

# Części z programowaną geometrią wewnętrzną wytwarzane przyrostowo – części PGW

Parts with internal programmed geometry produced using additive manufacturing

MACIEJ CADER \*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.94>

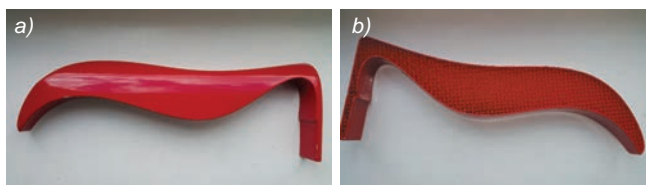
Przedstawiono wyniki badań metody szybkiego szacowania wytrzymałości prototypów wytwarzanych przyrostowo oraz propozycję algorytmu optymalizacji geometrii wewnętrznych części wytwarzanych przyrostowo. Zaproponowano wprowadzenie do obowiązującej nomenklatury dotyczącej szybkiego prototypowania nowego pojęcia – części z programowaną geometrią wewnętrzną – części PGW.

**SŁOWA KLUCZOWE:** druk 3D, szacowanie wytrzymałości, dobór geometrii wewnętrznych, wytwarzanie części

*Article presents results of rapid strength estimation method and optimization algorithm for internal geometry of parts produced using additive manufacturing. Proposed new naming associate with rapid prototyping – parts with internal programmed geometry – IPG Part.*

**KEYWORDS:** 3D printing, strength estimation, internal geometry selection, parts production

Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych (addytywnych/druku 3D) sprawił, że stają się one coraz poważniejszą alternatywą dla standardowych technologii wytwarzania. Wytwarzanie przyrostowe polega na nabudowywaniu kolejnych warstw materiału, na podstawie zaprojektowanego modelu CAD 3D, np. części maszyny. Taka część może mieć niemal dowolną geometrię zewnętrzną i wewnętrzną. Ze względu na sposób budowania – warstwa po warstwie – technologie te dają możliwość tzw. programowania geometrii wewnętrznej (rys. 1). To oznacza, że geometria wewnętrzna części maszyny może być zoptymalizowana (zaprogramowana) pod kątem obciążenia zewnętrznego, warunków pracy lub innych czynników (np. minimalizowanie masy całkowitej danej części z zachowaniem jej pierwotnego kształtu zewnętrznego).



Rys. 1. Przykład polimerowej części wytwarzanej metodą przyrostową z programowaną geometrią wewnętrzną: a) polakierowana powierzchnia zewnętrzna, b) geometria wewnętrzna (kratowa) dopasowana do warunków brzegowych

Dzięki programowanej geometrii wewnętrznej można tak optymalizować części maszyn, aby przy zadanej wytrzymałości spełniały one założone funkcje. Idąc dalej – masa „bierna” maszyn, czyli masa osłon, korpusów

i obudów, może zostać zredukowana do wymaganego minimum z zachowaniem założonej wytrzymałości. Świadome projektowanie i wdrażanie takich podzespołów będzie miało przełożenie na poprawę osiągnięć maszyn – np. zmniejszenie masy pozwoli na wykorzystanie mniejszych/tańszych jednostek napędowych. Ponadto możliwe jest budowanie ultralekkich korpusów maszyn, których odpowiedź na czynnik zewnętrzny (np. uderzenie) jest w pełni przewidywalna dzięki zaprogramowanej geometrii wewnętrznej.

Pomimo dynamicznego rozwoju technologii wytwarzania przyrostowego (druku 3D) rozwój oprogramowania lub metod, które dają możliwość świadomego wykorzystania potencjału tych technologii, jest powolny. Świadczy o tym przegląd światowych osiągnięć w tym zakresie oraz literatury.

