

ŁUCJA CIEŚLAK, DANUTA SZEWIECZYK

JERZY ZWONEK

Materia Metaloznawstwa

REKRYSZTALIZACJA UDAROWA STALI FERRYTYCZNO-PERLITYCZNEJ

Streszczenie. Przeprowadzone badania metalograficzne oraz rentgenograficzne, celem ujawnienia zmian strukturalnych zachodzących podczas rekrysztalizacji udarowej stali węglowej ferrytyczno-perlitycznej o różnych stopniach zgniotu oraz ich wpływu na własności mechaniczne. Rekrysztalizacja udarowa stali ferrytyczno-perlitycznej przebiega odmiennie niż konwencjonalna, a otrzymane własności wytrzymałościowe są wyższe, przy zachowaniu plastycznych.

1. Wstęp

Dotychczas przeprowadzono wiele teoretycznych i eksperymentalnych prac dotyczących procesów towarzyszących nagrzewaniu metali i stopów zgniecionych na zimno. Badano szczegółowo wpływ niektórych czynników na kinetykę rekrysztalizacji, głównie stopnia zgniotu, temperatury i czasu wygrzewania. W mniejszym stopniu zbadano wpływ składu fazowego oraz szybkości nagrzewania i deformacji. Duże znaczenie praktyczne rekrysztalizacji zgniotowej oraz różnorodność zjawisk zachodzących w czasie tej obróbki powoduje, że zagadnieniu temu poświęca się nadal sporo uwagi.

W ostatnich latach szczególną uwagę zwrócono na czynniki do tej pory niedoceniane, szybkość nagrzewania. Wykazano [1+3], że przy dużych szybkościach nagrzewania, rzędu $1000^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ i więcej, kinetyka rekrysztalizacji ulega wyraźnej zmianie. Wykorzystanie własności nagrzewania udarowego daje podstawy do opracowania nowych, wysokowydajnych procesów technologicznych, całkowicie lub częściowo zautomatyzowanych.

Jednak opublikowane dotąd badania obejmowały głównie rekry-
stalizację udarową niektórych metali i stopów jednofazowych.
Natomiast danych odnośnie rekrytalizacji udarowej stopów
wielofazowych w dotychczasowej literaturze brakuje.

2. Rekrytalizacja stopów dwufazowych

Przebieg rekrytalizacji stopów dwufazowych posiada inny cha-
rakter niż metali i stopów jednofazowych. Obecność drugiej
fazy wpływa na kinetykę rekrytalizacji osnowy zmieniając
szybkości tworzenia i wzrostu zarodków rekrytalizacji, kie-
runek oraz intensywność oddziaływania zależą głównie od jej
rozmieszczenia i dyspersji, w mniejszym stopniu od ilości.

W przypadku fazy występującej w postaci cząstek o dużym stopn
stopniu dyspersji, ilość tworzących się zarodków rekrytaliza-
cji ulega zwiększeniu, natomiast szybkość ich wzrostu zmniej-
szeniu. Temperatury początku i końca rekrytalizacji osnowy
rosną proporcjonalnie do dyspersji fazy rozproszonej. Przypa-
dek ten zachodzi, jeżeli równocześnie z rekrytalizacją zachod-
zą procesy wydzieleniowe oraz przy rekrytalizacji stopu dwu-
fazowego po dużym zgnioście, powodującym znaczne rozdrobienie
fazy twardszej. Szybkość rekrytalizacji zwłaszcza wtórnej,
uwarunkowana jest wtedy w dużym stopniu procesem koalescencji
cząstek utrudniających migrację granic ziarn. W rezultacie o-
trzymuje się z reguły strukturę drobnoziarnistą, niekiedy jed-
nak, na skutek równomiernego rozmieszczenia cząstek w osnowie
może nastąpić lokalny rozrost ziarn [4].

Jeżeli obie fazy tworzą oddzielne ziarna albo druga faza
rozmieszczona jest w postaci niewielkiej ilości dużych cząstek,
to szybkość rekrytalizacji osnowy osiąga wartości jak dla
stopu jednofazowego a nawet w okresie początkowym większe. Za-
rodki rekrytalizacji powstają w niewielkiej ilości, głównie
na granicach międzyfazowych w temperaturze tym niższej, im
większa jest różnica twardości faz [4]. Otrzymana struktura
i konfiguracja granic ziarn uwarunkowana jest rozmieszczeniem
i trwałością cząstek fazy rekrytalizującej w wyższych tempe-
raturach [5].

