

Parametryczny model numeryczny do predykcji właściwości mechanicznych struktur wytwarzanych w technologii FDM z materiałów polimerowych

Robert Szczesiak^{1), *)}, Michał Kowalik¹⁾, Maciej Cader²⁾, Paweł Pyrzanowski¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.9.7

Streszczenie: Przedstawiono badania nowego modelu numerycznego służącego do przewidywania właściwości mechanicznych struktur wytwarzanych w technologii *fused deposition modeling* (FDM). Model zaimplementowany w metodzie elementów skończonych odwzorowuje strukturę wewnętrzną badanego materiału na podstawie zadanych parametrów wytwarzania, takich jak: wysokość warstwy, odstęp między ścieżkami, orientacja kolejnych warstw. Oprócz analiz numerycznych przeprowadzono badania doświadczalne kształtek wytworzonych z ABS-M30 (Stratasys Ltd.), na ich podstawie wyznaczono moduły sprężystości podłużnej w trzech kierunkach i porównano je z wynikami uzyskanymi z modelu numerycznego. Różnice w wartościach modułów wyznaczonych na podstawie analiz numerycznych i badań doświadczalnych mieściły się w przedziale 0,79–6,19 %, w zależności od kierunku obciążenia. Tak niewielkie wartości błędów pozwalają na stwierdzenie, że przedstawiony model nadaje się do szacowania sztywności elementów wytwarzanych z wykorzystaniem technologii FDM.

Słowa kluczowe: ABS, technologia FDM, szybkie prototypowanie, przewidywanie właściwości mechanicznych, modelowanie numeryczne.

Parametric numerical model for predicting mechanical properties of structures made with FDM technology from polymeric materials

Abstract: This article presents a new numerical model for predicting the mechanical properties of the structures produced using Fused Deposition Modeling (FDM) technology. The model implemented in the finite element method represents internal structure of the investigated material, generated based on manufacturing parameters such as layer height, raster spacing or orientation of subsequent layers. In addition to numerical analysis, the experimental investigation of the samples made of ABS-M30 (Stratasys Ltd.) were performed and longitudinal elasticity modules in three directions were determined and compared with the results obtained from the numerical model. Differences in experimental and numerical values of longitudinal modules ranged from 0.79 % to 6.19 % depending on the load direction. Such low error values allow to state that the presented model is suitable for estimating the stiffness of the components manufactured by Fused Deposition Modeling.

Keywords: ABS, FDM technology, rapid prototyping, prediction of mechanical properties, numerical modeling.

Technologię *fused deposition modeling* (FDM) zalicza się do rodziny przyrostowych technologii wytwarzania. Jej rozwój zapoczątkował wynalazek firmy Stratasys Ltd., opatentowany w 1989 r. [1]. W technologii FDM wykorzystuje się polimerowe materiały termoplastyczne, z których najbardziej rozpowszechnionym, dostępnym

na rynku w wielu odmianach i kolorach, jest poli(akrylonitryl-*co*-butadien-*co*-styren) (ABS).

Obecnie technologia FDM swoją popularność zawdzięcza m.in. dostępności na rynku tanich konsumenckim drukarek 3D, dostarczanych przez silnie konkurujących producentów amatorskich maszyn CNC (*computer numerical control*) [2], co nie umniejsza jej użyteczności w zastosowaniach przemysłowych. Dążenie do możliwości wytwarzania za ich pomocą przedmiotów użytkowych wymusza opracowywanie metod i narzędzi obliczeniowych umożliwiających przewidywanie lub projektowanie pożądaných cech wyrobu.

W ostatnich latach opublikowano wiele prac dotyczących badań właściwości mechanicznych struktur wytwa-

¹⁾ Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa.

²⁾ Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Aleje Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa.

*) Autor do korespondencji:

e-mail: rszczesiak@meil.pw.edu.pl

rzanych w technologii FDM z materiałów polimerowych. Dawoud M. i współpracownicy [3] porównali gęstość, wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, a także udarność i dokładność wymiarową (statystyczny opis odchyłek pomiarów uzyskanych próbek w stosunku do wymiarów odniesienia modelu CAD) standardowych próbek wytwarzanych za pomocą formowania wtryskowego oraz technologii przyrostowej. Autorzy szeroko omówili wpływ na wspomniane właściwości zarówno dodatnich lub ujemnych wartości szczeliny między sąsiadującymi włóknami materiału, jak i kąta określającego kierunek nakładania materiału, z rozróżnieniem poszczególnych warstw wyrobu. Podobne badania opublikowali Sood A.K. i współpracownicy [4]. Oprócz wcześniej wymienionych parametrów uwzględnili także wysokość warstwy oraz orientację wytwarzanej próbki w przestrzeni roboczej maszyny, nie wzięli jednak pod uwagę ujemnych wartości szczeliny między sąsiadującymi włóknami. Autorzy [4] posłużyli się metodą powierzchni odpowiedzi, wykorzystującą wyniki eksperymentu planowanego. Ten sam zespół autorów [5] przedstawił również inne podejście do przewidywania właściwości mechanicznych, oparte na sieciach neuronowych, i wykazał ich większą zdolność do modelowania nieliniowych cech wyrobu. Casavola C. i współpracownicy [6] do przygotowania modelu struktury wytwarzanej w technologii FDM zastosowali klasyczną teorię laminatów. W badaniach potwierdzili ortotropowy charakter cech wytrzymałościowych wyrobów.

