

Rekristalizacija jekel za hladno masivno preoblikovanje

UDK: 669.14.018.233-174
ASM/SLA: CNg, G5, N5

Aleksander Kveder, Anton Razinger

Raziskave utrjevanja in rekristalizacije jekel za masivno preoblikovanje: Ugotovili smo eksponente utrjevanja, spodnje rekristalizacijske temperature in kritične deformacije. Velika rekristalizirana zrna lahko nastajajo le pri nelegiranih jeklih JMP 10 in JMP 15, vendar niso večja od 5,5 po ASTM. Žarjenje nad Ac₁ točko ni priporočljivo. Raziskali smo tudi dva hladno preoblikovana izdelka.

UVOD

Masivno preoblikovanje v hladnem je postopek, ki v tehnologiji preoblikovanja zavzema čedalje vidnejše mesto tudi v SFRJ. Odlikuje ga vrsta prednosti pred drugimi postopki, npr. utopnim kovanjem ali odrezavanjem. Manj je delovnih operacij, izdelek je cenejši, štedi se z materialom in tolerance mer so zelo ozke. Vendar ima tudi ta način preoblikovanja svoje zahteve: jekla za masivno preoblikovanje morajo biti posebne vrste, homogena, zelo čista, brez napak na površini in ustrezno toplotno obdelana. Za tehnologijo preoblikovanja je potrebno poznati preoblikovalne sposobnosti teh jekel, preoblikovalne trdnosti in podobno.

Železarna Jesenice proizvaja v družini JMP štiri jekla, ki v glavnem že zadovoljujejo potrebe po teh jeklih. Dosedanje izkušnje potrjujejo njihovo dobro kvaliteto. Prav tako so Železarna Jesenice, fakulteta za strojništvo in kovaška industrija Zreče že raziskali preoblikovalne lastnosti teh jekel in ugotovili, da ustrezajo svojemu namenu (Kuzman K., Razinger A.: Ocena sposobnosti domačih jekel za masivno preoblikovanje v hladnem, Železarski zbornik, 1973, šte. 4, str. 189 do 196).

Za ustrezno kvaliteto končnega izdelka pa ni pomembna le dobra preoblikovalna lastnost jekla, temveč tudi pravilna toplotna obdelava. Pred preoblikovanjem mora biti jeklo dobro omehčano, nato se pri preoblikovanju utrjuje in treba ga je med operacijami ali na koncu ponovno omehčati. Postopek vmesnega ali končnega mehčanja je rekristalizacijsko žarjenje.

Pri rekristalizacijskem žarjenju je treba poznati pravilno temperaturo in čas žarjenja. Upoštevati je treba še neenakomernost stopnje deformacije, velikost kristalnega zrna po rekristalizaciji, hitrost segrevanja in drugo. Namen te raziskave je bil ugotoviti soodvisnost teh parametrov rekristalizacijskega žarjenja.

EKSPERIMENTALNI DEL

MATERIALI IN NAČIN RAZISKOVANJA

Jekla: Preiskali smo vsa štiri jekla za masivno preoblikovanje, ki jih je osvojila Železarna Jesenice in jih že proizvaja. V tabeli 1 so navedene njihove oznake in zagotovljene kemične sestave.

Tabela 1: Vrste jekel in kemične sestave

Oznaka jekla (ZJ)	Podobno jeklo po JUS	Količina elementov v %				
		C	Si	Mn	Cr	Al
JMP 10	Č. 1121	0,06	max.	0,25	max.	0,025
		0,12	0,15	0,50	0,12	0,050
JPM 15	Č. 1221	0,12	max.	0,25	max.	0,025
		0,18	0,15	0,50	0,12	0,050
JPM 50 Cr	Č. 4120	0,12	0,20	0,40	0,50	0,015
		0,18	0,30	0,50	0,70	0,025
JMP 80 MnCr	Č. 4320	0,14	0,20	1,00	0,80	0,015
		0,19	0,30	1,20	1,00	0,025

Količina škodljivih elementov je omejena; tako sme biti največ 0,025 % S, 0,020 % P, 0,10 % Ni, 0,20 % Cu, 0,020 % Sn in 100 ppm N.

Ustrezne palice teh jekel smo mehko žarili z nihanjem temperature med 680 in 750° C. Vsa jekla so tako dobila vsaj 90-odstotno sferoidizirano strukturo.

Vzorci so bili valjčki premera 9 mm in višine 10 mm.

Deformacije so bile logaritmčne po enačbi

$$\epsilon = \ln \left(\frac{h_0}{h} \right) \cdot 100 \quad (\%)$$

h_0 = začetna višina valja

h = višina valja po deformaciji

dr. Aleksander Kveder je samostojni raziskovalec na Metalurškem inštitutu v Ljubljani

mgr. Anton Razinger je višji strokovni sodelavec v raziskovalnem oddelku Železarne Jesenice

Uporabili smo naslednje deformacije:

ϵ (%)	h (mm)
10	9,05
15	8,61
20	8,19
50	6,07
100	3,68
150	2,23

Vzorci smo stiskali na stiskalnem delu 30-tonskega nateznega stroja. Zgornje in spodnje površine smo mazali z molycote pasto. Za vsako deformacijo smo izdelali poseben obroč ustrezne debeline, ki ni dopuščal nadaljne deformacije. Tako so imeli vsi vzorci predvidene deformacije zares enake deformacije.

Vzorci smo preiskovali (metalografija, trdote) na sredini preseka valja v vzdolžni osi.

Rekristalizacijsko smo vzorce žarili v komorni peči. Temperaturo smo merili s kompenzatorjem, nihanje ni bilo večje od $\pm 2^\circ \text{C}$.

REZULTATI RAZISKAV

Utrjevanje JMP jekel

Na sliki 1 so prikazane krivulje utrjevanja JMP jekel, to je odvisnost trdote od stopnje deformacije. V logaritmičnih koordinatah je ta odvisnost linearna (slika 2), kar ustreza funkciji

$$H = a \cdot \epsilon^n$$

H je trdota, a je konstanta, n pa eksponent utrjevanja. Eksponenti utrjevanja znašajo:

JMP 10	$n = 0,185$
JMP 15	$n = 0,165$
JMP 50 Cr	$n = 0,143$
JMP 80 Cr	$n = 0,145$

Opozoriti pa moramo na dejstvo, da je trdota teh jekel v rekristaliziranem stanju (pod A_{c1}) nekoliko odvisna od velikosti kristalnega zrna. To bomo še posebej obravnavali. Strukture deformiranih jekel prikazuje slika 3.

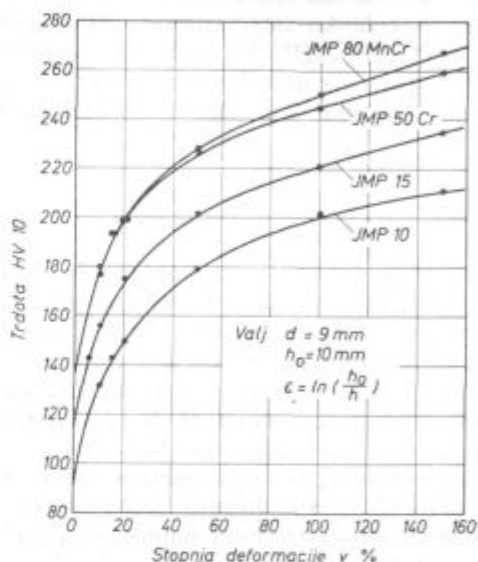
Poznavanje trdot v rekristaliziranem in deformiranem stanju se da s pridom uporabljati za določevanje stopnje ali dokončanja rekristalizacije, skupno z metalografijo, ki v nekaterih primerih ni popolnoma zanesljiva. Kot bo razvidno v poglavju o praktičnih primerih masivnega deformiranja, so te krivulje dobra osnova tudi za določanje deformacijske porazdelitve v prešancih in pri določanju tokov materiala.

