

## **Rozwój pustek i ewolucja uszkodzenia w metalach i stopach o niskiej symetrii sieci - modelowanie wieloskalowe i analiza doświadczalna**

Nukleacja, wzrost i koalescencja mikropustek to typowy scenariusz, według którego polikrystaliczne, ciągliwe materiały metalowe ulegają uszkodzeniu. Najczęściej mikropustki są zarodkowane w wyniku dekohezji lub procesu pęknięcia wtrąceń drugiej fazy. Następnie mikrodefekty narastają z powodu jednorodnego odkształcenia plastycznego aż do początku koalescencji, gdy odkształcenie lokalizuje się w paśmie łączącym blisko rozmieszczone pustki. Od tego momentu pustki kontynuują swój wzrost głównie w kierunku najbliższych sąsiadów, aż do ostatecznego zniszczenia.

Celem projektu jest zrozumienie i opisanie *jak pustki rosną i łączą się, prowadząc do uszkodzenia i zniszczenia w materiałach metalowych o wysokiej wytrzymałości i sztywności właściwej*, takich jak stopy tytanu lub magnezu. W przeciwieństwie do tradycyjnych stali lub stopów aluminium o wysokiej symetrii sieciowej, interesujące nas materiały mają zazwyczaj heksagonalną zwartą strukturę krystaliczną (A3), którą określa się jako *sieć o niskiej symetrii*. Niska symetria sieci skutkuje lokalnie silnie anizotropową odpowiedzią materiału, to znaczy obserwujemy istotną zależność właściwości mechanicznych od orientacji przyłożonego obciążenia. Dla niektórych jego kierunków plastyczne odkształcenie materiału jest ograniczone, co wywołuje lokalną koncentrację naprężeń w komponencie. Prowadzi to do niskiej ciągliwości i ograniczonej odporności na pęknięcie. W odróżnieniu od dobrze ugruntowanych teorii zjawisk związanych z uszkodzeniem plastycznym dostępnych dla materiałów tradycyjnych, podobne propozycje i analizy dotyczące tego samego problemu dla materiałów metalicznych o niskiej symetrii sieci są w powijakach. Lepsze zrozumienie związku między mikrostrukturą materiału a mechanizmem powstawania i rozwoju pustek może zatem zmniejszyć ograniczenia utrudniające stosowanie stopów o sieci A3 jako elementów konstrukcyjnych. Takie materiały są coraz częściej używane w przemyśle transportowym i lotniczym poszukującym rozwiązań obniżających zużycie paliwa. Dostęp do rzetelnego, fizycznego opisu zachowania mechanicznego materiału zmniejszy ryzyko związane z niespodziewaną awarią elementów konstrukcyjnych, w których zastosowano nowe rozwiązania materiałowe.

W celu sformułowania matematycznego modelu plastycznego uszkodzenia materiału o niskiej symetrii sieci posłużymy się *techniką modelowania mikromechanicznego (wieloskalowego)*. W jej ramach szacujemy uśrednione (efektywne) właściwości materiału niejednorodnego znając właściwości mechaniczne faz na poziomie mikro oraz cechy geometryczne mikrostruktury w reprezentatywnej objętości materiału - orientacja osi krystalograficznych, geometria pustek i ich rozkład przestrzenny. W ramach tej techniki przy poszukiwaniu odpowiedzi lokalnej wykorzystamy zarówno rozwiązania numeryczne jak i analityczne. Kluczowym składnikiem modeli mikromechanicznych jest *schemat przejścia mikro-makro*, który stanowi pomost między wejściowym lokalnym zachowaniem mechanicznym i daje w rezultacie *ujednorodnioną odpowiedź makroskopową, najlepiej w postaci efektywnego modelu materiałowego*. Cechy mikrostruktury są w tym modelu reprezentowane przez zestaw kilku parametrów, zamiast jej pełną rekonstrukcję. Model jest zatem wydajny obliczeniowo i może mieć zastosowanie w obliczeniach inżynierskich przy wykorzystaniu komercyjnych kodów komputerowych dedykowanych do projektowania elementów wieloskalowych. Zweryfikujemy również nasz model za pomocą analizy eksperymentalnej, w szczególności przeprowadzonej na poziomie lokalnym poprzez *pomiar odpowiedzi mechanicznej, wzrostu pustek i związanych z tym zmian mikrostrukturalnych w monokryształach*.

Badania podjęte w ramach projektu są przydatne w nowatorskim procesie projektowania mikrostruktury metali i stopów w kierunku ich późniejszych aplikacji w następujących aspektach:

- Lepsza kontrola wpływu lokalnych właściwości materiału, takich jak tekstura krystalograficzna i początkowy rozkład wydzieleni i dodatków, na mechanizmy uszkodzenia związane ze wzrostem pustek w silnie anizotropowych materiałach metalicznych.
- Optymalizacja mikrostruktury materiałów pod kątem ich przyszłych zastosowań poprzez rozpoznanie wpływu warunków obciążenia na zjawisko uszkodzenia.
- Wykonanie kroku naprzód w kierunku sprawdzonego narzędzia do projektowania wielkogabarytowych konstrukcji wykonanych z metali i stopów o niskiej symetrii.