

## STRESZCZENIE

Technologie przyrostowe, a wśród nich metody FFF/FDM należą obecnie do jednych z najprężniej rozwijających się dziedzin wytwarzania. Ostatnie 20 lat skutkowało nie tylko gigantycznym wzrostem popularności tych metod, ale także dynamicznym rozwojem stosowanych materiałów, maszyn je przetwarzających oraz zmniejszeniem się gabarytów tych maszyn, co tylko bardziej zwiększyło ich dostępność. W niniejszej pracy autor skupił się na połączeniu dwóch aspektów: możliwości zastosowania materiałów biodegradowalnych przetworzonych w metodach FFF/FDM w węzłach ślizgowych oraz wpływowi dodatków tribologicznych na właściwości tribologiczne drukowanych próbek.

Do badań wytworzono oraz zakwalifikowano następujące kompozycje:

- metoda wtrysku: niemodyfikowane PLA,
- metoda FFF/FDM:
  - niemodyfikowane PLA,
  - PLA + 1% MoS<sub>2</sub>,
  - PLA + 2,5% MoS<sub>2</sub>,
  - PLA + 1% MoS<sub>2</sub> + 1% grafit,
  - PLA + 1% grafit,
  - PLA + 2,5% grafit,
  - PLA + 5% grafit,
  - PLA + 7,5% grafit,
  - PLA + 10% grafit.

Próbki poddano następującym pomiarom:

- Tribologicznym na stanowisku *pin-on-disc*.
- Wpływu parametru chropowatości Ra przeciwpróbki na stanowisku *pin-on-disc* na właściwości tribologiczne. Do tej serii badań zakwalifikowano po jednym materiale wykazujących najlepsze wyniki z każdej z grup.
- Mikroskopowym powierzchni trących przed i po teście na stanowisku *pin-on-disc* z wykorzystaniem mikroskopu SEM.
- Wytrzymałości na rozciąganie oraz zginanie.
- Mikrotwardości.

Pomiary zużycia liniowego oraz współczynnika tarcia kinetycznego wykazały, iż sam proces druku 3D znacząco zmniejszał intensywność zużywania próbek względem próbek wykonanych metodą wtrysku, nie wpływając jednocześnie na współczynnik tarcia. Wpływ na taki stan rzeczy mogła mieć warstwowość próbek wykonanych metodą druku 3D, a co za tym idzie inny udział fazy krystalicznej oraz amorficznej, względem próbek wykonywanych metodą wtrysku. Ponadto, wykazano iż wysokie (7,5–10%) zawartości grafitu znacząco wpływają na obniżenie zużycia liniowego przy jednoczesnym małym wpływie na współczynnik tarcia. Tłumaczyć to można mikrowarstwą grafitu, kumulującą się na powierzchni próbki w trakcie trwania badania – co wykazały badania mikrotwardości. Zawartość grafitu 1% natomiast, umożliwiła obniżenie oporów ruchu o ponad 10%. W przypadku dodatku MoS<sub>2</sub>, głównym efektem było powstawanie zjawiska *stick-slip* oraz gwałtownego wzrostu zużycia liniowego, nasilających się wraz ze wzrostem zawartości tego dodatku w kompozycie. Badania wpływu parametru chropowatości Ra wykazały, iż przeciwpróbka o najmniejszej wartości tego parametru powodowała największe opory ruchu przy jednocześnie największym zużyciu liniowym, niezależnie od badanego kompozytu.

W przypadku badań wytrzymałości na rozciąganie jedynie próbki o najwyższej zawartości grafitu wykazały zmniejszenie jej wartości. Natomiast w przypadku wydłużenia, zarówno próbka o najwyższej zawartości MoS<sub>2</sub> jak i próbka o najwyższej zawartości grafitu, wykazały znaczące obniżenie tej wartości przy naprężeniu zrywającym. Z kolei wytrzymałość na zginanie, znacząco i obniżyła się dla wszystkich próbek z zawartością tylko dodatku grafitu oraz dla próbek z 2,5% MoS<sub>2</sub>, co więcej, wytrzymałość ta zmniejszała się wraz ze wzrostem ilości grafitu.

**Słowa kluczowe:** PLA, polilaktyd, tribologia, zużywanie, zużycie, kompozyty, druk 3D, FDM, FFF, fused deposition modelling, fused filament fabrication, wytwarzanie przyrostowe, grafit, MoS<sub>2</sub>, dodatki, tarcie, współczynnik tarcia.

## SUMMARY

Additive technologies, with FFF/FDM among them, are currently among the most rapidly developing ways of manufacturing. Over the last 20 years, it resulted in growing popularity, dynamic development in materials, and reduction of 3D printers' dimensions, which caused further expansion of availability. In this thesis, the author focused on connecting two aspects: the possibility of application of biodegradable composites processed with FFF/FDM methods in sliding mountings and the influence of the tribological additions on the tribological properties of the researched materials.

For the research described in this thesis, the following materials have been produced and selected:

- Injection molding: unmodified PLA,
- FFF/FDM:
  - unmodified PLA,
  - PLA + 1% MoS<sub>2</sub>,
  - PLA + 2,5% MoS<sub>2</sub>,
  - PLA + 1% MoS<sub>2</sub> + 1% graphite,
  - PLA + 1% graphite,
  - PLA + 2,5% graphite,
  - PLA + 5% graphite,
  - PLA + 7,5% graphite,
  - PLA + 10% graphite.

The following research tests were applied:

- Tribological measurements on a pin-on-disc tribometer.
- Research on the influence of the disc's roughness on the pin-on-disc tribometer. In this research series, two compositions were qualified – the ones presenting the most promising results in the previous tests.
- SEM observations before and after tribometer tests.
- Tensile and bending strength tests.
- Microhardness tests.

The measurement of the linear wear and the kinetic friction coefficient proved the 3D printing process, significantly affecting the decrease of the linear wear without influencing the

friction coefficient in relation to the injection molding samples. The root cause of these results can be found in the layered construction of the samples created with 3D printing technology. Layer-by-layer construction could significantly affect the amount of crystalline and amorphous phases, compared to the injection molding samples. Moreover, it has been shown that high graphite contents (7,5-10%) significantly reduce linear wear with a low impact on the friction coefficient. It can be explained with graphite microlayer, accumulated on the sample's surface during the tribometer tests – which was later shown in the microhardness tests. 1% of graphite addition allowed to lower the coefficient of friction by over 10%. In the case of the MoS<sub>2</sub> addition, the main effect was the occurrence of the stick-slip behavior connected with a drastic increase in linear wear. Both of these effects intensified with the growth of that addition. The research on the influence of the disc roughness showed that the counter-sample with the lowest degree of roughness caused the highest frictional resistance with the lowest linear wear rate, regardless of the tested composite.

In the case of tensile strength tests, only the samples with the highest graphite content showed a decrease in the tensile strength value. However, in the case of elongation, both the sample with the highest MoS<sub>2</sub> content and the sample with the highest graphite content showed a significant reduction in this value at the breaking stress. The bending strength decreased significantly for all the samples containing only the addition of graphite and the samples with 2.5% MoS<sub>2</sub>. Moreover, the strength decreased with the increase in the amount of graphite.

**Keywords:** PLA, polylactic acid, polylactide, tribology, wear, composites, 3D printing, FDM, FFF, fused deposition modelling, fused filament fabrication, graphite, MoS<sub>2</sub>, additives, friction, additive manufacturing, friction coefficient.