

Tomasz JARUGA, Michał MODŁAWSKI

Zakład Przetwórstwa Polimerów, Instytut Technologii Mechanicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, ul. Armii Krajowej 19C, 42-201 Częstochowa
e-mail: michal.modlowski@ipp.pcz.pl

Wytrzymałość struktury sześciokątnej otrzymanej metodą drukowania FDM

Streszczenie: Zbadano wytrzymałość struktury sześciokątnej o różnej wielkości otworów: 5, 10 oraz 15 mm a także dwóch różnych sposobach wytworzenia tych elementów metodą przyrostową FDM (Fused Deposition Modeling), różniącymi się sposobem prowadzenia wytłaczanego tworzywa. Wytrzymałość struktury określano za pomocą badania polegającego na obciążaniu próbki umieszczonej w uchwycie z otworem. Ustalono, że wytrzymałość struktury o wielkości otworów 15 mm i 10 mm to odpowiednio: 34% oraz 53% w stosunku do wytrzymałości struktury 5 mm. Ponadto, zarejestrowano różnicę wytrzymałości struktury w zależności od sposobu nakładania wytłaczanego tworzywa w kolejnych warstwach oraz od zastosowania retrakcji.

Słowa kluczowe: drukowanie 3D, Fused Deposition Modeling, wytrzymałość części wytwarzanych metodami Rapid Prototyping

STRENGTH OF FDM-PRINTED HEXAGONAL STRUCTURE

Abstract: Strength of the hexagonal structure of 5, 10 and 15 mm hole dimension and made by different options of FDM (Fused Deposition Modeling) was tested. The strength was determined in the test of loading the samples fixed over a hole. It was stated that the strength of 15 mm and 10 mm structure is respectively 34% and 53% of the 5 mm structure. Moreover, significant difference in strength depending on the manufacturing strategy and using or not the retraction option was noticed.

Keywords: 3D printing, Fused Deposition Modeling, strength of Rapid Prototyping parts

WPROWADZENIE

Metody przyrostowe wytwarzania prototypów (Rapid Prototyping) i narzędzi (Rapid Tooling) rozwijają się dynamicznie od końca lat 80. XX wieku. Wśród nich można wyróżnić takie główne metody jak [1,2]:

- stereolitografia (SL albo SLA – Stereolithography) – metoda utwardzania żywicy wiązką lasera UV,

- selektywne spiekanie laserowe (SLS – Selective Laser Sintering) – spiekanie wiązką lasera cząstek proszku materiału roboczego, czasem pokrytych warstwą adhezyjną. Czasami kolejnym etapem jest infiltracja porowatej struktury albo jej wygrzewanie,

- modelowanie uplastycznionym tworzywem (FDM – Fused Deposition Modeling) – układanie uplastycznionej nitki tworzywa,

- drukowanie 3D (3D Printing) – nakładanie spoiwa z głowicy drukującej. Spoiwo łączy cząstki proszku. Nazwa tej metody jest czasami używana zbiorczo do określania innych metod szybkiego prototypowania, na przykład metody FDM,

- drukowanie fotopolimerem (JS – Jetting System albo PJ – PolyJet) – nakładanie jednoczesne wielu kropli fotopolimeru z otworów głowicy drukującej na jedną warstwę tworzonego przedmiotu na platformie roboczej, i utwardzanie całej warstwy światłem UV,

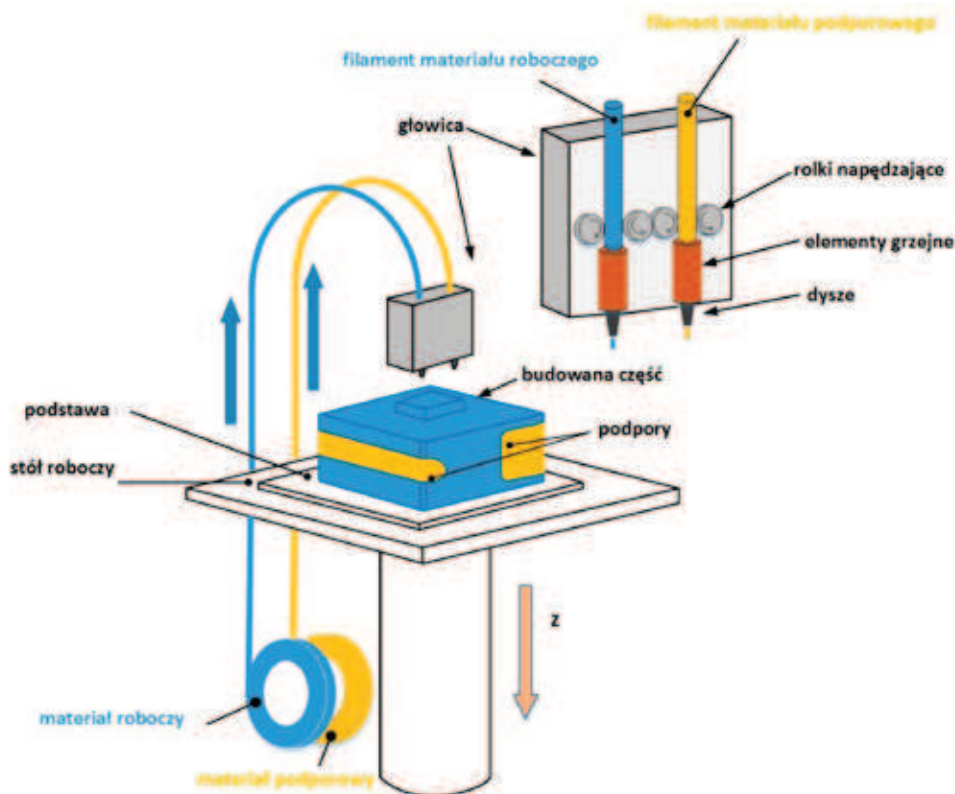
- laminowanie warstwowe (LLM – Layer Laminate Manufacturing albo LOM – Layer Object Manufacturing) – łączenie warstw materiału, wycinanych z arkuszy, najczęściej laserem.

