

Druk 3D z zastosowaniem materiałów elastycznych – przemysłowy skok technologiczny

WOJCIECH ŻYŁKA, BOGUMIŁ HOŁOTA, KRZYSZTOF MADEJ, PRZEMYSŁAW KOZIOŁ *

Drukowanie 3D z zastosowaniem materiałów elastycznych, zwanych również elastomerami, jest niezwykle ważną gałęzią całej technologii *FDM (Fused Deposition Modelling)*. Drukowanie 3D z materiałów elastycznych zwanych również elastomerami jest niezwykle ważną gałęzią całej technologii *FDM*. W artykule przedstawiono badanie wytrzymałości zmęczeniowej elastycznych osłon wykonanych techniką druku 3D w technologii *FDM* z filamentu elastycznego. Przedmiotem badań były wydruki 3D z elastycznych filamentów osłony tłoczyska siłownika pneumatycznego w laboratoryjnej prasie pneumatycznej. Osłonę zaprojektowano w kilku wariantach geometrycznych z elastycznego materiału *Fiberlogy Fiberflex 30D*.

WSTĘP

W ciągu ostatnich kilku lat druk 3D stał się rewolucyjną technologią, zmieniającą oblicze przemysłu. Jednym z najbardziej fascynujących kierunków rozwoju tej technologii jest druk 3D z materiałów elastycznych. Ta innowacyjna metoda produkcji oferuje szereg zastosowań, które rewolucjonizują różne gałęzie przemysłu. Drukowanie 3D z materiałów elastycznych zwanych również elastomerami jest niezwykle ważną gałęzią całej technologii druku 3D. Wydruki te charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością mechaniczną i zmęczeniową. Ponadto wydruki z gumy są odporne chemicznie, termicznie oraz na ścieranie. Ich liczne zalety otwierają tym samym drogę do wielu zastosowań, zarówno kreatywnych jak i praktycznych. Wydruki 3D z materiałów „FLEX” to najczęściej uszczelki, zatyczki, osłony oraz elementy tłumiące, takie jak wibroizolatory stosowane w celu oddzielenia od podłoża drgań wytwarzanych przez maszynę [4]. Obecnie coraz częściej stosowane są materiały elastyczne np. *TPU* – poliuretan termoplastyczny

(*thermoplastic polyurethane*). Ten rodzaj materiału charakteryzuje się bardzo dobrą wytrzymałością mechaniczną i zróżnicowaną elastycznością. Ponadto, prawie nie emituje w trakcie procesu druku 3D szkodliwych substancji.

Elastyczność i precyzja w jednym. Materiały elastyczne, takie jak *TPU (Termoplastyczny Poliuretan)* czy *TPE (Termoplastyczny Elastomer)*, umożliwiają drukowanie elementów o niebywałej elastyczności. W przemyśle, gdzie różnorodność kształtów i funkcji jest kluczowa, ta elastyczność staje się bezcenna. Chwyty do przemysłowych robotów, elementy amortyzujące lub uszczelki zyskują nowe możliwości dzięki zdolności druku 3D do precyzyjnego modelowania elastycznych struktur. Inżynierowie mogą szybko iterować i testować różne wersje produktów, co przyspiesza cykl projektowy [3].

Optymalizacja produkcji. Druk 3D z materiałów elastycznych przyspiesza procesy produkcyjne i redukuje koszty. Możliwość szybkiego prototypowania oraz wytwarzania małoseryjnych, nie-

standardowych elementów sprawia, że firmy mogą dostosowywać swoje produkty do indywidualnych potrzeb klientów. To kluczowe, zwłaszcza w dziedzinach, gdzie każdy element ma znaczenie.

Ergonomia, bezpieczeństwo pracy oraz redukcja odpadów. Wprowadzenie materiałów elastycznych do druku 3D rewolucjonizuje także ergonomię i bezpieczeństwo pracy. Rękojeści narzędzi czy elementy ochronne, takie jak osłony na maszyny, mogą teraz być produkowane z materiałów, które doskonale dopasowują się do dłoni lub kształtu urządzeń. To nie tylko zwiększa komfort pracy, ale także przekłada się na bezpieczeństwo operatorów. Druk 3D również minimalizuje ilość odpadów w procesie produkcyjnym poprzez precyzyjne dawkowanie materiałów. Elastyczne materiały mogą być również bardziej podatne na recykling, co wspiera zrównoważoną produkcję.

