

Bolesław GIEMZA, Marek DOMAŃSKI, Maciej DELIŚ, Dawid KAPICA

Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF 3D PRINTED COMPONENTS

Właściwości tribologiczne elementów drukowanych 3D

Abstract: Additive manufacturing technology is developing in many industries, including aviation, automotive and others. 3D printing offers new possibilities in the field of designing and manufacturing of machines and devices' components. The paper presents the results of tribological investigations of components produced in FDM printing technology. The authors presented the evaluation of sliding properties of the model friction couple – block on ring type – of available thermoplastic polymers and polymers' composites under dry friction conditions. The authors assessed the influence of material type and printed structure on resistance to motion of prepared samples.

Keywords: additive manufacturing, fused deposition modelling, tribology, friction coefficient

Streszczenie: Technologia wytwarzania przyrostowego jest rozwijana w wielu obszarach przemysłu, w tym w lotnictwie, motoryzacji i innych. Druk 3D oferuje nowe możliwości konstrukcyjne i wykonawcze urządzeń i elementów konstrukcyjnych. W artykule zaprezentowano wyniki badań właściwości tribologicznych elementów wytworzonych w technologii druku 3D FDM. Autorzy dokonali oceny właściwości ślizgowych modelowego węzła tarcia – typu rolka-kłosek – dostępnych polimerów termoplastycznych oraz kompozytów polimerowych w warunkach tarcia suchego. Określono wpływ rodzaju materiału oraz struktury wydruku na opory ruchu wytworzonych próbek.

Słowa kluczowe: wytwarzanie przyrostowe, osadzanie topionego materiału, tribologia, współczynnik tarcia

1. Introduction

Additive Manufacturing (AM) is currently one of the most developing and promising technologies for the construction of structural components, enabling the growth of practical use of a number of composite materials. 3D printing is expected to be one of the key developmental technologies that will shape the new approach to manufacturing and the products as well as factories of tomorrow [4].

The FDM (Fused Deposition Modeling) technology is based on moving a specially designed head on a plane and applying additional layers of a built model by applying a molten plastic thread by extruder tip.

The most popular materials for FDM technology are ABS plastic (acrylonitrile butadiene styrene) and polylactide - L-poly(lactic acid) (PLA). Also available are such materials as polycarbonate (PC), polyetherimide (PEI), polyamide (PA), PC-ABS (PC + ABS), polyethylene terephthalate (PET). Composite materials containing the addition of carbon fibre (CF), Kevlar, powdered metals, graphene and other carbon nanostructures, and ceramics are also increasingly offered. The most significant advantage of this technology is the low cost of 3D printing in relation to other printing technologies. It is related both to the low cost of the printer itself and the high availability of materials. It is also a technology that has recently been widely disseminated due to its availability at an affordable price for the general public.

In the literature, there are reports on tests, particularly the strength properties of the printed materials in the context of printing parameters and the process output and the content of the fillers (reinforcing) [1, 2, 9]. The insertion of reinforcement in the form of glass fibres [2] or carbon fibres [9] increases the strength of printed elements. These works also compared the strength and stiffness of printed and extruded (CM) samples. Paper [10] presents the effect of various types of fillers on the strength (stretching) and elongation of printed elements in two different orientations. It has been shown that the insertion of each of the used fillers to ABS plastic reduces the tensile strength, in some cases even twice. The orientation of the printing method (vertical vs. horizontal) also significantly affects durability, which confirms the results of the work [2]. Investigations of tribological properties of printed elements in FDM technology from ABS plastic are presented in [7, 8]. The tests were carried out on a pin-on-disc system, with dry friction against steel EN31 counter sample. In the tests [8], the orientation of the printed structure, layer thickness, width of the printed yarn and the degree of filling the structure at a constant rubbing speed of 1 m/s and a normal load of 25 N were conducted. It has been shown that the volumetric wear of the tested elements is significantly influenced by the orientation of the structure, the width of the printed fibre and the degree of filling. In the test [7] the effect of load, velocity and orientation of the

printed structure on the value of volume wear and coefficient of friction has been considered. The significant influence of load and orientation of the structure on wear and loads, the orientation of the structure and sliding velocity on the coefficient of friction was demonstrated. The results of the research on the influence of 3D printing parameters and graphite content in ABS on tribological properties are presented in [3], in tests on a pin-on-disc apparatus in friction on a gray cast iron disc. An increase in resistance to the motion was observed along with the increase of graphite content in ABS and the fact that the addition of graphite increases (non-linearly) the wear of ABS samples in relation to a pure thermoplastic matrix. Paper [6] presents the results of tribological comparative tests of printed elements made of ABS plastic and a specially prepared Nylon composite (polyamide) with 60% iron powder content (mass-about 8-9% by volume). The tests were also carried out on a pin-on-disc tester. As a counter-sample, SiC sandpaper with granulation 600 was used. It was estimated that the polyamide-iron composite is characterised by significantly lower wear compared to ABS. It has also been shown that PA generally has better anti-wear properties than ABS.

These article attempts to evaluate the resistance of motion in a model tribological node of materials dedicated to 3D printing (filaments). The research compiled the most popular materials, materials for engineering applications, and materials dedicated to friction nodes (tribofilaments).

2. Materials and Methods

Tribological tests were performed on Bocle test rig (PCS Instruments) modernized to 'block on ring' test rig, with measurement of resistance to motion (fig. 1).

