

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Numeryczne modelowanie pól naprężeń i odkształceń w rozciąganych metamateriałach ze stopu Ti-6Al-4V z wykorzystaniem tomografii komputerowej

Michał Doroszko¹, Andrzej Seweryn²

¹Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

²Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska
email: m.doroszko@pb.edu.pl, andrzej.seweryn@pg.edu.pl

STRESZCZENIE: Niniejsza praca dotyczy numerycznego modelowania pól naprężeń i odkształceń oraz właściwości mechanicznych struktur otrzymanych za pomocą metody przyrostowej. W pracy wykorzystano struktury diamentowe stopu tytanu Ti-6Al-4V o różnej gęstości względnej. Do modelowania wykorzystano modele geometryczne odwzorowujące rzeczywisty kształt badanych struktur. W celu odtworzenia geometrii próbek zastosowano tomografię (CT) i mikrotomografię komputerową (micro-CT), które umożliwiły otrzymanie dwóch poziomów dokładności odwzorowania detali kształtu badanych struktur. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń za pomocą metody elementów skończonych (MES) otrzymano i przeanalizowano rozkłady naprężeń i odkształceń w zdeformowanych strukturach. Zbadano zależność pomiędzy kształtem struktur komórkowych i ich efektywnymi właściwościami mechanicznymi w skali makroskopowej. Opisano również wpływ dokładności odwzorowania kształtu struktur na ich właściwości wytrzymałościowe i rozkłady naprężeń i odkształceń. Na podstawie przeprowadzonych badań wskazano lokalne strefy inicjacji pęknięć w tytanowych strukturach komórkowych. Na koniec wyniki obliczeń numerycznych zweryfikowano za pomocą badań eksperymentalnych.

SŁOWA KLUCZOWE: metoda elementów skończonych, odkształcanie, techniki przyrostowe, mikrotomografia, stopy tytanu

1. Materiały

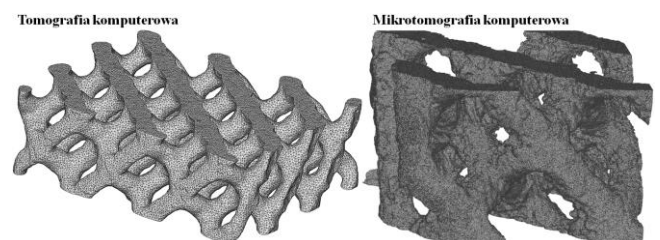
Materiałem przeznaczonym do wykonania próbek był proszek LaserForm Ti Gr23 (3D Systems). Do badań wyprodukowano diamentowe struktury krzyżowe o nominalnej gęstości względnej 18.5%, 27%, 50% oraz 66%. Próbkę otrzymano za pomocą metody przyrostowej laser power bed fusion (LPBF). W celu usunięcia naprężeń reszkowych powstałych w wyniku procesu druku 3D, próbki wygrzewano w temperaturze 920°C. Więcej szczegółów dotyczących badanych materiałów opisano w pracy Falkowska et al. [1].

2. Modelowanie numeryczne

W modelowaniu numerycznym pól naprężeń i odkształceń w procesie rozciągania uwzględniono rzeczywisty kształt przestrzennych struktur diamentowych. W tym celu zastosowano tomografię i mikrotomografię komputerową. Dzięki temu uzyskano modele geometryczne badanych struktur diamentowych odwzorowujące szczegóły geometrii wytworzonych próbek z różną dokładnością [2]. Wygenerowane modele geometryczne zaimportowano do oprogramowania MSC.MARC w postaci powierzchniowych siatek elementów skończonych, a następnie przekonwertowano je na siatki bryłowe (rys. 1).

W modelowaniu numerycznym rozciągania badanych struktur otrzymanych na podstawie obrazów CT i micro-CT wykorzystano sprężysto-plastyczny model materiału z umocnieniem izotropowym. Do obliczeń przyjęto moduł Younga $E_s = 116,9$ GPa i współczynnik Poissona $\nu_s = 0,31$

otrzymane w wyniku badań doświadczalnych litych próbek Ti-6Al-4V otrzymanych za pomocą druku 3D. Zastosowano również warunek plastyczności Hubera-von Misesa oraz zdefiniowano nieliniowość materiałową za pomocą rzeczywistej krzywej naprężenie-odkształcenie.



