

2.6. Odształcenie plastyczne i rekrytalizacja metali

2.6.1. Skutki odkształcenia plastycznego

Odształcenie plastyczne metalu, które powstaje podczas deformacji na zimno, powoduje znaczną zmianę jego własności fizycznych i mechanicznych. Zmiany te objawiają się przede wszystkim wzrostem twardości i wytrzymałości przy jednoczesnym spadku własności plastycznych (rys. 2.30), oraz obniżeniem przewodności elektrycznej i gęstości.

Wielkość odkształcenia plastycznego określa ilościowo tzw. stopień odkształcenia plastycznego q , który np. dla walcowania można wyrazić jako procentową zmianę przekroju materiału.

$$q = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100\%$$

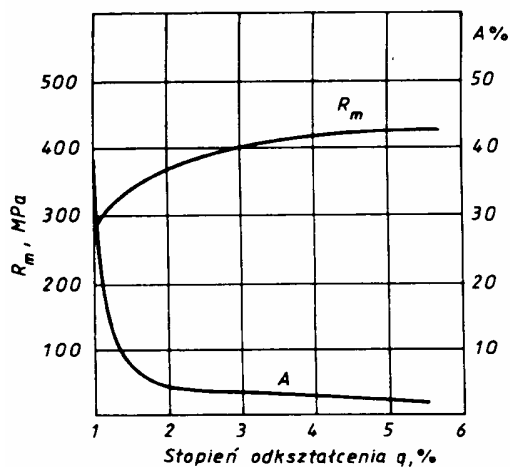
gdzie : S_0 – przekrój początkowy

S_1 – przekrój końcowy

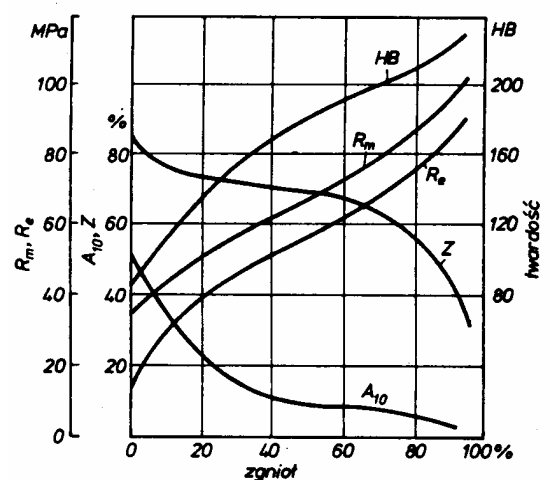
Wzrost twardości i wytrzymałości związany z odkształceniem plastycznym ma duże znaczenie i w pewnych przypadkach jest wykorzystywany w celu umocnienia materiału.

Często jednak zachodzi konieczność przywrócenia materiałom ich własności, jakie miały przed odkształceniem plastycznym np. w celu obniżenia twardości lub uzyskania odpowiednich własności fizycznych, takich jak np. dobra przewodność elektryczna (jest to bardzo istotne np. w procesie ciągnięcia drutów miedzianych przeznaczonych na przewody elektryczne). Obniżenie twardości i zwiększenie plastyczności odkształconego metalu oraz przywrócenie innych własności "fizycznych" można uzyskać przez wyżarzanie, które polega na wytrzymaniu odkształconego materiału przez pewien okres czasu w podwyższonej temperaturze, zwykle powyżej jednej trzeciej bezwzględnej temperatury topnienia

a)



b)



Rys. 2.30. Zmiana własności mechanicznych: a) – miedzi, b) – mosiądzu (35% Zn) w zależności od stopnia odkształcenia, plastycznego

Odształcenie plastyczne na zimno powoduje wzrost gęstości dyslokacji. Dla większości metali gęstość ta wzrasta od wartości ok. 10^6 - 10^8 dyslokacji na cm^2 typowej dla stanu wyżarzonego, do 10^{11} ÷ 10^{12} dyslokacji na cm^2 , w przypadku dużego odkształcenia plastycznego.

