

dr inż. Przemysław Siemiński, Marek Tomczuk  
Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, <http://www.simr.pw.edu.pl/> ,  
e-mail: [psieminski@simr.pw.edu.pl](mailto:psieminski@simr.pw.edu.pl), [tomczukmarek@gmail.com](mailto:tomczukmarek@gmail.com)

## **Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonywanych wybranymi metodami szybkiego prototypowania.**

*W niniejszym artykule przedstawiono pierwszy etap prac, który dotyczył zrywania próbek wykonanych w różnych ustawieniach wybranymi metodami RP: FDM (Fused Deposition Modeling) z czystego ABS, LOM (Laminated Object Manufacturing) z folii PCV, PJM (PolyJet Modeling) z żywicy akrylowej, 3DP (3D Printing) z proszku na bazie gipsu infiltrowanego żywicą epoksydową. Celem pracy jest zbadanie wpływu parametrów technologicznych metod RP na parametry wytrzymałościowe wytwarzanego obiektu.*

## **Tensile strength test samples of selected methods Rapid Prototyping (RP).**



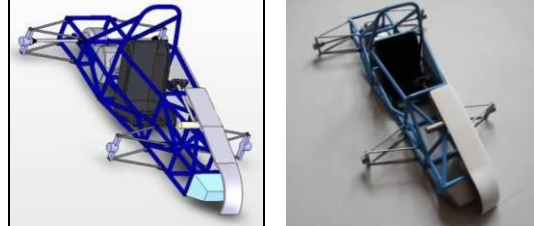


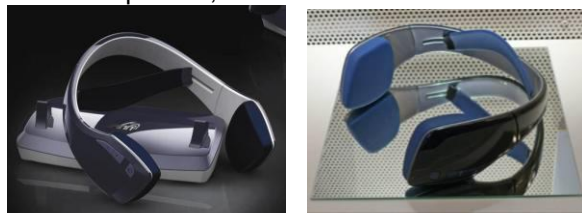



*This paper presents the first stage of the work, which dealt with breaking samples taken at different settings, different methods rapid prototyping: FDM (Fused Deposition Modeling) with pure ABS, LOM (Laminated Object Manufacturing) with PVC foil, PJM (PolyJet Modeling) with acrylic resin, 3DP (3D Printing) of gypsum powder infiltrated with epoxy resin. Aim of this study is to investigate the influence of process parameters on the parameters of RP methods of strength produced object.*

### **1. Wprowadzenie**

Od 5 lat na Wydziale Wzornictwa Akademii Sztuk Pięknych w Warszawie ([3druk.pl](http://3druk.pl)) oraz od 4 lat na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej ([www.simr.pw.edu.pl](http://www.simr.pw.edu.pl)) studenci i pracownicy mają do dyspozycji 3 różne technologie szybkiego prototypowania (RP). Są to: FDM (Fused Deposition Modeling) – modelowanie ciekłym tworzywem sztucznym realizowane na maszynie 1200BST firmy Dimension Printing; 3DP (3D Printing) - trójwymiarowe drukowanie proszkowe realizowane na maszynie Spectrum Z510 firmy Z-Corp. oraz PJM (PolyJet Modeling) - modelowanie wielostrumieniowe realizowane na maszynie Eden 250 firmy Objet Geom. Ponad to część projektów przekazywanych jest do wykonania

na innych maszynach m.in. z powodu dostępności innych materiałów budulcowych, innych właściwości (SLS, FDM, LOM) lub choćby ze względu na niższe koszty.

W ciągu tych lat wytworzonych zostało parę tysięcy różnorodnych obiektów: makiet (modeli prezentacyjnych), części mechanizmów i struktur przestrzennych, modeli wzorcowych, itd.. Prototypy powstają na potrzeby prac zaliczeniowych zajęcia związane z szybkim prototypowaniem (m.in. „Integracja projektowania i wytwarzania..” na SiMR PW i w Pracowni Podstaw Projektowania III na WW ASP [9,12]), prac semestralnych, dyplomowych [10,11], kół naukowych, studiów podyplomowych, prac badawczo-wdrożeniowych [8], a kończąc na zewnętrznych zleceniach komercyjnych (dot. 3druk.pl). Przykłady tych prac pokazano na serii kilkunastu zdjęć zamieszczonych poniżej w tab. 1.

Wydz. SiMR PW – realizacja pod kierunkiem P. Skawińskiego lub P. Siemińskiego	Wydz. Wzornictwa ASP Warszawa – realizacja pod kierunkiem J. Surawskiego i D. Głęba
	
<p>M.Strzała A. Kamiński – nadwozie inspirowane PT Cruiser'em</p>	<p>A. Getka, K. Borkowska – nadwozie, J. Godlewski – wkrętarka,</p>
	
<p>G. Hoffman – pojazd Formuła Student</p>	<p>S. Płoski – pistolet, M. Toruń i K. Kozak –odkurzacz</p>
	
<p>P. Badera – nadwozie FSO Syreny Sport [10]</p>	<p>A. Doroszczyk, M. Kraszewski – słuchawki</p>
	
<p>J. Rosiński – nadwozie samochodu sportowego</p>	<p>M. Chmura, P. Hubiszta – maszyna do szycia</p>
	
<p>J. Orłowski – mysz komp. z funkcją nawigacji 3D</p>	

Tab. 1. Wybrane projekty studenckie z Wydż. SiMR PW i WW ASP w Warszawie.

W przeważającej większości produkowane metodami RP na ww. Wydziałach obiekty to makiety, dla których istotny jest ich zewnętrzny kształt, a więc modelowane są jako skorupy. Prezentowane są one na wystawach i targach, wobec czego często są pakowane i przewożone, a więc nie powinny być zbyt delikatne. Z powodu, że elementy są różnych wielkości, niejednokrotnie są dzielone bo nie mieszczą się w komorze roboczej drukarki 3D i trudno jednoznacznie określić dla nich zalecaną grubość ścian. Dodatkowym niebezpieczeństwem jest kwestia ich obróbki po druku 3D (wyjęcia z maszyny, oczyszczania, itp.) oraz wykończenia modelarskiego (szlifowania, malowania, klejenia, itp.). Podobne problemy pojawiają się przy realizacji struktur przestrzennych (np. kratownic pojazdów) lub części mechanizmów.

## 2. Postawienie problemu

Na rynku dostępnych jest wiele metod szybkiego prototypowania (FDM, 3DP, LOM, MJM, SLA, SLS, SLM, ...), a każda z nich wykorzystuje różne materiały i sposoby ich przetwarzania. Przygotowując do drukowania 3D wirtualną geometrię w systemie 3D CAD, trzeba określić sporo wymiarów (szczególnie dot. grubości ścian) w zależności od wielkości modelu, jego kształtu, położenia podczas wytwarzania i jego późniejszego umiejscowienia w mechanizmie lub makiecie tak, aby wytrzymał zakładane obciążenia. Jest to szczególnie istotne ze względu na spore koszty szybkiego prototypowania (setki PLN za jeden model), a te bezpośrednio zależą od zużytego materiału i czasu pracy maszyny. Z tego względu aspekt wytrzymałościowy w przypadku części szybko-prototypowanych jest wielce istotny.