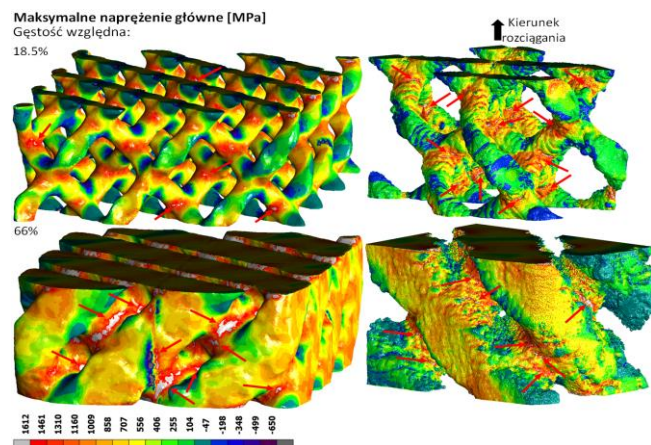
Rys. 1. Podział na elementy skończone modeli geometrycznych o gęstości względnej 27% otrzymanych za pomocą wykorzystanych technik tomograficznych [2].

3. Wyniki obliczeń numerycznych

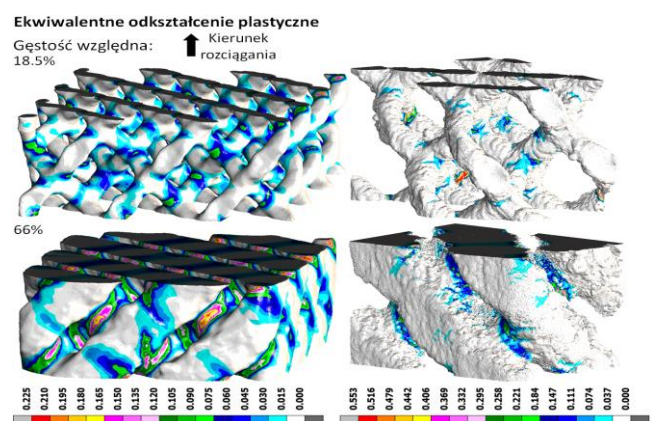
Otrzymano wyniki obliczeń numerycznych dotyczące procesu deformacji rozciąganych struktur diamentowych Ti-6Al-4V o różnych gęstościach względnych. Pokazano i przeanalizowano rozkłady naprężeń i odkształceń w zdeformowanych materiałach oraz krzywe rozciągania materiału. Wskazano też miejsca koncentracji naprężeń oraz potencjalne lokalizacje inicjacji pęknięć.

Rozkłady maksymalnego naprężenia głównego w strukturach diamentowych otrzymane na podstawie dwóch badanych metod pokazano na rys. 2. Maksymalne wartości są zlokalizowane w pobliżu węzłów badanych

struktur. Należy zwrócić uwagę na to, że otrzymane wartości maksymalne przekraczają wartość krytyczną naprężenia głównego. W lokalizacjach gdzie maksymalne naprężenie główne przekracza wartość krytyczną (czerwone strzałki) może dochodzić do inicjacji pęknięcia materiału. W modelach bazujących na micro-CT zaobserwowano dużą liczbę takich lokalizacji skupiających się głównie na powierzchni beleczek wokół węzłów struktur. W materiałach o gęstości względnej 18,5% oraz 27% naprężenie krytyczne występuje też sporadycznie w większych odległościach od węzłów struktur diamentowych [3]. Jest to związane ze znaczącym wpływem mikrokarbów technologicznych na rozkład naprężenia w materiale oraz jego wytrzymałość. Podczas gdy w materiałach o większej gęstości względnej, czyli 50% i 66%, decydujący wpływ na wytrzymałość struktur mają karby makroskopowe. Natomiast w przypadku modeli otrzymanych na podstawie obrazów CT występuje mniej lokalizacji, w których przekroczono krytyczną wartość naprężenia.



