

Vpliv temperaturnega in deformacijskega režima simuliranega valjanja na lastnosti nekaterih jekel

Aleksander Kveder

Predelavnost jekel pogosto preizkušamo s torzijskim preizkusom v vročem. Vendar so temperaturni in deformacijski režimi pri predelavah v praksi drugačni, zato je potrebno tem razmeram prilagoditi tudi način preizkušanja. Način predelave lahko vpliva tudi na lastnosti jekla, zato moramo pri določanju optimalnega temperaturnega intervala predelave upoštevati tudi strukturo in lastnosti jekla.

I. UVOD

Za plastično preoblikovanje kovin sta v metalurško tehnološkem smislu bistvenega pomena: 1. sposobnost kovine za plastično preoblikovanje, ali kot pravimo, predelavnost kovine; 2. struktura in lastnosti kovine, ki jih dobimo po takem ali drugačnem temperaturnem in deformacijskem režimu predelave.

Predelavnost kovin lahko določamo na več načinov, vendar je torzijski preizkus v vročem izpodrinil v zadnjih letih skoraj vse druge metode. Poglavitni rezultat tega preizkušanja je predelavnost jekel, ki jo izrazimo s temperaturno odvisnostjo števila obratov do preloma. Iz te odvisnosti lahko določimo optimalni temperaturni interval predelave, kar je za prakso izrednega pomena.

Na Metalurškem inštitutu smo napravili že vrsto raziskav predelavnosti jekel, ki jih proizvajajo Slovenske železarne.

Kljub zanimivim in koristnim rezultatom prej omenjenih raziskav smo imeli tudi kritične pomsleke. Prvi od teh je bil, da sta temperaturna režima pri torzijskem preizkušanju in pri valjanju ali kovanju v praksi različna. Na primer, jeklo pred valjanjem segrejemo na temperaturo 1250° C in ga nato deformiramo z več parcialnimi deformacijami pri kontinuirno padajoči temperaturi do 900° C ali celo nižje. Vprašanje je bilo, ali bo predelavnost tega jekla, določena s torzijskim preizkusom pri 1000° C, ustrezala predelavnosti jekla, ki se je na to temperaturo ohladilo iz višje temperature. Naredili smo precej obsežno raziskavo in ugotovili, da lahko pri nekaterih jeklih temperaturni režim močno vpliva na predelavnost jekla (A. Kveder, M. Taučer: Vpliv temperaturnega in

deformacijskega režima, količine raztopljenih karbidov in vrste legiranja na predelavnost jekla, poročilo MI štev. 115, marec 1973, in ista avtorja: Einfluss der Temperaturführung bei Warmverdrehsversuchen zur Beurteilung der Warmumformbarkeit von Stählen, Arch. Eisenhüttenwesen 45 (1974), Nr 7, julij, 465—469). Rezultate te raziskave smo razložili z dejstvom, da se struktura pri legiranih in karbidnih jeklih spreminja do visokih temperatur (raztapljanje, preurejanje karbidov), da se pri ohlajanju iz višje temperature pojavlja histereza teh pojavov in tako sta strukturi istega jekla pri isti temperaturi lahko zelo različni. Tu gre za razlike v sestavi trdne raztopine, količini, velikosti in razporeditvi karbidov in tudi za velikost kristalnih zrn. Vse to pa lahko zelo vpliva na procese, ki se dogajajo med deformiranjem, kot so dinamična poprava ali celo rekristalizacija, odrazijo pa se v predelavnosti kovine. Sklep te raziskave je bil, da moramo pri takih jeklih upoštevati tisto predelavnost, ki jo dobimo z ohlajanjem iz višje temperature in z ozirom na to tudi določiti optimalni temperaturni interval predelave. Nasprotno pa jekla, ki niso legirana ali pa malo legirana, tega pojava ne kažejo izrazito.

Drugi pomislek smo poskusili razjasniti v raziskavi, katere opis sledi. Problem in izhodišče smo postavili takole: ali je predelava v optimalnem temperaturnem intervalu tudi zagotovilo za optimalno strukturo in lastnosti jekla po predelavi? Pri karbidnem jeklu UTOP Mo 1 smo opazili, da ga lahko zelo dobro predelujemo v intervalu med 1300 in 900° C, toda pri 1100° C ima to jeklo drobnozrnato avstenitno karbidno strukturo, nad 1200° Celzija pa grobozrnato avstenitno strukturo. Kakšni bosta torej strukturi in kako se bodo razlikovale lastnosti tega jekla, če ga bomo predelovali iz te ali one najvišje temperature? Problem sega torej že iz okvira čistih predelavnostnih lastnosti kovine.