Producenci i dystrybutorzy materiałów stosowanych w szybkim prototypowaniu zwykle podają ich podstawowe parametry materiałowe, w tym wytrzymałościowe tj.: wytrzymałość na rozciąganie i moduł Younga [12]. Najczęściej są one podawane dla najkorzystniejszego, ze względów na wytrzymałościowych, ustawiania prototypu podczas wydruku. Niestety w technologiach przyrostowych, zbudowany obiekt jest bardzo silnie zróżnicowany warstwowo (w kierunku Z), a ponadto w części z metod RP (szczególnie w FDM), istotny jest też kierunek nakładania materiału budulcowego (w płaszczyźnie XY). Dodatkowo na wytrzymałość wpływa też wielkość i strategia wypełniania wnętrza modelu (FDM), parametry przetwarzania (np. temperatura) oraz późniejsza obróbka np. naświetlanie UV, wygrzewanie czy infiltracja (3DP). Oznacza to, że dla części z metod może nie być wystarczające zastosowanie opisu właściwości jak dla materiałów kompozytowych.

Z tego powodów celowe jest poznanie dla konkretnych materiałów zależności pomiędzy technologią a otrzymywaną wytrzymałością, co jest szczególnie ważne przy projektowaniu skomplikowanych przestrzennie kształtów tj. cienkościennie skorupy. Projektant znający ww. zasady, będzie wiedział gdzie i ile w modelu pogrubić ściankę, gdzie zmienić ustawienia obiektu podczas druku 3D lub czy podzielić model na kilka części, wydrukować je osobo w różnych ustawieniach i skleić w całość.

Na świecie badania nad wytrzymałością modeli wykonywanych metodami szybkiego prototypowania są już od pewnego czasu realizowane. Zwykle dotyczą jednak jednej technologii [2,6,7] lub ich pewnych szczególnych aspektów [3]. Autorzy nie spotkali się z publikacjami zawierającymi konkretne wskazówki projektowe dot. różnych metod RP. W przypadku porównywania metod druku 3D, to dotyczą najczęściej analiz wybranych maszyn RP, kosztów i czasu budowy modeli oraz dokładności wymiarowej [17,18].

### **3. Cel i zakres pracy**

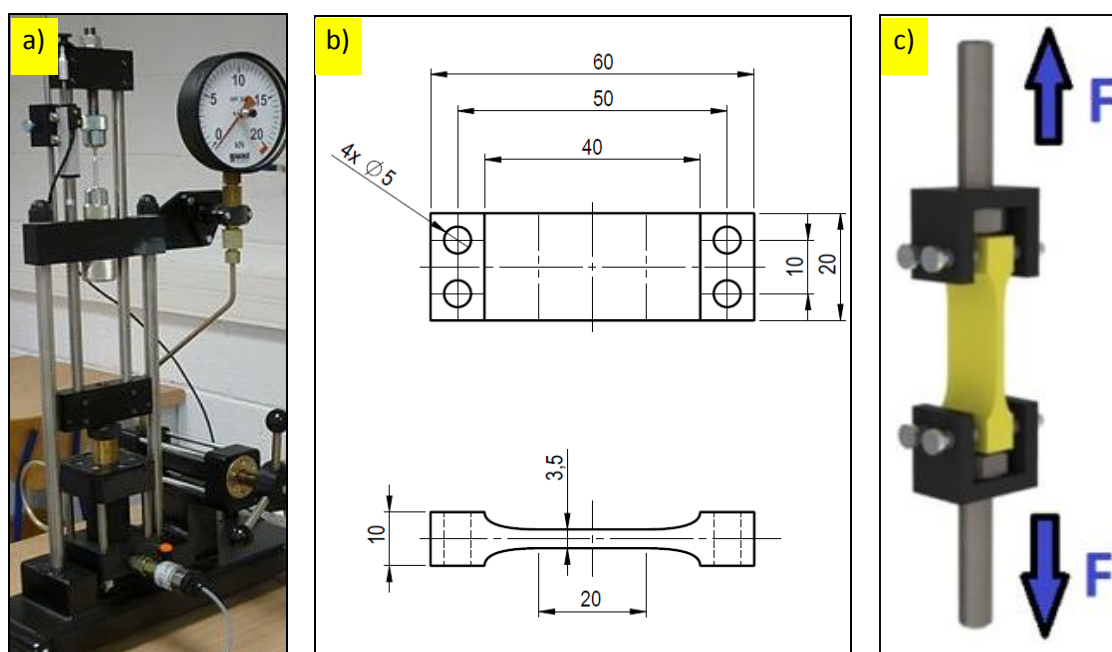
Na podstawie powyższej analizy, określono, że celem pracy będzie zbadanie wpływu parametrów technologicznych metody RP na parametry wytrzymałościowe obiektu, a dalej zaproponowanie wytycznych projektowych dla każdej z badanych metod i materiałów, a dalej porównanie ich ze sobą w przypadku budowy kształtów typu „skorupa” lub „część maszyny”. Z tego względu nie planuje się porównywania metod RP z metodami przemysłowymi przetwórstwa tworzyw sztucznych.

W niniejszym artykule przedstawiono pierwszy etap prac, który dotyczył zrywania próbek wykonanych w różnych ustawieniach wybranymi metodami RP: FDM (Fused Deposition Modeling) z czystego ABS, LOM (Laminated Object Manufacturing) z folii PCV, PJM (PolyJet Modeling) z żywicy akrylowej, 3DP (3D Printing) z proszku na bazie gipsu infiltrowanego żywicą epoksydową. Ponadto w przygotowaniu jest przeprowadzenie prób z innymi materiałami przetwarzanymi metodą FDM (dot. to maszyn FORTUS tj. ABS-M30, PC-ABS, PC, ULTEM 9085) oraz przebadanie próbek z proszku poliamidowego spiekanego metodą SLS. Następnym przygotowywanym krokiem jest próba statyczna ściskania.

## **2. Badania zrywania**

Badania statycznego rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej G.U.N.T. WP 300 będącej na wyposażeniu SiMR PW (rys. 1a). Próbką poddawana zrywaniu została zmodyfikowana względem wytycznych normatywnych [1,4,5] ze względu na możliwości dostępnej maszyny (mocowanie i przytrzymywanie próbek oraz zakres pomiarowy).

Ze względu na koszty prototypowania, wymiary próbek zostały zmodyfikowane (rys. 1b), a ich mocowanie na maszynie zrealizowano poprzez dodatkowe uchwyty w kształcie ceowników (rys.1c).



