

ZESZYTY STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH

Zastosowanie techniki SLA na okienne i drzwiowe profile uszczelniające

A. Rogowicz^a, M. Król^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email:

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: mariusz.krol@polsl.pl

Streszczenie: Celem pracy było określenie liniowej siły ściskającej oraz twardości Shore'a wybranych profili otrzymanych w technologii SLA i porównaniu ich z wynikami profili otrzymanych w tradycyjny sposób tj. w procesie wytłaczania tworzyw sztucznych.

Abstract: The main purpose of presented work was to determine the linear compressive force and hardness in Shore scale of selected profiles manufactured by 3d printing technique i.e. SLA technology and to compare them with the results of profiles obtained in a traditional way, i.e. in the extrusion process of TPA.

Słowa kluczowe: druk 3D, stereolitografia, SLA, badania własności mechanicznych

1. WSTĘP

Polimery postrzegane są jako główny składnik tworzyw sztucznych. Wytwarzane są podczas chemicznych polireakcji wykorzystując w nich monomery, czyli główny składnik polimerów. Wraz z rozwojem technologicznym, stały się podstawowym materiałem wykorzystywanym w życiu codziennym. Dzięki swoim szczególnym oraz specyficznym własnościom zyskały szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach takich jak przemysł motoryzacyjny, rolniczy, budowniczy a czy też przy produkcji opakowań na żywność. Poprzez szybki rozwój stały się komplementarne do pozostałych grup materiałów inżynierskich. Istotną cechą dla tworzyw polimerowych jest ich podatność przetwórcza. Małe straty produktów oraz niskie koszty produkcyjne spowodowały, że przemysł polimerów oraz tworzyw sztucznych jest największy na całym świecie. Kolejnym atutem tych materiałów jest ich podatność do ponownego wykorzystania z wytworzonych już produktów, czyli recyklingu lub odzyskania energii z tworzywa. Zapotrzebowanie oraz ich rozwój wymusił rozwinięcie zainteresowania ze strony chemicznej a także przetwórczej. Na przestrzeni ostatnich lat bezustannie zostają wprowadzane nowe połączenia polimerów oraz ich kompozyty poprawiając ich własności w celu zaspokojenia stawianym im wymagań konstrukcyjnych. Dynamiczny postęp metod wytwórczych wraz z

zapotrzebowaniem na nowocześniejsze, korzystniejsze materiały nakłania do zagłębiania się w szeroką tematykę związaną z tworzywami sztucznymi oraz ich metodykę badań [1, 2].

Wraz z szybkim rozwojem i postępowaniem technologicznym metod wytwarzania produktów z materiałów polimerowych, koniecznym jest obniżenie czasu realizacji nowych zleceń czy zamówień. Proces szybkiego prototypowania (Rapid Prototyping) lub produkcja przyrostowa (Additive Manufacturing) stosowana jest w różnych branżach w celu opisanego procesu, który szybko tworzy reprezentację systemu lub części przed ostatecznym wydaniem lub komercjalizacją. Produkcja przyrostowa to zautomatyzowany proces wytwarzania oparty na warstwach, służący do tworzenia skalowanych trójwymiarowych obiektów fizycznych bezpośrednio z danych 3D-CAD, bez użycia narzędzi zależnych od części, co znacznie przyspiesza fazę projektu [3].

Stereolitografia jest najstarszą metodą druku 3D, w której laser jest używany do zestalania ciekłej żywicy za pomocą światła ultrafioletowego. Podczas gdy drukarki FDM wyciągają warstwy włókien w celu utworzenia modelu 3D, wiązka laserowa na drukarce SLA wyciąga kawałek części w celu utwardzenia warstwy ciekłej żywicy warstwa po warstwie, generując część 3D. Podczas gdy większość innych drukarek 3D drukuje od dołu części i pracuje w górę, drukarki SLA mogą drukować od góry do dołu. Źródło laserowe i zbiornik żywicy znajduje się u podstawy drukarki, a część drukowana jest mocowana do dolnej platformy konstrukcyjnej [4-6].



Rysunek 1. Dron wydrukowany metodą SLA [6]

Figure 1. Drone printed by SLA method [6]

Drukarki SLA mogą być bardzo szybkie i precyzyjne ze względu na swój charakter. Jednak sama żywica jest droga, a ponieważ jest fotoutwardzalna, musi być przechowywana w specjalistycznych pojemnikach. Większość żywic, gdy utwardza się, jest zazwyczaj bardzo krucha i nie wytrzymuje dużych naprężeń, dlatego też druk SLA jest zazwyczaj przydatny w przypadku prototypowania, ale nie produkcji. Podobnie jak drukarki FDM, drukarki SLA wymagają struktur pomocniczych dla drukowanych części, a ich materiały są ograniczone, ponieważ mogą one drukować tylko w żywicy światłoutwardzalnej i nie mogą drukować z kilku materiałów jednocześnie. Jednak precyzja drukarek SLA pozwala im drukować bardzo skomplikowane elementy. Przykładowe zastosowanie przedstawiono na rys. 1 [4-10].