ELASTOMERY – PODZIAŁ I ZASTOSOWANIE

Wśród tworzyw konstrukcyjnych wykorzystywanych w druku 3D można wyróżnić trzy ich grupy [2]:

TPU – materiały o średniej elastyczności i dobrej odporności na działanie środ-

* Dr inż. Wojciech Żyłka, dr inż. Bogumił Hołota – Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, ul. Pigoń 1, 35-310 Rzeszów, mgr inż. Krzysztof Madej, mgr inż. Przemysław Kozioł – Rzeszowskie Centrum Technologii 3d, Al. gen I. Okulickiego 31, Rzeszów.

ków chemicznych, a także małej ścieralności;

TPE – materiały o dużej elastyczności i bardzo dobrej odporności na działanie środków chemicznych;

TPC – materiały o małej elastyczności, które bardzo dobrze znoszą ekspozycję na bezpośrednie oddziaływanie środków chemicznych.

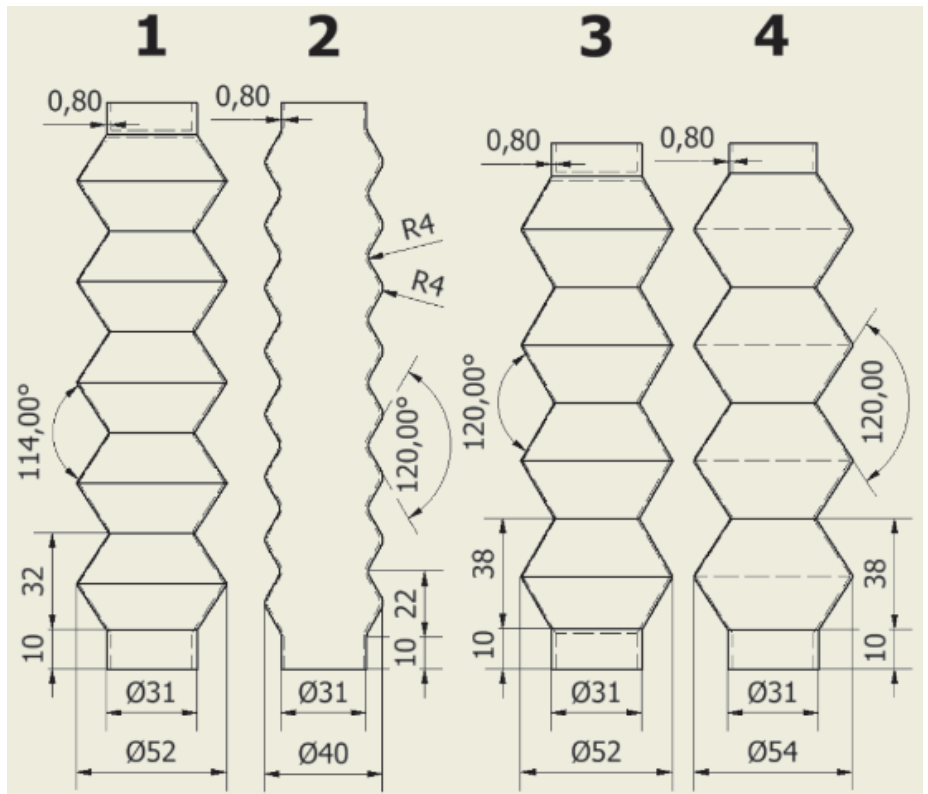
Materiały elastyczne mają zastosowania w druku 3D realizowanym w różnych gałęziach przemysłu. Poniżej wymieniono te najistotniejsze.

Robotyka. Chwyty i przeguby drukowane z materiałów elastycznych poprawiają elastyczność i skuteczność robotów przemysłowych. Materiały elastyczne, takie jak TPU, umożliwiają drukowanie chwytaków o zmiennym stopniu elastyczności, dzięki czemu mogą lepiej dopasować się do kształtu i tekstury różnych obiektów. Dzięki lepszemu dostosowaniu do różnych form i gabarytów, chwyty mogą być bardziej skuteczne w przechwytywaniu i manipulowaniu przedmiotami o zróżnicowanych i złożonych kształtach.

