

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Drzymały:
"Microstructural conditions of plastic deformation of Mg-based metal alloys"**

Praca doktorska mgr inż. Piotra Drzymały jest obszernym studium dotyczącym doświadczalnych i teoretycznych badań stopów na bazie magnezu w aspekcie ich mikrostruktury, tekstury oraz własności mechanicznych. Rozpatrzono szczegółowo odkształcenie po wyciskaniu na gorąco, a także analizowano wpływ obróbki termo-mechanicznej na mikrostrukturę i właściwości tych stopów. Ograniczono się praktycznie do jednego rodzaju stopu na bazie magnezu – AZ31, zawierającego 3% aluminium, 1% cynku i 0.2% manganu. Jest to najbardziej rozpowszechniony jednofazowy stop do obróbki plastycznej z grupy stopów z dodatkiem Al.

Koncepcja pracy doktorskiej zakładała wieloaspektowe spojrzenie na problem kształtowania wyrobów ze stopów na bazie magnezu. Rozwinięto badania zarówno teoretyczne jak i obliczeniowe. Na szczególne podkreślenie zasługuje duży wysiłek autora w kierunku ścisłej analizy relacji orientacji krystalograficznych. Ta część pracy jest dobrym wprowadzeniem dla osób uczących się pojęć orientacji i różnic orientacji w różnych parametryzacjach.

Praca podzielona jest na trzy części.

W pierwszej części pracy, obejmującej rozdziały 2 i 3, mgr inż. Piotr Drzymała omówił zagadnienia odkształceń stopów magnezu poprzez analizę aktualnych pozycji literaturowych oraz sformułował hipotezę i celdoktoratu. Wynikiem przeglądu literatury było spostrzeżenie, że stopy magnezu są bardzo wrażliwe na deformację i bliźniakowanie odgrywa decydującą rolę w procesie odkształcenia i formowaniu tekstury. Głównymi charakterystykami, które Autor użył do analizy odkształcenia badanych stopów magnezu są właśnie tekstura oraz parametry granic międzyziarnowych. Znaczną część wyników doświadczalnych uzyskano w pracy przy zastosowaniu techniki wstecznego rozproszenia elektronów (EBSD), co prowadziło z kolei do analizy zbiorów pojedynczych orientacji. Mgr inż. Drzymała opracował zatem własny pakiet algorytmów i programów służących do tej analizy pod wspólną nazwą ODYS (od: Orientation Data Imaging Software). Hipoteza pracy dotyczyła możliwości lepszego poznania i zrozumienia zachodzących procesów przemiany mikrostruktury dzięki zaawansowanej analizie krystalograficznej i obliczeniowej.

Druga część pracy, zawarta w rozdziale 4-tym, jest częścią teoretyczną i zawiera opis metodologii obliczania orientacji i misorientacji, przybliża parametryzację Rodriguesa do opisu tekstury i bliźniakowania w stopach magnezu. Opisano w niej także zagadnienia odtwarzania figur biegunowych z pojedynczych orientacji i wyznaczenia czynników Schmidta. Ponieważ w pracy badano także naprężenia własne stopów magnezu, to nie mogło zabraknąć opisu metody wyznaczenia dyfrakcyjnych stałych sprężystych. Wymienione w tej części pracy wzory i rachunki były podstawą przy tworzeniu własnych programów obliczeniowych, które służyły do analizy danych doświadczalnych.

Trzecia część pracy, zawarta w rozdziałach 5 i 6, zawiera opis użytych technik doświadczalnych oraz ich analizę. Autor przeprowadził badania bliźniakowania na modelowej próbce ze stopu magnezu w stanie po wyciskaniu na gorąco, a także analizował wpływ obróbki termo-mechanicznej na mikrostrukturę i właściwości stopów magnezu. Badany był głównie stop magnezu – AZ31, zawierający 3% aluminium, 1% cynku i 0.2% manganu. Dla porównania z dwufazowym stopem, wykonano część badań także na stopie AZ91 z dziewięcioprocentową zawartością aluminium. Wyjściowy materiał do badań stanowiły wytwarzane metodą wyciskania pręty i rury o ustalonych parametrach średnicy i grubości ścianki. W trakcie wyciskania utrzymywano stałą temperaturę około 430°C. Autor zastosował matryce o różnych średnicach otworów, co pozwoliło zbadać wpływ stopnia odkształcenia na mikrostrukturę. Okazało się, że zwiększenie stopnia przerobu ma bardzo korzystny wpływ na kształt i wymiar ziaren dzięki zwiększeniu ich kulistości. Zastosowane termiczno-mechaniczne warunki wyciskania zapobiegały tworzeniu się bliźniaków wewnątrz ziaren, co zapewniało najbardziej korzystną dla zwiększenia plastyczności mikrostrukturę stanu wyjściowego w wyciskanym pręcie.

Jednym z głównych wniosków przeprowadzonych badań odkształcenia magnezu jest istotna rola bliźniakowania jako mechanizmu zapewniającego zwiększoną plastyczność podczas odkształcenia w temperaturze pokojowej. Jednak intensywność bliźniakowania dość szybko maleje i w ogólności silnie zależy od rodzaju deformacji. Autor skupił się także na rozstrzygnięciu relacji pomiędzy naprężeniami wewnętrznymi w ziarnach macierzystych i bliźniakach, co zostało zweryfikowane przez specjalną konfigurację pomiaru dyfrakcyjnego. Pomiar naprężeń w trybie tomograficznym, który jest bardziej wrażliwy na geometryczne niedoskonałości warunków pomiaru, wykazało niezbicie, że naprężenia w matrycach i bliźniakach się nie różnią.

