

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Modyfikacja mezostruktury metamateriałów wytwarzanych przyrostowo ze stopu tytanu Ti-6Al-4V w celu poprawy ich właściwości mechanicznych

Paweł Bielski, Michał Doroszko, Andrzej Seweryn

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska

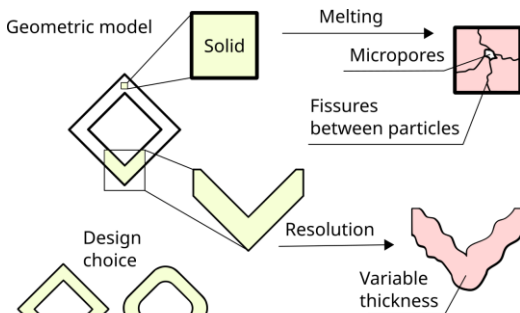
email: pawbiels@pg.edu.pl, michal.doroszko@pg.edu.pl, andrzej.seweryn@pg.edu.pl

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono wpływ geometrii mezostruktury na właściwości mechaniczne metamateriału ze stopu tytanu Ti-6Al-4V wytwarzanego metodą przyrostową Laser Powder Bed Fusion (LPBF). Wykorzystując obliczenia numeryczne metodą elementów skończonych (MES), zbadano zależność między promieniami zaokrąglenia powierzchni wewnętrznych mezostruktury a efektywną sztywnością i wytrzymałością materiału. Wyniki obliczeń numerycznych sugerują, że zwiększenie promieni zaokrąglenia powoduje zmianę decydującego kryterium granicznych naprężeń lokalnych z kryterium naprężeń głównych do kryterium naprężeń ekwiwalentnych, co związane jest z redukcją koncentracji naprężeń. Dla prezentowanego przypadku, odkształcenie efektywne przy zniszczeniu wzrosło z poniżej 2% do ponad 10%, podczas gdy nominalne naprężenie efektywne przy zniszczeniu podwoiło się. Sztywność wzrosła o 30% przy minimalnym wzroście zużycia materiału. Konieczna jest dalsza walidacja eksperymentalna, ponieważ wyidealizowane powierzchnie wewnętrzne, poddane obliczeniom numerycznym, nie są możliwe do uzyskania w procesie wytwarzania LPBF.

SŁOWA KLUCZOWE: metamateriały mechaniczne, wytwarzanie przyrostowe, Laser Powder Bed Fusion (LPBF), mezostruktura, metoda elementów skończonych, wytrzymałość metamateriału

1. Wstęp

Metamateriały to materiały o zaprojektowanej strukturze wewnętrznej, które wykazują właściwości mechaniczne odmienne od materiału bazowego [1]. Mają one strukturę hierarchiczną, składającą się z komórek. Kształt, rozmieszczenie i cechy geometryczne tych komórek tworzą tzw. mezostrukturę. Właściwości mechaniczne metamateriałów wytwarzanych metodami przyrostowymi zależą od geometrii mezostruktury. Kluczowe parametry mezostruktury obejmują: rozmiar i kształt komórki jednostkowej, grubość powłok i prętów oraz porowatość. Istotne są także właściwości materiału bazowego oraz ograniczenia techniki wytwarzania, takiej jak – w przypadku metali – laserowe przetapianie proszku (*Laser Powder Bed Fusion, LPBF*).

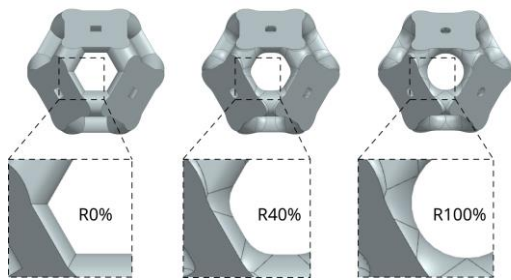


Rys. 1. Karby technologiczne i geometryczne

Przedstawione modelowanie ma na celu zmniejszenie koncentracji naprężeń poprzez redukcję efektu karbu w geometrii mezostruktury [2]. Występujące karby można podzielić na dwie grupy: wynikające z procesu wytwarzania oraz wprowadzone na etapie projektowania (Rys. 1). W pracy określono wpływ zaprojektowanych zaokrąglenia powierzchni wewnętrznych na efektywne właściwości mechaniczne metamateriału.