Zmiany własności w czasie rekrystalizacji stopów dwufazowych zachodzą wolniej i w szerszym zakresie temperatur niż dla stopów jednofazowych. Przebieg zmian zależy głównie od różnicy temperatur rekrystalizacji i dyspersji faz.

Przeprowadzone badania rekrystalizacji mosiądzu dwufazowego z uwzględnieniem szybkości nagrzewania wykazały, że udarowe nagrzewanie wywiera wyraźny wpływ na jej kinetykę. Stwierdzono, że w zależności od stopnia zgniotu, temperatury i szybkości nagrzewania, zarodki rekrystalizacji tworzą się na granicach ziarn jednej fazy lub równocześnie na granicach międzyfazowych [6].

3. Badania własne

Celem pracy było stwierdzenie zmian strukturalnych zachodzących w stali węglowej ferrytyczno-perlitycznej w czasie rekrystalizacji konwencjonalnej i udarowej oraz określenie ich wpływu na własności mechaniczne.

Do badań użyto taśm ze stali węglowej zwykłej jakości o zawartości 0,16%C, walcowanych na zimno ze stopniami zgniotu: 10, 30, 50, 70 i 90%. Wykonano wyżarzanie rekrystalizujące konwencjonalne i udarowe, pomiar własności mechanicznych oraz badania zmian strukturalnych. Zestawione w tablicy 1 parametry wyżarzania rekrystalizującego dobrano w ten sposób, aby ujawnić początek rekrystalizacji ferrytu oraz zmiany strukturalne zachodzące w wyższych temperaturach, aż do zakresu przemiany.

Nagrzewanie udarowe przeprowadzono sposobem oporowym, włączając próbkę w obwód wtórny transformatora. Wyłączenie prądu zasilania po upływie ustalonego wstępnie czasu odbywa się przy pomocy wyłącznika elektronicznego z dokładnością 0,01 sek. W celu zapewnienia równomiernego nagrzewania na całej długości, próbki wykonano z tolerancją $\pm 0,02$ mm. Temperaturę mierzono termoparą chromel-alumel przyspawaną do próbki i połączoną z rejestratorem elektronicznym firmy Brüel-Kjaer z dokładnością $\pm 20^{\circ}\text{C}$. Wygląd urządzenia podaje praca [2]. Analiza uzyskanych wykresów wykazała, że po wyłączeniu prądu następował okres izotermicznego zachowania temperatury przez ok. 15 sek. a następnie dopiero wolny spadek do temperatury otoczenia.

Parametry wyżarzania rekrystalizującego konwencjonalnego i udarowego

Z g n i o t %		10	30	50	70	90	
Temperatura wyżarzania rekrystalizującego (°C)	konwencjonalnego (czas wyżarzania 30 min.)	710	640	610	580	560	
		680	610	580	550	530	
		650	580	550	520	500	
		620	550	520	490	470	
Temperatura wyżarzania udarowego (°C)	szybkość na- grzewania (°C/sek)	500	700,750,810	680,740,810	620,700,780	680,780,830	580,650,750
		1000	710,760,810	680,720,850	630,710,790	680,750,810	590,660,750
		2000	710,760,820				
		3000		620,680,820	650,710,780		
		4000				660,730,820	690,750,830

4. Wyniki badań i ich dyskusja

Zmiany własności i struktury po rekrystalizacji konwencjonalnej i udarowej rejestrowano:

- a) pomiarem twardości Vickersa przy obciążeniu 5 kG,
- b) pomiarem wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia,
- c) badaniami metalograficznymi,
- d) badaniami rentgenograficznymi.

