

FRYDERYK STAUB, ŁUCJA CIEŚLAK

DANUTA SZEWIECZEK

Katedra Metaloznawstwa

WPLYW SZYBKOŚCI NAGRZEWANIA NA REKRYSYALIZACJĘ
STALI NISKOWĘGLOWEJ Poddanej małym zgniotom

Streszczenie. Badano wpływ szybkości nagrzewania na krytyczny stopień zgniotu oraz wielkość ziarn stali niskowęglowej poddanej małym zgniotom. Wykazano że położenie krytycznego stopnia zgniotu zależy od szybkości nagrzewania i z jej wzrostem przemieszcza się w stronę mniejszych zgniotów. Ponadto wzrost szybkości nagrzewania zmniejsza wpływ stopnia zgniotu na wielkość zrekrystalizowanego ziarna co prowadzi do otrzymania drobnoziarnistej i jednorodnej pod względem wielkości ziarna struktury.

Przegląd piśmiennictwa

W czasie przeróbki plastycznej na zimno część energii mechanicznej zużytej na odkształcenie zostaje zatrzymana w metalu w postaci różnego rodzaju defektów, reszta zaś zmienia się w ciepło.

Zatrzymana energia czyni odkształcony metal niestabilnym[1]. Proces, w czasie którego metal ze stanu niestabilnego przechodzi w stabilny określa się mianem rekrysalizacji, która przebiega poprzez szereg stadiów pośrednich jak: nawrót, rekrysalizacja pierwotna, rekrysalizacja wtórna. Złożona zależność rekrysalizacji od wielu czynników powoduje jej skomplikowany przebieg.

Zjawiska towarzyszące wyżarzaniu rekrysalizującemu w metalach odkształconych z niewielkim stopniem zgniotu nie przebiegają jednakowo.

Wyżarzaniu metalu o zgnioście podkrytycznym towarzyszy zjawisko poligonizacji. Energia zatrzymana w czasie zgniotu ze

stopniem podkrytycznym jest w obszarach o maksymalnej wartości tak niska, że zarodkowanie w normalnych warunkach nagrzewania nie zachodzi względnie wymaga bardzo dużych energii aktywacji [2, 3, 4]. Odnośnie zjawisk towarzyszących wyżarzaniu rekryystalizującemu metalu odkształconego ze stopniem krytycznym brak jednolitego poglądu.

Powstawanie maksimum na krzywej zależności wielkości zrekrystalizowanego ziarna od stopnia gniotu jest interpretowane w różny sposób.

Najbardziej rozpowszechniony jest pogląd zawarty w klasycznej definicji wyżarzania rekryystalizującego, wiążący powstawanie gruboziarnistej struktury z tworzeniem się zarodków i ich wzrostem.

Ilość obszarów, w których mogą powstać zarodki rekryystalizacji jest bardzo mała, stąd wielkość powstających ziarn jest duża [5].

Inni autorzy [6] wiążą nadmierną skłonność do rozrostu ziarn po zgnioście krytycznym z niejednorodnością odkształcenia w materiale polikrystalicznym. Ziarna korzystniej zorientowane odkształcone w pierwszej kolejności są dzielone poprzez linie poślizgów na większą ilość ziarn drobnych. W rezultacie po odkształceniu występują ziarna o zróżnicowanej wielkości. Podczas wyżarzania, drobne ziarna jako mniej stabilne zostają pochłonięte przez dużo mniej zdeformowane, które w ten sposób jeszcze bardziej zwiększają swoje wymiary.

W pracach [7, 8] wykazano, że gwałtowny rozrost ziarn po zgnioście krytycznym odbywa się bez zarodkowania drogą rozrostu ziarn. Podstawowym bodźcem rozrostu ziarn jest różnica energii sprężystej w obszarach sąsiadujących ze sobą ziarn. W miarę rozrostu ziarn różnica w wielkości energii sprężystej zmniejsza się i wówczas napędową siłą rozrostu pozostaje dążność do obniżenia energii powierzchniowej, co wiąże się ze zmniejszeniem szybkości przemieszczania się granic ziarn.

Pogląd ten zdaje się być najbardziej przekonujący, świadczą o tym następujące potwierdzone doświadczalne fakty.

