

Tekstura krystalograficzna polikrystalicznych tworzyw metalicznych.

Materiały
do zajęć audytoryjnych i ćwiczeń.

Adam Bunsch

Tekst w opracowaniu – wersja z dnia 26.04.2017

Kraków - 2017

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	3
2. Tekstura – pojęcie ogólne i jego znaczenie.	3
2.1. Definicje tekstury	4
2.2. Orientacja krystalitu.....	5
2.3. Orientacja idealna.....	6
2.4. Tekstura, jako własność statystyczna.....	6
3. Sposoby przedstawiania tekstury materiału polikrystalicznego	8
3.1. Figura biegunowa	8
3.1.1. Zasada rzutu stereograficznego.....	8
3.1.2. Idealna figura biegunowa	9
3.1.3. Eksperymentalna (rzeczywista) figura biegunowa	9
3.2. Odwrotne figury biegunowe	10
3.3. Funkcje rozkładu orientacji - FRO	11
3.4. Dwuwymiarowe mapy orientacji	13
4. Klasyfikacje tekstur krystalograficznych	14
4.1. Klasyfikacja tekstur ze względu na symetrię materiału (wyrobu).....	14
4.1.1. Tekstury wyrobów płaskich	14
4.1.2. Tekstury wyrobów o symetrii osiowej.....	14
4.2. Tekstury pojedyncze i złożone	15
4.3. Klasyfikacje tekstur ze względu na przyczyny powstawania	16
4.3.1. Tekstury osadzania	16
4.3.2. Tekstury krystalizacji	17
4.3.3. Tekstury odkształcenia	17
4.3.4. Tekstury wyżarzania i rekrytalizacji.....	17
4.3.5. Tekstury przemiany fazowej	18
4.4. Niejednorodność tekstur.	18
5. Metody pomiar tekstury krystalicznej	20
5.1. Podstawowe zasady pomiaru tekstury	20
5.2. Ocena stopnia stekstrowania materiału na podstawie zapisu dyfraktometrycznego – indeksy teksturowe.	21
5.3. Dyfraktometryczny pomiar figury biegunowej	24
5.4. Pomiary tekstur oparte o wyznaczanie orientacji pojedynczych krystalitów.	26
6. Wpływ tekstury na właściwości materiałów	30
6.2. Zależność właściwości mechanicznych od tekstury.....	30
6.3. Zależność właściwości magnetycznych i elektrycznych od tekstury	30
6.4. Wpływ tekstury na inne właściwości materiałów	31
7. Znaczenie (definicje) pojęć używanych w opracowaniu.	32
8. Literatura	33

1. Wstęp.

Przedstawione opracowanie jest przeznaczone dla studentów kierunku Inżynieria Materiałowa lub Metalurgia na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej AGH, jako materiał uzupełniający do zajęć z przedmiotów w ramach, których omawiane są zagadnienia związane z występowaniem tekstur w materiałach polikrystalicznych oraz metody laboratoryjne pomiaru tekstur a także wpływu tekstur na własności materiałów.

Tekstura krystalograficzna jest bardzo ważną cechą materiałów polikrystalicznych gdyż decyduje o ich własnościach i jest przyczyną anizotropii tych własności. Stekstrowanie wykazuje większość tworzyw polikrystalicznych i dlatego ta ich cecha powinna być dobrze znana inżynierom materiałoznawcom zarówno zajmujących się technologiami wytwarzania materiałów jak i ich wykorzystywaniem dla konkretnych zastosowań.

Tekstury materiałów polikrystalicznych są często opisywane w specyfikacjach i katalogach materiałów oraz przedstawiane podręcznikach oraz pracach naukowych przy opisie tworzyw. Z tego względu znajomość sposobu prezentowania tekstur i ich interpretacji jest ważną umiejętnością dla inżyniera materiałoznawcy. Również sposoby pomiaru tekstur krystalograficznych, chociaż dość skomplikowane metodycznie i wymagające stosowania specjalistycznej aparatury, powinny być znane specjalistom z zakresu inżynierii materiałowej, aby potrafili kompleksowo planować i prowadzić badania różnych materiałów.

2. Tekstura – pojęcie ogólne i jego znaczenie.

Tekstura. Czy to słowo wystarczy, aby wiedzieć, czego dotyczą opisy i rozważania w dalszej części opracowania? Absolutnie nie, bo słowo „tekstura” ma wiele znaczeń. Wszystkie znaczenia są fachowe, a nawet naukowe. Tekstura ma swoje znaczenie dla grafików (szczególnie komputerowych), ale również dla fachowców zajmujących się opisywaniem sposobów malowania obrazów. Tekstury są przedmiotem zainteresowania geologów. Jako stekstrowane określa się pokłady złóż, skał, osadów. Tekstury krystalograficzne opisują i badają inżynierowie zajmujący się nowoczesnymi materiałami konstrukcyjnymi a szczególnie inżynierowie materiałoznawcy interesujący się strukturami metali i stopów.

W małym Słowniku Języka Polskiego (PWN 1969), w Słowniku wyrazów obcy i zwrotów obcojęzycznych (PWAN 1989) i w Słowniku poprawnej polszczyzny (PWN 1980) nie ma słowa „tekstura”. W encyklopedii Wikipedia pojęcie tekstury mamy zdefiniowane, ale czy będą te definicje odpowiednie i wystarczające dla materiałoznawców?

Według polskiej wersji Wikipedii - **tekstura** - w sensie ogólnym oznacza cechę powierzchni przedmiotu, wrażenie, które odczuwa się za pomocą dotyku. Teksturą nazywa się też charakterystyczne dla danego materiału powtarzalne wzory na powierzchni przedmiotów, jak np. słoje drewna.

W tym samym miejscu oprócz definicji tekstury krystalograficznej (krystalicznej), znajdujemy również inne definicje i opisy słowa „tekstura”:

- Tekstura malarska (faktura dzieła sztuki) - celowo tworzone chropowatości farby, mające nadać obrazowi szczególny wygląd
- Tekstura gleby - skład mechaniczny gleby
- Tekstura pieczywa - twardość, spoistość, elastyczność, a także podatność na przeżuwanie pieczywa
- Tekstura w grafice komputerowej - obraz dwuwymiarowy (zwykle w postaci bitmapy), który jest "nałożony" na powierzchnię trójwymiarowych (w rzeczywistości "realnej") obiektów, aby nadać im naturalny wygląd
- Tekstura muzyczna - w przenośni: ogólne wrażenie "gęstości dźwięków" w danym utworze muzycznym
- Tekstura gotycka - nazwa pisma z XIV wieku
- Tekstura skały - to w skałach magmowych sposób wykształcenia kryształów, wielkość czy relacje między nimi.

Warto odnotować, że wyszukiwarka Google podaje, iż pewne frazy zawierające słowo tekstura pojawiają się na dzisiaj w zasobach światowej sieci odpowiednio:

Tekstura drewna - 15.900 razy
Tekstura skały - 20.500 razy
Tekstura metalu - 46.500 razy

Dodatkowo w tych zasobach pojawiają się pojęcia tekstura kamienia, tekstura trawy, tekstura papieru i tekstura photoshop najwięcej razy, bo aż 95.000 razy

Przedstawiony powyżej wykaz znaczeń słowa „tekstura” pokazuje nam do opisu jak wielu różnych własności, różnych przedmiotów i materiałów jest to określenie używane. Jako materiałoznawcy skupimy się na jednym z nich – tekstura krystaliczna (krystalograficzna). Na wstępie trzeba zauważyć, że podana powyżej definicja nie będzie dla nas wystarczająca a wręcz nawet trudno ją uznać za poprawną.

W prezentowanej publikacji interesować nas będzie tekstura, jako pojęcie dotyczące własności materiału polikrystalicznego. Ta tekstura nazywana jest tekstura krystaliczną i jest rozumiana, jako występowanie w materiale takiej sytuacji, iż kryształy w materiale polikrystalicznym względem zewnętrznego układu odniesienia mają tendencje do układania się sposobem nie przypadkowy a zatem możemy mówić o występowaniu uprzywilejowanych orientacji krysztalitów. Tak rozumiana tekstura jest własnością statystyczną gdyż jej występowanie jest związane z tym, że pewne orientacje krysztalitów obecnych w materiale polikrystalicznym występują w materiale częściej niżby to wynikało ze statystyki w przypadku braku jakiegokolwiek ich uporządkowania.

2.1. Definicje tekstury

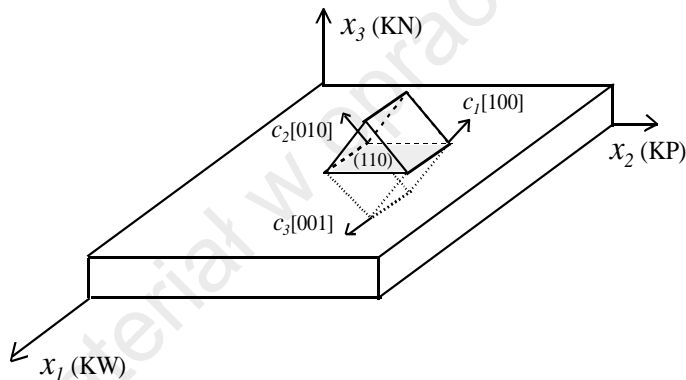
W literaturze spotykamy różne definicje tekstury krystalograficznej. Jako przykładowe definicje tekstury można podać następujące:

- Występowanie w polikryształach nieprzypadkowego rozkładu orientacji ziarn względem zewnętrznego układu odniesienia nosi nazwę **tekstury**
- Nieprzypadkowy rozkład orientacji ziarn polikryształu nazywamy **teksturą**.
- Metal wykazuje teksturę, gdy orientacja bardzo licznych ziarn nie jest przypadkowa

2.2. Orientacja krystalitu.

Dalsze rozważania wymagają określenia, co będziemy rozumieli pod pojęciem orientacji krystalitu w materiale polikrystalicznym. Materiał polikrystaliczny składa się z wielu (często bardzo wielu) pojedynczych krystalitów, które można w uproszczeniu utożsamiać z ziarnami. Każdy krystalit znajdujący się w tym materiale zachowuje w całej swojej objętości ciągłość kierunków i płaszczyzn krystalograficznych i dla każdego krystalitu można określić jak poszczególne kierunki krystalograficzne są zorientowane względem zewnętrznego układu odniesienia np. związanego z wyrobem – rysunek 1.

Sposobem przedstawiania tak określonej orientacji krystalitu jest, zatem wskazanie płaszczyzny krystalograficznej $\{hkl\}$ równoległej do powierzchni wyrobu i kierunku krystalograficznego $\langle uvw \rangle$ równoległego do określonego kierunku związanego z geometrią wyrobu. Stosowany zapis $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ określa tak zdefiniowaną orientację pojedynczego krystalitu (ziarna) względem powierzchni i charakterystycznego kierunku w wyrobie polikrystalicznym.

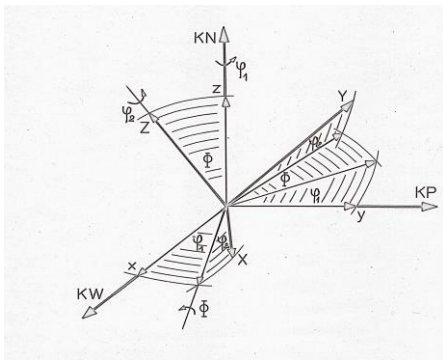


Rys. 1. Orientacja komórki elementarnej względem układu odniesienia związanego z wyrobem płaskim opisanym kierunkiem walcowania (KW), kierunkiem poprzecznym (KP) i kierunkiem normalnym (KN)

Zatem orientację krystalograficzną opisuje zestaw wskaźników: $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ gdzie:

- hkl – to wskaźniki płaszczyzny krystalograficznej równoległej do powierzchni wyrobu
- uvw – to wskaźniki kierunku krystalograficznego równoległego do wyróżnionego kierunku w wyrobie (w przypadku blach najczęściej do kierunku walcowania)

Inną formą opisywania orientacji krystalitu (ziarna) w materiale jest określanie wzajemnych orientacji dwóch układów współrzędnych; układu związanego z krystalitem oraz układu związanego z wyrobem. Taka relacja w przypadku dwóch prostokątnych układów współrzędnych jest opisywana poprzez trzy kąty Eulera $\varphi_1, \Psi, \varphi_2$. Ich definicje przedstawia rysunek. W przypadku, gdy rozważamy relacje pomiędzy dwoma prostokątnymi układami współrzędnych każdy z kątów Eulera zawiera się w zakresie od 0 do 90 stopni. Zatem zbiór wszystkich możliwości wzajemnych relacji pomiędzy tymi dwoma układami współrzędnych zawiera się w trójwymiarowej przestrzeni kątów $\varphi_1, \Psi, \varphi_2$. Każdy z punktów tej przestrzeni określa jedną z możliwych orientacji jednego układu względem drugiego. Ten sposób opisywania wzajemnych orientacji będzie wykorzystany przy wyznaczaniu funkcji rozkładu orientacji stanowiącej jeden ze sposobów przedstawiania tekstur w materiałach polikrystalicznych.