Badania twardości próbek wyżarzanych konwencjonalnie pozwoliły określić temperaturę początku rekrystalizacji ferrytu jako równą 530-650°C w zależności od stopnia zgniotu. Różnica temperatur początku i końca rekrystalizacji wynosi około 70°C dla zgniotu 10% i maleje z jego wzrostem do 40°C. Zgodnie z tym krzywe twardości na rys. 1 zmieniają kąt nachylenia do osi temperatur. Zwiększenie szybkości nagrzewania powoduje proporcjonalny wzrost temperatury rekrystalizacji. Przy szybkościach większych od 1000°C/sek temperatura rekrystalizacji ferrytu ustala się, przy czym wpływ zgniotu staje się mniej wyraźny.

Na podstawie wyników badań twardości dobrano optymalne w zakresie badanych zgniotów parametry wyżarzania konwencjonalnego - 560-680°C oraz udarowego 720-780°C przy szybkościach nagrzewania 2000-4000°C/sek. Uzyskane przy zachowaniu tych parametrów własności mechaniczne próbek zestawiono w tablicy 2.

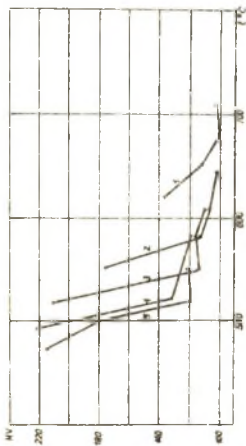
Twardość rośnie proporcjonalnie do szybkości nagrzewania (rys.2) i przy 2000-4000°C/sek osiąga wartości o 25÷35 jednostek wyższe niż po rekrystalizacji konwencjonalnej. Podobnie wzrasta granica plastyczności o około 6 kG/mm² i wytrzymałość, średnio 14 kG/mm², przy zachowaniu tych samych własności plastycznych.

Zwiększenie szybkości nagrzewania w zakresie 500-4000°C/sek nie wywiera wyraźnego wpływu na własności mechaniczne (rys. 3, 4).

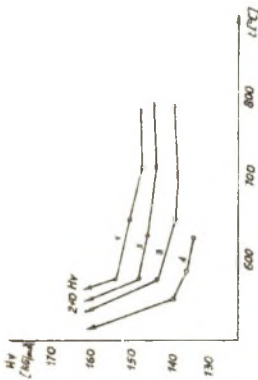
Badania metalograficzne i rentgenograficzne ujawniły charakterystyczne zmiany w strukturze stali rekrystalizowanej.

Własności mechaniczne stali węglowej o zawartości 0,16% C po rekrytalizacji konwencjonalnej i udarowej w zakresie optymalnych parametrów wyżarzania

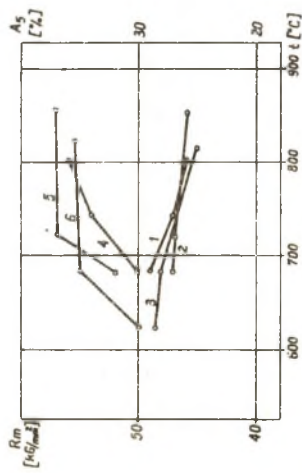
Sposób wyżarzania	Stopień zgniotu %	Szybkość nagrzewania °C/sek	Temperatura °C	Twardość HV	Re kG/mm ²	Rm kG/mm ²	A ₅ %
Konwencjonalny	10	0,3	680	98	28	31	39
	30	0,3	640	104	28	31	36
	50	0,3	610	106	28	31	36
	70	0,3	580	107	28	31	36
	90	0,3	560	109	29	32	35
Udarowy	10	2000	760	122	32	36	38
	30	3000	760	142	35	46	36
	50	3000	760	146	35	44	39
	70	4000	760	141	35	46	37
	90	4000	760	135	34	45	38



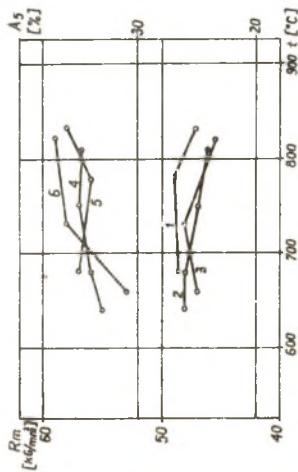
Rys. 1. Krzywe zmian twardości stali węglowej o zawartości 0,16% C w zależności od temperatury wyżarzania konwencjonalnego
1 - zgniot 10%; 2 - 30%; 3 - 50%; 4 - 70%;
5 - 90%