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Celem pracy było określenie liniowej siły ściskającej oraz twardości Shore'a wybranych profili otrzymanych w technologii SLA i porównaniu ich z wynikami profili otrzymanych w tradycyjny sposób tj. w procesie wytłaczania tworzyw sztucznych.

Zakres pracy obejmował:

- zaprojektowanie modeli 3D w programie SolidWorks wybranych profili drzwiowych i okiennych w celu określenia liniowej siły ściskającej, uniwersalnego profilu montażowego oraz próbek do badań twardości według skali Shore'a;
- wydruk techniką SLA wybranych profili drzwiowych i okiennych do badania liniowej siły ściskającej, uniwersalnego profilu montażowego oraz próbek do badań twardości według skali Shore'a, wykonanie postprocesingu w celu utwardzenia materiału;
- pomiar twardości według skali Shore'a wydrukowanych próbek;
- badanie liniowej siły ściskającej wydrukowanych próbek wytworzonych w technologii SLA oraz ich odpowiedników wytworzonych z TPE;
- analizę wyników pomiaru twardości i badania liniowej siły ściskającej próbek wydrukowanych w technologii SLA ich odpowiednikami wytworzonymi z TPE.

Badanym materiałem była żywica fotopolimerowa Flexible firmy Formlabs stosowana podczas druku 3D techniką SLA oraz termoplastyczny elastomer Ensoft SD-641-60A firmy ENPLAST przetworzony podczas procesu wytłaczania polimerów zastosowany w badaniach jako materiał referencyjny.

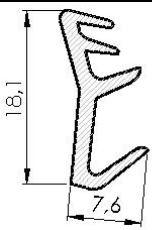
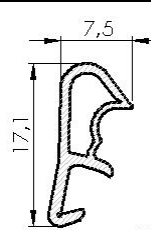
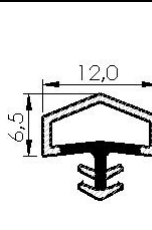
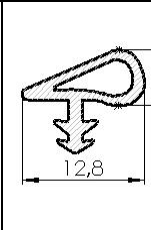
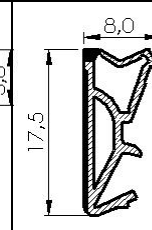
Żywica fotopolimerowa Flexible firmy Formlabs charakteryzuje się szeregiem własności, które idealnie pasują do produkcji prototypów nowych lub zmodernizowanych profili uszczelki. Pozwalają one na uzyskanie odpowiednich szczegółów i detali podczas drukowania części, które muszą zachować odpowiednią elastyczność. Jego właściwości ściskające sprawiają, że ta odporna na uderzenia żywica jest idealna do produkcji uszczelki, uchwytów i elastycznych połączeń. Zgodnie z informacjami podanymi przez producenta materiał durometryczny osiąga twardość około 80A° Shore'a oraz umożliwia wydruki o grubości 100 i 50 mikronów jednej warstwy. Materiał ten wymaga późniejszego utwardzenia, po którym osiąga swoje szczytowe własności wytrzymałościowe [11].

Materiałem referencyjnym był elastomer termoplastyczny Ensoft SD-641-60A TPE firmy ENPLAST (Ravago Group Company), który został przetworzony w procesie wytłaczania uszczelki. Jest to unikalna klasa materiałów, które łączy kluczowe właściwości przetwarzania i recyklingu tworzyw termoplastycznych z wieloma fizycznymi właściwościami kauczuków termoutwardzalnych, takimi jak elastyczność, niski poziom sprężania i wysoka elastyczność. Ten związek elastomeru termoplastycznego na bazie poliolefin (SEBS) jest średnio mineralnie wypełniony, w pełni nadający się do recyklingu i zaprojektowany specjalnie do wytłaczania w niskich temperaturach. Seria ENSOFT może być przetwarzana przy użyciu konwencjonalnych maszyn do produkcji tworzyw termoplastycznych [12].

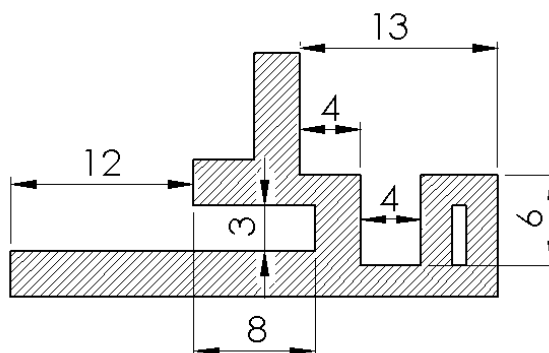
Poniżej przedstawiono technologiczną charakterystykę badanych profili (Tablica 1). Badanymi profilami były: jeden profil podstawowy, bez rozdmuchu i monoekstruzją określany nr. katalogowym S 4050 stosowany do uszczelnień okien oraz 4 profile z rozdmuchem, z czego podczas produkcji dwóch z nich wykorzystywana jest technologia współwytłaczania – co-ekstruzji.