Rys. 2. Orientacja dwóch układów odniesienia opisana kątami Eulera $\varphi_1, \Psi, \varphi_2$

2.3. Orientacja idealna.

Krystality w sterowanym materiale mają tendencje do przyjmowania określonych orientacji względem zewnętrznego układu odniesienia. Ta tendencja oznacza skupianie się orientacji pojedynczych krystalitów wokół jednej ściśle określonej orientacji, którą nazywamy orientacją idealną. Nie oznacza to, że wszystkie krystality mają tę samą orientację zgodną z idealną. W rzeczywistych sterowanych materiałach krystality przyjmują orientacje zbliżone do idealnej a ich rozkład wokół orientacji idealnej może mieć różny charakter (bliski, rozmyty, symetryczny, niesymetryczny).

Orientacje idealne określa się poprzez podanie ściśle określonych wskaźników krystalograficznych np. podając kierunek krystalograficzny równoległy do osi wyrobu lub jakiegoś charakterystycznego kierunku w wyrobie albo podając wskaźnik płaszczyzny krystalograficznej równoległej do płaszczyzny wyrobu.

2.4. Tekstura, jako własność statystyczna.

Tekstura jest własnością statystyczną materiału polikrystalicznego. Należy zwrócić uwagę na to, że o teksturze możemy mówić tylko w odniesieniu do materiału polikrystalicznego i tylko w przypadku, gdy w tym materiale obecnych jest dostatecznie wiele pojedynczych krystalitów tak, że możemy badać rozkład ich orientacji. Skrajnym przypadkiem, w którym w materiale mamy tylko jeden krystalit jest monokryształ. W odniesieniu do monokryształu możemy mówić jedynie o jego

orientacji. Oznacza to, że możemy zmierzyć (określić), jaka płaszczyzna krystalograficzna monokryształu jest równoległa do jego powierzchni i jaki kierunek krystalograficzny jest równoległy do np. jego krawędzi. Gdy materiał składa się z dwóch a może nawet kilku kryształów możemy pewnymi technikami określić orientacje każdego z tych kryształów, ale trudno wciąż mówić o rozkładzie orientacji. W tym przypadku orientacje poszczególnych kryształów są zazwyczaj różne. Mogą być zbliżone, ale mogą się też znacznie różnić. Wciąż jednak trudno będzie mówić o tym, że jakaś orientacja jest szczególnie uprzywilejowana. Powstaje pytanie, jaka ilość krystalitów jest graniczna i kiedy możemy zacząć badać statystykę takiego rozkładu, czyli mówić o teksturze. Przyjmuje się, że tą graniczną ilością jest 1000 krystalitów. A zatem tyle krystalitów musi występować w materiale lub tyle krystalitów musi być objęte pomiarem, aby dokonać pomiaru tekstury, jako własności statystycznej.

Nie jest przy tym ważny rozmiar tych krystalitów. Mogą być bardzo drobne (np. o rozmiarze kilku mikronów), ale mogą być to duże kryształy (nawet o rozmiarach wyrażonych w milimetrach). Ponieważ dla pomiaru tekstury istotnym jest, aby pomiarem objąć, co najmniej tysiąc krystalitów istotny staje się obszar (objętość), z jakiej dokonujemy pomiaru. To może być problemem pomiarowym gdyż może w przypadku dużych krystalitów wymagać przygotowania bardzo dużych próbek i objęcia ich całej powierzchni (objętości) pomiarem.

3. Sposoby przedstawiania tekstury materiału polikrystalicznego.

Sposób przedstawiania tekstur stanowi poważny problem eksperymentalno-obliczeniowy. Wybór forma prezentowania tekstur zależy od wielu czynników, wśród których można wyróżnić geometrię wyrobu, dla którego wykonywany jest pomiar, technikę pomiaru a także, jakie własności materiału są odnoszone do zmierzonych tekstur. Tekstury aktualnie w pracach badawczych przedstawia się w postaci:

- figur biegunowych
- odwrotnych figur biegunowych
- funkcji rozkładu orientacji
- map orientacji (dwu i trójwymiarowych)

3.1. Figura biegunowa

Figura biegunowa jest podstawową formą przedstawiania tekstury materiału polikrystalicznego. Zdefiniowanie figury biegunowej wymaga przypomnienia zasad rzutu stereograficznego.

3.1.1. Zasada rzutu stereograficznego

Rzut stereograficzny to prezentacja kierunków krystalograficznych w kryształach poprzez ich rzutowanie na jedną z wybranych płaszczyzn tego kryształu. W przypadku, gdy jest to płaszczyzna o określonych wskaźnikach taki rzut nazywamy rzutem standardowym.

Zasada rzutu standardowego jest następująca. Poszczególne kierunki krystalograficzne wychodzące z początku układu współrzędnych mają swoje rzuty sferyczne w miejscu gdzie przebijają sferę, której środek również znajduje się w początku układu współrzędnych. Rzuty stereograficzne poszczególnych kierunków znajdują się w miejscu gdzie płaszczyzna rzutowania przebijana jest przez prostą łączącą ich rzuty stereograficzne z biegunem sfery leżącym na przeciwległej półkuli względem rzutu. Jako płaszczyznę rzutowania przyjmuje się płaszczyznę równikową sfery. Gdy płaszczyzna rzutowania jest płaszczyzną o określonych wskaźnikach krystalograficznych taki rzut nazywamy rzutem standardowym na tą płaszczyznę. Podstawową własnością rzutu stereograficznego jest zachowanie na płaszczyźnie rzutu (przestrzeni dwuwymiarowej) zależności kątowych pomiędzy kierunkami takich, jakie występują w przestrzeni trójwymiarowej. Jest to, zatem rzut izokątny, czyli zachowujący kąty pomiędzy kierunkami i płaszczyznami w kryształach.

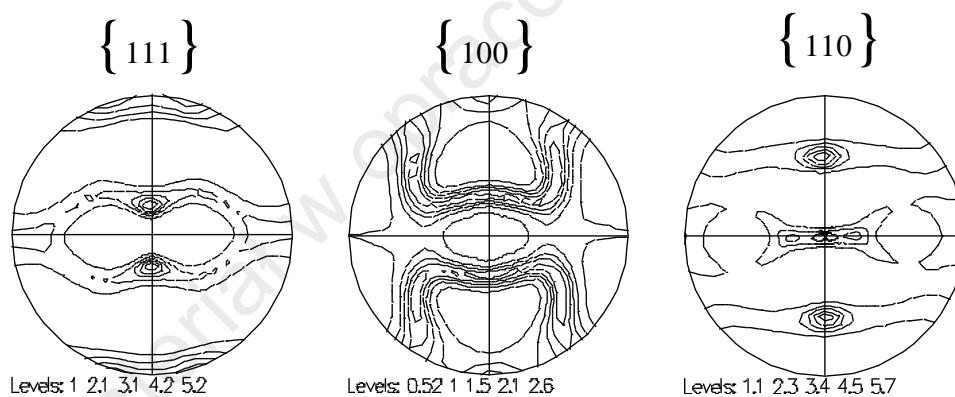
Rzut standardowy jest graficzną dwuwymiarową prezentacją położenia poszczególnych kierunków krystalograficznych na określonej płaszczyźnie rzutowania. Każdy kierunek krystalograficzny jest prezentowany na rzucie jednym punktem. Na rzucie prezentuje się wiele różnych kierunków krystalograficznych o określonych wskaźnikach (np. wszystkie kierunki powstające z kombinacji wskaźników 0, 1 i 2 z powtórzeniami). Taki rzut prezentuje położenia tych kierunków w jednym idealnym kryształach.

3.1.2. Idealna figura biegunowa

Idealna figura biegunowa prezentuje położenie rzutów kierunków krystalograficznych na określonej płaszczyźnie np. równoległą do powierzchni wyrobu dla jednej orientacji krystalitu w tym wyrobie. Taka figura biegunowa jest szczególnym przypadkiem rzutu standardowego, na którym prezentuje się położenia rzutów tylko jednego określonego typu kierunków.

3.1.3. Eksperymentalna (rzeczywista) figura biegunowa

Zachowując zasady rzutu stereograficznego można przeprowadzić rzutowanie tylko jednego typu kierunków np. $\langle 111 \rangle$ ale nie dla jednego kryształu, lecz dla kilku, kilkunastu, kilkuset lub kilku tysięcy kryształów z wyrobu. Gdyby wszystkie kryształy miały tą samą orientację względem zewnętrznego układu odniesienia (w tym przypadku układu współrzędnych) ich rzuty leżałyby dokładnie w jednym miejscu. Jeżeli jednak każdy z kryształów posiada inną orientację ich rzuty leżą w różnych miejscach. Zależnie od rozkładu orientacji tych kryształów również rzuty tych kierunków będą różnie rozmieszczone na rzucie. Gdy orientacje kryształów będą zupełnie przypadkowe rozkład rzutów kierunków na rzucie będzie również przypadkowy, czyli ich gęstość na całej powierzchni będzie jednakowa. Gdy jednak jakaś orientacja względem układu współrzędnych w pewnej grupie kryształów będzie występować częściej objawi się to zagęszczeniem rzutów tych kierunków w określonych miejscach rzutu. Ten niejednorodny rozkład rzutów uwidoczniiony na rzucie jest właśnie obrazem występowania tekstury materiale polikrystalicznym. Taki obraz tekstury uwidoczniiony na rzucie stereograficznym nazywamy figurą biegunową wtedy, gdy poszczególne rzuty określonego kierunku reprezentują orientacje poszczególnych ziran materiału polikrystalicznego.

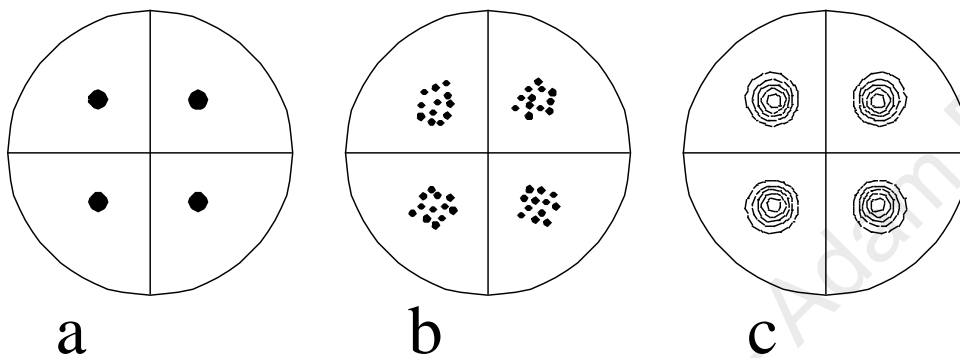


Rys. 3. Figury biegunowe $\{111\}$, $\{100\}$ i $\{110\}$ przedstawiające teksturę odkształconego na zimno aluminium.

Figura biegunowa jest to rozkład gęstości biegunów płaszczyzn określonego typu na powierzchni rzutu stereograficznego na płaszczyznę równoległą do powierzchni próbki. Figura biegunowa przedstawia na rzucie stereograficznym rozkład gęstości rzutów określonego typu kierunku krystalograficznego na płaszczyznę związaną z zewnętrznym układem odniesienia.