Rys. 1. Widok na maszynę wytrzymałościową G.U.N.T. WP 300 (a), wymiary próbki użytej do prób zrywania (b) oraz sposób mocowania ich na maszynie (c).

## 2.1. Wyniki próbek z metody FDM

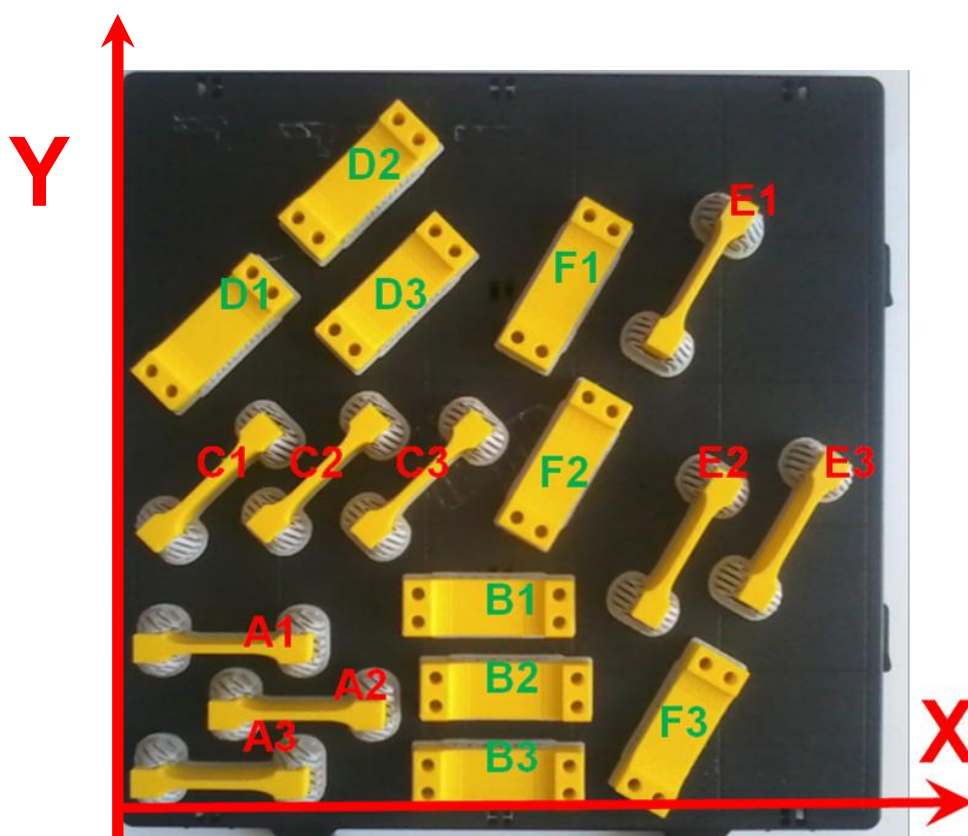
Wykonano szereg próbek z czystego tworzywa termoplastycznego ABS o kolorze żółtym wykonanych na maszynie 3D Dimension BST 1200 firmy Stratasys. To tworzywo dostarczane w postaci kartridży oznaczane jest jako P400. Dla tego materiału producent podaje na kartach materiałowych następujące parametry wytrzymałościowe (rys.2) i odnoszą się one do obiektu zbudowanego na płasko (nie ma danych dot. wypełnienia i ustawienia na płaszczyźnie XY).



MECHANICAL PROPERTIES*		<i>Build orientation is on side edge</i>	
	test method	Imperial	Metric
Tensile Strength, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	3,200 psi	22 MPa
Tensile Modulus, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	236,000 psi	1,627 MPa
Tensile Elongation, Type 1, 2 in/min (51 mm/min) 0.125	ASTM D638	6%	6%
Flexural Delamination	ASTM D790	2,000 psi	14 MPa
Flexural Strength	ASTM D790	6,000 psi	41 MPa
Flexural Modulus	ASTM D790	266,000 psi	1,834 MPa
IZOD Impact, notched, (Method A, 73° (23° C))	ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m

Tab. 2. Parametry wytrzymałościowe dla materiału ABS (ozn. handlowe P400) przetwarzanego w maszynach Dimension BST 1200 [13]. (dane nie weryfikowane przez autorów artykułu).

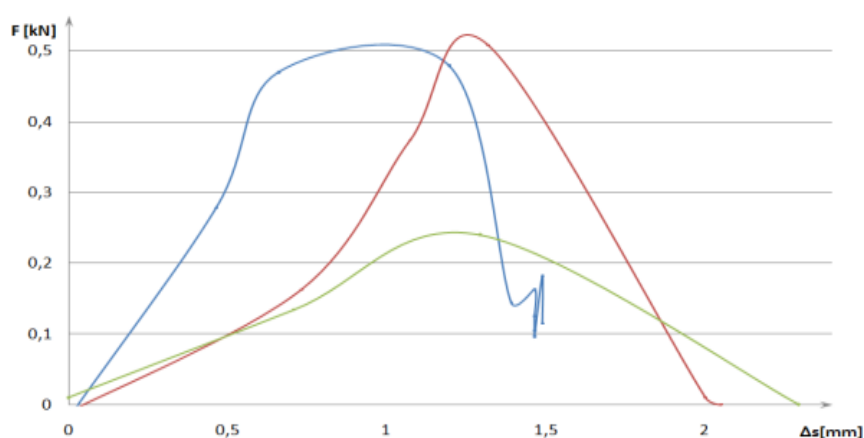
W badaniach autorzy do budowy próbek do zrywania zastosowali wypełnienie „pełne” (solid – normal), a grubość warstw ustawiono na 0,254 mm. Próbki drukowane były na płasko (w zestawach po 6 sztuk) i bokiem (w zestawach po 3 sztuki) w 3 różnych ustawieniach względem osi X pod kątem 0°, 45° i 60° (rys 2). Celem tego było sprawdzenie wpływ globalnego położenia próbki oraz kierunku ułożenia włókien wypełnienia (wewnątrz warstw) na jej wytrzymałość na rozciąganie.



Rys. 2. Widok na ustawienie zestawów próbek podczas wydruku (wraz z ozn. serii).