Izotermična rekristalizacijska žarjenja

Serie različno deformiranih vzorcev smo dali v segreto peč. Čas žarjenja je bil različen, ker smo upoštevali, da je pri višjih temperaturah rekristalizacija hitrejša, pri nižjih pa počasnejša. Rast zrn po rekristalizaciji je brezpomembna, kar

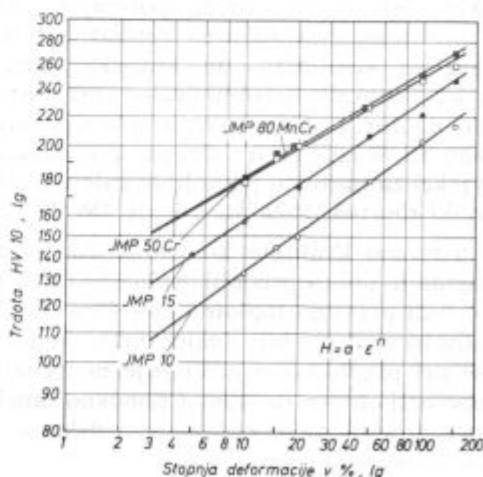
smo tudi preizkusili: žarjenje na 700°C v časih 40 min ali 10 ur da enako velikost kristalnih zrn. To je razumljivo, saj večja ali manjša količina sferoidiziranega cementita v teh jeklih močno vpliva celo na hitrost rekristalizacijskih front, katerih gonilna sila je za več redov velikosti večja od tiste za rast zrn. Uporabili smo torej naslednje čase žarjenja:

700°C	— 40 min
650°C	— 60 min
600°C	— 90 min
550°C	— 150 min
500°C	— 300 min



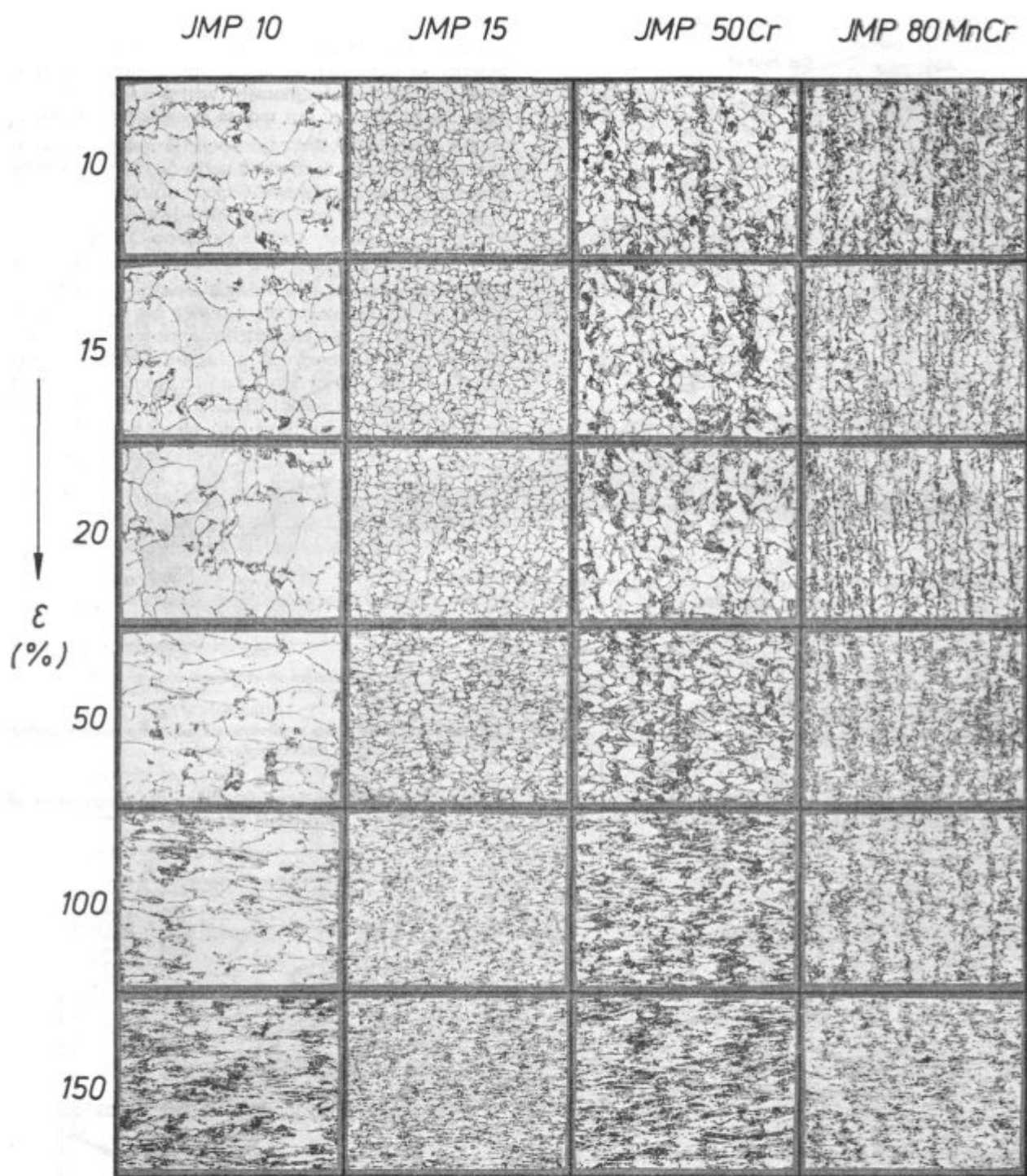
Slika 1
Odvisnost trdote JMP jekel od stopnje hladne deformacije

Fig. 1
Relationship between the JMP steel hardness and the degree of cold deformation



Slika 2
Odvisnost trdote JMP jekel od stopnje hladne deformacije

Fig. 2
Relationship between the JMP steel hardness and the degree of cold deformation



Slika 3

Strukture preiskovanih jekel po različnih stopnjah deformacije (povečanja 100×)

Fig. 3

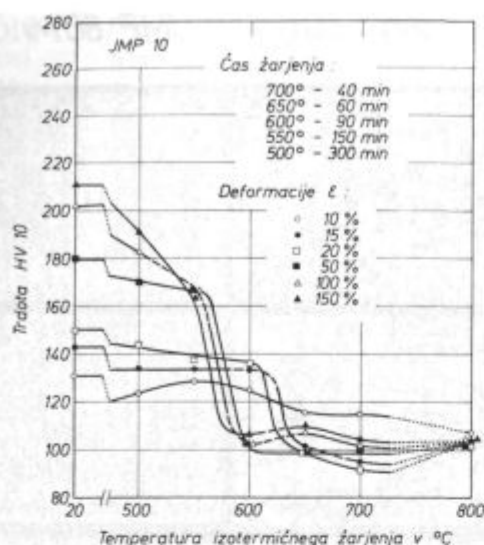
Structures of the investigated steels after various degrees of deformation (magnification 100 times)

z dodatkom 15 minut za segretje vzorcev na temperaturo.

Za določevanje rekristaliziranja vzorcev smo merili trdote in opravljali metalografske preglede, za velikosti rekristaliziranih kristalnih zrn pa smo uporabili Jeffriesovo planimetrično metodo.

Rezultate, dobljene z meritvami trdot, kažejo slike 4, 5, 6 in 7.

Jekli JMP 10 in JMP 15 se obnašata približno enako. Spodnja rekristalizacijska temperatura za deformacijo nad 50 % je 575° C, za deformacije 20 in 15 % okoli 625° C, medtem ko jekli z 10 % defor-

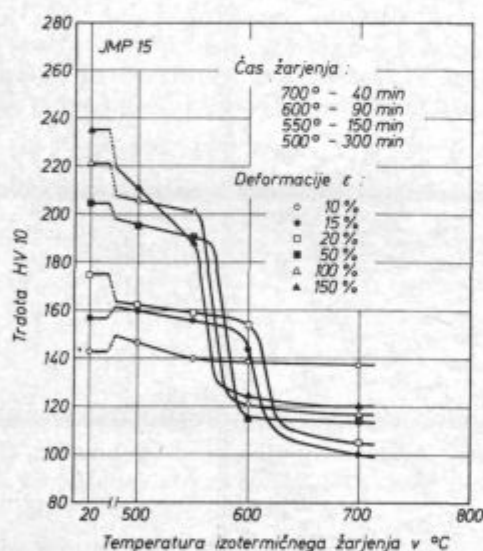


Slika 4

Trdote jekla JMP 10 v odvisnosti od temperature izotermičnega žarjenja

Fig. 4

Hardness of JMP 10 steel related to the temperature of isothermal annealing



Slika 5

Trdote jekla JMP 15 v odvisnosti od temperature izotermičnega žarjenja

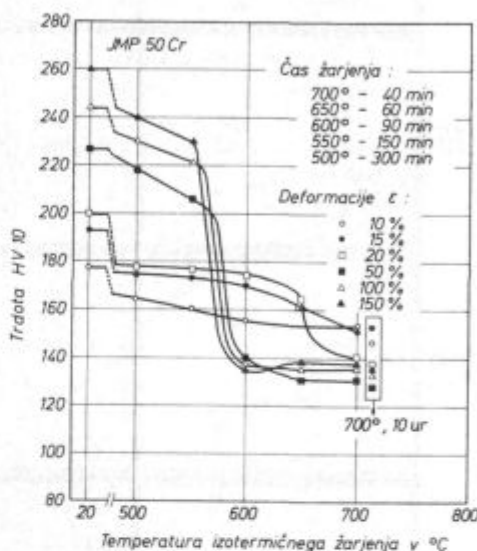
Fig. 5

Hardness of JMP 15 steel related to the temperature of isothermal annealing

macije sploh ne rekristalizirata. Rekristalizacija na 700°C je popolna (razen pri $\epsilon = 10\%$), razlike v trdoti pa so zaradi različnih velikosti kristalnih zrn. Pri deformaciji 10%, pri katerih je trdota pred žarjenjem 135 HV (JMP 10) in 143 HV (JMP 15), se med žarenjem na 700°C zniža na 115 HV (JMP 10), oziroma na 137 HV (JMP 15).

Vzorci JMP 10 smo žarili tudi na 800°C. Trdota je po tem žarjenju povprečno višja zaradi transformacije, ki povzroči nastanek lamelnega perlita. Vzorec z 10% deformacije tudi pri 800°C ne rekristalizira, vendar mu trdota še nekoliko popusti.

