

Numeryczne badania wytrzymałościowe elementów drukowanych 3D

Data wpłynięcia do Redakcji: 07/2026
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 08/2026

2026, volume 15, issue 1, pp. 168-180

Łukasz Bołoz
AGH w Krakowie, Poland



Streszczenie: Wytwarzanie addytywne, znane jako druk 3D, jest obecnie szeroko wykorzystywane w zastosowaniach profesjonalnych w wielu gałęziach przemysłu. Technologia ta szczególnie dobrze sprawdza się przy tworzeniu prototypów, modeli demonstracyjnych oraz krótkich serii produkcyjnych. Na właściwości mechaniczne wydruków, takie jak sztywność i wytrzymałość, wpływa wiele czynników, w tym specyficzna dla tej metody struktura wypełnienia oraz orientacja detalu podczas procesu drukowania. W przypadkach, gdy kluczowe znaczenie mają parametry wytrzymałościowe, konieczna staje się ich empiryczna weryfikacja. Charakterystyczną cechą druku 3D jest możliwość częściowego wypełnienia wnętrza elementu różnymi wzorami i przy różnym udziale materiału, co powoduje, że jego właściwości różnią się od materiału litego. Wykorzystanie metod numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych (FEM), wymaga uwzględnienia rzeczywistej struktury wypełnienia w modelu 3D. Każdorazowe przygotowanie takiego modelu na potrzeby analizy jest jednak czasochłonne. W artykule zaproponowano autorską, analityczną metodę generowania różnych typów wypełnień o zadanym stopniu zagęszczenia, opracowaną dla typowych struktur, takich jak Grid, Triangular czy Honeycomb. Rozwiązanie zaimplementowano w środowisku CAD z wykorzystaniem narzędzia iLogic programu Autodesk Inventor, co umożliwiło tworzenie modeli odpowiadających rzeczywistym wydrukowi 3D. Opracowaną metodę poddano weryfikacji, a następnie przeanalizowano wpływ wybranych parametrów druku na właściwości mechaniczne trzech przykładowych obiektów. Wyniki symulacji potwierdziły korzyści płynące z zastosowania tego podejścia i pozwoliły sformułować zalecenia dotyczące doboru rodzaju i stopnia wypełnienia oraz orientacji modelu w procesie drukowania w kontekście uzyskiwanej sztywności i wytrzymałości.

Słowa kluczowe: technologie druku 3D, szybkie prototypowanie, analiza numeryczna MES, właściwości wytrzymałościowe wydruków 3D, symulacje wytrzymałościowe MES

WSTĘP

Technologia wytwarzania addytywnego (druk 3D) rozwija się dynamicznie, umożliwiając stosowanie coraz szerszej gamy materiałów oraz uzyskiwanie wysokiej dokładności odwzorowania geometrii. Początkowo, ze względu na wysokie koszty, znajdowała zastosowanie głównie w przemyśle militarnym i medycynie. Upowszechnienie metody FDM (ang. Fused Deposition Modeling) doprowadziło jednak do jej szerokiego wykorzystania także w zastosowaniach hobbystycznych i prototypowych. Jedną z głównych zalet tej technologii jest możliwość regulacji stopnia i rodzaju wypełnienia, co pozwala ograniczyć czas i

koszt wytwarzania przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości mechanicznych.

Wraz ze wzrostem dokładności technologii druk 3D znajduje zastosowanie w coraz bardziej odpowiedzialnych elementach, pracujących pod znacznymi obciążeniami. Powoduje to konieczność określania ich wytrzymałości i sztywności już na etapie projektowania. Uzyskanie optymalnych parametrów wydruku wymaga uwzględnienia wielu czynników wpływających na masę, czas wykonania oraz właściwości mechaniczne. Metody empiryczne są w tym przypadku czasochłonne i kosztowne.

Powszechnie stosowaną metodą analizy jest metoda elementów skończonych (MES), jednak uzyskanie wiarygodnych wyników wymaga przygotowania modelu odwzorowującego rzeczywiste wypełnienie, co jest pracochłonne. Problemem jest również brak jednoznacznych zależności umożliwiających uzyskanie zadanego stopnia wypełnienia dla konkretnego rodzaju struktury. Rozwiązaniem jest zastosowanie narzędzia, które automatycznie generuje odpowiedni typ i stopień wypełnienia przy zachowaniu geometrii zewnętrznej modelu. Umożliwia to przeprowadzenie analiz MES uwzględniających wpływ rodzaju wypełnienia, jego gęstości oraz orientacji wydruku na właściwości mechaniczne.

W artykule przedstawiono metodę generowania wypełnień oraz jej implementację w środowisku CAD, umożliwiającą przygotowanie modeli numerycznych zgodnych z rzeczywistymi wydrukami 3D (Bołoz, 2024).

PRZEGLĄD LITERATURY

Cyfrowe prototypowanie pozwala na uniknięcie wielu błędów jeszcze na etapie projektu, czyli zanim poniesione zostaną koszty produkcji (Bołoz, 2020), (Bołoz & Castañeda, 2018). Nieustanny rozwój oraz popularyzacja technologii wytwarzania przyrostowego sprawia, że elementy tak wykonane spełniają coraz bardziej odpowiedzialne zadania i funkcje. Wydruki te nie są już stosowane wyłącznie w celach prototypowych, lecz stają się pełnoprawnymi, a także w pełni funkcjonalnymi elementami konstrukcyjnymi. Fakt ten stawia przed konstruktorami wygórowane wymagania. Istotny jest prawidłowy dobór materiału i parametrów wydruku, tak aby uzyskać detal o prawidłowej geometrii pomimo skurczu (Ngo i in., 2018), (Ficzere & Lukács, 2020), (Ficzere, 2021), (Sterca i in., 2022). Jednak coraz częściej znaczenie ma zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej i sztywności. Początkowo badania wytrzymałościowe były przeprowadzone wyłącznie w laboratoriach badawczych, związanych z instytucjami naukowymi oraz przemysłowymi, gdzie przeprowadzane były testy niszczące wydruków z różnych materiałów (Lee & Wu, 2020), (N i in., 2021), (Benamira i in., 2023). Jednak badania takie wymagają posiadania maszyny wytrzymałościowej oraz nakładu czasu i kosztów na wykonanie obiektów o różnych parametrach, które docelowo są niszczone w trakcie testów. W różnych ośrodkach prowadzone były prace dotyczące zwiększenia wytrzymałości i ogólnie optymalizacji parametrów wydruków w