II. MATERIALI IN NAČIN RAZISKOVANJA

1. Preiskovana jekla

Jekla, katerih sestava je v tabeli 1, so proizvodne taline. Preizkušance smo naredili iz kovanjih in toplotno obdelanih palic debeline 18 mm.

Tabela 1: Kemične sestave preizkušanih jekel

Jeklo	Kemična sestava v %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	N	
Č. 1940, OC 100	1,02	0,17	0,27	0,05	0,01	0,01	0,03	0,16		
Č. 4581, Prokron 9	0,80	1,53	0,44	19,90			3,57	0,11		
Č. 4588, 21-4-N	0,52	0,17	8,41	21,00			1,48	0,07	0,378	
Č. 4751, UTOP Mo 1	0,37	0,94	0,40	5,13	1,28	0,38	0,18	0,19		

Toplotne obdelave so bile naslednje:

Č. 1940 — OC 100: Mehko žarjenje 700 °C, 8 ur; posebne toplotne obdelave za posamezne preizkuse so opisane pri rezultatih.

Č. 4581 — Prokron 9: Mehko žarjenje, 790 °C, 8 ur.

Č. 4588 — 21-4-N: Gašeno, 1100 °C, voda.

Č. 4751 — UTOP Mo 1: Mehko žarjeno, 830 °C, 8 ur.

2. Račun deformacij in ohlajevalne hitrosti

Razmere deformiranja in ohlajevanja smo hoteli čimbolj približati razmeram valjanja jekla v praksi. Popolnoma to seveda ni mogoče, saj se torzijska deformacija razlikuje od pretežno enosne deformacije pri valjanju in skupna deformacija torzijskega preizkušanca se po polmeru cilindričnega dela spreminja linearno od določene vrednosti na površini do nič v sredini. Pri preiskavah, pri katerih so rezultati odvisni od mesta v vzorcu, ki ga lahko poljubno izberemo (metalografija, trdote), to nima nobenega vpliva, pri preizkusih, pri katerih smo uporabili cel preizkušavec (natezni preizkus), pa moramo upoštevati, da so rezultati nekoliko manj selektivni, kot bi bili v primeru enake deformacije po vsem preseku.

Za osnovo smo vzeli skupno konvencionalno deformacijo:

$$\epsilon_k = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad \text{ali} \quad \epsilon_k = \frac{F_0 - F_f}{F_0}$$

l_0 , F_0 in l_f , F_f so oznake za dolžine, oziroma preseke pred valjanjem in po njem. Ta deformacija je v praksi pogosto zelo različna — izbrali smo vrednost 0,98, oziroma 98 %. Razmerje med konvencionalno deformacijo in logaritmično deformacijo Σ_{ln} je:

$$\epsilon_{ln} = \ln(\epsilon_k + 1)$$

Sledi

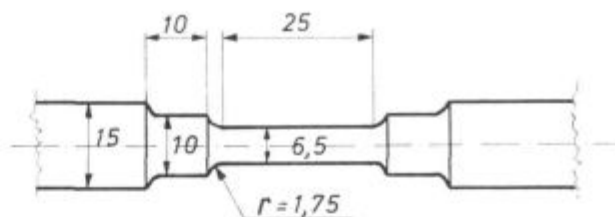
$$\epsilon_{ln} = \ln(0,98 + 1) \approx 0,7 \quad \text{ali} \quad 70 \%$$

Po Rossardu in Blainu (Rev. Met., 1962, 59, 233) je razmerje med logaritmično deformacijo in strižno deformacijo γ :

$$\epsilon_{ln} = \frac{\gamma}{2} \quad \gamma = 2\epsilon_{ln} \approx 1,4 \quad \text{ali} \quad 140 \%$$

Mere preizkušanca kaže slika 1.

Za račun deformacij in tudi za metalografske raziskave smo izbrali mesto pri polmeru $r = 3$ mm, to je 0,25 mm pod površino. Za en obrat preizkušanca je torej deformacija pri $r = 3$ mm



Slika 1
Torzijski preizkušavec

Fig. 1
Torsion test piece.

$$\gamma = \frac{r \cdot \theta}{L} = 0,75 \quad \text{ali} \quad 75 \%$$

θ je torzijski kot (za 1 obrat je 2π), L pa torzijska dolžina.