Pri jeklu JMP 50 Cr je spodnja rekristalizacijska temperatura za deformacije 50, 100 in 150% prav tako med 550 in 600°C.

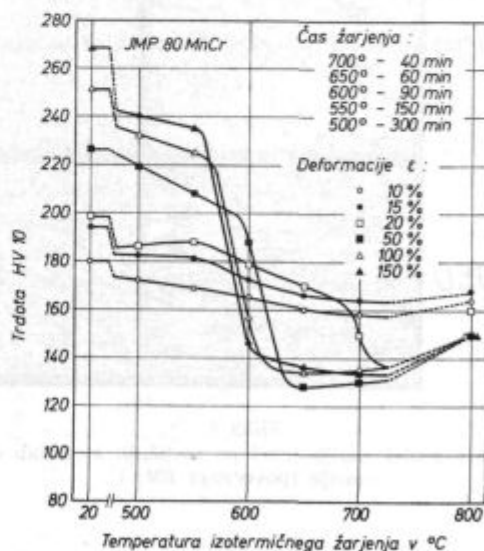


Slika 6

Trdote jekla JMP 50 Cr v odvisnosti od temperature izotermičnega žarjenja

Fig. 6

Hardness of JMP 50 Cr steel related to the temperature of isothermal annealing



Slika 7

Trdote jekla JMP 80 MnCr v odvisnosti od temperature izotermičnega žarjenja

Fig. 7

Hardness of JMP 80 Mn Cr steel related to the temperature of isothermal annealing

Pri deformaciji 20 % je opaziti začetek rekristalizacije pri 650°C, pri deformaciji 15 % nastajajo pri 700°C komaj kali, medtem ko manjše deformacije sploh ne povzročijo rekristalizacije.

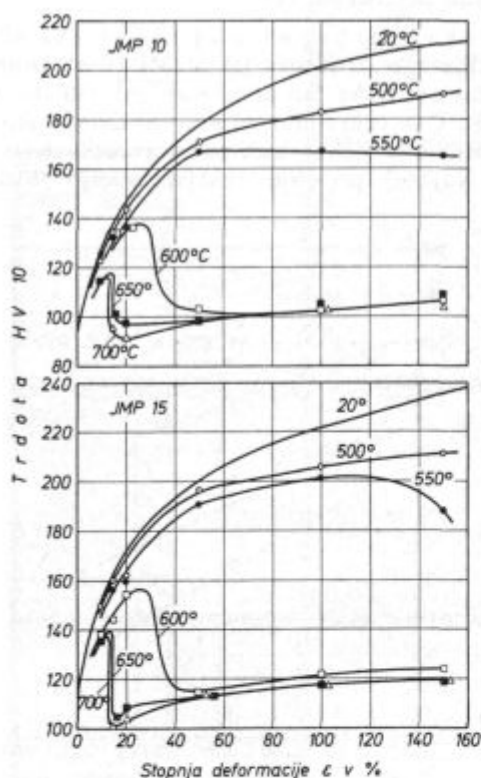
Jeklo JMP 80 MnCr začne rekristalizirati v območju 575 do 625°C, toda le pri deformacijah 50 % in večjih. Deformacija 20 % tudi pri 700°C povzroči le nepopolno rekristalizacijo, medtem ko se jeklo z manjšimi deformacijami le popušča. Žarjenje na 800°C povzroči v vseh primerih povečanje trdote zaradi nastanka prehodnih struktur.

V diagramih na slikah 8 in 9 je prikazana odvisnost trdote od stopnje deformacije po žarjenjih na različnih temperaturah. Na teh diagramih so dobro vidne minimalne deformacije za rekristalizacijo. Tipično kritično stopnjo deformacije kaže ta le jekli JMP 10 in JMP 15 pri temperaturah 650 in 700°C. Te so za obe jekli enake:

JMP 10 in 15 650°C $\epsilon_{kr} = 15\%$
 700°C $\epsilon_{kr} = 13\%$

(Pri jeklu JMP 10 in pri 700°C nastajajo kali in začetna drobna zrna tudi pri deformaciji 10 %, vendar se rekristalizacija ne nadaljuje).

Sicer pa imajo druga jekla in druge deformacije deformacijske intervale, ki povzročijo delne rekristalizacije. Ti intervali so pri jeklih in različnih temperaturah naslednji:

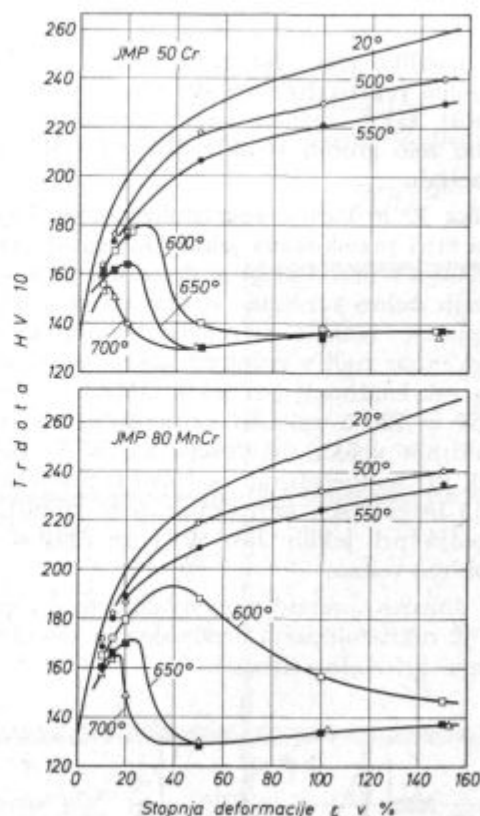


Slika 8

Trdota jekel JMP 10 in JMP 15 v odvisnosti od stopnje deformacije in temperature rekristalizacijskega žarjenja

Fig. 8

Hardness of JMP 10 and JMP 15 steel related to the degree of deformation and the temperature of the recrystallization annealing



Slika 9

Trdota jekel JMP 50 Cr in JMP 80 MnCr v odvisnosti od stopnje deformacije in temperature rekristalizacijskega žarjenja

Fig. 9

Hardness of JMP 50 Cr and JMP 80 Mn Cr steel related to the degree of deformation and the temperature of the recrystallization annealing

JMP 10 in 15	600°C	$\epsilon_{kr} = 27$ do 45 %
	650°C	$\epsilon_{kr} = 15\%$
	700°C	$\epsilon_{kr} = 13\%$
JMP 50 Cr	600°C	$\epsilon_{kr} = 33$ do 55 %
	650°C	$\epsilon_{kr} = 20$ do 40 %
	700°C	$\epsilon_{kr} = 13$ do 30 %
JMP 80 MnCr	600°C	$\epsilon_{kr} = 40$ do nad 100 %
	650°C	$\epsilon_{kr} = 25$ do 40 %
	650°C	$\epsilon_{kr} = 17$ do 30 %

Rekristalizacijski diagrami so navadno prostorske slike, ki prikazujejo medsebojne odvisnosti deformacije, temperature in velikosti kristalnih zrn. Enofazna jekla in jekla brez transformacije kažejo zelo lepe odvisnosti. Pri JMP jeklih pa je pomemben vpliv sferoidiziranih delcev cementita, ki lahko pospešujejo nastajanje kali, obenem pa močno zavirajo migracijo rekristalizacijskih mej. Zato v razmerah, ko lahko nastaja mnogo kali, nastajajo zelo drobna zrna, omejena na prostore med cementitnimi delci ali gnezdi cementitnih delcev. V razmerah slabših nukleacijskih sposobnosti (manjše deformacije, nižje temperature) pa morajo rekristalizacijske meje prehajati preko delcev in gnezdi in rekristalizacijska

hitrost je bistveno zavrta. Tako dobimo zelo nepravilno izoblikovana rekristalizirana zrna ali celo nepopolno rekristalizirane strukture. Velika pa je prednost takih razmer rekristaliziranja, da ne dobimo zelo grobih strukturni niti pri kritičnih deformacijah.

Slika 10 prikazuje rekristalizacijske diagrame za vsa štiri preiskovana jekla. Odvisnost velikosti kristalnega zrna od stopnje deformacije je v vseh primerih dobro razvidna — čim večja je stopnja deformacije, manjše je rekristalizirano kristalno zrno. Vendar tudi v primerih jasno izraženih kritičnih rekristalizacij pri jeklih JMP 10 in JMP 15 pri 650 in 700°C velikost kritičnih kristalnih zrn ni pretirano velika, saj dosega največ 5,5 do 6 po ASTM. Pri temperaturah pod 650°C pri JMP 10 in JMP 15 in pri vseh temperaturah in stopnjah deformacije pri jeklih JMP 50 Cr in JMP 80 MnCr pa dobimo vedno:

a) določen interval stopenj deformacij, pri katerih je rekristalizacija nepopolna in zato zrna ne dosežejo kritičnih velikosti,

b) velikosti zrn, ki so manjše od 8 po ASTM (povprečna površina zrn 500 μm^2 ali manjša) in tvorijo strukture, ki jih prištevamo med izredno drobnozrnat.

Pri JMP 50 Cr in JMP 80 MnCr opazimo zanimiv pojav, da največja zrna — čeprav sorazmerno še vedno zelo drobna, 8 po ASTM — dobimo na 650°C. To kaže na sorazmerno majhno hitrost nukleacije in že dovolj veliko gibljivost kristalnih mej.