Tablica 1. Technologiczna charakterystyka badanych profili

Table 1. Technological characteristics of the studied profiles

Nr katalogowy	S 4050	S 50	S 7292	S 485	SV 12
Miniatura					
Szerokość kanału montażowego	4 mm	3 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Wysokość swobodna	7,6 mm	7,5 mm	6,5 mm	5,8 mm	8 mm
Minimalny zakres pracy	5 mm	5 mm	5 mm	5 mm	5 mm
Wytłaczanie z rozdmuchem	nie	tak	tak	tak	tak
Współwytłaczanie	nie	nie	tak	nie	tak
Przeznaczenie	Przylgowa okienna	Przylgowa okienna	Drzwi wewnętrzne z przylgą	Drzwi wewnętrzne bez przylgi	Przylgowa okienna

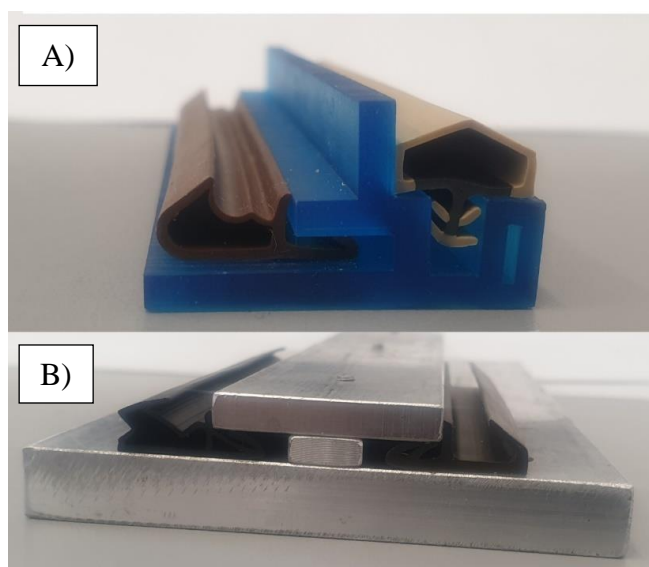
Przygotowanie uniwersalnego profilu montażowego



Rysunek 2. Rysunek techniczny uniwersalnego profilu montażowego wykonanego w technologii SLA z żywicy fotopolimerowej Tough

Figure 2. Drawing of the universal mounting profile made in SLA technology from Tough photopolymer resin

Aby wykonać badania liniowej siły ściskającej należy przygotować odpowiednie kanały montażowe zgodnie z zastosowaniem danego profilu. W tych badaniach wykorzystano dwa profile osadzeniowe. Pierwszy specjalnie zamodelowany i wydrukowany w technologii SLA z żywicy Tough (wymiary profilu na rys. 2) profil umożliwiający osadzenie uszczelek S 485, S 7292 i S 50, oraz drugi podstawowy wykonany z aluminium, umożliwiający osadzenie uszczelek płaskich z kanałem montażowym, mieszczącym się w zakresie 4-5 mm. Oba te profile montażowe przedstawiono na rys. 3.



Rysunek 3. Profile montażowe do osadzenia uszczelek – A) wykonany w technologii SLA i B) z aluminium

Figure 3. Mounting profiles for sealing gaskets - A) made in SLA and B technology made of aluminum

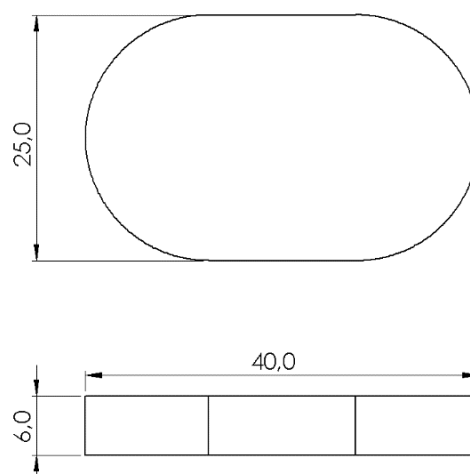
Aby dokonać pomiarów liniowej siły ściskającej należało wyznaczyć maksymalną twardość żywicy Flexible, a więc minimalny czas jej utwardzania, który jest potrzeby do jej osiągnięcia. Próbki do badań twardości według skali Shore'a zostały zamodelowane 3D w programie SolidWorks, a następnie wydrukowane w technologii SLA. Podczas projektowania próbek do badań twardości zostały zachowane wszelkie wytyczne zgodnie z normą PN-EN ISO 868:2004 (U). Wymiary próbek przedstawiono na rys. 5.