Na wszystkich poniższych wykresach i rysunkach (w tym podrozdziale) widoczne są przebiegi siły rozciągającej w funkcji wydłużenia, a na zdjęciach miejsca

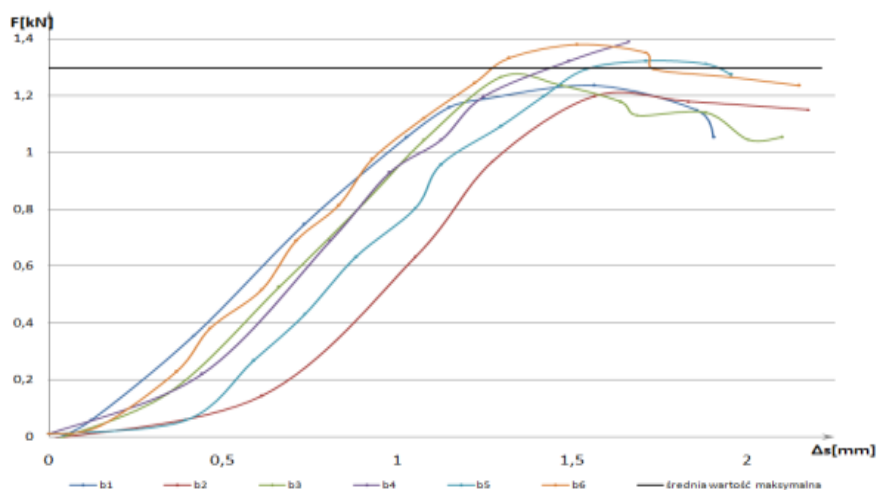
rozerwania jednej z próbek. Na rys. 3 i 4 pokazano wyniki dla serii A, czyli próbki ułożone wzdłuż osi X, bokiem (średnia siła rozrywająca 0,4 kN). Na rys. 5 i 6 widoczne są wyniki dla serii B - próbki ułożone wzdłuż osi X, na płasko (średnia siła rozrywająca 1,3 kN). Na rys. 7 i 8 jest wykres dla serii C - próbki ułożone pod kątem  $45^\circ$  do osi X, bokiem (średnia siła rozrywająca 0,31 kN). Na rys. 9 i 10 zawarto wyniki dla serii D, gdzie próbki ułożone były pod kątem  $45^\circ$  do osi X, na płasko (średnia siła rozrywająca 1,16 kN). Seria E - próbki ułożone pod kątem  $60^\circ$  do osi X, bokiem (średnia siła rozrywająca 0,56 kN) pokazana została na rys 11 i 12, zaś seria F - próbki ułożone pod kątem  $60^\circ$  do osi X, na płasko (średnia siła rozrywająca 1,19 kN) pokazana została na rys 13 i 14.



Rys. 3. Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla serii A - próbki ułożone wzdłuż osi X.



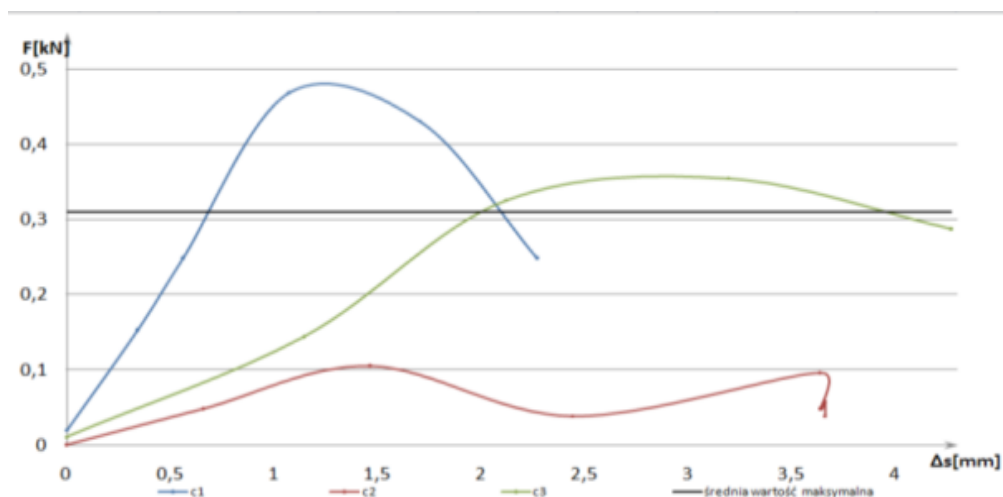
Rys. 4. Widok na próbkę z serii A zniszczoną poprzez rozwarstwienie i wyrwanie jednego z boków. Jest to przykład ustawienia nie zalecanego do druku.



Rys. 5. Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla serii B - próbki ułożone wzdłuż osi X, na płasko.



Rys. 6. Widok na próbkę z serii B zniszczoną poprawnie. Jest to przykład ustawienia zalecanego do druku.

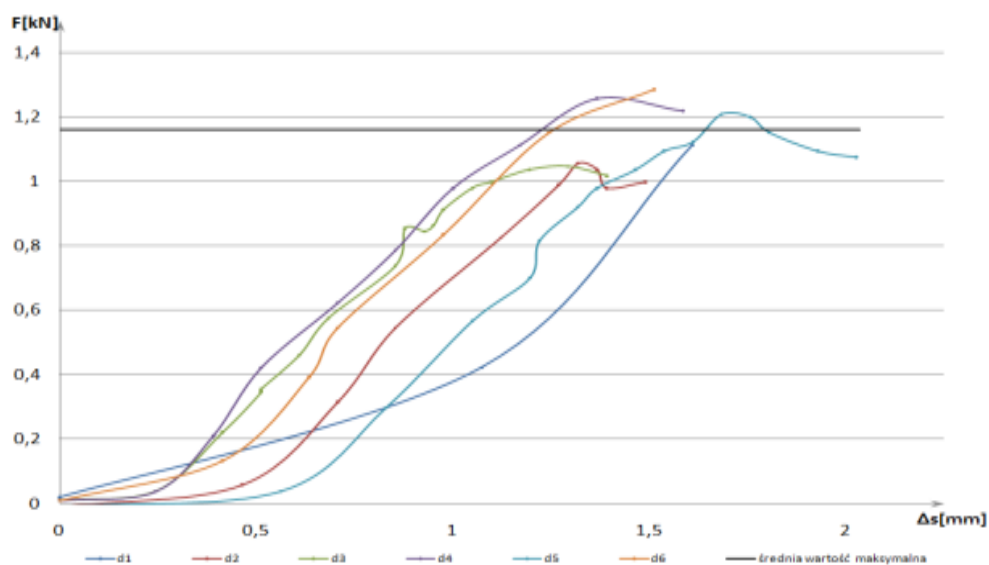


Rys. 7 Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla serii C - próbki ułożone pod kątem  $45^\circ$  do osi X, bokiem.





