

Wybrane cechy geometryczne i wskaźniki wytrzymałościowe elementów wykonanych metodą modelowania uplastycznionym tworzywem

Karol Pepliński^{1), *}, Piotr Czyżewski¹⁾, Dawid Górecki²⁾, Dariusz Sykutera¹⁾, Marek Bieliński¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.198

Streszczenie: W ramach pracy zbadano serię próbek z terpolimeru akrylonitryl-butadien-styren, wykonanych metodą modelowania uplastycznionym tworzywem (FDM), która należy do najpopularniejszych metod wytwarzania przyrostowego. Do otrzymania próbek użyto drukarki 3D Dimension Elite BST 786 (Stratasys). Próbki referencyjne otrzymano metodą wtryskiwania z zastosowaniem wtryskarki laboratoryjnej Battenfeld 350 PLUS. Określono wpływ grubości warstwy tworzywa oraz orientacji modelu w przestrzeni roboczej urządzenia na właściwości mechaniczne wyrobów, a także na ich dokładność wymiarową. W tym celu wybrano trzy różne kąty orientacji wytwarzanych przyrostowo próbek względem osi Y (0°, 45° lub 90°) oraz dwie grubości warstwy (0,254 lub 0,178 mm). Stwierdzono, że właściwości próbek wykonanych metodą FDM były z reguły gorsze niż właściwości próbek otrzymanych metodą wtryskiwania oraz że najlepszymi właściwościami charakteryzowały się próbki wytwarzane z zastosowaniem większej grubości warstwy i kąta orientacji wynoszącego 90°.

Słowa kluczowe: modelowanie uplastycznionym tworzywem, wtryskiwanie, właściwości mechaniczne, dokładność wymiarowa, wskaźniki ekonomiczne, terpolimer akrylonitryl-butadien-styren.

Selected geometrical features and strength indicators of elements manufactured by fused deposition modeling technology

Abstract: In this work, we investigated a series of specimens made of acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer using fused deposition modeling (FDM) method, currently one of the most popular additive manufacturing techniques. We used Dimension Elite BST 786 (Stratasys) 3D printer for the manufacture of specimens, while reference samples were produced by injection molding using laboratory injection molding machine Battenfeld 350 PLUS. The effect of the plastic layer thickness and orientation of the model in the device workspace on the mechanical properties and dimensional stability of the products was studied. For this purpose, three different specimen orientation angles with respect to Y axis: 0° (flat), 45° (hemispheric) and 90° (lateral) and two layer thicknesses: 0.254 mm and 0.178 mm were assumed. It was found that the properties of the specimens produced by FDM method are generally less advantageous than those of injection-molded samples. The best specimen properties were obtained using the higher layer thickness and orientation angle of 90°.

Keywords: fused deposition modeling, injection molding, mechanical properties, dimensional accuracy, economical indices, acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer.

Dobre właściwości przetwórcze materiałów polimerowych [1] dają możliwość kreowania nowych, innowacyjnych zastosowań [2]. Alternatywą dla technologii przetwórstwa o charakterze masowym (np. wtryskiwanie, wytłaczanie), mogą być technologie jednostkowe [3, 4]. Przykładem mogą być tzw. technologie przyrostowe, w których stosuje się wszystkie znane w przetwórstwie tworzyw

postacie materiałów polimerowych (stan płynny, proszek, granulaty lub tzw. filament, a więc wytłoczyny) [5–8].

Wytwarzanie przyrostowe (AM, z ang. *additive manufacturing*) to zbiór technologii umożliwiających otrzymanie wytworu fizycznego z wykorzystaniem modelu 3D CAD. W tym przypadku nie ma konieczności przygotowania narzędzi (np. form wtryskowych), czy projektowania złożonego procesu technologicznego [1, 3]. Komercyjnie dostępnych jest wiele technologii przyrostowych, których rynek w roku 2009 szacowany był na 1,9 mld \$ [4], w roku 2013 na 2,5 mld \$, a w roku 2018 osiągnie 16,2 mld \$ [9]. Współcześnie AM można uważać za podstawowe składowe rozwijające się nowego

¹⁾ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Przetwórstwa i Recyklingu Tworzyw, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 87-796 Bydgoszcz.

²⁾ Fado, ul. Solna 7a, 85-862 Bydgoszcz.

^{*} Autor do korespondencji; e-mail: karolpep@utp.edu.pl

trendu przemysłowego, który określa się jako „Przemysł 4.0” (*“Industry 4.0”*) [10].

Obecnie w grupie technik AM jedną z najpopularniejszych metod jest modelowanie uplastycznionym tworzywem FDM (z ang. *fused deposition modeling*) [1, 6]. Duży wybór dostępnych materiałów termoplastycznych, urządzeń oraz szeroki zakres możliwych do użycia parametrów procesowych sprawia, że technologia ta ma zastosowanie do wytwarzania modeli koncepcyjnych, prototypów i form prototypowych, a także gotowych wyrobów [1–3]. Najczęściej stosowanym w technologii FDM materiałem jest terpolimer akrylonitryl-butadien-styren (ABS) w postaci filamentu o nazwie handlowej ABSplus-P430 [1, 11].

Jakość produktów wytwarzanych metodą FDM zależy od szeregu parametrów procesowych, m.in.:

- sposób i gęstość wypełnienia warstw tworzywa,
- współczynniki kompensacji skurczowej w płaszczyźnie X-Y oraz osi Z,
- grubość warstwy,
- orientacja modelu,
- kąt i szerokość rastra,
- sposób wypełnienia struktur podporowych.

W przypadku urządzenia Dimension Elite BST 786, parametry zmienne ograniczone są do nastawy grubości warstwy, orientacji modelu, gęstości wypełnienia oraz sposobu wypełnienia struktur podporowych. Grubość warstwy tworzywa nanoszonej przez dyszę odnosi się do wartości przemieszczenia platformy roboczej w osi Z. Parametr ten jest zwykle związany z rodzajem zastosowanej dyszy wytłaczającej [11, 12]. Natomiast orientacja odnosi się do pochylenia modelu względem osi X, Y oraz Z. Płaszczyzna podziału na warstwy jest zawsze równoległa do płaszczyzny podstawy platformy oraz prostopadła do kierunku wytwarzania, tj. wektora normalnego względem płaszczyzny podziału [7, 8, 13].

Badaniem wpływu orientacji wytwarzanych elementów w przestrzeni roboczej drukarki na wybrane właściwości użytkowe, oznaczane podczas próby statycznego rozciągania, zajmowało się szereg zespołów badawczych [13, 14–20]. W badaniach tych potwierdzono tezę o obniżaniu się wytrzymałości elementów w kierunkach obciążeń zbliżonych do kierunku budowanego modelu (oś Z). W publikacji [14] stwierdzono, że w przypadku występowania obciążeń rozciągających należy dążyć do tego, aby przebiegały one równoległe do kierunku występowania najdłuższych włókien konturu, a jednocześnie nie były równoległe do kierunku wytwarzania. W pracy [15] rozszerzono badania o wpływ odległości między rastrem a konturem oraz odległości między rastrami na właściwości wytworów rastra. Inni badacze [16] przeprowadzili analizę wpływu cech geometrycznych rastra na właściwości wytrzymałościowe próbek z poliwęglanu. Analiza ta umożliwiła ustalenie cech skutkujących 16-proc. wzrostem wytrzymałości na rozciąganie próbek, względem próbek wytworzonych przy standardowych ustawieniach. Wpływ cech geometrycznych rastra na efekty użytkowe wytwarzanych ele-

mentów opisano w pracach [17–19]. Badania te wykazały, że nieznacznie wyższą wytrzymałość na rozciąganie uzyskuje się przy zastosowaniu większej grubości warstwy, co wyjaśniano mniejszą liczbą adhezyjnych połączeń między poszczególnymi warstwami. Na podstawie analizy wpływu kierunku narastania warstw na ugięcie belek [21] stwierdzono, że mniejsze ugięcie uzyskuje się w przypadku próbek, w których poszczególne warstwy ułożone są równoległe względem przyłożonego obciążenia.