Za deformacijo, ki bi ustrezala konvencionalni deformaciji 98 %, sta torej potrebna približno 2 obrata preizkušanca. Odločili smo se za 8 deformacij po 0,25 obrata.

Za simulacijo ohlajevanja jekla smo predpostavili, da se jeklo pri valjanju ohlajuje približno enakomerno hitro. Ker se jeklo tanjša in periodično dotika hladnih valjev, je ohlajevanje tudi pri nižjih temperaturah približno enako hitro kot pri višjih. Zato smo torzijski preizkušavec ohlajevali v peči s približno enakomerno hitrostjo 60 °C na minuto. To hitrost ohlajevanja smo uporabljali pri vseh preizkusih ohlajevanja na nižje temperature in torziranja do prelomov, kot tudi pri preizkusih simulacije valjanja, ko smo med ohlajevanjem osemkrat deformirali preizkušavec po 0,25 obrata.

3. Način raziskovanja

Torzijski stroj ima dvodelno silitno peč za temperature do 1350 °C. Preizkuse smo opravili v argonu, da smo preprečili močno oksidacijo pri visokih temperaturah. Vrtilna hitrost je bila 4,5 obrata na minuto.

Metalografske raziskave in slike smo naredili 0,25 mm pod površino na vzdolžnem preseku torziranega dela preizkušanca. Primerjalne nedeformirane strukture pa so iz debelejšega dela preizkušanca, takoj za torzijskim cilindrom. Jekla s transformacijo smo jedkali na avstenitno strukturo z različnimi kombinacijami nasičenih vodnih ali alkoholnih raztopin pikrinove kisline z večjimi ali manjšimi dodatki Agepona.

Natezne preizkuse deformiranih preizkušancev smo izvršili tako, da smo torzirani del postružili od izhodne debeline 6,5 mm na 6 mm in izvršili normalni preizkus do pretрга. Izmerili smo trdnost, raztezek in kontrakcijo.

III. REZULTATI RAZISKAV

Pri posameznih jeklih smo naredili naslednje preiskave:

— določitev predelavnosti na standarden torzijski način, to je s segrevanjem preizkušancev na temperature preizkusov,

— določitve predelavnosti z ohlajanjem preizkušancev iz določenih višjih temperatur na temperature preizkušanja,

— simulacija valjanja z različnimi variacijami začetnih in končnih temperatur,

— metalografske in mehanske raziskave.

1. Jeklo Č. 1940-OC 100

Čeprav smo to jeklo pred izdelavo preizkušancev mehko žarili 8 ur na 700°C, je bila struktura lamelarni perlit in skoraj brez opazne sferoidizacije. Vendar pa jeklo ni imelo mreže sekundarnega cementita po kristalnih mejah.

Na sliki 2 so krivulje predelavnosti, dobljene s standardnimi torzijskimi preizkusi, to je s segrevanjem na temperature preizkušanja. Osnovna krivulja, ki ima v legendi pripombo »lamelarni perlit«, ima zanimivo in nenavadno obliko. Do A_{c1} ima jeklo zelo slabo predelavnost (A_{c1} — začetek je pri 745°C, A_{c1} — konec pa pri 760°C — glej v zgornjem delu diagrama del dilatometrijske krivulje za segrevanje tega jekla). Od 800°C se predelavnost izredno močno izboljša, od nepolnih 3 obratov do 50 obratov do preloma. To temperaturno področje glede na dilatometrijsko krivuljo zelo dobro ustreza področju med A_{c1} in A_{cm} . Nato se predelavnost do 980°C poslabša, nakar ponovno narašča do maksimuma približno pri 1150°C, vendar tudi še pri 1300°C predelavnost ni slaba.