Szybkie prototypowanie (Rapid Prototyping) umożliwia wykonywanie prototypów do oceny na przykład ergonomii wyrobu, czy też

współpracy kinematycznej części w ramach zespołu. Niejednokrotnie wykonywane są w ten sposób elementy na specjalne zamówienie, mające zastąpić części uszkodzone, czy też małe serie wyrobów, gdy nie jest uzasadnione ekonomicznie wykonywanie narzędzia typu forma wtryskowa w metalu. Stosuje się również elementy wykonane przyrostowo jako mające zastosowania w badaniach naukowych [3] czy testach technicznych, ze względu na możliwość szybkiej korekty kształtu w razie konieczności usprawnienia ich działania. Metody szybkiego wytwarzania narzędzi (Rapid Tooling) dają z kolei możliwość uzyskania w ciągu kilkunastu czy kilkudziesięciu godzin prototypowego narzędzia. Znane jest też zastosowanie metod przyrostowych, w szczególności SLM (Selective Laser Melting – selektywne stapianie laserowe) do wykonywania tzw. kanałów konformalnych w formach wtryskowych, które to kanały, dzięki swojemu bardzo skomplikowanemu dla klasycznej obróbki kształtowi umożliwia-

ją skuteczne chłodzenie trudno dostępnych obszarów gniazd form wtryskowych [4].

Metoda FDM (Fused Deposition Modeling) nazywana metodą modelowania uplastycznionym tworzywem [5,6] jest dziś powszechnie stosowana, ze względu na szereg praktycznych zalet, jakimi są dostępność i stosunkowo niska cena materiału. W metodzie tej stosować można tworzywa termoplastyczne, najczęściej ABS, które mają postać nawiniętej na szpulę nitki, zwanej filamentem, o średnicy zwykle powyżej 1,5 mm. Zaletą tej metody jest również to, że urządzenie nie działa na zasadzie sterowania wiązką lasera, a to powoduje, że koszt urządzenia nie jest wysoki. W tym przypadku kolejne warstwy są tworzone przez wytłaczaną nitkę uplastycznionego tworzywa, które opuszcza głowicę o średnicy kilku dziesiątych milimetra. Druga głowica nanosi materiał podporowy, który jest konieczny do podparcia wytworzonych w poprzednich krokach warstw, które znajdują się poza obrębem tworzonych niżej warstw wyrobu – rys. 1.



Rys. 1. Schemat metody FDM [5, 7]

Fig. 1. Scheme of FDM method [5, 7]

Jednym z problemów towarzyszących wykonywaniu prototypów jest różnica wytrzymałości prototypu i wyrobu docelowego. Wiąże się to po pierwsze z częstą koniecznością zastosowania innego tworzywa do wykonania prototypu, a po drugie z samą technologią wykonania prototypu, polegającą na nakładaniu kolejnych warstw, których spójność może być inna niż ciągłego materiału uzyskanego na przykład w procesie wtryskiwania, prasowania czy odlewania. Oprócz warstw tworzących powłokę zewnętrzną w elementach uzyskiwanych metodami Rapid Prototyping należy liczyć się z obniżeniem wytrzymałości w środku wyrobu, gdyż w celu przyspieszenia procesu wytwarzania a także uzyskania oszczędności materiału oraz zmniejszenia masy stosuje się wypełnienie wnętrza określoną strukturą, której zadaniem jest połączenie ścianek wyrobu stanowiących powłokę zewnętrzną. Stosuje się na przykład wypełnienie ściankami krzyżującymi się pod kątem prostym albo tworzącymi strukturę heksagonalną, przypominającą plaster miodu. Prowadzone są badania mające na celu określenie wytrzymałości elementów wytworzonych metodami szybkiego prototypowania, aby oszacować, w jakim stopniu można zbliżyć się do wytrzymałości docelowego wyrobu litego [5,6]. W badaniach wytrzymałości na rozciąganie kształtek z tworzywa ABS wytrzymałość kształtek wytworzonych metodą FDM wynosiła od około 30 do 75% wytrzymałości kształtek wtryskiwanych [5]. W pracy [6] wykazano natomiast, że dokładność wymiarowo-kształtowa nie zależy w istotny sposób od stopnia wypełnienia kształtki z ABS. Obok różnicy wytrzymałości na obciążenia statyczne elementy drukowane metodą FDM wykazują różną wytrzymałość zmęczeniową, co dla tworzywa ABS z różnym rodzajem wypełnienia wykazano w pracy [8]. Ponadto, elementy wykonywane tą metodą wykazują anizotropię właściwości wytrzymałościowych, co dla tworzywa ABS potwierdzono w pracy [9], stosując różne rodzaje wypełnienia. Oprócz stopnia wypełnienia strukturą heksagonalną wpływ na wytrzymałość na ściskanie ma również liczba linii tworzących

kontur przedmiotu w jednej warstwie. Wpływ ten jest znaczący, gdy wypełnienie będzie stanowiło niewielki procent, jak na przykład 10, 25 czy 50% powierzchni jednej warstwy, co wykazano dla tworzywa ABS w pracy [10].