Wpływ orientacji modelu na udarność opisano m.in. w pracy [22]. Stwierdzono tam, że jedynie próbki o orientacji warstw tworzywa pod kątem 0° i 90° wykazują zdolność do przenoszenia niewielkich obciążeń dynamicznych. Określono przy tym, że udarność próbek wytwarzanych metodą FDM stanowi ok. 47 % udarności próbek wytwarzanych metodą wtryskiwania.

Wpływ parametrów procesowych na dokładność wymiarową elementów wytwarzanych w technologii FDM opisano w pracy [12]. Autorzy stwierdzili, że dokładność wymiarowa najbardziej zależy od orientacji modelu w przestrzeni roboczej urządzenia. W publikacji [23], wskazano, że najwyższą dokładność wymiarową uzyskuje się w przypadku orientacji próbek pod kątem 45° względem osi Y. W pracy [24] przedstawiono wyniki badań wpływu grubości warstwy, szerokości i kąta rastra oraz odległości między rastrami na uzyskiwaną jakość powierzchni oraz dokładność wymiarową. Autorzy potwierdzili, że najsilniejszy wpływ na uzyskiwaną dokładność wywiera grubość warstwy oraz szerokość rastra, które powinny być możliwie małe. Z kolei autorzy pracy [25] prowadzili badania mające na celu wybór optymalnego współczynnika kompensacji skurczowej dla urządzenia FDM. Efektem badań było wskazanie czynników mogących wpływać na dokładność wymiarową, tj. temperatury uplastyczniania oraz szybkości budowy modelu. Część najnowszych badań dotyczy optymalizacji FDM za pośrednictwem algorytmów samouczących [26] (z ang. *teaching based optimization algorithm*). W publikacji [27] przedstawiono z kolei metody projektowania DFM (z ang. *design for manufacturing*) w procesie FDM. Metoda ta opiera się na odpowiednim skompensowaniu powierzchni modelu na etapie jego projektowania. Inne podejście do problemu poprawy dokładności wymiarowej elementów wytwarzanych w technologii FDM przedstawiono w pracy [28], w której opisano system szybkiego prototypowania łączący frezarkę pięcioosiową oraz głowicę wytłaczającą, charakterystyczną dla technologii FDM. Zdaniem autorów, taka konstrukcja umożliwia znaczną poprawę dokładności wymiarowej oraz jakości powierzchni produkowanych wytworów.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Do wytworzenia próbek metodą FDM użyto kopolimeru akrylonitryl-butadien-styren (ABS-P430), firmy Stratasy. Kopolimer miał postać filamentu o średnicy $\phi = 1,68$ mm i masowym wskaźniku szybkości płynięcia

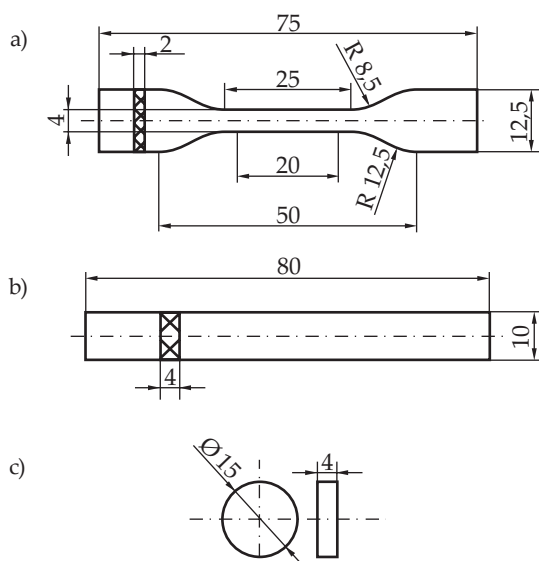
$MFR_{230\text{ }^{\circ}\text{C}/2,16\text{ kg}} = 38\text{ g}/10\text{ min}$. Jako materiał podporowy zastosowano filament P400SR Soluble Support Material tej samej firmy. Próbkę porównawczą (referencyjną) wytworzono metodą wtryskiwania tworzyw polimerowych. Jako materiał wsadowy wykorzystano kopolimer ABS, o nazwie handlowej Terluran GP-35 firmy Styrolution, charakteryzujący się zbliżoną wartością $MFR_{230\text{ }^{\circ}\text{C}/2,16\text{ kg}}$ wynoszącą 35 g/10 min. Granulat tworzywa przed procesem wtryskiwania suszono w temperaturze 80 °C przez 4 h w suszarce Binder KMF 115.

Przygotowanie próbek

Próbki do badań wytwarzano w technologii FDM wykorzystując urządzenie Dimension Elite BST 786 firmy Stratasys. Próbkę referencyjną wytwarzano za pomocą wtryskarki laboratoryjnej Battenfeld 350 PLUS, charakteryzującej się siłą zwarcia 350 kN. Kształty i wymiary próbek przedstawia rys. 1. W badaniach statycznego rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012 zastosowano kształtki badawcze typu 5A (technologia FDM, rys. 1a) oraz 1A (technologia wtryskiwania). W badaniach 3-punktowego zginania oraz badaniach udarności zastosowano typu 1 (rys. 1b, wg PN-EN ISO 178:2003 oraz PN-EN ISO 179:2010). W badaniach twardości zastosowano zgodnie z PN-EN ISO 878:2005 kształtki w technologii FDM, rys. 1c, a w technologii wtryskiwania próbki przygotowano z kształtek badawczych (uchwyt kształtki), wykorzystywanych również w badaniach statycznego rozciągania.

Proces wytwarzania próbek metodą FDM, realizowano stosując następujące, stałe parametry procesowe:

- temperatura wnętrza komory roboczej 75 °C,
- temperatura dyszy wytłaczającej 280 °C,

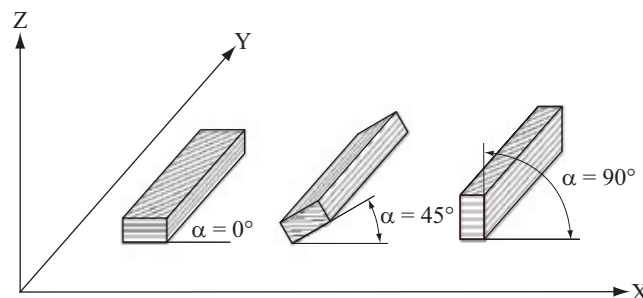


Rys. 1. Wymiary próbek do oznaczania właściwości podczas: a) statycznego rozciągania, b) 3-punktowego zginania oraz badania udarności i dokładności wymiarowej, c) badania twardości
Fig. 1. Dimensions of specimens for determination of the properties during: a) static tensile test, b) 3-point bend, impact and dimensional accuracy tests, c) hardness test

– gęstość wypełnienia wnętrza modelu – wypełnienie o wysokim zagęszczeniu.