aspekcie własności mechanicznych (Marković i in., 2023), (Shi i in., 2024). Badany był również wpływ samego filamentu oraz sposobu jego produkcji na wytrzymałość wydruków (Cojocar i in., 2022). Jednak w zakresie analiz MES wydruków 3D dostępnych jest jedynie kilka prac, które wybiórczo traktują problem. W jednej z prac autorzy analizowali wytrzymałość prostych próbek wykonanych z tworzywa wzmocnionego włóknem węglowym (Majko i in., 2019), w kolejnej również badane były próbki a wyniki porównywane z wynikami uzyskanymi na maszynie wytrzymałościowej (Sabik i in., 2022). W innym badana była empirycznie oraz MES wytrzymałość podpór (Cosmi & Dal Maso, 2021). Znaleźć można również opracowania dotyczące konkretnych obiektów, na przykład analiza MES silnika elektrycznego z magnesami trwałymi wykonanego w technologii druku 3D (Stakhiv i in., 2021) czy też shifting numb skrzyni biegów wykonanego ze stali metodą SLM (selective laser melting) (Pagac i in., 2021). Dostępne wyniki badań dostarczają wielu cennych informacji, pozwalających na dobór parametrów wydruku. Jednak są to ogólne zalecenia, które dotycząc prostych próbek znormalizowanych. Nie ma możliwości zastosowania tych zaleceń dla elementów funkcjonalnych o złożonych kształtach, poddanych różnym przypadkom obciążenia.

METODY BADAWCZE

Opracowanie metody generowania wypełnień wymagało przygotowania podstaw analitycznych dla wybranych typów struktur. Ze względu na ich powszechne zastosowanie wybrano wypełnienia Grid, Triangular oraz Honeycomb.

Uwzględniając parametry drukarek przemysłowych FDM przyjęto zakres średnicy dyszy od 0,2 do 0,8 mm oraz stopnia wypełnienia od 10% do 90%. Na tej podstawie opracowano parametryczne szkice wypełnień, zależne od średnicy dyszy i stopnia wypełnienia, oraz wyprowadzono odpowiadające im zależności matematyczne.

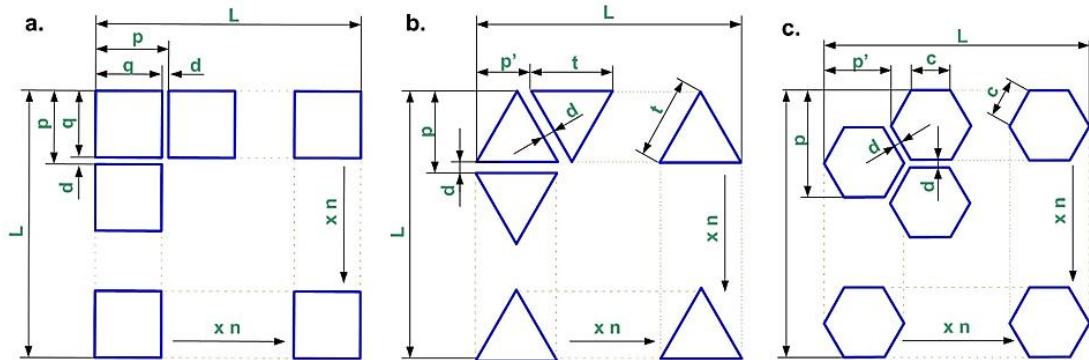
Otrzymane wzory zaimplementowano w programie Autodesk Inventor Professional z wykorzystaniem narzędzia iLogic. Walidację przeprowadzono poprzez porównanie wygenerowanych struktur z wynikami uzyskanymi w oprogramowaniu slicer (Simplify, UltiMaker Cura, PrusaSlicer) oraz przez obliczenie rzeczywistego stopnia wypełnienia.

Zweryfikowane narzędzie wykorzystano następnie do numerycznych badań wytrzymałościowych trzech rzeczywistych elementów.

METODA GENEROWANIA WYPEŁNIEŃ

Dla każdego rodzaju wypełnienia opracowano odpowiednie schematy oraz wyprowadzono wymagane zależności matematyczne, które uzależniają geometrię wypełnienia od średnicy dyszy wyrażonej w milimetrach oraz stopnia wypełnienia wyrażonego w procentach (rys. 1). Dla każdego wypełnienia program generuje szkic, który następnie jest zamieniany w model 3D wypełnienia. Obiekt 3D elementu jest następnie zamieniany na skorupę. Trzy

bryły, czyli obiekt 3D, skorupa obiektu 3D oraz wypełnienie tworzą obiekt finalny, który uzyskiwany jest za pomocą operacji Boolean.