Duża szybkość przemieszczania się granic ziarn w początkowym stadium nagrzewania i kilkakrotne jej obniżenie w miarę rozrostu ziarn oraz brak przemieszczania się granic ziarn do środków ich krzywizn.

Rekrytalizacja przeprowadzona po zgniotach przewyższających nieco zgniot krytyczny przebiega drogą zarodkowania oraz rozrostu ziarn. W miarę wzrostu stopnia zgniotu decydującym staje się zarodkowanie [9].

W licznych pracach z ostatnich lat wykazano możliwość uzyskania szeregu cennych danych odnośnie procesów towarzyszących wyżarzaniu rekrytalizującemu po przeróbce plastycznej na zimno.

Osiąga się to drogą zastąpienia nagrzewania konwencjonalnego przez udarowe [10]. W związku z powyższym należy również oczekiwać zmian w procesie rekrytalizacji po małych zgniotach.

2. Badania własne

Celem pracy było określenie wpływu szybkości nagrzewania na krystaliczny stopień zgniotu stali niskowęglowej.

Do badań użyto taśmy ze stali niskowęglowej o składzie chemicznym podanym w tablicy 1, walcowanej na zimno z następującymi zgniotami 1,6, 2,6, 4,0, 5,6, 7,0, 8,5, 9,5 oraz 10,5%. Wielkość ziarna materiału c strukturze wyjściowej wynosiła $D_{gr} = 15\mu$.

Tablica 1

Skład chemiczny taśmy ze stali niskowęglowej użytej do badań

Składnik w %							
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu
0,05	0,12	0,09	0,01	0,032	0,01	0,01	0,07

Obróbka cieplna obejmowała wyżarzanie konwencjonalne i udarowe.

Parametry obróbki cieplnej określono na podstawie uprzednio przeprowadzonych badań wstępnych. Wyżarzanie udarowe prowadzono w temperaturze 800°C przy szybkościach nagrzewania: 500,

1000, 2250, 3500 i 5000^oC/sek z wygrzaniem izotermicznym wynoszącym 15 sek., zaś konwencjonalnie w tej samej temperaturze w czasie 30 min.

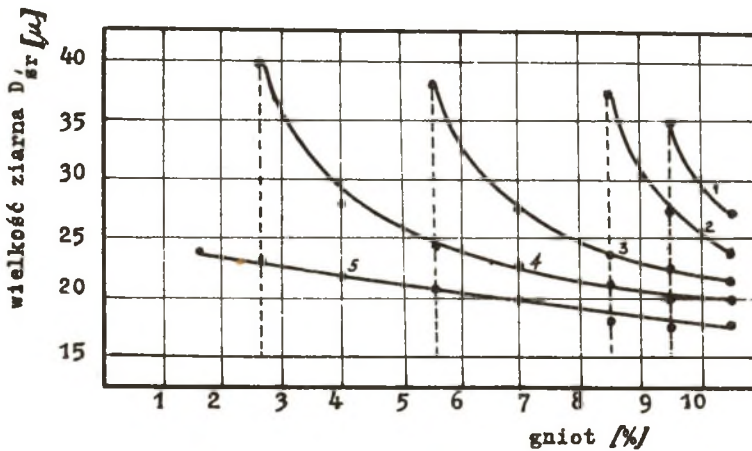
Opis urządzeń do grzania oraz rejestrowania temperatury podczas wyżarzania udarowego zamieszczono w pracy [11].

2.1. Wyniki badań i ich dyskusja

Zmiany zachodzące po rekrytalizacji konwencjonalnej i udarowej rejestrowano metodami:

- a) pomiaru wielkości ziarn metodą przeciętnej średnicy,
- b) analizy statystycznej,
- c) badań metalograficznych.

Wyniki pomiaru wielkości ziarn próbek wyżarzonych konwencjonalnie i udarowo w zależności od stopnia zgniotu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zmiana wielkości ziarna w zależności od stopnia zgniotu oraz zmiennej szybkości nagrzewania po wyżarzaniu rekrytalizującym w temperaturze 800^oC

- | | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1 - $V=0,3^{\circ}\text{C}/\text{sek}$, $\tau = 30\text{min}$ | - wyżarzanie konwencjonalne |
| 2 - $V=500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$, $\tau = 15\text{sek}$ | - wyżarzanie udarowe |
| 3 - $V=2250^{\circ}\text{C}/\text{sek}$, $\tau = 15\text{sek}$ | |
| 4 - $V=3500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$, $\tau = 15\text{sek}$ | |
| 5 - $V=5000^{\circ}\text{C}/\text{sek}$, $\tau = 15\text{sek}$ | |

W warunkach nagrzewania konwencjonalnego w temperaturze 800°C w czasie 30 min krytyczny stopień zgniotu wyniósł 9,5% rys. 1, krzywa 1.