Jako zmienne parametry procesu wytwarzania przyjęto:

- grubość warstwy tworzywa wynoszącą 0,254 mm lub 0,178 mm,
- kąt orientacji względem osi Y, który zgodnie z rys. 2 był równy 0° (orientacja płaska), 45° (orientacja półkątowa) lub 90° (orientacja boczna).



Rys. 2. Schemat orientacji modeli w przestrzeni roboczej drukarki względem osi Y (od lewej próbka o orientacji płaskiej, półkątowej i bocznej)

Fig. 2. Schematic of model orientation with respect to Y-axis in the 3D printer workspace (from the left: flat, hemispheric, and lateral orientation)

Proces wtryskiwania przeprowadzono stosując następujące parametry procesowe: czas wtrysku 1,1 s, ciśnienie wtrysku 52,5 MPa, ciśnienie docisku 43,8 MPa, czas docisku 12 s, czas chłodzenia 25 s. Temperatura pierwszej strefy układu uplastyczniającego wynosiła 240 °C, natomiast temperatura drugiej strefy układu uplastyczniającego, dyszy wtryskowej oraz układu gorąco kanałowego 250 °C.

Metodyka badań

Moduł sprężystości wzdłużnej, wytrzymałość na rozciąganie, moduł przy zginaniu oraz wytrzymałość na zginanie oznaczano za pomocą maszyny wytrzymałościowej Z030 firmy Zwick/Roell zgodnie z PN-EN ISO 527-1:2012 oraz PN-EN ISO 178:2003.

Udarność określano według PN-EN ISO 179:2010, używając młota wahadłowego HIT 50 firmy Zwick/Roell.

Do pomiaru twardości w sposób opisany w PN-EN ISO 878:2005 zastosowano twardościomierz Zwick/Roell 3106 (skala Shore'a D).

Dokładność wymiarową określano za pomocą suwmiarki MarCal 16ER o dokładności $\pm 0,01$ mm oraz używając skanera optycznego 3D ATOS II TripleScan firmy GOM.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Cechy mechaniczne elementów FDM

Wyniki pomiarów wybranych cech mechanicznych zamieszczono w tabeli 1 i na rys. 3–7 (jako wartości względne, w stosunku do właściwości próbek wtryskiwanych).

Na ich podstawie można stwierdzić, że nadanie zróżnicowanej makrostruktury poprzez orientowanie modeli w przestrzeni roboczej urządzenia względem osi Y, wywiera niewielki wpływ na własności oznaczane podczas próby statycznego rozciągania. Warstwowy charakter budowy wyrobów w technikach przyrostowych, realizowany w przypadku technologii FDM poprzez adhezyjne łączenie uplastycznionego materiału powoduje, że wytrzymałość modelu jest najmniejsza właśnie w miejscach łączenia warstw. Zatem zgodnie z wynikami badań opisywanymi w [13, 15], właściwości oznaczane podczas próby statycznego rozciągania ulegają pogorszeniu w miarę zbliżania się kierunku obciążenia do kierunku budowy modelu (wektorem prostopadłym do płaszczyzny podziału tego modelu na warstwy), a tym samym jego orientacji względem osi Z. W założeniach pracy przyjęto orientowanie modelu względem osi Y, zatem niezależnie od wartości kąta o jaki model został pochylony, kierunek jego wytwarzania pozostał prostopadły do kierunku działania siły przykładanej podczas badania. Stąd mimo występujących różnic w makrostrukturze próbek, oznaczone właściwości mechaniczne miały wartości zbliżone. Istotnych różnic nie zaobserwowano również w przypadku zmiany grubości warstwy, czego dowodzą wyniki przedstawione na rys. 3–5. Nieznaczne pogorszenie wytrzymałości na rozciąganie (σ_M) próbek o orientacji płaskiej i bocznej, wykonanych z zastosowaniem mniejszej grubości warstwy, jest prawdopodobnie spowodowane większą liczbą warstw, a tym samym większą liczbą występujących pomiędzy nimi połączeń adhezyjnych, co znajduje potwierdzenie w pracy [19].

W wyniku analizy wyników próby 3-punktowego zginania (tabela 1) ustalono, że niezależnie od zastosowanej grubości nakładanej warstwy najkorzystniejszy moduł przy zginaniu (E_f) uzyskuje się w przypadku pró-

bek o orientacji modelu pod kątem 90° względem osi Y. Spośród próbek wykonanych z zastosowaniem grubości warstwy równej 0,254 mm najwyższą wytrzymałością przy zginaniu odznaczają się próbki również zorientowane pod kątem 90°. Zastosowanie grubości warstwy wynoszącej 0,178 mm, skutkuje natomiast najwyższą wytrzymałością przy zginaniu próbek otrzymywanych w orientacji płaskiej. Wartość wydłużenia względnego przy wytrzymałości na zginanie (ϵ_f), niezależnie od zastosowanych parametrów procesowych, jest na zbliżonym poziomie.

Uzyskany rozkład wyników można tłumaczyć zależnością pomiędzy kierunkiem obciążenia a kierunkiem wytwarzania próbek. Szczególnie widoczne jest to w przypadku orientacji modelu pod kątami 0° i 90°. W pierwszym przypadku poszczególne warstwy próbki ułożone były prostopadle do kierunku działania obciążenia, zatem za pogorszenie właściwości odpowiadała adhezyjna forma połączenia na granicach kolejnych warstw materiału. Natomiast w przypadku orientacji pod kątem 90° poszczególne warstwy próbki przebiegały równolegle względem kierunku obciążenia. Mniej korzystne właściwości próbek zorientowanych podczas wytwarzania pod kątem 45°, w porównaniu z próbkami zorientowanymi pod kątem 0° (pomimo nieprostopadłego do obciążenia ułożenia warstw) może być spowodowane spiętrzeniem naprężeń normalnych (zginających) oraz stycznych (ścinających).

Wśród próbek o grubości nakładanej warstwy wynoszącej 0,254 mm najwyższą udarność, 27,36 kJ/m², odznaczały się próbki zbudowane z warstw zorientowanych względem osi Y pod kątem 90° (tabela 1). Gdy kąt ten wynosił 45° i 0° udarność była niższa, odpowiednio, o 9,3 i 31,1 %. Korzystniejsze właściwości próbki o orientacji bocznej, w porównaniu z próbką o orientacji pła-