Typowym przykładem figury biegunowej jest figura przedstawiająca teksturę wyrobu płaskiego, jakim może być na przykład blacha. W takim przypadku płaszczyzną rzutowania najczęściej jest płaszczyzna blachy.

Na figurze biegunowej wykonanej dla monokryształu obserwujemy cztery bieguny $\{111\}$ wyraźnie od siebie oddzielone (rys. 4a). Wraz ze wzrostem ilości ziaren objętych analizą następuje zmiana z pojedynczego punktu w zbiór punktów (rys. 4b), które ilościowo odpowiadają ilości analizowanych ziarn. Dla realnych próbek, w których występują miliony ziaren przedstawienie wszystkich biegunów za pomocą punktów jest niemożliwe i zastępuje się je izoliniami łączącymi punkty o tej samej gęstości biegunów (rys. 4c).

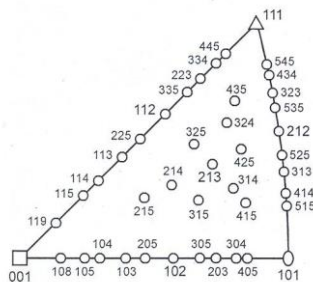


Rys. 4. Figury biegunowe przedstawiające teksturę $(001)[100]$ dla jednego zira (monokryształu), dwunastu ziaren oraz realnej próbki, w której występuje wielka ilość ziaren o zbliżonej orientacji.

3.2. Odwrotne figury biegunowe

Odwrotne figury biegunowe są to rzuty standardowe, w których pokazano położenie zewnętrznych kierunków odniesienia badanego materiału względem sieci krystalicznej. To uzasadnia nazwę „odwrotna figura biegunowa” gdyż ten sposób prezentowania wyników jest odwrotnością zasady stosowanej przy wykreślaniu figur biegunowych. W przypadku odwrotnej figury biegunowej dokonujemy rzutowania kierunków związanych z geometrią wyrobu na płaszczyznę rzutowania związaną z kryształem a konkretnie płaszczyznę (001) .

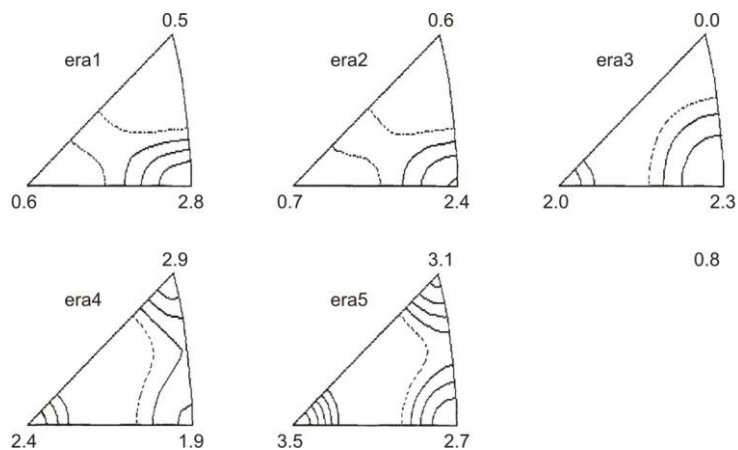
W przypadku wyrobów walcowanych najczęściej są to położenia kierunku normalnego KN, kierunku walcowania KW oraz kierunku poprzecznego KP na rzucie stereograficznym. Odwrotne figury biegunowe przedstawia się w postaci rozkładów gęstości kierunków KN, KW i KP na powierzchni rzutu stereograficznego reprezentowanego najczęściej przez tak zwany trójkąt podstawowy.



Rys. 5. Trójkąt podstawowy (fragment rzutu stereograficznego na płaszczyznę (001))

Zaznaczając na trójkącie podstawowym rozkład ilości ziarn, w których orientacje zaznaczone na trójkącie są równoległe do kierunku normalnego do płaszczyzny wyrobu (blachy) otrzymujemy **odwrotną figurę biegunową KN**.

Przykłady odwrotnych figur biegunowych KN przedstawiające tekstury cienkich warstw miedzi osadzanych elektrolitycznie przedstawiono na rysunkach.



Rys. 6. Odwrotne figury biegunowe KN przedstawiające tekstury cienkich warstw miedzi osadzanych elektrolitycznie.

3.3. Funkcje rozkładu orientacji - FRO

Funkcja rozkładu orientacji (fro) w języku angielskim jest opisywana, jako Orientation Distribution Function i dlatego dość powszechnie w literaturze jest stosowana forma skrócona jej nazwy, jako ODF.

Figury biegunowe wyznaczone doświadczalnie są rozkładami dwuwymiarowymi, więc nie zawierają pełnej informacji o rozkładzie krystalitów. Pełną informację zawiera trójwymiarowa funkcja tekstury zwana funkcją rozkładu orientacji (FRO). Funkcja ta jest zdefiniowana, jako:

$$F(g) = f(\varphi_1, \varphi, \varphi_2)$$

gdzie orientacja g reprezentowana jest przez 3 kąty Eulera: $\varphi_1, \varphi, \varphi_2$

Zasady wyznaczania kątów Eulera opisujących wzajemne orientacje krystalitu (układ x, y, z) i próbki wyrobu (KW, KN, KP) zostały podane w wcześniejszym rozdziale. Tu warto przypomnieć, że jedynie układ współrzędnych prostokątnych może być poprzez obrót o trzy kąty Eulera $\varphi_1, \varphi, \varphi_2$ przeprowadzony w drugi, dowolnie względem pierwszego zorientowany, układ współrzędnych prostokątnych, a te trzy kąty w sposób jednoznaczny określają wzajemną orientację tych dwóch układów współrzędnych.

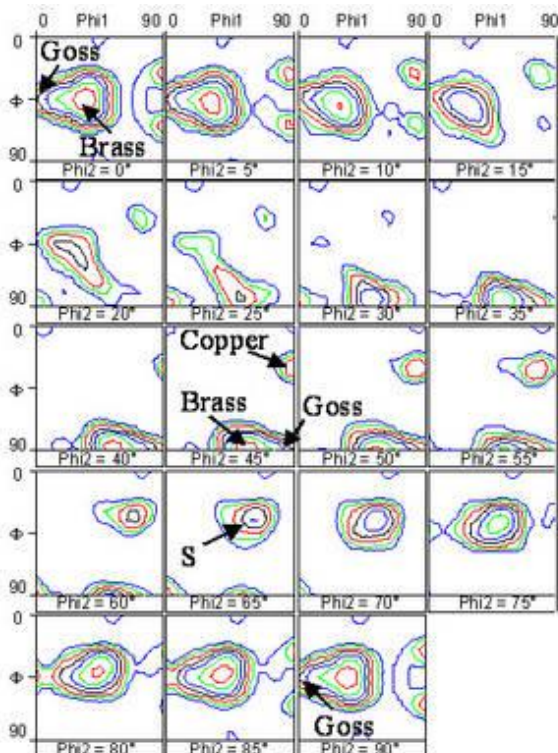
Funkcja $f(g)$ definiowana jest następująco.

$$\frac{dV}{V} = f(g)dg$$

W równaniu tym dV/V jest udziałem objętości kryształitów, których orientacje zawarte są w przedziale $(g, g+dg)$ czyli w niewielkim zakresie orientacji wokół tej opisanej kątami Eulera $\varphi_1, \varphi, \varphi_2$.

Wartość funkcji rozkładu orientacji w danym punkcie przestrzeni kątów Eulera jest udziałem objętościowym kryształitów o orientacji opisanej konkretnymi kątami $\varphi_1, \varphi, \varphi_2$. Wyznaczając te wartości w całej przestrzeni kątów Eulera mamy pełny obraz tekstury materiału polikrystalicznego.

Funkcje rozkładu orientacji jest funkcją trójwymiarową. Dlatego też przedstawia się ją graficznie w trójwymiarowej przestrzeni kątów $\varphi_1, \varphi, \varphi_2$ jako powierzchnie o stałej wartości. Ta forma przedstawiania wyników pomiarów i obliczeń nie jest wygodna i praktyczna gdyż wymaga trójwymiarowych rysunków, których wygląd zależy od sposobu ich wykonania (np. przyjętej geometrii rzutu aksonometrycznego) a zatem obrazy nie są jednoznaczne i są trudne do porównywania. Z tego powodu często funkcje rozkładu orientacji przedstawia się w przekrojach po jednym z kątów Eulera (najczęściej φ_1 lub φ_2) jako linie o stałej wartości funkcji. Dla w przypadku relacji pomiędzy dwoma układami ortogonalnymi (co odpowiada np. regularnej sieci krystalograficznej i geometrii wyrobu opisanej układem ortogonalnym przestrzeni funkcji rozkładu orientacji przedstawia się na kolejnych przekrojach kąta φ_1 lub φ_2 od 0 do 90 stopni co 5 stopni. Taki podział prowadzi do uzyskania 17 przekrojów przestrzeni funkcji rozkładu orientacji i jest w standardowym układzie prezentowany na dwuwymiarowym rysunku.

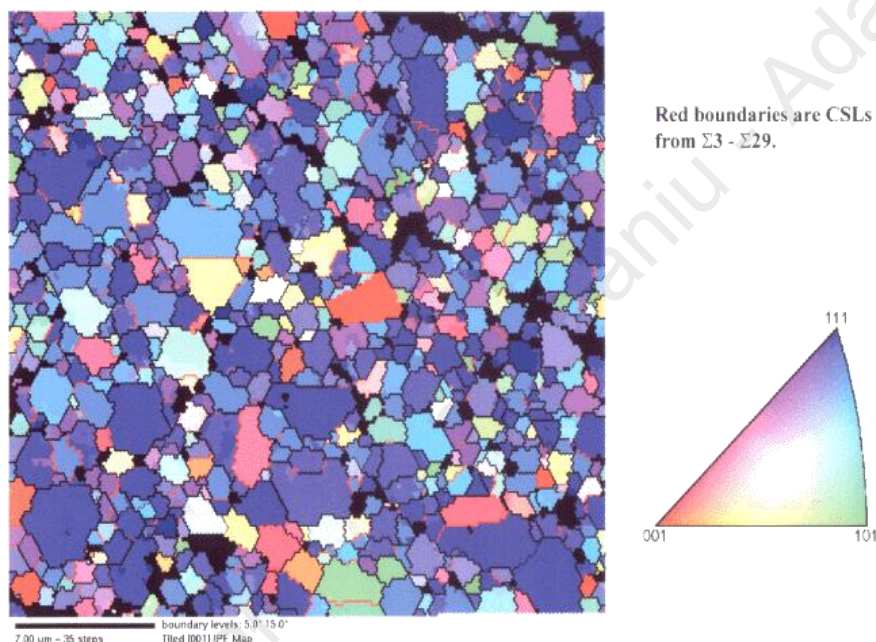


Rys. 7. Przekroje funkcji rozkładu orientacji (fro) $\varphi_2=\text{const}$ przedstawiające teksturę odkształconego aluminium.

Nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru wartości funkcji rozkładu orientacji. Najczęstszym typem danych doświadczalnych, które wykorzystuje się do obliczania funkcji rozkładu orientacji są figury biegunowe. Obliczanie funkcji rozkładu orientacji jest złożonym problemem matematycznym opartym o zależności geometryczne występujące w kryształach. Procedura obliczeń zależy nie tylko od posiadanych danych eksperymentalnych, ale również od typu sieci krystalicznej badanego materiału oraz geometrii (symetrii) wyrobu. Szczegóły tego typu obliczeń opisał w swoich pracach Bunge a zostały one ogólnie przyjęte na konferencji tekturowej w roku 1978.

3.4. Dwuwymiarowe mapy orientacji

Wyznaczanie topografii orientacji krystalograficznych stało się ważną techniką badania materiałów polikrystalicznych. Wykonuje się je przy użyciu transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM) lub też skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Mapy orientacji przedstawiają fragment próbki, na którym oznaczone są odpowiednimi kolorami krystality o tej samej orientacji (rys. 8).