Wyżarzanie udarowe w temperaturze 800°C w czasie 15 sek. charakteryzują się gwałtownym rozrostem ziarn w zakresie szybkości nagrzewania do $3500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$. Różnym szybkościom nagrzewania odpowiadają inne wartości zgniotu krytycznego $500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ - 8,5%, $2250^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ - 5,6% oraz $3500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ - 2,6% rys. 1 krzywe 2, 3, 4. Natomiast przy szybkości nagrzewania $5000^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ gwałtownego rozrostu ziarn charakteryzującego zgniot krytyczny już się nie obserwuje rys. 1, krzywa 5.

Wartość zgniotu krytycznego nie jest więc wartością stałą. W zależności od warunków wyżarzania wartość ta zmienia swoje położenie. Wzrost szybkości nagrzewania przesuwa wartość zgniotu krytycznego w stronę zerowych odkształceń. Niższe wartości zgniotu krytycznego przy wzroście szybkości nagrzewania związane są prawdopodobnie z zahamowaniem nawrotu i połączeniem go z rekrytalizacją [10].

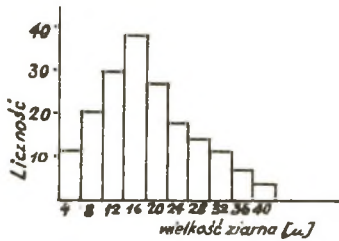
Zjawisko to zachodzi tym bardziej im większa jest szybkość nagrzewania. Umożliwia to rekrytalizację w próbkach o takim stopniu zgniotu, w którym w czasie nagrzewania konwencjonalnego nie zachodziła.

Po zgniotach większych od krytycznych wielkość ziarna ze wzrostem szybkości nagrzewania maleje (rys. 1).

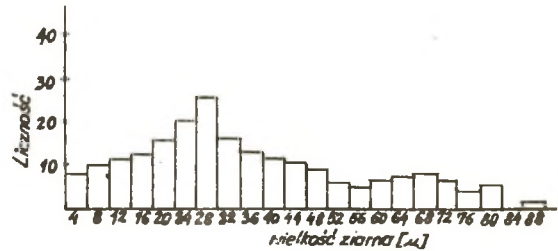
Po zgniotach podkrytycznych zarówno wyżarzanie konwencjonalne jak i udarowe nie powoduje żadnych zmian w wielkości ziarna.

* Sporządzenie histogramów wielkości zrekrystalizowanego ziarna w próbkach o określonych zgniotach w zależności od liczby ziarn jednakowej wielkości (liczności) oraz ich analiza pozwoliła ustalić kilka zależności.

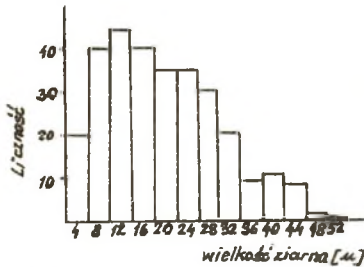
Rozłożenie wielkości ziarna w zależności od liczności w próbce przed zgniotem ma charakter rozkładu normalnego (rys. 2). Po wyżarzaniu rekrytalizującym zarówno konwencjonalnym jak i udarowym zarys rozkładu normalnego zostaje naruszony. Dla próbek o zgniotach krytycznych charakter rozkładu wielkości ziarn w zależności od liczności przedstawiono przykładowo na rys. 3.



