

Analiza anizotropii właściwości mechanicznych stopu magnezu typu WE43

Michał Dudziński, Michał Wałag , Anna Kula 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, Kraków

Streszczenie: Artykuł przedstawia prace eksperymentalne dotyczące aspektów anizotropii właściwości mechanicznych stopu WE43 oraz technicznie czystego magnezu (99,95%) uzyskanych w procesie wyciskania na gorąco. Prace eksperymentalne obejmowały charakterystykę strukturalną i fazową materiałów w stanie wyjściowym oraz próby jednoosiowego ściskania prowadzone równolegle lub prostopadle do kierunku wyciskania. Komplementarnie przeprowadzono badania makrotekstury materiałów w stanie wyjściowym oraz po deformacji plastycznej. Na podstawie uzyskanych wyników określono stopień anizotropii właściwości mechanicznych badanych materiałów oraz wskazano na teksturę jako ważny czynnik warunkujący sposób deformacji plastycznej materiałów po wyciskaniu.

Słowa kluczowe: stop WE43, anizotropia, tekstura, próba ściskania, mikrostruktura

ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES ANISOTROPY IN WE43 MAGNESIUM ALLOY

Abstract: The article presents experimental work on the anisotropy aspects of the mechanical properties of WE43 alloy and technically pure magnesium (99.95%) obtained by hot extrusion. The experimental work includes structural and phase characterisation of as-extruded materials and uniaxial compression tests conducted parallel and perpendicular to the extrusion direction. Complementary studies of the macrotexture of materials before and after plastic deformation were carried out. Based on received results the degree of anisotropy of the mechanical properties of the tested materials was determined. The texture was identified as an important factor determining the activation of particular deformation mode of the materials after extrusion.

Keywords: WE43 alloy, anisotropy, texture, compression test, microstructure

https://doi.org/10.7494/978-83-67427-74-6_3

1. Wprowadzenie

Prężnie rozwijający się przemysł transportowy oraz lotniczy wymaga od materiałów stosowanych w tych gałęziach równie dynamicznego rozwoju. Od nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych wymaga się zmniejszenia wagi przy zachowaniu tych samych bądź lepszych własności mechanicznych. Ponadto konsekwentne wprowadzanie idei gospodarki obiegu zamkniętego wymusza projektowanie materiałów łatwych do recyklingu. Dążenie do „odchudzenia” konstrukcji, głównie w przemyśle lotniczym i samochodowym, spowodowało zwrócenie uwagi inżynierów na stopy magnezu. Zastąpienie dotychczas stosowanych elementów aluminiowych magnezem, którego gęstość wynosi 1740 kg/m^3 , pozwala zredukować masę gotowego wyrobu o 30% (Bohlen i in. 2007). W takim świetle stopy na osnowie magnezu ukazują się jako przyszłościowe materiały konstrukcyjne. W tej grupie szczególną rolę odgrywają stopy magnezu z pierwiastkami ziem rzadkich (*rare earth elements*, REE). Zainteresowanie metalami ziem rzadkich jako dodatkami do stopów magnezu wynika głównie z ich korzystnego wpływu na właściwości wytrzymałościowe, plastyczność oraz teksturę (Kula 2019). Efektywność oddziaływania REE przejawia się głównie w zmodyfikowanej teksturze stopów magnezu, która znacząco ułatwia proces kształtowania wyrobów podczas przeróbki plastycznej (Dziadoń 2012). W procesach przeróbki plastycznej materiałów heksagonalnych dochodzi do powstawania bardzo silnej tekstury odkształceniowej. Wyróżniona orientacja powoduje anizotropię własności, co oznacza, że np. materiał stekstrowany będzie wykazywał różnice np. w granicy plastyczności w zależności od kierunku przyłożonej siły (Robson 2015). W niniejszej pracy podjęto próbę określenia stopnia anizotropii własności mechanicznych komercyjnego stopu WE43 oraz czystego magnezu (99,95%).

2. Charakterystyka materiału badawczego oraz metod badawczych

Materiał do badań stanowił stop magnezu WE43 o składzie chemicznym podanym w tabeli 1.

Tabela 1
Skład chemiczny materiału badanego [% wag.]