Rys. 1 Schematy do wyprowadzenia równań na wielkość i liczbę elementów wypełnienia:
a. Grid, b. Triangular, c. Honeycomb

W przypadku każdego wypełnienia wzór tworzony jest przez dyszę o określonej i zdefiniowanej średnicy d , która jest jednocześnie grubością drukowanej ścianki wypełnienia. Dla danej średnicy dyszy, zmieniana jest wielkość elementu wypełnienia tak, aby w rezultacie otrzymać wzór wynikający ze stopnia wypełnienia D . Elementami wybranych wypełnień są wielokąty foremne. Dla wypełnienia Grid elementem jest kwadrat o boku q (rys. 1a), dla Triangular trójkąt o boku t (rys. 1b), a dla Honeycomb sześciokąt foremny o boku c (rys. 1c). Na podstawie stopnia wypełnienia oraz średnicy dyszy konieczne jest wyznaczenie długości boku kwadratu, trójkąta lub sześciokąta. Pusta przestrzeń pomiędzy wydrukowanym wzorem stanowi dopełnienie stopnia wypełnienia. Wypełnienie musi obejmować cały obiekt, stąd wartością wyjściową do obliczeń jest pole powierzchni kwadratu o boku L , nie mniejszym niż największy wymiar podstawy drukowanego obiektu, dla danej orientacji na stole drukarki. Natomiast liczba warstw, czyli wysokość wypełnienia musi być nie mniejsza niż trzeci wymiar (wysokość) drukowanego obiektu. Liczba elementów n w szyku, dystans między elementami p wraz z wielkością elementu i średnicą dyszy są ściśle powiązane.

Uwzględniając przedstawione założenia wyprowadzono odpowiednie zależności. Po ich przekształceniu i uproszczeniu uzyskano w efekcie równania kwadratowe dla każdego wypełnienia:

$$\begin{cases} -D \cdot q^2 + (2d - 2d \cdot D) \cdot q + d^2 \cdot (1 - D) = 0 \\ -\sqrt{3} \cdot t^2 + (6d - 6d \cdot D) \cdot t + 3\sqrt{3} \cdot d^2 - 3\sqrt{3} \cdot d^2 \cdot D = 0 \\ -3\sqrt{3} \cdot D \cdot c^2 + 6 \cdot d \cdot (1 - D) \cdot c + \sqrt{3} \cdot d^2 \cdot (1 - D) = 0 \end{cases}$$

gdzie:

D – stopień wypełnienia wyrażony jako ułamek dziesiętny, [-],

d – średnica dyszy stanowiąca grubość ścianki wypełnienia, [mm],

q – długość boku elementu Grid, [mm],

t – długość boku elementu Triangular, [mm],

c – długość boku elementu Honeycomb, [mm].

Powyższe zależności zostały zapisane w postaci skryptu iLogic, który pozwala na wygenerowania wypełnień. Fragmenty skryptu przedstawiono na rys. 2. Skrypt został zaopatrzony w formularz, który służy do wprowadzania wielkości podstawy elementu, wysokości, rodzaju wypełnienia, grubości ścianki, średnicy dyszy oraz stopnia wypełnienia.

```

If Feature.IsActive("Generowanie wypełnienia Grid") = True Then
    a_Grid = -Sw
    b_Grid = (2 * Śr_d)*(1-Sw)
    c_Grid=((Śr_d)^2)*(1-Sw)
    'Obliczanie delty
    pdelta_Grid = Sqrt(((b_Grid) ^ 2ul) -4ul * a_Grid * c_Grid)
    x1_Grid = (-b_Grid - pdelta_Grid) / (2 * ul * a_Grid)
    x2_Grid = (-b_Grid + pdelta_Grid) / (2 * ul * a_Grid)
    Bok_Grid = Max(x1_Grid, x2_Grid)

End If

If Feature.IsActive("Generowanie wypełnienia Triangular") = True Then
    'Parametry funkcji kwadratowe
    a_Triangular =-Sqrt(3ul)*Sw
    b_Triangular = 6 * Śr_d(1 - Sw)
    c_Triangular = (3*Sqrt(3)*(Śr_d^2))*(1-Sw)
    'Obliczanie delty
    pdelta_Triangular = Sqrt(((b_Triangular) ^ 2ul) -4ul * a_Triangular * c_Triangular)
    x1_Triangular = (-b_Triangular - pdelta_Triangular) / (2 * ul * a_Triangular)
    x2_Triangular = (-b_Triangular + pdelta_Triangular) / (2 * ul * a_Triangular)
    Bok_Triangular = Max(x1_Triangular, x2_Triangular)

End If

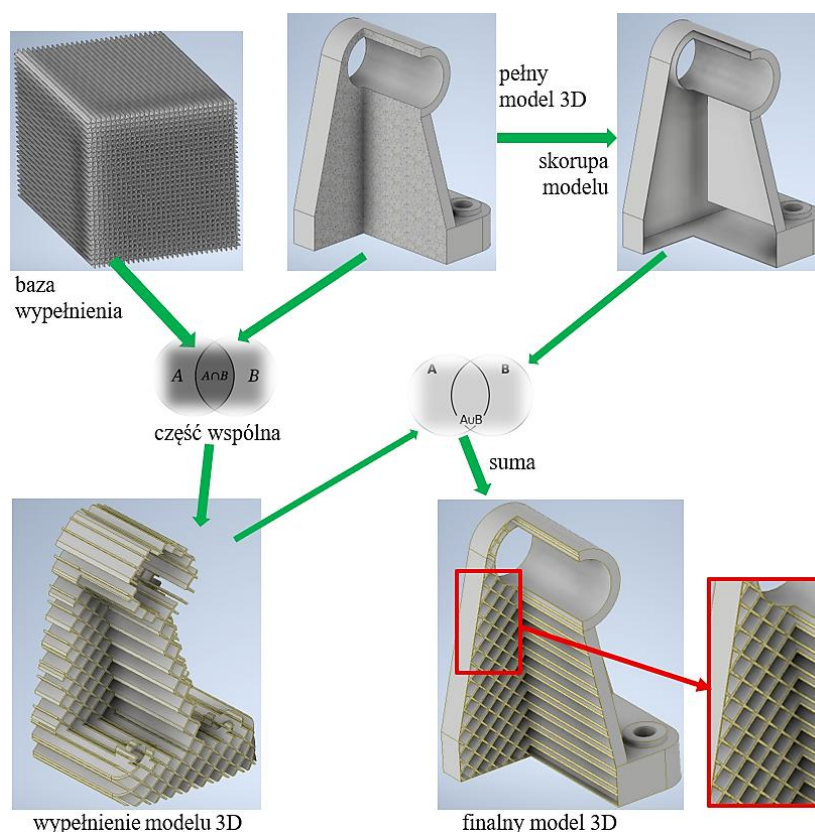
If Feature.IsActive("Generowanie wypełnienia Honey") = True Then
    'Parametry funkcji kwadratowe
    a_HoneyComb = -3ul*Sqrt(3ul)*Sw
    b_HoneyComb = 6*Śr_d*(1-Sw)
    c_HoneyComb= Sqrt(3)*((Śr_d)^2)*(1-Sw)
    'Obliczanie delty
    pdelta_HoneyComb = Sqrt(((b_HoneyComb) ^ 2ul) -4ul * a_HoneyComb * c_HoneyComb)
    x1_HoneyComb = (-b_HoneyComb - pdelta_HoneyComb) / (2 * ul * a_HoneyComb)
    x2_HoneyComb = (-b_HoneyComb + pdelta_HoneyComb) / (2 * ul * a_HoneyComb)
    Bok_HoneyComb = Max(x1_HoneyComb, x2_HoneyComb)

End If