Wielu innych, oprócz wyżej wymienionych, autorów także podjęło się opracowania metod i narzędzi do przewidywania cech wyrobów, jednak tylko nieliczne publikacje dotyczą wykorzystania metody elementów skończonych oraz oceny wpływu kilku parametrów jednocześnie na cechy wyrobu o dowolnym kształcie. Na przykład Garg A. i współpracownicy [7] z zastosowaniem metody elementów skończonych szczegółowo opisali mechanizm zniszczenia, zachodzący podczas jednoosiowej próby rozciągania standardowej kształtki do badania właściwości mechanicznych tworzyw polimerowych. W przedstawionym w tej pracy modelu numerycznym spośród parametrów wpływających na cechy wyrobu jako dane wejściowe przyjęto tylko wysokość warstwy oraz kąt określający kierunek nakładania materiału. Model ten przedstawiono ponadto w ujęciu makroskopowym, związanym z określonym kształtem standardowej próbki.

Celem niniejszej pracy było opracowanie i zweryfikowanie parametrycznego modelu numerycznego do przewidywania właściwości mechanicznych struktur wytwarzanych w technologii FDM z materiałów polimerowych. Opracowany model operował na reprezentatywnej jednostce struktury wypełniającej wyrób o dowolnym kształcie. W celu weryfikacji jego działania doświadczalnie oznaczono moduł sprężystości podłużnej wybranych struktur wytwarzanych z materiału ABS i wyniki porównano z uzyskanymi za pomocą odpowiednio sparametryzowanego modelu numerycznego.

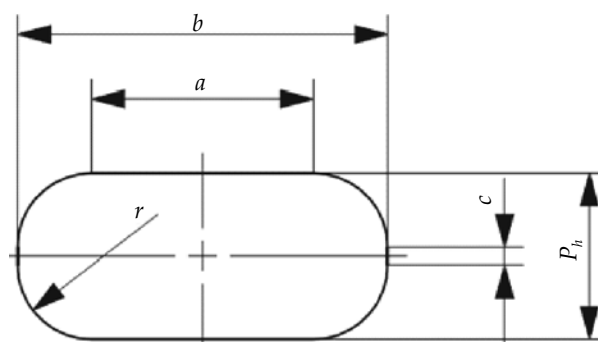
MODEL NUMERYCZNY

Kształt nakładanych włókien topionego materiału

W literaturze przedmiotu [8, 9] kształt przekroju poprzecznego pojedynczego włókna nałożonego uplastycznionego materiału przedstawia się często w postaci elipsy o osi wielkiej równoległej do płaszczyzny stolika maszyny CNC. Takie spłaszczenie kołowego kształtu przekroju poprzecznego jest zgodne z obserwacjami mikroskopowymi przekrojów próbek wytwarzanych w technologii FDM.

W przedstawionym tu modelu, rozumianym jako forma komputerowej reprezentacji matematycznego opisu rzeczywistej struktury wyrobu, wprowadzono pewne modyfikacje w odniesieniu do eliptycznego kształtu. Zauważono, że eliptyzacja nakładanego włókna nie jest wynikiem jedynie grawitacyjnego rozplywania się uplastycznionego materiału, ale w znacznej mierze także nacisku wywieranego na uplastycznione włókno przez dyszę głowicy, poruszającą się w mniejszej niż wymiar średnicy dyszy odległości od poprzednio nałożonej warstwy (lub od stolika maszyny w wypadku pierwszej warstwy). Zadana wysokość warstwy nakładanego materiału jest zwykle mniejsza niż średnica dyszy nakładającej roztopione włókno, co powoduje spłaszczenie włókna przez dyszę, determinujące górny i dolny odcinek na poprzecznym przekroju włókna (rys. 1, wymiar a).