Celem badań, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy, było określenie wytrzymałości struktury heksagonalnej (sześciokątnej), wytworzonej metodą FDM, przy różnej wielkości otworów. Tego typu struktura jest stosowana zarówno jako wypełnienie wnętrza elementów wytwarzanych metodą FDM, jak i do różnego typu elementów gotowych, na przykład elementy frontów w samochodach czy też perforowane przegrody stosowane do badań przepływów przez złoża materiałów gruboziarnistych. W tym ostatnim przypadku struktura sześciokątna, oprócz zapewnienia przepływu czynnika przez spoczywający na przegrodzie materiał, musi spełnić kryterium wytrzymałości na ścinanie oraz rozciąganie, aby przenieść odpowiedni ciężar elementów stanowiących przepuszczalne złoża. Pod tym kątem prowadzono badania, analizując wytrzymałość elementów podczas testu, w którym odzwierciedlono obciążenie tego typu elementu, zamontowanego w zbiorniku i przenoszącego wymienione obciążenie. Czynnikiem zmiennymi były: wielkość otworów w strukturze heksagonalnej oraz sposób nakładania poszczególnych warstw podczas wykonywania próbek metodą FDM, polegający na zastosowaniu różnej ścieżki narzędzia (głowicy), z czym związany był również różny czas wytwarzania.

BADANIA EKSPERYMENTALNE

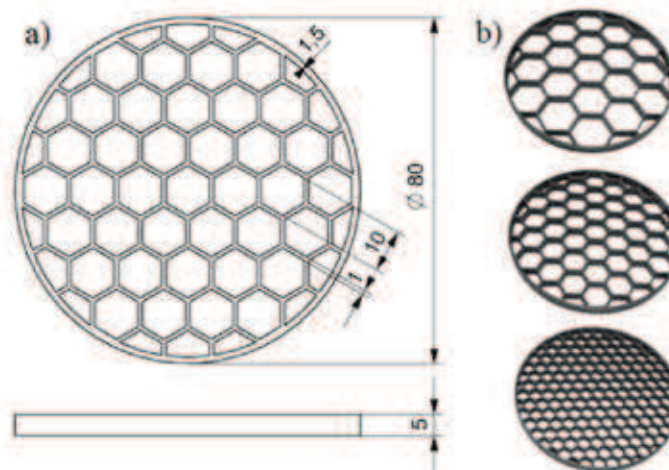
Próbki zostały wykonane na drukarce 3D golemD firmy 3FX. Materiał w postaci filamentu, z którego wykonane zostały próbki to akrylonitryl-butadien-styren (ABS) o średnicy nominalnej $1,75 \pm 0,05$ mm. Tworzywo to zostało wybrane ze względu na większą wytrzymałość oraz odporność termiczną w stosunku do drugiego, równie często stosowanego materiału jakim jest polilaktyd (PLA). Przewidziano wykonanie części przy użyciu dwóch różnych sposobów pro-

wadzenia wytłaczanego tworzywa, czyli różnych kształtów ścieżki narzędzia, oraz trzech wielkości otworów struktury sześciokątnej.

Kształt i wymiary próbki przedstawiono na rys.2. W badaniach zastosowano trzy rodzaje struktury heksagonalnej różniące się wielkością sześciokątnych otworów. Ich wielkość określona została za pomocą średnicy okręgu wpisanego w sześciokąt, a określona w artykule jako wielkość otworu, wynosi 15 mm, 10 mm albo 5 mm. Na rys. 2a przedstawiono pozostałe wymiary elementu o wielkości otworu 10 mm.

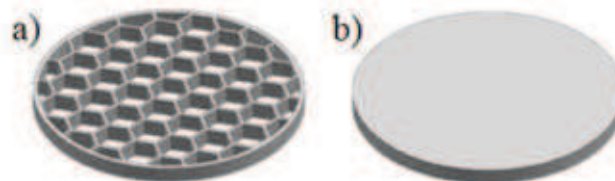
W celu wykonania próbek o określonym kształcie można zastosować dwie metody wytwarzania tych elementów. Pierwsza, oznaczona literą A – polega na wykonaniu rysunku 3D elementu o założonym kształcie (rys. 3a) oraz na tej podstawie wykonanie wydruku. Druga

metoda – metoda B – zakłada narysowanie w programie CAD krążka (rys.3b) o wymiarach zewnętrznych takich, jak w metodzie A. Część wewnętrzna – o strukturze heksagonalnej, jest tworzona w programie służącym do generowania kodu wykonywanego przez drukarkę (tzw. G-code) na podstawie pliku o rozszerzeniu *stl* zawierającego model elementu. Do tego celu został wykorzystany program o nazwie Slic3r. Elementy wykonywane na drukarce 3D nie są całkowicie wypełnione, lecz wewnątrz nich najczęściej generowana jest określona w programie struktura. Jedną z możliwych do uzyskania kompozycji jest struktura heksagonalna. Opcja ta została wykorzystana w metodzie B do wykonania elementów. Górna oraz dolna powierzchnia kształtki na rys. 3b nie są drukowane.



