

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Modelowanie właściwości zmęczeniowych metamateriałów ze stopu Ti-6Al-4V wytwarzanych przyrostowo z uwzględnieniem kształtu mezostruktury

Michał Doroszko¹, Andrzej Seweryn²

¹Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

²Instytut Budowy Okrętów, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska

email: m.doroszko@pb.edu.pl, andrzej.seweryn@pg.edu.pl

STRESZCZENIE: Niniejsza praca dotyczy numerycznego modelowania zachowania metamateriałów ze stopu Ti-6Al-4V pod obciążeniem cyklicznym. W badaniach wykorzystano struktury diamentowe stopu tytanu wytworzone za pomocą metody addytywnej laser powder bed fusion (LPBF) o różnym stopniu gęstości względnej. Dzięki zastosowaniu mikrotomografii komputerowej wygenerowano realistyczne modele geometryczne badanych mezostruktur uwzględniające imperfekcje materiału będące rezultatem procesu produkcyjnego. Następnie utworzone modele wykorzystano do numerycznego modelowania zachowania metamateriałów pod obciążeniem cyklicznym. W obliczeniach numerycznych uwzględniono również rzeczywistą krzywą umocnienia materiału w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych. Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych określono wpływ kształtu i gęstości względnej struktury diamentowej na zachowanie makroskopowe metamateriałów pod obciążeniem cyklicznym. Wskazano i przeanalizowano obszary mezostruktur najbardziej narażone na pękanie zmęczeniowe. Określono również lokalną koncentrację naprężeń w poszczególnych strukturach oraz zweryfikowano przeprowadzone modelowanie numeryczne za pomocą wyników eksperymentalnych. Na podstawie uzyskanych wyników i ich analizy zaproponowano naprężeniowe kryterium pękania zmęczeniowego metamateriałów ze stopu Ti-6Al-4V wytworzonych za pomocą metody addytywnej LPBF.

SŁOWA KLUCZOWE: zmęczenie, metoda elementów skończonych, wytwarzania przyrostowe, mikrotomografia, stopy tytanu

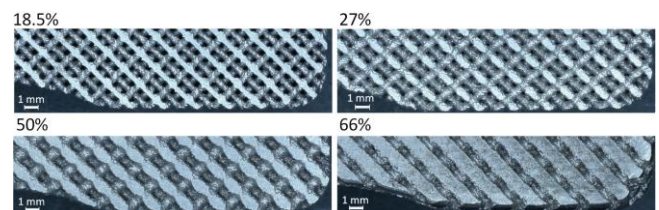
1. Wstęp

W niniejszej pracy opisano numeryczne modelowanie metamateriału ze stopu Ti-6Al-4V pod obciążeniem cyklicznym [1]. Do badań wykorzystano diamentowe struktury krzyżowe o różnej wartości gęstości względnej. W celu odwzorowania rzeczywistego nieidealnego kształtu wyprodukowanych mezostruktur wraz z defektami wykorzystano mikrotomografię komputerową. Na podstawie obrazów mikrotomograficznych wygenerowano trójwymiarowe modele geometryczne struktur badanych metamateriałów, które następnie wykorzystano do obliczeń numerycznych za pomocą MES [2,3]. Do modelu obliczeniowego zaimplementowano również rzeczywistą krzywą umocnienia materiału, dzięki czemu możliwe jest określenie naprężeń występujących w materiale aż do momentu inicjacji pęknięcia [4,5]. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano rozkłady naprężeń i odkształceń w mezostrukturach poddanych obciążeniom cyklicznym. Wskazano miejsca, w których występuje największa koncentracja naprężenia i odkształcenia, czyli miejsca w których może nastąpić lokalna inicjacja pęknięcia materiału wskutek zmęczenia materiału. Określono również zależność pomiędzy gęstością względną struktur diamentowych, a koncentracją naprężenia w miejscach najbardziej wyężonych. Na podstawie wyników obliczeń opisano również w jaki sposób oraz w jakim stopniu mogą wpływać na właściwości zmęczeniowe defekty mezostruktury powstałe w procesie produkcji. Niewątpliwym osiągnięciem, na które należy zwrócić