Ponieważ odkształcenie plastyczne jest związane z ruchem dyslokacji, występowanie zjawiska utwardzenia oznacza, że w odkształconym metalu następuje wzrost oporu dla ruchu dyslokacji. Opór ten rośnie wraz ze wzrostem gęstości dyslokacji, które blokują się nawzajem. Część dyslokacji zostaje utwierdzona w kryształach i wywołuje wewnętrzne naprężenia, które przeciwdziałają przemieszczaniu się innych dyslokacji. W konsekwencji powoduje to obniżenie plastyczności i umocnienie materiału.

Wskutek odkształcenia plastycznego i związanych z nim poślizgów, zachodzących w poszczególnych ziarnach, w metalu pojawia się tzw. **tekstura**, czyli określona orientacja

krystalograficzna ziaren związana z kierunkiem odkształcenia. Stopień stekstrowania metalu wzrasta ze stopniem odkształcenia plastycznego.

Zmiany w strukturze metalu, jakie powstają w wyniku odkształcenia plastycznego można stwierdzić najwyraźniej za pomocą takich metod, jak np. mikroskopia optyczna, mikroskopia elektronowa i dyfrakcja promieni X.

Za pomocą badań metalograficznych można stwierdzić odkształcenie ziarn i pojawienie się pasm poślizgu (rys. 2.31). Natomiast transmisyjna mikroskopia elektronowa umożliwia obserwację zmian rozkładu i gęstości dyslokacji.

Wzrost gęstości dyslokacji zwiększa energię wewnętrzną sieci krystalicznej, gdyż wzrasta stopień zaburzenia regularnego rozmieszczenia atomów. Stan odkształcenia plastycznego jest w związku z tym termodynamicznie nietrwały w stosunku do stanu wyzarzonego. W konsekwencji odkształcony plastycznie metal będzie wykazywał tendencję do powrotu do stanu o mniejszej energii swobodnej, tj, do stanu bardziej uporządkowanego. Powrót ten jednak na ogół nie może zachodzić w sposób samorzutny, lecz jedynie w temperaturach podwyższonych, w których mogą mieć miejsce procesy aktywowane cieplnie, takie jak dyfuzja, poślizg poprzeczny i wspinanie się dyslokacji. Dlatego, aby utwardzony przez odkształcenie plastyczne metal zmiękczyć i przywrócić mu inne własności, jakie przedtem wykazywał, konieczne jest jego podgrzanie do odpowiedniej temperatury



Rys. 2.31. Pasma poślizgu w austenitycznej stali chromowo-niklowej (18% Cr, 8% Ni) odkształconej plastycznie przez rozciąganie. Próbką nietrawiona. Powiększenie 800x

W czasie usuwania skutków odkształcenia plastycznego przez wyżarzanie można wyróżnić trzy procesy, które kolejno zachodzą w odkształconym plastycznie metalu:

- zdrowienie,
- rekrytalizacja
- rozrost ziarna

3.6.2. Zdrowienie

W czasie wygrzewania odkształconego plastycznie metalu można zaobserwować, że w pewnej temperaturze następuje usunięcie zniekształceń sieci krystalicznej. Objawia się to tym, że linie dyfrakcyjne na rentgenogramach (otrzymanych metodą proszkową) rozmyte wskutek deformacji sieci, stają się znowu wyraźne i ostre. Zjawisko to nosi nazwę zdrowienia.

Zanikowi zniekształceń sieci krystalicznej towarzyszy częściowe usunięcie skutków odkształcenia plastycznego. Następuje pewne podwyższenie przewodności elektrycznej oraz częściowy spadek umocnienia.

Minimalna temperatura, w której można stwierdzić te zjawiska, określana jest jako temperatura zdrowienia.

Proces zdrowienia związany jest ze zmianą rozmieszczenia i gęstości defektów sieci krystalicznej, głównie wakansów i dyslokacji. W odkształconym na zimno metalu istnieje gęsta sieć dyslokacji, która powstała w wyniku poślizgów i wzajemnego oddziaływania dyslokacji. W czasie zdrowienia następuje przemieszczanie i zmiana uporządkowania dyslokacji, co powoduje zmniejszenie energii zmagazynowanej w odkształcanej sieci. Proces ten jest aktywowany cieplnie.