Rys. 8. Przykładowa mapa orientacji krystalitów w materiale oraz trójkąt podstawowy z oznaczonymi kierunkami i przypisanymi im odpowiednimi kolorami reprezentującymi poszczególne orientacje

Do tworzenia map orientacji wykorzystuje się najczęściej technikę dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) w skaningowych mikroskopach elektronowych. Ostatnio do tworzenia tego typu map zastosowano obrazy dyfrakcyjne Kikuchiego (TKP) oraz obrazy dyfrakcyjne uzyskane przy użyciu wiązki zbieżnej (CBED) w transmisyjnym mikroskopie elektronowym (TEM). Ta technika pomiarów nazywa się orientation imagin microscopy (OIM).

Obecnie oprócz map dwuwymiarowych tworzy się podobna technika obrazy trójwymiarowe przedstawiające orientacje poszczególnych ziarn w określonej objętości materiału. Tworzenia takich obrazów jest możliwe dzięki zastosowaniu przenikliwego promieniowania np. neutronowego i zbieraniu informacji z objętości materiału a nie tylko jego powierzchni.

4. Klasyfikacje tekstur krystalograficznych

Tekstury możemy klasyfikować ze względu na szereg kryteriów. Te kryteria to pochodzenie tekstury, czyli przyczyna jej powstania lub proces, w którym tekstura powstaje, geometria przedmiotu (wyrobu), w którym obserwujemy teksturę, charakter tekstury

4.1. Klasyfikacja tekstur ze względu na symetrię materiału (wyrobu).

Tekstury występują w większości materiałów polikrystalicznych. Bardzo rzadko spotyka się niesteksturowane materiały lub wyroby a uzyskanie takiego materiału zawsze stanowi duży problem technologiczny. Każdy wyrób (materiał) ma swój kształt. Ponieważ tekstura to określony i nieprzypadkowy sposób ułożenia krystalitów względem układu odniesienia związanego z wyrobem, zatem istotnym jest symetria tego układu odniesienia, która określa kształt wyrobu. Dwa najczęściej spotykane przypadki to wyrób płaski, z którym związany jest prostokątny układ odniesienia (współrzędnych) oraz wyrób o symetrii osiowej.

Ze względu na geometrię wyrobu możemy wyróżnić następujące typy tekstur:

- Teksturę wyrobu płaskiego
- Teksturę osiową
- Teksturę włóknistą
- Teksturę cylindryczną

4.1.1. Tekstury wyrobów płaskich

Typowym przykładem wyrobów płaskich, w których występują tekstury i dla których ich istnienie ma duże znaczenie gdyż często determinuje ich własności są blachy walcowane. Układ odniesienia związany z blachą najczęściej określa się przez podanie trzech wzajemnie prostopadłych kierunków (kierunku walcowania KW, kierunku normalnego do powierzchni blachy KN i kierunku poprzecznego KP). Tekstura blachy (wyrobu płaskiego) jest określana poprzez podanie, jakie płaszczyzny krystalograficzne w poszczególnych krystalitach układają się równolegle do płaszczyzny walcowania blachy i jakie kierunki krystalograficzne układają się równolegle do kierunku walcowania. Do opisu takiej tekstury a dokładnie składowych tekstury wyrobu płaskiego używa się wskaźników $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ gdzie hkl są to wskaźniki płaszczyzny równoległej do płaszczyzny wyrobu (płaszczyzny walcowania) a uvw są to wskaźniki kierunku równoległego do określonego kierunku w wyrobie (najczęściej kierunku walcowania).

4.1.2. Tekstury wyrobów o symetrii osiowej

Typowymi wyrobami o symetrii osiowej są pręty i druty. Te wyroby posiadają oś symetrii. Teksturę tego typu wyrobów opisuje się podając, jakie kierunki krystalograficzne w poszczególnych krystalitach układają się równolegle lub prawie równolegle do osi wyrobu.

Jako szczególny typ wyrobu i występujące w nich tekstury trzeba omówić wyroby o symetrii osiowej (np. pręty druty, rury,). W tych wyrobach można również wyróżnić różne typy tekstur. **Tekstura osiowa** w tego typu wyrobie występuje wtedy, gdy określony kierunek krystalograficzny w krystalitach jest równoległy do osi wyrobu. Tekstury osiowe mogą być w tym przypadku pojedyncze, podwójne a nawet mogą zawierać więcej składowych. Gdy tekstura jest pojedyncza oznacza, że materiały w większości krystalitów określony kierunek krystalograficzny jest równoległy lub prawie równoległy do osi wyrobu. Gdy w materiale wstępują dwie lub więcej grup krystalitów, w których w każdej inny kierunek krystalograficzny jest równoległy do osi wyrobu mówimy o teksturze podwójnej lub potrójnej itd,

Szczególnym przypadkiem tekstury wyrobu o symetrii osiowej jest **tekstura cylindryczna**. Tak określamy teksturę, w której składowa opisana jest jednym kierunkiem równoległym do osi wyrobu (tak jak w teksturze osiowej), ale dodatkowo określona płaszczyzna w krystalitach układa się równoległe do np. jego (powierzchni) poboczniczy. Takie układanie się krystalitów w wyrobie reprezentuje wyższy stopień ich uporządkowania niż ten, który wykazuje materiał o teksturze osiowej.

4.2. *Tekstury pojedyncze i złożone*

Jednym z kryterium klasyfikacji tekstur jest ilość składowych występujących w teksturze materiału. Na tej podstawie tekstury dzielimy na:

- pojedyncze
- podwójne
- złożone
- włókniste

Gdy w materiale tylko jedna orientacja krystalograficzna ziarn (krystalitów) jest uprzywilejowana i jej udział w przestrzeni orientacji jest wyższy niż średnia statystyczna mówimy, że materiał posiada pojedynczą teksturę z jedną składową orientacją. Figury biegunowe przedstawiające takie tekstury są proste do interpretacji gdyż można na nich wskazać położenia symetrycznie równoważnych kierunków określonego typu odpowiadającego figurze. Na tej podstawie stosunkowo łatwo można wyznaczyć wskaźniki $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ określające teksturę przedstawioną na figurze biegunowej.

Pojedyncze tekstury są jednak rzadkim przypadkiem w realnych materiałach, w których zazwyczaj mamy do czynienia z teksturami złożonymi z kilku albo nawet wielu orientacji. W takiej sytuacji figury biegunowe są znacznie bardziej skomplikowane a ich interpretacja nie jest łatwa.

Tekstury złożone można podzielić na różne typy w zależności od tego jak są powiązane ze sobą składowe tych tekstur. Jednym z przypadków jest **nałożenie kilku orientacji** wtedy, gdy tekstura materiału złożona jest z kilku niezwiązanych ze sobą składowych. Każdej ze składowych można przypisać orientację idealną i tym samym wyróżnić ją, jako składową. Wskazanie tych idealnych orientacji może nie być łatwe, ale jest możliwe do wykonania na figurach biegunowych w oparciu o znajomość rzutu stereograficznego lub metodami obliczeniowymi.

Innym przypadkiem tekstury złożonej jest tekstura **włóknista**. W tym przypadku w teksturze materiału nie można wyróżnić pojedynczych składowych tekstury. W teksturze materiału wstępuje cały zbiór orientacji, które zmieniają się w sposób ciągły na przykład tak, że wiele płaszczyzn ze zbioru płaszczyzn należących do danego pasa krystalograficznego jest równoległych do np. powierzchni wyrobu a równocześnie oś tego pasa jest równoległa do jakiegoś ściśle określonego kierunku układu współrzędnych związanego z wyrobem. Gdy jedna określona płaszczyzna w krystalitach wyrobu jest równoległa np. do jego powierzchni, ale nie można wyróżnić jednego kierunku krystalograficznego (leżącego na tej płaszczyźnie), jako równoległego do układu odniesienia związanego z wyrobem mamy w materiale teksturę osiową - wtedy też kierunek krystalograficzny prostopadły do tej płaszczyzny jest prostopadły do powierzchni wyrobu i stanowi niejako oś, wokół której są obrócone płaszczyzny o tych samych wskaźnikach.

4.3. Klasyfikacje tekstur ze względu na przyczyny powstawania

Ważnym kryterium klasyfikacji tekstur jest przyczyna ich powstawania. Na tej podstawie wyróżniamy;

Tekstury pierwotne, do których zaliczamy:

- Tekstury osadzania
- Tekstury krystalizacji
- Tekstury odkształcenia

Tekstury wtórne, do których zaliczamy:

- Tekstury wyżarzania
- Tekstury rekrytalizacji
- Tekstury rozrostu ziarna
- Tekstury przemiany fazowej

Tekstury osadzania występują w cienkich warstwach metalicznych otrzymanych przez osadzanie z pary lub cieczy. Tekstury krystalizacji powstają podczas krystalizacji z fazy ciekłej. Tekstury odkształcenia - powstają na skutek mechanicznego odkształcenia materiału. Tekstury wyżarzania-rekrytalizacji - tworzą się podczas wyżarzania materiału jak i również rekrytalizacji i rozrostu ziarna. Tekstury przemiany fazowej - powstają w materiale po przemianie fazowej z fazy wyjściowej (która również może być teksturowana i najczęściej jest teksturowana).

4.3.1. Tekstury osadzania

Cienkie warstwy metaliczne otrzymuje się często przez osadzanie z pary lub cieczy. Ich orientacje krystalograficzne zależą od natury substratów oraz warunków symetrii procesu osadzania. Najczęściej warstwy osadzone posiadają teksturę włóknistą o osiach równoległych do kierunku wzrostu warstwy, czyli o określonym kierunku krystalograficznym prostopadłym do powierzchni osadzania. W praktyce w warunkach elektrolitycznego osadzania udaje się np. w uzyskiwać warstwy niklu, w których pojedyncze kierunki krystalograficzne $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, $\langle 210 \rangle$, $\langle 211 \rangle$, $\langle 221 \rangle$, $\langle 310 \rangle$, $\langle 311 \rangle$ lub ich kombinacje są równoległe do kierunku osadzania. Warstwy naparowywane niklu wykazują mniejszą liczbę powstających orientacji. Często jest tak, że tekstura warstwy osadzonej doskonali się w miarę jej nakładania (wzrostu).

4.3.2. Tekstury krystalizacji

Prawie wszystkie metale i stopy zanim przybiorą ostateczną formę przewidzianą do dalszej obróbki lub wykorzystania w praktyce przechodzą przez stan ciekły izotropowy. W czasie krystalizacji ze stanu ciekłego zachodzą procesy nadające powstającym ziarnom pewną określoną orientację krystalograficzną, które wpływają na własności materiału.

Krzepnięcie zazwyczaj zaczyna się w miejscu kontaktu cieczy z wlewnicą. Liczne ziarna zarodkujące na zimnej ścianie mają najczęściej przypadkowe orientacje krystalograficzne. Spośród tych ziaren w czasie krzepnięcia odlewy niektóre rozrastają się w głąb krystalizującej cieczy szybciej niż inne tworząc tak zwaną strefę kryształów słupkowych o wyraźnie określonej orientacji krystalograficznej. Ta strefa odlewy ma wyraźnie określoną teksturę, która wpływa istotnie na tekstury występujące w wyrobach powstających po przeróbce odlewu.

Przykładem takiego procesu, w którym tworzą się tekstury krzepnięcia jest proces krystalizacji wlewka stalowego, w którym obserwuje się powstawanie strefy kryształów zamrożonych o bezładnej orientacji ziaren oraz strefy kryształów kolumnowych o wyraźnej teksturze.

Większość metali i stopów o strukturach regularnych uzyskuje tekstury $\langle 001 \rangle$ w której kierunek $\langle 001 \rangle$ jest równoległy do kierunku odpływu ciepła a płaszczyzna $\{001\}$ równoległa do ściany wlewnicy i frontu krystalizacji. W ołowiu topionym strefowo zaobserwowana natomiast teksturę $\langle 111 \rangle$. Taki typ tekstur z wyraźnie określonym kierunkiem krystalograficznym równoległym do określonego kierunku w wyrobie nazywamy teksturą włóknistą.

W przypadku krzepnięcia metalu zachodzącego w obecności jakiegoś ukierunkowanego zjawiska fizycznego, jak na przykład pola magnetycznego, działającej siły odśrodkowej lub w przypadku bardziej skomplikowanych warunków chłodzenia mogą powstawać różne i bardziej wyraźne tekstury włókniste.