Nie ma zaawansowanych prac nad algorytmami dotyczącymi połączenia trzech istotnych aspektów optymalnego wytwarzania części maszyn metodami przyrostowymi. Chodzi tu o dobór geometrii wypełnienia, na tej podstawie – generowanie propozycji finalnego kształtu i rozkładu geometrii wewnętrznej (wizualizacja CAD 3D), a na tej podstawie – proponowanie ścieżki narzędzia dla głowicy wytwarzającej. Elementy tych aspektów optymalnego wytwarzania – choć pojawiają się na świecie w różnym stopniu zaawansowania – to w żaden sposób nie są ze sobą powiązane. Idąc dalej, nie ma jeszcze możliwości przeniesienia chociażby wyników analizy topologicznej kształtu – wykonywanej na podstawie metody elementów skończonych – bezpośrednio do praktyki. Z drugiej strony dynamiczny rozwój maszyn doaddytywnego wytwarzania, spełniających standardy i wymogi przemysłowe (drukarek 3D), pozwala na wytwarzanie części o niemal dowolnych kształtach z szerokiej gamy materiałów (polimerów, stopów metali, metali szlachetnych, ceramiki itp.). Możliwości maszyn nie są jednak wykorzystywane w sposób optymalny, właśnie ze względu na duże trudności z przełożeniem wyników analizy MES na język maszynowy, który umożliwiłby generowanie ścieżki narzędzia na podstawie dobranej do konkretnej aplikacji geometrii wewnętrznej wytwarzanej części.

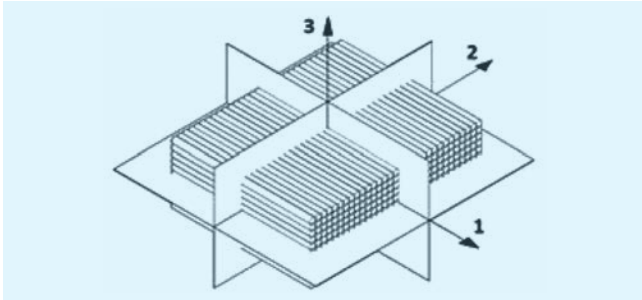
## Metoda doboru geometrii wewnętrznej części

Opracowanie metody doboru geometrii wewnętrznej prototypów wytwarzanych przyrostowo oparto na technologii FDM, która daje największe możliwości w tym zakresie. FDM polega na nakładaniu kolejnych warstw polimeru termoutwardzalnego (np. ABS-M30) w postaci cienkiego włókna materiału izotropowego. Jednak powstały w ten sposób prototyp z zaprogramowanym wypełnieniem-geometrią wewnętrzną jako całość wykazuje takie właściwości mechaniczne jak materiał ortotropowy. Wynika to z możliwości i specyfiki technologii FDM:

\* Dr inż. Maciej Cader (mcader@piap.pl) – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

- dowolnego sterowania ułożeniem włókna materiałowego w płaszczyźnie poziomej,
- budowania modeli warstwa po warstwie.

Udowodniono to m.in. w badaniach własnych [1] oraz badaniach prowadzonych w innych ośrodkach [np. 2–4]. Do opisu właściwości takich geometrii należy więc zastosować model materiału ortotropowego. W geometriach tego typu można wyróżnić trzy kierunki wzajemnie prostopadłe, zwane głównymi osiami materiałowymi (rys. 2).



Rys. 2. Szcik struktury geometrycznej wytwarzanej przyrostowo w technologii FDM: 1 i 2 – kierunki układania włókna, 3 – kierunek przyrostu geometrii wzdłuż osi pionowej

Ponieważ struktura geometryczna wytworzona w technologii FDM wykazuje właściwości ortotropowe, więc zgodnie z uogólnionym prawem Hooke'a równania konstytutywne, które określają właściwości mechaniczne tej struktury, można zapisać w postaci następującego równania macierzowego:

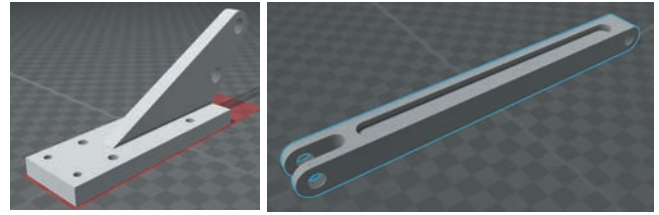
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

gdzie:  $\sigma_{ij}$  oraz  $\tau_{ij}$  – składowe wektora naprężeń,  $\varepsilon_{ij}$  oraz  $\gamma_{ij}$  – składowe wektora odkształceń ( $i$  oraz  $j$  mogą przyjmować wartości 1, 2 lub 3), a macierz sztywności jest symetryczną macierzą zawierającą 12 niezależnych wielkości:

- trzy moduły Younga:  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $E_{33}$ ,
  - trzy moduły Kirchhoffa:  $G_{23}$ ,  $G_{31}$ ,  $G_{12}$ ,
  - oraz sześć modułów Poissona:  $\nu_{21}$ ,  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{32}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ ,
- gdzie dla technologii FDM:  $\nu_{12} = \nu_{21}$ ,  $\nu_{13} = \nu_{31}$ ,  $\nu_{23} = \nu_{32}$ .

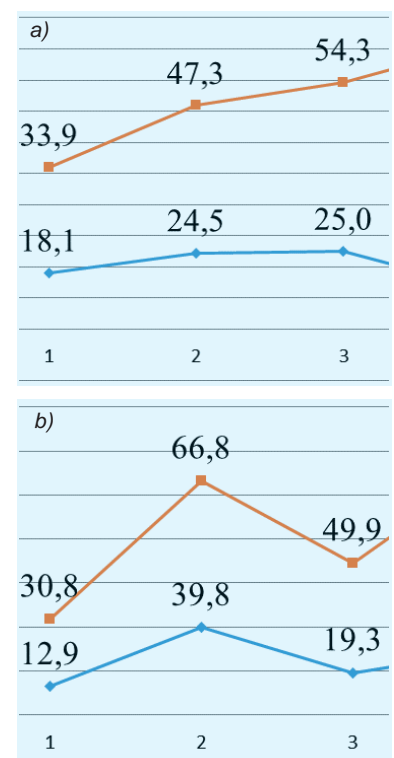
Po przyjęciu założenia o ortotropowości struktury geometrycznej wytwarzanej przyrostowo w technologii FDM i uzyskaniu wartościowych wielkości (danych sprężystych) na podstawie badań doświadczalnych, można przeprowadzić obliczenia komputerowe właściwości struktury geometrycznej [5].

Skuteczność metody analizowano w badaniach jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych oraz badaniach pola ugięcia prototypów części wytworzonych w technologii FDM, które zawierały reprezentatywne geometrie wypełnienia wewnętrznego (rys. 3).



Rys. 3. Badane prototypy wyprodukowane w trzech partiach zawierających różne geometrie wypełnienia wewnętrznego: litą-włóknistą, żeberkową i kratową [5]

W oparciu o badania [5] wyznaczono stałe sprężyste do macierzy sztywności omawianych geometrii oraz charakterystyki wytrzymałościowe. Dodatkowo zbadano pola ugięcia prototypów części z tymi geometriami wewnętrznymi. Stałe sprężyste posłużyły do symulacyjnych badań rozciągania jednoosiowego próbek normatywnych oraz symulacyjnych badań ugięcia prototypów zaprojektowanych w normalnym trybie modelowania jako lite bryły CAD. Porównano wyniki badań laboratoryjnych i symulacyjnych. Dodatkowo wyniki zestawiono z wynikami badań próbek i prototypów odniesienia wytworzonych metodą wtrysku z materiału ABS-M30, czyli o strukturze izotropowej. Otrzymano informacje o dokładności obliczeń wytrzymałościowych. Wykazano [5], że w przypadku szacowania wytrzymałości na podstawie badań symulacyjnych wykonywanych dla geometrii litej CAD wykazującej właściwości izotropowe błąd mieścił się w przedziale 30,8–87,0%. Dla tych samych prototypów błąd oszacowania wytrzymałości z wykorzystaniem zaproponowanej metody mieścił się w przedziale: 12,2–39,8%. Wartość błędu jest zależna od typu geometrii wypełnienia prototypów. To oznacza, że błąd szacowania wytrzymałości z wykorzystaniem zaproponowanej metody zmniejszył się średnio o połowę względem dotychczasowej metody badań symulacyjnych na podstawie geometrii litej-izotropowej prototypów. Na rys. 4a i b przedstawiono cztery wykresy: —●— – krzywa błędu pomiędzy wynikami symulacji komputerowych dla opracowanej metody MSS (na bazie uzyskanych wyników) a wynikami laboratoryjnymi,