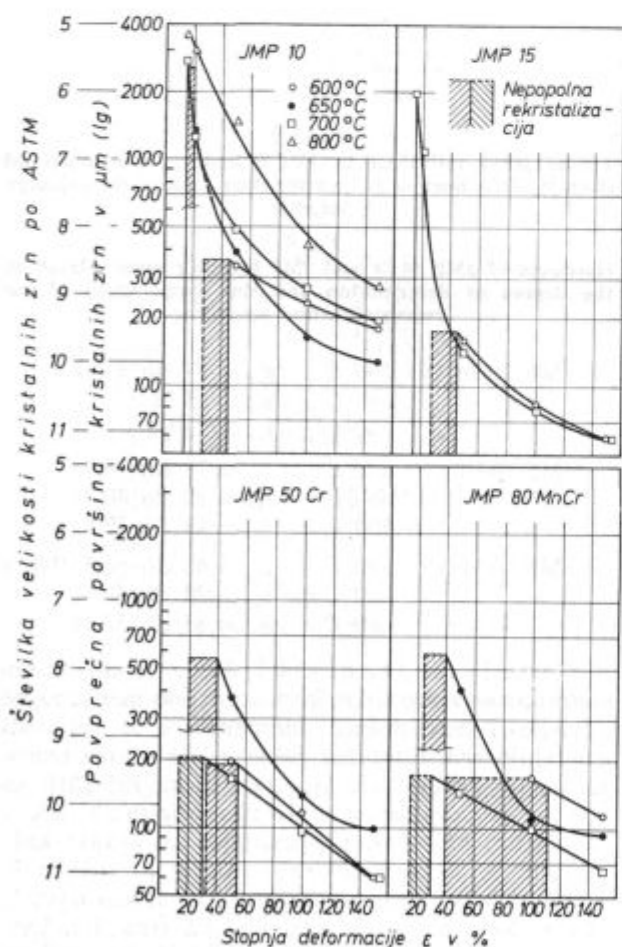
Na diagramu za jeklo JMP 10 (slika 10) je prikazana tudi krivulja za temperaturo 800°C, na kateri dobimo v splošnem največja kristalna zrna. Če upoštevamo še rezultate pri trdotah, omenjene v prejšnjem poglavju, lahko trdimo, da ta temperatura ne pride v poštev za žarjenje hladno deformiranih delov.

Omenili smo že, pa tudi iz opisanih diagramov je razvidno, da je končna trdota rekristaliziranih jekel odvisna od velikosti kristalnih zrn. To odvisnost prikazuje diagram na sliki 11. V logaritmčnih koordinatah trdote (H) in povprečne površine kristalnih zrn (F) je ta odvisnost

$$\lg H = \lg H_0 - k \lg F$$

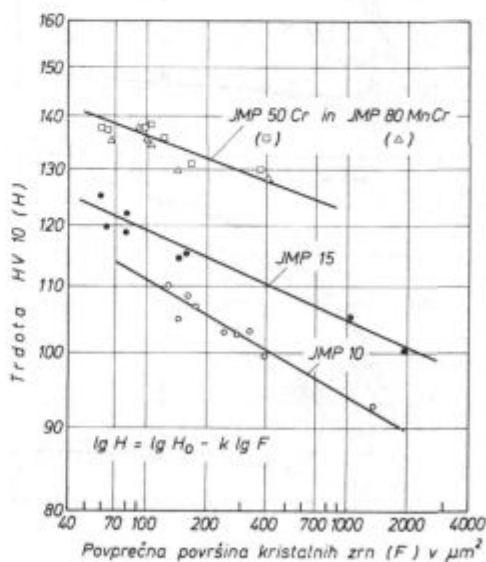
Funkcija je identična z Hall-Petchovo enačbo, ki opisuje odvisnost med mejo plastičnosti in povprečnim premerom zrn.

Metalografski posnetki. Na sliki 12 so prikazane strukture jekla JMP 10 po izotermičnih žarjenjih na temperaturah od 550 do 700°C. Na 550°C je rekristalizacija kljub dveinpolurnemu žarjenju nepopolna tudi pri največjih deformacijah. Najbolj popolno rekristalizacijo dosežemo



Slika 10
Rekristalizacijski diagrame

Fig. 10
Recrystallization diagrams



Slika 11
Odvisnost trdote rekristaliziranih jekel od velikosti kristalnih zrn

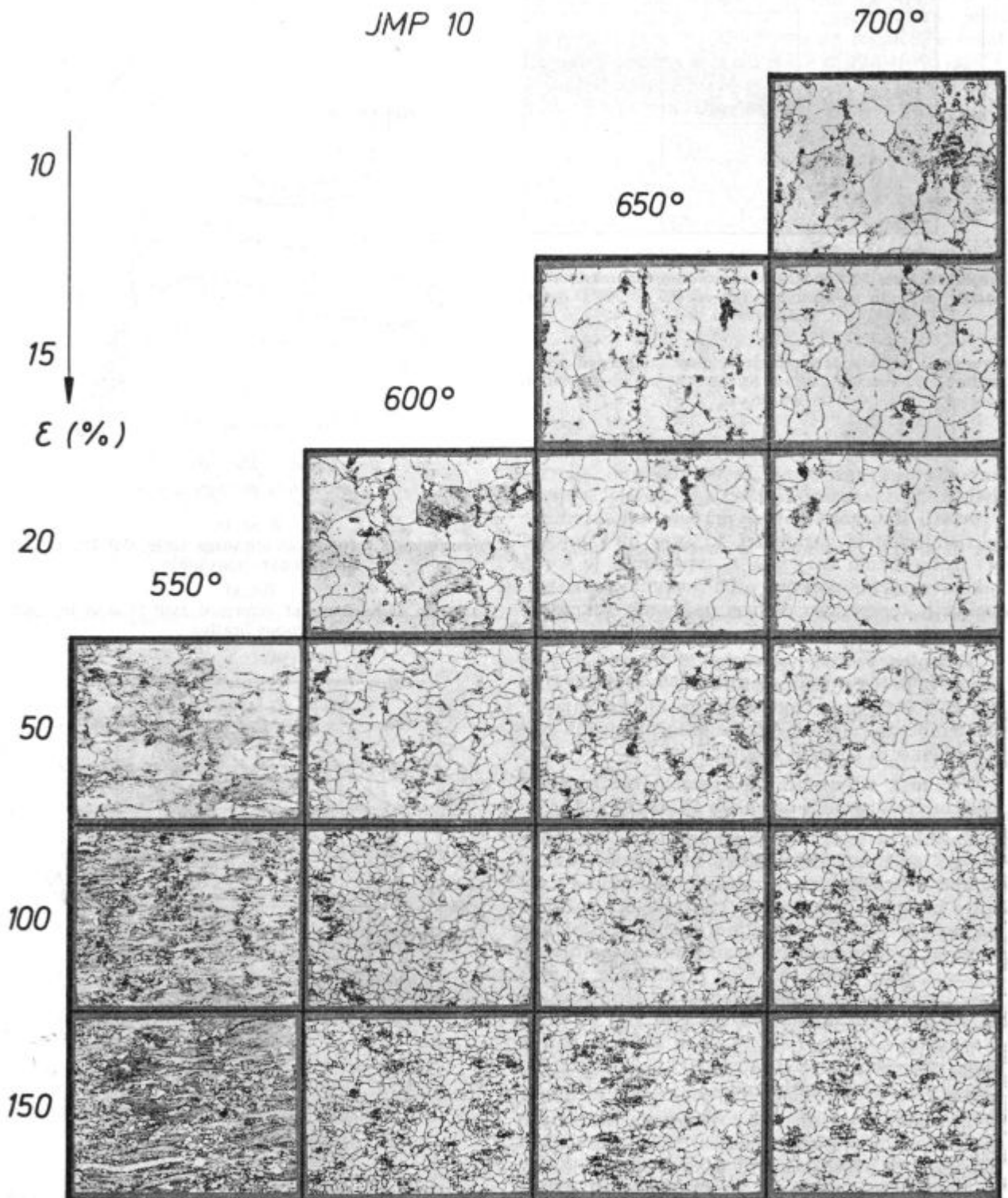
Fig. 11
Relationship between the hardness of recrystallized steels and the grain size

še na 700° C, razen pri podkritičnih deformacijah; struktura z deformacijo 10 % ni rekristalizirana.

Slika 13 prikazuje žarilne strukture jekla JMP 80 MnCr. Značilne so izredno drobnopozrnate strukture, ki nastajajo po velikih deformacijah.