The test conditions are described below:

- friction couple block on ring,
- friction conditions dry, air,
- number of tests 2 (repetition),
- sample dimensions 23.5x13x2.9 mm,
- load 1000 g,
- sliding velocity 0.5 m/s,
- test period 1800 s,
- counter sample ϕ 49,2 mm, SAE 8720 steel, 58...62 HRC,
- $R_q = 0,51 \dots 0,71 \mu\text{m}$
- ambient temperature $25 \pm 1^\circ\text{C}$,
- ambient humidity 30...40%,

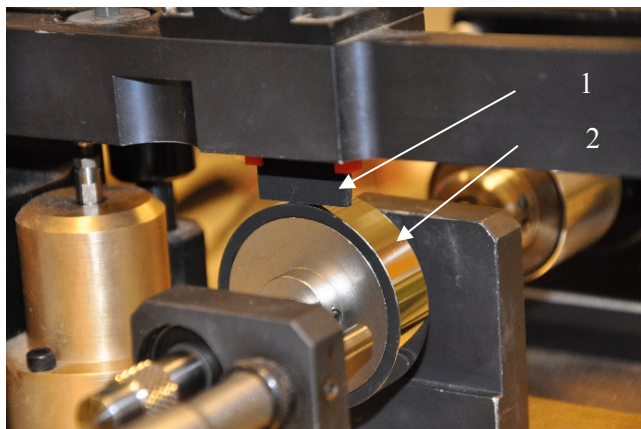


Fig. 1. Photo of test friction couple: 1 – sample, 2 – counter sample

Samples (blocks) were 3D printed (FDM) in both X and Y directions (fig. 2) from the following materials (filaments):

- D-1 – Iglidur I180-PF (Igus),
- D-2 – Iglidur I170-PF (Igus),
- D-3 – PLA (3Novatica) – only Y direction,
- D-4 – ABS (3DXTech),
- D-5 – ABS CFR (3DXTech),
- D-8 – PA (Tarnamid T-27, Grupa Azoty S.A.) – only X direction,
- D-9 – PA CFR (CARBONX™),
- D-10 – PA C-CFR (Carbon Fibre, Mark Forged),
- D-11 – PA (Alloy 910, Taluman3D),
- D-12 – Iglidur J260-PF (Igus).

The arrangement of single yarns of melted polymer were built (printed) parallel (in case of X printing direction) or perpendicular (in case of Y printing direction) to applied load during tests. All selected filaments are commercially available except D-8 – prototype PA filament. Test samples were printed on MakerBot Replicator 2x 3D printer excluding D-10, which was prepared using Markforged Mark Two printer.

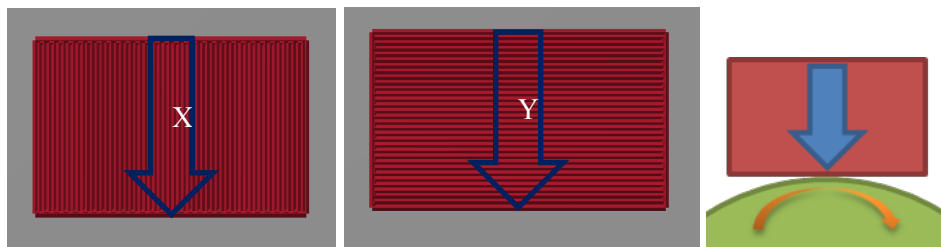
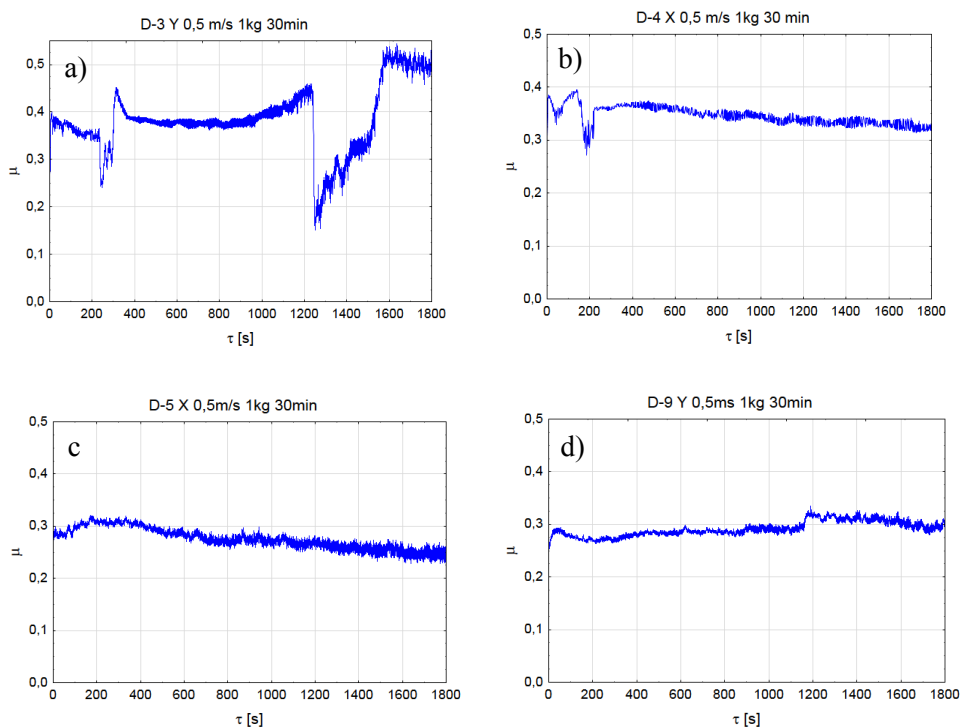


Fig. 2. The scheme of printing direction X and Y and loading direction of samples

3. Results and Discussion

During tribological tests, friction force (as resistant to motion) was measured. The examples of the coefficient of friction curves were presented in fig. 3 a-j.



