ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969

Seria: MECHANIKA z. 43 Nr kol. 265

DANUTA SZEWIECZEK
Katedra Metaloznawstwa

# WPŁYW UDAROWEGO WYŻARZANIA REKRYSTALIZUJĄCEGO NA ZMIANY STRUKTURALNE ODKSZTAŁCONEGO ŻELAZA

Streszczenie: Określono przebieg zjawisk strukturalnych w różnych warunkach prowadzenia procesu rekrystalizacji z uwzględnieniem wpływu stopnia zgniotu o wartości krytycznej oraz nadkrytycznej przy rekrystalizacji konwencjonalnej i udarowej z szybkością 500 i 1000°C/s. Przeprowadzono pomiar twardości, badania struktury na mikroskopie świetlnym i elektronowym oraz rentgenograficzny pomiar zniekształceń sieciowych II rodzaju.

## 1. Przegląd piśmiennictwa

W licznych badaniach z ostatnich lat uzyskano szereg interesujących danych o procesach towarzyszących wyżarzaniu rekrystalizującemu przy nagrzewaniu udarowym [1, 2]. Przeprowadzane dotychczas badania nad wpływem szybkości nagrzewania na rekrystalizację metali w szerokim zakresie zgniotów pozwoliły na sformułowanie pewnych prawidłowości.

Najbardziej szczegółowo zbadano procesy zachodzące przy szybkim nagrzewaniu w zakresie zgniotów krytycznych i nadkrytycznych.

Badania przeprowadzone w okresie ostatnich lat [1,3] pozwoliły ustalić, że przy nagrzewaniu udarowym metalu odkształconego na stopień krytyczny, materiał nie wykazuje skłonności do nadmiernego rozrostu ziarn.

Nagrzewanie udarowe tłumi nadmierny rozrost ziarn po zgniocie krytycznym i przesuwa go w stronę mniejszych odkształceń. Przy rekrystalizacji udarowej po zgniocie krytycznym przebiegają procesy, w wyniku których zachodzi poligonizacja i migracja granic ziarn. Chociaż wzrost szybkości nagrzewania tłumi zarówno migrację granic ziarn jak i poligonizację, przy udarowym nagrzewaniu dominuje poligonizacja.

Natomiast przy nagrzewaniu konwencjonalnym w zasadzie mechanizm migracji przeważa nad poligonizacją [4].

Procesy migracji granic ziarn i poligonizacji charakteryzują się różnymi energiami aktywacji. W warunkach nagrzewania konwencjonalnego przeważa proces migracji granic ziarn, jako mający mniejszą wartość energii aktywacji dla określonego zakresu odkształceń. Nagrzewanie udarowe daje pierwszeństwo procesom charakteryzującym się dużymi wartościami energii aktywacji [1,2].

Nagrzewanie udarowe z szybkościami w zakresie 30 ÷ 100°C/s do temperatur od 100 do 200°C powyżej "progu" rekrystalizacji powoduje stłumienie nadmiernego rozrostu ziarn. Otrzymana struktura jest drobnoziarnista i jednorodna pod względem wielkości ziarn, a zarazem stabilna.

Zwiększenie szybkości nagrzewania jest nieodłącznie związane z odpowiednim podwyższeniem temperatur. Przy wszystkich stopniach odkształcenia wzrost szybkości nagrzewania powoduje podwyższenie temperatury początku ($t_p$) i końca ($t_k$) rekrystalizacji [1]. W żelazie technicznym wzrost ten wynosi od 70 do 100°C. Ze wzrostem szybkości nagrzewania podwyższenie temperatur $t_p$ i $t_k$ sukcesywnie maleje. Przy szybkościach powyżej 400 ÷ 600°C/s temperatury $t_p$ i $t_k$ praktycznie nie ulegają zmianie. Ustalono, że przy stałej szybkości nagrzewania zwiększenie zgniotu powoduje obniżenie temperatur $t_p$ i $t_k$. W miarę wzrostu stopnia odkształcenia obniżenie temperatur $t_p$ i $t_k$ stopniowo zanika. Przy zgniotach powyżej 40% temperatury $t_p$ i $t_k$ zmieniają się już nieznacznie [1].

Przy zgniotach powyżej 40% w technicznie czystych metalach zwiększenie szybkości nagrzewania od 10 do 500°C/s powoduje prawie dwukrotne zmniejszenie wielkości ziarn. Dalszy wzrost szybkości nagrzewania nie wywiera już tak wyraźnego wpływu na wielkość ziarna.

Wpływ stopnia zgniotu na wielkość ziarna maleje ze wzrostem szybkości nagrzewania. Otrzymana struktura jest bardziej drobnoziarnista. Zjawisko to wiąże się ze zwiększeniem szybkości tworzenia się zarodków rekrystalizacji w miarę wzrostu szybkości nagrzewania. Przy dużych szybkościach nagrzewania zarod-

kowanie przeważa nad wzrostem i określa w zasadzie całkowicie szybkość procesu rekrystalizacji [1,2].