4.3.3. Tekstury odkształcenia

Większość metali i stopów podlega przeróbce plastycznej w celu nadania im oczekiwanych wymiarów i kształtów, w których są praktycznie stosowane. Wszystkie procesy przeróbki plastycznej zarówno te prowadzone na gorąco jak i na zimno prowadzą do pojawienia się w materiałach tekstur zwanych teksturami odkształcenia. Tekstury odkształcenia, powstają na skutek obrotu ziaren w wyniku procesu odkształcenia (walcowanie, przeciąganie, kucie i inne). W efekcie w odkształcanym materiale polikrystalicznym określony kierunek krystalograficzny jest równoległy do osi (w przypadku wyrobów o kształcie osiowym – np. drut, pręt) lub w przypadku wyrobów płaskich (np. blach) określona płaszczyzna krystalograficzna jest równoległa do powierzchni blachy, a kierunek równoległy do kierunku ich walcowania.

4.3.4. Tekstury wyżarzania i rekrytalizacji

Odształcone materiały metaliczne bardzo często po deformacji są poddawane wyżarzaniu albo w celu nadania im określonych własności lub aby usunąć efekty umocnienia i umożliwić ich dalszą przeróbkę plastyczną przez odkształcenie.

W czasie wyżarzania odkształconego materiału najczęściej następuje zmiana tekstury materiału z tekstury odkształcenia na teksturę wyżarzania (rekrytalizacji) a tylko czasem materiał zrekrystalizowany zachowuje teksturę materiału odkształconego.

Przemiana tekstury odkształcenia w teksturę wyżarzania jest uzależniona od stopnia wyżarzenia materiału. Zdrowienie zasadniczo nie powoduje zmiany tekstury materiału. Dopiero proces rekrytalizacji przebiegający na drodze zarodkowania i wzrostu prowadzi do jej zmiany. Przebieg tej zmiany opisują dwie teorie tworzenia się tekstur rekrytalizacji: teoria zorientowanego zarodkowania i teoria uprzywilejowanego wzrostu:

Teoria zorientowanego zarodkowania - przyjmuje, że w odkształconym materiale w czasie jego rekrytalizacji powstają zarodki nowych ziarn wyłącznie o określonych orientacjach krystalograficznych względem odkształconej osnowy. Te zarodki w procesie wzrostu zajmują całą objętość materiału a zatem ich orientacja decyduje o teksturze zrekrystalizowanego materiału.

Teoria uprzywilejowanego wzrostu - przyjmuje, że w powstające zarodki mają wszystkie możliwe orientacje krystalograficzne jednak ich prędkość wzrostu w głąb odkształconej osnowy zależy o tych orientacji i jest różna a zatem tekstura zrekrystalizowanego materiału jest zdeterminowana orientacją tych zarodków, które względem odkształconej osnowy rosną najszybciej.

Jeżeli materiał jest poddawany dalszemu wyżarzaniu może dojść do procesu rozrostu ziarn polegającym na wroście ziarn dużych kosztem tych mniejszych. Ten proces prowadzi najczęściej do wzmocnienia tekstury materiału jednak ze względu na olbrzymi rozmiar powstających ziarn zaczynamy mieć w tym przypadku bardziej z zagadnieniem orientacji pojedynczych ziarn niż teksturą, która jest własnością statystyczną i opisuje duże populacje ziarn.

4.3.5. Tekstury przemiany fazowej

Mianem tekstury przemiany fazowej określa się teksturę w materiale po przemianie fazowej. **Tekstura przemiany fazowej** obecna w materiale po przemianie fazowej zależy od tekstury fazy wyjściowej a także ewentualnej relacji krystalograficznej, jaka może łączyć orientacje komórek elementarnych fazy wyjściowej i powstającej w trakcie przemiany. W przypadku np. przemiany α w γ w stalach istnieją takie relacje pomiędzy komórkami austenitu i fazy α lub martenzytu, spośród których najbardziej znaną jest relacja Kurdiumowa-Schaksa. Zatem jeżeli dochodzi do przemiany stekstrowanego austenitu powstająca faza α będzie również stekstrowana, a rodzaj tej tekstury będzie zależał od konkretnej relacji, która będzie zrealizowana w trakcie przemiany.

4.4 Niejednorodność tekstur.

Inżynierski materiał polikrystaliczny jest zazwyczaj stekstrowany. Charakter tej tekstury bywa jednak różny, co z jednej strony jest własnością materiału, ale równocześnie musi być brane pod uwagę planując pomiar tej tekstury.

W najprostszym przypadku materiał posiada jednakową teksturę w całej objętości. Mówimy wtedy o jednorodnej teksturze materiału. Częściej jednak mamy do czynienia z przypadkami, gdy tekstura materiału jest niejednorodna, czyli

niejednakowa w całej objętości. Charakter tej niejednorodności może być różny. Najczęściej zależy od geometrii przedmiotu (wyrobu) i technologii jego produkcji. Różnice możemy obserwować w teksturze warstw powierzchniowych wyrobu i jego warstw wewnętrznych. Mówimy wtedy o teksturze powierzchni i teksturze warstw wewnętrznych. Różnice tekstury można obserwować również pomiędzy poszczególnymi miejscami wyrobów (np. środek pasma walcowanego i jego krawędź lub początek i koniec wyrobu). Każdy taki przypadek wymaga takiego zaplanowania sposobu pomiaru tekstury, aby ta niejednorodność mogła zostać zdiagnozowana. Zatem konieczne są pomiary w różnych miejscach wyrobu. Dopiero po stwierdzeniu, że tekstura w każdym z nich jest jednakowa istnieją podstawy do tego, aby pojedynczy pomiar był podstawą do wnioskowania o teksturze całego wyrobu. W każdym innym przypadku konieczne są pomiary tekstur lokalnych i ujawnianie jej niejednorodności. Może to być wykonywane poprzez użycie różnych technik badawczych.

Tekstura jest własnością statystyczną gdyż polega na występowaniu uprzywilejowanych orientacji krystalograficznych w wieloelementowym agregacie polikrystalicznym. Jednak bardzo często tekstura ta nie jest jednakowa w całej objętości materiału. To może prowadzić do takiej sytuacji, iż pomiar tekstury nie będzie reprezentatywny dla badanego materiału

Ze względu na wielkość powierzchnię lub objętość materiału, w którym dokonujemy pomiaru tekstury można rozróżnić, co najmniej cztery rodzaje pomiaru tekstur:

- pomiar tekstury lokalnej na powierzchni
- pomiar tekstury lokalnej w określonej małej objętości
- pomiar tekstury uśrednionej z dużej powierzchni
- pomiar tekstury uśrednionej z dużej objętości

5. Metody pomiar tekstury krystalicznej

5.1. Podstawowe zasady pomiaru tekstury

Istnieją metody oznaczania pojedynczych orientacji monokryształów. Do takich metod należy znana krystalografom metoda Lauego. Ponieważ każdy krystalit w materiale polikrystalicznym może być traktowany, jako monokryształ, zatem jeżeli wielkość pojedynczego ziarna (krystalitu) w materiale polikrystalicznym jest dostatecznie duża dla stosowanej techniki pomiarowej jest możliwość określenia orientacji takiego ziarna. Pomiar tekstury wymaga jednak określania orientacji bardzo wielu krystalitów w aglomeracie polikrystalicznym. Powstaje, więc pytanie czy taki pomiar orientacji ziarno po ziarnie dla dużej ilości ziarn jest możliwy. Dla takiego sposobu pomiaru tekstury istnieją, co najmniej dwie bariery techniczne. Często pojedyncze krystality są tak małych rozmiarów, że nie ma technicznej możliwości pomiaru ich orientacji wspomnianymi metodami. Ponieważ pomiar pojedynczej orientacji jest procesem złożonym, zatem niezmiernie czasochłonne byłoby oznaczenie tą metodą orientacji dostatecznej ilości krystalitów - tak dużej, aby móc badać ich statystyczny rozkład. Pewne możliwości w tym względzie dają współczesne metody mikroskopii elektronowej i skaningowej wsparte technologiami komputerowymi i informatycznymi. Możliwości wykorzystania tych technik pomiarowych do pomiaru tekstur będą omówione w innym rozdziale.

Jak zatem inaczej można dokonać pomiaru orientacji dostatecznej ilości krystalitów tak, aby móc określić teksturę materiału, czyli rozkład orientacji krystalitów w przestrzeni badanego wyrobu. Rozwiązanie przynoszą metody dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego lub neutronowego. Pomiar tymi metodami jest pomiarem pośrednim. Nie polega na bezpośrednim pomiarze orientacji krystalitów, ale opiera się na pomiarze efektu dyfrakcyjnego, który od tej orientacji zależy. Pomiar ten polega na określaniu intensywności promieniowania ugiętego na określonych płaszczyznach krystalograficznych w krystalitach materiału polikrystalicznego.

Dla pojedynczego kryształu prawo Bragga określa warunki ugięcia promieniowania na określonej rodzinie płaszczyzn krystalograficznych. Przy zastosowaniu promieniowania o określonej długości fali ugięcie zachodzi, gdy spełnione jest równanie

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \Theta$$

gdzie:

n – liczba całkowita

λ - długość fali

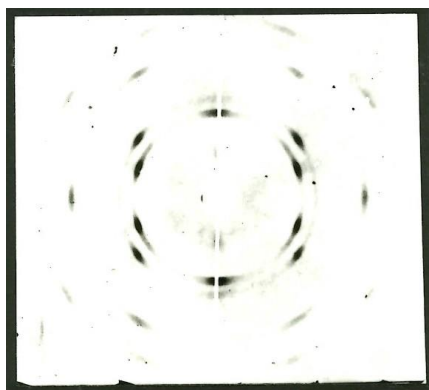
d_{hkl} - odległość między płaszczyznami o wskaźnikach hkl

Θ - kąt padania promieniowania na kryształ

Gdy jednak promieniowanie pada pod określonym kątem na bardzo liczny zbiór różnie zorientowanych w przestrzeni krystalitów tylko nieliczne z nich będą tak zorientowane względem wiązki promieniowania, że prawo Bragga będzie spełnione.

Jeżeli przyjmiemy w odpowiednio zaprojektowanym urządzeniu taką strategię pomiaru, że na określona powierzchnie lub na określoną objętość materiału polikrystalicznego będzie padać pod zmieniającymi się odpowiednio kątami promieniowanie rentgenowskie lub neutronowe pomiar tekstury (figury biegunowej) stanie się możliwy. Każdej orientacji badanego przedmiotu względem promieniowania padającego możemy przypisać zmierzoną eksperymentalnie intensywność promieniowania ugiętego. Ta intensywność jest proporcjonalna do ilości kryształitów, które w tym położeniu miały taką orientację, że spełnione było prawo Bragga. Gdy przeprowadzamy pomiar dla wybranego fragmentu przestrzeni orientacji preparatu względem wiązki padającej uzyskamy informacje o ich rozkładzie a to odpowiadać będzie rozkładowi gęstości poszczególnych orientacji kryształitów w tym zakresie przestrzeni.

Oceny czy materiał jest steksturowany można dokonać rentgenowskimi metodami fotograficznymi bez angażowania skomplikowanej aparatury. Na zdjęciu rentgenowskim materiału polikrystalicznego wykonanym w płaskiej kamerze techniką promieni zwrotnych obserwujemy (w przypadku dostatecznie drobnej struktury ziarn lub w materiale odkształconym) koncentryczne pierścienie debaja pochodzące od określonych płaszczyzn krystalograficznych, dla których są spełnione warunki dyfrakcji. Jeżeli materiał nie jest steksturowany pierścienie debaja na całym obwodzie mają jednakową intensywność, (czyli stopień zaczernienia kliszy fotograficznej jest jednakowy na całym pierścieniu). Gdy materiał jest steksturowany zaczernienie pierścieni zmienia się na obwodzie – rysunek 9. Taki charakter pierścieni wskazuje na wstępowanie tekstury w materiale. Z położenia zaczernień na obwodzie pierścienia można również określić typ tej tekstury, jednak wymaga to złożonej analizy geometrycznej.