Rys. 2. Kształt i wymiary badanej kształtki: a) szkic elementu o wielkości otworu 10 mm b) wykonane próbki o wielkości otworu kolejno 15, 10 oraz 5 mm

Fig. 2. Shape and dimensions of the tested elements: a) sketch of the element of 10 mm structure, b) the manufactured samples with 15, 10, and 5 mm hole dimensions

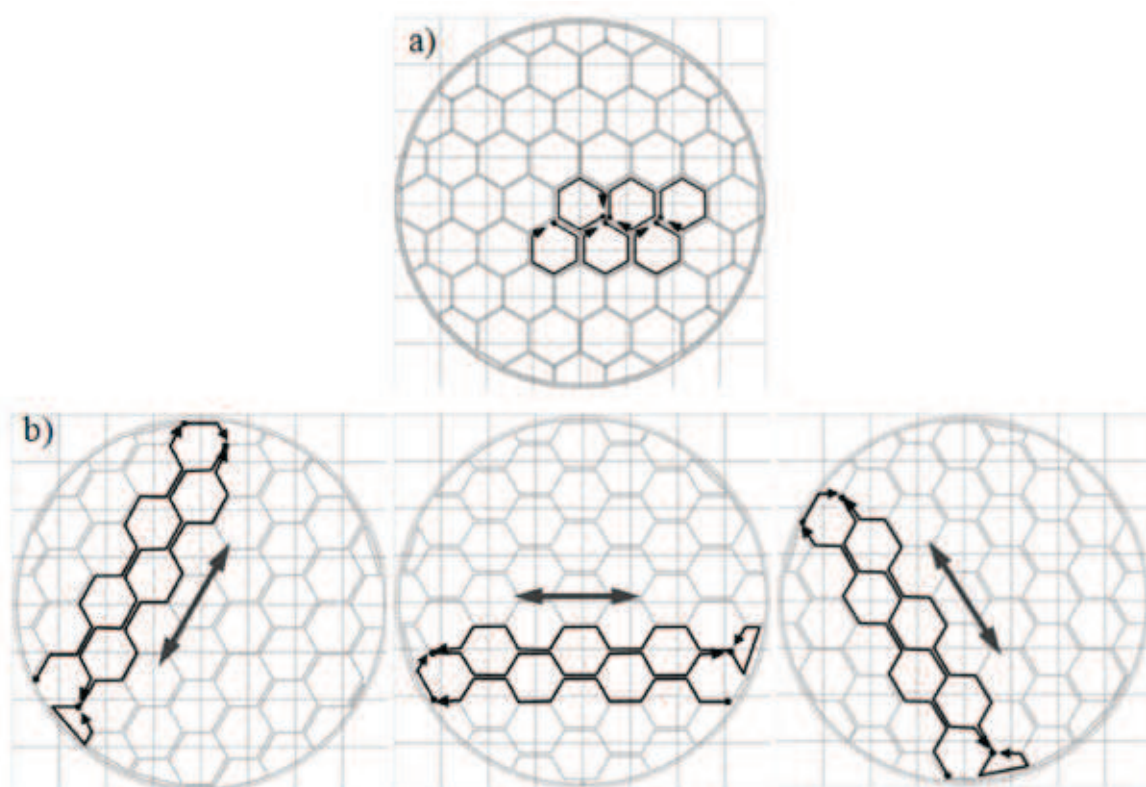


Rys.3 Kształt modeli CAD w: a) metodzie pierwszej – A, b) metodzie drugiej – B – struktura sześciokątna powstanie w tym elemencie podczas generowania G-code'u

Fig. 3. CAD models in: a) the first method - A, b) the second method - B - hexagonal structure is created in this case in G-code generation

Od wybranej metody zależy sposób generowania kodu dla poszczególnych warstw. Z danym sposobem generowania kodu związany jest określony kształt ścieżki narzędzia. Na rys. 4 przedstawiono pojedynczą warstwę wydruku wygenerowaną przez program Slic3r w metodzie A – rys. 4a oraz trzy kolejne warstwy w metodzie B – rys. 4b. Za pomocą łamanych strzałką oznaczono ścieżkę narzędzia – dyszy drukującej.

Obiema metodami jest taka sama i wynosi 1 mm. Grubość ta determinuje parametr drukowania: szerokość wytłaczania – szerokość wytłoczyny (*extrusion width*). W pierwszej metodzie wielokrotność szerokości wytłoczyny musi być równa 1 mm, dlatego parametr ten został ustawiony na wartość 0,5 mm. Natomiast w metodzie drugiej parametr ten musi być równy 0,75 mm, aby uzyskać ściankę o średniej grubości 1 mm.



Rys. 4. Podgląd pojedynczej warstwy wygenerowanego G-code'u: a) elementu wykonanego metodą A, b) trzy kolejne warstwy wykonane metodą B

Fig. 4. View of the single layer of G-code extruder path: a) of the element manufactured by A-method, b) three consecutive layers manufactured by B-method

Grubość ścianki struktury sześciokątnej w metodzie B nie jest stała. Gdy ścianka ułożona jest równoległe do kierunku generowania wypełnienia, zaznaczonego na środku kształtki strzałką (rys. 4b), jej grubość jest dwa razy większa niż gdy ścianka jest ułożona w inny sposób. Dlatego, w celu porównania otrzymanych wyników określono, że średnia grubość ścianki struktury sześciokątnej uzyskanych

Istotnym parametrem przy drukowaniu FDM jest retrakcja. Polega ona na cofnięciu filamentu oraz uniesieniu dyszy podczas przemieszczania głowicy drukarki. Stosuje się ją, aby zapobiegać wyciekaniu tworzywa z dyszy podczas ruchu jałowego oraz powstawaniu nitek pomiędzy oddzielnymi obszarami drukowanymi na jednej warstwie. Retrakcja jest zazwyczaj wykonywana przy drukowaniu ścianek zewnętrznych oraz gdy dy-

sza się nad nimi przemieszcza, natomiast podczas wytwarzania wypełnienia nie jest wykonywana. Ponieważ właśnie to wypełnienie w próbkach wykonanych metodą B zostało poddane badaniom, zdecydowano się na wykonanie próbek metodą B zarówno z włączoną jak i wyłączoną retrakcją podczas drukowania wypełnienia.