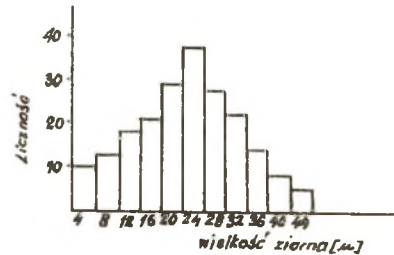
Rys. 2. Rozkład ziarn w zależności od ich wielkości
zgniot - 0%, $D_{\text{sr}} - 15 \mu$



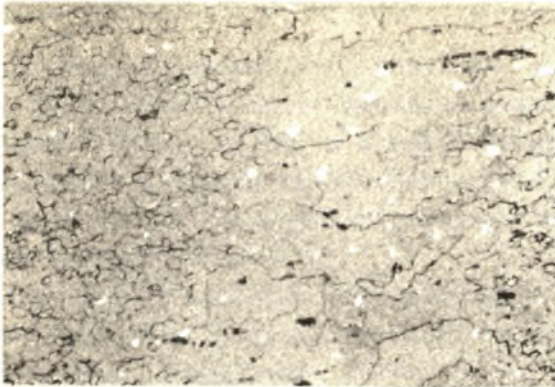
Rys. 3. Rozkład ziarn w zależności od ich wielkości
zgniot - 8,5%, temp. - 880°C , $\tau - 15$ sek, $V - 500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$, $D_{\text{sr}} - 35,4 \mu$



Rys. 4. Rozkład ziarn w zależności od ich wielkości
zgniot - 8,5%, temp. - 800°C ,
 $\tau - 15$ sek, $V - 2250^{\circ}\text{C}/\text{sek}$,
 $D_{\text{sr}} - 23,6 \mu$



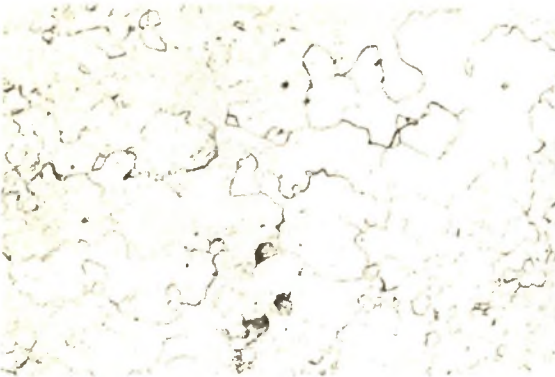
Rys. 5. Rozkład ziarn w zależności od ich wielkości
zgniot - 10,5%, temp. - 800°C ,
 $\tau - 15$ sek, $V - 3500^{\circ}\text{C}/\text{sek}$,
 $D_{\text{sr}} - 20 \mu$