Przemysł obuwniczy. Produkcja obuwia roboczego z wykorzystaniem druku 3D z materiałów elastycznych stanowi przełom w zakresie komfortu i bezpieczeństwa pracowników przemysłowych. Elastyczne podeszwy i ich elementy zapewniają ergonomiczne dopasowanie do stóp użytkowników. Druk 3D umożliwi produkcję spersonalizowanego obuwia, idealnie dopasowanego do indywidualnych cech stóp. Elastyczność materiałów przyczynia się do zminimalizowania zmęczenia nóg i poprawy komfortu podczas długotrwałego noszenia obuwia roboczego.

Przemysł maszynowy – elementy amortyzujące. W przemyśle, w którym maszyny pracują w dynamicznych warunkach, elementy ochronne i amortyzujące odgrywają kluczową rolę. Druk 3D z materiałów elastycznych pozwala na stworzenie osłon, amortyzatorów, lub innych elementów, które efektywnie absorbują wstrząsy. Elastyczne materiały absorbują energię kinetyczną, chroniąc maszyny i ich elementy przed skutkami wibracji i uderzeń, co zwiększa żywotność maszyn.

Przemysł narzędziowy. Produkcja narzędzi oraz rękojeści do narzędzi. Chwy-



Rys. 1. Wymiary próbek wykorzystanych w badaniu

Physical Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Specific Density	ISO 1183	g/cm ³	1.07
Hardness	Test Method	Unit	Typical Value
Shore A, 1 sec, 23°C	ISO 7619	-	81
Shore D, 1 sec, 23°C	ISO 7619	-	30
Mechanical Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Tensile Stress:			
Break	ISO 527	MPa	22
5% Strain	ISO 527	MPa	1
10% Strain	ISO 527	MPa	2
50% Strain	ISO 527	MPa	6
Elongation at break	ISO 527	%	870
Thermal Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Heat Distortion Temperature @ 0.45 MPa	ISO 75	°C	70
Melting Temperature Tm	DSC	°C	170
Elastomer Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Tear Strength	ISO 34-1	kN/m	95

Rys. 2. Karta techniczna Fiberlogy Fiberflex 30D [2]

ty do wkrętarek lub osłony narzędzi drukowane 3D z materiałów elastycznych zapewniają lepszą ergonomię i bezpieczeństwo pracy. Druk 3D z materiałów elastycznych umożliwia personalizację narzędzi, dostosowując je do indywidualnych potrzeb użytkownika. Elastyczne uchwyty mogą być projektowane

z myślą o ergonomicznym chwycie, co poprawia komfort obsługi. Elastyczne materiały są doskonałe do szybkiej produkcji prototypów. Dzięki temu inżynierowie mogą testować różne koncepcje i wprowadzać modyfikacje bez konieczności długotrwałych procesów produkcyjnych.

Przemysł motoryzacyjny. Druk 3D umożliwia produkcję elastycznych komponentów wnętrza, takich jak elementy paneli drzwi lub deski rozdzielczej. To pozwala na bardziej innowacyjne i ergonomiczne projekty, zwiększając jednocześnie komfort użytkowników. Elastyczne materiały znajdują zastosowanie w produkcji uszczelek, zapewniając doskonałe uszczelnienie i chroniąc przed wnikaniem wody, pyłów lub hałasu. Elastyczne materiały są często lżejsze niż tradycyjne ze względu na ich wypełnienie co przyczynia się do optymalizacji wagi pojazdów. To wpływa korzystnie na efektywność paliwową i ogólną wydajność pojazdów. Druk 3D umożliwia szybką produkcję prototypów elastycznych części, co pozwala na testowanie różnych projektów i wprowadzanie modyfikacji, skracając czas rozwoju produktów [1].

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Badania miały na celu analizę wytrzymałości zmęczeniowej wydruków 3D z materiałów elastycznych oraz określenie zachowania się materiałów TPU w warunkach cyklicznego obciążenia, które jest powszechne w wielu zastosowaniach praktycznych. Dodatkowo, w badaniach skupiono się na roli osłony tłoczyska, które jest kluczowym elementem w wielu mechanizmach i urządzeniach. Podczas badania, przyjęto identyczne parametry dla kilku osłon, które symulowały codzienne warunki eksploatacji wydruków elastycznych. Osłona tłoczyska z materiału TPU była jednym



Rys. 4. Prasa pneumatyczna [5]