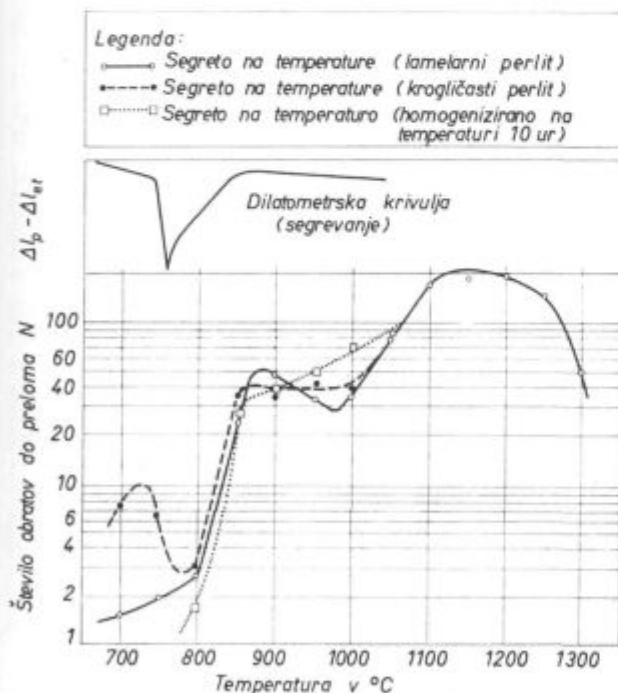


Fig. 2

Steel Č. 1940 — OC 100: Workability curves obtained by heating samples to the temperature.

Slika 2

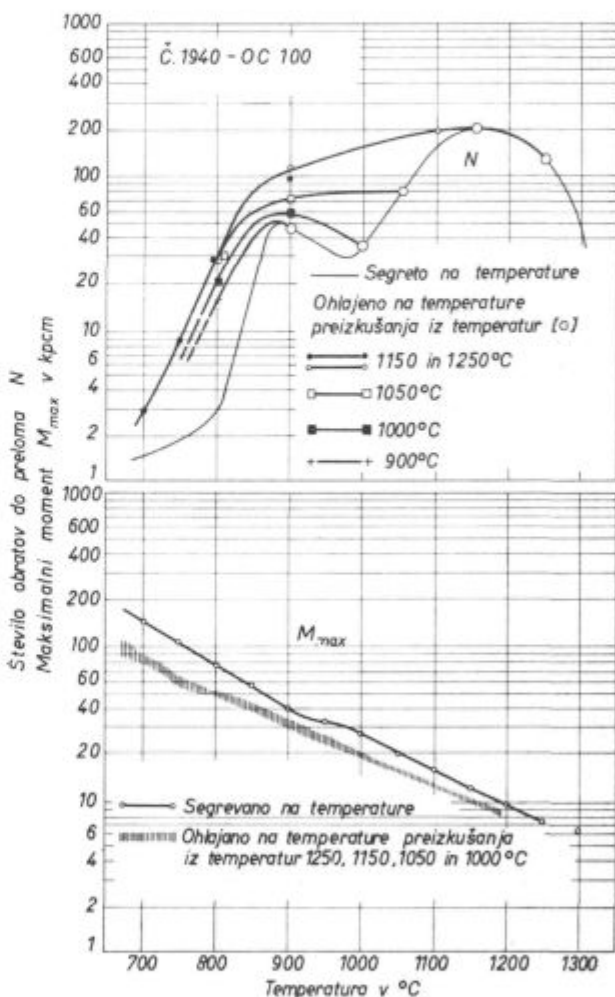
Jeklo Č. 1940 — OC 100: Krivulje predelavnosti, dobljene s segrevanjem preizkušancev na temperature

Preizkušance za drugo serijo smo mehko žarili z nihanjem temperature med 650°C in 800°C in dobili pretežno sferoidizirano strukturo (krogličasti perlit). Na sliki 2 vidimo, da se pojavi značilno povečanje predelavnosti tik pod A_{c1} , zmanjšanje predelavnosti med 880 in 980°C pa je le malo ublaženo.

V tretji seriji smo preizkušance pred preizkusom segrevali 10 ur. Ustrezna krivulja na sliki 2 pokaže precejšnjo izravnavo predelavnosti nad 900°C.

Sklepamo torej lahko, da se predelavnost med 850 in 950°C poslabša zaradi nehomogenizirane avstenitne trdne raztopine.

Preizkuse z ohlajanjem preizkušancev iz višjih temperatur na temperature preizkusov prikazuje slika 3. Ohlajanje iz vseh temperatur izredno



Slika 3

Jeklo Č. 1940 — OC 100: Krivulje predelavnosti, dobljene z ohlajanjem preizkušancev iz višjih temperatur na temperature preizkusov (zgoraj) in krivulje maksimalnih momentov (spodaj).

Fig. 3

Steel Č. 1940 — OC 100: Workability curves obtained by cooling samples from higher temperatures on the testing temperature (upper curves), and curves of maximal moments (lower curves).