Symetryczne spłaszczenie na bokach włókna można natomiast tłumaczyć tym, że trajektoria dyszy, na którą składają się m.in. sąsiadujące równoległe odcinki, powoduje zwykle duże zagęszczenie materiału w każdej warstwie. W wyniku omawianego wyżej spłaszczenia w pionie włókno rozplywa się na boki, a ograniczeniem dla tej

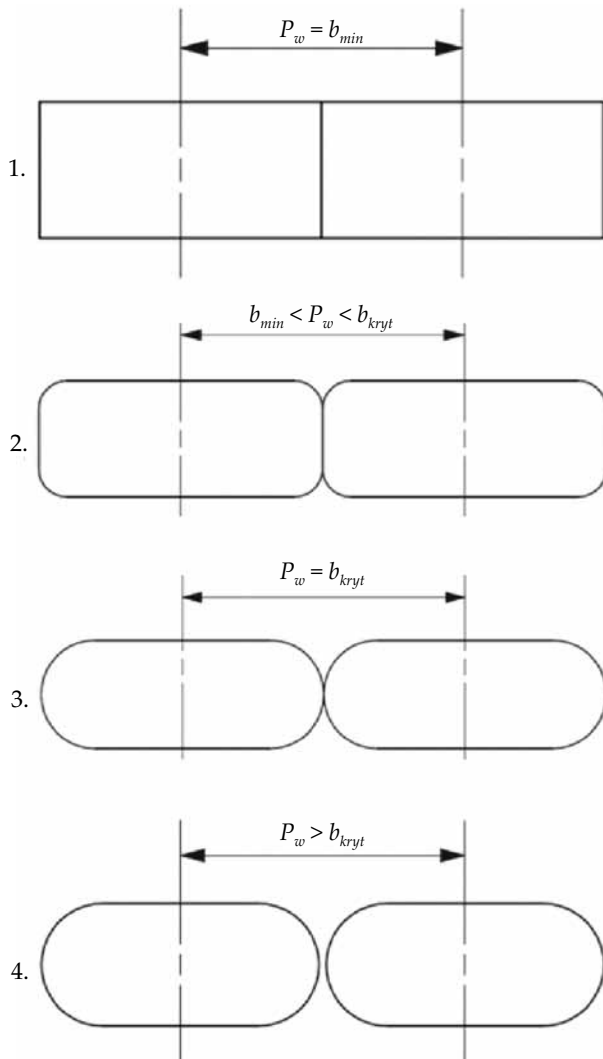


Rys. 1. Przekrój poprzeczny włókna; P_h – wysokość pojedynczej warstwy, a – długość poziomego odcinka linii prostej przekroju poprzecznego nałożonego włókna po spłaszczeniu i po zakrzepnięciu materiału, b – całkowita szerokość pojedynczego włókna, c – długość pionowego odcinka linii prostej przekroju poprzecznego, wymiar opisujący spłaszczenie włókna

Fig. 1. Cross-section of a fiber; P_h – single layer height, a – length of horizontal line segment of applied fiber after flattening and solidification of material, b – total width of single fiber, c – length of vertical line segment of cross-section, dimension describing the fiber flattening

deformacji może być brzeg sąsiadującego odcinka włókna nałożonego już w rozpatrywanej warstwie. Stopień bocznego spłaszczenia włókna jest więc silnie zależny od odległości pomiędzy osiami sąsiadujących odcinków włókna materiału, co w modelu numerycznym jest określane parametrem P_w . Możliwe są zatem cztery warianty (rys. 2):

- włókna są rozmieszczone tak gęsto, że przekrój poprzeczny wyrobu jest w całości wypełniony – przypadek skrajny (1.);
- włókna nałożone na sąsiadujących ze sobą odcinkach trajektorii stykają się w pewnym zakresie i tworzą



Rys. 2. Cztery warianty z różnymi wartościami parametru P_w ; P_w – odległości między sąsiadującymi, znajdującymi się w tej samej warstwie liniami trajektorii głowicy, b_{kryt} – wartość krytyczna wymiaru b odpowiadająca sytuacji, gdy $c = 0$ i sąsiadujące włókna są do siebie styczne, b_{min} – wartość minimalna wymiaru b odpowiadająca sytuacji całkowitego wypełnienia próbki przez materiał

Fig. 2. Four scenarios with different P_w parameter values; P_w – distances between adjacent lines of head trajectory in the same layer, b_{kryt} – critical value of dimension b when $c = 0$ and adjacent fibers are tangential to each other, b_{min} – minimum value of dimension b corresponding to complete filling of the sample with material

powierzchnię kontaktu zależną od wartości parametrów (2.);

- włókna na sąsiadujących odcinkach trajektorii w tej samej warstwie są do siebie styczne – przypadek szczególny (3.);
- włókna na sąsiadujących odcinkach trajektorii, po spłaszczeniu w pionie, swobodnie rozplývają się na boki dzięki dostatecznie dużej odległości między sąsiadującymi odcinkami (4.).

Mechanizm powstawania obszaru styku omówiono dokładniej w pracach innych autorów [10–12].