Nagrzewanie udarowe ma ważne znaczenie praktyczne, przede wszystkim w tych przypadkach, kiedy zgniot krytyczny jest nie do uniknięcia, a gruboziarnista struktura niedopuszczalna. Nagrzewanie udarowe pozwala w znacznej mierze na rozszerzenie zakresu optymalnych warunków przeróbki plastycznej bez równoczesnego uzyskania niekorzystnej struktury.
Wzrost szybkości nagrzewania jest szczególnie efektywny przy rekrystalizacji po małych i średnich zgniotach.

## 2. Badania własne

Celem pracy było określenie wpływu szybkości nagrzewania na strukturę i własności żelaza odkształconego w zakresie zgniotów krytycznych i nadkrytycznych.

Badania przeprowadzono na żelazie dostarczanym w postaci płaskowników walcowanych na gorąco, pochodzących z jednego wytopu huty krajowej, o składzie chemicznym podanym w tablicy 1.

Tablica 1

| Skład chemiczny | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % C | % Mn | % Si | % P | % S | % Cr | % Ni | % Cu | % Al |
| 0,020 | 0,065 | 0,000 | 0,012 | 0,010 | 0,015 | 0,025 | 0,030 | 0,002 |

Celem otrzymania równomiernej wielkości ziarna płaskowniki walcowano na zimno ze zgniotem 70%, a następnie wyżarzono w próżni przy temperaturze 800°C, w czasie 10 godzin. Wielkość ziarna po tych zabiegach wynosiła $D_{śr}$ = 15 μm. Przygotowany w ten sposób materiał walcowano na zimno ze zgniotem w zakresie od 3,5 do 33%.

Obróbka cieplna obejmowała wyżarzanie rekrystalizujące konwencjonalne i udarowe.

Parametry obróbki cieplnej określono na podstawie uprzednio przeprowadzonych badań wstępnych. Wyżarzanie rekrystalizujące udarowe przeprowadzono przy temperaturze 800°C z szybkościami nagrzewania 500 i 1000°C/s, zaś konwencjonalne w tej samej temperaturze w czasie 30 min.

Wyżarzanie udarowe przeprowadzono na urządzeniu laboratoryjnym do stacjonarnego, bezpośredniego oporowego nagrzewania. Pomiar temperatury wykonano z dokładnością ± 20°C przy użyciu termopary chromel-alumel przyspawanej do próbki i połączonej z termorejestratorem elektronicznym do szybkich przebiegów f-my Brüel - Kjaer (Dania). Parametry prądowe dla poszczególnych zgniotów określano oddzielnie.

Celem określenia wpływu obróbki cieplnej na zmiany strukturalne odkształconego żelaza posłużono się następującymi metodami badań:

- pomiarem twardości;
- metalograficznymi na mikroskopie świetlnym,
- na mikroskopie elektronowym,
- rentgenograficznymi.

## 3. Pomiar twardości

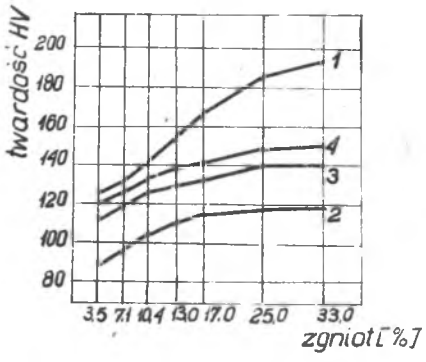
Pomiar twardości dokonano metodą Vickersa przy obciążeniu 1 kG na twardościomierzu f-my Harser (Szwajcaria).

Twardość próbek po zgniotach w zakresie od 3,5 do 33% wzrastała i wynosiła odpowiednio od ok. 130 do 190 HV.

Po rekrystalizacji konwencjonalnej, jak i udarowej, obserwuje się spadek twardości, występuje jednak pewna różnica dla próbek rekrystalizowanych konwencjonalnie i udarowo. Po wyżarzaniu rekrystalizującym przy temperaturze 800°C/30 min nastąpił spadek twardości dla odpowiednich zgniotów od ok. 90 do 120 HV. Twardość próbek rekrystalizowanych udarowo z szybkością 500°C/s przy temperaturze 800°C jest dla wszystkich stopni zgniotu o ok. 20 HV wyższa niż po rekrystalizacji konwencjonalnej i zawiera się w zakresie 110 ÷ 140 HV.

Natomiast twardość próbek rekrystalizowanych udarowo z szybkością 1000°C/s wynosiła ok. 120 ÷ 150 HV dla zakresu badanych

zgniotów. Przebieg zmian twardości w zależności od stopnia zgniotu dla różnych warunków nagrzewania przedstawiono na rys. 1.