3.6.3. Rekrytalizacja

Jeśli odkształcony na zimno metal będzie poddawany dalszemu wygrzewaniu, to w pewnej określonej temperaturze, wyższej od temperatury zdrowienia, zaczną powstawać zarodki nowych nieodkształconych ziarn metalu. Nowe ziarna rozrastają się kosztem ziarn odkształconych i po pewnym czasie wszystkie stare ziarna zostają zastąpione przez nowe.

Zjawisko to nosi nazwę rekrytalizacji, zwane jest również rekrytalizacją pierwotną. Orientacja krystalograficzna nowych ziarn różni się znacznie od orientacji ziarn starych, kosztem których powstają ziarna nieodkształcone. Wynika stąd, że sieć krystaliczna nowych ziarn nie jest koherentna z siecią ziarn odkształconych (tzn. nie jest z nią związana i nie jest do niej dopasowana), a proces rekrytalizacji polega na przemieszczaniu się (migracji) wysokokątowych granic ziarn oddzielających nowe kryształy od odkształconych ziarn osnowy.

Temperatura rekrytalizacji. Najniższa temperatura, w jakiej zachodzi proces rekrytalizacji, nazywana jest temperaturą rekrytalizacji. Temperatura ta jest charakterystyczna dla danego metalu lub stopu i zależy głównie od dwóch czynników:

a) od uprzedniego stopnia odkształcenia plastycznego, tj. im wyższy był jego stopień, tym niższa będzie temperatura rekrytalizacji; b) od czystości metalu.

Porównując temperaturę rekrytalizacji z temperaturą topnienia dla różnych metali można stwierdzić, że zachodzi pomiędzy nimi prosta proporcjonalność. Dla metali technicznie czystych w przypadku dużych odkształceń plastycznych występuje zależność

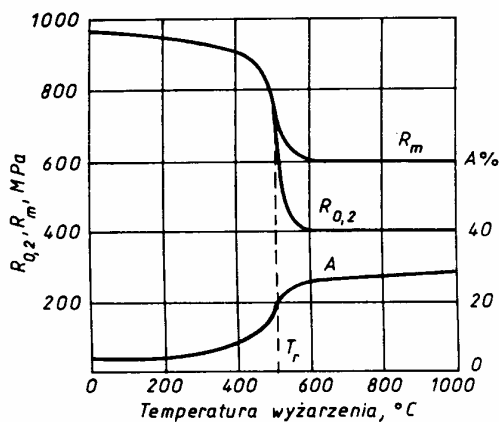
$$T_r = 0,3 \div 0,4 T_{top}$$

gdzie: T_r — temperatura rekrytalizacji,

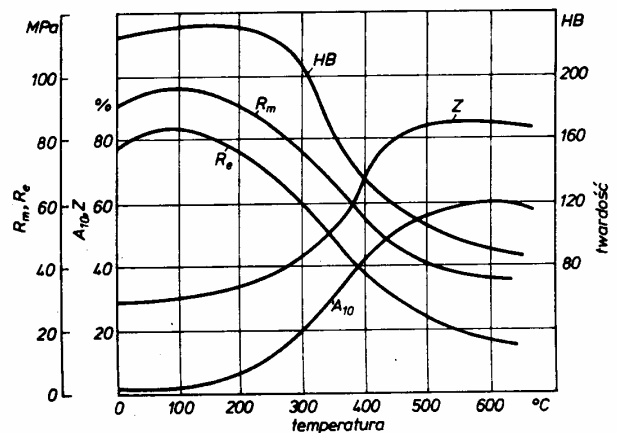
T_{top} — bezwzględna temperatura topnienia.