```

Rys. 1 Fragmenty skryptów iLogic dla wypełnień, kolejno Grid, Triangular, Honeycomb

Finalny obiekt stanowi część wspólną wypełnienia i obiektu, która następnie jest sumowana ze skorupą obiektu (rys. 3). Taki sam efekt można uzyskać w dowolnym programie CAD pozwalającym na tworzenie skryptów lub współpracującym z zewnętrznym arkuszem kalkulacyjnym.



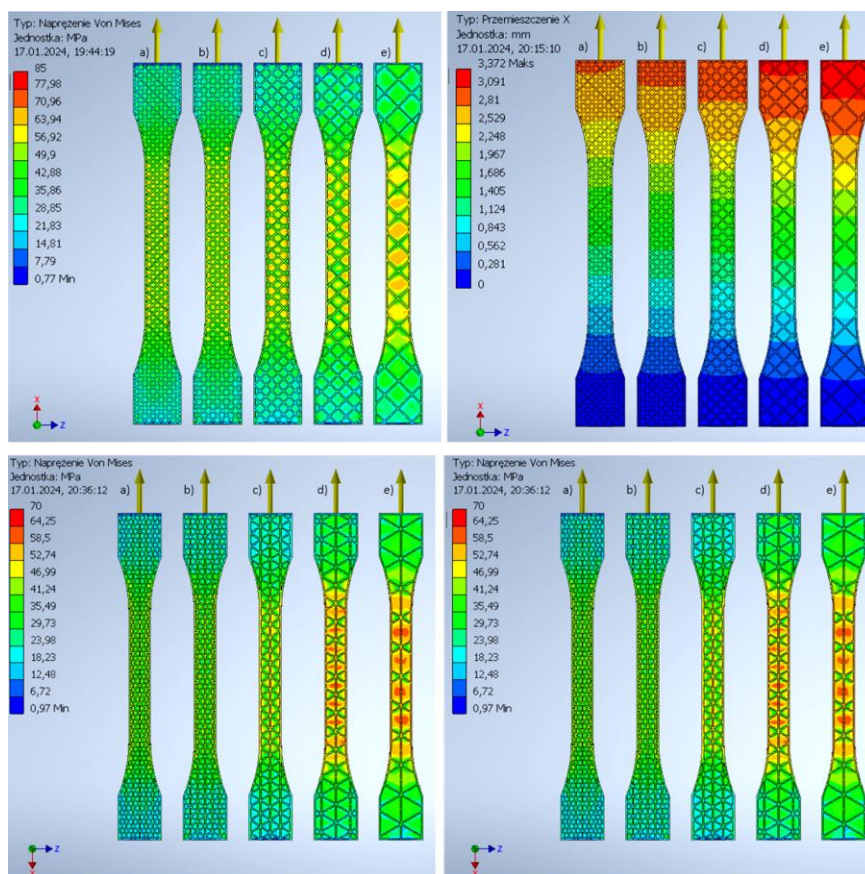
Rys. 3 Etapy tworzenia finalnego obiektu z modelu, skorupy modelu i wypełnienia

WALIDACJA METODY I NARZĘDZIA

Generator wypełnień poddano walidacji w celu weryfikacji zarówno opracowanej metody, jak i narzędzia. Wyniki porównano z wypełnieniami generowanymi w oprogramowaniu do druku 3D (Simplify, UltiMaker Cura, PrusaSlicer). Stopień wypełnienia zweryfikowano dodatkowo poprzez jego obliczenie na podstawie stosunku pola powierzchni wzoru do pola całkowitego.

W wyniku działania generatora otrzymywany jest model 3D składający się z dwóch brył: obrysu zewnętrznego oraz wypełnienia. W celu sprawdzenia, czy element zachowuje się jako jednorodna struktura, przeprowadzono weryfikację numeryczną metodą MES. Jako obiekt przyjęto znormalizowaną próbkę do badań jednoosiowego rozciągania i przeprowadzono odpowiednią symulację.

Analizie poddano wszystkie rodzaje wypełnień dla różnych wartości stopnia wypełnienia, uwzględniając przemieszczenia oraz naprężenia zredukowane (rys. 4). Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowe działanie generatora.