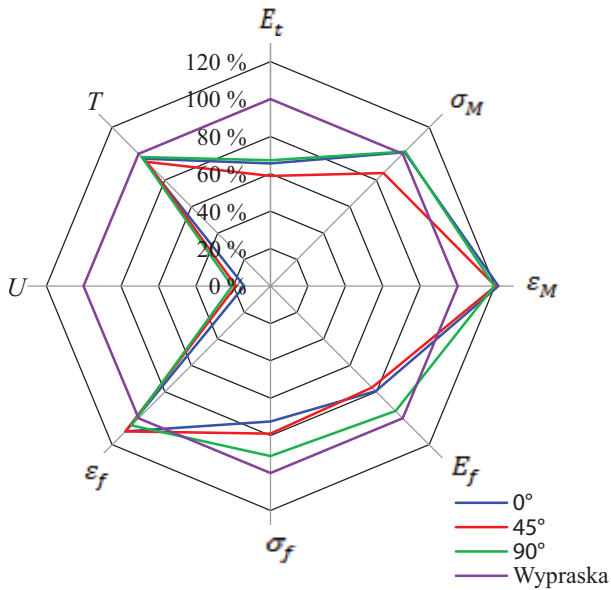
T a b e l a 1. Zestawienie wyników otrzymanych podczas próby statycznego rozciągania, 3-punktowego zginania, oznaczania udarności, twardości dla próbek wytworzonych w technologii FDM oraz próbek wtryskiwanych^{a)}

T a b l e 1. Summary of the results obtained during: static tensile test, 3-point bend test, impact test, hardness test for specimens produced by FDM technology and injection molding^{a)}

	Grubość warstwy mm	α , °	E_t MPa	σ_M MPa	ϵ_M %	E_f MPa	σ_f MPa	ϵ_f %	U , kJ/m ²	T , °ShD
Próbki wytwarzane przyrostowo	0,254	0	906,0	41,0	5,60	2866,7	60,4	4,10	18,84	72,30
		45	815,3	34,6	5,53	2763,3	65,8	4,10	24,82	70,42
		90	931,0	41,2	5,50	3403,3	75,8	3,93	27,36	73,06
	0,178	0	916,7	37,1	5,73	2966,7	63,1	3,83	18,08	73,32
		45	827,0	35,5	5,50	2646,7	62,3	4,10	22,88	69,46
		90	918,4	39,0	5,40	3093,3	62,1	3,63	18,06	71,88
Próbki wtryskiwane		–	1384,0	40,5	4,60	3602,0	83,4	3,73	133,07	74,98

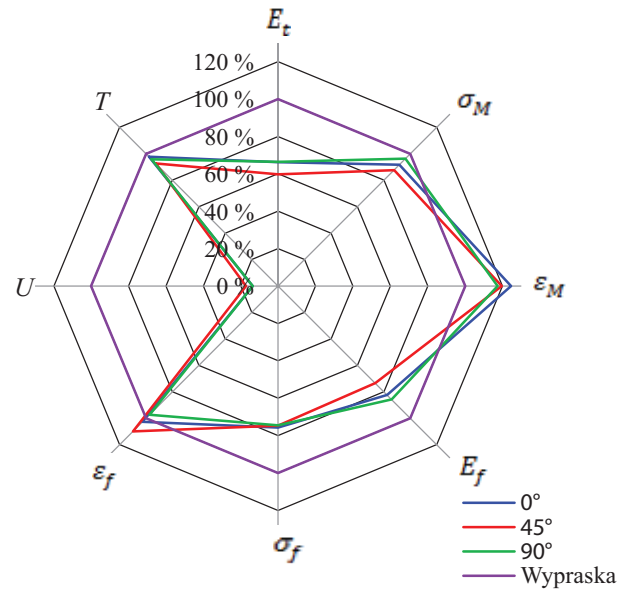
^{a)} α – orientacja drukowanej próbki, E_t – średni moduł sprężystości, σ_M – średnia wytrzymałość na rozciąganie, ϵ_M – średnie odkształcenie względne przy wytrzymałości na rozciąganie, E_f – średni moduł przy zginaniu, σ_f – średnia wytrzymałość na zginanie, ϵ_f – średnie odkształcenie względne przy wytrzymałości na zginanie, U – udarność, T – twardość.

^{a)} α – orientation of printed specimen, E_t – average Young's modulus, σ_M – average tensile strength, ϵ_M – average relative strain at tensile strength, E_f – average flexural modulus, σ_f – average flexural strength, ϵ_f – average relative strain at flexural strength, U – impact strength, T – hardness.



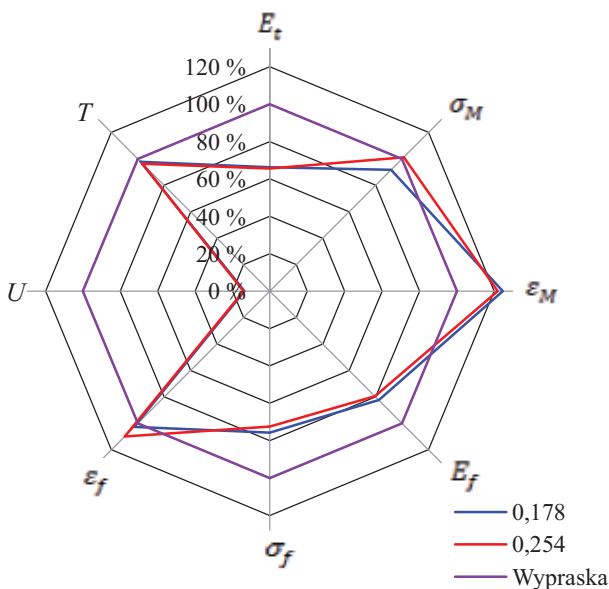
Rys. 3. Wpływ orientacji na względne wartości właściwości mechanicznych próbek wytwarzanych przyrostowo z zastosowaniem grubości warstwy równej 0,254 mm (względem próbek wtryskiwanych; znaczenie symboli właściwości mechanicznych opisane w objaśnieniach do tabeli 1)

Fig. 3. Effect of orientation on the relative values of mechanical properties of additive-manufactured specimens using the layer thickness of 0.254 mm (in relation to injection-molded specimens; for meaning of symbols: see explanations to table 1)



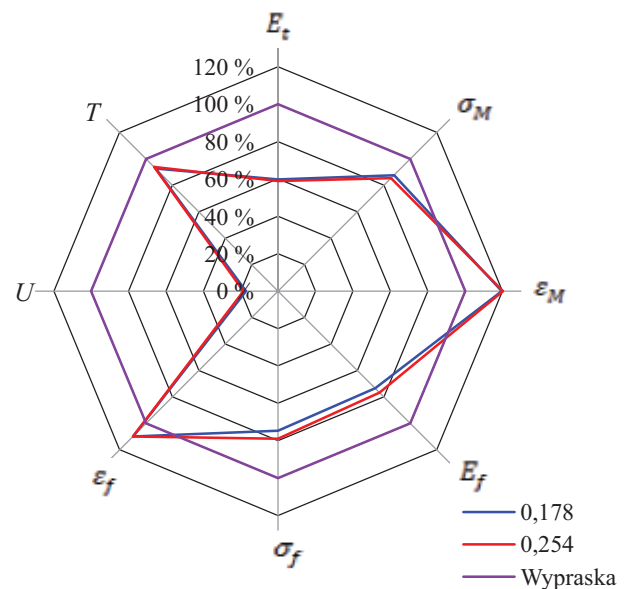
Rys. 4. Wpływ orientacji na względne wartości właściwości mechanicznych próbek wytwarzanych przyrostowo z zastosowaniem grubości warstwy równej 0,178 mm (względem próbek wtryskiwanych; znaczenie symboli właściwości mechanicznych opisane w objaśnieniach do tabeli 1)

Fig. 4. Effect of orientation on the relative values of mechanical properties of additive-manufactured specimens using the layer thickness of 0.178 mm (in relation to injection-molded specimens; for meaning of symbols: see explanations to table 1)