Rys. 1. Zależność twardości od stopnia zgniotu po rekrystalizacji konwencjonalnej i udarowej
1 - zgniot, 2 - 800°C/30m, 3 - 800°C/500°C/s, 4 - 800°C/1000°C/s

## 4. Badania metalograficzne na mikroskopie świetlnym

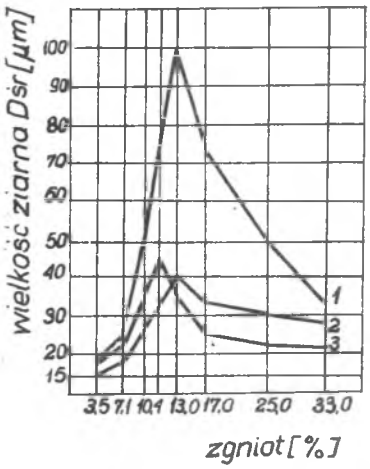
Obserwacje struktury na mikroskopie świetlnym przeprowadzono celem określenia wielkości ziarna oraz zmian strukturalnych w zależności od przeprowadzonej obróbki cieplnej.

### 4a. Pomiar wielkości ziarna

Pomiar wielkości ziarna dokonano metodą przeciętnej średnicy. Średnią wielkość ziarna określono na podstawie pomiaru 5 próbek, przy powiększeniach 100 względnie 500 x. Na jeden punkt pomiarowy przypadało nie mniej niż 200 ziarn.

Przebieg zmian wielkości ziarna w zależności od stopnia zgniotu dla rekrystalizacji konwencjonalnej przy temperaturze 800°C/30 min przedstawiono na rys. 2 (krzywa 1). Stwierdzono intensywny wzrost ziarna do wielkości 100 μm dla zgniotu 13%, przy czym zgniot ten okazał się krytycznym. Dalszy wzrost zgnio-

tu zaznaczył się stopniowym spadkiem wielkości ziarna, dla zgniotu 33% uzyskano wielkość ziarna równą 35 μm.



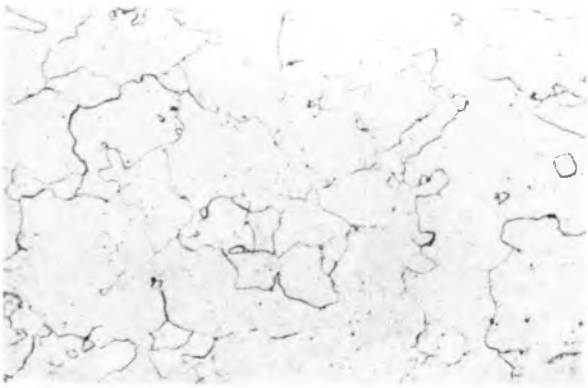

Rys. 2. Zależność wielkości ziarna od stopnia zgniotu po rekrystalizacji konwencjonalnej i udarowej;
1 - 800°C/m, 2 - 800°C/500°C/s, 3- 800°C/1000°C/s.

Ze wzrostem szybkości nagrzewania udarowego obserwowano zmniejszenie wielkości ziarna (rys. 2 - krzywe 2 i 3). Dla zgniotu 13% i szybkości nagrzewania 500°C/s wielkość ziarna była mniejsza o 60μm w porównaniu z rekrystalizacją konwencjonalną. Powyżej 13% zgniotu zaznaczył się spadek wielkości ziarna odpowiednio do stopnia zgniotu, aż do 30 μm dla zgniotu 33%. Dla szybkości nagrzewania 1000°C/s zgniot krytyczny wynosił 12%, a wielkość ziarna ok. 45 μm. Ze wzrostem zgniotu ziarno odpowiednio maleje aż do ok. 20 μm dla zgniotu 33%.

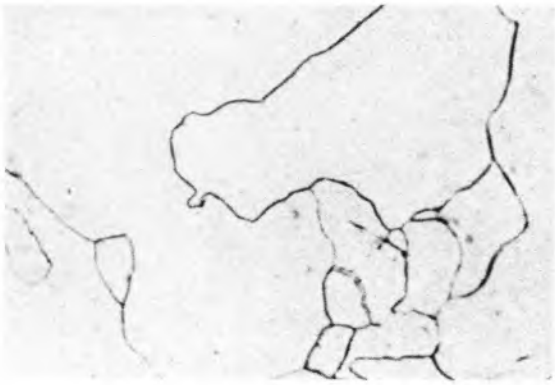
4b. Badania struktury

Badania przeprowadzono na zgładach poprzecznych trawionych 2% roztworem alkoholowym kwasu azotowego. Obserwacji dokonano na mikroskopie świetlnym firmy Reichert (Austria) przy powiększeniach od 100 do 650 x.