Y	Nd	Pr	Zn	Zr	Mg
4,38	2,84	0,5	<0,01	0,5	reszta

Stop został wyciśnięty współbieżnie w temperaturze 370°C z prędkością ruchu stempla 1 mm/s oraz stopieniem redukcji przekroju $\lambda \sim 14$. Z otrzymanego pręta wycięto próbki okrągłe o średnicy $d_o = 6 \text{ mm}$ i wysokości $h_o = 8 \text{ mm}$. Próbki z pręta

wycinano za pomocą elektrodrążarki drutowej, tak aby zminimalizować stopień deformacji materiału. Próbkę wycinano w następujący sposób:

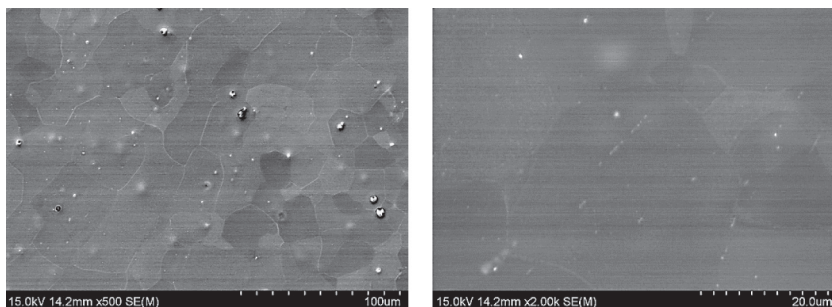
- oś próbki równoległa do kierunku wyciskania – **oznaczenie 0st**; w takim układzie podczas deformacji kierunek ściskania jest równoległy do kierunku wyciskania ($K\acute{S} \parallel ED$);
- oś próbki prostopadła do kierunku wyciskania – **oznaczenie 90st**; w takim układzie podczas deformacji kierunek ściskania jest prostopadły do kierunku wyciskania ($K\acute{S} \perp ED$).

Próbki odkształcano w warunkach jednoosiowego ściskania w temperaturze otoczenia na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej typu ZwickRoell z prędkością odkształcania $8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Próbkę stopu WE43 poddano również badaniom mikrostruktury przy wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego typu Hitachi SU-70. Próbkę do badań przygotowano z wykorzystaniem klasycznych technik szlifowania i polerowania. Badania tekstury materiałów w stanie przed deformacją i po deformacji przeprowadzono za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego typu Bruker D8 Advance/Discover operującego promieniowaniem typu Cu o długości fali $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$. Dla badanych próbek rejestrowano niekompletne figury biegunowe, które w następnej kolejności przeliczano, wykorzystując program MTEX operujący w środowisku MATLAB. Dyfraktometr D8 Advance/Discover zastosowano również do rentgenowskiej analizy fazowej stopu WE43 w stanie wyjściowym po wyciskaniu. Dla celów porównawczych zestawowi podobnych badań poddano próbkę magnezu o czystości 99,95% uzyskanego w procesie wyciskania w temperaturze 300°C przy zachowaniu ruchu stempla 1 mm/s oraz $\lambda \sim 14$ tak jak w przypadku stopu WE43.

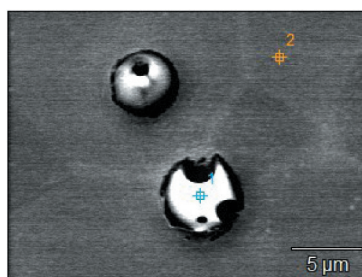
3. Wyniki badań

3.1. Wyniki obserwacji mikrostruktury materiału wyjściowego za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego

Na rysunku 1 pokazano mikrostrukturę czystego magnezu. Zdjęcia SEM potwierdzają, że magnez po wyciskaniu na gorąco wykazuje cechy zrekrystalizowanego materiału o charakterystycznych równoosiowych ziarnach. W mikrostrukturze wyróżniono drobne cząstki, wzbogacone w żelazo oraz krzem (rys. 2, tab. 2), stanowiące typowe zanieczyszczenie technicznie czystego magnezu. Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyczne cechy mikrostruktury stopu WE43 obserwowane przy użyciu SEM. Z przeprowadzonych obserwacji wynika, że w mikrostrukturze stopu WE43 znajduje się duża ilość drobnych cząstek wzbogaconych w pierwiastki ziem rzadkich (rys. 4, tab. 3). Rentgenowska analiza fazowa wskazuje, że są to głównie cząstki faz międzymetalicznych typu Mg_{12}Nd oraz Mg_{24}Y (rys. 5).