Rys. 4 Naprężenia zredukowane i przemieszczenia dla wypełnienie Grid i Triangular:
a. 50%, b. 45%, c. 35%, d. 25%, e. 15%

PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA GENERATORA DO ANALIZY RZECZYWISTYCH OBIEKTÓW

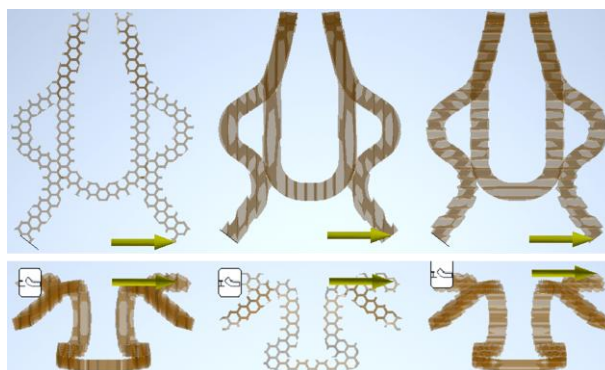
Opracowany generator pozwala na wykonanie cennych analiz, zanim element zostanie wydrukowany. Koszt detalu związany z czasem trwania druku i ilością materiału może zostać zminimalizowany. Dzięki przeprowadzeniu wstępnych analiz możliwe jest określenie optymalnych parametrów oraz orientacji wydruku. Poniżej przedstawiono trzy przykładowe zastosowania generatora do oceny wytrzymałości i sztywności rzeczywistych detali:

- wpływ orientacji wydruku zawlecзки,
- wpływ rodzaju wypełnienia haka,
- wpływ stopnia wypełnienia łącznika.

W pierwszym przykładzie wykonano symulacje zawlecзки (rys. 5), która posiada wypełnienie Honeycomb, dysza o średnicy 0,4 mm, stopień wypełnienia 40%, dla trzech różnych, prostopadłych orientacji wydruku (rys. 6).



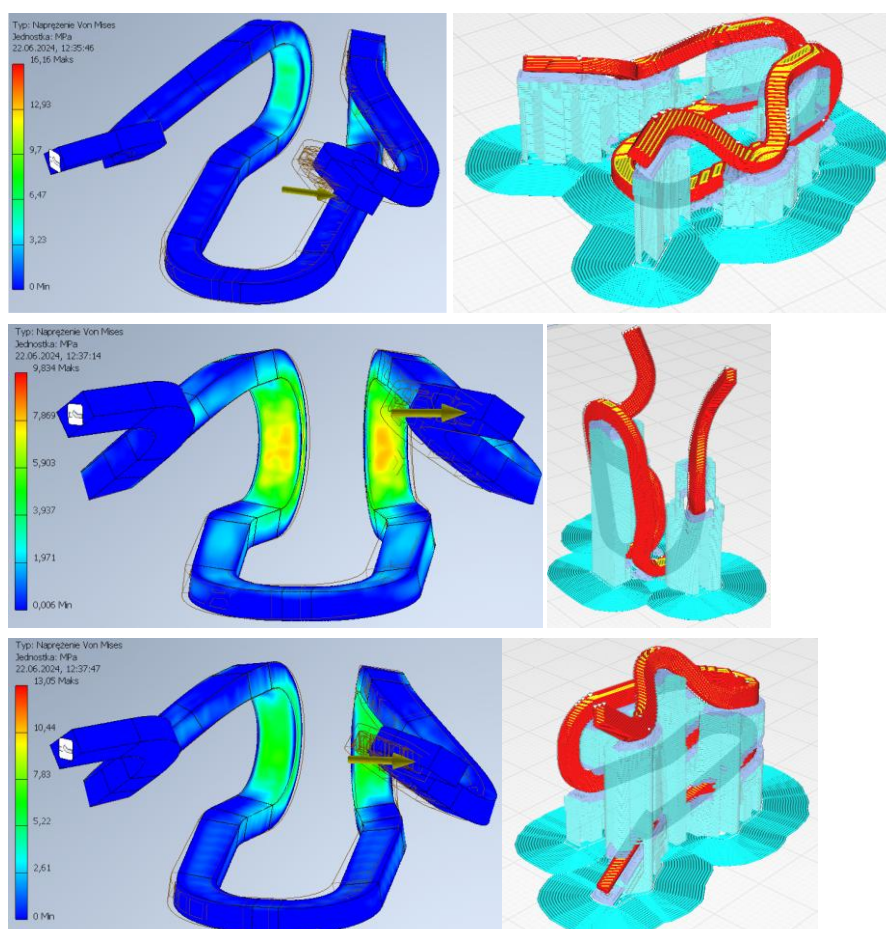
Rys. 5 Zawlecзка HERT wykorzystana do analizy wpływu orientacji wydruku



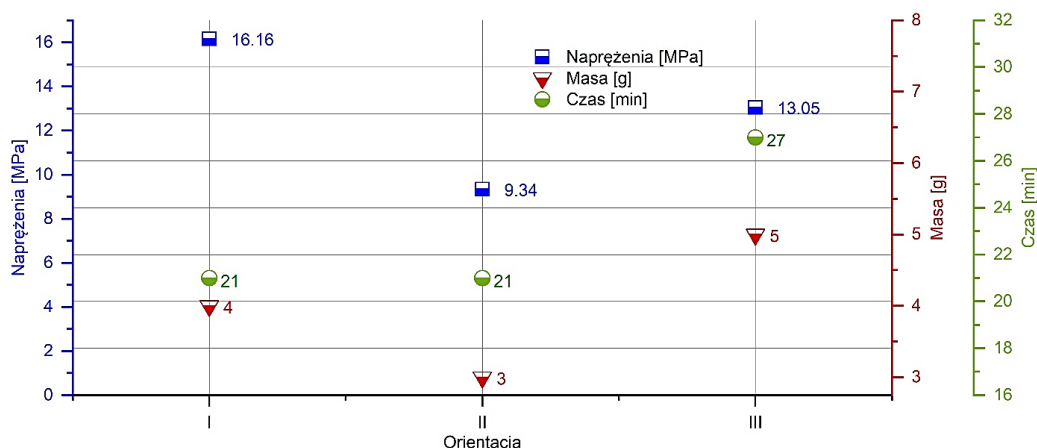
Rys. 6 Wypełnienia zawleczek dla trzech prostokątnych orientacji wydruku