Kontinuirno segrevanje

Več vzorcev vseh jekel in deformacij smo dali v hladno peč in segrevali s konstantno hitrostjo 2° C/min. Ta način je torej približna simulacija re-

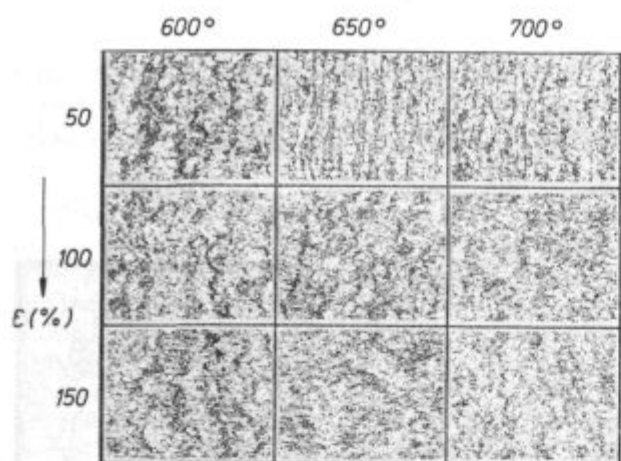


Slika 12

Strukture jekla JMP 10 po izotermičnih rekristalizacijskih žarjenjih na temperaturah od 550 do 700° C (povečanja 100 ×)

Fig. 12

Structures of JMP 10 steel after isothermal recrystallization annealing from 550 to 700° C (magnification 100 times)



Slika 13

Strukture jekla JMP 80 MnCr po izotermičnih rekristalizacijskih žarjenjih na temperaturah od 600 do 700°C (povečanja 100 ×)

Fig. 13

Structures of JMP 80 MnCr steel after isothermal recrystallization annealing from 600 to 700°C (magnification 100 times)

kristalizacijskega žarjenja velike količine materiala naenkrat, pri čemer se ves material, ali vsaj tisti, ki je v sredini vložka, zelo počasi segreva. Ugotoviti smo hoteli, ali se pri tem kaj spremene rekristalizacijski parametri, ki smo jih ugotovili pri izotermičnih žarjenjih — vprašanje je torej, kako eventualna poprava pred dosežem rekristalizacijskih temperatur vpliva na potek rekristalizacije.

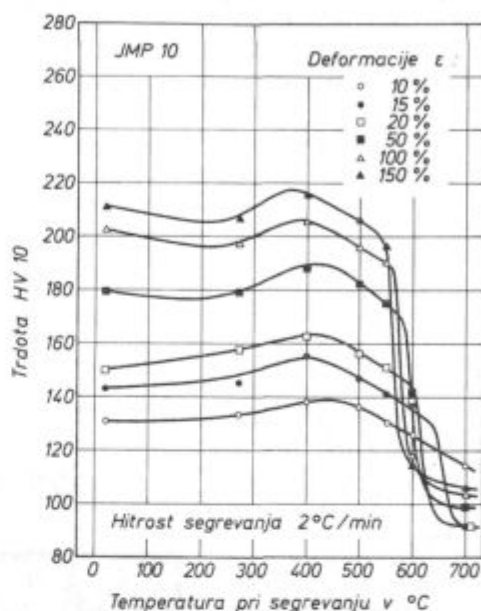
Komplete vzorcev vseh jekel in deformacij smo jemali iz peči pri temperaturah 270, 400, 500, 550, 600 in 700°C, brez izotermičnega zadrževanja na teh temperaturah. Vse vzorce smo pregledali metalografsko in izmerili trdote.

Trdote v odvisnosti od dosežene temperature prikazujejo diagrami na slikah 14, 15, 16 in 17.

Značilnost vseh teh diagramov je, da se deformirana jekla med 250 in 400°C utrjujejo. Nedvomno gre za izločevalno utrjevanje, ki prepreči popravo materiala. Izločevanje terciarnega cementita povzroči pri 400°C celo večje trdote kot jih je imel material v deformiranem stanju pri navadni temperaturi. Nad 400°C se začne popuščanje, ki ima jasno izraženo linearno odvisnost od temperature. Le pri legiranih jeklih JMP 50 Cr in JMP 80 MnCr in manjših deformacijah (10, 15 in 20 %) se kažejo zastoji popuščanja med 500 in 600°C, ki nastanejo zaradi preobrazbe karbidov.

To sekundarno utrjanje povzroči, da jeklo kljub počasnemu segrevanju doseže rekristalizacijsko temperaturo praktično prav tako trdo, kot je bilo po hladni deformaciji. V nasprotju s tem lahko opazimo pri izotermičnih diagramih (slike 4 do 7), da so jekla malo pod rekristalizacijski temperaturami že precej omehčana, pri deformacijah 150 % na primer za povprečno 40 HV.

Zaradi navedenega so rekristalizacijske temperature pri kontinuiranem segrevanju (strmo zmanjšanje trdote) največ za 15° višje od tistih pri izotermičnih žarjenjih. Če upoštevamo še, da smo vzorce jemali iz peči brez zadrževanja na doseže-

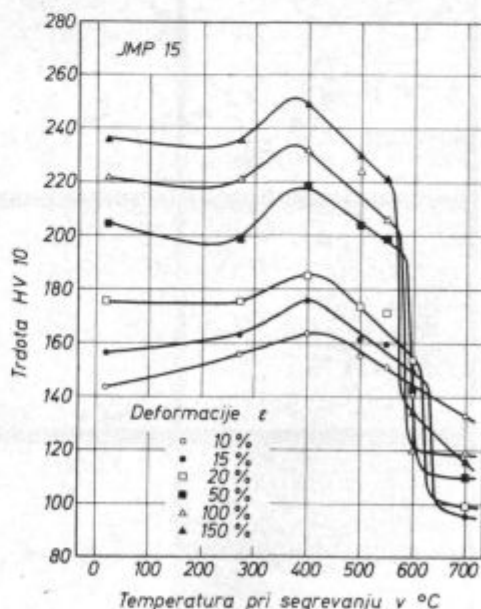


Slika 14

Spreminjanje trdote deformiranega jekla JMP 10 pri kontinuirnem segrevanju

Fig. 14

Variation of hardness of deformed JMP 15 steel in continuous heating



Slika 15

Spreminjanje trdote deformiranega jekla JMP 15 pri kontinuirnem segrevanju

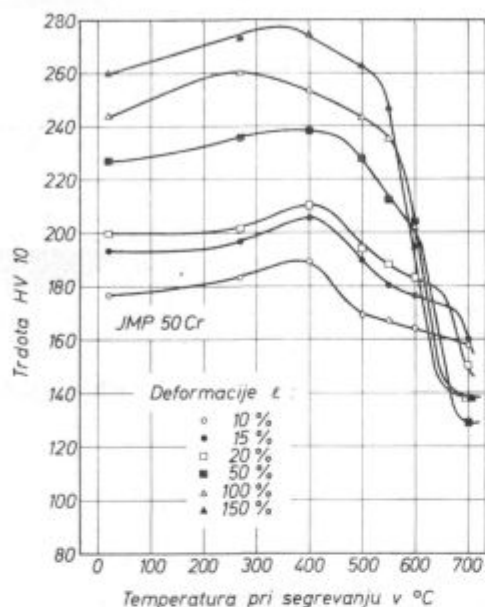
Fig. 15

Variation of hardness of deformed JMP 15 steel in continuous heating

nih temperaturah in da so bili časi izotermičnih žarjenj, zlasti pri nižjih temperaturah sorazmerno dolgi, lahko trdimo, da način segrevanja ne vpliva na rezultat rekristalizacijskega žarjenja.

Metalografske primere rekristalizacij, doseženih pri segrevanju do 600°C, kaže slika 18. Jeklo

JMP 10 še ne rekristalizira, če je bila hladna deformacija 10, 15 ali 20 %, pri deformaciji 50 % opazimo okoli 20 % rekristalizacije, pri deformacijah 100 in 150 % pa 40, oziroma 95 % rekristalizacije. To se popolnoma sklada z meritvami trdot in ustreznimi krivuljami na sliki 14. Podobne rezultate kaže jeklo JMP 15, medtem ko jeklo JMP 50 Cr kaže pri večjih deformacijah šele začetke rekristalizacij. Jeklo JMP 80 MnCr pri 600°C še ne rekristalizira, le pri 150-odstotno deformiranem vzorcu smo opazili začetno nukleacijo.