Rys. 1. Mikrostruktura czystego magnezu uzyskana po procesie wyciskania na gorąco, obserwowana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego

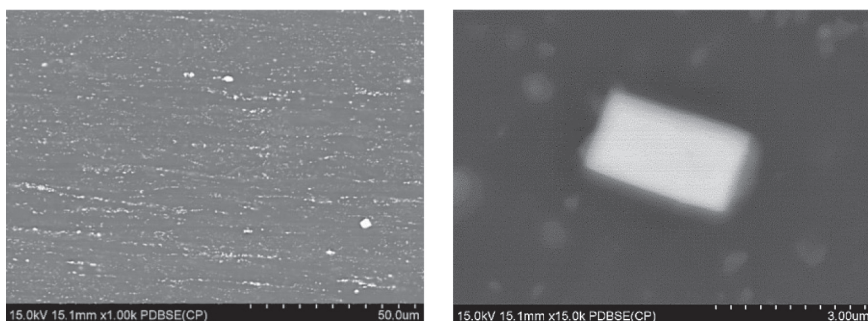


Rys. 2. Mikrostruktura magnezu wraz z zaznaczonymi punktami, dla których wykonano analizę EDS

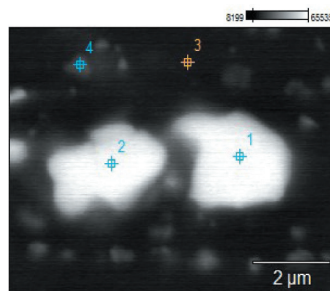
Tabela 2

Wyniki analizy składu chemicznego [% wag.] przeprowadzonej w punktach zaznaczonych na rysunku 2

	O	Mg	Si	Fe
Pkt 1	30,6	44,9	2,0	21,6
Pkt 2	—	100,0	—	—



Rys. 3. Mikrostruktura stopu WE43 uzyskana po procesie wyciskania na gorąco, obserwowana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego

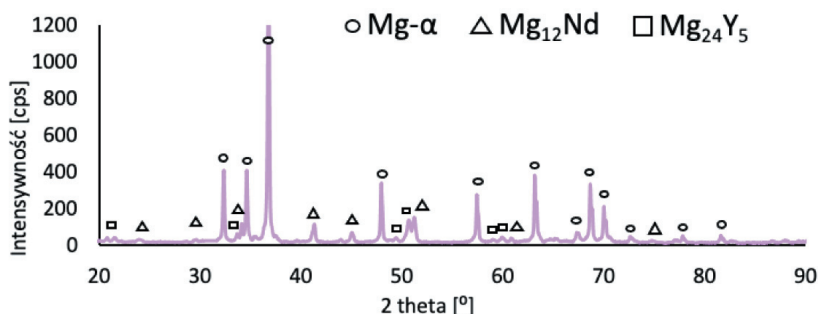


Rys. 4. Mikrostruktura stopu WE43 wraz z zaznaczonymi punktami, dla których wykonano analizę EDS

Tabela 3

Wyniki analizy składu chemicznego [% wag.] przeprowadzonej w punktach zaznaczonych na rysunku 4

	Mg	Y	Nd
Pkt 1	71,85	2,82	25,33
Pkt 2	72,56	2,99	24,46
Pkt 3	94,38	3,70	1,91
Pkt 4	90,06	4,63	5,31