Źródło: Bołoz, 2024

Należy mieć na uwadze konieczność wykonania podpór w przypadku drukowania takiej zawlecзки, co wpływa na czas wydruku, który będzie różny w zależności od orientacji, co również pokazano na rysunku 7. W kolejności orientacji jak rys. 5 masa filamentu i czas wydruku wynoszą 4 g/21 minut, 3 g/21 minut, 5 g/27 minut. Różnice w czasie wydruku oraz masie filamentu są znaczące. Najkorzystniejsza jest druga orientacja ze względu na wytrzymałość, czas wydruku jak również zużycie filamentu (rys. 8) (Bołoz, 2024).

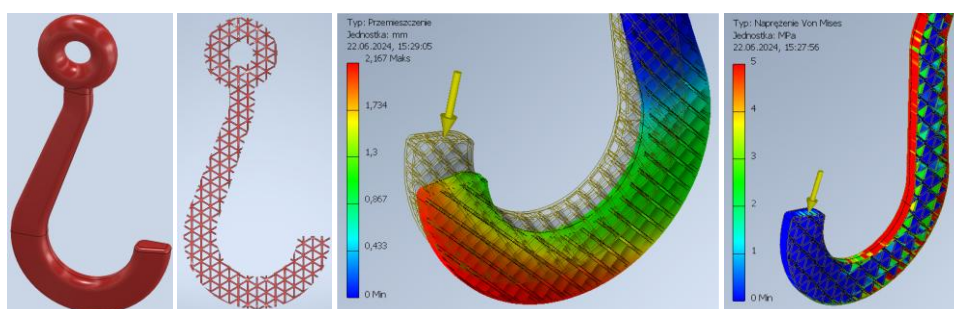


Rys. 7 Naprężenia zredukowane oraz podpory (kolor turkusowy) w zawlecce dla różnych orientacji wydruku (kolejność jak na rys. 5)



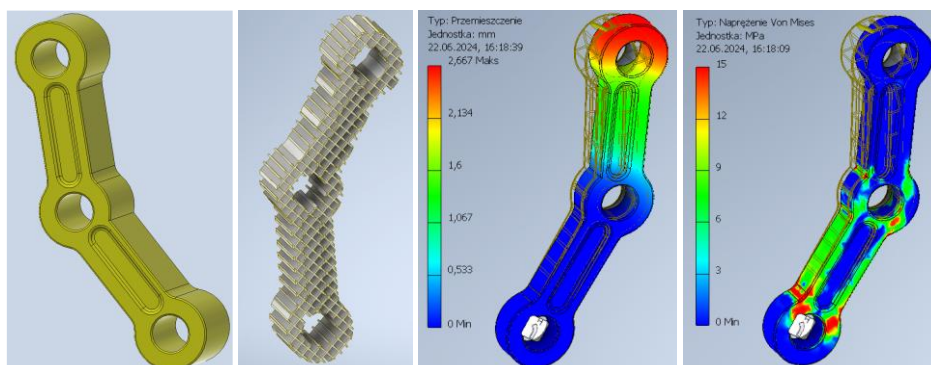
Rys. 8 Zestawienie parametrów wydruku i wytrzymałości zawlecзки

Kolejna analiza miała na celu dobór rodzaju wypełnienia do wydrukowania haka. Założono stopień wypełnienia na poziomie 35% dla wypełnienia typu Grid, Triangular oraz Honeycomb. Hak utwardzono i obciążono siłą. Przeprowadzona analiza MES wykazała, że dla wypełnienia Grid naprężenia wyniosły 34,8 MPa a przemieszczenie 2,2 mm; dla Triangular 27,9 MPa oraz 1,9 mm, a dla Honeycomb 29,0 MPa oraz 2,0 mm. Wybrane zrzuty przedstawiono na rys. 9 (Bołoz, 2024).



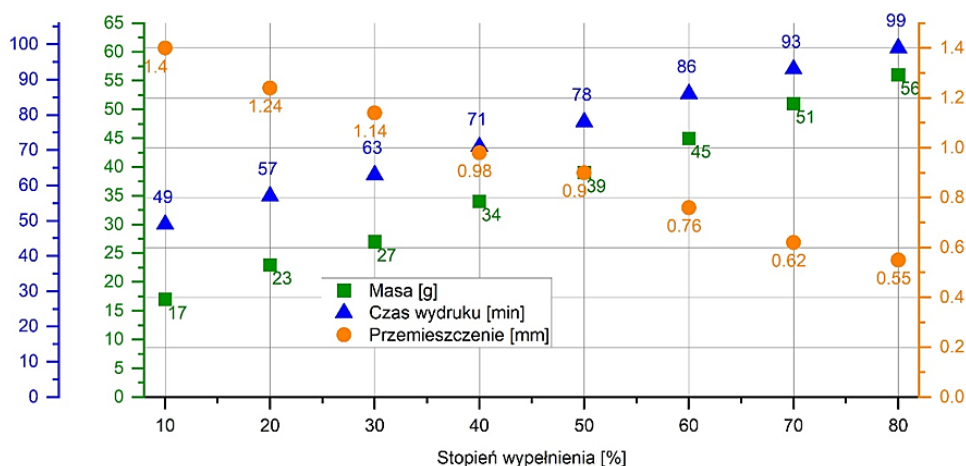
Rys. 9 Wybrane zrzuty z analizy MES haka
(model, wypełnienie 3d, przemieszczenia, naprężenia)

Trzecie badania symulacyjne miały na celu zobrazowanie wpływu stopnia wypełnienia detalu na maksymalne naprężenia, przemieszczenie, masę oraz czas wydruku elementu (rys. 10).