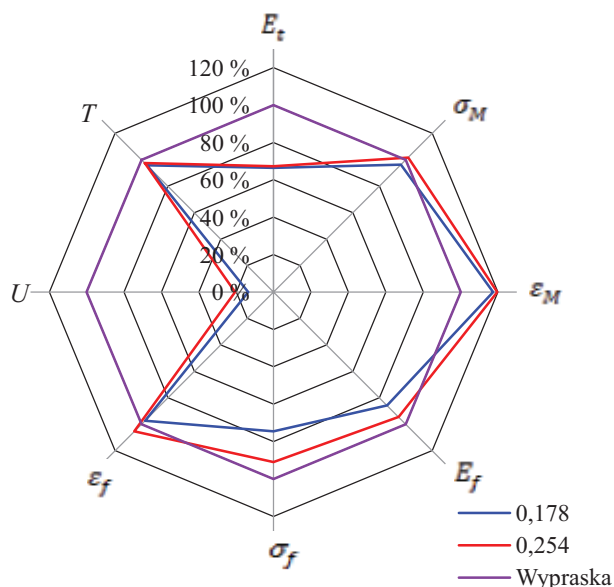
Rys. 5. Wpływ grubości warstwy na względne wartości właściwości mechanicznych próbek wytwarzanych przyrostowo z zastosowaniem orientacji płaskiej (względem próbek wtryskiwanych; znaczenie symboli właściwości mechanicznych opisane w objaśnieniach do tabeli 1)

Fig. 5. Effect of layer thickness on the relative values of mechanical properties of additive-manufactured specimens using the flat orientation (in relation to injection-molded specimens; for meaning of symbols: see explanations to table 1)



Rys. 6. Wpływ grubości warstwy na względne wartości właściwości mechanicznych próbek wytwarzanych przyrostowo z zastosowaniem orientacji półkątowej (względem próbek wtryskiwanych; znaczenie symboli właściwości mechanicznych opisane w objaśnieniach do tabeli 1)

Fig. 6. Effect of layer thickness on the relative values of mechanical properties of additive-manufactured specimens using the hemispheric orientation (in relation to injection-molded specimens; for meaning of symbols: see explanations to table 1)



Rys. 7. Wpływ grubości warstwy na względne wartości właściwości mechanicznych próbek wytwarzanych przyrostowo z zastosowaniem orientacji bocznej (względem próbek wtryskiwanych; znaczenie symboli właściwości mechanicznych opisane w objaśnieniach do tabeli 1)

Fig. 7. Effect of layer thickness on the relative values of mechanical properties of additive-manufactured specimens using the lateral orientation (in relation to injection-molded specimens; for meaning of symbols: see explanations to table 1)

skiej, mogą wynikać z większej liczby pojedynczych włókien konturu zorientowanych prostopadłe do kierunku obciążenia. Im większe obciążenie możliwe jest do rozprzodzenia wzdłuż tych włókien, tym większe całościowe obciążenie może wytrzymać próbek [22]. Podobnie jak w przypadku próby 3-punktowego zginania, mniejsza w porównaniu z innymi próbkami udarność obserwowana w próbkach o orientacji opisanej kątem 45° , pomimo większej liczby włókien ułożonych prostopadłe względem kierunku obciążenia, może być skutkiem występowania dodatkowo naprężeń ścinających. W grupie próbek o grubości warstwy równej 0,178 mm najwyższą udarność, wynoszącą $22,88 \text{ kJ/m}^2$, charakteryzowały się próbki o orientacji półkątowej. Udarność ta była większa niż w przypadku próbek o pozostałych orientacjach o ok. 26,7 %.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że grubość nakładanej warstwy nie wpływała w istotny sposób na udarność próbki. Pomimo tego, że dla całego zakresu przyjętych kątów orientacji, próbki wytwarzane z zastosowaniem grubości warstwy równej 0,178 mm charakteryzowały się niższą udarnośćią, to dla orientacji pod kątami 0° i 45° różnice pomiędzy zastosowanymi grubościami warstw były niewielkie (odpowiednio 4 i 7,8 %). Podobnie jak w przypadku próby 3-punktowego zginania największą różnicę, wynoszącą 33,9 %, obserwowano w przypadku próbek z kątem orientacji 90° , co mogło być wynikiem lepszego wypełnienia warstw

oraz zwiększonej ich liczby, a tym samym większej liczby słabych połączeń o charakterze adhezyjnym między poszczególnymi warstwami.

Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, iż zarówno grubość warstwy, jak i orientacja modelu wywierają znikomy wpływ na twardość. Pomimo odmiennej makrostruktury zarówno powierzchni, jak i rdzenia próbek, wynikającej z odmiennego sposobu nakładania poszczególnych włókien materiału, twardość zbadanych próbek jest na zbliżonym poziomie. Nieznaczne różnice w twardości poszczególnych próbek, nieprzekraczające 4 %, zarówno w przypadku kryterium orientacji, jak i grubości warstwy, wynikają z tego, że badane zmienne nie wpływają na zagęszczenie warstwy zewnętrznej jak i na wypełnienia próbek. Odległości pomiędzy włóknami konturu i wypełnienia oraz poszczególnymi włóknami samego wypełnienia są w próbkach niezależne od sposobu orientacji czy zastosowanej grubości warstwy. Można zatem przyjąć, że największy wpływ na twardość modeli wytwarzanych metodą FDM mają takie parametry jak: gęstość wypełnienia oraz parametr „porowatości” (ilość pustych przestrzeni, ang. *air gap*) określający odległość pomiędzy poszczególnymi włóknami materiału, a także rodzaj zastosowanego materiału.

Dokładność wykonania

Na podstawie badań własnych oraz dostępnej literatury zaproponowano ocenę dokładności wymiarowej próbek wytworzonych metodą FDM. Jako kryterium oceny zastosowano całkowity współczynnik dokładności wymiarowej (k_c) zaproponowany w pracy [23]. Im wyższy współczynnik k_c tym gorsza jest dokładność wytworzonej części. Wartości liczbowe tego współczynnika odpowiadają średniemu procentowemu odchyleniu od wymiaru nominalnego długości, szerokości i wysokości. Obliczone współczynniki dokładności wymiarowej zestawiono w tabeli 2. Stwierdzono, że sposób orientacji modelu wywiera istotny wpływ na uzyskiwaną dokładność wymiarową. Niezależnie od zastosowanej grubości warstwy najniższą wartość całkowitego współczynnika dokładności wymiarowej uzyskano w próbkach o orientacji bocznej modelu. W próbkach o grubości warstwy wynoszącej 0,254 mm współczynnik k_c kształtował się na poziomie 1,06 %, zaś w tych o grubości 0,178 mm na poziomie 1,22 % (tabela 2). Podobnie, w sposób niezależny od grubości warstwy, najmniejszą dokładność wymiarową zaobserwowano w próbkach o orientacji półkątowej. Zastosowanie grubszej warstwy dało wartość k_c równą 3,05 %, zaś warstwy o grubości 0,178 mm wartość 2,30 %. Analiza wszystkich przedstawionych w tabeli 2 wyników pozwala na stwierdzenie, że najwyższe wartości k_c uzyskuje się w przypadku wymiarów, których wytworzenie jest bezpośrednio związane z przemieszczeniem stołu roboczego urządzenia, a zatem z przemieszczeniem wzdłuż osi Z. Przykładowo, współczynnik dokładności wysokości (k_w) próbki o orientacji płaskiej wynosi