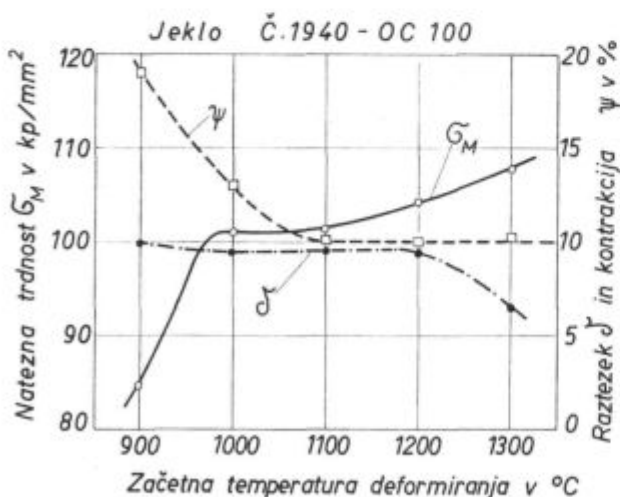
izboljša predelavnost tega jekla, celo ohladitev iz 1250 °C da pri nižjih temperaturah zelo dobre predelavnosti, čeprav so kristalna zrna pri tem že tako velika, da jih lahko merimo v mm. To dokazuje, da tudi izredno povečanje kristalnih zrn na višjih temperaturah ne poslabša predelavnosti pri deformacijah na nižjih temperaturah. Seveda velja ta trditev le za homogene enofazne strukture, pri katerih povečevanje zrn ne spremlja še kakšen drug pojav, npr. preurejanje težko topnih karbidov iz sferoidizirane oblike v mrežo po kristalnih mejah.

Digram na sliki 3 prikazuje krivulje maksimalnih momentov v odvisnosti od temperature. Vidimo, da je razlika v maksimalnih momentih med preizkusi segrevanja in ohlajanja na temperature ne le do 900 °C, kot bi lahko predvidevali glede na histerezo raztapljanja in izločanja sekundarnega cementita, temveč tudi pri višjih temperaturah. Boljša predelavnost pri ohlajevalnih preizkusih se torej kaže tudi v manjši predelavni trdnosti, izraženi z maksimalnim momentom.

Lastnosti jekla OC 100 smo ugotavljali s preizkušanci, ki smo jih deformirali po načinu simulacije valjanja iz različnih začetnih temperatur in v različnih temperaturnih intervalih. Pet preizkušancev smo deformirali v naslednjih temperaturnih intervalih:

- 1300—1000 °C
- 1200— 950 °C
- 1100— 850 °C
- 1000— 800 °C
- 900— 750 °C

Prva deformacija je bila na zgornji temperaturi, nato je v enakomernih temperaturnih presledkih sledilo šest deformacij, zadnjo pa smo izvedli na spodnji temperaturi. Vse preizkušance



Slika 4

Jeklo Č. 1940 — OC 100: Mehanske lastnosti v odvisnosti od začetne temperature deformiranja

Fig. 4

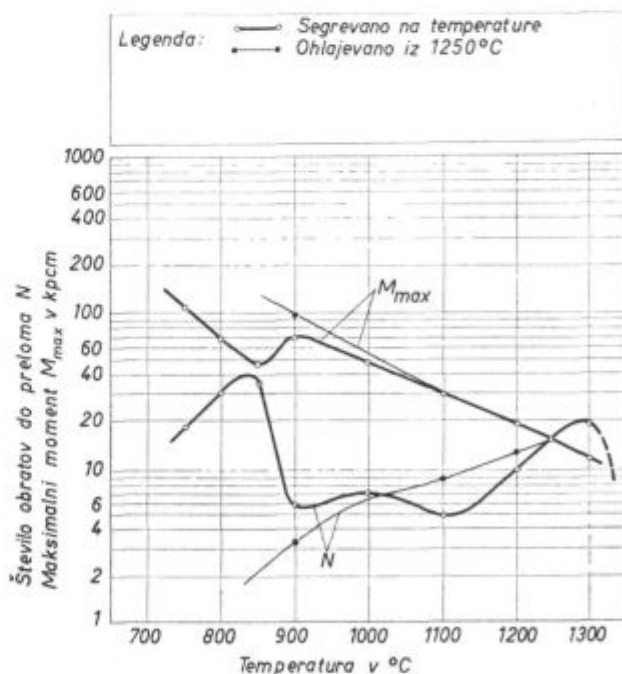
Steel Č. 1940 — OC 100: Mechanical properties depending on the initial temperature of deformation.

smo po zadnji deformaciji hladili v peči do 750 °C, nato pa zunaj peči, vendar v zaščitni cevi. S tem smo dosegli, da so se v vseh primerih hladili preizkušanci prek transformacijskega temperaturnega intervala s približno enako hitrostjo. Pred nateznimi preizkusi nismo izvedli nobene toplotne obdelave.