Pozostałe parametry drukowania zadeklarowane w programie Slic3r:

- średnica dyszy: 0,3 mm,
- wysokość warstwy: 0,15 mm,
- gęstość wypełnienia – dotyczy metody B, wynosi:
 - 9% w celu uzyskania otworów sześciokątnych o wielkości 15 mm,
 - 13% odpowiada wielkości otworu 10 mm,
 - 23% dla otworów 5 mm,
- prędkość drukowania: pierwsza warstwa: 25 mm/s, ścianki: 60 mm/s, wypełnienie: 80 mm/s,
- średnica filamentu: 1,80 mm – wyznaczona przy pomocy suwmiarki oraz na podstawie obserwacji poziomych powierzchni płaskich wcześniej wykonanych wydruków,
- temperatura dyszy: 250°C,
- temperatura stołu roboczego: 100°C dla pierwszej warstwy oraz 90°C dla warstw kolejnych,
- parametry retrakcji:
 - długość odcinka cofniętego filamentu: 1 mm,
 - prędkość retrakcji: 30 mm/s,
 - wysokość uniesienia dyszy: 0,2 mm.

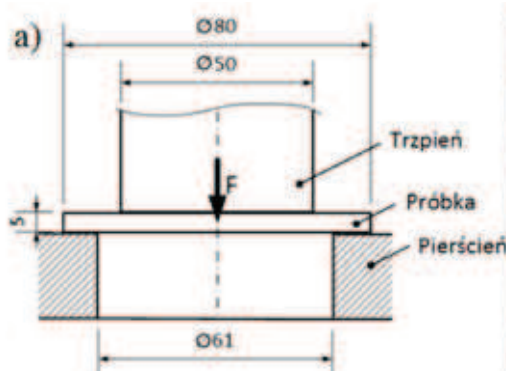
Badania wytrzymałościowe zostały wykonane w taki sposób, aby jak najlepiej odwzorować warunki obciążenia struktury sześciokątnej w złożu fluidalnym. Próbki o średnicy 80 mm i wysokości 5 mm umieszczone zostały na pierścieniu o średnicy wewnętrznej 61 mm i były ściskane trzpieniem o średnicy 50 mm, jak jest to przedstawione na rys. 5. Badania wytrzymałościowe zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Hegewald & Peschke InspektDesk 20 (maksymalne obciążenie 20 kN). Parametry badania były następujące:

- prędkość ściskania: 1 mm/min,
- pomiar był rejestrowany po przekroczeniu wartości siły 10 N,
- zakończenie testu następowało, gdy wartość siły obciążającej była mniejsza niż 30% wartości siły maksymalnej.

Wszystkie pomiary zostały wykonane po co najmniej 24 godzinach od wytworzenia próbek. Zbadano po 3 próbki z każdej serii. Przed przystąpieniem do badania właściwego próbki zostały zważone. Została również zmierzona wysokość próbek.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Czas wykonania próbek był różny w zależności od wielkości otworu sześciokątnego oraz wybranej metody. Najszybciej drukowane były elementy wykonane metodą B bez retrakcji – od 13 min dla otworu o wielkości 15 mm do 20 min



Rys. 5. Warunki przeprowadzania badania wytrzymałościowego: a) schemat, b) widok stanowiska (bez założonej próbki)

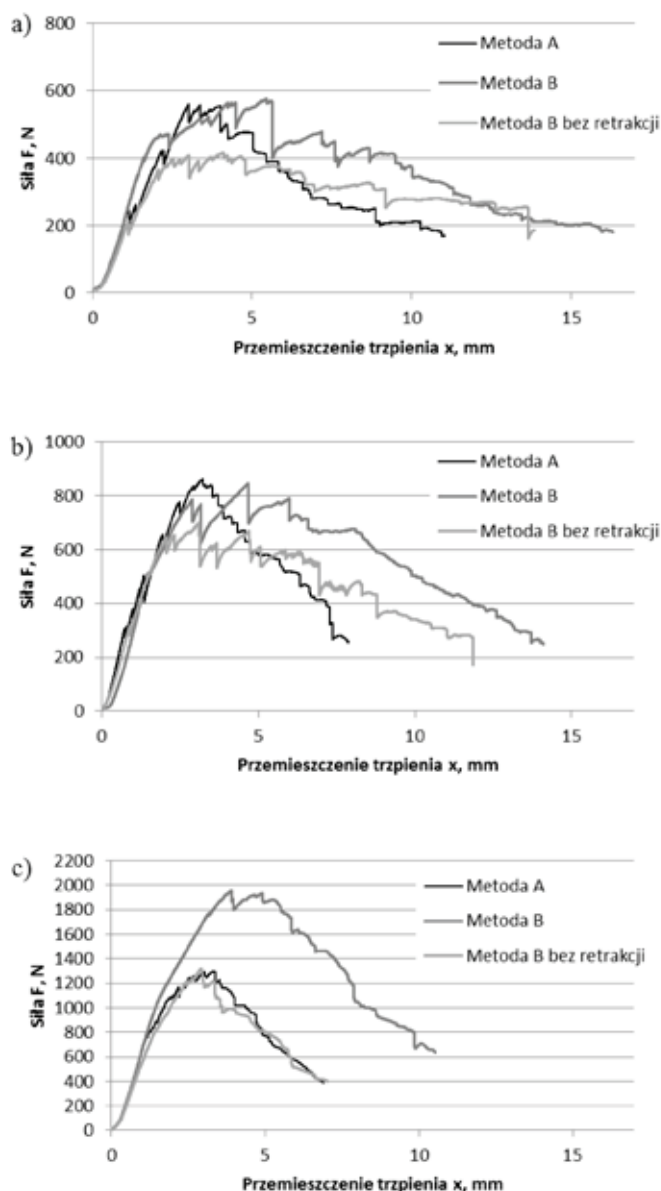
Fig. 5. The strength test: a) scheme, b) view of the test stand (without sample)