Rys. 2. Rozkład maksymalnego naprężenia głównego w strukturach o gęstości względnej 18,5% i 66% w momencie inicjacji pęknięcia makroskopowego [2]



Rys. 3. Rozkład ekwiwalentnego odkształcenia plastycznego w strukturach Ti-6Al-4V o gęstości względnej 18,5% i 66% w momencie inicjacji pęknięcia makroskopowego [2]

Na rysunku 3 pokazano rozkłady odkształcenia plastycznego odpowiednio dla struktur na podstawie obrazów CT i micro-CT w momencie inicjacji pęknięcia makroskopowego. W przypadku modeli CT wraz ze wzrostem gęstości względnej znacząco powiększają się

strefy plastyczne oraz wartości maksymalne odkształcenia. Należy odnotować, że wartości odkształcenia w miejscach najbardziej odkształconych plastycznie są nawet dwukrotnie większe w przypadku modeli bazujących na obrazach micro-CT niż CT. Jest to spowodowane wysoką koncentracją odkształcenia plastycznego w mikrokarbach badanych struktur, które w przypadku modeli CT są wygładzone z powodu mniejszej dokładności pomiaru tomograficznego.

4. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki modelowania numerycznego za pomocą metody elementów skończonych procesu odkształcania struktur diamentowych stopu tytanu Ti-6Al-4V o różnej gęstości względnej. Na podstawie wykonanych i opisanych w pracy badań oraz analizy uzyskanych wyników można przedstawić poniższe wnioski.

- 1) Wykazano, że dokładność odwzorowania geometrii za pomocą tomografii komputerowej jest niewystarczająca, o czym świadczą znacznie zawyżone wartości gęstości względnej oraz siły rozciągającej na wykresach zależności nominalnych efektywnych naprężeń od odkształceń.
- 2) W przypadku zastosowania w obliczeniach odwzorowania geometrii struktur za pomocą mikrotomografii komputerowej otrzymano maksymalne wartości lokalnych naprężeń (maksymalnych normalnych oraz ekwiwalentnych) zbliżone do wartości tych naprężeń dla litego materiału w momencie inicjacji pęknięcia.
- 3) Uzyskane wyniki koncentracji naprężeń i odkształceń w rzeczywistej strukturze pozwalają także na analizę właściwości zmęczeniowych materiału, z uwzględnieniem zarówno karbów związanych z kształtem samej struktury diamentowej, jak i pustek oraz mikrokarbów technologicznych między cząstkami stopionego proszku, będące wynikiem niedokładności procesu produkcji [4].
- 4) Otrzymane wyniki mogą być podstawą modyfikacji geometrii struktury pod kątem obniżenia efektu karbów strukturalnych – koncentracji naprężeń oraz odkształceń i jednocześnie zwiększenia jej wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej.

Praca została wykonana w ramach projektu nr 035578 realizowanego na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki.

Literatura

- [1] Falkowska A., Seweryn A., Skrodzki M., *Strength Properties of a Porous Titanium Alloy Ti6Al4V with Diamond Structure Obtained by Laser Power Bed Fusion (LPBF)*, Materials, Vol. 13, No. 22, 5138 2020.
- [2] Doroszko M., Falkowska A., Seweryn A., *Image-based numerical modeling of the tensile deformation behavior and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V diamond lattice structures*, Materials Science & Engineering A, Vol. 818, 141362, 2021.
- [3] Doroszko M., *Numerical Investigation of the Defects Effect in Additive Manufactured Ti-6Al-4V Struts on Deformation Behavior Based on Microtomographic Images*, Materials, Vol. 15, No. 14, 4807, 2022.
- [4] Falkowska A., Seweryn A., *Fatigue of Titanium Alloy Ti6Al4V with Diamond Structure Obtained by Laser Power Bed Fusion Method*, International Journal of Fatigue, Vol. 163, 107079, 2022.