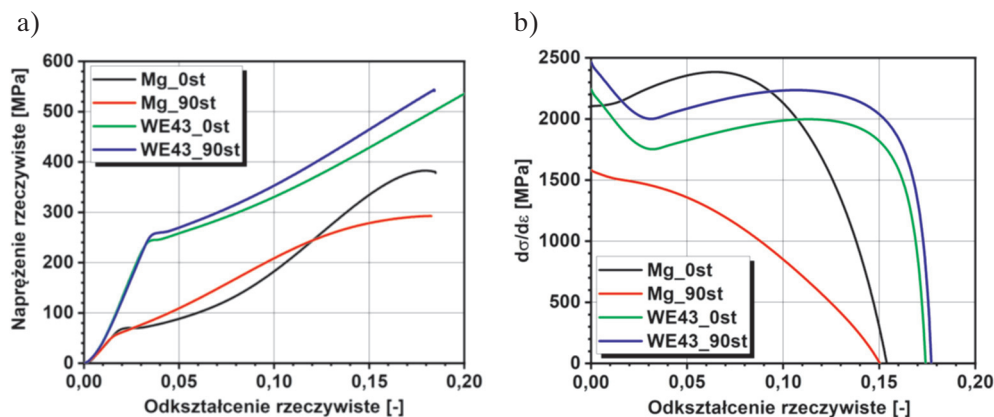


Rys. 5. Dyfraktogram rentgenowski stopu magnezu WE43 w stanie po wyciskaniu

3.2. Wyniki statycznej próby ściskania

Na rysunku 6a przedstawiono przebieg krzywych ściskania, uzyskanych dla próbki czystego magnezu oraz stopu WE43 odkształcanych w wariacie 0st i 90st. Z obserwacji przebiegu charakterystyk σ - ϵ wynika, że w przypadku stopu WE43, niezależnie od wariantu odkształcenia, krzywe wskazują na wyraźne przejście ze stanu sprężystego w stan plastyczny. Po przejściu granicy plastyczności na krzywych ściskania obserwuje

się bardzo krótkie „plateau”, po którym następuje praktycznie liniowy wzrost naprężenia, aż do pęknięcia. Dane eksperymentalne wskazują, że stop odkształcany w wariacie 90st wykazuje lekko wyższą granicę plastyczności.



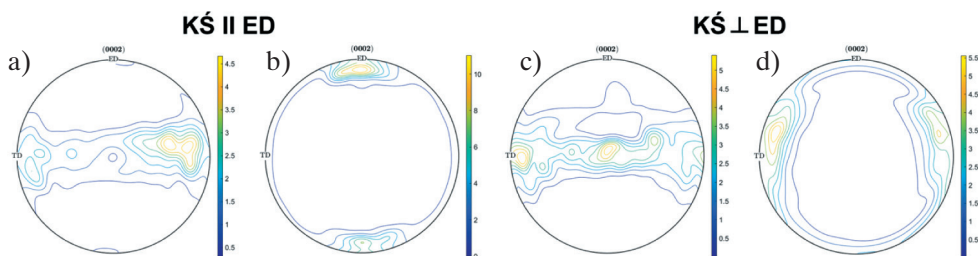
Rys. 6. Zestawienie krzywych: naprężenie rzeczywiste w funkcji odkształcenia rzeczywistego σ_{rz} vs. ϵ_{rz} (a) oraz prędkości umocnienia $d\sigma/d\epsilon$ w funkcji odkształcenia rzeczywistego ϵ_{rz} (b) dla próbek czystego magnezu i stopu WE43 odkształcanych w wariacie 0st oraz 90st

W przypadku czystego magnezu odkształcanego w wariacie 0st proces płynięcia plastycznego jest zdefiniowany przez wyraźniejszą granicę plastyczności niż w wariacie 90st. Charakterystyka ściskania magnezu odkształcanego w kierunku równoległym do kierunku wyciskania wykazuje sigmoidalny kształt z charakterystycznym zakresem „plateau”, odpowiadającym niskiej wartości umocnienia związanej z intensywnym bliźniakowaniem dominującym na tym etapie odkształcenia (rys. 6a). Krzywe prędkości umocnienia (rys. 6b) uzyskane w próbie ściskania stopu WE43 wykazują jakościowo podobny przebieg niezależnie od przeprowadzonego wariantu odkształcenia. Początkowy spadek $d\sigma/d\epsilon$ związany jest z zakresem sprężystego odkształcenia stopów. Po przekroczeniu granicy plastyczności krzywe prędkości umocnienia wykazują tendencję wzrostową aż do uzyskania pewnego maksimum, po którym następuje ciągły spadek krzywych prędkości umocnienia (rys. 6b). W przypadku czystego magnezu odkształcenie w wariacie 0st charakteryzuje ciągły wzrost krzywej prędkości umocnienia od momentu przekroczenia granicy plastyczności aż do maksimum ustalonego na poziomie około 0,07 odkształcenia rzeczywistego, po czym następuje ciągły spadek krzywej $d\sigma/d\epsilon$.