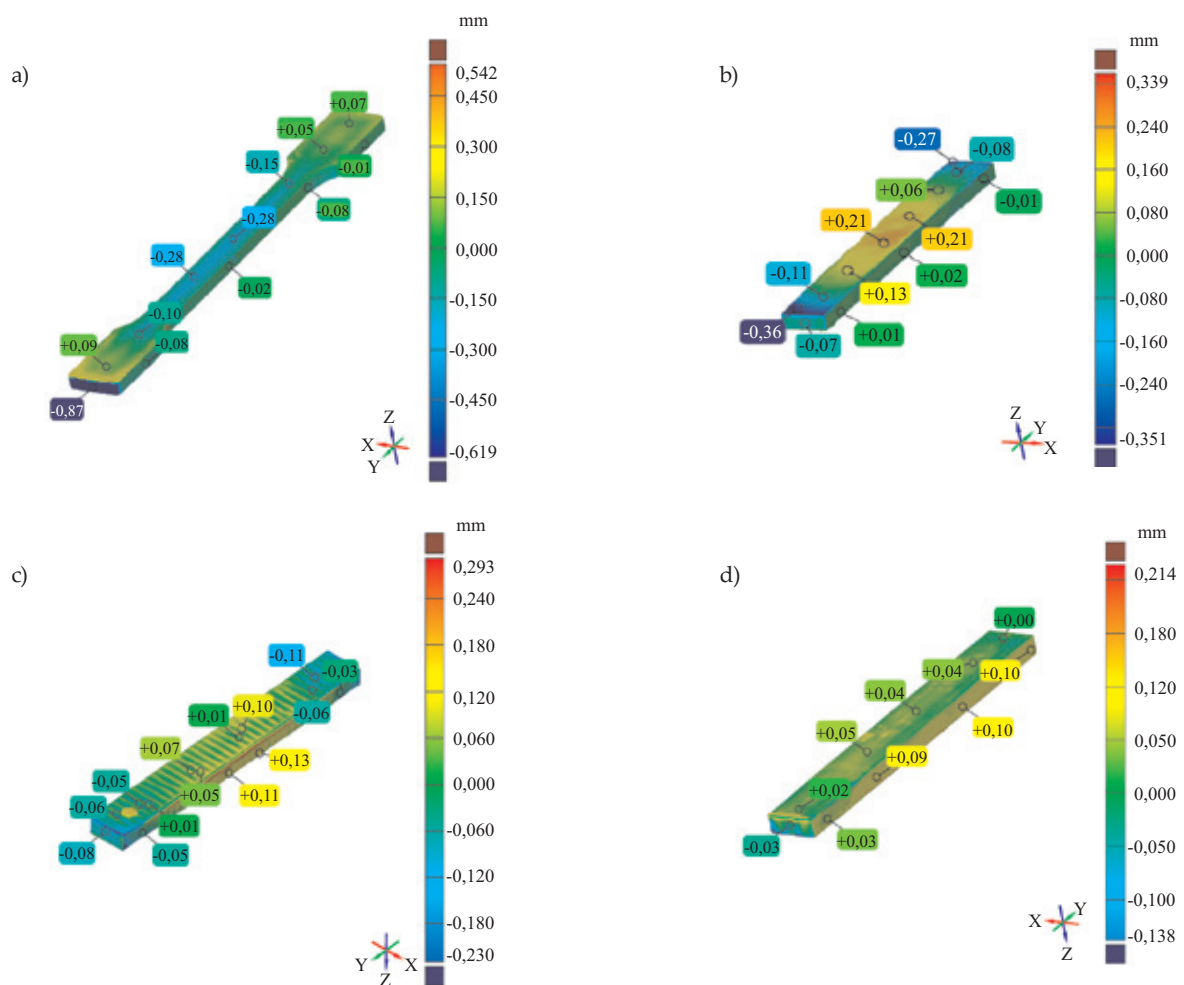
T a b e l a 2. Zestawienie współczynników dokładności wymiarowej oraz średnich zmian wymiarów (względem modelu 3D CAD) dla próbek drukowanej i próbki wtryskiwanej^{b)}

T a b l e 2. Dimensional accuracy coefficients and average dimension variations (in relation to 3D CAD model) for 3D printed specimens and injection-molded specimens^{b)}

	Grubość warstwy mm	α , °	k_d , %	k_{sz} , %	k_w , %	k_c , %	Δ_d , mm	Δ_{sz} , mm	Δ_w , mm
Próbki wytwarzane przyrostowo	0,254	0	0,08	0,17	3,58	1,28	0,06	0,00	0,14
		45	0,07	2,83	6,25	3,05	0,06	0,28	0,25
		90	0,06	2,80	0,33	1,06	0,05	0,28	0,01
	0,178	0	0,08	0,33	5,33	1,92	0,07	0,03	0,21
		45	0,18	2,13	4,58	2,30	0,14	0,21	0,18
		90	0,19	2,63	0,83	1,22	0,15	0,21	0,03
Próbki wtryskiwane		–	1,17	0,20	0,32	0,56	1,18	0,02	0,01

^{b)} α – orientacja drukowanej próbki, k_d – współczynnik dokładności dla długości, k_{sz} – współczynnik dokładności dla szerokości, k_w – współczynnik dokładności dla wysokości, k_c – całkowity współczynnik dokładności wymiarowej, Δ_d – średnia zmiana wymiaru na długości próbki, Δ_{sz} – średnia zmiana wymiaru na szerokości próbki, Δ_w – średnia zmiana wymiaru na wysokości próbki.

^{b)} α – orientation of printed specimen, k_d – coefficient of dimensional accuracy for length, k_{sz} – coefficient of dimensional accuracy for width, k_w – coefficient of dimensional accuracy for height, k_c – total coefficient of dimensional accuracy, Δ_d – average change in dimension of specimen length, Δ_{sz} – average change in dimension of specimen width, Δ_w – average change in dimension of specimen height.



Rys. 8. Porównanie mapy odchyłków wymiarowych próbki wtryskiwanej (a) oraz wybranych próbek różniących się grubością warstwy i kątem orientacji: 0,254 mm, 0° (b); 0,254 mm, 45° (c) oraz 0,178 mm, 90° (d)

Fig. 8. Dimensional deviation maps for the test specimens depending on the layer thickness and angle orientation: a) injection-molded specimen, b) 0.254 mm, 0°, c) 0.254 mm, 45°, d) 0.178 mm, 90°

3,58 %, a próbki o orientacji bocznej tylko 0,33 %. Współczynnik dokładności szerokości (k_{sz}) wykazuje podobną zależność. Wartość k_{sz} pierwszej ze wspomnianych próbek wynosi 0,17 %, zaś dla drugiej 2,58 %. Z kolei w próbkach o orientacji półkątowej wysoką wartość współczynników dokładności wymiarowej obserwuje się zarówno w przypadku szerokości, jak i wysokości. Można zatem stwierdzić, że orientacja modelu w przestrzeni roboczej urządzenia decyduje o tym, które z wymiarów są wytwarzane z wyższą, a które z niższą dokładnością.