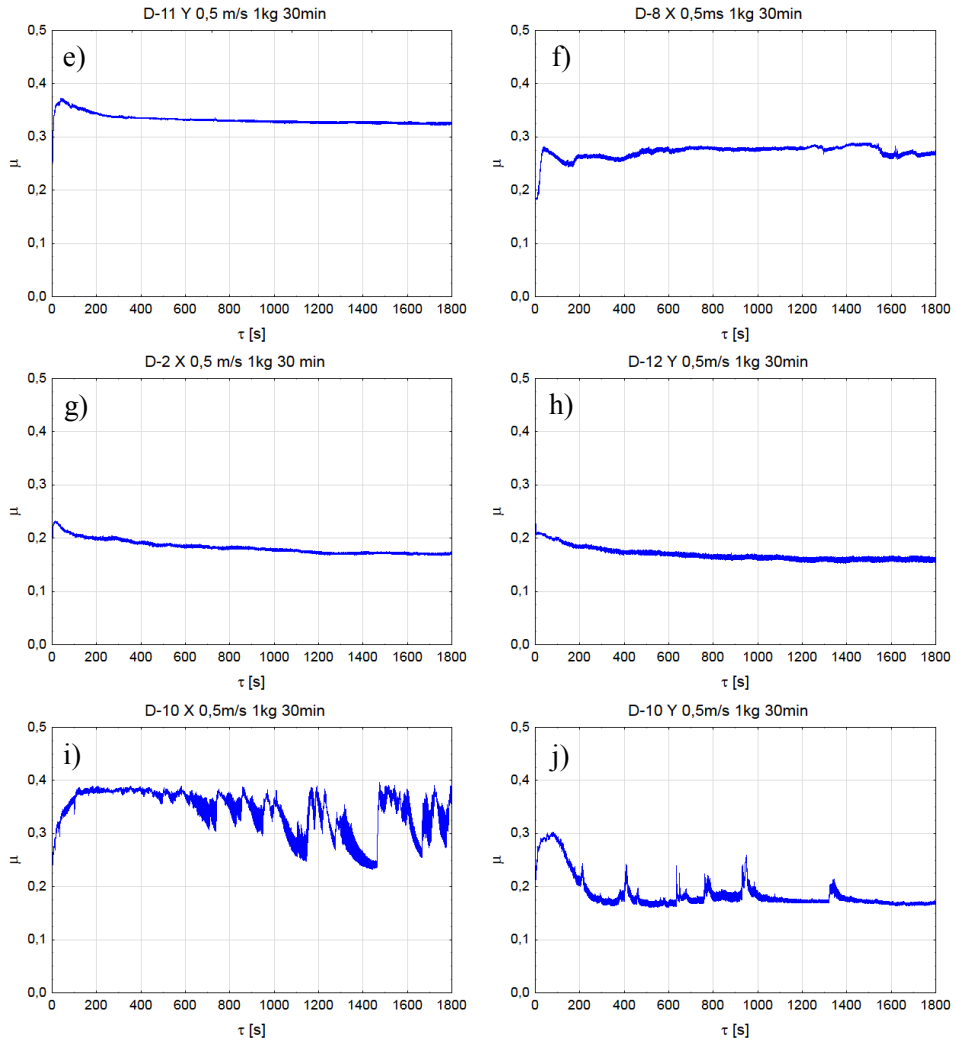


Fig. 3. The example results of the coefficient of friction μ curves for 3D printed samples; a) D-3 (PLA), b) D-4 (ABS), c) D-5 (ABS CFR), d) D-9 (PA CFR), e) D-11 (PA), f) D-8 (PA), g) D-2 (tribofilament), h) D-12 (tribofilament), i) D-10 (PA C-CFR X direction), j) D-10 (PA C-CFR Y direction)

Short description of results presented in fig. 3:

- a) and b) – most common materials for 3D printing – PLA (a) and ABS (b). Friction coefficient μ value is quite high – between 0.3-0.4 (0.5). For the PLA sample, the μ curve is unstable and rises to 0.5. For the ABS, resistance to motion slowly decreases during the test to just above 0.3.

- c) and d) – CFR thermoplastic polymer composites – ABS CFR (c) and PA CFR (d). Curves of μ are much stable than previously. ABS CFR samples have a bit lower μ value.
- e) and f) – PA filaments, μ values are more stable (particularly for D-11 Alloy 910). The use of prototype filament (D-8 Tarnamid T-27) results in lower resistance to motion.
- g) and h) – commercially available filaments for tribological applications (tribofilaments). Resistance to motion is much lower than most of the investigated samples – μ below 0.2. The μ values are very stable during tests.
- and j) – continuous carbon fibre reinforcement polyamide (PA C-CFR). There is a strong difference between the results of tests in X and Y directions. The loading of the samples in Y direction (perpendicular to carbon fibres) resulted in much lower and more stable μ value.

The influence of samples printing direction on coefficient of friction μ is presented in fig. 4. For all tested materials, the range and mean μ values of gained results are shown. The stable or mean μ values were included in the analysis.

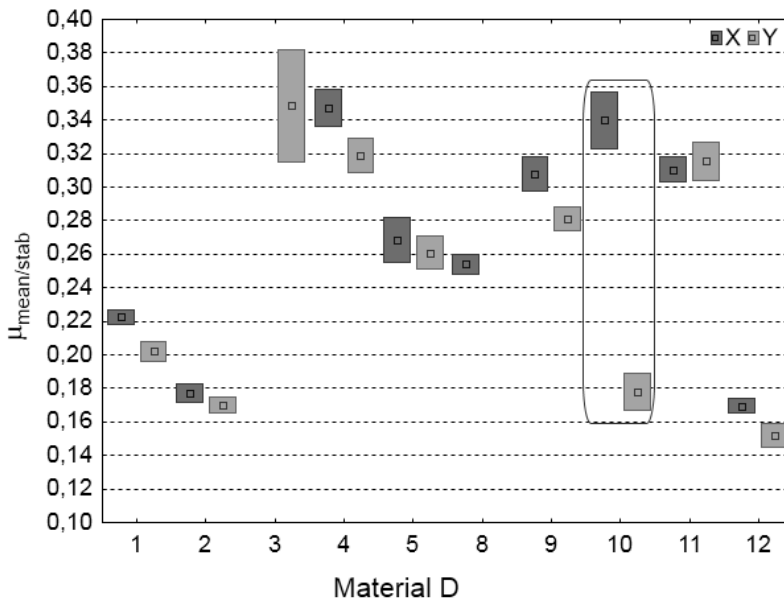


Fig. 4. The friction coefficient values of the investigated samples depending on the loading (printing) direction; (mean, max and min values)