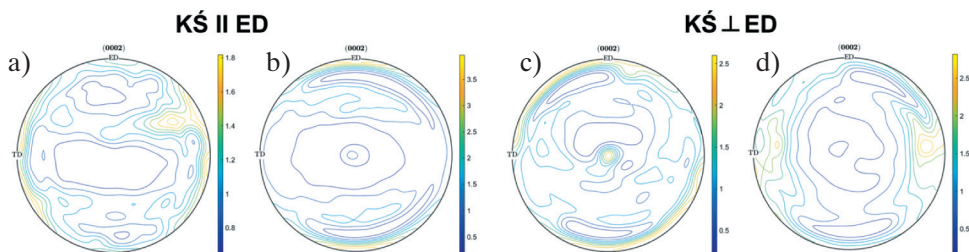
3.3. Wyniki badań tekstury

Na rysunku 7 przedstawiono teksturę czystego magnezu w stanie po wyciskaniu na gorąco oraz po maksymalnej deformacji plastycznej. Analiza figur biegunowych wskazuje, że magnez w stanie wyjściowym po wyciskaniu wykazuje silną teksturę bazalną.

Po maksymalnej deformacji w próbie jednoosiowego ściskania zaobserwowano silną reorientację ziarn w stosunku do wyjściowej tekstury (rys. 7). Taka sytuacja może mieć miejsce tylko wtedy, gdy w czasie deformacji dochodzi do mechanicznego bliźniakowania. Na rysunku 7d przedstawiono figurę biegunową czystego magnezu odkształconego w wariacie 90st, gdzie kierunek ściskania jest prostopadły do kierunku wyciskania ($K\acute{S} \perp ED$). Z badań tekstury wynika, że odkształcanie magnezu w konwencji 90st prowadzi do częściowej zmiany wyjściowej tekstury, zwłaszcza ziaren o orientacjach skoncentrowanych wokół kierunku TD. W tym przypadku następuje reorientacja ziarn w stronę kierunku wyciskania ED wywołana bliźniakowaniem. Ponadto po deformacji obserwuje się również pewną frakcję ziarn o orientacji zlokalizowanej wokół kierunku ND (rys. 8b). Na rysunkach 8a i c przedstawiono figurę biegunową płaszczyzny (0002) dla stopu WE43 w stanie wyjściowym po wyciskaniu na gorąco. W tym przypadku większość ziarn jest zorientowana osią c komórki heksagonalnej prostopadłe do kierunku wyciskania ED. Po deformacji plastycznej w wariacie 0st początkowa tekstura jest przetransformowana do nowej bliźniaczej orientacji, gdzie oś c komórki heksagonalnej jest równoległa do kierunku ściskania (rys. 8b).



Rys. 7. Figury biegunowe typu (0002) dla czystego magnezu w stanie wyjściowym (a, c) oraz po maksymalnej deformacji w procesie ściskania (b, d), gdzie kierunek ściskania jest równoległy do kierunku wyciskania ($K\acute{S} \parallel ED$ – wariant 0st) (b) oraz prostopadły do kierunku wyciskania ($K\acute{S} \perp ED$ – wariant 90st) (d)



Rys. 8. Figury biegunowe typu (0002) dla stopu WE43 w stanie wyjściowym (a, c) oraz po maksymalnej deformacji w procesie ściskania (b, d), gdzie kierunek ściskania jest równoległy do kierunku wyciskania ($K\acute{S} \parallel ED$ – wariant 0st) (b) oraz prostopadły do kierunku wyciskania ($K\acute{S} \perp ED$ – wariant 90st) (d)

Deformacja stopu w wariacie 90st prowadzi do reorientacji początkowej tekstury reprezentowanej przez orientację wokół kierunku TD. Transformacja tej orientacji związana jest z procesem bliźniakowania mechanicznego, a dokładniej – aktywacją tzw. bliźniaków rozciągania. Warto również zwrócić uwagę na to, że pewna frakcja ziarn po maksymalnym odkształceniu ściskającym wykazuje teksturę podobną do wyjściowej (rys. 8d).