Rysunek 4. Gotowy wydruk na platformie roboczej z widocznymi podporami pomocniczymi
Figure 4. Ready printout on the working platform with visible auxiliary supports

Próbki do badania liniowej siły ściskającej profili również zamodelowano w programie SolidWorks, z uwzględnieniem odpowiednich podpór pomocniczych rys. 4,

charakterystycznych dla drukarek 3D oraz zgodnie z dostępnymi rysunkami technicznymi. Długość modelu profilu określono na 100 mm plus podpory pomocnicze o wysokości 5 mm. Odpowiednio zamodelowane zostały wydrukowane w technologii SLA. Natomiast ich odpowiedniki z TPE zostały wytworzone konwencjonalną metodą wytłaczania polimerów, z zachowaniem wszelkich zaleceń producenta ENPLAST zamieszczonych w karcie charakterystyki materiału. Uszczelki zostały pocięte na 100 mm odcinki i odłożone w zaciemnione miejsce w celu ich relaksacji.



Rysunek 5. Wymiary próbki do badań twardości według skali Shore'a

Figure 5. Dimensions of the sample for testing hardness according to the Shore scale

Wydruk próbek do badań twardości Shore'a, próbek do badań liniowej siły ściskającej oraz uniwersalnego profilu montażowych odbył się na drukarce Form 2 firmy Formlabs. Drukarka ta pracuje w technologii SLA, która utwardza materiał przy użyciu wiązki lasera. Charakteryzuje ją wysoka precyzja oraz stosunkowo duży obszar roboczy w tej klasie drukarek dostępnych na rynku. Firma Formlabs udostępnia również szeroką gamę materiałów, co pozwala nam doprecyzować pożądane własności wydrukowanych elementów.

Wydrukowano 21 próbek do badań twardości według Shore'a i 15 próbek do badań liniowej siły ściskającej. Próbki do badań twardości oraz badań liniowej siły ściskającej zostały wydrukowane z zastosowaniem 100 mikronowej grubości jednej warstwy z żywicy fotopolimerowej Flexible firmy Formlabs.

Uniwersalny profil montażowy wydrukowany został z żywicy Tough firmy Formlabs. Żywica ta charakteryzuje się wysoką twardością oraz sztywnością, co sprawia, że jest odpowiednim materiałem do tego typu elementów. Grubość jednej warstwy wydruku ustawiono na 100 mikronów.

Post Procesing

Wydrukowane próbki do badań twardości oczyszczono w alkoholu izopropylowym o stężeniu 99,9% przez 10 minut i utwardzono przy pomocy lampy UV o mocy 36 Watów wyposażoną w 4 świetlówki - 9 Watowe o długości fali 365 nm, w różnych odstępach czasu przedstawionych w tablicy 6 w celu określenia wpływu czasu utwardzania na twardość materiału.

Tablica 2. Czas wygrzewania próbek do badań twardości według skali Shore'a
Table 2. The soaking time of samples for hardness tests according to the Shore scale

Nr. próbki	Czas wygrzewania [min]
1	0
2	30
3	60
4	90
5	120
6	150
7	180

Natomiast po zakończonym drukowaniu próbek do badań liniowej siły ściskającej, oczyszczono je w alkoholu izopropylowym o stężeniu 99% przez 10 minut, następnie osuszono i utwardzono w lampie UV o mocy 36 W wyposażoną w 4 świetlówki - 9 W o długości fali 365 nm, przez jedną godzinę. Tak przygotowane próbki zostały pozbawione podpór pomocniczych i odłożone w zaciemnione miejsce w celu ich relaksacji.

Pomiar twardości według skali Shore'a

Pomiar twardości został wykonany twardościomierzem firmy Limit 4000, na wcześniej przygotowanych próbkach. Twardościomierz Limit umożliwia pomiar twardości materiałów miękkich, np. gumy czy miękkich tworzyw sztucznych. Powierzchnia pomiarowa powinna być możliwie gładka, pole pomiarowe powinno być nie mniejsze niż 12 mm, a pomiar należy prowadzić w odległości co najmniej 12 mm od brzegu materiału. Na wcześniej wydrukowanych próbkach wykonano 21 pomiarów na 7 próbkach, po 3 pomiary na każdej [13, 14].

Badanie liniowej siły ściskającej

Badanie liniowej siły ściskającej zostało wykonane na maszynie wytrzymałościowej firmy TinusOlsen 5ST jest to model przeznaczony do badań rozciągania, ściskania, zginania i wytrzymałości na ścinanie materiałów. Urządzenie sterowane jest za pomocą specjalnego oprogramowania autorskiego Tinus Olsen Horizon Data Analysis, który umożliwia programowanie ruchów maszyny w zależności od zapotrzebowań danego badania.