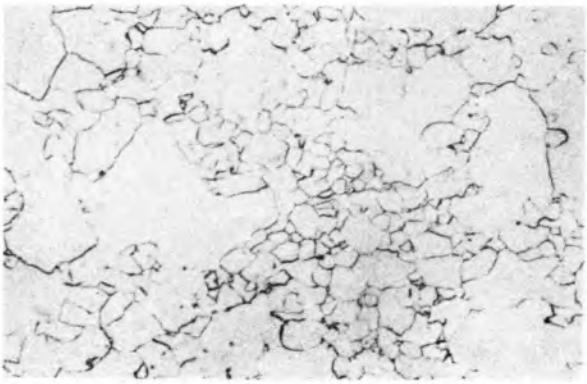
Rys. 3



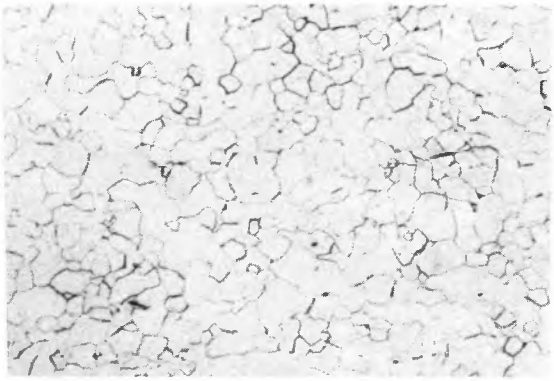
Rys. 4



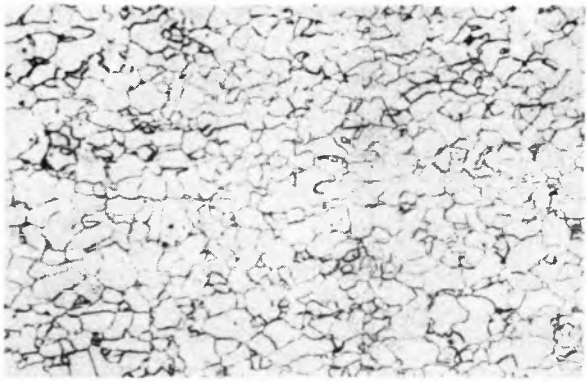
Rys. 5



Rys. 6

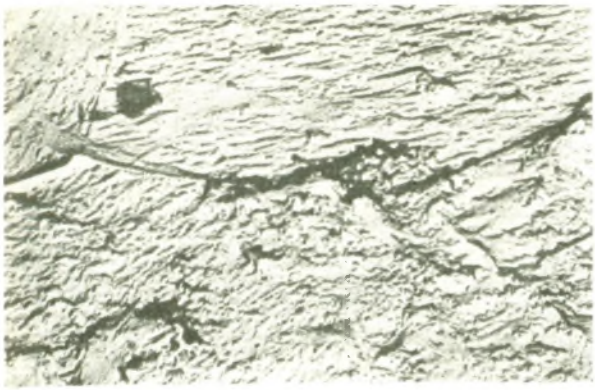


Rys. 7

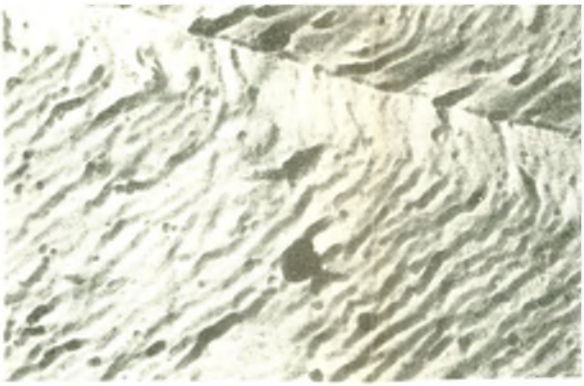


Rys. 8

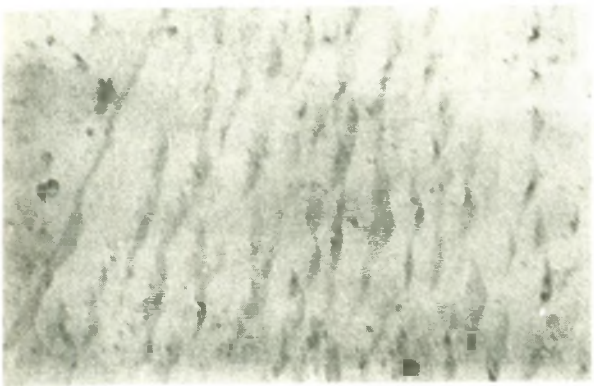
| Nr rys. | Zgniot | Obróbka cieplna | Powiększenie | Opis struktury |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 13% | Rekrystalizacja konwencjonalna 800°C/30 min | 150 x | Duże ziarna ferrytu o pofałdowanych granicach |
| 4 | 12% | Rekrystalizacja udarowa 800°C/1000°C/s | 150 x | Ziarna ferrytu o pofałdowanych granicach |
| 5 | 17% | Rekrystalizacja konwencjonalna 800 °C/30 min. | 650 x | Ziarna zmiennej wielkości. Miejscami na granicach rozłożone zarodki nowych ziarn |
| 6 | 17% | Rekrystalizacja udarowa 800°C/500°C/s | 150 x | Opis jak na rys. 5 |
| 7 | 33% | Rekrystalizacja udarowa 800°C/500°C/s | 150 x | Ferryt o równomiernej wielkości ziarna |
| 8 | 33% | Rekrystalizacja udarowa 800°C/1000°C/s | 150 x | Opis jak na rys. 7 |