4. Analiza wyników

Eksperyment badawczy wskazuje, że badany stop WE43 charakteryzuje się około pięciokrotnie większą granicą plastyczności w porównaniu z czystym magnezem. Wyznaczone wartości granicy plastyczności magnezu oraz stopu WE43 to odpowiednio ~ 55 MPa oraz ~ 255 MPa (rys. 6). Pozytywny wpływ dodatku pierwiastków ziem rzadkich odnotowano również, badając teksturę materiałów wyjściowych. Czysty magnez wykazuje bardzo silną bazalną teksturę, o znacznie większej intensywności niż stop WE43. Ponadto stop WE43 charakteryzuje tekstura o większym stopniu randomizacji bazalnych płaszczyzn w kierunku równoległym do kierunku wyciskania (rys. 8). Tekstura materiałów wyjściowych bardzo silnie wpływa na przebieg krzywych odkształcenia σ - ϵ oraz krzywych prędkości umocnienia $d\sigma/d\epsilon$ (rys. 6). Po procesie wyciskania badane materiały wykazują orientację, w której oś c komórki heksagonalnej jest prostopadła do kierunku wyciskania ED. Taka orientacja bardzo silnie warunkuje mechanizmy deformacji, które mogą być aktywowane podczas jednoosiowego ściskania. Gdy oś ściskania jest równoległa do kierunku wyciskania ($K\bar{S} \parallel ED$), wszystkie ziarna zorientowane osią c komórki heksagonalnej prostopadle do $K\bar{S}$ będą doświadczały odkształcenia spowodowanego bliźniakowaniem mechanicznym typu $\{10\bar{1}2\} < \bar{1}011 >$. Dokładnie tak dzieje się w przypadku odkształcania czystego magnezu oraz stopu WE43 w wariacie 0st. Przy tak zadanym kierunku ściskania dominującym systemem odkształcenia będzie bliźniakowanie, zwłaszcza w początkowym stadium deformacji.

O aktywacji bliźniakowania świadczy:

- kształt krzywych σ - ϵ (rys. 6) – zwłaszcza „plateau” w początkowym stadium odkształcenia;
- szybki wzrost krzywych prędkości umocnienia przy niskich odkształceniach spowodowany pojawieniem się granic bliźniaczych w podstrukturze badanych materiałów, które skutecznie blokują ruch dyslokacji, wpływając na wyższą efektywność akumulacji defektów;
- silna reorientacja ziarn, która może być wywołana tylko bliźniakowaniem.

Bliźniakowanie typu $\{10\bar{1}2\} < \bar{1}011 >$ opisuje kąt dezorientacji $86,3^\circ$ pomiędzy płaszczyzną bazalną osnowy i bliźniaka (Dziadoń 2012), stąd też transformacja większości ziarn po deformacji o około 90° , tak jak ma to miejsce w przypadku badanych materiałów w wariacie 0st, wywołana jest aktywnością bliźniakowania. Modyfikacja wyjściowej tekstury stopu WE43 przez jej osłabienie wpływa na bardziej zbalansowany udział bliźniakowania w globalnym procesie deformacji przez ściskanie. W przypadku wariantu odkształcenia 90st, tj. gdy oś ściskania jest prostopadła do kierunku wyciskania ($K\dot{S} \perp ED$), obserwuje się pewną frakcję ziarn zorientowanych osią c komórki heksagonalnej prostopadłe do $K\dot{S}$ oraz równoległe do $K\dot{S}$. Zatem w tym przypadku można oczekiwać, że frakcja ziarn zorientowana osią c komórki heksagonalnej prostopadłe do $K\dot{S}$ będzie preferować odkształcenie przez bliźniakowanie typu $\{10\bar{1}2\} < \bar{1}011 >$, zwłaszcza na początkowym etapie odkształcenia. W przypadku ziarn zorientowanych osią c komórki heksagonalnej równoległe do $K\dot{S}$ bliźniakowanie typu $\{10\bar{1}2\} < \bar{1}011 >$ będzie zablokowane ze względu na polarną naturę bliźniakowania – dla tej frakcji ziarn dominującym systemem odkształcenia będzie poślizg. Można zatem wnioskować, że odkształcenie plastyczne w wariacie 90st zależy od udziału objętościowego poszczególnych frakcji ziarn, co ma bezpośredni wpływ na:

- charakter krzywych σ - ϵ ,
- kinetykę umocnienia badanych materiałów i efektywność akumulacji defektów w podstrukturze,
- teksturę po odkształceniu.