Po odpowiednim ustawieniu maszyny, osadzenia próbek we wcześniej przygotowanych profilach montażowych i przygotowaniu odpowiedniego programu uruchamia się badanie. Maszyna opuszcza platformę dociskową w kierunku uszczelki do wysokości swobodnej podanej wcześniej przez operatora, następnie czeka ona na potwierdzenie czy należy kontynuować badanie. Po zatwierdzeniu, kontynuowane jest badanie, platforma dociskowa wstępnie dociska uszczelkę w zakresie jej pracy, a następnie szybko wraca do pozycji swobodnej. W tym momencie urządzenie powtarza proces ściskania i zatrzymuje się w pozycji jej minimalnego zakresu pracy, zapisywana jest wartość siły jaka jest potrzebna do wykonania ścisku i jest ona utrzymywana przez 30 sekund, rejestrując przy tym wartości odkształcenia uszczelki w czasie. Wynikiem badania jest średnia trzech wyników z trzech różnych próbek

tego samego profilu. Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z Normą PN-EN 12365-1:2006 oraz PN-EN 12365-2:2006 [15].

3. WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzone badanie twardości miało na celu określenie wpływu czasu utwardzania żywicy fotopolimerowej na jej twardość wyjściową oraz oszacowanie minimalnego czasu utwardzania potrzebnego do uzyskania maksymalnej twardości. Wyniki badania przedstawiono w Tablicy 3. Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić wzrost twardości żywicy podczas pierwszych 60 minut utwardzania o około 6° Shore'a A, dłuższy czas utwardzania nie jest konieczny, ponieważ nie prowadzi on do wzrostu twardości żywicy fotopolimerowej. Po zakończonych badaniach twardości, uwzględniono wartość minimalnego czasu potrzebnego do maksymalnego utwardzenia żywicy przy utwardzaniu próbek do badań liniowej siły ściskającej wytworzonych metodą przyrostową – tj. 60 min, a stosowanie dłuższego czasu naświetlania z punktu ekonomiczno-finansowego jest nieuzasadnione. Zgodnie z uzyskanymi wynikami twardości próbek wykonanych w technologii SLA tj. ~ 60°A, powinny być one porównywalne z twardością podaną przez producenta elastomeru termoplastycznego, który zaświadcza o twardości równej 60°A, co korzystnie wpływa na porównanie uzyskanych wyników badań.

Tablica 3. Wpływ czasu utwardzania żywicy Flexible firmy Formlabs na jej twardość

Table 3. The influence of Formlabs Flexible resin curing time on its hardness

Nr. próbki	Czas wygrzewania [min]	Twardość			Średnia twardość Shore'a	Odchylenie standardowe
		Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3		
1	0	53,9	55,7	58,5	56 ± 1	2,3
2	30	57,5	54,1	59,2	57 ± 1	2,6
3	60	62,3	60,8	62,2	62 ± 1	0,8
4	90	59,7	62,1	62,2	61 ± 1	1,4
5	120	63,5	63,5	61,1	63 ± 1	1,4
6	150	59,8	61,3	62,7	61 ± 1	1,5
7	180	62,2	62,3	65,4	63 ± 1	1,8

Badanie liniowej siły ściskającej

W tablicy 4 przedstawiono wyniki pomiarów wszystkich próbek, na których zostało przeprowadzone badanie liniowej siły ściskającej. Najwyższy zarejestrowany wynik uzyskany podczas badania wynosi 179 N/m i został zarejestrowany dla profilu S 485 wykonanego z TPE, a najniższym 29,1 N/m uzyskanym podczas badania profilu S 50 wykonanego w technologii SLA.

Tablica 4. Wyniki badania liniowej siły ściskającej wyrażonej w N/m
 Table 4. Results of the linear compressive force test expressed in N / m

	Liniowa siła ściskająca [N/m]	
	TPE	SLA
S 7292	46	35,7
S 485	179	131
SV 12	107	36
S 4050	42	35,8
S 50	48	29,1

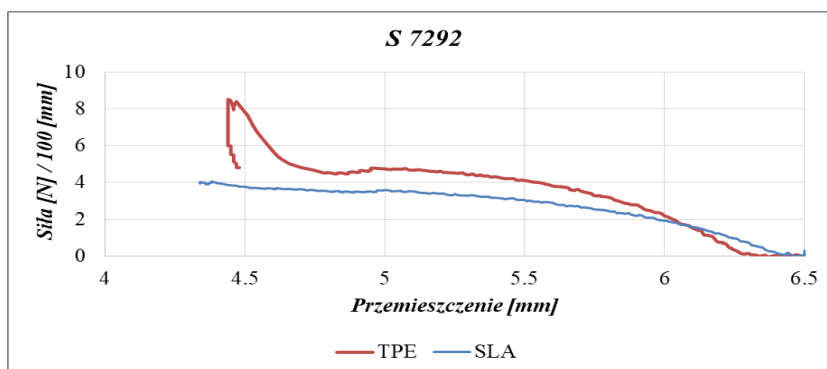
Badanie zostało przeprowadzone na 5 różnych profilach uszczelek, wykonanych z dwóch różnych materiałów, po 3 próbki na jeden materiał. Łącznie wykonano 30 pomiarów, 15 pomiarów na próbkach z materiału TPE i 15 z żywicy fotopolimerowej Formlabs Flexible. Biorąc pod uwagę różnice geometryczne oraz charakterystykę pracy każdej uszczelki, uzyskane wyniki należy rozpatrywać indywidualnie dla każdego profilu.