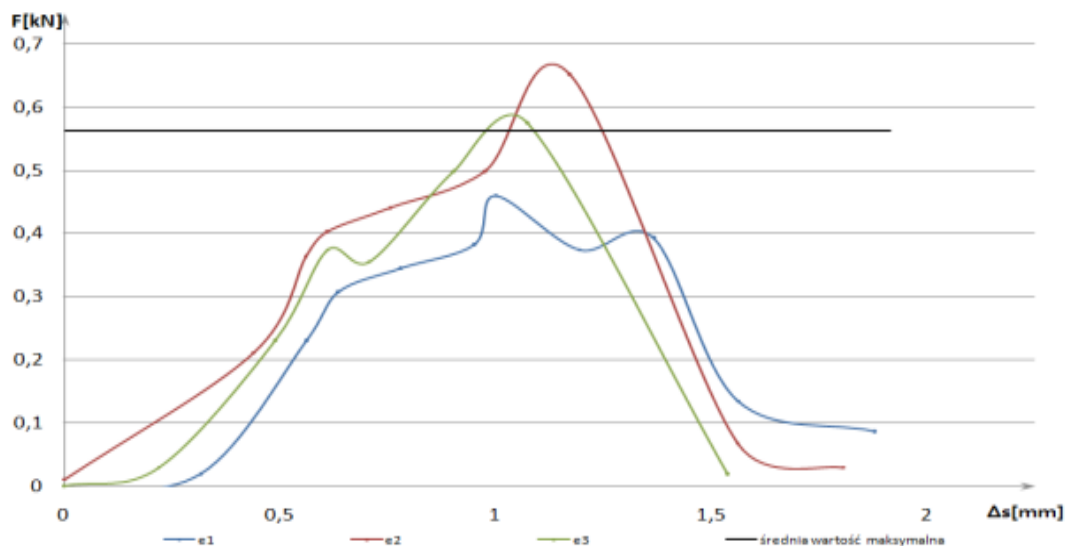
Rys. 8. Widok na próbkę z serii C zniszczoną poprzez rozwarstwienie i wyrwanie części jednego z otworów. Jest to przykład ustawienia nie zalecanego do druku.



Rys. 9 Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla serii D – ułożone pod kątem 45° do osi X, na płasko.



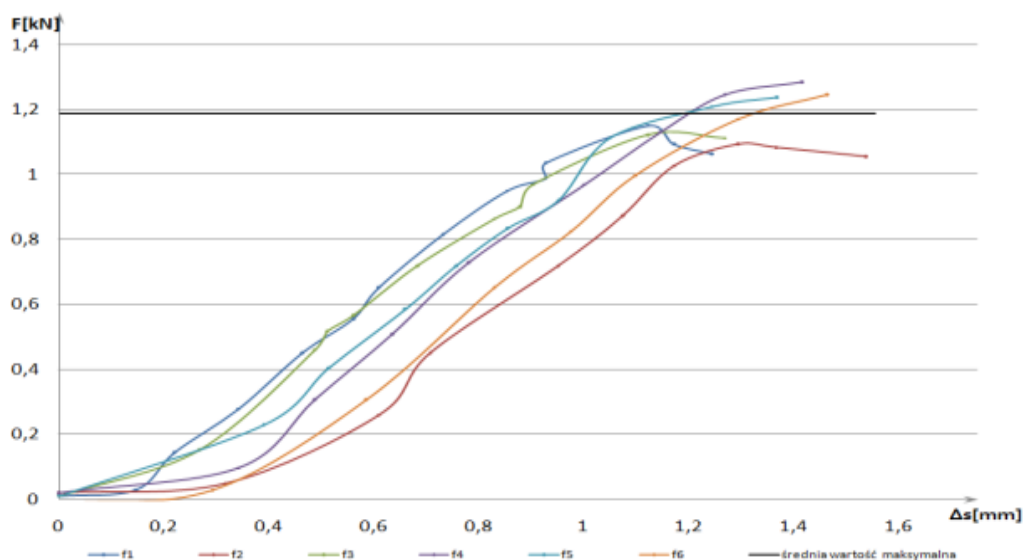
Rys. 10. Widok na próbkę z serii D zniszczoną poprawnie. Jest to przykład ustawienia zalecanego do druku.



Rys. 11 Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla serii E – ułożone pod kątem  $60^\circ$  do osi X, na płasko.



Rys. 12. Widok na próbkę z serii E zniszczoną poprzez rozwarstwienie i wyrwanie części jednego z otworów. Jest to przykład ustawienia nie zalecanego do druku.



Rys. 13 Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla serii F – próbki ułożone pod kątem  $60^\circ$  do osi X, na płasko.

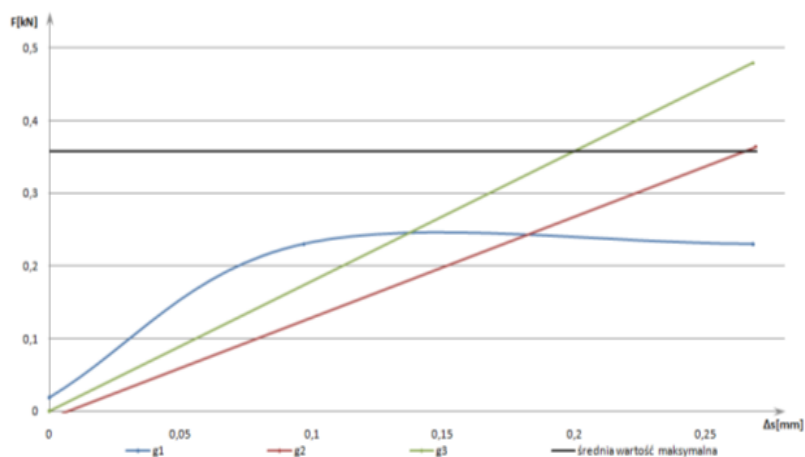


Rys. 14. Widok na próbkę z serii F zniszczoną poprawnie. Jest to przykład ustawienia zalecanego do druku.

## 2.2. Wyniki próbek z metody 3DP

Dzięki pomocy Wydz. Wzornictwa ASP w Warszawie próbki wykonano w na maszynie Spectrum Z-510 firmy Z-Corporation. Do budowy próbek zastosowano proszek na bazie gipsu ZP150, który łączony był standardowym, bezbarwnym lepiszczem ZB60. Grubość budowanej warstwy ustalono na 0,089 mm. Po wydruku zastosowano kilkugodzinne wygrzewanie w maszynie, a potem ręczne infiltrowanie żywicą epoksydową (odpowiednika ozn. handlowo jako Z-Max). Próbki wykonano na płasko (poziomo), wzdłuż osi X. Podczas badania siły rozrywania na maszynie wytrzymałościowej, materiał zachowywał się jak ciała kruche, bez odkształcenia plastycznego (rys. 16). Przy relatywnie niewielkiej sile rozciągającej następowało kruche pęknięcie przy niezauważalnie małym odkształceniu. W wyniku pomiarów

określono, że średnia siła rozrywająca równa około 0,36 kN (rys. 15), przy czym było to na granicy czułości systemu pomiarowego maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 15 Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla próbek z metody 3DP.