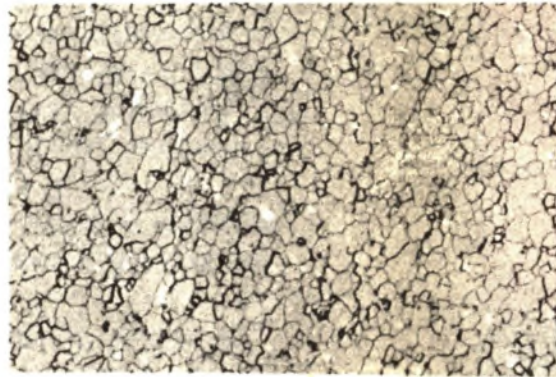
Rys. 6



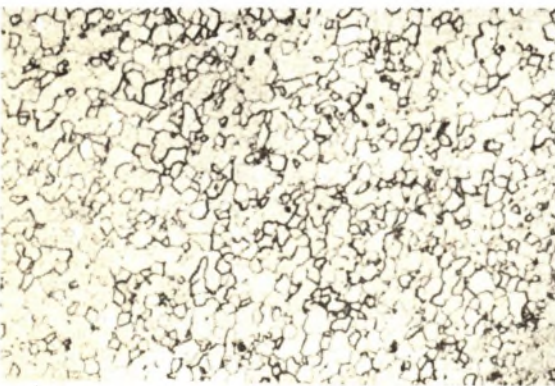
Rys. 7



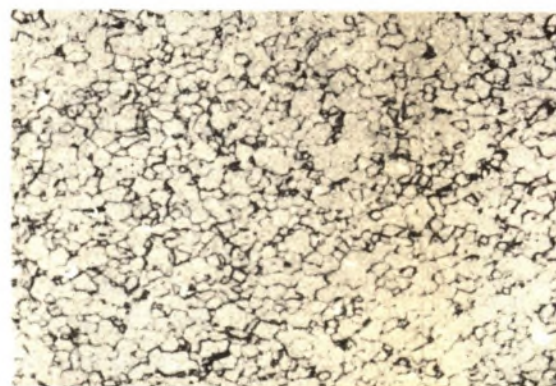
Rys. 8



Rys. 9



Rys. 10



Rys. 11

Nr rys.	Obróbka cieplna	Trawienie	Struktura	Powiększenie
6	Rekrystalizacja udarowa 800°C/15 sek V - 500°C/sek zgniot - 8,5%	Nital	Ziarna ferrytu o zmiennej wielkości. Duże ziarna o granicach postrzępionych, miejscami z wyraźnymi "językami"	100 x
7	Rekrystalizacja udarowa 800°C/15sek V - 3500°C/sek zgniot - 2,6%	Nital	Ziarna ferrytu o zmiennej wielkości. Duże ziarna o postrzępionych granicach	100 x
8	Rekrystalizacja udarowa 800°C/15sek V - 500°C/sek zgniot - 9,5%	Nital	Ziarna ferrytu o zmiennej wielkości. Na granicach ziarn o brzegach postrzępionych rozłożone zarodki nowych	100 x
9	Rekrystalizacja udarowa 800°C/15sek V - 2250°C/sek zgniot - 9,5%	Nital	Ziarna ferrytu o równomiernej wielkości	100 x
10	Rekrystalizacja udarowa 800°C/15 sek V - 3500°C/sek zgniot - 9,5%	Nital	Opis jak na rys. 9	100 x
11	Rekrystalizacja udarowa 800°C/15 sek V - 5000°C/sek zgniot - 9,5%	Nital	Opis jak na rys. 9	100 x

Liczność ziarn małych zmniejsza się, a pojawiają się w większej ilości ziarna duże, znacznie przewyższające maksymalną wielkość ziarn w próbce o strukturze wyjściowej. Ten zarys histogramów w pewnej mierze świadczy o tym, że rekrytalizacja po gniotach krytycznych przebiega bez zarodkowania, a więc drogą rozrostu ziarn.

W przypadku zgniótów nadkrytycznych histogramy zaczynają przybierać inny zarys. Nieznaczny wzrost zgniotu ponad krytyczny zwiększa liczbę ziarn małych (rys. 4), zaś dalsze podwyższenie stopnia zgniotu prowadzi do zmniejszenia liczby ziarn bardzo małych jak i dużych, natomiast liczba ziarn średniej wielkości rośnie. Histogramy przybierają znowu zarys rozkładu normalnego (rys. 5). Ta zmiana w obrazach histogramów świadczy o tym, że obok rozrostu ziarn zachodzi zjawisko zarodkowania i to tym wyraźniej im większy stopień zgniotu. Charakter jakościowy histogramów w poszczególnych zakresach jest jednakowy dla różnych szybkości nagrzewania, zmienia się tylko średnia wielkość ziarna.

Badania metalograficzne w próbkach odkształconych z zniotem podkrytycznym nie wykazały żadnych zmian w zakresie powiększeń na mikroskopie optycznym.

Zarys granic ziarn nie zmienił się w stosunku do granic w próbce o strukturze wyjściowej. Próbki o zniotach krytycznych posiadają ziarna kilka razy większe aniżeli ziarna wyjściowe. Granice ziarn są kręte (postrzępione) oraz miejscami posiadają wyraźne "języki" (rys. 6, 7). Wielkość ziarna jest bardzo nierównomierna. Gwałtowny rozrost ziarn odbywa się drogą frontального przemieszczania granic ziarn.

Szybkość przemieszczania na różnych odcinkach granicy jest nierównomierna i miejscami powstają wyraźne "języki" rys. 6. Gwałtowny rozrost ziarn jak to wynika z zarysu granic ziarn odbywa się bez zarodkowania co zresztą pozwoliły stwierdzić już histogramy.