Rysunek 6. Porównanie osadzenia profilu S 7292 wykonanego z TPE (profil na drugim planie) oraz w technologii SLA (pierwszy plan)

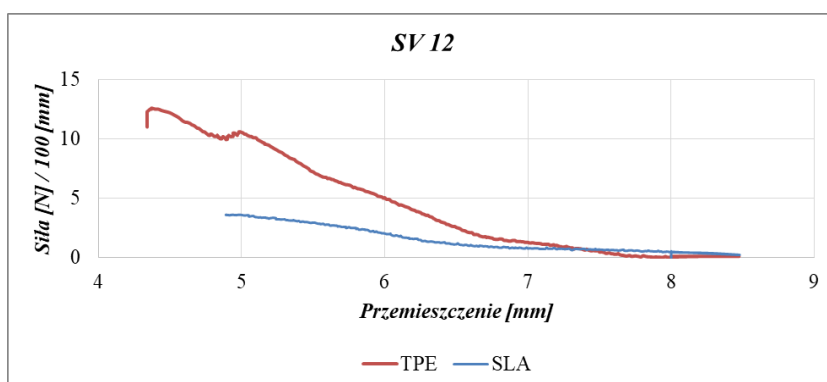
Figure 6. Comparison of the embedding of the S 7292 profile made of TPE (profile in the foreground) and in SLA technology (foreground)

Na rys. 7 przedstawiono wykres zależności liniowej siły ściskającej do jej przemieszczenia profilu S 7292 wykonanego technologią SLA oraz ekstrudowaną. Podczas przebiegu ściskania zauważyć można, że wyniki otrzymane z wykonanego badania są porównywalne - średnio mniejsze o 1 N/100mm, z wyjątkiem końcowego etapu utrzymywania próbki pod stałym naciskiem przez 30 sekund, gdzie zauważyć można znaczny wzrost siły oddziaływującej na platformę ściskającą. Na rys. 28 nie stwierdzono żadnych różnic geometrycznych, które mogłyby wpłynąć na przebieg badania.



Rysunek 7. Porównanie sił oddziałujących podczas badania liniowej siły ściskającej próbki powstałej z TPE oraz powstałych w technologii SLA – profilu S 7292

Figure 7. Comparison of forces acting during testing the linear compressive force of a sample formed from TPE and created in SLA technology - profile S 7292



Rysunek 8. Porównanie sił oddziałujących podczas badania liniowej siły ściskającej próbki powstałej z TPE oraz powstałych w technologii SLA – profilu SV 12

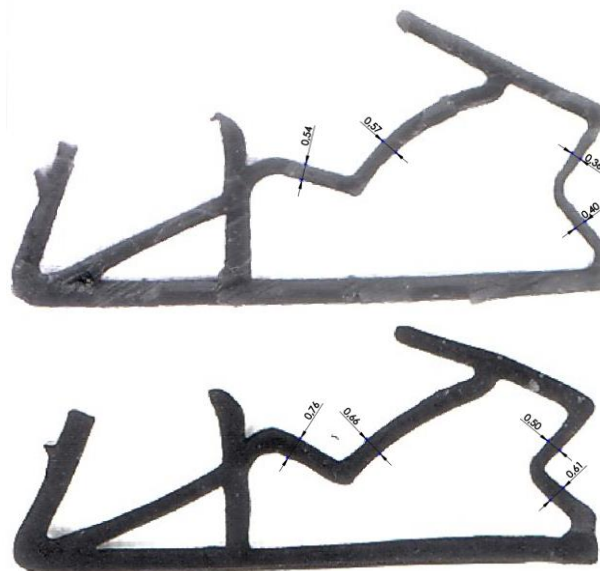
Figure 8. Comparison of forces acting during testing of the linear compressive force of a sample formed from TPE and created in SLA technology - profile SV 12



Rysunek 9. Porównanie osadzenia profilu SV 12 wykonanego z TPE (pierwszy plan) oraz w technologii SLA (drugi plan)

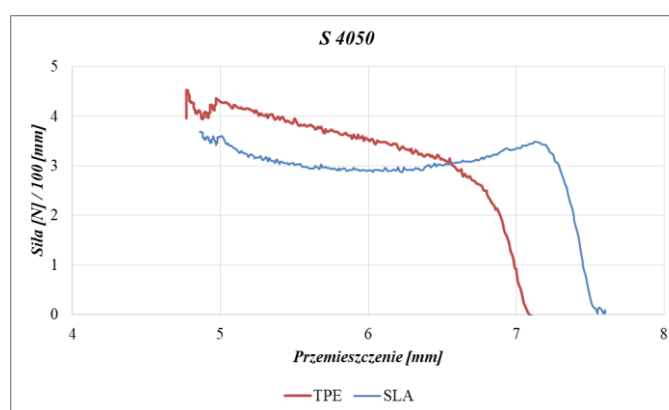
Figure 9. Comparison of the embedding of the SV 12 profile made of TPE (foreground) and SLA technology (second plan)