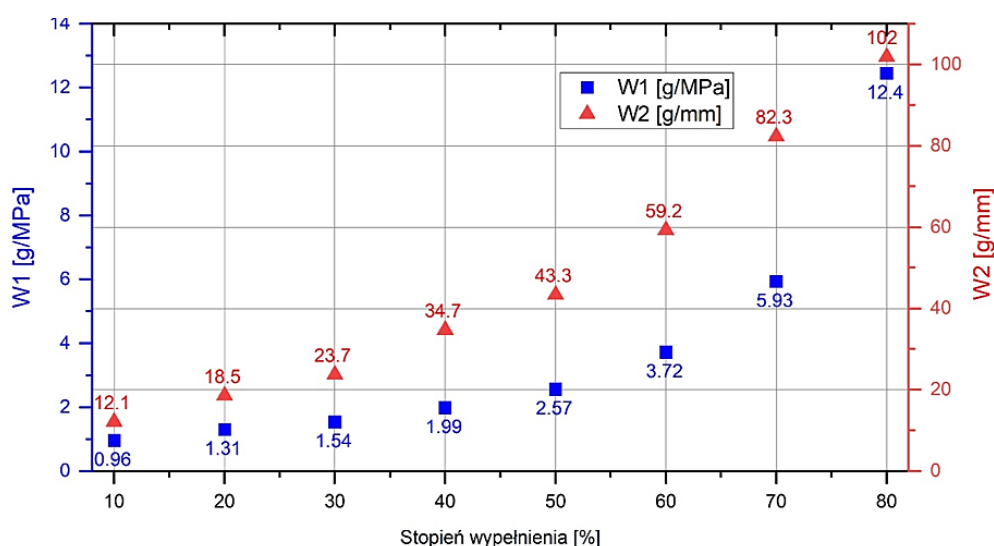
Rys. 10 Wybrane zrzuty z analizy MES łącznika
(model, wypełnieniem przemieszczenia, naprężenia)

Jako obiekt wybrano łącznik mechanizmu chwytaka obciążony siłą. Przeanalizowano modele z wypełnieniem od 10% do 80%. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu na rys. 11. Element taki z wypełnieniem 100% ma masę 64 g, przemieści się maksymalnie 0,49 mm, a naprężenia osiągną 3,6 MPa (Bołoz, 2024).



Rys. 11 Wykres maksymalnego przemieszczenia, masy i czasu wydruku łącznika

Czas drukowania oraz masa elementu rosną wraz ze stopniem wypełnienia, co zwiększa również sztywność. Zakładając dopuszczalne naprężenie lub przemieszczenie łącznika pod obciążeniem można dobrać stopień wypełnienia, oszacować czas wydruku oraz jego masę. Warto również wziąć pod uwagę wskaźniki W1 i W2 (rys. 12), które są ilorazem masy przez kolejno naprężenia maksymalne oraz przemieszczenia maksymalne.



Rys. 12 Wykres wskaźników masowych W1 i W2 dla wydruku łącznika

Wskaźniki te informują, ile jest wymagane gramów filamentu aby osiągnąć naprężenia 1 MPa oraz przemieszczenie 1 mm. Wraz ze wzrostem tych wskaźników spada opłacalność wydruku w aspekcie jego wytrzymałości i

sztywności. Warto zauważyć, że o ile na wcześniejszym wykresie wielkości zmieniały się niemal liniowo w funkcji stopnia wypełnienia, to wskaźniki W1 i W2 zmieniają się wykładniczo.

PODSUMOWANIE

Celem pracy było opracowanie metody oraz narzędzia umożliwiającego przekształcenie standardowych modeli 3D w modele z wypełnieniem odpowiadającym strukturze stosowanej w druku 3D. Na tej podstawie, z wykorzystaniem iLogic w programie Autodesk Inventor, opracowano generator modeli z wypełnieniem dla struktur Grid, Triangular i Honeycomb.

Wyprowadzone zależności matematyczne oparto na założeniu, że stopień wypełnienia stanowi stosunek pola powierzchni zadrukowanej do całkowitej, a grubość ścianki odpowiada średnicy dyszy. Na tej podstawie, w zależności od typu wypełnienia, wyznaczana jest długość boku odpowiedniej figury elementarnej. Następnie generowany jest szkielet o zadanych wymiarach, a końcowy model powstaje poprzez operacje Boolean łączące wypełnienie z obrysem zewnętrznym.

Poprawność działania generatora potwierdzono poprzez porównanie z wynikami uzyskanymi w oprogramowaniu slicer (Simplify, UltiMaker Cura, PrusaSlicer) oraz analizę rzeczywistego stopnia wypełnienia. Dodatkowo przeprowadzono walidację numeryczną MES, która wykazała zgodność otrzymanych wyników.

Opracowane narzędzie umożliwia dobór parametrów wydruku dla elementów o dowolnej geometrii i obciążeniu. Przedstawione przykłady zastosowań wykazały, że analiza numeryczna pozwala zwiększyć wytrzymałość i sztywność elementów lub ograniczyć masę i czas druku, w zależności od przyjętych kryteriów.