The following observations of obtained μ results were made:

- the effect of printing direction was not observed for materials D-5 (ABS CFR) and D-11 (PA); ranges of μ values overlaps for X and Y printed samples,
- slight difference between samples printed in X or Y directions was observed for IGUS tribofilaments D-1 ($\Delta\mu \approx 0.02$), D-2 ($\Delta\mu \approx 0.01$), D-12 ($\Delta\mu \approx 0.02$) and for samples D-4 (ABS $\Delta\mu \approx 0.03$) and D-9 (PA CFR $\Delta\mu \approx 0.03$),
- the significant influence of printing direction was found for D-10 samples (PA C-CFR) – $\Delta\mu \approx 0.16$.

4. Summary

In most cases, resistance to the motion for samples printed in Y direction was lower than printed in the X direction. It could be the effect of the technology of printing. The Y direction means that single yarns of the polymer are parallel to sliding direction. The mechanical properties in the Y direction are lower than in X direction (because of bonding between melted yarns during printing). The laminar flow of melted polymer (during FDM 3d printing) could also affect the internal structure of polymer yarn. It is easily visible for cut fibre reinforced polymers, but perhaps it influences on the layering of long polymer chains. For better understanding, particularly small differences between μ values obtained for samples printed in different directions, more tests should be done. However, such a small influence should not have any practical significance, except D-10 material. In the case of D-10 material – perpendicular direction of continuous carbon fibre to the load (Y) direction (parallel to sliding direction) – effects in μ values about 0.17...0.19. The metal surface of ring ‘slides’ on carbon fibre. The arrangement of fibre in the X direction – parallel to load direction (perpendicular to sliding direction) – effects in unstable work and high μ values (0.32...0.36). The metal surface of the counter sample ‘rubs’ on carbon fibre ‘brush’.

Completed investigations show the practical possibility of using available 3D printing materials for manufacturing the usable friction components. The orientation of the printed structure in relation to the applied load (X or Y direction) for most engineering materials does not significantly affect the coefficient of friction - 0.01-0.03 differences were obtained. The significant influence was achieved for the material reinforced with continuous filament (D-10). The approximately two-fold decrease in resistance to the motion was obtained when the sample was loaded in the Y direction with respect to the X direction. For the

practical aspect of using the materials considered, it is necessary to assess the wear of the tested elements and the heat dissipation from the friction zone.

5. References

1. Campbell T. A., Ivanova O. S.: 3D printing of multifunctional nanocomposites, *Nano Today* 8, 2013.
2. Carneiro O.S., Silva A.F., Gomes R.: Fused deposition modeling with polypropylene, *Materials & Design* 83, 2015.
3. Dawoud M., Taha I., Ebeid S.J.: Effect of processing parameters and graphite content on the tribological behaviour of 3D printed acrylonitrile butadiene styrene, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2015, 46, No. 12 DOI 10.1002/mawe.201500450.
4. Fornea D., Van Laere H.: Opinia Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego w sprawie "Życie w przyszłości. Druk 3D jako narzędzie wzmocnienia gospodarki europejskiej", *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* 2015/C 332/05, 08.10.2015.
5. Ganesan A., Affi J., Yamada M., Fukumoto M.: Bonding behavior studies of cold sprayed copper coating on the PVC polymer substrate, *Surface and Coatings Technology*, 207, 2012.
6. Garg H.K., Singh R.: Comparison of wear behavior of ABS and Nylon6-Fe powder composite parts prepared with fused deposition modelling, *J. Cent. South Univ.* (2015) 22: 3705-3711, DOI: 10.1007/s11771-015-2913-z.
7. Gurrala P.K., Regalla S.P.: Friction and wear behavior of ABS polymer parts made by fused deposition modeling (FDM, International Conference on Advances in Tribology ICAT'14, National Institute of Technology, Calicut, Kerala, India, February 21-24, 2014.
8. Sood A.K., Equbal A., Toppo V., Ohdar R.K., Mahapatra S.S.: An investigation on sliding wear of FDM built parts, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 5, 2012.
9. Tekinalp H.L., Kunc V., Velez-Garcia G.M., Duty C.E., Love L.J., Naskar A.K., Blue C.A., Ozcan S.: Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing, *Composites Science and Technology* 105, 2014.
10. Torrado A.R., Shemelya C.M., English J.D., Lin Y., Wickera R.B., Roberson D.A.: Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing, *Additive Manufacturing* 6, 2015.
11. Tsouknidas A.: Friction Induced Wear of Rapid Prototyping Generated Materials: A Review, *Advances in Tribology*, Volume 2011, Article ID 746270, DOI:10.1155/2011/746270.

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE ELEMENTÓW DRUKOWANYCH 3D

1. Wstęp

Technologie przyrostowe (AM – ang. *additive manufacturing*) są obecnie jedną z najbardziej rozwojowych i obiecujących technologii wytwarzania elementów konstrukcyjnych umożliwiających praktyczne wykorzystanie licznych materiałów kompozytowych. Oczekuje się, że druk 3D będzie jedną z kluczowych technologii rozwojowych, które ukształtują nowe podejście do produkcji oraz do produktów i fabryk jutra [4]. Technologia FDM (ang. *fused deposition modeling*) opiera się na przemieszczaniu specjalnie zaprojektowanej głowicy w płaszczyźnie i nakładaniu kolejnych warstw modelu, poprzez nakładanie stopionego włókna termoplastu za pomocą końcówki ekstrudera. Najpopularniejszymi materiałami dla technologii FDM są tworzywo ABS (ang. akrylonitryl butadien styren) oraz polilaktyd – kwas L-polimlekowy (PLA). Dostępne są również takie materiały jak: poliwęglan (PC), polieteroimid (PEI), poliamid (PA), PC-ABS (PC+ABS), politereftalan etylenu (PET). Coraz częściej oferowane są także materiały kompozytowe zawierające domieszki włókna węglowego (CF), szklanego, Kevlaru, sproszkowanych metali, grafenu i innych nanostruktur węglowych, ceramiki. Największą zaletą tej technologii jest niski koszt wydruku w stosunku do innych technologii. Jest związane to zarówno z niskim kosztem samej drukarki jak i dużą dostępnością materiałów.