2. Materiały i metody

W badaniach metamateriałów rozróżnia się wielkości efektywne, rozważane na poziomie makroskopowym, oraz wielkości lokalne, rozważane na poziomie mezostruktury. Naprężenia i odkształcenia efektywne odnoszą się do metamateriału traktowanego jako ciało homogeniczne. Naprężenia i odkształcenia lokalne dotyczą bezpośrednio materiału bazowego, z którego wykonana jest mezostruktura. Założono, że gdy naprężenia lokalne przekraczają wartości dopuszczalne dla materiału bazowego, to towarzyszące im wartości efektywne należy uznać za graniczne. Analizując rozkład naprężeń w mezostrukturze, można określić dopuszczalne wartości obciążeń globalnych, którym poddawany jest metamateriał. W celu zmniejszenia koncentracji naprężeń w karkach geometrycznych, wprowadzono zaokrąglenia o różnych promieniach badając ich wpływ na właściwości efektywne. Promień wyrażono procentowo, gdzie 100% oznacza maksymalny dopuszczalny promień przy pełnym zaokrągleniu (Rys. 2).



Rys. 2. Definicja procentowych promieni zaokrąglenia

Do analizy wybrano trzy typowe komórki jednostkowe: komórka diamentowa (*Diamond Cell*), komórka Kelvina (*Kelvin Cell*) oraz kratownica oktetowa (*Octet Truss*). Zaprojektowano zestawy modeli geometrycznych o różnych parametrach strukturalnych przy użyciu programu Siemens NX. Rozmiar komórki jednostkowej ustalono na poziomie 2,4 mm, a grubość prętów była zmienna między 0,5 a 1,1 mm, co dało gęstość względną w przedziale od 20% do 67%. Następnie zastosowano różne promienie zaokrąglenia, tworząc warianty geometryczne do analizy.

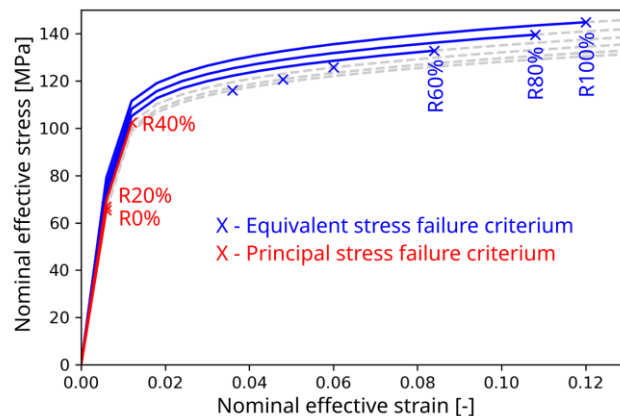
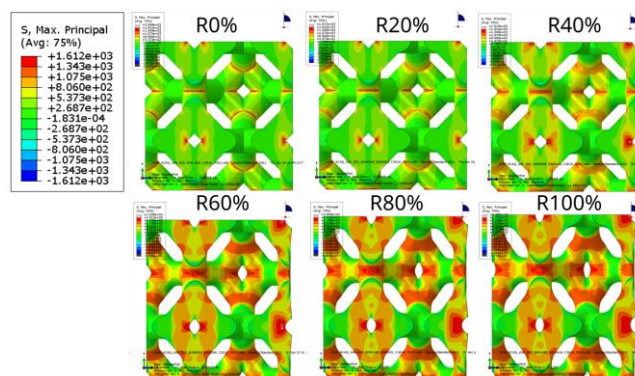
Każdy typ komórki posłużył do skonstruowania reprezentatywnego elementu objętościowego (*Representative Volume Element, RVE*). Wygenerowano modele do obliczeń numerycznych odzwierciedlające RVE o wymiarach 3x3x3 komórki. Warunki symetrii zredukowały modele do 1/8 ich pierwotnej objętości. Warunki brzegowe odzwierciedlały próbę rozciągania jednoosiowego. Obliczenia geometryczne i materiałowo nieliniowe (GMNA) przeprowadzono za pomocą SIMULIA Abaqus. Krzywą umocnienia stopu Ti-6Al-4V doświadczalnie określono jako rzeczywistą zależność ekwiwalentnego naprężenia od odkształcenia [3,4]. Aby uchwycić maksymalne wartości naprężeń i odkształceń zastosowano gęstą siatkę elementów skończonych o rozmiarze 10 μm . Modele zawierały po kilka milionów czworościennych elementów C3D4. Zastosowano algorytm przyrostowy Newtona-Raphsona ze sterowaniem przemieszczeniem. Symulację kończono w chwili osiągnięcia granicznych wartości naprężeń głównych lub ekwiwalentnych na poziomie mezostruktury.