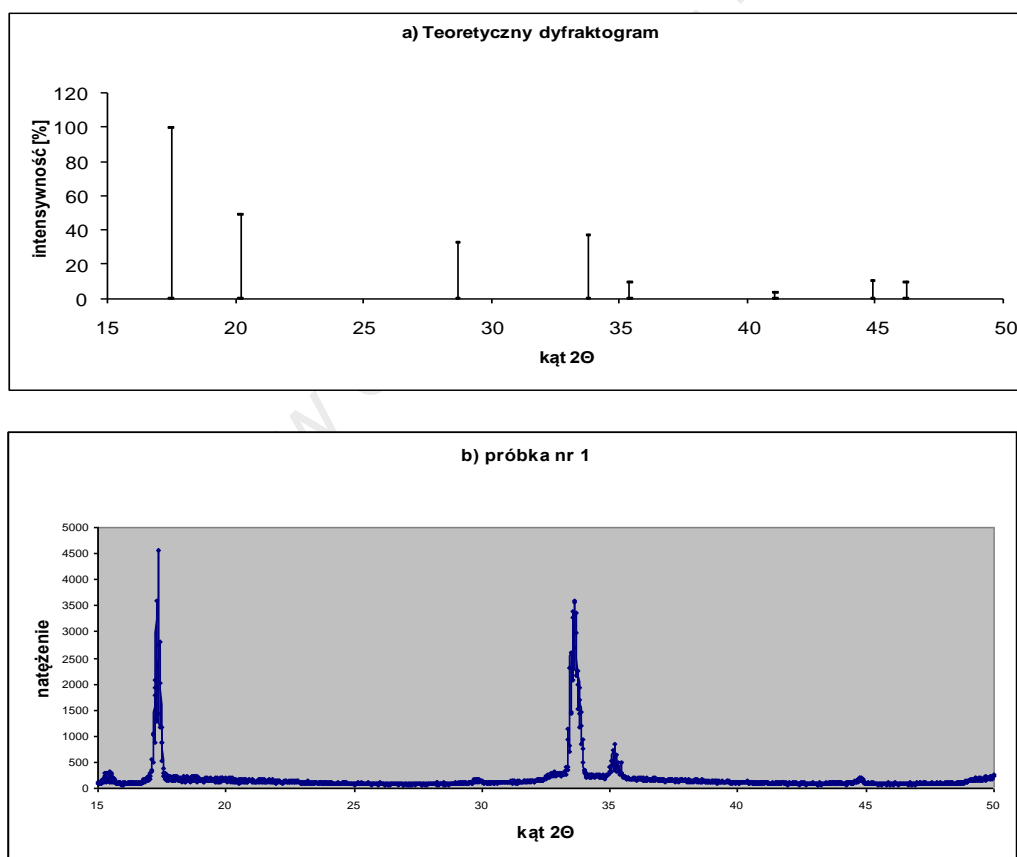
Rys. 9. Zdjęcie rentgenowskie wykonane w płaskiej kamerze metodą promieni przechodzących, przedstawiające steksturowanie pręta z aluminium.

5.2. Ocena stopnia steksturowania materiału na podstawie zapisu dyfraktometrycznego – indeksy teksturowe.

Zapis dyfraktometryczny w geometrii Brag-Brentano prowadzi do uzyskania dyfraktogramu, w którym położenia i intensywności poszczególnych linii dyfrakcyjnych są charakterystyczne dla materiału, dla którego ten zapis został wykonany. W oparciu o te informacje można dokonać jakościowej identyfikacji

badanej fazy poprzez porównanie eksperymentalnego dyfraktogramu (rysunek 10b) z bazą wzorców (spośród których najbardziej znana i powszechnie stosowana jest baza ICDD) lub z teoretycznym dyfraktogramem obliczonym przy założeniu, że materiał nie wykazuje tekstury (rysunek 10a).

Położenia linii dyfrakcyjnych zależą od odległości pomiędzy płaszczyznami krystalograficznymi badanej fazy. Intensywności tych linii zależą od wielu czynników geometrycznych. Dla konkretnej fazy przy zastosowaniu określonego rodzaju promieniowania rentgenowskiego stosunki intensywności poszczególnych linii dyfrakcyjnych można obliczyć. W bazie wzorców są one również podane. Tak obliczane intensywności względne są liczone przy założeniu, że preparat (badana faza) jest w stanie proszkowym, odprężona, czyli wolna od naprężeń oraz że preparat proszkowy nie wykazuje uprzywilejowanych orientacji a względne intensywności poszczególnych linii dyfrakcyjnych zależą od krotności odpowiadających im płaszczyzn krystalograficznych. Porównując zapis dyfrakcyjny realnego preparatu z wzorcowym często możemy zauważyć różnice we względnych intensywnościach poszczególnych linii dyfrakcyjnych. Taka różnica jest poważną przesłanką do stwierdzenia, że marniał (preparat) jest steksturowany. W materiale staksturowanym czynnikiem wpływającym na względną intensywność linii dyfrakcyjnych jest nie tylko krotność płaszczyzn, ale również zróżnicowane prawdopodobieństwo ułożenia się poszczególnych płaszczyzn w pozycji odbijającej padające promieniowanie. To prawdopodobieństwo zależy od tekstury.



Rys. 10. Teoretyczny dyfraktogram dla niesteksturowanego aluminium (a) i dyfraktogram eksperymentalny (zmierzony) dla pręta z aluminium posiadającego wyraźną teksturę (b).

Pomiar figury biegunowej i tym samym tekstury materiału jest złożoną procedurą badawczą wymagającą skomplikowanej aparatury oraz odpowiedniego oprogramowania do analizy wyników pomiaru. Często zależy nam tylko na tym, aby określić czy materiał jest stekstutowany i ewentualnie ograniczyć się tylko do oznaczenia stopnia stekstutowania materiału. Taka informacja bądź jest już wystarczająca bądź też jest dopiero podstawą do decyzji o pomiarze tekstury (figur biegunowych).

Zapis dyfraktometryczny metodą Bragg-Brentano pozwala jednoznacznie określić czy materiał jest stekstutowany poprzez analizę wartości współczynników będących stosunkami intensywności np. par linii dyfrakcyjnych I_{111}/I_{200} , I_{110}/I_{200} . Wartości tych współczynników dla materiałów niestekstutowanych (bez tekstury) można obliczyć z danych tablicowych zawartych w międzynarodowych standardach dyfrakcyjnych (kartach ICDD). Wzorcowe zapisy dyfrakcyjne zawarte w tej bazie danych są zapisami dla materiałów jednofazowych bez tekstury. Zatem gdy stosunek intensywności dwóch linii dyfrakcyjnych $I_{h_1k_1l_1}/I_{h_2k_2l_2}$ dla zapisu eksperymentalnego różni się od tego stosunku dla wzorca oznacza to, że materiał jest stekstutowany. Im większa jest ta różnica tym bardziej materiał jest stekstutowany.

W praktyce stosuje się różne wskaźniki stekstutowania obliczane na podstawie zapisów dyfrakcyjnych metodą Bragg-Brentano. Mogą to być jak wspomniano wcześniej stosunki intensywności dwóch wybranych linii dyfrakcyjnych, ale używa się też bardziej skomplikowanych współczynników. Indeksy złożone opierają się na bardziej rozbudowanych formułach (wzorach) zawsze jednak zasada jest ta sama, że indeks dla realnego materiału porównujemy z indeksem obliczonym dla niestekstutowanego wzorca. Różnica pomiędzy wartościami indeksów wskazuje na stopień stekstutowania.

Przykładem takiego indeksu teksturowego jest wskaźnik orientacji określony wzorem:

$$M_{hkl} = \{I_{(hkl)} / (I_{(110)} + I_{(200)} + \dots)\} / \{IF_{(hkl)} / (IF_{(110)} + IF_{(200)} + \dots)\}$$

gdzie:

$I_{(hkl)}$ - zmierzona intensywność linii dyfrakcyjnej hkl,

$IF_{(hkl)}$ - intensywność linii dyfrakcyjnej hkl odczytana z wzorca ICDD

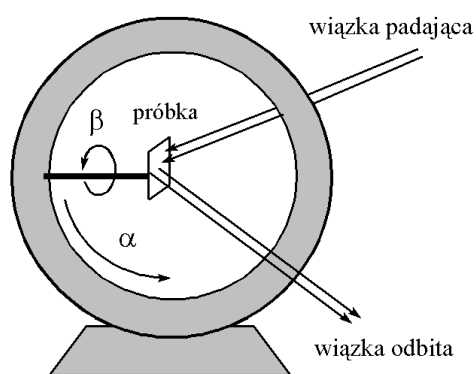
Wartość równa 1 tak zdefiniowanego wskaźnika oznacza brak tekstury w materiale. Wartości mniejsze od jedności lub wyższe od jedności wskazują na stekstutowanie materiału.

Tak zdefiniowane wskaźniki mogą być wykorzystane w wielu sytuacjach, gdy istotna jest ocena czy materiał jest stekstutowany lub gdy wystarczające jest porównanie stopnia stekstutowania materiałów albo bieżąca ocena czy stopień stekstutowania jest zgodny z projektowanym, zamierzonym, planowanym lub wymaganym). Dlatego też wskaźniki te doskonale nadają się do szybkich pomiarów realizowanych np. bezpośrednio na linii produkcyjnej np. wyrobów walcowanych lub w laboratoriach, które nie dysponują dyfraktometrem z przystawką teksturową.

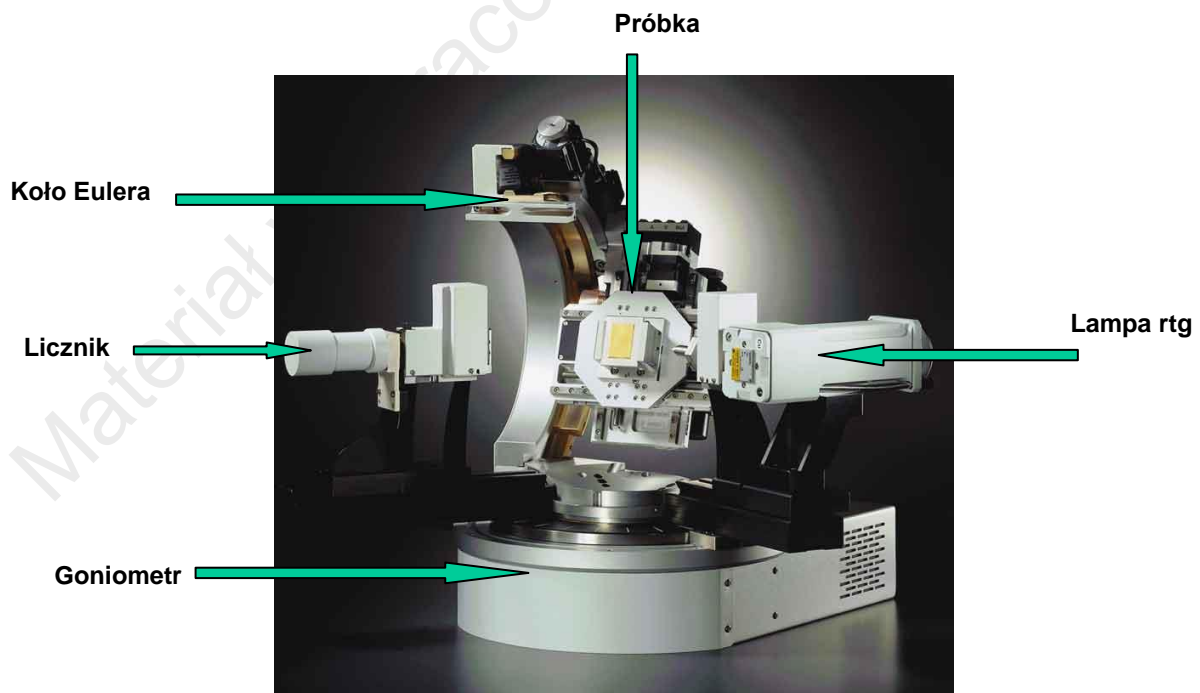
5.3. Dyfrakcyjny pomiar figury biegunowej

Aby uzyskać eksperymentalny obraz figury biegunowej musimy dla każdej orientacji odpowiadającej poszczególnym położeniom na siatce biegunowej, wykonać pomiar intensywności odbicia promieniowania (rentgenowskiego lub neutronowego) od płaszczyzn krystalograficznych określonego typu i zaznaczyć je na rzucie.