Parametry

Parametrami wejściowymi modelu numerycznego są:

- P_d – średnica dyszy głowicy nakładającej materiał wytwarzanej części, zależna od modelu i konfiguracji danej maszyny CNC;
- P_h – wysokość pojedynczej warstwy wytwarzanej części, zależna od ustawień podanych przez operatora maszyny;
- P_w – odległość między sąsiadującymi liniami trajektorii głowicy znajdującymi się w tej samej warstwie. Możliwość oraz sposób wpływania na wartość tego parametru zależy od oprogramowania, którym operator posługuje się do przygotowania zbioru instrukcji sterujących maszyną;
- P_{fill} – opcjonalny, stały współczynnik korekcyjny, głównie umożliwia uwzględnienie różnicy między planowanym a rzeczywistym polem przekroju próbki, zmierzonym na obrazie mikroskopowym przełomu próbki użytej do kalibracji numerycznego modelu predykcyjnego dla danej maszyny i zastosowanego materiału; nazywany współczynnikiem wypełnienia; jeśli nie jest stosowany to przybiera wartość 1;
- $P_{orient\ center}$ – kąt określony między dodatnim kierunkiem osi X układu współrzędnych modelu numerycznego a kierunkiem linii środkowych włókien materiału nałożonego w środkowej warstwie modelu; zmienny w zakresie 0–90 stopni.

W modelu występują również wielkości zależne, obliczane na podstawie przedstawionych wyżej parametrów niezależnych. Odpowiadają one m.in. za wymiary prostopadłocianu automatycznie przycinającego importowany model geometryczny, generowany przez system CAD. Celem tego zabiegu jest zapewnienie korzystnego kształtu brzegów modelu powstających po odrzuceniu jego części znajdującej się poza wnętrzem prostopadłocianu. Dzięki temu brzegi są powierzchniami płaskimi, w wypadku których można łatwo nałożyć warunki brzegowe oraz obciążenie zewnętrzne.

Parametry wyjściowe

Odształcenie modelu jest wymuszane zadaniem przemieszczeniem odpowiedniego brzegu o, z góry przyjętą, wartość 0,001 mm, niewielką w stosunku do gabarytów

modelu. Następnie oblicza się moduł sprężystości podłużnej badanej struktury według podanych wzorów:

– wydłużenie względne (odkształcenie) w kierunku rozciągania (ϵ)

$$\epsilon = \frac{u}{l_0} \quad (1)$$

gdzie: $u = 0,001$ mm, założone przemieszczenie brzegu modelu, l_0 – długość początkowa modelu w kierunku zgodnym z kierunkiem rozciągania;

– naprężenie normalne (σ):

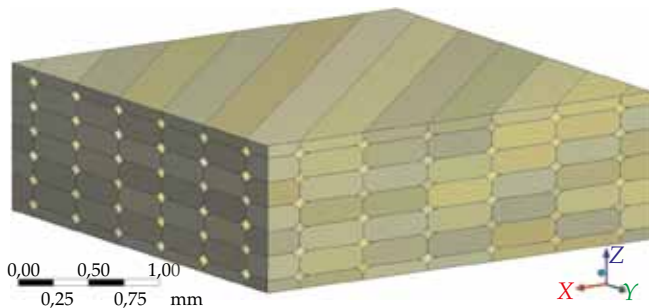
$$\sigma = \frac{F_R}{A_0} \quad (2)$$

gdzie: F_R – siła reakcji w więzach w kierunku wymuszonego przemieszczenia, A_0 – początkowe pole przekroju poprzecznego rozciąganego modelu, obliczane jako iloczyn wymiarów zewnętrznych modelu w kierunkach prostopadłych do kierunku rozciągania;

– moduł sprężystości podłużnej (E_t):

$$E_t = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

Wielkość E_t jest rozpatrywanym w tym artykule parametrem wyjściowym modelu numerycznego. Przykładową realizację modelu numerycznego gotowego do przeprowadzenia analizy przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Przykładowy model numeryczny dla parametrów:

$P_d = 0,3$ mm, $P_h = 0,178$ mm, $P_w = 0,3854$ mm, $P_{orient\ center} = 45^\circ$

Fig. 3. Example numerical model for parameters: $P_d = 0.3$ mm,

$P_h = 0.178$ mm, $P_w = 0.3854$ mm, $P_{orient\ center} = 45^\circ$

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

W celu weryfikacji proponowanego modelu numerycznego zaplanowano, a następnie przeprowadzono doświadczalne oznaczanie właściwości mechanicznych struktur wytwarzanych w technologii FDM. Ponieważ była to pierwsza próba sprawdzenia słuszności proponowanego rozwiązania przewidywania właściwości mechanicznych, ograniczono się do zbadania niewielkiej liczby próbek o strukturze wykonanej w wybranych kierunkach dla pojedynczego zestawu wartości parametrów odpowiadających za: wysokość warstwy, średnicę dyszy i odległość między sąsiadującymi odcinkami trajektorii narzędzia.