LITERATURA

- Benamira, M., Benhassine, N., Ayad, A., & Dekhane, A. (2023). Investigation of printing parameters effects on mechanical and failure properties of 3D printed PLA. *Engineering Failure Analysis*, 148, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107218>
- Bołoz, Ł. (2020). Digital Prototyping on the Example of Selected Self-Propelled Mining Machines. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 3(1), pp. 172-183. <https://doi.org/10.2478/mape-2020-0015>
- Bołoz, Ł. (2024). Generating Models for Numerical Strength Tests of 3D Printed Elements. *Management Systems in Production Engineering*, 32(3), pp. 372-379. <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0035>
- Bołoz, Ł., & Castañeda, L. F. (2018). Computer-Aided Support for the Rapid Creation of Parametric Models of Milling Units for Longwall Shearers. *Management Systems in Production Engineering*, 26(4), pp. 193-199. <https://doi.org/10.1515/mspe-2018-0031>
- Cojocar, V., Frunzaverde, D., Miclosina, C.-O., & Marginean, G. (2022). The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication – A Review. *Polymers*, 14(5), 886. <https://doi.org/10.3390/polym14050886>
- Cosmi, F., & Dal Maso, A. (2021). Experimental characterization and validation by FEM analyses of a 3D-printed support. *IOP Conference Series: Materials Science and*

- Engineering, 1038(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1038/1/012009>
- Ficzere, P. (2021). Research on and Practice of Additive Manufacturing Technologies. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 49(2), pp. 59-64. <https://doi.org/10.33927/hjic-2021-23>
- Ficzere, P., & Lukács, N. L. (2020). Influence of 3D printing parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 903(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012008>
- Lee, D., & Wu, G.-Y. (2020). Parameters Affecting the Mechanical Properties of Three-Dimensional (3D) Printed Carbon Fiber-Reinforced Polylactide Composites. *Polymers*, 12(11), 2456. <https://doi.org/10.3390/polym12112456>
- Majko, J., Saga, M., Vasko, M., Handrik, M., Barnik, F., & Dorčiak, F. (2019). FEM analysis of long-fibre composite structures created by 3D printing. *Transportation Research Procedia*, 40, pp. 792-799. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.112>
- Marković, M.-P., Cingesar, I. K., & Vrsaljko, D. (2023). Maximizing Mechanical Performance of 3D Printed Parts Through Process Parameter Optimization. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3dp.2023.0170. <https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0170>
- N, J., G, S., & A D, P. (2021). Effect of Printing Parameters of 3D Printed PLA Parts on Mechanical Properties. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.36909/jer.ICMMM.15697>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, pp. 172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Pagac, M., Hajnys, J., Halama, R., Aldabash, T., Mesicek, J., Jancar, L., & Jansa, J. (2021). Prediction of Model Distortion by FEM in 3D Printing via the Selective Laser Melting of Stainless Steel AISI 316L. *Applied Sciences*, 11(4), 1656. <https://doi.org/10.3390/app11041656>
- Sabik, A., Rucka, M., Andrzejewska, A., & Wojtczak, E. (2022). Tensile failure study of 3D printed PLA using DIC technique and FEM analysis. *Mechanics of Materials*, 175, 104506. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104506>
- Shi, L.-K., Li, P.-C., Liu, C.-R., Zhu, J.-X., Zhang, T.-H., & Xiong, G. (2024). An improved tensile strength and failure mode prediction model of FDM 3D printing PLA material: Theoretical and experimental investigations. *Journal of Building Engineering*, 90, 109389. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109389>
- Stakhiv, H., Solomchak, O., Lasek, P., & Stepień, M. (2021). FEM Simulation and Analysis of a Concept 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets. *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, pp. 656-660. <https://doi.org/10.1109/PEMC48073.2021.9432529>
- Sterca, A. D., Calin, R.-A., Cristian, L., Walcher, E. M., Bodur, O., Ceclan, V., Grozav, S. D., & Durakbasa, N. M. (2022). Evaluation of Fused Deposition Modeling Process Parameters Influence on 3D Printed Components by High Precision Metrology. W N. M. Durakbasa & M. G. Gençylmaz (Red.), *Digitizing Production Systems* (pp. 281-295). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90421-0_24

Computational Strength Evaluation of 3D Printed Components

Abstract: Additive manufacturing, commonly referred to as 3D printing, is widely applied across numerous industrial fields, particularly in prototyping, demonstration models, and low-volume production. The mechanical performance of printed parts, including stiffness and strength, is governed by multiple factors, among which the internal infill architecture and build orientation play a key role. When structural integrity is critical, experimental verification is often required. A distinctive feature of 3D printing is the possibility of using partial infill with various patterns and material distributions, which leads to mechanical behaviour that differs from that of fully solid elements. The use of computational approaches, such as the finite element method (FEM), requires incorporating the actual infill geometry into the 3D model. However, generating such detailed models for each analysis is both time- and labour-intensive. This study introduces an original analytical approach for generating infill structures of different types and densities, developed for commonly used patterns such as grid, triangular, and honeycomb. The method was implemented in a CAD environment using the iLogic functionality of Autodesk Inventor, enabling automated creation of models consistent with real 3D-printed parts. The proposed approach was validated and subsequently applied to investigate the influence of selected printing parameters on the mechanical behaviour of three representative components. Numerical simulations demonstrated clear benefits of the method and enabled formulation of practical guidelines for selecting infill type, density, and printing orientation with respect to achieving desired stiffness and strength characteristics.

Keywords: additive manufacturing processes, 3D printing applications, FEM-based numerical analysis, mechanical performance of printed parts, computational strength assessment

Łukasz Bołoz

ORCID ID: 0000-0002-7139-0558

AGH University of Krakow

Faculty of Mechanical Engineering and Robotics

Department of Machinery Engineering and Transport

A. Mickiewicza Av. 30, 30-059 Krakow, Poland

e-mail: boloz@agh.edu.pl