Związane to jest z dużą niejednorodnością odkształcenia i rozrzutem energii sprężystej oddzielnych ziarn po zniotach krytycznych. Po zniotach przewyższających nieco wartość kry-

tyczną zmiany w strukturze zachodzą w dwojaki sposób. Obok rozrostu o którym świadczą granice postrzęplone obserwuje się rozłożone na granicach ziarn wyjściowych zarodki nowych (rys. 8). Zwiększenie stopnia zgniotu powoduje powstawanie nowych ziarn tylko drogą zarodkowania. Ze wzrostem zgniotu wielkość ziarn maleje. Wszystkie zaobserwowane zjawiska występują zarówno w próbkach zrekrystalizowanych konwencjonalnie jak i udarowo. Wpływ szybkości nagrzewania po zgniotach nadkrytycznych charakteryzuje się powstawaniem mniejszego - bardziej równomiernego pod względem wielkości ziarna (rys. 9, 10, 11).

Z przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

- 1) Wielkość zgniotu krytycznego nie jest wartością stałą. Zależy ona od szybkości nagrzewania i z jej wzrostem przesuwają się w stronę mniejszych zgniotów.
- 2) Wyżarzanie rekrytalizujące po zgniotach krytycznych odbywa się drogą rozrostu ziarn.
- 3) Rekrytalizacja po zgniotach nadkrytycznych zachodzi poprzez rozrost ziarn oraz zarodkowanie.
- 4) Wielkość ziarn po zgniotach nadkrytycznych jest uzależniona od szybkości nagrzewania i ze wzrostem jej maleje.
- 5) Wyżarzanie udarowe może być wykorzystane w celu uniknięcia gwałtownego rozrostu ziarn przy rekrytalizacji po zgniotach krytycznych.

LITERATURA

- [1] Mc Lean D.: Mechanical Properties of Metals tłumacz. Moskwa 1966.
- [2] Kuhlman D., Masing G., Raffelsieper S.: Ztschr. Metallkunde 40, 1948, str. 241.
- [3] Cottrell A.H., Aytakin V.: Inst. Metals 77, 1950, str. 389.
- [4] Cahn R.W.: Proc. Phys. Soc. A 63, 1950, str. 323.

- [5] Beck P.A.: Adv. in Physics 3, 1954, str. 245.
- [6] Gulajew A.R.: Metalłowiedenje, Oborongiz 1961.
- [7] Gorelik S.S.; Granik G.J.: Fiz. Metałł, Metałł 7, t. 3, 1959 str. 426.
- [8] Gorelik S.S., Kaljanowa S.M., Rozenberg W.M.: Fiz. Metałł, Metałł, 10 t, 2 1960, str. 251.
- [9] Dehlinger U.: Ztschr. Metallkunde 40, 1961, str. 44.
- [10] Iwanow W.I., Osipow K.A.: Wozwrat i rekrytalizacja w metałłach pri bystrom nagrewe moskwa 1964.
- [11] Cieślak Ł.: Komitet Hutnictwa PAN - Zakopane kwiecień 1966, str. 23.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ПРОЦЕСС РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ
МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ МАЛЫХ СТЕПЕНЯХ ДЕФОРМАЦИИ

Резюме

Исследовано влияние скорости нагрева на критическую степень деформации и на величину зерен малоуглеродистой стали при малых степенях деформации.

Повышение скорости нагрева снижает значение критической степени деформации. Увеличение скорости нагрева снижает влияние предвапительной степени деформации на величину зерна и способствует получению более мелкозернистой и однородной по величине зерна структуры.

EINFLUSS DER ERWÄRMUNGSGESCHWINDIGKEIT
AUF DIE REKRISTALLISATION EINES STAHLES MIT
WIEDRIGEM KOHLENSTOFFGEHALT NACH SCHWACHER VERFORMUNG

Zusammenfassung

Es wurden Untersuchungen über den Einfluss der Erwärmungsgeschwindigkeit (beschleunigte Rekristallisation) auf den kritischen Verformungsgrad sowie Korngrösse eines Stahles mit niedrigen Kohlenstoffgehalt nach kleiner Verformung durchgeführt. Man stellte fest, dass der kritische Verformungsgrad von der Erwärmungsgeschwindigkeit beeinflusst, und mit ihrer Erhöhung zu kleineren Verformungsgraden verschoben wird. Ausserdem eine Erhöhung der Erwärmungsgeschwindigkeit vermindert den Einfluss des Kaltverformungsgrades auf die Korngrösse des rekristallisierten Stahles, was das Erhalten eines kleinen und gleichmassigen Kornes ermöglicht.