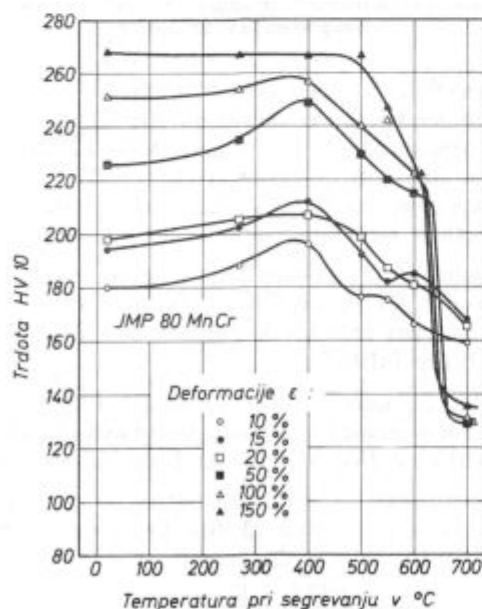


Slika 16

Spreminjanje trdote deformiranega jekla JMP 50 Cr pri kontinuirnem segrevanju

Fig. 16

Variation of hardness of deformed JMP 50 Cr steel in continuous heating

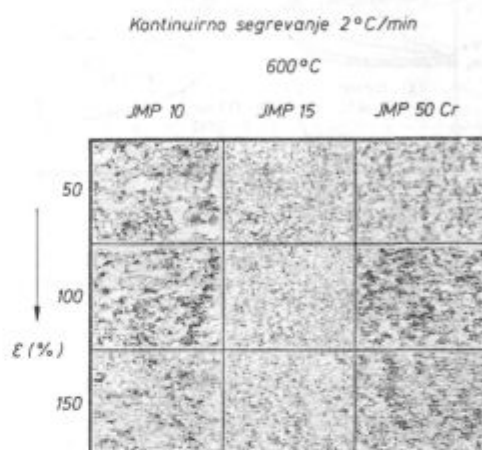


Slika 17

Spreminjanje trdote deformiranega jekla JMP 80 MnCr pri kontinuirnem segrevanju

Fig. 17

Variation of hardness of deformed JMP 80 MnCr steel in continuous heating



Slika 18

Strukture deformiranih in kontinuirno segrevanih JMP jekel

Fig. 18

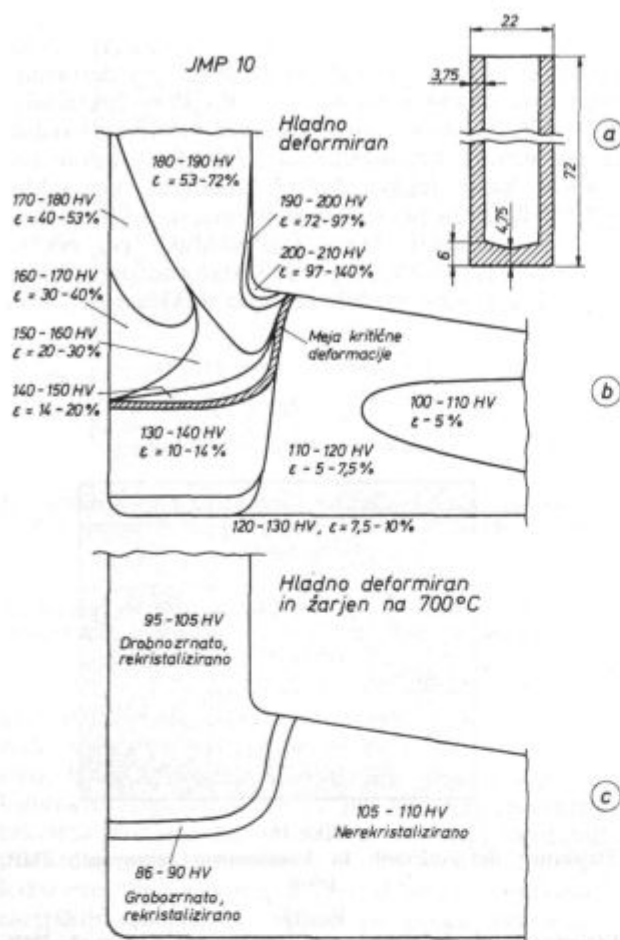
Structures of deformed and continuously heated JMP steel

Preiskavi masivno preoblikovanih izdelkov

Namen teh raziskav je bil ugotoviti realno stanje deformacij in rekristalizacijskih struktur v dveh izdelkih, ki imata velik deformacijski gradient. Ta izdelka bomo označevali z A in B.

Izdelek A: Izdelan je iz valjastega kosa jekla JMP 10 z vtiskavanjem luknje, oziroma proti smernim iztiskavanjem materiala (slika 19 a). Preiskovani kos je druga in končna operacija iztiskavanja.

Najprej smo izmerili trdote po vzdolžnem preseku izdelka. Slika 19 b kaže področja trdot v enakih intervalih 10 HV. Glede na to, da je določena utrditev, oziroma trdota posledica določene stopnje deformacije, smo po diagramu na sliki 1 določili tudi deformacije v teh področjih. Slika kaže, da je gradient deformacij zelo velik, saj sega od nekaj odstotkov do 140 %. Čeprav ni bil naš namen študirati toka materiala, vidimo, da lahko s poznavanjem utrjevalne krivulje materiala in meritvami trdot zelo dobro določimo te tokove pri hladnem preoblikovanju. Dno izdelka, ki je bilo pred iztiskavanjem debelejšje, je rezervoar materiala, ki pri deformiranju teče v stene izdelka. Med malo deformiranim dnom in steno nastaja ozek pas (šrafirani del na sliki 19 b), ki je deformiran za približno 15 %.



Slika 19

Trdote izdelka A v deformiranem in žarjenem stanju

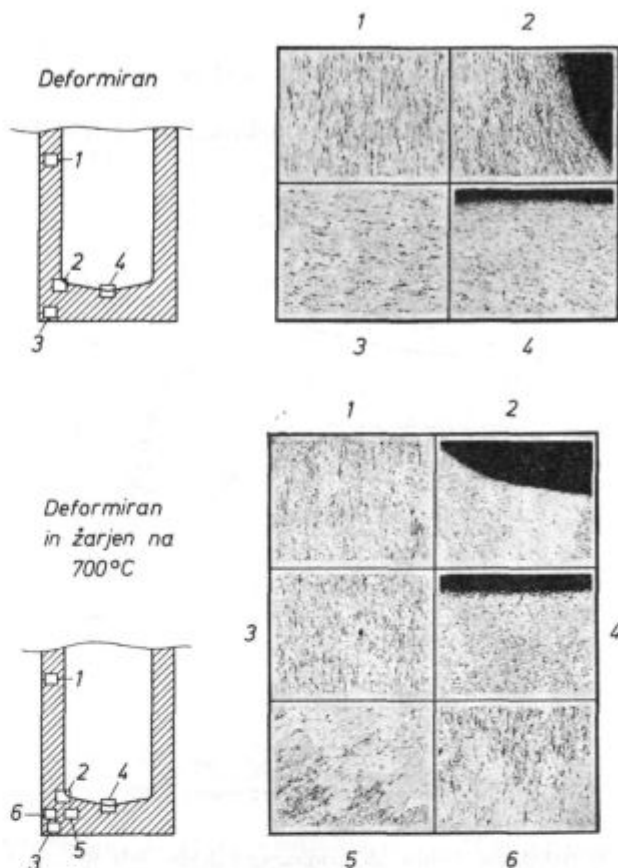
Fig. 19

Hardness of the product A in deformed and annealed state

Surove kose smo žarili na temperaturah 600, 650, 700 in 800°C. Opisali bomo žarjenje na 700°C (ker iz prejšnjih rezultatov vemo, da je to optimalna temperatura) in 800°C, ker nam je znano, da ponekod na tej temperaturi žarijo masivno preoblikovane izdelke.

Žarjenje na 700°C da interesantne rezultate, ki pa so popolnoma v skladu z našimi ugotovitvami v prejšnjih poglavjih. Slika 19c kaže, da ostane dno izdelka, ki je bilo deformirano do 14 %, nerekristalizirano. V pasu med dnom in steno, na meji med deformacijami do 14 % in večjimi, nastaja ozek pas kritično rekristaliziranega materiala s sorazmerno grobimi kristalnimi zrni in zato tudi najnižjo trdoto.

Strukture deformiranega in na 700°C žarjenega izdelka A so prikazane na sliki 20. Na steni, posebno pa še na notranjem prehodu med dnom in steno, opazimo precej močno deformacijo. Rekristalizirane strukture so povsod sorazmerno drobnozrnate, razen v že omenjenem kritično deformiranem pasu.



Slika 20

Strukture deformiranega in na 700°C žarjenega izdelka A (povečanja 50x)

Fig. 20

Structure of deformed product A annealed at 700°C (magnification 50 times)

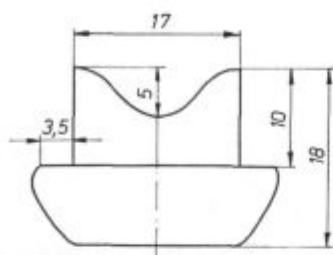
Strukture po žarjenju na 800°C so glede zrna-tosti enake kot po žarjenju na 700°C, le da je pas grobe rekristalizacije nekoliko širši in potegnjen tudi do manjših deformacij (12 %). Trdote pa so za povprečno 5 HV večje, kar je posledica transformacije v lamelarni perlit.

Izdelek B: Preiskave tega izdelka smo naredili v presekih po simetrični osi in tudi sicer na isti način kot pri izdelku A. Jeklo ima več ogljika in je kvalitete JMP 15.

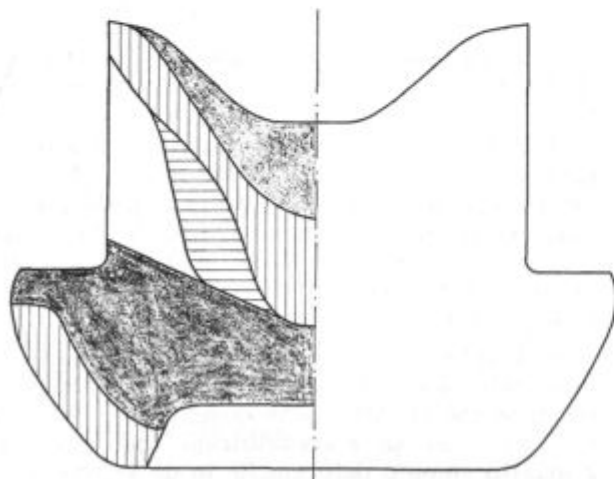
Slika 21 kaže obliko, mere in deformacijske gradiente v preseku izdelka. Deformacije, posnete iz krivulje za JMP 15 na sliki 1, dosega 95 %.