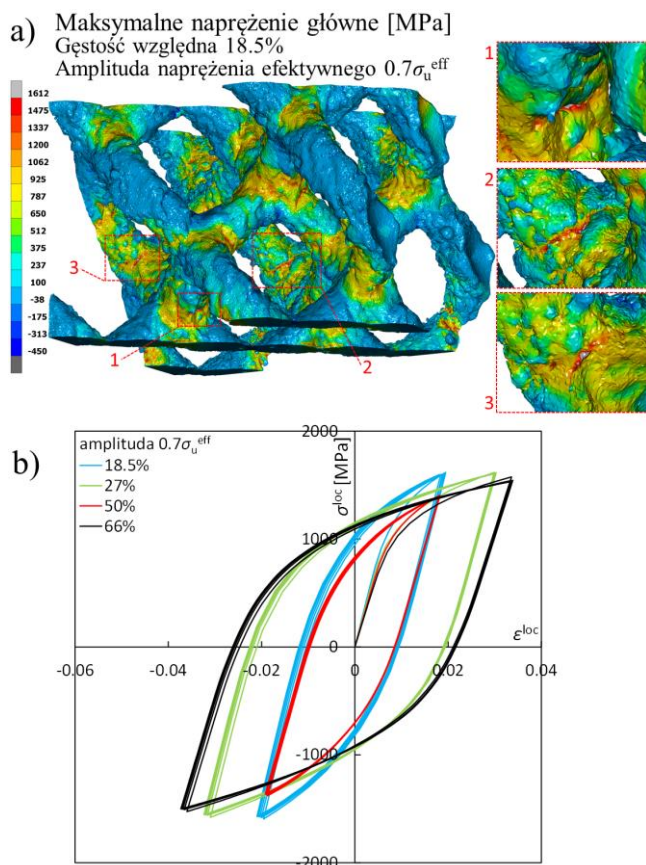
uwagę w niniejszej pracy jest również określenie rzeczywistej krzywej zmęczeniowej badanych metamateriałów. Uwzględni ona rzeczywiste wartości naprężenia występujące lokalnie w mezostrukturach, a nie wartość uśrednioną jak ma to miejsce w publikowanych dotąd pracach. Otrzymane wyniki numeryczne zweryfikowano poprzez porównanie ich z dostępnymi wynikami zmęczeniowych badań eksperymentalnych.

2. Materiały i metody badawcze

Surowym materiałem, z którego wyprodukowano metamateriały był proszek stopu tytanu Ti-6Al-4V o wielkości cząstek około 40 μm . Wykorzystując przyrostową metodę wytwarzania LPBF uzyskano metamateriały o strukturze diamentowej i nominalnej wartości gęstości względnej 18.5%, 27%, 50% oraz 66%, które uzyskano odpowiednio dla grubości rozpórek 0.49, 0.6, 0.7 i 1.2 mm (Rys. 1).



Rys. 1. Badane struktury diamentowe metamateriałów o różnej gęstości względnej uzyskane za pomocą metody addytywnej LPBF [1].



Rys. 2. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych: a) rozkład σ_1 po obciążeniu cyklicznym, b) rzeczywiste pętle histerezy (lokalne) [1].

Do wygenerowania modeli geometrycznych odwzorowujących rzeczywisty kształt diamentowych struktur krzyżowych wraz z ich defektami zastosowano pomiary mikrotomograficzne. Do numerycznego modelowania (za pomocą metody elementów skończonych) metamateriałów obciążonych cyklicznie zastosowano sprężysto-plastyczny model materiałowy wykorzystujący umocnienie kinematyczne, kryterium uplastycznienia Hubera-von Misesa oraz uwzględniono nieliniowość badanego materiału.

3. Wyniki

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych określono rozkłady naprężeń i odkształceń w obciążanych cyklicznie strukturach diamentowych metamateriałów o różnej gęstości względnej. Następnie wskazano miejsca występowania lokalnych największych wartości naprężenia oraz na ich podstawie wykreślono rzeczywiste (lokalne) pętle histerezy badanych struktur (Rys. 2).