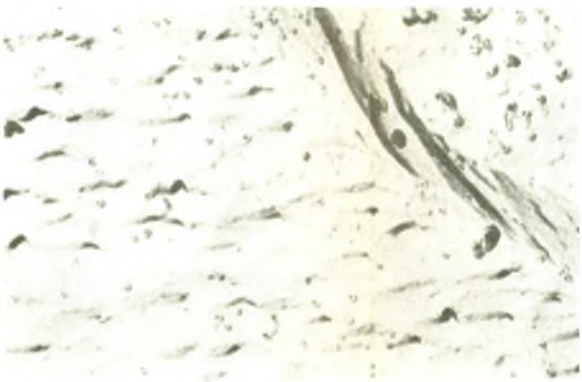
Rys. 9



Rys. 10

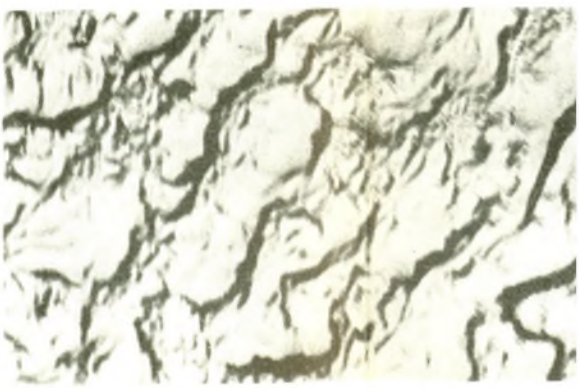


Rys. 11



Rys. 12

Rys. 13



Rys. 14

| Nr rys. | Zgniot | Obróbka cieplna | Powiększenie | Opis struktury |
|---|---|---|---|---|
| 9 | 12% | ---- | 10 000 x | W ziarnach ferrytu o różnej orientacji krystalograficznej widoczna substruktura. |
| 10 | 13% | Rekrystalizacja konwencjonalna 800°C/30 min | 24 000 x | W ziarnach ferrytu charakterystyczna substruktura, ponadto widoczna granica szerokokątowa. |
| 11 | 33% | Rekrystalizacja konwencjonalna 800°C/30 min. | 12 000 x | Wyraźnie ukształtowana struktura blokowa. |
| 12 | 33% | Rekrystalizacja udarowa 800°C/500°C/s | 24 000 x | Opis jak na rys. 11. |
| 13 | 33% | Rekrystalizacja udarowa 800°C/1000°C/s | 24 000 x | Wewnątrz uformowanych fragmentów widoczne bloki. |
| 14 | 13% | Rekrystalizacja udarowa 800°C/1000°C/s | 24 000 x | Opis jak na rys. 13. |

Badania metalograficzne próbek odkształconych ze zgniotami podkrytycznymi, a następnie obrobione cieplnie, w zasadzie nie wykazały zmian struktury.

W próbkach o zgniocie krytycznym po rekrystalizacji konwencjonalnej w 800°C/30 m ujawniono pewne zmiany polegające na znacznym wzroście wielkości ziarna. Uzyskane ziarna posiadały nierównomierną wielkość, o granicach pofałdowanych (rys. 3).

W strukturze próbek rekrystalizowanych udarowo po odkształceniach krytycznych wystąpiły również ziarna o pofałdowanych granicach (rys. 4).

Po zgniotach nadkrytycznych, obok ziarn o pofałdowanych granicach widoczne są nagromadzenia ziarn drobnych (rys. 5, 6). Zjawisko to występuje zarówno w próbkach rekrystalizowanych konwencjonalnie, jak i udarowo. Ze wzrostem wielkości nagrzewania ziarna są coraz mniejsze i bardziej równomierne (rys. 7,8).

## 5. Badania na mikroskopie elektronowym

Badania na mikroskopie elektronowym struktury ujawnionej trawieniem zgładów przeprowadzono przy zastosowaniu replik węglowych, bezpośrednich. Stosowano powszechnie przyjęte metody preparowania [5]. Obserwacje prowadzono na mikroskopie JEM-6A przy powiększeniach od 800 do 30 000 x.