Chemical	Rating	Chemical	Rating
Acetaldehyde	Excellent	Gasoline	Excellent
Acetic acid	Excellent	Glycerin	Excellent
Acetone	Fair	n-Hexane	Excellent
Acetylene	Excellent	Hydrazine	Soluble
Amine	Soluble	Hydrochloric acid	Poor
Aniline	Poor	Isopropyl alcohol	Excellent
ASTM oil No. 1	Excellent	Iso-octane	Excellent
ASTM oil No. 3	Excellent	m-Cresol	Soluble
ASTM ref. fuel A	Excellent	Methyl alcohol	Excellent
ASTM ref. fuel B	Excellent	Methyl ethyl ketone	Excellent
ASTM ref. fuel C	Poor	Methylene chloride	Soluble
Benzene	Fair	Naphthalene	Fair
Butane	Excellent	Nitric acid	Soluble
Butyl acetate	Fair	o-Chlorophenol	Soluble
Carbon monoxide	Excellent	Perchloroethylene	Soluble
Carbon tetrachloride	Poor	Petroleum ether	Excellent
Chlorobenzene	Soluble	Phenol	Soluble
Chloroform	Soluble	Potassium hydroxide	Good
Chlorosulfonic acid	Poor	Sea water	Excellent
Chloric acid	Good	Silicone grease	Excellent
Cresol	Poor	NaCl satd. water	Excellent
Cyclohexane	Good	Sodium hydroxide	Good
Dimethyl formamide	Fair	Steam (100°C)	Fair
D.O.P.	Excellent	Sulfuric acid 5%	Good
Ethyl acetate	Fair	Sulfuric acid 10%	Fair
Ethyl alcohol	Excellent	Sulfuric acid 50%	Soluble
Ethylene chloride	Soluble	THF	Fair
Ethylene dichloride	Soluble	Toluene	Fair
Ethylene glycol	Excellent	Trichloroethane	Soluble
Ethylene oxide	Excellent	Triethanolamine	Soluble
Formaldehyde	Fair	Water	Excellent
Formic acid	Fair	Water (100°C)	Fair
Freon	Excellent	Xylene	Good

Rys. 3. Karta odporności chemicznej Fiberlogy Fiberflex 30D [2]

z kluczowych elementów badania, ze względu na jej potencjalny wpływ na trwałość całego wydruku. Poniżej przedstawiono parametry jakie przyjęto do badań:

- docelowa liczba cykli: 5000,
- częstotliwość: 1/3 Hz,
- początkowy wysuw tłoczyska: 0 mm,
- ciśnienie robocze: 0,45 MPa,
- obciążenie osłony: 362 N wysuw, 327 N wsuw.

Do przeprowadzenia badania przygotowano cztery próbki w odstępach czasowych. W pierwszej kolejności badano wytrzymałość próbek o numerach 1 oraz 2. Następnie naniesiono korekty mające na celu zwiększenie wytrzymałości i przetestowano próbki o numerach 3 oraz 4. Modele CAD zostały przygotowane w środowisku Autodesk Inventor w sekcji modelowania bryłowego. Na rysunku 1 zaprezentowano wszystkie próbki umieszczone w sąsiadującym położeniu [4].

Do wytworzenia elementów wybrano materiał *Fiberlogy Fiberflex 30D*. Na Rys. 2 zaprezentowano kartę techniczną, a na Rys. 3 – kartę chemiczną tego filamentu.

Badania przeprowadzono w laboratorium Uniwersytetu Rzeszowskiego. Wykorzystano w nich następujący sprzęt:

- prasę pneumatyczną (Rys. 4),
- zasilacz laboratoryjny DF1730SL10A NDN – 30V, 10A,
- Arduino Nano V3 ATmega328P.

Wyniki badań

Próbka nr 1

Cechy charakterystyczne:

- liczba przewężeń: 4,
- brak zaokrąglenia krawędzi,
- natężenie przepływu powietrza podczas druku: 1,65 m³/godz. (30%),
- temperatura druku: 205°C.

Próbkę po wykonaniu 1200 cykli pokazano na rys. 5. Uległa ona rozerwaniu w miejscu, gdzie po 1000 cyklach zaobserwowano luźną ścieżkę materiału [4].

Próbka uległa uszkodzeniu z powodu nieodpowiednio dobranych parametrów druku 3D (temperatura, przepływ materiału, chłodzenie). W miejscu występowania szwu (miejsce zmiany warstwy na kolejną) prędkość ruchów osi zmniejsza się do zera, natomiast w dyszy panowało ciśnienie spowodowane wtłaczaniem materiału. Skutkowało to wydobyciem się zbyt dużej ilości materiału w sposób niekontrolowany. Ścieżki w okolicach szwu przez to nie zostały ze sobą w prawidłowy sposób spojone, a to wygenerowało miejsce dla powstania uszkodzenia w trakcie próby. Po naderwaniu się wydruku 3D w miejscu szwu kolejne ruchy powodowały jego dalsze rozrywanie [4].