Jak można zaobserwować w tabeli 2 grubość stosowanej warstwy wywiera mniej znaczący wpływ na dokładność wymiarową wyrobów niż orientacja. Zależnie od kąta orientacji poszczególne współczynniki zmieniają się w sposób nieliniowy, nie można zatem jednoznacznie stwierdzić, jaka grubość warstwy zapewnia uzyskanie wyższej dokładności.

Przykładowe mapy odchyłek wymiarowych przedstawiono na rys. 8. Ich analiza pozwala na zaobserwowanie tendencji do deformacji w próbkach o orientacji płaskiej. W tych przypadkach różnica odchyłek mierzonych na krańcach próbki oraz na jej środku wynosiła 0,48–0,57 mm (rys. 8b). Mniejsze wypaczenie próbek obserwowano po zastosowaniu orientacji półkątowej (rys. 8c), gdzie rozpatrywana różnica zawierała się w zakresie 0,16–0,21 mm. Charakterystyczna dla tego kąta orientacji była także falista struktura powierzchni, na której różnice pomiędzy kolejnymi wzniesieniami i wgłębieniami wynosiły ok. 0,1 mm. Istotnej deformacji nie obserwowano natomiast w próbkach wykonanych z zastosowaniem orientacji bocznej (rys. 8d). W przypadku próbki wtryskiwanej (rys. 8a) można było wyraźnie zaobserwować efekt skurczu wzdłużnego, objawiającego się zmniejszeniem długości próbki o 0,87 mm. Natomiast odchyłki widoczne w środkowej wąskiej części badanego wiosełka były obrazem zapadnięć skurczowych. Prawdopodobną

przyczyną powstania zapadnięć było niedostateczne ciśnienie docisku bądź zbyt krótki czas docisku podczas realizacji procesu wtryskiwania.

Analiza wskaźników efektywności ekonomicznej

Z przedstawionych rezultatów badań wynika, że w przypadku grubości warstwy wynoszącej 0,254 mm najkorzystniejszym zbiorem oznaczanych właściwości (dotyczących próbek wytwarzanych w technologii FDM) odznaczały się próbki otrzymane z zastosowaniem orientacji bocznej. Jak wynika z danych zestawionych w tabeli 3, w porównaniu z próbkami o orientacji płaskiej, orientacja boczna zapewnia (oprócz poprawy oznaczanych właściwości) zmniejszenie zużycia materiału podporowego, jednak kosztem wydłużenia czasu trwania procesu. Natomiast orientacja warstw w próbce pod kątem 45° prowadziła z reguły do pogorszenia oznaczanych właściwości, a przy tym skutkowała najwyższym zużyciem materiału podporowego oraz najdłuższym czasem trwania procesu (tabela 3). Analogiczny rozkład wyników zaobserwowano w przypadku próbek o grubości warstw równych 0,178 mm. Można zatem stwierdzić, że przy mniejszej grubości warstwy uzyskanie optymalnego zespołu badanych właściwości zapewnia orientacja pod kątem 90°.

Analiza danych przedstawionych na rys. 7 wskazuje, że zastosowanie większej grubości warstwy i orientacji bocznej pozwala na uzyskanie całościowo korzystniejszego zestawu oznaczanych właściwości. Ponadto, wytwarzanie przy tej grubości warstwy powoduje zmniejszenie zużycia materiału podporowego oraz skrócenie czasu trwania procesu (tabela 3). Analizując rysunki 4, 5, 6 można również zauważyć, że z reguły właściwości próbek wytwarzanych metodą FDM osiągają wartości na poziomie od 58,9 do 97,7 % wartości odnoszących się do

T a b e l a 3. Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej procesu FDM^{o)}

T a b l e 3. Economic efficiency indicators for FDM process^{o)}

	Grubość warstwy mm	α , °	A			B			C		
			MM cm ³	MP cm ³	t , min	MM cm ³	MP cm ³	t , min	MM cm ³	MP cm ³	t , min
Próbki wytwarzane przyrostowo	0,254	0	8,24	5,70	54	18,50	6,53	88	10,92	3,42	48
		45	8,26	16,06	158	20,40	17,50	190	12,06	12,12	216
		90	7,96	5,98	104	20,36	4,16	122	12,00	2,76	120
	0,178	0	8,76	5,16	96	18,12	5,92	160	10,74	3,12	84
		45	8,34	16,50	312	18,80	17,50	372	11,46	11,92	360
		90	8,70	5,52	180	17,64	3,78	196	10,50	3,12	210
Próbki wtryskiwane	–	10,80	15,42	1,50	4,10	5,50	1,5	3,10	0,69	2	

^{o)} A – próbki zastosowane w próbie statycznego rozciągania, B – próbki zastosowane w: próbie 3-punktowego zginania, badaniach uderności oraz dokładności wymiarowej, C – próbki do badania twardości, MM – zużycie materiału modelowego, MP – zużycie materiału podporowego, t – czas wytwarzania.

^{o)} A – specimens used in static tensile test, B – specimens used in: 3-point bending, impact strength and dimensional accuracy tests, C – specimen used in hardness test, MM – the amount of used model material, MP – the amount of used supporting material, t – production time.

próbek wytwarzanych metodą wtryskiwania. Wyjątkiem jest udarność, której wartość względem próbek wtryskiwanych kształtuje się na poziomie nieprzekraczającym 21 % (a zatem o 26 p.p. niższym niż stwierdzono w publikacji [22]) oraz wytrzymałość na rozciąganie (której wartość względna dla próbek zorientowanych pod kątem 0° i 90°, wytwarzanych przy grubości warstwy równej 0,254 mm wynosi ok. 102 %) i wydłużenie względne przy zerwaniu (wartość względna dla próbek zorientowanych pod kątem 90° i wytwarzanych przy grubości warstwy równej 0,178 mm osiąga 128 %).

PODSUMOWANIE

Stwierdzono, że orientacja modelu względem osi Y wywierała istotny wpływ na udarność, właściwości oznaczane podczas próby 3-punktowego zginania oraz na dokładność wymiarową. Natomiast wpływ na twardość, moduł sprężystości oraz wytrzymałość na rozciąganie był nieznaczny. Przeprowadzone badania potwierdziły empiryczną zależność, według której pogorszenie właściwości wytworów jest tym większe im bardziej kierunek obciążenia podczas badania pokrywa się z kierunkiem wytwarzania części.

Wykazano, że grubość warstwy nie wywiera istotnego wpływu na oznaczane właściwości. Jedynie udarność osiągała korzystniejsze wartości w przypadku próbek o grubości warstwy 0,254 mm, dla wszystkich badanych kątów orientacji. Zauważono również niekorzystny wpływ orientacji bocznej w próbce o grubości warstwy 0,178 mm na udarność, moduł przy zginaniu oraz wytrzymałość na zginanie próbek.

Zaobserwowano ponadto, że wyroby wytwarzane w technologii FDM charakteryzowały się małą wytrzymałością na obciążenie dynamiczne, gdyż udarność tych wyrobów kształtowała się na poziomie 13,5–20,6 % udarności wyprasek otrzymanych metodą wtryskiwania. Tak istotnej różnicy nie stwierdzono natomiast dla pozostałych oznaczanych właściwości.