T a b e l a 1. Wybrane właściwości fizyczne tworzywa ABS-M30 [14]

T a b l e 1. Selected properties of ABS-M30 polymeric material [14]

Właściwość	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	36
Moduł sprężystości podłużnej, MPa	2413
Współczynnik Poissona, [-]	0,34
Odkształcenie przy zerwaniu, %	4
Gęstość, g/cm ³	1,04
Temperatura mięknięcia, °C	99
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, 1/K	$8,82 \cdot 10^{-5}$

T a b e l a 2. Zastosowane parametry procesu wytwarzania próbek

T a b l e 2. Machine settings for manufacturing of test specimens

Parametr	Wartość
Średnica dyszy T12, in (mm)	0,012 (0,3)
Szczelina powietrzna, in (mm)	0,001 (0,0254)
Temperatura głowicy, °C	230
Temperatura stolika, °C	90
Wysokość warstwy, mm	0,178
Wymiary przestrzeni roboczej (X, Y, Z), mm	355, 254, 254

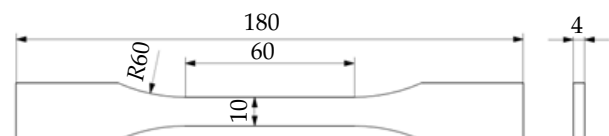
Materiał

Wszystkie próbki wykonano z tworzywa polimerowego: poli(akrylonitryl-co-butadien-co-styren), dostarczonego w postaci szpuli filamentu oznaczonego handlowo ABS-M30 (taki sam materiał w podobny sposób stosowali inni autorzy [13]). Wybrane właściwości fizyczne (dane udostępnione przez producenta [14]), przedstawiono w tabeli 1.

Otrzymywanie kształtek

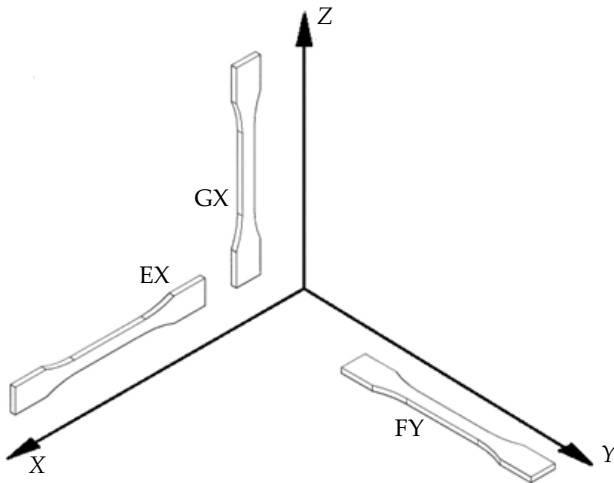
Kształtki wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012 (rys. 4) za pomocą maszyny Stratasys FORTUS 400mc skonfigurowanej z dyszą T12. Przez dyszę tłoczono uplastyczniony materiał polimerowy w postaci włókna o przekroju kołowym. Zastosowane parametry procesu wytwarzania próbek przedstawiono w tabeli 2.

Wykonano trzy serie po trzy próbki w każdej serii. Orientacje próbek, ściśle związane z osiami maszyny,



Rys. 4. Wymiary kształtek wykorzystanych w badaniu wg PN-EN ISO 527-1:2012

Fig. 4. Dimensions of test specimens used in the study according to PN-EN ISO 527-1:2012



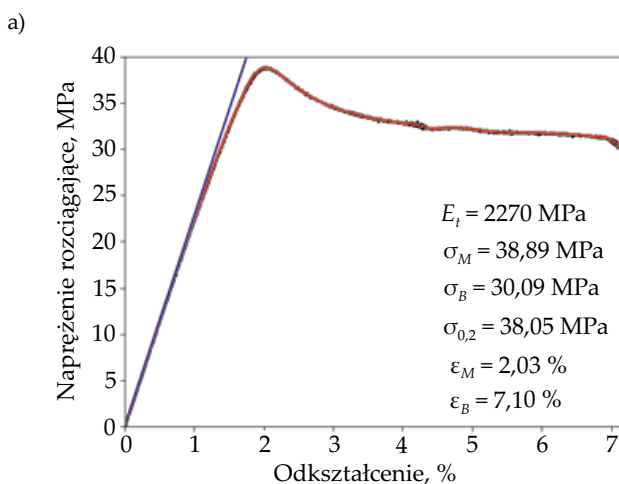
Rys. 5. Orientacje serii próbek względem układu współrzędnych maszyny

Fig. 5. Sample series orientations relative to the machine coordinate frame

a także z ortotropowym modelem struktury wytwarzanej przyrostowo, pokazano na rys. 5. W każdej serii uplastycznione włókno polimerowe nakładano równoległe do osi X maszyny.