Podczas analizy przebiegu badania dla profilu SV 12 przedstawionego na rys. 8 zauważyć można znaczną różnicę liniowej siły ściskającej. Dla próbki wykonanej w technologii SLA wynosiła ona 3,6 N/100mm natomiast dla próbki wykonanej z TPE prawie trzy razy tyle – 10,7 N/100mm. Osadzenie profilu przedstawiono na rys. 9. Najprawdopodobniej spowodowane jest to różną grubością ścianek widoczną na rys. 10, która w tym wypadku powinna być uwzględniona podczas analizy wyników.



Rysunek 10. Porównanie grubości ścianek wytworzonych próbek – górna SLA, dolna TPE
Figure 10. Comparison of wall thickness of samples produced - upper SLA, lower TPE

Różne grubości ścianek, wynikają z charakterystyki procesów obu metod wytwarzania próbek. Powodów wpływu na te różnice może być wiele, zła prędkość wytłaczanego profilu, zbyt wysoka temperatura procesu, niedopatrzenie operatora czy też skurcz powstały podczas wykonywania wydruku lub za duża ingerencja alkoholu izopropylowego na strukturę materiału – efekty tych niedopatrzeń szczególnie widać przy podczas badania profilu SV 12.



Rysunek 11. Porównanie sił oddziałujących podczas badania liniowej siły ściskającej próbki powstałej z TPE oraz powstałych w technologii SLA – profilu S 4050
Figure 11. Comparison of forces acting during testing the linear compressive force of a sample formed from TPE and created in the SLA technology - profile S 4050

Analizując wykres profilu S 4050 rys. 11, zauważyć można szybki wzrost siły powstały na początku badania a następnie jej delikatny spadek i ponowny wzrost na końcu. Prawdopodobną przyczyną tej charakterystycznej różnicy jest zauważalna różnica lepkości materiału, która uniemożliwia płynne przemieszczanie się pióra uszczelki po powierzchni platformy dociskającej podczas wykonywanego badania. Znikome różnice w osadzeniu profilu widoczne są na rys. 12.



Rysunek 12. Porównanie osadzenia profilu S 4050 wykonanego z TPE (pierwszy plan) oraz w technologii SLA (drugi plan)

Figure 12. Comparison of the seating of the S 4050 profile made of TPE (foreground) and SLA technology (second plan)

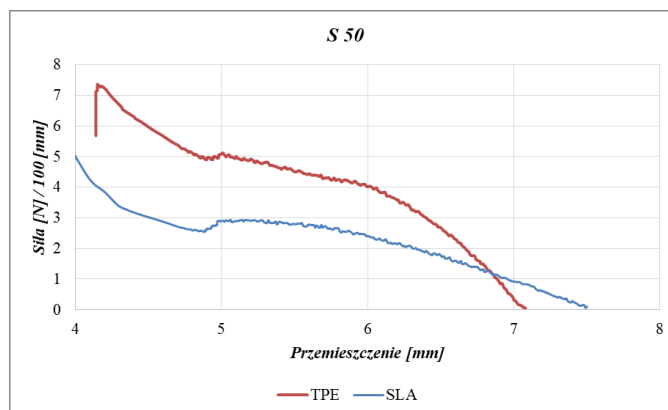


Rysunek 13. Porównanie osadzenia profilu S 50 wykonanego z TPE (pierwszy plan) oraz w technologii SLA (drugi plan)

Figure 13. Comparison of the seating of the S 50 profile made of TPE (foreground) and SLA technology (second plan)

Analiza wykresu liniowej siły ściskającej do przemieszczenia profilu S 50 przedstawioną na rys. 14 wykazała porównywalne oddziaływanie sił podczas wykonywanego badania ze średnią

różnicą 2 N/100mm. Natomiast rys. 13 przedstawia porównanie osadzenia tego profilu wykonanego z TPE oraz w technologii SLA.



Rysunek 14. Porównanie sił oddziałujących podczas badania liniowej siły ściskającej próbki powstałej z TPE oraz powstałych w technologii SLA – profilu S 50