Rys. 4. Krzywe wartości błędów w %, obliczenia ugięcia: a) ramienia, b) szczęki – dla trzech geometrii wypełnienia: 1 – litą (włóknistą), 2 – żeberkowa, 3 – kratowa

— krzywa błędu pomiędzy wynikami symulacji komputerowych dla struktur izotropowych a wynikami laboratoryjnymi.

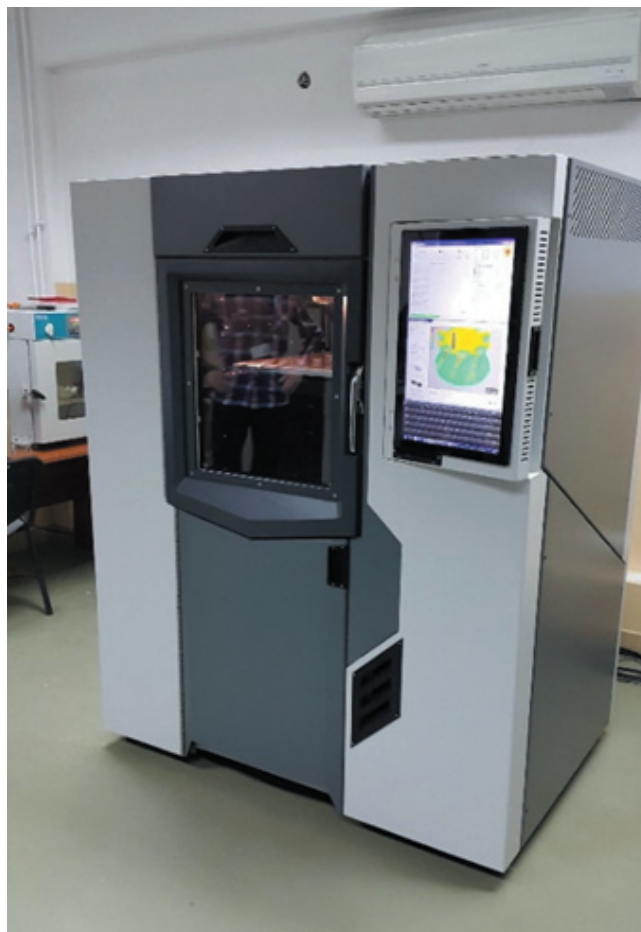
### Algorytm optymalizacji doboru geometrii

Równoległe z pracami nad doбором geometrii wewnętrznych dla prototypów wytwarzanych przyrostowo w Laboratorium Szybkiego Prototypowania i Obliczeń Numerycznych PIAP rozpoczęto prace nad stworzeniem oprogramowania umożliwiającego dobór geometrii wewnętrznych dla części wytwarzanych przyrostowo. Algorytm doboru będzie się opierał na założeniach funkcjonalnych optymalizacji topologicznej wykonywanej z wykorzystaniem MES oraz zadanych przez użytkownika warunkach brzegowych. Dodatkowo program będzie się posługiwał algorytmem wyznaczania ścieżki narzędzia dobranej do technologii addytywnej FDM, tj. z uwzględnieniem jej cech. Założono, że użytkownik otrzyma geometrię 3D, która będzie podstawą do zaprogramowania odpowiednich ruchów maszyny – bezpośredniego wytwarzania na drukarce 3D produkcji PIAP (rys. 5).