Temperatura rekrytalizacji dla stopów jest wyższa niż dla metali technicznie czystych i w niektórych przypadkach dochodzi do $0,8 T_{top}$. Natomiast dla metali o wysokiej czystości temperatura rekrytalizacji jest bardzo niska i wynosi $0,1 \div 0,2 T_{top}$. Wartości te są słuszne w przypadku dużych stopni odkształcenia plastycznego, natomiast dla małych odkształceń plastycznych mogą być znacznie wyższe. Procesowi rekrytalizacji towarzyszą znaczne zmiany własności mechanicznych odkształconego metalu. W wyniku wyżarzania rekrytalizującego twardość i wytrzymałość maleją, osiągając wartości właściwe dla materiału przed odkształceniem plastycznym. Jednocześnie rekrytalizacja przywraca w pełni własności plastyczne metalu. Na rysunku 2.32 przedstawiona jest zmiana wytrzymałości na rozciąganie (R_m , granicy plastyczności ($R_{0,2}$) i wydłużenia A odkształconego plastycznie żelaza, w zależności od temperatury wyżarzania. W pewnym wąskim zakresie temperatur widoczny jest charakterystyczny spadek wytrzymałości i wzrost plastyczności. Temperaturę T_r , odpowiadającą punktom przegięcia krzywych, przyjmuje się umownie jako temperaturę rekrytalizacji

a)



b)



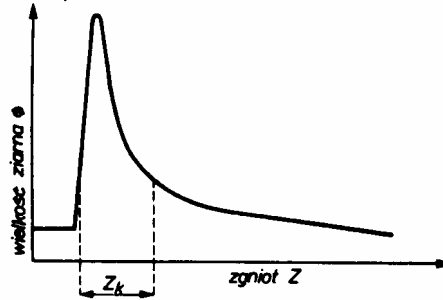
Rys. 2.32. Zmiana własności mechanicznych odkształconego plastycznie: a) żelaza; T_r - umowna temperatura rekrytalizacji, b) mosiądzu (35% Zn) w zależności od temperatury wyżarzania

Podobnie jak R_m , zmienia się również twardość odkształconego plastycznie metalu wyżarzonego w różnych temperaturach.

Wielkość ziarna po rekrytalizacji. Wielkość ziarna powstałego po rekrytalizacji zależy przede wszystkim od następujących czynników:

- uprzedniego stopnia odkształcenia plastycznego na zimno,
- temperatury wyżarzania,
- czasu wyżarzania.

Wraz ze wzrostem czasu wyżarzania w danej stałej temperaturze wzrasta wielkość ziarna. Dlatego aby określić wpływ odkształcenia plastycznego i temperatury wyżarzania na wielkość ziarna, przyjmuje się pewien stały czas wygrzewania. Stopień odkształcenia plastycznego, któremu metal został poddany przed wyżarzaniem-wpływa bardzo silnie na wielkość ziarna po rekrytalizacji (rys. 2.33).



Rys. 2.33. Wpływ stopnia odkształcenia plastycznego na wielkość ziarna po rekrytalizacji

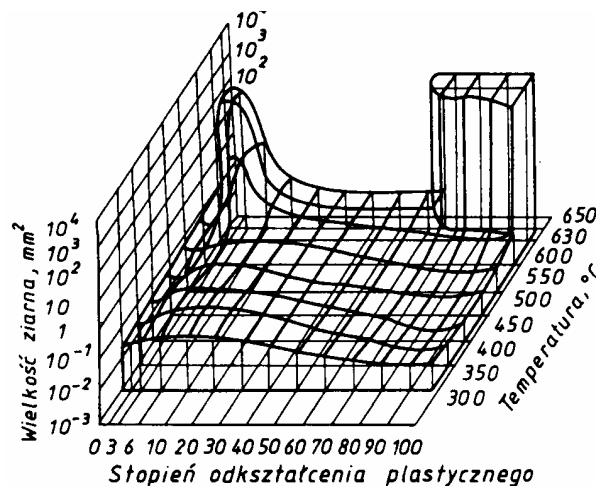
Dla każdego metalu istnieje w zakresie stosunkowo małych odkształceń plastycznych pewien charakterystyczny stopień tego odkształcenia, zwany **krytycznym odkształceniem plastycznym - q_{kr}** , który powoduje w czasie rekrytalizacji w wysokiej temperaturze wyjątkowo silny rozrost ziarna.