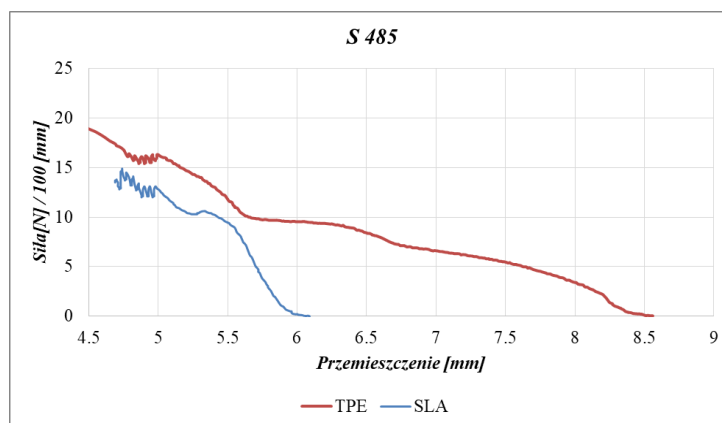
Figure 14. Comparison of forces acting during testing of the linear compressive force of a sample formed from TPE and created in the SLA technology - profile S 50

Wykres zależności siły ściskającej do przemieszczenia profilu S 485 wykonanego technologią SLA oraz ekstrudowaną przedstawiono na rys. 16. Zauważyć można siły występujące w przedziale wysokości 6,2 do 8,5 próbki wykonanej z TPE. Najprawdopodobniej spowodowane jest zbyt dużym ciśnieniem powietrza doprowadzonym do komory roboczej oraz różnica elastyczności obu materiałów, co widać na rys. 15. Końcowa część pomiaru przeszła zgodnie z planem, a rozkład sił zachodzących w oby dwóch materiałach jest podobny.



Rysunek 15. Porównanie osadzenia profilu S 485 wykonanego z TPE (biała) oraz w technologii SLA (czarna)

Figure 15. Comparison of the S 485 profile seat made of TPE (white) and SLA technology (black)



Rysunek 16. Porównanie sił oddziałujących podczas badania liniowej siły ściskającej próbkę powstałą z TPE oraz powstałą w technologii SLA – profilu S 485

Figure 16. Comparison of forces acting during testing of the linear compressive force of a sample formed from TPE and created in SLA technology - profile S 485

4. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań wysunięto następujące wnioski:

- Odpowiednia preparatyka próbek ma znaczący wpływ na właściwości wytrzymałościowe.
- Próbkę wykonaną w technologii SLA, wykazuje niższą odporność na liniową siłę ściskającą w porównaniu do próbek ekstrudowanych, spowodowane jest to niższą twardością materiału wykorzystywanego w technologii SLA.
- Niższe wartości otrzymanych wyników badania liniowej siły ściskającej próbek wykonanych w technologii SLA w porównaniu do ekstrudowanych nie są tak duże, aby dyskwalifikować materiał Flexible w zastosowaniach wizualizacyjnych i prototypowych profili uszczelniających.
- Najwyższą twardość próbek wykonanych w technologii SLA uzyskano po upływie 60 minut tj. 62°C, a dłuższy czas utwardzania w lampie UV z punktu widzenia ekonomiczno-finansowego jest nieopłacalny, ponieważ nie zaobserwowano zwiększenia twardości materiału.
- Analiza przebiegu badania liniowej siły ściskającej nie wykazała znacznych różnic właściwości materiału SLA w porównaniu do TPE, co świadczy o porównywalnej funkcjonalności.
- Technika SLA może być z powodzeniem zastosowana na wizualizację i badanie nowych prototypów profili uszczelniających, obniżając tym samym koszty nowego projektu o wartość nowego narzędzia wytaczarskiego.

LITERATURA

1. Dobrzański L. A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.
2. PlasticEurope, *Tworzywa sztuczne – fakty*, wyd. PlasticEurope, 2016.
3. Kamrani A. K., Abouel Nasr E., *Engineering Design and Rapid Prototyping*, Springer-Verlag New York Inc., 2010.
4. Siemiński P., Budzik G., *Techniki przyrostowe: druk drukarki 3D*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015

5. Gibson I., Rosen D., Stucker B., *Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*, New York, Springer, cop. 2015
6. <http://www.formlabs.com>, *The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D printing, March 2017* [dostęp 05.07.2019]
7. Rabek J. F., *Współczesna wiedza o polimerach*, wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 2008.
8. http://www.mechanik.media.pl/pliki/do_pobrania/artykuly/18/k12-14-16.pdf [dostęp 15.01.2019r]
9. Borkowski K., *Przemysł tworzyw sztucznych – materiałów XXI wieku*, wyd. mechanik, nr 4/2015.
10. Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., *Metody badań i ocena własności tworzyw sztucznych*, wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
11. <https://formlabs.com/materials/> [dostęp 18.08.2019]
12. Karta charakterystyki: ENSOFT SD-641-60A - ENPLAST, Ravago Group Company
13. PN-EN ISO 868:2004 (U) Tworzywa sztuczne i ebonit. Oznaczanie twardości przy wciskaniu z zastosowaniem twardościomierza (twardość Shore'a)
14. <https://limit24.pl/1455-mierniki-twardosci> [dostęp 19.08.2019]
15. PN-EN 12365-2:2006 Okucia budowlane. Uszczelki i taśmy uszczelniające do drzwi, okien, żaluzji i ścian osłonowych - Część 2: Metoda badania liniowej siły ściskającej