Z makroskopowej analizy tekstury materiałów wyjściowych oraz przebiegu krzywych odkształcenia i prędkości umocnienia można wnioskować, że czysty magnez przy deformacji 90st wykazuje nieco większy udział objętościowy ziarn o orientacji, która doświadcza deformacji przez poślizg. Zmodyfikowana tekstura stopu WE43 i większy udział orientacji ziarn, w której płaszczyzna bazalna leży w płaszczyźnie TD (rys. 8), powoduje, że bliźniakowanie w wariacie 90st może być bardziej aktywne niż w przypadku czystego magnezu. W celu potwierdzenia powyższych spostrzeżeń konieczna jest dalsza i bardziej szczegółowa analiza tekstury i udziałów objętościowych ziarn o poszczególnych orientacjach. Analizując wyniki badań własnych, można zauważyć, że współczynnik asymetrii, który można tutaj zdefiniować jako stosunek granic plastyczności wyznaczonych w wariacie 0st i 90st, $\sigma_{y0st}/\sigma_{y90st}$, dla czystego magnezu wynosi 1,160, zaś dla stopu WE43 1,019. Można zatem wnioskować, że badane materiały wykazują niewielki stopień asymetrii granicy plastyczności. Wyraźniejsza anizotropia właściwości pojawia się przy większych odkształceniach, zwłaszcza w przypadku czystego magnezu (rys. 6).

3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Wprowadzenie pierwiastków ziem rzadkich do magnezu znacząco wpływa na zwiększenie jego wytrzymałości. W odniesieniu do granicy plastyczności σ_y zaobserwowano jej wzrost o około 200 MPa w stosunku do granicy plastyczności technicznie czystego magnezu. Zaobserwowano również pozytywny wpływ dodatku metali ziem rzadkich na teksturę materiałów wyjściowych.
2. Zarówno technicznie czysty magnez, jak i stop WE43 wykazują niską anizotropię granicy plastyczności podczas ściskania w badanych wariantach deformacji. Większa asymetria, zwłaszcza w przypadku czystego magnezu, pojawia się dopiero podczas zaawansowanego odkształcenia plastycznego.
3. Mechanizm odkształcenia plastycznego czystego magnezu oraz stopu WE43 podczas ściskania silnie zależy od tekstury badanych materiałów. W przypadku odkształcania badanych materiałów w wariancie, w którym oś ściskania jest równoległa do kierunku wyciskania ($K\bar{S} \parallel ED$), dominującym systemem deformacji, zwłaszcza na początkowym etapie odkształcenia, jest bliźniakowanie typu $\{10\bar{1}2\} < \bar{1}011 >$. Gdy oś ściskania jest prostopadła do kierunku wyciskania ($K\bar{S} \perp ED$), aktywowane mechanizmy odkształcenia są silnie uwarunkowane orientacją indywidulanych ziarn, dla których proces deformacji może być realizowany przez poślizg i/lub bliźniakowanie typu $\{10\bar{1}2\} < \bar{1}011 >$.

Literatura

- Bohlen J., Letzig D., Kainer K.U., 2007, *New perspectives for wrought magnesium alloys*, Materials Science Forum, vol. 546–549, s. 1–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.546-549.1>.
- Dziadoń A., 2012, *Magnez i jego stopy*, Samodzielna Sekcja „Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej”, Kielce.
- Kula A., 2019, *Mechanizmy i parametry aktywacyjne odkształcenia plastycznego stopów Mg-Gd i Mg-Y zachodzącego w warunkach silnego ograniczenia łatwego poślizgu dyslokacji*, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków.
- Robson J.D., 2015, *Critical Assessment 9: Wrought magnesium alloys*, Materials Science and Technology, vol. 31(3), s. 257–264. <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.00-00000683>.