Obliczono, że wartość współczynnika k_c wyrobów wytwarzanych metodą FDM była od ok. 2 do 6 razy wyższa (gorsza) w porównaniu z analogiczną wartością dotyczącą elementów uzyskiwanych metodą wtryskiwania. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych za pomocą skanera 3D zaobserwowano większą tendencję do deformacji próbek o orientacji płaskiej i półkątowej.

Biorąc pod uwagę cały zakres przeprowadzonych badań, najkorzystniejszy zestaw wartości badanych właściwości wykazywały próbki z grubością warstwy 0,254 mm i wytworzone z zastosowaniem orientacji bocznej. W porównaniu z próbkami wytwarzanymi z taką samą grubością warstwy, lecz z orientacją płaską, odznaczały się lepszymi właściwościami oraz zmniejszonym zużyciem materiału podporowego, ale nieznacznie wydłużonym czasem procesu. Orientacja półkątowa prowadziła z reguły do ponad dwukrotnego wydłużenia czasu procesu oraz znacznego pogorszenia

właściwości, co wskazuje na brak zasadności stosowania takiej orientacji.

LITERATURA

- [1] Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.: "Additive Manufacturing Technologies, Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing", Springer 2010.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [2] Pepliński K., Bieliński M.: *Polimery* **2015**, 60, 747.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.747>
- [3] Venuvinod P.K., Weiyin M.: "Rapid Prototyping, Laser-based and Other Technologies", Springer Science+Business Media 2004.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-6361-4>
- [4] Wohlers T.: "Worldwide trends in additive manufacturing", RapidTech 2009, Materiały US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies, 24–25 września 2009, str. 1–3.
- [5] Bourell D.L., Beaman J.J., Leu M.C. i in.: "A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: Looking back and looping ahead", RapidTech 2009, Materiały US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies, 24–25 września 2009, str. 5–11.
- [6] Chlebus E., Boratyński T., Dybała B. i in.: „Innowacyjne Technologie Rapid Prototyping”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2003.
- [7] Cooper K.G.: "Rapid Prototyping Technology: Selection and Application", Marcel Dekker Inc. 2005.
- [8] Oczóś K.E.: *Mechanik* **2008**, 4, 241.
- [9] <https://www.canalys.com/newsroom/3d-printing-market-grow-us162-billion-2018/> (data dostępu 25.08.2016).
- [10] Radziwona A.: *Procedia Engineering* **2014**, 69, 1184.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>
- [11] <http://www.stratasys.com/> (data dostępu: 25.08.2016).
- [12] Ranjeet K.S.: "An investigation on dimensional accuracy of fused deposition modeling (FDM) processed part using fuzzy logic, master of technology in mechanical engineering", praca magisterska, National Institute of Technology Rourkela, Indie 2011.
- [13] Górski F., Wichniarek W., Andrzejewski J.: *Przetwórstwo tworzyw* **2012**, 18, 428.
- [14] Domingo-Espin M., Puigoriol-Forcada J.M., Garcia-Granada A.-A. i in.: *Materials & Design* **2015**, 83, 670.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>
- [15] Bagsik A., Shöppner V.: "Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with ULTEM*9085", Materiały 69th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, Boston, Massachusetts, USA, 1–5 maja 2011, str. 1249–1299.
- [16] Hossain M.S., Ramos J., Espalin D. i in.: "Improving tensile mechanical properties of FDM – manufactured specimens *via* modifying build parameters", Materiały Solid Freeform Fabrication Symposium,

- University of Texas, Austin 12–14 sierpnia 2013, str. 380–392.
- [17] <http://cdn.intechopen.com/pdfs/35261.pdf> str. 159–180, (data dostępu 25.08.2016).
- [18] Casvola C., Cazzato A., Moramarco V. i in.: *Materials & Design* **2016**, 90, 453.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009>
- [19] Carneiro O.S., Silva A.F., Gomes R.: *Materials & Design* **2015**, 83, 768.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>
- [20] Fordan E., Koch M., Menon U.: “Mechanical and dimensional characteristics of Fused deposition modeling build styles”, *Materiały Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas, Austin, 12–14 sierpnia 1996*, str. 419–442.
- [21] Siemiński P., Rajch A.: *Mechanik* **2014**, 87, 2CD 13.
- [22] Górski F., Kuczko W., Wichniarek R.: *Archives of Mechanical Technology and Automation* **2014**, 34, 3.
- [23] Górski F., Kuczko W., Wichniarek R.: *Advances in Science and Technology* **2013**, 19, 27.
<http://dx.doi.org/10.5604/20804075.1062340>
- [24] Nancharaiyah T., Ranga R.D., Ramachandra R.V.: *International Journal of Emerging Technologies* **2010**, 2, 106.
- [25] Gregorian A., Elliott B., Navarro R. i in.: “Accuracy improvement in rapid prototyping machine (FDM-1650)”, *Materiały Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas, Austin 6–8 sierpnia 2001*, str. 77–84.
- [26] Rao R.V., Rai D.P.: *Engineering Science and Technology* **2016**, 19, 587.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.008>
- [27] Boschetto A., Bottini L.: *Robotics and Computer – Integrated Manufacturing* **2016**, 37, 103.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.07.005>
- [28] Lee W., Wei Ch., Chung Sh.: *Journal of Materials Processing Technology* **2014**, 214, 2366.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.004>

Otrzymano 29 VI 2016 r.

W kolejnym zeszycie ukaza się m.in. następujące artykuły:

P. Penczek – Pamięci Profesora Andrzeja Dudy (j. ang.)

T. Biedroń, A. Michalski, T. Biela, P. Kubisa – Stereokompleksowanie polilaktydów zawierających ciecze jonowe jako grupy końcowe (j. ang.)

A. Simakova, C. Arnoux, K. Matyjaszewski – Degradowalne kopolimery zawierające wiązania estrowe otrzymywane metodą polimeryzacji rodnikowej z otwarciem pierścienia w polimeryzacji rodnikowej z przeniesieniem atomu (j. ang.)

M. Danko, J. Mosnáček – Polimeryzacja z otwarciem pierścienia γ -butyrolaktonu i jego pochodnych (j. ang.)

R. Liénard, T. Josse, J. De Winter, P. Dubois, P. Gerbaux, O. Coulembier – Otrzymywanie cyklopolilaktydów o wysokiej czystości przez optymalizację katalizowanej miedzią reakcji cykloaddycji azydek-alkin (j. ang.)

Z. Florjańczyk, A. Frydrych, A. Chudzik, K. Rucińska, M. Basamon – Synteza i charakterystyka kopolimerów o kształcie gwiazdy otrzymanych z kwasu mlekowego i monomerów heterocyklicznych (j. ang.)

D. Szweda, R. Szweda, A. Dworak, B. Trzebicka – Termoczułe poli(metakrylany glikoli oligoetylenowych) i ich biokoniugaty – synteza i zachowanie w roztworze (j. ang.)

U. Kwolek, K. Wójcik, M. Janiczek, M. Nowakowska, M. Kepczyński – Synteza i właściwości antybakteryjne czwartorzędowej amoniowej pochodnej polietylenoiminy (j. ang.)

G. Adamus, P. Kurcok, I. Radecka, M. Kowalczyk – Otrzymywanie bioaktywnych oligomerów z naturalnych biopoliestrów i ich syntetycznych analogów (j. ang.)