W literaturze pojawiają się wyniki badań, szczególnie właściwości wytrzymałościowych materiałów drukowanych w kontekście parametrów i sposobu wydruku oraz zawartości napelnaczy (zbrojenia) [1, 2, 9]. Wprowadzenie zbrojenia w postaci włókien szklanych [2] lub włókien węglowych [9] powoduje zwiększenie wytrzymałości elementów. W pracach tych porównywano również wytrzymałość i sztywność próbek drukowanych z wytłaczanymi (CM). W pracy [10] przedstawiono wpływ różnych napelnaczy na wytrzymałość (rozciąganie) i wydłużenie elementów drukowanych w dwóch różnych orientacjach. Wykazano, że wprowadzenie każdego z napelnaczy do tworzywa ABS powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie, w niektórych przypadkach nawet dwukrotnie. Zorientowanie sposobu drukowania (wertikalne vs horyzontalne) również istotnie wpływa na wytrzymałość, co potwierdza wyniki [2]. Badania właściwości tribologicznych elementów drukowanych w technologii FDM

z tworzywa ABS przedstawiono w [7, 8]. Badania prowadzono w układzie pin-on-disc, przy tarcu suchym ze stalą EN31. W testach [8] brano pod uwagę ukierunkowanie struktury wydruku, grubość warstwy, szerokość drukowanego włókna oraz stopień wypełnienia struktury przy stałej prędkości poślizgu 1 m/s oraz obciążeniu normalnym 25N. Wykazano, że na wartość zużycia objętościowego badanych elementów istotnie wpływają zorientowanie struktury, szerokość drukowanego włókna oraz stopień wypełnienia. W badaniach [7] wzięto pod uwagę wpływ obciążenia, prędkości poślizgu oraz zorientowania struktury wydruku na wartość zużycia objętościowego i współczynnika tarcia. Wykazano istotny wpływ obciążenia i orientacji struktury na zużycie oraz obciążenia, orientacji struktury i prędkości poślizgu na współczynnik tarcia. Wyniki badań wpływu parametrów druku 3D oraz zawartości grafitu w ABS na właściwości tribologiczne przedstawiono w [3], w testach na aparacie pin-on-disc własnej konstrukcji przy współpracy z tarczą z żeliwa szarego. Zaobserwowano wzrost oporów ruchu wraz ze wzrostem zawartości grafitu w ABS oraz fakt, że dodatek grafitu powoduje zwiększenie (nieliniowo) zużycia próbek ABS w stosunku do czystej osnowy termoplastycznej. W pracy [6] przedstawiono wyniki tribologicznych badań porównawczych elementów drukowanych z tworzywa ABS oraz specjalnie przygotowanego kompozytu Nylon (poliamid) z 60% zawartością (masowo – ok. 8-9% objętościowo) proszku żelaza. Badania przeprowadzono również na testerze typu pin-on-disc. Jako przeciwpróbkę zastosowano papier ścierny SiC o granulacji 600. Oceniono, że w badanym zakresie kompozyt poliamidowo-żelazny charakteryzuje się znacznie mniejszym zużyciem w porównaniu do tworzywa ABS, czego przyczyną jest obecność odpornego na zużycie ściernie żelaza (w porównaniu z osnową tworzywa sztucznego). Istotne jest również to, że porównywano różne tworzywa sztuczne, z czego Nylon posiada ogólnie lepsze właściwości przeciwzużyciowe niż ABS.

W artykule podjęto próbę oceny oporów ruchu w modelowym węźle tribologicznym materiałów dedykowanych do druku 3D (filamentów). Badania dotyczyły materiałów najbardziej popularnych, materiałów inżynierskich oraz dedykowanych na zastosowania tribologiczne (tribofilamenty).

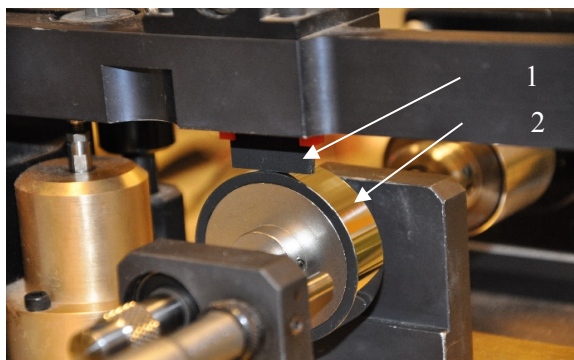
2. Metodyka badań

Testy tribologiczne zostały wykonane na testerze 'Bocle' (PCS Instruments) zmodernizowanym do węzła typu 'rolka-klocek', z pomiarem oporów ruchu (rys. 1).