Po odkształceniach na replikach zaobserowano wyraźną substrukturę w obrębie ziarn ferrytu (rys. 9). Wielkość bloków malała ze wzrostem odkształcenia.

Wyżarzanie rekrystalizujące konwencjonalne w 800°C/30 m spowodowało znaczny wzrost wielkości bloków w całym zakresie badanych zgniotów, przy czym wielkość bloków malała ze stopniem zgniotu (rys. 10,11).

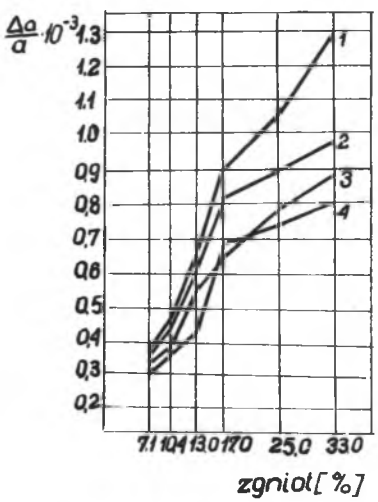
Po rekrystalizacji udarowej przy temperaturze 800°C dla jednakowych stopni zgniotu ze wzrostem szybkości nagrzewania wielkość bloków malała (rys. 12,13). Wzrost szybkości nagrzewania spowodował utworzenie w ziarnach fragmentów składających się z dużej ilości bloków (rys. 12÷14).

## 6. Badania rentgenograficzne

W ramach badań rentgenograficznych przeprowadzono pomiar zniekształceń sieciowych drugiego rodzaju. Badania przeprowadzono metodą aproksymacji [6,7] na dytraktometrze TUR-M61 z poziomym goniometrem licznikowym HZG-1, stosując filtrowane promieniowanie anody kobaltowej.

Pomiar gęstości impulsów przeprowadzono licznikiem Geigera-Mülera typu VA-Z-33. Rejestrację impulsów dokonano na taśmie przy szybkości licznika $\frac{1}{12}$ °/min i szybkości przesuwu taśmy 1200 mm/godz.

Zmiany zniekształceń sieciowych w zależności od stopnia zgniotu po różnych zabiegach cieplnych przedstawiono na rys.15.




Rys. 15. Zależność zniekształceń sieciowych ($\frac{\Delta a}{a}$) od stopnia zgniotu po rekrystalizacji konwencjonalnej i udarowej
1 - zgniot, 2 - 800°C/1000°C/s, 3 - 800°C/500°C/s, 4 - 800°C/30 min

Zniekształcenia sieciowe próbek po zgniotach w zakresie od 7,1 do 33% wzrastają i wynoszą odpowiednio od ok. 0,39 do 1,29 . $10^{-3}$.

Zniekształcenia sieciowe wzrastają wraz z szybkością nagrzewania. Dla próbek rekrystalizowanych konwencjonalnie w zakresie badanych zgniotów wartości $\frac{\Delta a}{a}$ wynoszą 0,31 do 0,77 . $10^{-3}$. Wielkości zniekształceń sieciowych dla próbek rekrystalizowanych udarowo po zgniotach od 7,1 do 33% wynoszą odpowiednio dla szybkości nagrzewania 500°C/s od 0,35 do 0,85 . $10^{-3}$, natomiast dla 1000°C/s 0,38 do 0,98 . $10^{-3}$.

## 7. Dyskusja wyników

Do czynników decydujących o mechanicznych i technologicznych własnościach jednofazowych metali i stopów należy, obok wielkości ziarna, zaliczyć substrukturę i zniekształcenia sieciowe.

Wielkość ziarna regulowana jest doborem parametrów rekrystalizacji, natomiast zmiany substruktury i gęstości defektów zachodzą już wcześniej, w stadium nawrotu. Zmiana dotychczasowej technologii winna zatem wpłynąć na proces nawrotu. Można to uzyskać między innymi przez zwiększenie szybkości nagrzewania, zapewniając przebieg rekrystalizacji przy zahamowaniu procesów nawrotu [1,2].

Przeprowadzone badania pozwalają na określenie przebiegu zjawisk strukturalnych w różnych warunkach prowadzenia procesu rekrystalizacji przy uwzględnieniu wpływu stopnia zgniotu o wartości krytycznej oraz nadkrytycznej przy rekrystalizacji konwencjonalnej i udarowej z szybkością 500°C/s i 1000°C/s.

Zmiany struktury w próbkach o zgniocie krytycznym, wynoszącym 13%, przedstawiają się następująco: w wyniku rekrystalizacji konwencjonalnej przy 800°C/30 m wystąpiły ziarna nierównomiernej wielkości o pofałdowanych granicach (rys. 3,4). Próbki o jednakowych zgniotach, po osiągnięciu tej samej temperatury z różnymi szybkosciami nagrzewania udarowego, cechuje różna ilość defektów strukturalnych (rys. 15 - krzywe 2 i 3). Tłumaczy to, w pewnej mierze, przesunięcie maksimum zależności wielkości ziarna od stopnia zgniotu w stronę mniejszych wartości odkształceń ze wzrostem szybkości nagrzewania.