Wykorzystując uzyskane wcześniej wyniki obliczeń numerycznych opracowano eksperymentalno-numeryczne podejście do prognozowania trwałości zmęczeniowej metamateriałów o różnej gęstości względnej wytworzonych za pomocą metody przyrostowej [1]. W tym celu zaadaptowano model kumulacji uszkodzeń Falkowskiej i Seweryna [6] wykorzystujący efektywne wartości naprężenia makroskopowego do modelowania na podstawie rzeczywistych wartości naprężenia normalnego w kierunku obciążenia określonego w miejscach największej

koncentracji. Niniejszy model pozwala określić wartość przyrostu zmiennej stanu uszkodzenia $d\omega$ oraz stanu degradacji materiału na podstawie lokalnych rzeczywistych wartości składowej normalnej tensora naprężenia w kierunku obciążenia w materiałach niejednorodnych takich jak badane struktury diamentowe ze stopu Ti-6Al-4V. Model wykorzystuje założenia klasycznej liniowej hipotezy kumulacji uszkodzeń Palmgren-Minera [7,8], która zakłada jednakowy przyrost uszkodzeń w materiale w każdym kolejnym cyklu obciążenia zmęczeniowego.

4. Wnioski

W niniejszej pracy opisano numeryczne modelowanie zachowania metamateriałów z implantacyjnego stopu Ti-6Al-4V otrzymane metodą przyrostową LPBF pod obciążeniem cyklicznym. Najważniejsze osiągnięcia zawarte i opisane w niniejszej pracy [1] są następujące:

1. W zagłębieniach technologicznych tworzących mikrokarby występujące na połączeniach struktur diamentowych rozpórka-węzeł na skutek obciążeń cyklicznych nakładają się na siebie dwa efekty spiętrzające naprężenia, których interakcja prowadzi do lokalizacji naprężenia o wartości bliskiej, a nawet przekraczającej wartość krytyczną.
2. Określono rzeczywiste pętle histerezy występujące w najbardziej wyężonych miejscach mezostruktur, a następnie lokalne wartości amplitudy naprężenia w tych lokalizacjach.
3. Zaproponowano model kumulacji uszkodzeń wykorzystujący rzeczywiste wartości naprężenia lokalnego oraz liniową hipotezę kumulacji uszkodzeń.
4. Zaproponowano trzy podejścia doświadczalno-numeryczne do prognozowania trwałości zmęczeniowej metamateriałów wykorzystujące zaproponowany model kumulacji uszkodzeń.

Praca została wykonana w ramach projektu Nr WZ/WM-IIM/4/2023 realizowanego w Politechnice Białostockiej i finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki.

Literatura

- [1] M. Doroszko, A. Seweryn, Cyclic behaviour modelling of additively manufactured Ti-6Al-4V lattice structures, *Int. J. Mech. Sci.* 273 (2024) 109219.
- [2] M. Doroszko, A. Seweryn, A new numerical modelling method for deformation behaviour of metallic porous materials using X-ray computed microtomography, *Mater. Sci. Eng. A.* (2017).
- [3] M. Doroszko, A. Seweryn, Pore-scale numerical modelling of large deformation behaviour of sintered porous metals under compression using computed microtomography, *Mech. Mater.* (2020).
- [4] M. Doroszko, A. Falkowska, A. Seweryn, Image-based numerical modeling of the tensile deformation behavior and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V diamond lattice structures, *Mater. Sci. Eng. A.* (2021).
- [5] M. Doroszko, Numerical Investigation of the Defects Effect in Additive Manufactured Ti-6Al-4V Struts on Deformation Behavior Based on Microtomographic Images, *Materials (Basel)*. 15 (2022) 4807.
- [6] A. Falkowska, A. Seweryn, Fatigue life of 316L steel sinters of varying porosity under conditions of uniaxial periodically variable loading at a fixed stress amplitude, *Int. J. Fatigue.* (2018).
- [7] A. Palmgren, Die lebensdauer von kugellagern, *Zeitschrift Des Vereins Dtsch. Ingenieure.* (1924).
- [8] M.A. Miner, Cumulative Damage in Fatigue, in: *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, 1945.