Metodyka badań

Próby jednoosiowego statycznego rozciągania przeprowadzono z wykorzystaniem maszyny Instron 8516 [15]. Próbki rozciągano z prędkością 1,5 mm/min, aż do całkowitego zerwania. Siłę, mierzoną przetwornikiem zainstalowanym w maszynie, oraz odkształcenie, mierzone ekstensometrem mechanicznym, rejestrowano z częstotliwością 100 Hz.



WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Badania doświadczalne

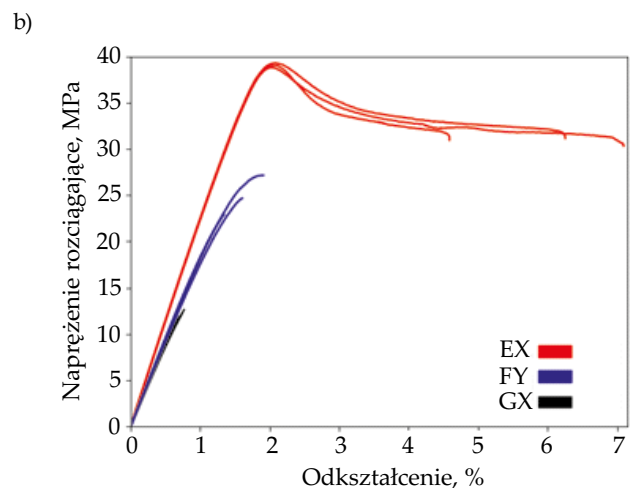
Sposób opracowania wyników na przykładzie próbki EX3 pokazano na rys. 6a. Naprężenia stanowią iloraz zarejestrowanej siły i początkowego pola przekroju próbki w obszarze pomiarowym. Z wykresu można odczytać przede wszystkim moduł sprężystości podłużnej, wyznaczony zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012. Czarne punkty na wykresie odpowiadają danym doświadczalnym. Ciągła czerwona linia to wynik obróbki danych za pomocą filtra Savitzky'ego-Golay'a [16, 17]. Współczynnik kierunkowy zaznaczonego na niebiesko odcinka linii prostej jest równy modułowi sprężystości podłużnej E_t .

Krzywe naprężenie-odkształcenie wszystkich badanych kształtek w próbie statycznego jednoosiowego rozciągania przedstawiono na rys. 6b. Największą sztywność i wytrzymałość na rozciąganie wykazują kształtki serii EX, natomiast kształtki serii GX cechuje największa podatność na rozciąganie i najmniejsze naprężenia zrywające, co jest spowodowane kierunkiem ułożenia włókien. Próbki każdej serii wykazywały zadowalającą powtarzalność wyników.

Model numeryczny

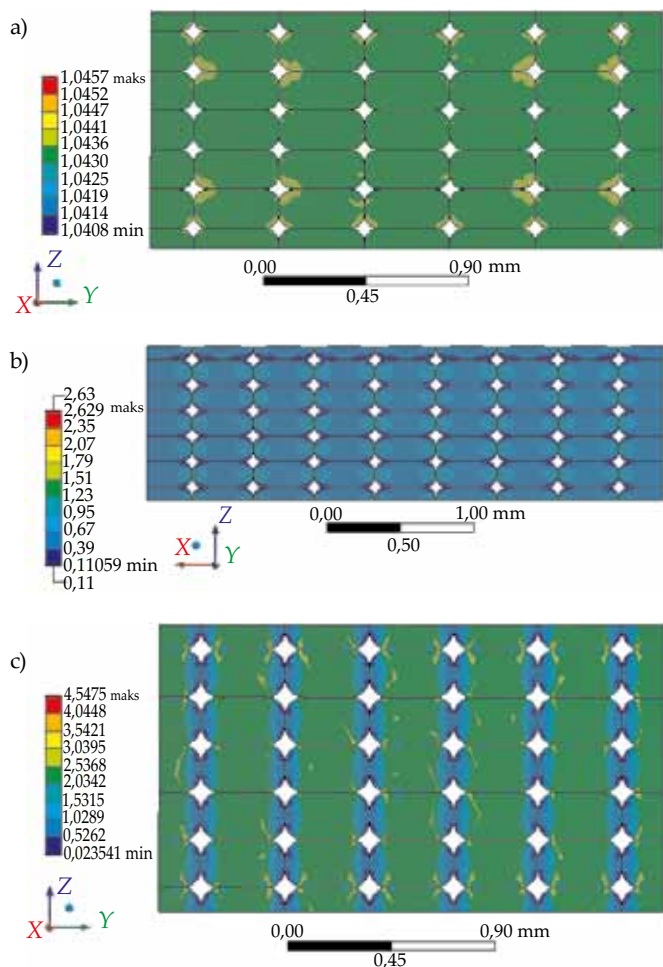
Do modelu numerycznego wprowadzono dane odpowiadające właściwościom materiału ABS-M30, z którego wykonano próbki do badań doświadczalnych. Przyjęto izotropowy, liniowy model materiału.