Próbki wykazujące jednakowe odkształcenia "geometryczne" oraz "fizyczne" cechuje, po osiągnięciu tej samej temperatury

z różną szybkością, inna wielkość odkształcenia "fizycznego". Dla większych szybkości nagrzewania wymagane jest więc mniejsze odkształcenie "geometryczne", aby nie nastąpiło przesunięcie zgniotu krytycznego do mniejszych wartości. Przy małych odkształceniach gęstość skalarowa dyslokacji jest mniejsza od wymaganej dla utworzenia granic o dużej dezorientacji [8].

Sugeruje to, że po zgniotach krytycznych rekrystalizacja odbywała się bez zarodkowania drogą migracji istniejących szerokokątnych granic ziarn.

Stwierdzono, że zarówno po rekrystalizacji konwencjonalnej, jak i udarowej, przemieszczanie granic ziarn odbywało się od środka ich krzywizn, pod wpływem energii nagromadzonej podczas odkształcenia plastycznego na zimno. Ponieważ szybkość przemieszczania granicy od środka jej krzywizny jest znacznie większa aniżeli przy ruchu granicy do środka krzywizny [8], przeto w wyniku uzyskuje się odpowiednio duże ziarno (rys. 3,4).

Przez prawidłowy dobór parametrów obróbki cieplnej przy nagrzewaniu udarowym próbek poddanych uprzednio zgniotowi krytycznemu uzyskano znaczne zahamowanie nadmiernego rozrostu ziarn z szybkością nagrzewania. Substruktura zrekrystalizowanego udarowego ferrytu po zgniotach krytycznych posiada wyraźną budowę blokową (rys. 14). Zniekształcenia sieciowe pozostałe w materiale są znaczne (rys. 15, krzywe 2 i 3). Wielkość zniekształceń sieciowych $\frac{\Delta a}{a}$ obecnych w materiale zrekrystalizowanym wzrasta z szybkością nagrzewania. Równolegle ze zniekształceniami sieciowymi wzrasta twardość HV (rys. 1).

W zakresie małych i średnich zgniotów nadkrytycznych niejednorodne odkształcenie powoduje znaczne zróżnicowanie czasów inkubacji tworzenia zarodków rekrystalizacji w różnych obszarach materiału [9]. Dlatego w procesie rekrystalizacji po zgniotach, nieco przewyższających krytyczne, ujawniono zarówno migrację ziarn wyjściowych, jak i zarodkowanie nowych (rys. 5,6). W miarę wzrostu zgniotu w procesie rekrystalizacji zaczyna dominować zarodkowanie (rys. 7,8).

Kiedy odkształcenie jest niejednorodne, zwłaszcza przy zgniotach od 3,5 do 33%, korzystny wpływ na rekrystalizację wywiera szybkość nagrzewania [1,2]. Nagrzewanie udarowe zmniejsza różni-

cę okresów inkubacyjnych tworzenie zarodków. Równocześnie ze wzrostem szybkości nagrzewania wzrasta szybkość powstawania (N) oraz wzrostu (G) zarodków rekrystalizacji. Stosunek $\frac{N}{G}$ ze wzrostem szybkości nagrzewania zwiększa się, natomiast energia tworzenia zarodków rekrystalizacji staje się znacznie mniejsza aniżeli energia aktywacji ich wzrostu [1,9]. W wyniku tego powstała większa ilość zarodków rekrystalizacji i struktura jest bardziej drobnoziarnista oraz jednorodna, aniżeli przy nagrzewaniu konwencjonalnym. Wielkość ziarna przy określonym zgniocie nadkrytycznym maleje ze wzrostem szybkości nagrzewania (rys. 2).

W substrukturze próbek rekrystalizowanych zarówno konwencjonalnie jak i udarowo po zgniotach nadkrytycznych, nastąpił wzrost bloków ze spadkiem szybkości nagrzewania (rys. 11÷13). Zniekształcenia sieciowe pozostałe w materiale zrekrystalizowanym wzrastają ze zgniotem oraz szybkością nagrzewania (rys. 15). Obecność większych zniekształceń sieciowych w materiale zrekrystalizowanym udarowo, znacznie drobniejsze bloki, oraz mniejsze ziarno powodują wzrost twardości w stosunku do próbek po rekrystalizacji konwencjonalnej (rys. 1).

Jak wynika z przytoczonych rozważań na zmiany strukturalne badania materiału duży wpływ posiada szybkość nagrzewania. Potwierdziły to wyniki badań własnych; wpływ szybkosci zaznaczył się w całym zakresie badanych zgniotów od 3,5 do 33%.