dla najmniejszego otworu. Włączenie retrakcji wydłużało czas drukowania o 1–2 min. Próbki wykonane metodą A były drukowane najdłużej – ok. 40 min dla elementu zawierającego największe otwory oraz ok. 90 min dla elementu z najmniejszymi sześciokątami.

Stwierdzono, że masa próbki nie zależy od metody jej wykonania i wynosi dla próbek o wielkości otworu sześciokątnego 15 mm: $4,52 \pm 0,06$ g;

dla 10 mm: $5,69 \pm 0,16$ g oraz dla próbek o wielkości otworu 5 mm: $8,24 \pm 0,14$ g. Średnia wysokość zmierzonych próbek to $4,98 \pm 0,05$ mm.

Na podstawie badań wytrzymałościowych uzyskano dane dotyczące zależności pomiędzy siłą, z jaką trzpień obciąża próbkę a wartością przemieszczenia tego trzpienia. Zależność ta dla wybranych próbek przedstawiona jest na wykresie na rys. 6. Podczas rejestracji krzy-



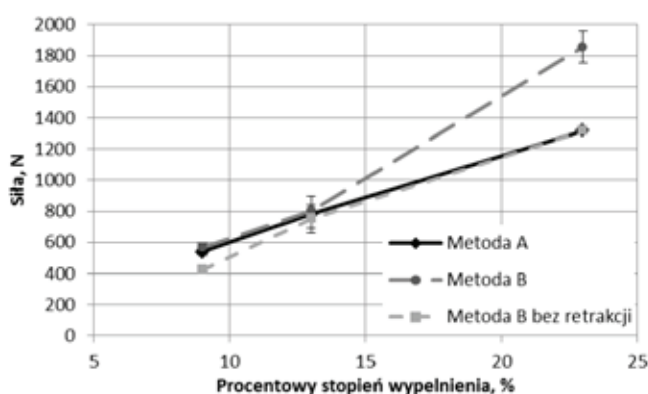
Rys. 6. Zależność siły przenoszonej przez próbkę w zależności od przemieszczenia tłoka dla wielkości otworu równego: a) 15 mm, b) 10 mm, c) 5 mm

Fig. 6. The plots of the load in the function of pushing rod displacement obtained for three hole dimensions of the hexagonal structure: a) 15 mm, b) 10 mm, c) 5 mm

wych występowały na nich krótkotrwałe spadki obciążenia, które odpowiadały zniszczeniu kolejnych obszarów struktury heksagonalnej.

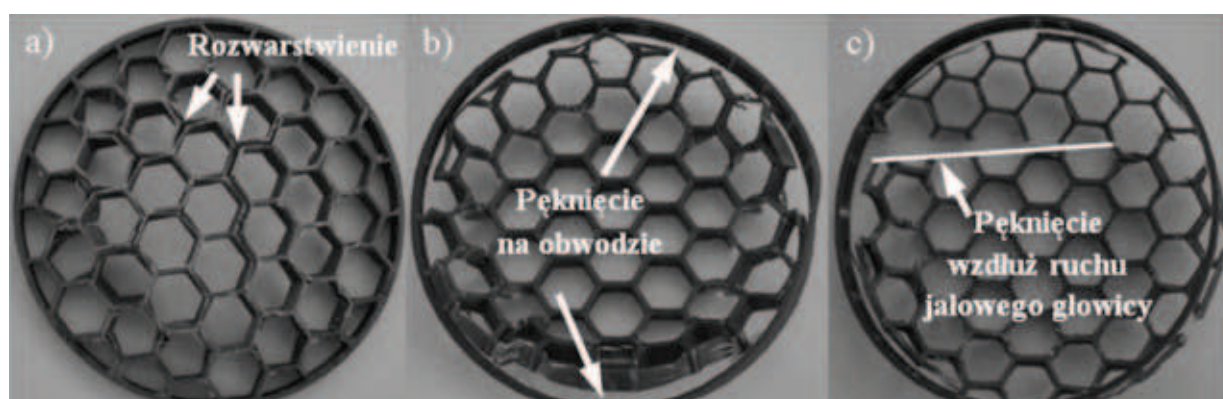
Na podstawie wykresów przedstawionych na rys. 6. została wyznaczona maksymalna zarejestrowana wartość siły obciążającej próbkę, nazwana w artykule siłą maksymalną. Zależność wartości tej siły w zależności od stopnia wypełnienia zadanego w metodzie B jest przedstawiona na rys. 7. Dla wygenerowania otworu o wielkości 15 mm zastosowano wypełnienie równe 9%, otworu o wielkości 10 mm 13% wypełnienia, natomiast otwór 5 mm uzyskano przy wypełnieniu 23%. W tym przypadku 100% wypełnienia odpowiadałoby próbce będącej litym krążkiem.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wraz ze zmniejszającą się wielkością otworu sześciokątnego, a więc zwiększającym się stopniem wypełnienia zwiększa się wartość siły maksymalnej obciążającej próbkę. Wartość maksymalnej siły jest podobna dla obu metod generowania kodu dla otworów sześciokątnych o wielkości 15 mm oraz 10 mm. Natomiast elementy o wielkości otworu 5 mm wydrukowane metodą B są bardziej wytrzymałe od elementów wykonanych metodą A o ok. 40%, pod warunkiem, że podczas drukowania elementów zostanie wykonana retrakcja. Retrakcja wykonywana podczas drukowania wypełnienia ma duży wpływ na wytrzymałość mechaniczną wydruków. Elementy wykonane