Rozkłady naprężeń zredukowanych dla trzech przeprowadzanych analiz przedstawiono na rys. 7. Stwierdzono, że struktura pracuje jednorodnie z wyjątkiem



Rys. 6. Wykresy naprężenia w funkcji odkształcenia w próbie statycznego jednoosiowego rozciągania: a) kształtki EX3, b) zbiorczy wykres wszystkich badanych kształtek; E_t – moduł sprężystości podłużnej, σ_M – naprężenie maksymalne, σ_B – naprężenie przy zerwaniu, $\sigma_{0,2}$ – umowna granica plastyczności, ϵ_M – odkształcenie odpowiadające naprężeniu maksymalnemu, ϵ_B – odkształcenie przy zerwaniu

Fig. 6. Stress-strain plots of all tested specimens for static tensile test: a) EX3 specimen, b) collective plot for tested specimens; E_t – elastic modulus, σ_M – maximum stress, σ_B – stress at break, $\sigma_{0,2}$ – apparent yield strength, ϵ_M – deformation at maximum stress, ϵ_B – deformation at break



Rys. 7. Rozkłady naprężeń zredukowanych w odniesieniu do trzech przeprowadzonych analiz numerycznych: a) model kształtki serii EX, b) model kształtki serii FY, c) model kształtki serii GX

Fig. 7. Equivalent stress contour plots of the three numerical analyses performed: a) model of EX series, b) model of FY series, c) model of GX series

obszarów koncentracji naprężeń, występujących w okolicach miejsc styku sąsiadujących ze sobą spłaszczonych włókien. Obszarów tych nie obserwuje się wyłącznie w wypadku włókien obciążonych wzdłuż ich osi (za wyjątkiem małych zaburzeń numerycznych). W tym wypadku w całym przekroju analizowanych włókien naprężenia, określone z dokładnością numeryczną, są stałe.

Wartości modułów sprężystości podłużnej uzyskane z analiz numerycznych zestawiono z wynikami badań doświadczalnych (tabela 3). Stwierdzono, że w wypadku próbek o orientacji EX i GX błąd względny wynikający z zastosowania proponowanego modelu numerycznego w odniesieniu do wyników badań doświadczalnych nie przekraczał 1 %. Błąd dotyczący próbek z serii FY był większy i wynosił ponad 6 %. Największy moduł sprężystości podłużnej wykazywały próbki o orientacji EX, natomiast najmniejsza średnia wartość E_t cechowała próbki serii FY, zarówno w odniesieniu do badań doświadczalnych, jak i modelu numerycznego. Największym rozrzu-

T a b e l a 3. Porównanie modułu sprężystości podłużnej wyznaczonego na podstawie badań doświadczalnych i przewidzianego za pomocą modelu numerycznego

T a b l e 3. Comparison of elastic modulus: experimental and calculated from numerical model

Seria	Moduł sprężystości podłużnej MPa		Błąd względny %
	Model numeryczny	Badania doświadczalne	
EX	2290	2272 ± 11,3	0,79
FY	1681	1792 ± 16,9	6,19
GX	1875	1871 ± 44,4	0,21

± – odchylenie standardowe.

± – standard deviation.

tem doświadczalnych wartości modułów sprężystości podłużnej charakteryzowały się próbki z serii GX.

Procentowy błąd względny (Δx) obliczano według wzoru:

$$\Delta x = \frac{|E_{\text{model}} - E_{\text{exp}}|}{E_{\text{exp}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie: E_{model} – moduł sprężystości podłużnej uzyskany z modelu numerycznego, E_{exp} – wartość średnia wyznaczonego doświadczalnie modułu sprężystości podłużnej danej serii próbek.

PODSUMOWANIE

Zaproponowano nowy parametryczny model numeryczny do przewidywania właściwości mechanicznych struktur wytwarzanych w technologii FDM z materiałów polimerowych. Dane uzyskane za pomocą modelu porównane z wynikami badań doświadczalnych oznaczania modułu sprężystości podłużnej wykazują zadowalającą zgodność.