Przy dużych szybkościach nagrzewania procesy nawrotu prawdopodobnie nie przebiegły do końca; w wyniku tego w strukturze zrekrystalizowanego ferrytu została zachowana znaczna część umocnienia, uzyskanego w wyniku zgniotu. Dyfuzyjny proces rekrystalizacji zaszedł w warunkach zachowania strukturalnych nieprawidłowości przechodzących z umocnionego ferrytu w ferryt zrekrystalizowany.

Ogólnie biorąc, badane próbki wykazujące w stanie odkształconym w zasadzie jednakową ilość defektów strukturalnych, posiadają różną ilość defektów po osiągnięciu tej samej temperatury rekrystalizacji ze zmiennymi szybkościami nagrzewania. Po osiągnięciu jednakowej temperatury dla tego samego zgniotu, ze

wzrostem szybkości nagrzewania w materiale zrekrystalizowanym pozostają większe wartości zniekształceń sieciowych. Większym szybkościom nagrzewania dla jednakowych zgniotów odpowiadają mniejsze wielkości bloków. Twardość HV dla tych samych zgniotów po rekrystalizacji wzrasta z szybkością nagrzewania.

## 8. Wnioski

1. Na własności, strukturę oraz substrukturę fazy $\alpha$ i zniekształcenia sieciowe żelaza technicznego, uzyskanego w wyniku rekrystalizacji udarowej, duży wpływ wywiera szybkość nagrzewania. Potwierdziły to wyniki badań, a w szczególności:

- po rekrystalizacji udarowej z szybkością 500°C/s żelazo posiada twardość o ok. 20 HV wyższą aniżeli po zabiegu konwencjonalnym; wzrost szybkości nagrzewania z 500°C/s do 1000°C/s podwyższa twardość średnio o dalsze 10 HV;
- ze wzrostem szybkości nagrzewania powstaje bardziej drobnoziarnista i jednorodna struktura, a zgniot krytyczny przesuwa się w kierunku mniejszych wartości odkształceń;
- dla jednakowych stopni zgniotu ze wzrostem szybkości nagrzewania wielkość bloków maleje;
- dla tych samych zgniotów wielkość zniekształceń sieciowych, pozostających w materiale po rekrystalizacji, rośnie z szybkością nagrzewania; w wyniku tego rekrystalizacja udarowa zostaje zakończona przy zachowaniu znacznej części umocnienia wniesionego uprzednim zgniotem; procesy zaniku umocnienia oraz rekrystalizacji przebiegają więc niezależnie od siebie.

2. Praktyczne wykorzystanie przeprowadzonych badań w zakresie przydatności w przemyśle polega na możliwości regulowania wielkości ziarn, zwłaszcza po zgniotach krytycznych w procesie wyżarzania udarowego.

L I T E R A T U R A

[1] IWANOW M.N., OSIPOW K.A.: Wozwrat i rekristalizacja w metałłach pri bystrom nagrewie, Nauka, Moskwa 1964.

[2] BODJAKO i inni: Termokinetika rekristalizacji, Nauka i Technika, Mińsk 1968.

[3] IZBRANOW P.D. i inni: Fizika metałłow i metałłowiedenje a) t. 2, wyd. 6 1959; b) t.8, wyd. 3 i 4, 1956.

[4] ALEKSANDROW L.H., MORDJUK W.C.: Fizika metałłow i mietałłowiedenje t. 2 wyd. 2 1961.

[5] BRAMNAR J.S., DEWEY M.A.: Specimen Preparation for Electron Metallography, Blackwell Sci. Public. 1966.

[6] ŁYSAK L.V.: Woprosy fiziki metałłow i metałłowiedenja, AN USSR 6, 1954, 45.

[7] BOJARSKI Z., BOŁOD T.: Praca badawcza B - 1549 IMŻ, Gliwice 1966.

[8] BECK P.A.: Adv. Phys., 3, 1954, 245.

[9] GORELIK S.S.: Rekristalizacja metałłow i spławow, Mietałłurgija, Moskwa 1967.

ВЛИЯНИЕ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ СКОРОСТНЫХ НАГРЕВАХ НА ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАКЛЕПАННОГО ЖЕЛЕЗА

Р е з ю м е

Исследовано с различной степенью деформированные листы. Образцы нагревались со скоростью 500 град/сек, и 1000 град/сек. Обработанные образцы подвергались рентгеноструктурному и микроструктурному анализам а также измерению твердости.

DIE BESCHLEUNIGTE REKRISTALISATION $\alpha$-EISEN

Z u s a m m e n f a s s u n g

Ed wurden die Strukturerscheinungen in $\alpha$-Eisen nach verschiedenen verformungs- und Rekristalisation Bedingungen bestimmt. An den rekristalisierten Proben sind Untersuchungen der Härte, Struktur, sowie der verenderungen der Eigenspanungen II Art duchgeführt.