Próbka nr 2

Cechy charakterystyczne:

- liczba przewężeń: 7,
- mocno zaokrąglone krawędzie $R = 4\text{ mm}$,
- natężenie przepływu powietrza podczas druku: $1,65\text{ m}^3/\text{godz.}$ (30%),
- temperatura druku: 205°C .

Ułożenie próbki 2 na urządzeniu znacznie różni się od próbki nr 1. Jest to spowodowane innym kształtem osłony,

a dokładnie jej zaokrąglonymi krawędziami. Na Rys. 6 przedstawiono próbkę po wykonaniu 3350 cykli. Widoczne jest pęknięcie w jednym z przewężeń.

Poza innym kształtem, który przyczynił się do zwiększenia liczby wykonanych cykli, próbka nr 2 była drukowana przy identycznych ustawieniach jak próbka nr 1, stąd przyczyna uszkodzenia była taka sama. Nieprawidłowe spajanie warstw w okolicach szwu skutkowało rozwarstwieniem się wydruku 3D. Następnie uszkodzenie postępowało wzdłuż warstwy, na której się zaczęło.

Próbka nr 3

Cechy charakterystyczne:

- liczba przewężeń: 3,
- brak zaokrąglenia krawędzi,
- prędkość wentylatora w trakcie druku 3D: 50%,
- temperatura druku: 215°C ,
- położenie szwu: wyrównany.

Wprowadzenie zmian parametrów druku 3D skutkowało prawidłowym spajaniem warstw. Na próbce po wykonaniu 1000 cykli zaobserwowano pojawienie się szarych otarć pomiędzy przewężeniami osłony. Próbka po wykonaniu 5000 cykli nie uległa uszkodzeniu. Zaobserwowano jedynie zwiększenie się obszarów, na których wy-

stępują otarcia, które zostały pokazane na rysunku 7 [4].

Próbka nr 4

Cechy charakterystyczne:

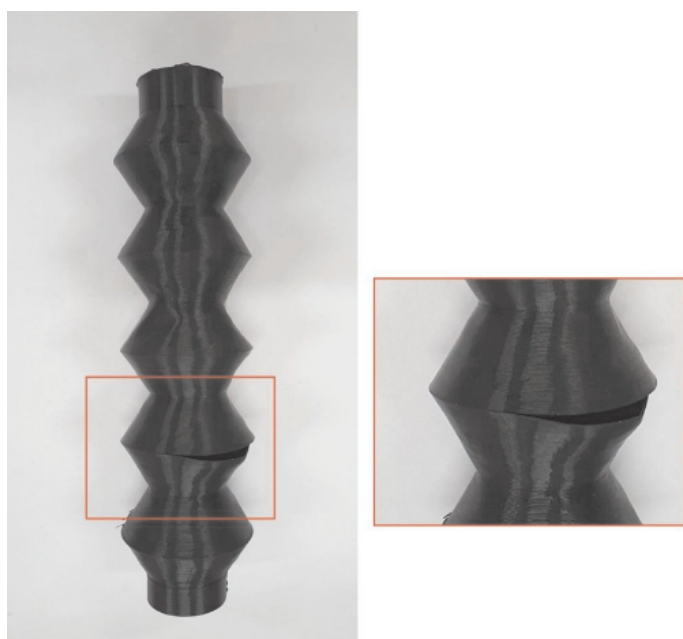
- liczba przewężeń: 3,
- natężenie przepływu powietrza podczas druku: $2,75\text{ m}^3/\text{godz.}$ (50%),
- temperatura druku: 215°C ,
- położenie szwu: losowy.

Na próbce po wykonaniu 1000 cykli zaobserwowano pojawienie się szarych otarć pomiędzy przewężeniami osłony. Próbkę po wykonaniu 5000 cykli pokazano na rys. 8. Zaobserwowano zwiększenie się obszarów, na których występują otarcia oraz zmianę kształtu względem stanu początkowego [3].