Pomiar wykonujemy używając monochromatycznego (filtrowanego) promieniowania wykorzystując dyfraktometr wyposażony w goniometr oraz przystawkę tekturową zwaną kołem Eulera – rys 11 i 12. Taka konfiguracja aparatury pozwala na pomiar eksperymentalnych figur biegunowych.



Rys.11. Schemat budowy koła Eulera wraz z osiami obrotu odpowiadającymi kątom α i β .

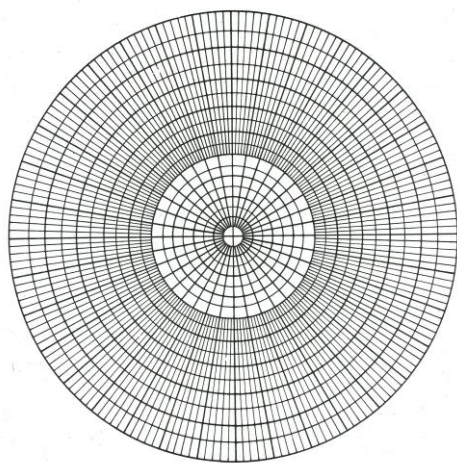


Rys. 12. Goniometr wraz z kołem Eulera – stanowisko do pomiaru tekstur na dyfraktometrze Bruker Axs D8 Advance..

Figura biegunowa jest to rozkład gęstości biegunów płaszczyzn określonego typu na powierzchni rzutu stereograficznego na płaszczyznę równoległą do powierzchni próbki. Strategia pomiaru figury biegunowej jest następująca:

- Goniometr ustawiamy w położeniu $\Theta/2\Theta$ odpowiadającym warunkom dyfrakcji dla wybranej płaszczyzny krystalograficznej. Oznacza to, że dla tej płaszczyzny krystalograficznej spełnione ma być prawo Bragga ($n\lambda=2d_{hkl}\sin \Theta$).
- **Wykorzystując koło Eulera** dokonujemy pomiarów intensywności promieniowania ugiętego na wybranej wcześniej płaszczyźnie krystalograficznej **zmieniając kąt α nachylenie próbki względem wiązki padającej od 0 do 90°**.
- **Dla każdego kąta α dokonujemy pomiarów zmieniając kąt β od 0 do 360° (obrót wokół osi prostopadłej do próbki).**

W praktyce pomiary wykonuje się dla kolejnych kątów α od 0 do 70° co 5° i dla każdego kąta α zmieniając kąt β od 0 do 360° co 5°. Taka strategia pomiarów prowadzi do pomiaru intensywności promieniowania na obwodzie 15 centrycznych kół na każdym po 71 punktów pomiarowych co razem daje 1065 punktów pomiarowych. Taka sekwencja pomiarów pozwala na dokonanie pomiaru intensywności odbicia odpowiadających wszystkim punktom na rzucie stereograficznym leżącym w węzłach siatki biegunowej (rys. 13) o odstępach między liniami równym 5°. Przypisując każdemu punktowi zmierzoną intensywność i zaznaczając ją na rzucie w odpowiednim miejscu uzyskujemy tak zwaną **figurę biegunową**. Im więcej będzie płaszczyzn w danej orientacji tym wyższą wartość zaznaczymy na rzucie. Zatem wykonamy mapę rozkładu gęstości poszczególnych orientacji na powierzchni rzutu.



Rys. 13. Siatka biegunowa przedstawiająca zasadę nanoszenia wyników pomiarów tekstur na rzut stereograficzny

Tak opisana procedura jest pomiarem krokowym. Inną możliwością jest pomiar ciągły przy każdym z kątów α nachylenia próbki oraz również ciągła zmiana kąta β przy skorelowanej czasowo również ciągłej zmianie kąta α . W tym przypadku powierzchnia figury biegunowej jest przeskanowana pomiarem, którego miejsca leżą na spirali, której środek leży w środku figury biegunowej.

Jak wspomniano we wcześniejszych rozdziałach określenie czy materiał jest steksturowany i oznaczenie stopnia steksturowania materiału może być dokonane metodami znacznie prostszymi niż pomiar tekstury na dyfraktometrze wyposażonym w koło Eulera. Można tego dokonać metodą fotograficzną wykonując zdjęcie w płaskiej kamerze lub dyfraktometryczną w oparciu o zapis dyfrakcyjny metodą Bragg-Brentano.

5.4. Pomiary tekstur oparte o wyznaczanie orientacji pojedynczych krystalitów.

Obecność tekstury może być stwierdzona pomiarami efektów dyfrakcyjnych pochodzących od określonej objętości materiału, w której jest obecne wiele krystalitów, ale może być też stwierdzona poprzez pomiary indywidualnych orientacji dostatecznej ilości pojedynczych krystalitów.

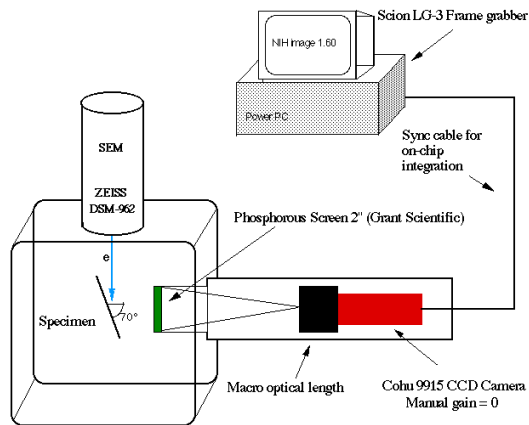
Ponieważ współcześnie istnieją metody wyznaczania lokalnych orientacji krystalograficznych bardzo małych obszarów ($0.5\mu\text{m}$) można wykonać serię pomiarów lokalnych orientacji na określonej powierzchni próbki i tą drogą uzyskać obraz (mapę) orientacji występujących na tej powierzchni.

Wykonanie każdego z tych typów pomiarów wymaga innej metodyki badawczej. Używanie do pomiaru tekstury promieniowania o dużej przenikliwości (neutronowe lub rentgenowskie o dużej intensywności) pozwala na pomiary tekstur uśrednionych z dużej objętości. Promieniowanie uzyskiwane w lamach rentgenowskich pozwala na pomiary tekstur uśrednionych z dużej powierzchni dzięki zastosowaniu szerokiej wiązki promieniowania lub skanowania (ruchu) próbki w czasie pomiaru. Pomiary lokalne orientacji wymagają zastosowania wiązek promieniowania o małych przekrojach lub techniki wyznaczania pojedynczych orientacji w mikroskopie skaningowym lub elektronowym. Lokalne pomiary z małych objętości są możliwe przy zastosowaniu przenikliwego promieniowania neutronowego lub rentgenowskiego oraz dzięki specjalnym technikom pomiaru tekstur 3D.

Przykładem techniki lokalnych pomiarów tekstury jest ich pomiar w mikroskopie elektronowym (skaningowym lub transmisyjnym) z wykorzystaniem techniki EBSD (Electron Back Scattering Diffraction) opartej o akwizycję map orientacji zwanej Orientation Imaging Microscopy (OIM). Polega ona na wyznaczaniu orientacji krystalograficznych kolejnych punktów na powierzchni badanej próbki na podstawie obrazów dyfrakcyjnych elektronów wstecznie rozproszonych (Backscatter Kikuchi Pattern), a następnie przypisanie im odpowiedniego koloru, co prowadzi do uzyskania obrazu mikroskopowego próbki widzianego poprzez kontrast „orientacji” krystalograficznej – czyli prowadzi do uzyskania mapy orientacji.

Pomiar techniką EBSD można zrealizować wykorzystując zestaw aparaturowy przedstawiony na schemacie – rysunek 14. Do uzyskania dyfrakcji konieczna jest zogniskowana wiązka elektronowa o stosunkowo dużej energii (np. 20keV). Pada ona na próbkę nachyloną pod odpowiednim kątem ($20\text{-}30$ stopni) do kierunku biegu tej wiązki. Efekty dyfrakcyjne (obrazy Kikuchiego) są uzyskiwane na ekranie fluorescencyjnym i rejestrowane w kamerze CCD. Zdygitalizowane obrazy są rejestrowane w komputerze, w którym za pomocą odpowiedniego oprogramowania

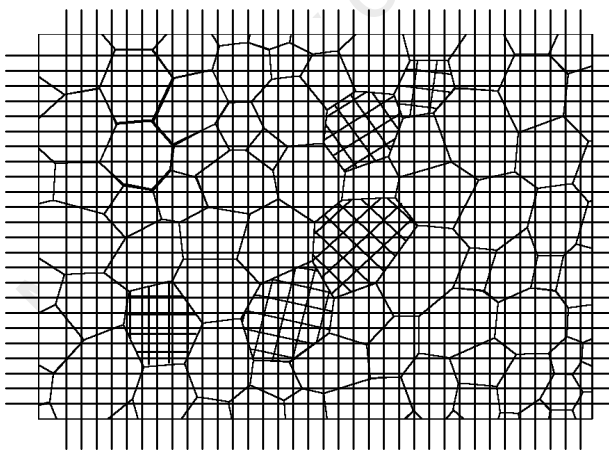
wyznaczane są dla każdego z nich odpowiadające orientacje krystalograficzne miejsca, z którego pochodzą. Każdemu obrazowi dyfrakcyjnemu jest przypisane położenie na próbce, z którego on pochodzi. Odpowiednie sterowniki kontrolują warunki pracy mikroskopu, położenie próbki (wiązki) i miejsce, z którego pochodzą obrazy dyfrakcyjne.



Rys. 14. Zestaw aparaturowy do pomiaru lokalnej tekstury metodą OIM w skaningowym mikroskopie elektronowym.

Pomiar pojedynczych orientacji krystalograficznych w węzłach siatki pomiarowej na powierzchni próbki (rysunek 15) w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) może być realizowany na dwa sposoby:

- poprzez przesuw wiązki elektronowej po powierzchni nieruchomej próbki (beam mode)
- poprzez przesuw stolika goniometrycznego przy nieruchomej wiązce elektronowej (stage mode)

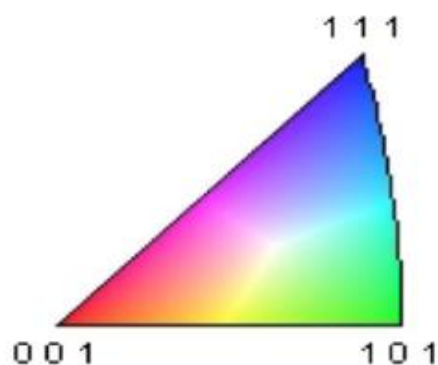


Rys. 14. Schemat pomiaru dwuwymiarowej mapy orientacji na powierzchni próbki.

Po przeskanowaniu całej powierzchni próbki uzyskuje się dla każdego węzła siatki pomiarowej obrazy dyfrakcyjne a po ich rozwiązaniu informacje o orientacjach krystalograficznych tych miejsc. Przypisując każdej orientacji np. określony kolor

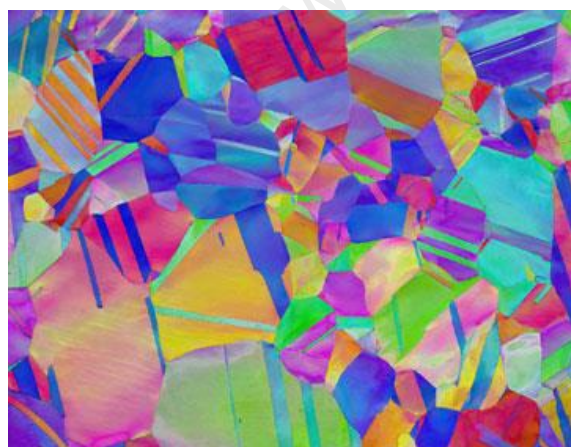
powstaje obraz próbki widziany poprzez kontrast orientacji krystalograficznej, czyli dwuwymiarowa mapa orientacji.