Rys. 2. Twardość stali 0,16% po zgnioście 50% rekrytalizowanej udarowo (krzywe 1 ÷ 3) oraz konwencjonalnie (4) w zależności do temperatury wyżarzania i szybkości nagrzewania
1 - 3000°C/sec, 2 - 1000°C/sec, 3 - 500°C/sec, 4 - 0,3°C/sec



Rys. 3. Wytrzymałość na rozciąganie (krzywe 1÷3) i wydłużenie stali węglowej 0,16% C (4÷6) w zależności od temperatury rekrytalizacji udarowej po zgnioście 30% i szybkości nagrzewania
1 i 4 - 500°C/sec, 2 i 5 - 1000°C/sec, 3 i 6 - 3000°C/sec



Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie (krzywe 1÷3) i wydłużenie (4÷6) stali węglowej 0,16% C w zależności od temperatury rekrytalizacji udarowej po zgnioście 70% i szybkości nagrzewania
1 i 5 - 500°C/sec, 2 i 4 - 1000°C/sec, 3 i 6 - 4000°C/sec

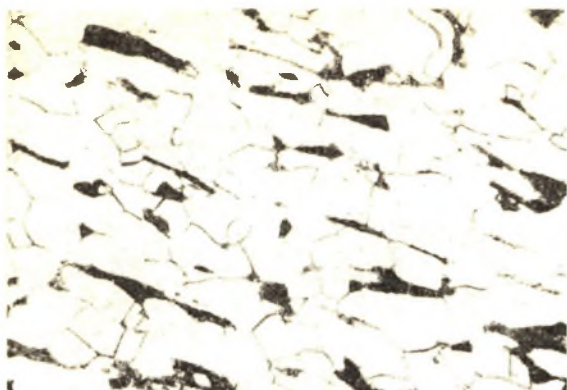
W czasie rekrytalizacji konwencjonalnej fazą rekrytalizującą wcześniej, niezależnie od stopnia zgniotu i temperatury wyżarzania jest ferryt. Wielkość zrekrystalizowanego ziarna ferrytu maleje ze wzrostem zgniotu. Niezrekrystalizowane obszary perlitu są wydłużone i zachowują układ nadany w czasie poprzedniej przeróbki plastycznej (rys. 5). Pozostają one na ogół niezmienione dla wszystkich badanych zgniotów, chociaż przy 90% zgniotu obserwuje się już początki koagulacji cementytu. Zatem w czasie wyżarzania konwencjonalnego stali ferrytyczno-perlitycznej obie fazy rekrytalizują niezależnie.

Zjawiska zachodzące podczas rekrytalizacji udarowej przebiegają zasadniczo w inny sposób niż przy konwencjonalnej, chociaż niskie temperatury do około 600°C przy szybkości nagrzewania $500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ jeszcze żadnych zmian nie wprowadzają, bowiem ferryt rekrytalizuje, zaś perlit pozostaje niezmieniony i zachowuje układ pasmowy. Dalszy wzrost stopnia zgniotu (70 i 90%), wzrost temperatury oraz szybkości nagrzewania powyżej $500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ powodują równoczesne zmiany ferrytu i perlitu. Struktura zmienia się całkowicie, gdyż obok drobnych ziarn zrekrystalizowanego ferrytu występuje skoagulowany cementyt perlitu, przy czym perlit rozmieszczony jest na ogół równomiernie (rys. 6 i 7). Ta drobnoziarnista struktura ferrytu, z równomiernie rozłożonym perlitem częściowo ziarnistym, zapewnia wysokie własności wytrzymałościowe i dobre własności plastyczne.