Warunki badań podano poniżej:

- | | |
|-------------------|-------------------|
| – węzeł tarcia | rolka-klocek, |
| – warunki tarcia | techniczne suche, |
| – ilość powtórzeń | 2, |

- wymiary próbek 23,5x13x2,9 mm,
- obciążenie 1000 g,
- prędkość poślizgu 0,5 m/s,
- czas badania 1800 s,
- przeciwpróbka ϕ 49,2 mm, SAE8720 steel, 58...62HRC,
 $R_q = 0,51 \dots 0,71 \mu\text{m}$
- temperatura otoczenia $25 \pm 1^\circ\text{C}$,
- wilgotność otoczenia 30...40%,

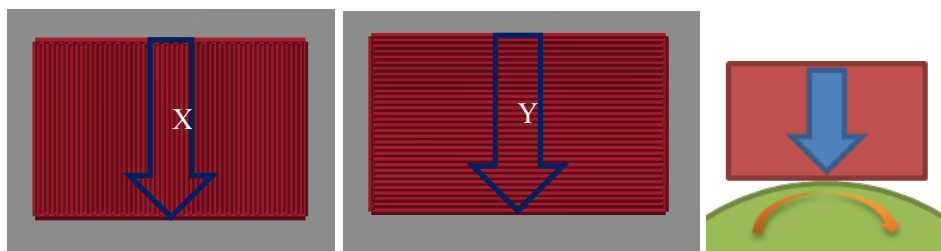


Rys. 1. Badany węzeł tarcia: 1 – próbka, 2 – przeciwpróbka

Próbki (klocki) zostały wudrukowane (FDM) w kierunkach X I Y (rys. 2) z następujących materiałów (filamentów):

- D-1 – Iglidur I180-PF (Igus),
- D-2 – Iglidur I170-PF (Igus),
- D-3 – PLA (3Novatica) – tylko kierunek Y,
- D-4 – ABS (3DXTech),
- D-5 – ABS CFR (3DXTech),
- D-8 – PA (Tarnamid T-27, Grupa Azoty S.A.) – tylko kierunek X,
- D-9 – PA CFR (CARBONX™),
- D-10 – PA C-CFR (Carbon Fibre, Mark Forged),
- D-11 – PA (Alloy 910, Taluman3D),
- D-12 – Iglidur J260-PF (Igus).

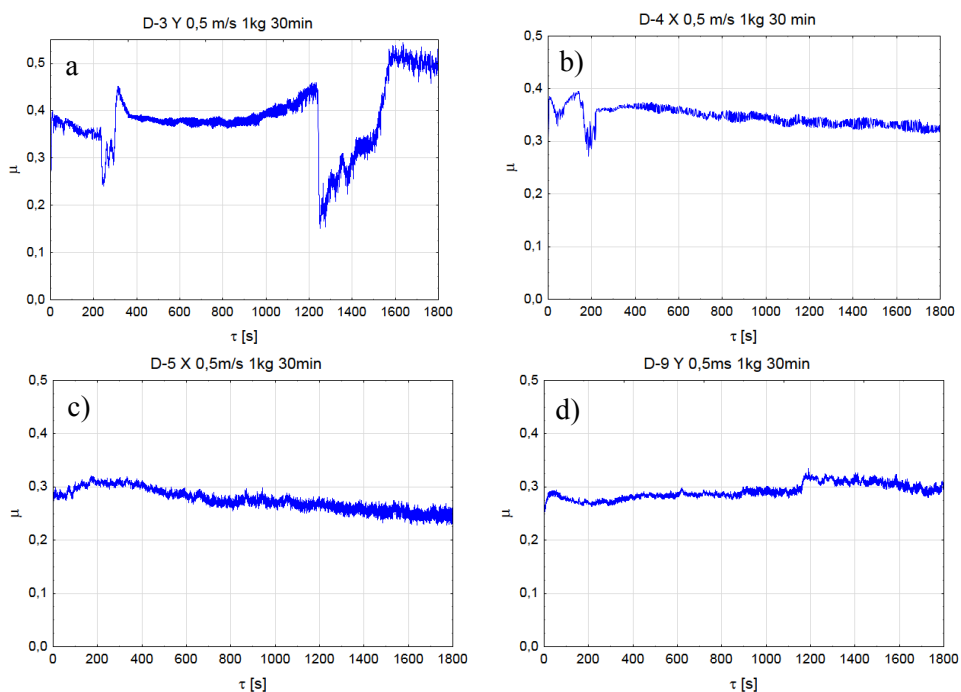
Pojedyncze włókna stopionego polimeru zostały ułożone (wydrukowane) równolegle (w przypadku kierunku drukowania X) lub prostopadłe (w przypadku kierunku drukowania Y) do przyłożonego obciążenia podczas testów. Wszystkie wybrane filamenty są dostępne w handlu, z wyjątkiem D-8 - prototypowego włókna PA. Próbki testowe zostały wydrukowane na drukarce 3D MakerBot Replicator 2x z wyłączeniem próbki D-10, która została przygotowana przy użyciu drukarki Markforged Mark Two.