Rys. 7. Zależność siły maksymalnej od procentowego stopnia wypełnienia

Fig. 7. Maximum load as a function of fulfillment level



Rys. 8. Próbki o wielkości otworu 10 mm po badaniu wytrzymałości wykonanym a) metodą A, b) metodą B, c) metodą B bez retrakcji

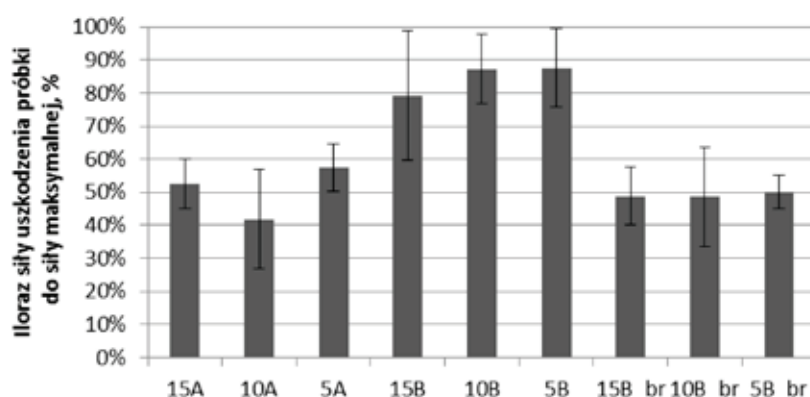
Fig. 8. The samples of 10 mm hole dimensions after the test. The samples were manufactured with a) A-method, b) B-method, c) B-method without retraction

przy włączonej retrakcji charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi – wartość siły maksymalnej jest większa średnio o 27%.

Podczas obciążania próbek następowało ich pękanie. Uszkodzenie próbki skutkowało zmniejszeniem siły ją obciążającej, co można zaobserwować jako pionowe odcinki – oznaczające spadek obciążenia na wykresach na rys. 6. Próbki wykonywane metodą A pękały zazwyczaj na połączeniu wytłoczonych „nitek” tworzących wewnątrz otworów sześciokątnych (miejsce zaznaczone strzałkami na rys. 8a). W próbkach z metody B uszkodzeniu ulegało połączenie pomiędzy wewnętrzną częścią próbki ścianką zewnętrzną o grubości 1,5 mm (strzałki na rys. 8b). Próbki metody B wykonane bez retrakcji pękały wzdłuż drogi ruchu jałowego głowicy drukującej (linia wskazywana przez strzałkę – rys. 8c), a następnie również pomiędzy częścią zawierającą strukturę sześciokątną a ścianką zewnętrzną.

tworzone tą metodą pękają dopiero przy przekroczeniu 80–90% wartości siły maksymalnej dla elementów wykonywanych tą metodą. Wyłączenie wykonywania retrakcji powoduje, że pęknięcie następuje już przy ok. 50% wartości siły maksymalnej tych elementów. Trwałe uszkodzenie wydruków uzyskane metodą A następuje przy podobnej jak w metodzie B bez retrakcji wartości siły względem siły maksymalnej – 40–60%.

Przedstawiona na wykresie na rys. 10. sztywność próbek obliczona została jako iloraz różnicy siły obciążającej próbkę do przemieszczenia trzpienia, które wywołuje tę zmianę wartości siły (wzór 1). Zakres wielkości siły oraz przemieszczenia został dobrany indywidualnie dla próbek z każdej metody i każdej wielkości otworu, tak aby zależność siły obciążającej od przemieszczenia trzpienia jest liniowa. Na podstawie wykresu na rys. 10. można stwierdzić, że sztywność k wykonanych próbek zależy w sposób liniowy od procentowego stopnia wypełnienia.