Badano także wpływ obróbki cieplno-mechanicznej na właściwości, teksturę i morfologię wyciskanych na gorąco rur i kołnierzy ze stopu magnezu. Wybrano dwie technologie obróbki sugerując się aktywacją różnych mechanizmów bliźniakowania: walcowanie pielgrzymowe oraz dociskanie wzdłuż osi rury (prowadzone przy zmiennych parametrach siły i temperatury). Autor stwierdził, iż w trakcie walcowania pielgrzymowego nie tworzy się wyraźna tekstura, podczas gdy w

procesie dociskania powstaje mocna tekstura złożonej z dwóch wyraźnych składowych. Na podstawie analizy dostępnej w pakiecie ODYS zidentyfikowano preferencyjne pojedyncze oraz podwójne niekoherentne granice bliźniacze i obserwowano zmiany parametrów cechujących mikrostrukturę. Jednakże z powodu niewystarczającej jakości map orientacji dla silnie odkształconych próbek nie udało się przeprowadzić wiarygodnej analizy mechanizmu pęknięcia.

Szczególną uwagę poświęcił Autor procesom obróbki cieplno-mechanicznej badanych stopów (rozdziały 6.1 i 6.2). W pierwszej części Autor przedstawił optymalne parametry technologiczne w procesie wytłaczania stopu AZ31, prowadzące do korzystnej mikrostruktury i tekstury po rekrytalizacji ze względu na zwiększoną plastyczność. Zbadana została także anizotropia własności mechanicznych związana z podstawową składową powstałą wcześniej tekstury po wyciskaniu prętów. Orientacja anizotropii zależy od kierunku obciążenia działającego na dany krystalit oraz od intensywności oddziaływania jego sąsiadów. Proces bliźniakowania został zbadany w szerokim zakresie odkształceń materiału. Interesującym dodatkowym źródłem informacji okazała się także technika emisji akustycznej, uzupełniona obserwacją zmian morfologicznych, tekstur, wraz z głębokim wglądem w stan naprężeń dla różnych komponentów tekstur.

Druga część tej grupy zagadnień obróbki termo-mechanicznej dotyczy wyciskanych rur i kołnierzy. I tutaj celem obróbki jest uzyskanie pożądanej morfologii, wielkości ziaren oraz tekstury. Zbadano także warunki prowadzące do zwiększenia korzystnej anizotropii stopów magnezu. W proponowanych rodzajach obróbki termomechanicznej, zwrócono szczególną uwagę na rolę bliźniakowania jako dodatkowego, obok poślizgu, mechanizmu odkształcenia zapewniającego zwiększoną plastyczność, a także wpływ temperatury na mikrostrukturę.

Uwagi krytyczne

Autor wybrał konwencję, w której wektory nie są wyróżnione bądź pogrubieniem, bądź strzałką nad nimi. Myślę, że praca byłaby bardziej czytelna, gdyby je tak wyróżniono (bo np. wektor r oraz jego składowa r_i oznaczone są taką samą czcionką).

Zauważyłem także drobne błędy drukarskie w dwóch wzorach: w Równ. 1.4 powinno być:

$$q_i = n_i \sin \frac{\theta}{2} \quad (\text{a nie } \cos), \text{ zaś w Równ. 6.6 po prawej stronie brakuje tenora } S_{mnop}, \text{ ponadto błędne są}$$

wskaźniki przy kosinusach kierunkowych a_{ij} .

W pewnych miejscach tekstu występują drobne potknięcia w języku angielskim. Np., liczba mnoga od 'vertex' to 'vertices', a nie 'vertexes'. Albo: 'przykładowy (wynik)' to: 'example (result)', a nie 'exemplary'.

Podsumowanie

Praca doktorska mgr inż. Piotra Drzymały jest kompletnym studium teoretyczno-doświadczalnym dotyczącym formowania termo-mechanicznego elementów ze stopów magnezu. Poziom analizy teoretycznej oraz utworzonego pakietu oprogramowania oceniam wysoko. Również część doświadczalna jest kompletna. W pracy użyto następujące technik: dyfrakcja elektronów rozproszonych wstecznie, dyfrakcja rentgenowska (także w odmianie tomograficznej), testy mechaniczne oraz emisja akustyczna.

Efektom pracy jest identyfikacja mechanizmów odkształcenia badanych stopów magnezu oraz propozycja optymalnych procesów ich formowania.

Wniosek końcowy

Praca stanowi istotny postęp w badaniu struktury, własności oraz procesów formowania stopów magnezu. Doktorant stworzył nowe narzędzia obliczeniowe oraz przeprowadził kompletne badania doświadczalne. Oceniam bardzo pozytywnie przedstawioną pracę doktorską. Drobne potknięcia redakcyjne nie wpływają oczywiście na wysoką ocenę pracy.

Pragnę stwierdzić, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Piotra Drzymały spełnia kryteria dotyczące rozpraw doktorskich zgodnie z brzmieniem ustawy o stopniach i tytule naukowym. W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie tej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Równocześnie proponuję wyróżnienie pracy.