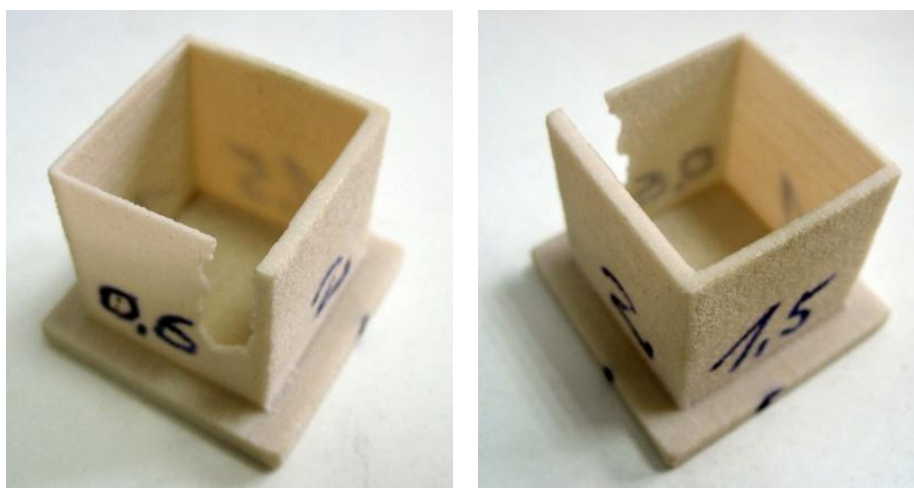
Rys. 16. Widok na zerwaną próbkę wykonaną w metodzie 3DP.

	Z Corp zp150-Z-Max ACTUAL	Z Corp zp150-Z-Bond ACTUAL
Tensile Strength	26 MPa	14 MPa
Tensile Elongation	0.2%	0.2%
Flexural Strength	44 MPa	31 MPa
Flexural Modulus	10,680 MPa	7,160 MPa
Shore Hardness	87 D	81 D
Heat Deflection Temperature @ 66 psi	115°C	112°C
Compression strength	98 MPa	-

Tab. 3. Parametry wytrzymałościowe dla proszku ZP150 infiltrowanego Z-Bond przetwarzanego w maszynach Spectrum Z-510 firmy Z-Corp [14]. Nie wiadomo nic o

tym jak próbka była położona w komorze roboczej podczas druku 3D.  
(dane nie weryfikowane przez autorów artykułu).

Dla metody 3DP przeprowadzono badania dodatkowe. Wydrukowano rurę kwadratową o różnej grubości ścianek, odpowiednio 0,6, 1, 1,5 i 2mm, wysokości 20mm na podstawie o wymiarach 35x35x1mm. Ścianka o najmniejszej grubości odkształciła się podczas wyjmowania z komory roboczej maszyny, a następnie wykruszyła się podczas wydmuchiwania niezestalonego proszku (rys. 17 ). Rura kwadratowa została wydrukowana w maszynie tak, aby podstawa była równoległa do płaszczyzny XY, a krawędzie podstawy były zgodne z osiami X i Y.



Rys. 17. Widok na rurę kwadratową wykonaną w 3DP do testu grubości ścianek.

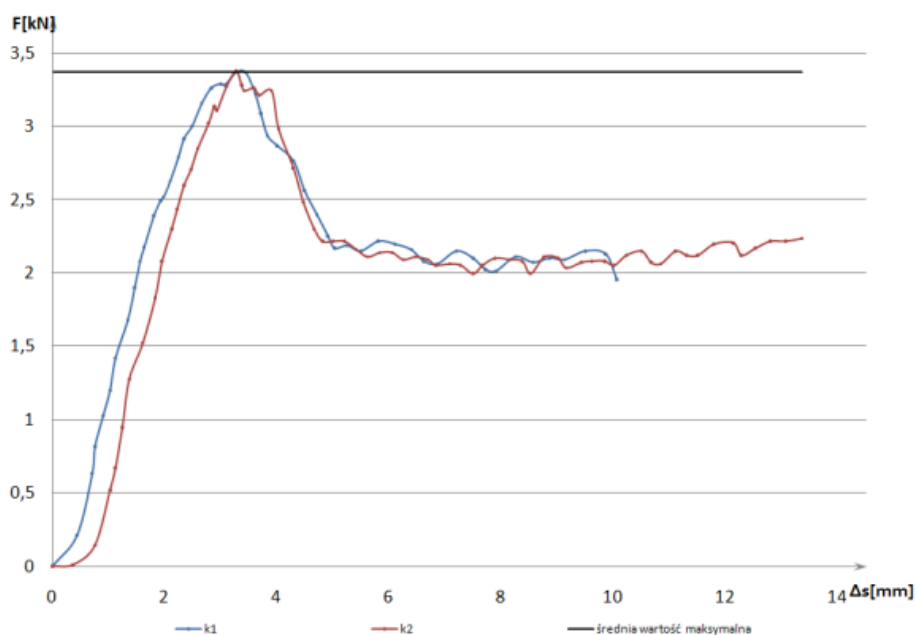
### 2.3. Wyniki próbek z metody PolyJet

Próbki wykonano na Wydz. Wzornictwa ASP w Warszawie na maszynie Eden 250 firmy Objet. Do ich wykonania użyto bezbarwnej żywicy akrylowej (o ozn. handlowym FullCure720) o dużej przejrzystości i lekko słomkowym odcieniu. W maszynach Eden inicjatorem procesu polimeryzacji jest stale świecąca podczas pracy lampka UV. Wydruk wykonano dla grubości warstwy równej 0,016 mm. Próbki ustawiono wzdłuż osi X, na płasko (poziomo). Po wydruku 3D próbki umyto pod ciśnieniem czystą wodą z materiału podporowego otaczającego cały kształt.

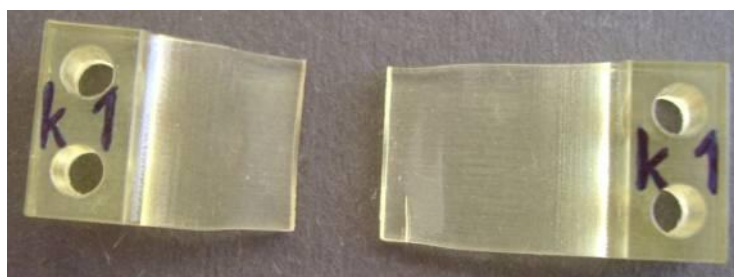
Z uwagi na wysokie koszty, wydrukowane zostały tylko dwie próbki, przy czym różnice w wynikach ich prób były nieznaczne. Średnia siła rozrywająca równa była 3,37 kN (rys. 18), co daje prawie trzykrotnie lepszą wartość względem próbek z



czystego ABS produkowanych metodą FDM (wg danych opisanych wcześniej). Rozciągana próbka sporo się odkształciła (rys. 19) – średnio prawie 3,6 mm.



Rys. 18 Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla próbek z metody PJM.