3. Wyniki i wnioski

Przedstawione wyniki dotyczą jednego wybranego wariantu geometrycznego – komórki Kelvina o gęstości względnej 30%. Obliczenia numeryczne wykazały, że zwiększenie promieni zaokrąglenia prowadzi do znacznego wzrostu efektywnego modułu sprężystości i wytrzymałości metamateriału. Co istotne, wzrost właściwości nie jest proporcjonalny – wytrzymałość rośnie szybciej od sztywności. Stopniowe wygładzanie kątów prowadzi do przejścia z dominującego kryterium wytrzymałościowego opartego na naprężeniach głównych do naprężeń ekwiwalentnych (Rys. 3), co związane jest z redukcją koncentracji naprężeń i lepszą dystrybucją naprężeń w materiale (Rys. 4).

Zmiana geometrii znacząco poprawiła właściwości wytrzymałościowe. Odkształcenie efektywne przy zniszczeniu wzrosło z poniżej 2% dla promienia zerowego do ponad 10% dla maksymalnego promienia. Wartość nominalnego naprężenia efektywnego towarzysząca

granicznym naprężeniom lokalnym przy uszkodzeniu wzrosła o ponad 100%, a efektywny moduł sprężystości o 30%. Uzyskano to przy jedynie 5% wzroście masy mezostruktury między skrajnymi wartościami promienia. Wyniki te wymagają weryfikacji eksperymentalnej, ponieważ nominalne cechy wewnętrznych powierzchni nie są możliwe do uzyskania w procesie wytwarzania LPBF.

Rys. 3. Efektywne nominalne krzywe σ - ϵ dla komórki Kelvina o gęstości względnej 30%

Rys. 4. Rozkład naprężeń głównych w zależności od zaokrąglenia mezostruktury w chwili osiągnięcia granicznych wartości naprężeń lokalnych (komórka Kelvina o gęstości względnej 30%)

Badanie zostało zrealizowane z wykorzystaniem klastra obliczeniowego TRYTON PLUS obsługiwane przez Trójmiejską Akademicką Sieć Komputerową TASK. Praca została wykonana w ramach projektu nr 037302, realizowanego w Politechnice Gdańskiej.

Literatura

- [1] Surjadi JU, Gao L, Du H, Li X, Xiong X, Fang NX, Lu Y., Mechanical metamaterials and their engineering applications. *Advanced Engineering Materials*. 2019 Mar;21(3):1800864.
- [2] Meyer G, Wang H, Mittelstedt C. Influence of geometrical notches and form optimization on the mechanical properties of additively manufactured lattice structures. *Materials & Design*. 2022 Oct 1; 222:111082.
- [3] Dorosko 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 and Engineering: A*. 2021 Jun 22; 818:141362.
- [4] Dorosko M, Seweryn A. Cyclic behaviour modelling of additively manufactured Ti-6Al-4V lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024 Jul 1;273:109219.