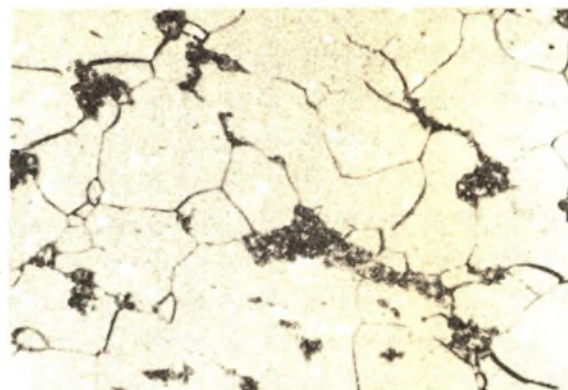
Na podstawie rentgenograficznych badań tekstur ustalono, że próbki po zgnioście posiadały teksturę o ułożeniu $[111]$, $[110]$ (rys. 8). Po wyżarzaniu konwencjonalnym ferryt wykazuje wyraźną teksturę rekrytalizacji $[111]$, $[112]$ (rys. 9) różną od tekstury zgniotu. W miarę wzrostu szybkości nagrzewania obserwuje się osłabienie tekstury rekrytalizacji a po rekrytalizacji udarowej z szybkością $4000^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ pozostają tylko jej ślady (rys. 10).

Z przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

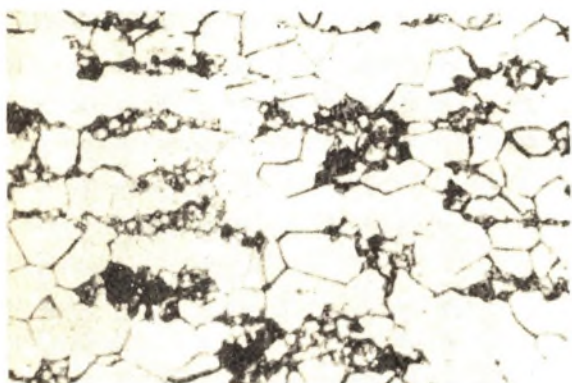
1. Na proces rekrytalizacji zgniotowej stali węglowej ferrytyczno-perlitycznej szybkość nagrzewania wywiera istotny wpływ.