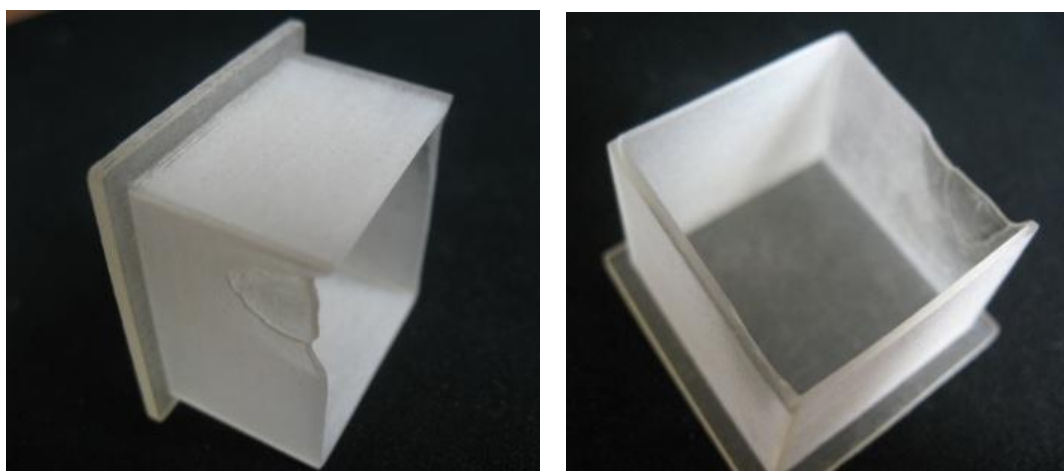
Rys. 19. Widok na zerwaną próbkę wykonaną w metodzie PJM.

W próbach nie analizowano wpływu temperatury na ich wytrzymałość. W przypadku żywic akrylowych wzrost temperatury powyżej 40-50°C (tab. 2) powoduje mięknięcie materiału i ich płynięcie, a więc zmianę kształtu.

FullCure720					
Property	ASTM	Metric		Imperial	
Tensile Strength	D-638-03	Mpa	60	psi	8744
Modulus of Elasticity	D-638-04	Mpa	2870	psi	416150
Elongation at Break	D-638-05	%	20	%	20
Flexural Strength	D-790-03	Mpa	76	psi	10991
Flexural Modulus	D-790-04	Mpa	1718	psi	249110
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	24	ft lb/in	0.4
Shore Hardness	Scale D	Scale D	83	Scale D	83
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	81	Scale M	81
HDT at 0.45 Mpa	D-648-06	°C	48	°F	119
HDT at 1.82 Mpa	D-648-07	°C	44	°F	112
Tg	DMA, E''	°C	49	°F	120
Ash Content	USP 28	%	<0.03	%	<0.03
Water Absorption	D570-98 24 Hr	%	1.53	%	1.53

Tab. 4. Parametry wytrzymałościowe dla materiały FullCure720 przetwarzanego w maszynach serii Eden firmy Objet [15]. Nie wiadomo nic o tym jak próbka była położona w komorze roboczej podczas druku 3D.(dane nie weryfikowane przez autorów artykułu).

Dla metody PJM przeprowadzono badania dodatkowe. Wydrukowano rurę kwadratową o różnej grubości ścianek, odpowiednio 0.6, 0.8, 0.9, 1mm, wysokości 20mm na podstawie o wymiarach 35x35x1mm. Ścianka o najmniejszej grubości odkształciła się i lekko zdarła pod wpływem strumienia wody wmywającej materiał podporowy. Na rys. 20 widoczne są ubytki na najcieńszej ze ścianek.

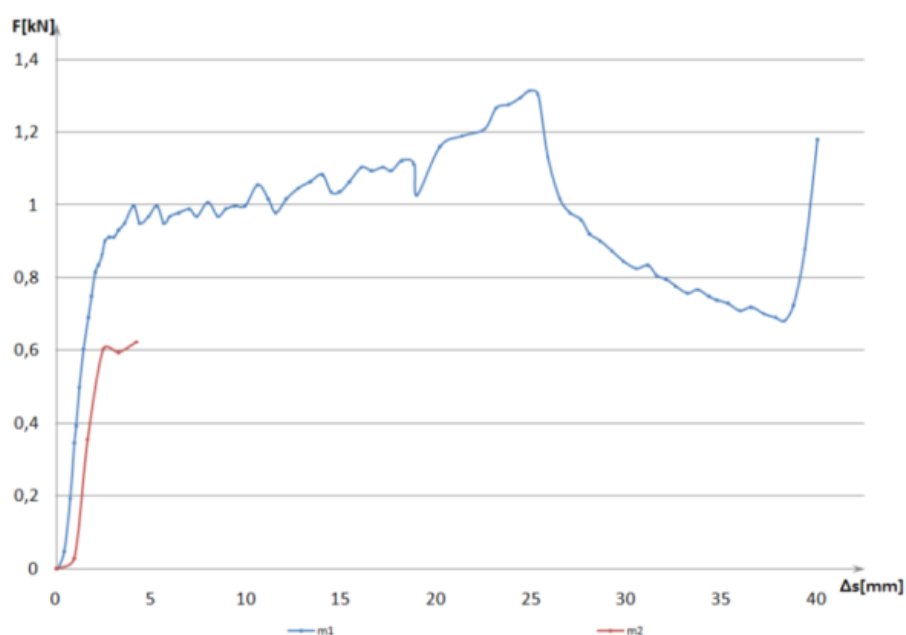


Rys. 20. Widok na rurę kwadratową wykonaną w PJM do testu grubości ścianek.

## 2.4. Wyniki próbek z metody LOM

Dzięki uprzejmości firmy 3D Master z Warszawy wykonano szereg próbek z miodowej folii PCV o grubości ok. 0,1 mm (ozn. handlowe SolidVC) na maszynie Solido SD/300Pro. Warstwy folii były łączone standardowo dedykowanym tym maszynom klejem SolidGL-101.

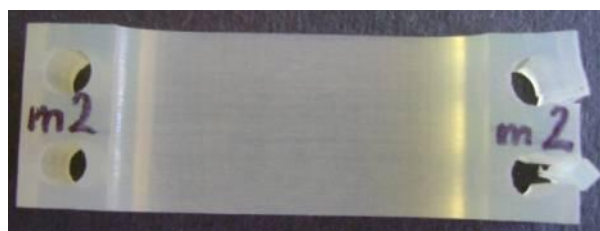
Próbki ułożono wzdłuż osi X (prostopadle do rozwijanej z bębna folii) w dwóch ustawieniach – poziomo (na płasko) i pionowo na dłuższym boku. Na rys. 21 widoczne są przebiegi siły rozciągającej w funkcji wydłużenia, a na rys. 22 i 23 widoczne są zniszczone podczas badania próbki. Ustawienie pionowe (patrz rys. 23) spowodowało osłabienie otworów mocujących próbkę w maszynie wytrzymałościowej. Kawalek materiału został wyrwany z otworu mocującego, natomiast przewężenie próbki pozostawało nienaruszone (siła rozrywająca wyniosła 0,6 kN). W przypadku ustawienia próbki na płasko (rys. 22), próba była poprawna – w momencie zerwania wydłużenie było na poziomie 100% wydłużenia przed zerwaniem. Średnia siła rozrywająca wyniosła 1,313 kN.