Rys. 9. Siła przy której następuje trwałe uszkodzenie próbki, odniesiona do siły maksymalnej. Liczba oznacza wielkość otworu, litera A, B oznacza metodę generowania kodu, dopisek *_br* oznacza próbki drukowane bez retrakcji podczas wykonywania wypełnienia

Fig. 9. Load at break as the percentage of the maximum load. 15, 10, 5 - hole dimension, A, B - G-code generation method, *br* - option without retraction

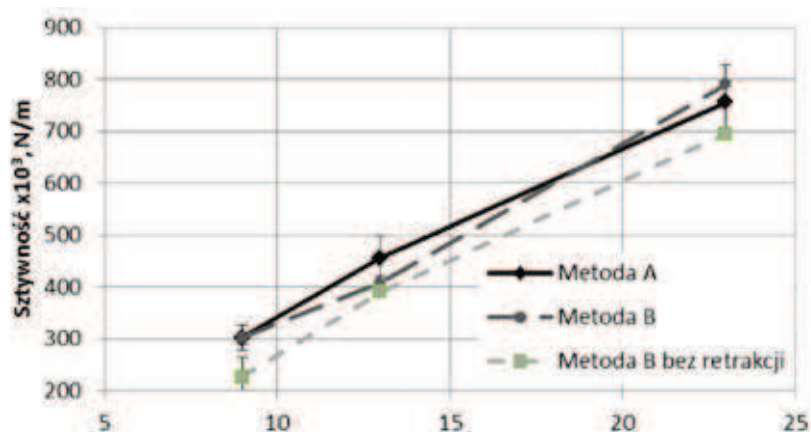
Na podstawie danych wykresu na rys. 6. wyznaczono wartość siły obciążającej próbkę, przy której nastąpiło pierwsze pęknięcie. Wartość tej siły odniesiona do wartości siły maksymalnej przedstawiona jest na rys. 9. Elementy wykonane metodą B przy włączonej retrakcji charakteryzują się większą wartością siły, przy której następuje trwałe uszkodzenie próbki – jej pęknięcie w stosunku do wartości siły maksymalnej. Próbki wy-

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad (1)$$

gdzie:

ΔF – przyrost siły w zakresie prostoliniowym krzywej obciążenia, N

Δx – odkształcenie próbki w zakresie prostoliniowym krzywej obciążenia, m



Rys. 10. Sztywność próbek

Fig. 10. Stiffness of the samples

Wyznaczone wartości sztywności k (rys. 10) potwierdzają również fakt, że struktura wykonana bez retrakcji wykazuje słabsze właściwości mechaniczne niż pozostałe dwa rodzaje struktury, wykonanej z tą opcją.

PODSUMOWANIE

Wykazano istnienie zależności pomiędzy właściwościami mechanicznymi elementów uzyskanych za pomocą drukowania 3D metodą FDM, a warunkami wytwarzania. Maksymalna siła, z jaką może zostać obciążona próbka, jej sztywność oraz wartość siły przy której następuje jej trwałe uszkodzenie zależą od ścieżki, po jakiej będzie się poruszać dysza podczas wykonywania elementu w metodzie FDM oraz od zastosowania retrakcji podczas drukowania wypełnienia. Przy zastosowaniu korzystnego ułożenia tworzywa w warstwie można uzyskać zwiększenie maksymalnej siły przenoszonej przez próbkę o 40%, jak również prawie dwukrotnie zwiększyć siłę, przy której następuje pęknięcie elementu.

Czas drukowania elementów charakteryzujących się większą wytrzymałością (metoda B) był 3–4 razy krótszy, niż próbek drukowanych przy podejściu standardowym – metoda A. Korzystne jest wykorzystanie zaprogramowanej strategii tworzenia wypełnienia, gdyż uzyskuje się odpowiednią wytrzymałość, przy skróceniu czasu wykonywania elementów.

BIBLIOGRAFIA

- Gebhardt A.: *Rapid prototyping*, Hanser, Munich 2003, p. 83.
- Sasimowski E.: *Przyrostowe metody wytwarzania elementów z tworzyw polimerowych*. Przetwórstwo Tworzyw 2015, vol. 165, nr 3, s. 349-354.
- Pepliński K., Bieliński M.: Prototype modular inserts to boost the cooling of mold cavities in polymer processing, *Polimery* 2015, vol. 60, nr 11-12, s. 747-750.
- Postawa P.: *Chłodzenie konformalne form wtryskowych*. Teka Komisji Budowy i Eksploatacji Maszyn, Elektrotechniki, Budownictwa, Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, Lublin 2008, vol. II, s. 129–132.
- Górski F., Wichniarek R., Andrzejewski J.: *Wpływ orientacji części na wytrzymałość modeli z ABS wytwarzanych techniką modelowania uplastycznionym tworzywem sztucznym*. Przetwórstwo Tworzyw 2012, vol. 149, nr 5, s. 428–435.
- Wichniarek R., Górski F., Kuczko W.: *Analiza wpływu stopnia wypełnienia wyrobów wytwarzanych metodą modelowania uplastycznionym tworzywem polimerowym na ich dokładność kształtową*. Przetwórstwo Tworzyw 2012, vol. 149, nr 5, s. 535–540.
- Fused Deposition Modeling (FDM)*. <http://www.cuspartnet.com/wu/fused-deposition-modeling> (dostęp 01.07.2016)
- Lee J., Huang A.: *Fatigue Analysis of FDM materials*. Rapid Prototyping Journal 2013, vol. 19, nr 4, p. 291-299.
- Ziemian S., Okwara M., Ziemian C.W.: *Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene*. Rapid Prototyping Journal 2015, vol. 21, nr 3, p. 270–278.
- Gościński M., Dudziak B.: *Badania wytrzymałości na ściskanie próbek z tworzywa ABS drukowanych w technologii FDM*. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 2015, nr 5, s. 24-28.

Data przyjęcia publikacji do druku: 15-09-16