Deformacijske in žarilne strukture na značilnih mestih prikazuje slika 22. Strukture po rekristalizaciji so še bolj drobnozrnate, kar je posledica večje količine cementitnih delcev. Zaradi istega vzroka tudi nismo nikjer opazili izrazite grobozrnate rekristalizacije. Ima pa izdelek nerekristalizirana področja, ki ustrezajo področjem deformacij do okoli 15 % na sliki 21.

Trdota po žarjenju na 700°C je precej homogena in znaša 100 do 105 HV.



Material JMP 15
Stisnjeno iz valja $\varnothing 15,7\text{mm}$



	140 - 160 HV, $\epsilon = \text{do } 5\%$
	160 - 180 HV, $\epsilon = 5 - 25\%$
	180 - 200 HV, $\epsilon = 25 - 50\%$
	200 - 220 HV, $\epsilon = 50 - 95\%$

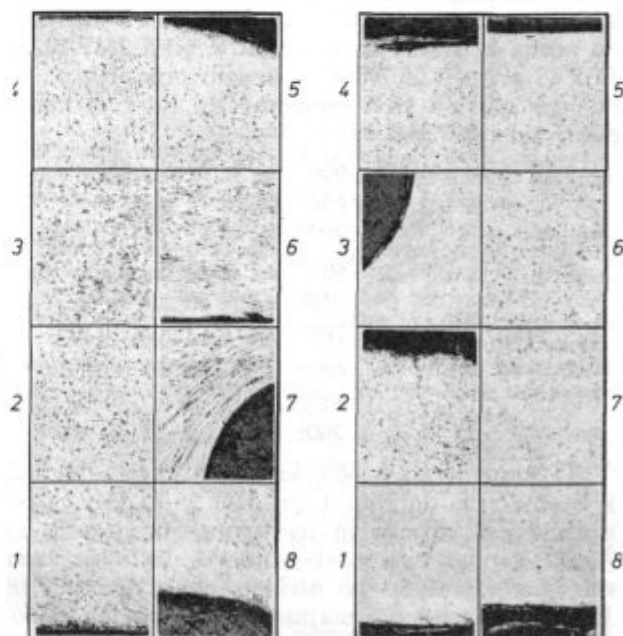
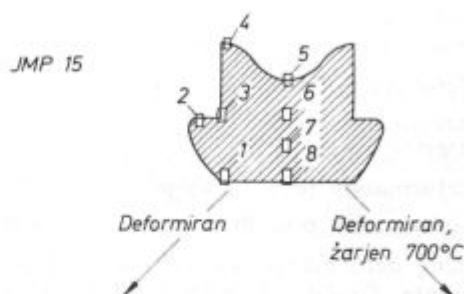
Trdote v žarjenem stanju : 700 °C : 100-105 HV
800 °C : 125-135 HV

Slika 21
Trdote izdelka B v deformiranem stanju
Fig. 21
Hardness of product B as deformed

Po žarjenju na 800 °C je struktura glede zrnato-
sti podobna, trdota pa bistveno večja, od 125 do
135 HV. To je razumljivo, ker ima jeklo JMP 15
sorazmerno precej več ogljika kot JMP 10.

SKLEPI

Jekla vrste JMP uporabljamo za hladno masiv-
no preoblikovanje. Lastnosti teh jekel, predvsem
velika čistoča, brezhibna površina in ustrezna
struktura, omogočajo velike hladne deformacije.
Z različnimi postopki preoblikovanja je tako možno
izdelati zelo raznolike izdelke. Deformirani izdelki
pa imajo lahko po svojem volumnu zelo različne
deformacije.



Slika 22
Strukture izdelka B po deformiranju in žar-
jenju na 700 °C (povečanja 50x)

Fig. 22
Structure of product B after deformation and
annealing at 700 °C (magnification 50 times).

Z opisano raziskavo smo ugotovili, kako se ta
jekla rekristalizirajo, kako je kinetika rekristaliza-
cije odvisna od temperature, stopnje deformacije,
načina segrevanja in kakšne so rekristalizacijske
strukture. Vzorce ustrezne valjaste oblike smo
tlačno deformirali 10, 15, 20, 50, 100 in 150 %.
Raziskali smo tudi dva hladno deformirana izdel-
ka, v katerih sta deformacijska gradienta od 5 do
140 %, oziroma od 5 do 95 %.

Rezultate lahko strnemo v naslednje sklepe in
priporočila:

1. Vsa štiri JMP jekla se utrjujejo po znani
potenčni funkciji $H = a \cdot \epsilon^n$, ki v logaritmirani obli-
ki da premico utrjevanja.

EkspONENTI utrjevanja n ($\text{dlgH}/\text{dlg}\epsilon = \text{hitrost}$
utrjevanja) znašajo:

JMP 10	$n = 0,185$
JMP 15	$n = 0,165$
JMP 50 Cr	$n = 0,143$
JMP 80 MnCr	$n = 0,145$

2. Spodnje rekristalizacijske temperature so pri jeklih JMP 10, JMP 15 in JMP 50 Cr

— za deformacije 50 % in večje 575° C
— za deformacije pod 50 % 625° C
pri jeklu JMP 80 MnCr pa

— za deformacije 50 % in večje 600° C
— za deformacije pod 50 % nad 650° C

3. Kritične deformacije so odvisne od temperature žarjenja. Tipično kritično deformacijo, pri kateri poteče rekristalizacija do konca v sorazmerno groba kristalna zrna, imata le jekli JMP 10 in JMP 15 pri 650 in 700° C, v drugih primerih pa je določen ožji ali širši temperaturni interval nepopolne rekristalizacije:

JMP 10 in JMP 15: 600° $\epsilon_{kr} = 27$ do 45 %
650° $\epsilon_{kr} = 15$ %
700° $\epsilon_{kr} = 13$ %

JMP 50 Cr: 600° $\epsilon_{kr} = 33$ do 55 %
650° $\epsilon_{kr} = 20$ do 40 %
700° $\epsilon_{kr} = 12$ do 30 %

JMP 80 MnCr: 600° $\epsilon_{kr} = 40$ do nad 100 %
650° $\epsilon_{kr} = 25$ do 40 %
700° $\epsilon_{kr} = 17$ do 30 %

4. Sorazmerno groba kritično rekristalizirana kristalna zrna dobimo le pri JMP 10 in JMP 15 po kritični deformaciji in na temperaturah 650 do 700° C. Vendar tudi v teh primerih nastajajo zrna velikosti največ 5,5 po ASTM. Jekli JMP 50 Cr in JMP 80 MnCr pa pri majhnih deformacijah nepo-

polno rekristalizirata, pri večjih pa v drobnostnate strukture. V splošnem so rekristalizirana kristalna zrna — razen prej omenjenih primerov — vedno manjša od 8 po ASTM.

5. Trdota rekristaliziranih jekel je odvisna od velikosti kristalnih zrn po enačbi

$$\lg H = \lg H_0 - k \lg F,$$

ki je identična s Hall-Petchovo enačbo.

6. Žarjenje nad A_{c1} (800° C) nima nobenih prednosti, trdota se celo nekoliko poveča zaradi transformacije v lamelarni perlit. Pri jeklu JMP 80 MnCr pa je tako žarjenje še posebno nepriporočljivo, ker lahko nastajajo trde prehodne strukture.

7. Počasno kontinuirno segrevanje bistveno ne spremeni razmer rekristalizacije preiskovanih jekel.

8. Preiskali smo dva hladno masivno preoblikovana izdelka, eden iz jekla JMP 10 z gradientom deformacije od 5 do 140 %, drugi iz jekla JMP 15 z gradientom deformacije od 5 do 95 %. Optimalne rezultate da žarjenje na 700° C. Nekoliko bolj grobo zrno da le jeklo JMP 10, če so v izdelku tudi področja s kritično deformacijo okoli 13 %.

9. V splošnem lahko priporočamo za vsa jekla vrste JMP rekristalizacijsko žarjenje na temperaturah od 650 do 700° C. Čas žarjenja mora biti dovolj dolg, da se rekristalizirajo tudi področja z manjšo stopnjo deformacije in da se omehčajo tista področja, ki zaradi podkritične deformacije ne rekristalizirajo.

ZUSAMMENFASSUNG

Stähle der Sorte JMP werden für die Kaltmassivumformung angewendet. Die Eigenschaften dieser Stähle, vor allem ein hoher Reinheitsgrad, eine tadellose Oberfläche und ein geeignetes Gefüge, ermöglichen einen hohen Kaltumformungsgrad. Mit verschiedenen Verfahren der Kaltumformung ist es möglich sehr verschiedenartige Erzeugnisse zu fertigen.