Zasada przypisywania kolorów poszczególnym orientacjom jest oparta o rzut stereograficzny. Rysunek 16 pokazuje, jakie kolory są przypisane poszczególnym orientacjom z trójkąta podstawowego na rzucie stereograficznym.

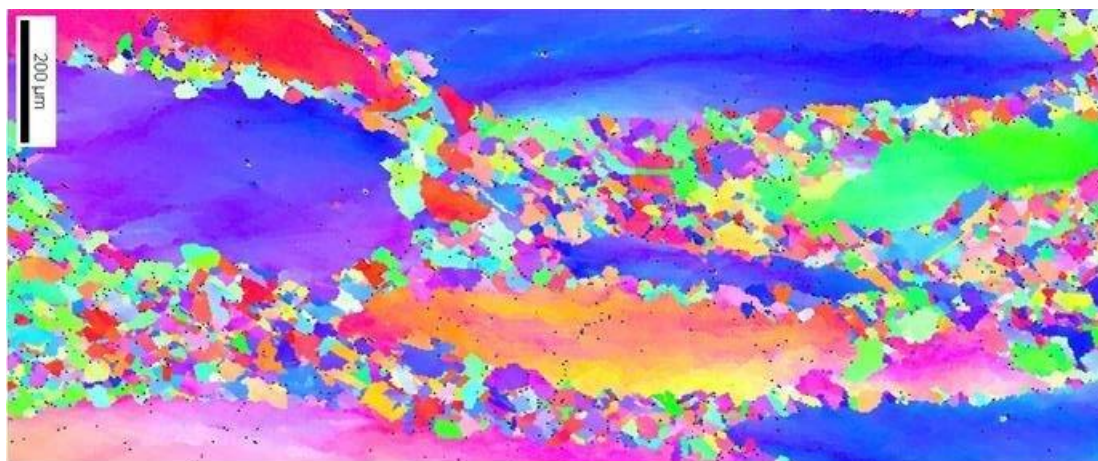


Rys. 16. Zasada przypisywania kolorów orientacjom krystalograficznym.

Uzyskane techniką EBSD obrazy (mapy orientacji) są obrazami przedstawiającymi lokalną teksturę materiału gdyż pokazują, jakie orientacje występują w poszczególnych miejscach na powierzchni próbki. Zatem mapy orientacji przedstawiają teksturę nie w ujęciu statystycznym, ale ewidentnie lokalnym (miejscowym) i są doskonałą metodą badania niejednorodności tekstur np. w obszarach odkształconych albo we wczesnych etapach rekrytalizacji, gdy w odkształconej osnowie powstają nowe ziarna (zarodki) o innych orientacjach niż ma otaczająca osnowa. Przykłady dwuwymiarowych map orientacji uzyskanych metodą EBSD przedstawiono na rysunkach 17 i 18.



Rys. 17. Dwuwymiarowa mapa orientacji zrekrytalizowanego miedzi uzyskana techniką EBSD.



Rys.17. Dwuwymiarowa mapa orientacji częściowo zrekrytalizowanego stopu Inconel 945

Materiał w opracowaniu - Adam Bunsch

6. Wpływ tekstury na własności materiałów

6.1. Wpływ tekstury na własności materiałów i zastosowanie przemysłowe tekstur

Materiały stekstrowane wykazują anizotropię własności. Ta anizotropia może być cechą pożądaną w pewnych wyrobach szczególnie wtedy, gdy zależy nam na ich kierunkowych własnościach. Z tego punktu widzenia tekstura materiału może być wykorzystywana do konkretnych zastosowań. Wymaga to oczywiście umiejętności jej świadomego kształtowania w procesach technologicznych produkcji tych materiałów.

Gdy pożądanym jest wyrób anizotropowy (o jednakowych własnościach) w każdym kierunku zasadniczo najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie materiałów bez tekstury (niestekstrowanych) które są izotropowe. Często uzyskanie takiego wyrobu nie jest łatwe i wtedy można się posłużyć wyrobem pseudoizotropowym, czyli takim, który posiada teksturę składającą się z kilku składowych, których wpływ na własności wzajemnie się kompensuje.

W związku z tym, że zastosowanie wyrobu stekstrowanego może być w konkretnych przypadkach rozwiązań konstrukcyjnych uzasadnione w kolejnych rozdziałach zostanie opisany wpływ tekstury na własności materiałów.

6.2. Zależność własności mechanicznych od tekstury

Własności mechaniczne, które zależą od tekstury to: anizotropia normalna i anizotropia płaska. Wstępowanie tych form anizotropii powoduje powstawanie tak zwanych uch w procesie głębokiego tłoczenia. Od tekstury zależy również sprężystość, wytrzymałość na pełzanie a także odporność na zmęczenie.

6.3. Zależność własności magnetycznych i elektrycznych od tekstury

Własności magnetyczne metali ferromagnetycznych są silnie anizotropowe i dlatego tekstura ma wpływ na własności wyrobów stosowanych w elektrotechnice. Przykładem mogą być blachy elektrotechniczne stosowanych w budowie transformatorów. Blach transformatorowe powinny posiadać charakterystyczną teksturę zwana teksturą Gossa $\{110\}<001>$ zapewniającą najmniejsze straty ciepłe w czasie pracy transformatora. Wynika to z tego, że orientacja krystalograficzna ziarn w blachach wpływa istotnie na wartość ich stratności oraz przenikalności magnetycznej.

Również ze względu na zależności własności magnetycznych od orientacji ziarn większość stosowanych obecnie magnesów trwałych ze stopów żelazo-aluminium-nikiel-kobalt (alnico) produkowana jest w warunkach kontrolowanej krystalizacji w polu magnetycznym w celu uzyskania pożądanej tekstury. Powolne studzenie tych

stopów w polu magnetycznym polepsza moc właściwą magnesów w kierunku działania tego pola. Taka procedura nazywa się orientowaniem stopu alnico.

Od orientacji krystalograficznej zależy praca wyjścia elektronu a zatem od tekstury zależy przebieg proces emisji termoelektronowa.

6.4. Wpływ tekstury na inne własności materiałów

Tekstura ma wpływ na takie własności materiałów i procesy z nimi związane jak korozja i trawienie. Poprzez kształtowanie tekstury uzyskuje się efekt umocnienia teksturowego metali o sieci heksagonalnej. Tekstura ujawnia swoją obecność i wpływa na własności eutektyk ukierunkowanych. Teksturowanie prętów uranowych ma również wpływ na ich własności.

Materiał w opracowaniu - Adam Bunsch

7. Znaczenie (definicje) pojęć używanych w opracowaniu.

Zagadnienia dotyczące tekstur występujących w materiałach polikrystalicznych są szeroko dyskutowane w literaturze z zakresu inżynierii materiałowej. Ze względu na złożoność tego zagadnienia oraz powiązania pomiędzy kilkoma dziedzinami wiedzy, jakie występują przy omawianiu zagadnień dotyczących tekstur i metod ich pomiaru konieczne jest przyjęcie umowy, co do rozumienia szeregu pojęć używanych w przypadku gdy mówimy o teksturach w inżynierii materiałowej.

orientacja krystalograficzna - pojęcie związane z pojedynczym kryształem (kryształem). Opisuje jak ten kryształ jest zorientowany (ułożony) względem zewnętrznego układu odniesienia związanego z wyrobem (przedmiotem) w którym ten kryształ się znajduje. Orientacja krystalograficzna jest opisywana poprzez określenia, jakie są wskaźniki płaszczyzny krystalograficznej, która jest równoległa np. do powierzchni wyrobu i jakie są wskaźniki kierunku krystalograficznego równoległego do określonego kierunku w wyrobie (osi, krawędzi itp.).

tekstura materiału – własność polegająca na występowaniu jakiejś formy uporządkowania kryształitów w materiale polikrystalicznym. Uporządkowanie to polega na przyjmowaniu przez kryształy określonych (uprzywilejowanych) orientacji względem zewnętrznego układu odniesienia częściej niż by to wynikało z rozkładu statystycznego..

orientacja idealna – zespół wskaźników krystalograficznych kierunków i/lub płaszczyzn opisujący kierunki i/lub płaszczyzny równoległe do zewnętrznego układu odniesienia związanego z wyrobem. Orientacja idealna jest pojęciem geometrycznym. Opisuje jakie kierunki i płaszczyzny są równoległe do osi (płaszczyzn) zewnętrznego układu odniesienia.

składowa tekstury – jedna z kilku orientacji krystalograficznych, którą przyjmują kryształy w materiale teksturowanym. Dokładnie w tych orientacjach lub wokół nich układają się grupy kryształitów materiału polikrystalicznego. Każda składowa tekstury może być opisana pojedynczą orientacją krystalograficzną. Z tego względu zamiennie w analizie tekstur często używa się określenia „orientacja krystalograficzna” mając na myśli składową tekstury.

8. Literatura

Zbiór pozycji literaturowych obejmujących omawiane zagadnienia i przydatnych przy studiowaniu tematyki tekstur materiałów polikrystalicznych

- [1] P. Coulomb: „Tekstury w metalach o sieci regularnej”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977
- [2] Z. Bojarski, E. Łągiewka: „Rentgenowska analiza strukturalna”, PWN, Warszawa 1988
- [3] Z. Bojarski M. Gigla: „Krystalografia”, Wydawnictwo PWN Warszawa 2007
- [4] B.D. Cullity S.R. Stock “Elements of x-ray diffraction III edition” Prentice Hall, Inc. 2001
- [5] A. Kelly, G. W. Groves: „Krystalografia i defekty kryształów”, PWN Warszawa 1980
- [6] J. Przedmojski: “Rentgenowskie metody badawcze w inżynierii materiałowej”, WNT, Warszawa 1990.
- [7] K. Przybyłowicz: „Metaloznawstwo”, WNT Warszawa 1992, 2003
- [8] M. Blicharski: „Wstęp do inżynierii materiałowej”, WNT Warszawa 2001
- [9] K. Przybyłowicz, S. Jasieński: „Nowoczesne metody badawcze w metalurgii i materiałoznawstwie”, Skrypt uczelniany nr 644, Kraków 1978
- [10] L. A. Dobrzański: „Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo”, WNT Warszawa 2002
- [11] L. G. Schultz: „Direct Method of Determining Preferred Orientation of a Flat Reflection Sample Using a Geiger Counter of X-Ray Spectrometer” J.Appl. Physics, 1949
- [12] J. Karp: „Tekstury walcowania bliźniaków w aluminium”, Zeszyt Naukowy AGH 27, nr 225 Kraków 1968
- [13] Textures of Materials – 5th International Conference on Textures of Materials 1978 s.93
- [14] J.T. Bonarski: „Rentgenowska tomografia teksturowa”, PAN Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Kraków 2001
- [15] F. Dobrzański: Stereologiczna analiza tekstury w badaniach strukturalnych Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2008.

-
- [16] M. Faryna: „Dyfrakcja elektronów wstecznie rozproszonych w skaningowym mikroskopie elektronowym”, Wydawnictwa AGH, Kraków 2012.
- [17] W. Ratuszek: „Tekstury odkształcenia i rekrytalizacji w stopach na osnowie miedzi”, Wydawnictwo AGH Kraków 1995 Rozprawy i monografie, AGH
- [18] A. Bunsch: „Recrystallization kinetics of cold rolled copper” Risø National Laboratory, Roskilde Denmark september 1991 – Riso-I-544
- [19] A. Bunsch: “Grain subdivision and its relation to bulk texture development in cold rolled aluminium studied by orientation imaging microscopy (OIM)”, University of Mining and Metallurgy – Kraków (Poland), Risø National Laboratory, Roskilde Denmark November 1995 – Riso-I-955(EN)
- [20] Ł.Cieniek: Materiał do ćwiczenia „Anizotropia i tekstury odkształcenia”
- [21] Źródło: [p://pl.wikipedia.org/wiki/Tekstura](http://pl.wikipedia.org/wiki/Tekstura)

Materiał w opracowaniu - Adam Bunsch