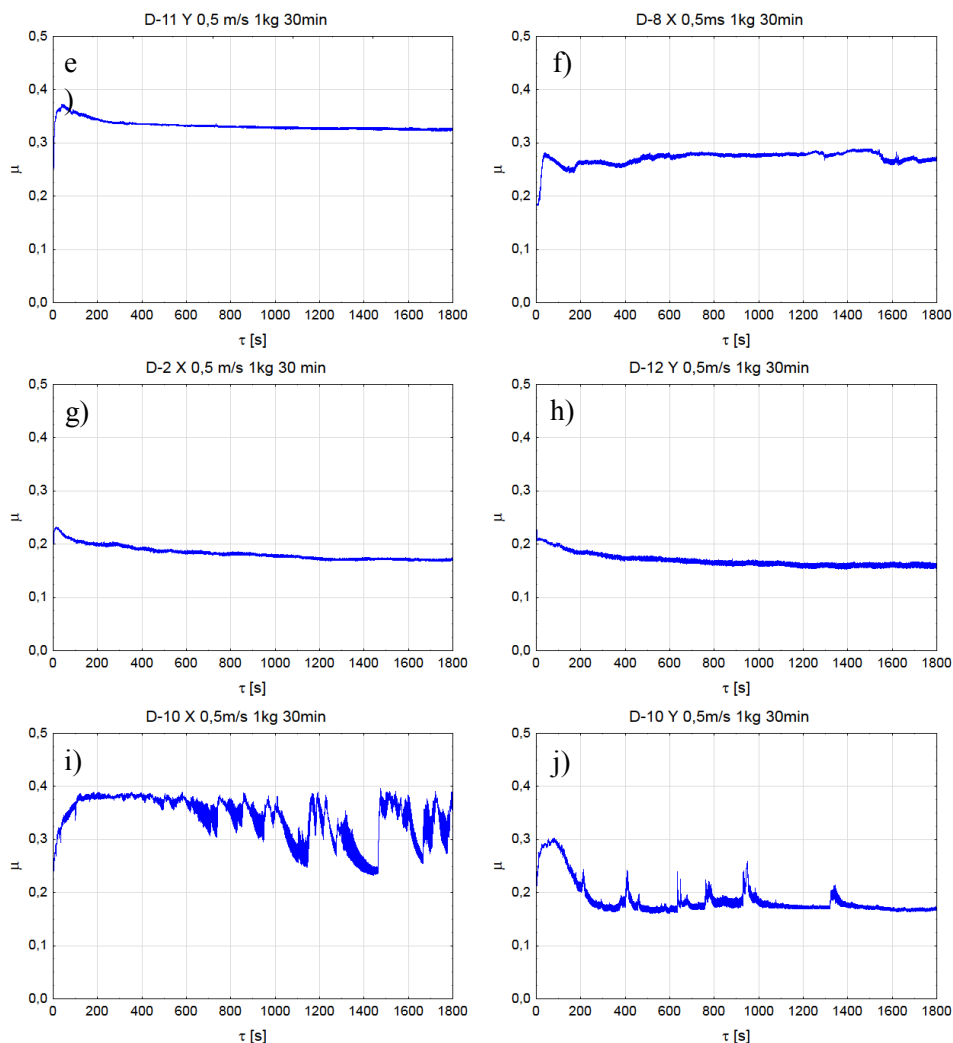


Rys. 2. Schemat kierunków X i Y wydruku i obciążenia badanych próbek

3. Wyniki badań

W trakcie testów mierzono siłę tarcia (jako opory ruchu). Przykładowe przebiegi wartości współczynnika tarcia przedstawiono na rys. 3 a-j.





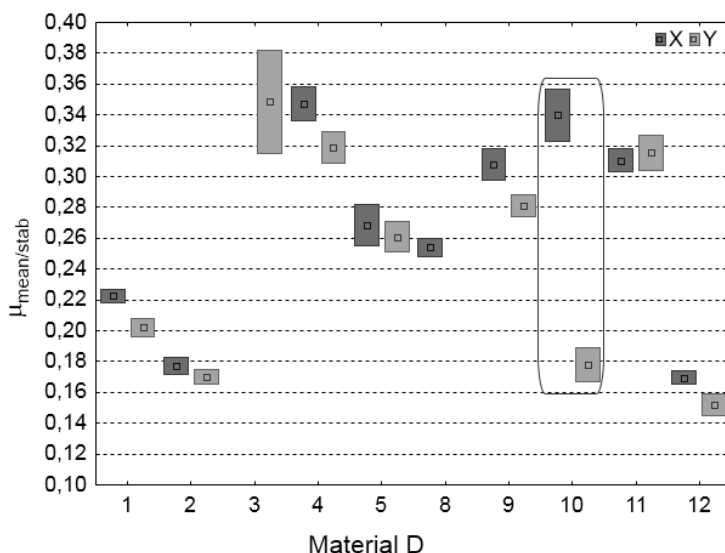
Rys. 3. Przykładowe przebiegi współczynnika tarcia μ dla badanych próbek: a) D-3 (PLA), b) D-4 (ABS), c) D-5 (ABS CFR), d) D-9 (PA CFR), e) D-11 (PA), f) D-8 (PA), g) D-2 (tribofilament), h) D-12 (tribofilament), i) D-10 (PA C-CFR kierunek X), j) D-10 (PA C-CFR kierunek Y)

Krótki opis wyników badań (rys. 3):

- a) i b) – najczęstsze materiały do druku 3D – PLA (a) and ABS (b). Wartość współczynnika tarcia μ jest dość wysoka – pomiędzy 0,3-0,4 (0,5). Dla próbki PLA przebieg μ jest niestabilny i rośnie do wartości 0,5. Dla próbki ABS opory ruchu stopniowo maleją do wartości μ ok. 0,3.

- c) i d) – CFR kompozyty termoplastyczne – ABS CFR (c) i PA CFR (d). Przebiegi μ są znacznie bardziej stabilne niż poprzednie. Próbkę ABS CFR charakteryzuje nieco mniejsza wartość μ .
- e) i f) – filamenty PA, przebiegi μ są znacznie bardziej stabilne (szczególnie dla D-11 Alloy 910). Zastosowanie prototypowego materiału (D-8 Tarnamid T-27) skutkowało niższymi oporami ruchu.
- g) i h) – dostępne na rynku filamenty do zastosowań tribologicznych (tribofilamenty). Opory ruchu są znacznie niższe w porównaniu z większością badanych próbek – μ poniżej 0,2. Przebiegi μ są bardzo stabilne w trakcie testów.
- i) i j) – poliamid wzmacniany ciągłym włóknem węglowym (PA C-CFR). Wykazano istotną różnicę pomiędzy wynikami testów w kierunku X i Y. Obciążenie próbek w kierunku Y (prostopadle do włókien węglowych) skutkowało znacznie mniejszą i bardziej stabilną wartością μ .

Wpływ kierunku drukowania na wartość współczynnika tarcia μ zaprezentowano na rys. 4. Dla wszystkich badanych materiałów przedstawiono rozstęp i wartość średnią μ z uzyskanych wyników. W analizie pod uwagę brano wartości stabilne lub średnie z przebiegów.