Mit der beschriebenen Untersuchung haben wir festgestellt, wie diese Stähle rekristallisieren, wie die Kinetik der Rekristallisation von der Temperatur, dem Verformungsgrad, von der Erwärmungsart abhängig ist und wie das Rekristallisationsgefüge aussieht. Die Proben von einer zylindrischen Form haben wir durch eine Druckbelastung um 10, 15, 20, 50, 100 und 150 % verformt. Wir haben auch zwei durch die Kaltumformung hergestellten Erzeugnisse untersucht, in welchen der Verformungsgrad von 5 bis 150 %, bzw. von 5 bis 95 % betrug. Die Ergebnisse können mit folgenden Entschlüssen und Empfehlungen zusammengefasst werden:

Alle vier JMP Stahlsorten verfestigen sich nach der bekannten funktion

$$H = a \cdot \epsilon^n$$

welche in der logarithmischen Form eine Gerade für die Verfestigung ergibt. Die Exponenten der Verfestigung betragen 0.143 bis 0.185.

Die unteren Rekristallisationstemperaturen sind bei den Stählen JMP 10, JMP 15 und JMP 50 Cr

— 575° C für den Verformungsgrad 50 % und mehr
— 625° C für den Verformungsgrad kleiner als 50 %
und bei dem Stahl JMP 80 MnCr

— 600° C für den Verformungsgrad 50 % und mehr
— 650° C für den Verformungsgrad kleiner als 50 %

Der kritische Verformungsgrad ist von der Glühtemperatur abhängig. Einen typischen Verformungsgrad bei welchem die Rekristallisation bis zum Ende in verhältnismässig grobe Kristallkörner übergeht, haben nur die Stähle JMP 10 und JMP 15 bei 650° und 700° C. In diesen zwei Fällen ist der kritische Verformungsgrad 15 bzw. 13 %. Bei den Stählen JMP 50 Cr und JMP 80 MnCr bestehen Intervalle der kritischen Verformungsgrade bei welchen die Rekristallisation nicht bis zum Ende verläuft. Der kritische Verformungsgrad für eine vollkommene Rekristallisation kann auch über 50 % betragen.

Verhältnismässig grob rekristallisierte Kristallkörner können nur bei JMP 10 und JMP 15 nach der kritischen Verformung und auf Temperaturen 650° C bis 700° C erhalten werden. Es entstehen jedoch auch bei diesen Fällen Kristallkörner, welche nicht grösser als 5.5 nach ASTM sind.

Die Stähle JMP 50 Cr und JMP 80 MnCr rekristallisieren bei kleinem Verformungsgrad nur unvollkommen, während beim grösseren Verformungsgrad ein feinkörniges Gefüge

entsteht. Im allgemeinen sind die rekristallisierten Kristallkörner — ausser in erwähnten Fällen — immer kleiner als 8 nach ASTM.

Die Härte der rekristallisierten Stähle ist von der Grösse der Kristallkörner nach der Gleichung:
 $\lg H = \lg H_0 - k \lg F$
 abhängig. Diese ist identisch der Hall-Petch Gleichung.

Das Glühen über A_c1 hat keinen Vorteil, die Härte wird wegen der Transformation in Lamellarperlite sogar etwas grösser. Bei dem Stahl JMP 80 MnCr ist ein solches

Glühen noch weniger empfehlenswert, weil ein hartes Übergangsgefüge auftritt.

Ein langsames kontinuierliches Erwärmen verändert die Verhältnisse bei der Rekristallisation nicht.

Im allgemeinen kann für alle JMP Stähle ein Rekristallisationsglühen auf Temperaturen von 650° bis 700° C empfohlen werden. Die Zeit der Glühung muss lang genug sein, dass auch die Bereiche mit einem kleineren Umformungsgrad rekristallisieren und dass jene Bereiche erweichen, welche wegen der unterkritischen Umformung nicht rekristallisieren können.

SUMMARY

JMP steel is used for cold volume forming. Properties of this steel, mainly great purity, perfect surface, and the corresponding structure enable high cold deformations. By various methods of cold forming pieces of different shapes can be made.

The described investigation revealed the way of recrystallization of this steel, relationship between the kinetics of recrystallization, the temperature, the degree of deformation, and the way of heating, and finally also the recrystallization structures. Cylindrical samples were compressed 10, 15, 20, 50, 100, and 150 %. Also two cold formed products with deformations from 5 to 150 % and 5 to 95 % were investigated. The results enable for following conclusions and proposals:

All four JMP steel are hardened according to the known power function $H = a \cdot \epsilon^k$ which in logarithmic form gives line for hardening. The powers are between 0.143 and 0.185.

The lower temperatures of recrystallization of JMP 10, JMP 15, and JMP 50 Cr steel are 575° C for deformations 50 % and higher, and 625° C for deformations lower than 50 %, while of the JMP 80 MnCr steel they are 600° C for deformations 50 % and higher, and 650° C for deformations lower than 50 %.

Critical deformations depend on the annealing temperature. A typical critical deformation at which the recrystallization is completed by a relatively coarse grains was found only with JMP 10 and JMP 15 steel at 650 and 700° C respectively. In these two cases the critical deformation

was 15 and 13 % respectively. In JMP 50 Cr and JMP 80 MnCr steel only intervals of critical deformation exist at which recrystallization is not completed. Critical deformation for complete recrystallization can exceed even 50 %.

Relatively coarse recrystallized grains are obtained only in JMP 10 and JMP 15 steel at the critical deformation and the respective temperatures 650 and 700° C. Also these crystal grains were not bigger than 5.5 by ASTM scale. JMP 50 Cr and JMP 80 MnCr steel at low deformations do not recrystallize completely while at higher deformations fine-grained structure is obtained. In general, the recrystallized grains with the exception of previously mentioned cases are always smaller than 8 by ASTM scale.

Hardness of the recrystallized steel depends on the grain size according to the equation $\lg H = \lg H_0 - k \lg F$ which is identical with the Hall-Petch equation.

Annealing above A_c1 gives no priorities, hardness is even slightly increased due to the transformation into lamellar pearlite. In JMP 80 MnCr steel such annealing is especially uncommendable since hard transition structures are formed.

Slow continuous heating does not change the recrystallization conditions.

In general, the recommended recrystallization annealing for all JMP steel is between 650 and 700° C. The annealing time must be long enough that recrystallization takes place also in regions of lower deformations and that the regions which do not recrystallize due to subcritical deformation are softened.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для холодного массивного преобразования употребляют стали марок JMP. Благоприятные свойства этих сталей, т. е. большая чистота, безупречная поверхность и соответствующая структура позволяют выполнять большие холодные преобразования. С разными способами холодного преобразования возможно изготовить очень различные изделия.

С рассмотренным исследованием определенным образом проследит рекристаллизация этих сталей, зависимость кинетики рекристаллизации от темп-ры, от степени преобразования и от способа нагревания. Приведены также структуры рекристаллизации. Образцы цилиндрической формы подвергали прессованию на 10, 15, 20, 50, 100 и 150 %. Рассмотрены также два изделия при которых градиент деформации представлял от 5 до 150 %, относительно 5 до 95 %. Результаты исследования можно объединить в следующие заключения:

Все четыре марки JMP сталей упрочняют по известной функции

$$H = a \cdot \epsilon^k,$$

которая в логарифмической форме дает прямую упрочнения. Экспоненты упрочнения составляют 0,143 до 1,185.

Нижние темп-ры рекристаллизации при сталях JMP 10, JMP 15 и JMP 50 Cr следующие:

— при деформациях 50 % и выше 575° C

— при деформациях меньше 50 % 625° C

при сталях марки JMP 80 MnCr:

— при деформациях 50 % и выше 600° C

— при деформациях меньше 50 % 650° C

Критические деформации зависят от темп-ры отжига. Типичную критическую деформацию, при которой процесс рекристаллизации протекает до конца в сравнительно грубые кристаллические зерна, имеют только стали марок JMP 10 и JMP 15 при 650 и 700° C. При этих двух примерах критическая деформация составляла 15 и 13 %. При сталях JMP 50 Cr и JMP 80 MnCr существуют интервалы критических деформаций при которых рекристаллизация не протекает до конца. Критическая деформация для полной рекристаллизации может превышать даже и 50 %.

Сравнительно грубые кристаллические кристаллы зерна можно получить только при сталях JMP 10 и JMP 15 после критической деформации и при темп-рах 650 до 700° C. Хотя также при этих примерах образуются кристаллы зерна величины меньше 5,5 по ASTM. Стали JMP 50 Cr и JMP 80 MnCr кристаллизуются при низких деформациях неполно, при высоких же, в виде

мелкозернистой структуры. В общем рекристаллизация кристаллических зерен, кроме выше упомянутых примеров всегда меньше 8 по ASTM.

Твердость рекристаллизованных сталей зависит от величины кристаллических зерен по уравнению $\log H = \log H_0 - k \log F$, которая тождественна уравнению Hall-Petch-a.

Отжиг свыше A_c не дает никаких преимуществ, причем, вследствие преобразования в пластинчатый перлит, твердость

даже немного увеличивается. Такой отжиг в особенности не рекомендуется при стали марки JMR 80 MлСт так как образуются переходные твердые структуры. Медленный, непрерывный нагрев не изменяет условия рекристаллизации.

В общем для всех сталей JMR рекомендуется рекристаллизационный нагрев при темп-ах между 650—700° Ц. Длительность отжига должно продолжаться довольно долго, чтобы произошла рекристаллизация также участков с меньшей степени деформации, а также и смягчение участков, которые вследствие докритической деформации не рекристаллизуются.