Krytyczne odkształcenie plastyczne dla większości metali waha się w granicach od ok. 1 do 10%.

W wielu przemysłowych procesach technologicznych polegających np. na walcowaniu na zimno i wyżarzaniu międzyoperacyjnym, występowanie krytycznego odkształcenia plastycznego jest zjawiskiem niepożądanym, gdyż daje materiał o strukturze gruboziarnistej o odpowiednich własnościach mechanicznych oraz skłonny do pęknięć.

Istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość ziarna po rekrytalizacji jest również temperatura wyżarzania. Im wyższa jest ta temperatura, tym większe ziarno otrzymuje się w wyniku rekrytalizacji, przy stałym czasie wyżarzania. Zależność wielkości ziarna metalu po rekrytalizacji jednocześnie od temperatury wyżarzania i od stopnia odkształcenia plastycznego

Dla aluminium wykres taki pokazano na rys. 2.33. Na wykresie tym w zakresie wysokich



Rys. 2.33. Przestrzenny wykres rekrytalizacji dla aluminium przedstawiający wielkość ziarna w funkcji odkształcenia plastycznego i temperatury wyżarzania

temperatur wyżarzania oprócz omówionego wyżej krytycznego odkształcenia plastycznego, występuje również drugi bardzo wyraźny obszar rozrostu ziaren w zakresie dużych odkształceń plastycznych.

Obszar ten pojawia się w przypadku niektórych metali i jest związany z rozrostem ziarna (na skutek tzw. rekrytalizacji wtórnej) oraz z teksturą deformacji metalu tj. ukierunkowaniem struktury, które silnie się zaznacza przy dużych odkształceniach plastycznych.

3.6.4. Rozrost ziarna

Wyżarzanie metalu w wysokich temperaturach (już po zakończeniu procesu rekrytalizacji) powoduje, jak już wspomniano, rozrost ziarna. Głównym czynnikiem rządzącym tym procesem jest napięcie powierzchniowe występujące na granicach ziarn, związane z wyższą energią swobodną atomów znajdujących się na powierzchni ziarn w porównaniu z energią atomów znajdujących się wewnątrz nich. W konsekwencji w materiale polikrystalicznym będzie występowała tendencja do zmniejszenia powierzchni ziarn, a więc do ich rozrostu, gdyż związane to jest z obniżeniem energii swobodnej materiału. Proces rozrostu ziarna odbywa się przez pochłanianie małych ziarn przez większe.

Czynnikiem hamującym rozrost ziarna są m.in. zanieczyszczenia metalu, wydzielania innych faz oraz obecność obcych cząstek o dużej dyspersji celowo wprowadzonych do metalu w celu umocnienia i nadania mu określonych własności mechanicznych.

3.6.5. Techniczne znaczenie rekrytalizacji

Wyżarzanie rekrytalizujące jest szeroko stosowane przy wytwarzaniu takich półwyrobów, jak: blachy, rury, pręty, druty, kształtowniki itp., które są poddawane obróbce plastycznej na zimno. Ponieważ odkształcenie plastyczne umacnia metal, nie można w jednej operacji nadać wyrobom ostatecznego kształtu lub wymiarów. Metal umocniony na skutek odkształcenia plastycznego tak dalece traci własności plastyczne, że nie odkształca się dalej, lecz pęka. Dlatego konieczne jest międzyoperacyjne wyżarzanie rekrytalizujące, które zmiękcza i uplastycznia metal. Jeżeli odkształcenie plastyczne metalu przeprowadza się w temperaturze wyższej od temperatury rekrytalizacji, to proces taki nosi nazwę obróbki plastycznej na gorąco. W czasie takiej obróbki zachodzą jednocześnie dwa procesy: odkształcenie plastyczne i rekrytalizacja. W rezultacie nie następuje umocnienie metalu, który miał strukturę zrekrystalizowaną.