Wyniki uzyskane doświadczalnie są zgodne z otrzymanymi przez innych badaczy. Prace zespołu Pilipović A. i współpr. [18] potwierdzają słuszność założenia o liniowej zależności naprężeń i odkształceń w początkowej fazie rozciągania. Crococo D. i współpr. [19] badali również materiał ABS-M30. Uzyskane przez nich krzywe rozciągania są zgodne z przedstawionymi w niniejszej pracy i potwierdzają poprawność wyznaczenia współczynnika sprężystości liniowej, który w wypadku próbek o orientacji włókien ± 45° w następujących po sobie warstwach o wysokości 0,25 mm wynosił 1812 ± 107 MPa. Wyniki prezentowanego w niniejszej pracy modelu do przewidywania właściwości mechanicznych tworzyw polimerowych są także zbliżone z osiągnięciami innych badaczy posługujących się metodą elementów skończonych, np. sposób modelowania przedstawiony przez Naghieh S. i współpr. [20] wykazywał błąd w stosunku do wyników badań doświadczalnych na poziomie 16,11 % lub 0,02 %, w zależności od rozpatrywanego przypadku.

Zaproponowany przez nas model zweryfikowano doświadczalnie na podstawie wyników badań prowadzonych dla trzech głównych kierunków układania włókien. Małe rozbieżności wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi dają podstawy do dalszych prac nad rozwojem modelu. Zaplanowano weryfikację poprawności modelu w odniesieniu do włókien o dowolnej wzajemnej orientacji oraz rozszerzenie zakresu przewidywania o współczynnik Poissona oraz moduł sprężystości poprzecznej, co pozwoli na określenie wszystkich parametrów macierzy sztywności materiału ortotropowego.

Kolejnym etapem prac będzie implementacja nieliniowego modelu materiałowego oraz kryteriów zniszczenia, co umożliwi przewidywanie nie tylko sztywności, lecz także wytrzymałości polimerowych struktur wytwarzanych metodą FDM. Nawet taki model jednak nie zastąpi w pełni doświadczalnego wyznaczania stałych mechanicznych, ale może znacznie ograniczyć liczbę niezbędnych do oceny konfiguracji, co w istotnym stopniu zmniejszy koszty badań. Model może też znaleźć zastosowanie w multiskalowym modelowaniu złożonych struktur.

LITERATURA

- [1] Pat. US 5 121 329 (1989).
- [2] Campbell I., Bourell D., Gibson I.: *Rapid Prototyping Journal* **2012**, 18, 255.
<http://dx.doi.org/10.1108/13552541211231563>
- [3] Dawoud M., Taha I., Ebeid S.J.: *Journal of Manufacturing Processes* **2016**, 21, 39.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.11.002>
- [4] Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S.: *Materials & Design* **2010**, 31, 287.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>
- [5] Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S.: *Journal of Advanced Research* **2012**, 3, 81.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001>
- [6] Casavola C., Cazzato A., Moramarco V. i in.: *Materials & Design* **2016**, 90, 453.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009>
- [7] Garg A., Bhattacharya A.: *International Journal of Mechanical Sciences* **2017**, 120, 225.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.032>
- [8] Ahn D., Kweon J.-H., Kwon S. i in.: *Journal of Materials Processing Technology* **2009**, 209, 5593.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016>
- [9] El-Gizawy A.S., Corl S., Graybill B.: "Process-induced Properties of FDM Products", *Materiały International Conference on Mechanical Engineering and Technology Congress & Exposition*, Paryż, Francja, 25–29 lipca 2011.
- [10] Gurrall P.K., Regall S.P.: *Virtual and Physical Prototyping* **2014**, 9, 141.
<http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2014.913400>
- [11] Costa S.F., Duarte F.M., Covas J.A.: *Journal of Materials Processing Technology* **2017**, 245, 167.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.026>
- [12] Bellehumeur C., Li L., Sun Q. i in.: *Journal of Manufacturing Processes* **2004**, 6, 170.
[http://dx.doi.org/10.1016/S1526-6125\(04\)70071-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70071-7)
- [13] Cader M., Oliwa R., Markowska O. i in.: *Polimery* **2017**, 62, 27.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.027>
- [14] <http://www.stratasys.com/materials/fdm/abs-m30> (data dostępu 29.11.2017)
- [15] Oliwa R., Oleksy M., Heneczkowski M. i in.: *Polimery* **2017**, 62, 36.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.036>
- [16] Jianwen L., Kui Y., Jing B.: *Signal Processing* **2005**, 85, 1429.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.02.002>
- [17] Schafer R.W.: *IEEE Signal Processing Magazine* **2011**, 28, 111.
<http://dx.doi.org/10.1109/MSP.2011.941097>
- [18] Pilipović A., Raos P., Šercer M.: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2009**, 40, 105.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1310-7>
- [19] Crococo C., De Agostinis M., Olmi G.: *Computational Materials Science* **2013**, 79, 506.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.06.041>
- [20] Naghieh S., Ravari M.R.K., Badrossamay M. i in.: *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* **2016**, 59, 241.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.01.031>

Otrzymano 12 I 2018 r.