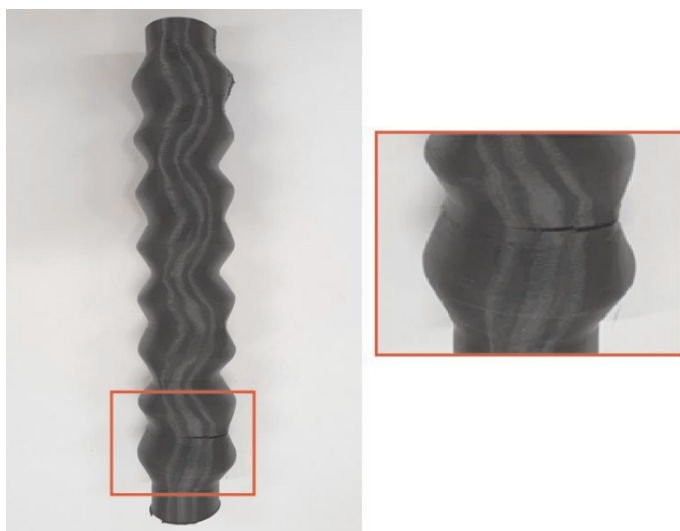
Próbka nr 4 została wydrukowana w technice 3D przy takich samych parametrach jak próbka nr 3, z wyjątkiem pozycji szwu – zastosowano w tym przypadku szew losowy, występujący na każdej warstwie w innej pozycji na okręgu. Po pełnej liczbie założonych cykli nie zauważono uszkodzeń próbki.

PODSUMOWANIE

Wyniki badań potwierdziły, że materiały elastyczne, zwłaszcza TPU, przy odpowiednich parametrach druku mają



Rys. 5. Widok próbki nr 1, która uległa uszkodzeniu.



Rys. 6. Widok próbki nr 2, która uległa uszkodzeniu



Rys. 7. Próbką po wykonaniu 5000 cykli, która nie uległa uszkodzeniu



Rys. 8. Próbką po wykonaniu 5000 cykli, która nie uległa uszkodzeniu

dobrą wytrzymałość zmęczeniową, co otwiera nowe perspektywy dla ich zastosowań praktycznych. Zastosowanie wydruków 3D z materiałów elastycznych staje się coraz bardziej realne, a badania takie jak te opisane wyżej, przyczyniają się do lepszego poznania ich właściwości i potencjalnych zastosowań.

Badania wytrzymałości zmęczeniowej wydruków 3D z materiałów elastycznych, ze szczególnym uwzględnieniem osłony tłoczyska wykonanego z TPU, stanowią krok w zastosowaniach praktycznych druku 3D. Wprowadzenie tych nowych materiałów do produkcji może znacząco wpłynąć na rozwój wielu branż, zapewniając elastyczne i wytrzymałe rozwiązania. Odkrycia te otwierają nowe perspektywy dla projektantów, inżynierów i producentów, przyspieszając adaptację nowoczesnych technologii druku 3D. Druk 3D

z materiałów elastycznych nie tylko zmienia sposób, w jaki produkuje się przedmioty, ale także wpływa na same możliwości projektowania i funkcjonalność produktów finalnych. To niezwykle narzędzie umożliwia przemysłowi dostosowanie się do zmieniających się potrzeb rynku, oferując elastyczność, precyzję i nowe horyzonty możliwości. Wydaje się, że technika druku 3D z materiałów elastycznych prawdopodobnie zastąpi tradycyjne sposoby wytwarzania elementów elastycznych takich jak, np. osłony tłoczysk, amortyzatorów, ruchomych części maszyn. Będzie to mieć szczególne znaczenie w prototypowaniu urządzeń, gdzie takie elementy wykonane komercyjnie w tradycyjnych technologiach są z oczywistych przyczyn nieosiągalne. Rewolucja w przemyśle już trwa, a druk 3D z materiałów elastycznych jest jednym z głównych motorów tego przełomu [4].

Literatura

- [1] Budzik G., Woźniak J., Przeszłowski Ł.: DRUK 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022.
- [2] <https://fiberlogy.com/pl/filamenty/filament-fiberflex-40d/>.
- [3] <https://omni3d.com/pl/blog/druk-3d-w-przemysle/>.
- [4] Kozioł P.: Badanie wytrzymałości zmęczeniowej wydruków 3D z materiałów elastycznych, Magisterska praca dyplomowa, Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Rzeszów 2022.
- [5] Piróg S.: Projekt prasy pneumatycznej sterowanej pneumatycznie i elektro-pneumatycznie. Inżynierska praca dyplomowa, Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Rzeszów 2019. ■