Rys. 4. Wartości współczynnika tarcia badanych próbek w zależności od kierunku drukowania (obciążenia);(wartości średnie, max i min)

Na podstawie uzyskanych wyników poczyniono następujące spostrzeżenia:

- nie zaobserwowano wpływu kierunku drukowania dla materiałów D-5 (ABS CFR) oraz D-11 (PA); rozstępy wartości μ dla próbek drukowanych w kierunkach X i Y pokrywają się,
- stwierdzono niewielkie różnice pomiędzy próbkami drukowanymi w kierunkach X i Y dla tribofialmentów IGUS D-1 ($\Delta\mu \approx 0,02$), D-2 ($\Delta\mu \approx 0,01$), D-12 ($\Delta\mu \approx 0,02$) oraz próbek D-4 (ABS $\Delta\mu \approx 0,03$) i D-9 (PA CFR $\Delta\mu \approx 0,03$),
- Istotną wpływ kierunku drukowania stwierdzono dla próbek z materiału D-10 (PA C-CFR) – $\Delta\mu \approx 0,16$.

4. Podsumowanie

W większości przypadków opory ruchu dla próbek drukowanych w kierunku Y były mniejsze niż w kierunku X. Może to być skutkiem samej technologii drukowania. Kierunek Y oznacza, że pojedyncze włókna polimeru są równoległe do kierunku poślizgu. Właściwości mechaniczne w kierunku Y są mniejsze niż w kierunku X (ze względu na wiązanie między stopionymi włóknami podczas drukowania). Przepływ laminarny stopionego polimeru (podczas druku 3D FDM) może również wpływać na wewnętrzną strukturę polimerowego włókna. Jest łatwy do zauważenia dla polimerów wzmacnianych włóknami ciętymi, ale może również wpływać na strukturę warstw długich łańcuchów polimerowych. Dla lepszego zrozumienia, szczególnie małych różnic między wartościami μ uzyskanymi dla próbek drukowanych w różnych kierunkach, należy wykonać większą liczbę testów. Jednak tak mały wpływ nie powinien mieć żadnego praktycznego znaczenia, z wyjątkiem materiału D-10. W tym przypadku prostopadły do kierunku obciążenia kierunek ciągłego włókna węglowego (Y) (równoległe do kierunku przesuwania) skutkuje wartością μ około 0,17 ... 0,19. Metalowa powierzchnia rolki „ślizga się” po włóknie węglowym. Ułożenie włókien w kierunku X – równoległe do kierunku obciążenia (prostopadle do kierunku poślizgu) daje efekt niestabilnej pracy i wysokiej wartości μ (0,32 ... 0,36). Metalowa powierzchnia rolki „ściera się” na „szczotce” z włókna węglowego.

Zrealizowane badania wskazują, na praktyczną możliwość wykorzystania dostępnych materiałów do druku 3D do wytwarzania użytkowych elementów węzłów tarcia. Ukierunkowanie struktury wydruku w stosunku do zadanego obciążenia (kierunek X lub Y) dla większości materiałów inżynierskich nie wpływa znacząco na wartość współczynnika tarcia – uzyskano różnice 0,01-0,03. Istotny wpływ uzyskano dla materiału zbrojonego włóknem ciągłym (D-10), dla którego otrzymano ok. dwukrotne zmniejszenie oporów przy obciążeniu próbki w kierunku

Y w stosunku do kierunku X. Dla praktycznego aspektu stosowania rozważanych materiałów należałoby ocenić zużycie badanych elementów i odprowadzanie ciepła ze strefy tarcia.

5. Literatura

1. Campbell T. A., Ivanova O. S.: 3D printing of multifunctional nanocomposites, *Nano Today* 8, 2013.
2. Carneiro O.S., Silva A.F., Gomes R.: Fused deposition modeling with polypropylene, *Materials & Design* 83, 2015.
3. Dawoud M., Taha I., Ebeid S.J.: Effect of processing parameters and graphite content on the tribological behaviour of 3D printed acrylonitrile butadiene styrene, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2015, 46, No. 12 DOI 10.1002/mawe.201500450.
4. Fornea D., Van Laere H.: Opinia Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego w sprawie "Życie w przyszłości. Druk 3D jako narzędzie wzmocnienia gospodarki europejskiej", *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* 2015/C 332/05, 08.10.2015.
5. Ganesan A., Affi J., Yamada M., Fukumoto M.: Bonding behavior studies of cold sprayed copper coating on the PVC polymer substrate, *Surface and Coatings Technology*, 207, 2012.
6. Garg H.K., Singh R.: Comparison of wear behavior of ABS and Nylon6-Fe powder composite parts prepared with fused deposition modelling, *J. Cent. South Univ.* (2015) 22: 3705-3711, DOI: 10.1007/s11771-015-2913-z.
7. Gurrall P.K., Regalla S.P.: Friction and wear behavior of ABS polymer parts made by fused deposition modeling (FDM, International Conference on Advances in Tribology ICAT'14, National Institute of Technology, Calicut, Kerala, India, February 21-24, 2014.
8. Sood A.K., Equbal A., Toppo V., Ohdar R.K., Mahapatra S.S.: An investigation on sliding wear of FDM built parts, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 5, 2012.
9. Tekinalp H.L., Kunc V., Velez-Garcia G.M., Duty C.E., Love L.J., Naskar A.K., Blue C.A., Ozcan S.: Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing, *Composites Science and Technology* 105, 2014.
10. Torrado A.R., Shemelya C.M., English J.D., Lin Y., Wickera R.B., Roberson D.A.: Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing, *Additive Manufacturing* 6, 2015.
11. Tsouknidas A.: Friction Induced Wear of Rapid Prototyping Generated Materials: A Review, *Advances in Tribology*, Volume 2011, Article ID 746270, DOI:10.1155/2011/746270.