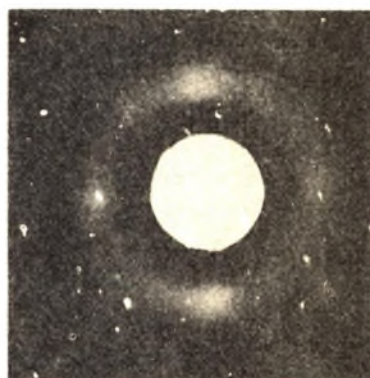
Rys. 5



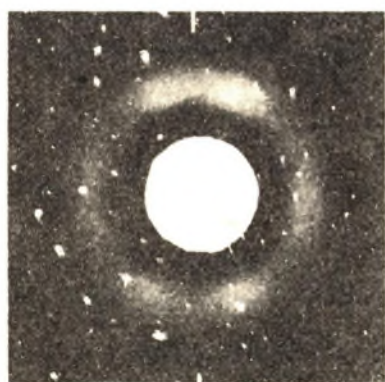
Rys. 6



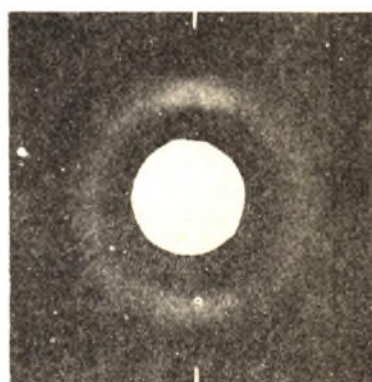
Rys. 7



Rys. 8



Rys. 9



Rys. 10

Opis struktur i rentgenogramów

Nr rys.	Obróbka cieplna	Draw.	Struktura pod mikroskopem	Powiększenie
5	Rekrystalizacja konwencjonalna w temperaturze 670°C	Nital	Struktura stali węglowej 0,16%C po zgnioocie 30% i rekrystalizacji konwencjonalnej. Zrekrystalizowane ziarna ferrytu z perlitem w układzie pasmowym	500x
6	Rekrystalizacja udarowa, temperatura 720°C $v = 1000^{\circ}\text{C}/\text{sek}$	Nital	Struktura stali po zgnioocie 70% rekrystalizowanej udarowo. Ferryt z perlitem. Perlit z cementytem skoagulowanym	500x
7	Rekrystalizacja udarowa, temperatura 720°C $v = 4000^{\circ}\text{C}/\text{sek}$	Nital	Struktura stali po zgnioocie 90% i rekrystalizacji udarowej. Zrekrystalizowany ferryt z perlitem skoagulowanym	500x
8			Teksturogram próbki po zgnioocie 90%. Cztery lokalne rozjaśnienia na obwodzie prążka (100). Tekstura zgniotu	
9	Rekrystalizacja konwencjonalna		Teksturogram próbki po zgnioocie 90% i rekrystalizacji konwencjonalnej. Refleks (100) wykazuje sześć lokalnych rozjaśnień - tekstura rekrystalizacji	
10	Rekrystalizacja udarowa		Teksturogram próbki po zgnioocie 90% i rekrystalizacji udarowej. Ślady tekstury rekrystalizacji	

2. Podczas nagrzewania konwencjonalnego zachodzi oddzielnie rekrytalizacja ferrytu zaś zmiany w perlicie zachodzą tylko dla najwyższych zgniotów. Perlit posiada nadal układ pasmowy. Analogicznie zachodzą zjawiska dla zgniotów do 30% przy nagrzewaniu z szybkością do 500°C/sek.

3. Szybkości nagrzewania powyżej 500°C/sek powodują równoczesną rekrytalizację ferrytu i zmiany w perlicie.

4. Rekrytalizacja udarowa stali niskowęglowej jest warunkowana przekroczeniem szybkości nagrzewania 500°C/sek.

5. Stal ferrytyczno-perlityczna o zawartości 0,16%C poddana rekrytalizacji udarowej wykazuje:

- a) własności wytrzymałościowe wyższe od własności stali rekrytalizowanej konwencjonalnie - a w szczególności: R_m wyższe o 15 kG/mm², zaś twardość o około 30 HV;
- b) własności plastyczne odpowiadające własnościom stali rekrytalizowanej konwencjonalnie;
- c) drobnoziarnistą strukturę ferrytu z równomiernie rozłożonym perlitem ziarnistym;
- d) niemal całkowity zanik tekstury rekrytalizacji w miarę wzrostu szybkości nagrzewania;

6. Wyżarzanie udarowe ma duże znaczenie przemysłowe ze względu na znaczne skrócenie procesu rekrytalizacji, otrzymanie korzystnych własności mechanicznych i możliwość prowadzenia ciągłej obróbki cieplnej.

LITERATURA

- [1] Iwanow W.I., Osipow K.A.: Wozwrat i rekrytalizacja w metaleach pri bystrom nagrewje. Moskwa 1964 r.
- [2] Staub F., Cieślak Ł.: Archiwum Hutnictwa. T. VII, 1962, str. 333.

- [3] Staub F., Cieślak Ł.: Hutnik nr 9, 1965, str. 315.
- [4] Smith C.S.: Trans. AIME v 175, 1948 r., str. 15.
- [5] Wendorff Z.: Zeszyty Naukowe AGH nr 2, 1954, str. 47.
- [6] Zimin N.W.: Fizika Metallow i Metallowiedenje, t. 20, 1965, z. 2, str. 265.

РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПРИ СКОРОСТНЫХ НАГРЕВАХ
ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

Резюме

Металлографическими и рентгенографическими методами определялись изменения структуры в процессе рекристаллизации при быстром нагреве углеродистой стали с различными степенями предварительного наклепа и их влияние на механические свойства.

Процесс рекристаллизации ферритно-перлитной стали при скоростным и медленном нагреве не протекает одинаково. Изученные механические свойства стали выше, чем при медленном нагреве, пластические не изменяются.

DIE BESCHLEUNIGTE REKRISTALLISATION EINES
FERRIT-PERLITISCHEN STAHL

Zusammenfassung

Metallographische und Röntgenstrukturelle Untersuchungen an einem Kohlenstoffstahl mit der Ferrit und Perlitstruktur nach beschleunigter Rekristallisation erwies den Einfluss des Kaltverformungsgrades auf die mechanischen Eigenschaften. Besonders ist die Zugfestigkeit grösser im Vergleich zur konventioneller Rekristallisation wobei plastische Eigenschaften dieselben verbleiben.