Rys. 21. Wykres siły rozciągającej w funkcji wydłużenia dla próbek z metody LOM.



Rys. 22. Widok na próbkę z metody LOM (wykonanej na płask) zniszczoną poprawnie. Jest to przykład ustawienia zalecanego do druku.



Rys. 23. Widok na próbkę z metody LOM (wykonanej na dłuższym boku) zniszczoną poprzez rozwarstwienie i wyrwanie części jednego z uchwytów. Jest to przykład ustawienia nie zalecanego do druku.

SOLIDVC <sup>®</sup> MATERIAL		
□ Rigid Polyvinylchloride compound		
□ Bonded with liquid adhesive		
Properties	Condition	Value
Appearance		Amber, Cream, Black, and Red
Density, g/cm <sup>3</sup>	25° C (77° F)	1.3
Tensile strength	ASTM D 638 25° C	27.8 – 32.4 MPa
Elongation at break, %	ASTM D 638 25° C	152 – 167 [%]
Tensile modulus	MPa ASTM D 638 25° C	730 – 1018 MPa
Izod notched impact	ASTM D 256 06	1206 – 1282 [J/m]
Heat deflection temperature	ASTM D 638 @ 264 psi	57 – 60 ° C (134.6 – 140 ° F)

Tab. 5. Parametry wytrzymałościowe dla folii PCV przetwarzanej w maszynach Solido SD/300Pro [16]. Nie wiadomo nic o tym jak próbka była położona w komorze roboczej podczas druku 3D. (dane nie weryfikowane przez autorów artykułu).

### 3. Podsumowanie

Wyniki badań w postaci średniej sił krytycznych zostały przedstawione w tabeli poniżej (dane dla najlepszego ustawienia, co opisano wcześniej):

Nazwa metody RP:	3DP	LOM	FDM	PolyJet
Materiał próbki	proszek gipsowy impregnowany żywicą epoksydową	klejone warstwy folii PCV o	wytłaczane nitki czystego tworzywa ABS	żywica akrylowa utwardzana światłem UV
Siła krytyczna dla najlepszego ustawienia	0,357 kN	1,313 kN	1,216 kN	3,37 kN

Na dotychczas z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski ogólne:

- Na obecnym etapie badań zaobserwowano, że żywica akrylowa stosowana w metodzie PolyJet jest zdecydowanie wytrzymalsza od czystego ABS w FDM.
- W metodach FDM i LOM ustawienie wytwarzanego elementu w przestrzeni roboczej drukarki ma bardzo duży wpływ na jego wytrzymałość na rozciąganie.
- W przypadku wszystkich zaprezentowanych metod RP zaobserwowano, że na wytrzymałość próbek na rozciąganie ma wpływ jednorodność ich struktury wewnętrznej. .

### 4. Literatura

- [1] Bełzowski A.: Podstawowe wiadomości o próbach wytrzymałości materiałów kompozytowych. Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej 2007.
- [2] Galeta T., Raos P., Somolanji M.: Impact of structure and building orientation on strength of 3D printed models. KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe. 10/2012. Chorwacja.



- [3] Gościański M., Ciechacki R., Dudziak B.: Technologiczne uwarunkowania procesu klejenia elementów z terpolimeru ABS w aspekcie wykonywania modeli metodą FDM. „Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering” 2012, Vol. 57(1).
- [4] Normy ISO 3167, ISO 294 - dotyczące wykonywania i geometrii kształtek z tworzyw termoplastycznych stosowanych do badań.
- [5] Norma ISO 527 - oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu.
- [6] Novakova-Marcincinova L., Novak-Marcincin J.: Testing of Materials for Rapid Prototyping Fused Deposition Modelling Technology. World Academy of Science, Engineering and Technology 70 2012
- [7] Raju B.S. (i inni): Determining the influence of layer thickness for rapid prototyping with stereolithography (SLA) process. International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(7), 2010, 3199-3205.
- [8] Siemiński P., Wojs M: Wykonanie dyszy Venturiego metodami szybkiego prototypowania zastosowane do badań w odpieniaczach akwarystycznych. Miesięcznik Mechanik nr 2/2011, str. 148.
- [9] Siemiński P.: Zastosowanie druku przestrzennego we wzornictwie przemysłowym. Miesięcznik Mechanik nr 12/2008, str. 1066.
- [10] Siemiński P. Denisuk P.: Wykonanie krótkiej serii obudów z zastosowaniem drukowanego modelu wzorcowego oraz form silikonowych. Miesięcznik Mechanik nr 1/2010, str. 66.
- [11] Skawiński P. Badera P.: Rekonstrukcja nadwozia samochodu syrena sport w środowisku programów CAD. Miesięcznik Mechanik nr 1/2009, str. 70-71.
- [12] Surawski J., Siemiński P.: Szybkie prototypowanie w projektowaniu wzorniczym (metody PolyJet i 3D Printing). Miesięcznik Mechanik nr 11/2009, str. 951
- [13] Materiały informacyjne firmy Stratasys z USA, producenta maszyn do szybkiego prototypowania w technologii FDM. [www.staratasys.com](http://www.staratasys.com), [www.fortus.com](http://www.fortus.com), [www.dimensionprinting.com](http://www.dimensionprinting.com)
- [14] Materiały informacyjne firmy Z-Corp z USA, producenta maszyn do szybkiego prototypowania w technologii 3DP. [www.zcorp.com](http://www.zcorp.com)
- [15] Materiały informacyjne firmy Objet Geom. z Izraela, producenta maszyn do szybkiego prototypowania w technologii PJM. [www.objet.com](http://www.objet.com),

- [16] Materiały informacyjne firmy Solido Ltd., producenta maszyn do szybkiego prototypowania w technologii LOM. [www.solido3d.com](http://www.solido3d.com)
- [17] Kret M.: Drukarki 3D – porównanie. Miesięcznik Mechanik nr 11/2010, str. 864-866 (polskie opracowanie na podstawie T. A. Grimm & Associates, Inc: 3D Printer Benchmark - North American Edition. [www.tagrimm.com/benchmark-2010](http://www.tagrimm.com/benchmark-2010)
- [18] Chlebus E. (red.): Innowacyjne technologie Rapid Prototyping - Rapid Tooling w rozwoju produktu. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.