Pokrótce zasada działania programu przedstawia się następująco: użytkownik będzie miał możliwość zaimportowania do środowiska programu geometrii bryłowej (CAD 3D) części przeznaczonej do wytworzenia w technologii addytywnej. Oprogramowanie zmieni reprezentację graficzną bryły na szkieletową. Na szkieletową reprezentację bryły będzie nakładana siatka punktów, ale w sposób skorelowany z zasadą budowania modeli w technologii FDM. To oznacza, że gęstość siatki (np. prostopadłościów złożonych z punktów wierzchołkowych oraz łączących je linii) będzie odpowiadała grubości warstw nakładanego materiału oraz sposobowi pracy maszyn. Założono, że gęstość siatki będzie można regulować, ale w określonym zakresie wynikającym z ograniczeń technologii addytywnych. Siatka będzie odcięta powierzchniami modelu szkieletowego, a na przecięciu siatki i powierzchni bryły zostaną utworzone punkty, które zostaną połączone przez odpowiednio prowadzone linie. W ten sposób powstanie siatka objętościowa i powierzchniowa dla modelu. Użytkownik, wykorzystując powstałą na powierzchni bryły siatkę powierzchniową, będzie mógł wskazać obszary występowania obciążeń. Obciążenia będą zadawane w formie siły lub ciśnienia. Oprogramowanie określi – z wykorzystaniem opracowanych modeli matematycznych – obszar oddziaływania przyłożonego pola obciążeń na węzły siatki. Obszary – na podstawie algorytmu – będą określane według czterech kategorii: oddziaływanie silne, umiarkowane, słabe, brak oddziaływania. O tym użytkownik będzie mógł się dowiedzieć z wizualizacji. W kolejnym kroku oprogramowanie zaproponuje dobór i rozkład gęstości geometrii wewnętrznej i na jej podstawie zostaną stworzone ścieżki narzędzia bazujące na krzywych rozpiętych na punktach siatki. Użytkownik będzie mógł wprowadzać korekty zaproponowanej ścieżki i ostatecznego jej kształtu. Założono, że w ostatniej fazie działania programu użytkownik będzie miał możliwość wyeksportowania pliku modelu do pliku zawierającego przygotowaną geometrię do postaci bryły powierzchniowej – STL lub w przypadku aplikacji na maszynie addytywnej PIAP – uruchomienia procesu wytwarzania.

### Podsumowanie

Autor proponuje wprowadzenie do nomenklatury związanej z technikami i technologiami szybkiego prototypo-



Rys. 5. Maszyna addytywna (drukarka 3D) produkcji PIAP

wania nowego pojęcia: „części z programowaną geometrią wewnętrzną” – części PGW (*parts with internal programmed geometry* – IPG Parts).

W Laboratorium Szybkiego Prototypowania i Obliczeń Numerycznych PIAP prowadzone są prace w trzech aspektach związanych z częściami PGW przeznaczonymi do produkcji z wykorzystaniem metod addytywnych (druku 3D):

- opracowania metod szybkiego modelowania dowolnych kształtów geometrii wewnętrznych części PGW,
- opracowania metod szybkiego szacowania wytrzymałości części PGW w celu optymalizacji procesu addytywnego,
- optymalizacji metod wytwarzania poprzez dobór geometrii wewnętrznych części PGW.

### LITERATURA

1. Cader M., Jastrzębska A., Pakieła Z., Szwejkowski P. „Analiza wpływu orientacji modelu w komorze roboczej na wytrzymałość w procesie FDM”. *Mechanik*. 7 (2012): s. 85–94.
2. Arivazhagan A., Masood S.H. “Dynamic response of FDM made ABS parts in different part orientations”. *AdvMaterRes*. 748 (2013): p. 291–294.
3. Crococolo D., De Agostinis M., Olmi G. “Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30”. *Computational Materials Science*. 79 (2013): 506–518.
4. Domingo-Espin M., Puigoriol-Forcada J. “Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts”. *Materials & Design*. 83 (2015): 670–677.
5. Cader M. „Szacowanie wytrzymałości prototypów wytwarzanych przyrostowo metodą FDM”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PIAP, 2016.