Na sliki 4 so prikazani rezultati nateznih preizkusov v odvisnosti od začetne temperature deformiranja. Natezna trdnost se od 1300 do 1000 °C zniža od 108 na 101, nato pa pri 900 °C pade na 84,5 kp/mm². Od 1100 °C do 900 °C se kontrakcija poveča od 10 % na približno 20 %. Vpliv velikosti kristalnega zrna je vsekakor jasno izražen, posebno med 1000 in 900 °C, ko se začne sekundarna rekristalizacija, oziroma nagla rast kristalnih zrn. Na osnovi teh rezultatov bi bil optimalni temperaturni interval predelave — predvsem glede na lastnosti jekla po predelavi — med 900 in 750 °C. Z ozirom na razmere predelave v valjarnah pa je tak interval nerealen. Verjetno pa je, da zgornja temperatura predelave ne bi smela preseči 1150 °C.

2. Jeklo Č. 4751 — UTOP Mo 1

Predelavnost jekla UTOP Mo 1 po načinu segrevanja in ohlajanja na temperature preizkusov je prikazana na sliki 5. Če izvzamemo feritno karbidno področje, doseže predelavnost najboljše vrednosti pri 1300 °C, in če za določanje spodnje temperature predelavnosti upoštevamo krivuljo, dob-



Slika 5

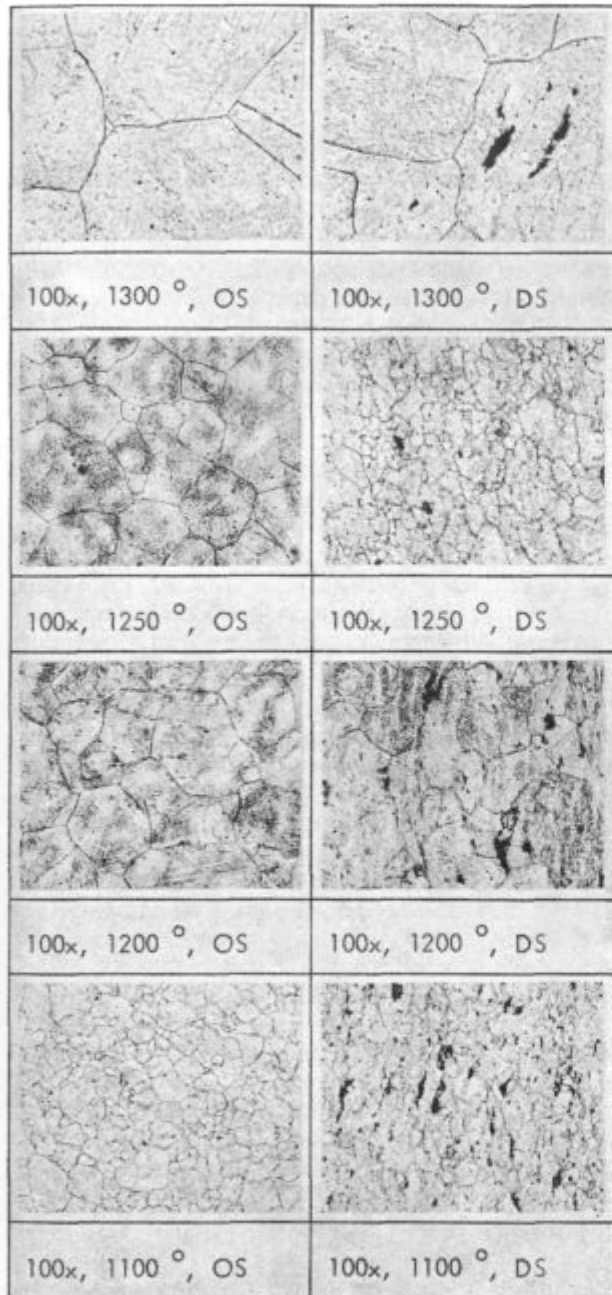
Jeklo Č. 4751 — UTOP Mo 1: Krivulje predelavnosti in maksimalnih momentov, dobljene s segrevanjem in ohlajanjem preizkušancev na temperature preizkusov

Fig. 5

Steel Č. 4751 — UTOP Mo 1: Workability curves and curves of maximal moments, determined by heating and cooling of samples to the testing temperature.

ljeno po načinu ohlajevanja, dobimo optimalni temperaturni interval predelave od 1270° do 900 °C.

Metalografske posnetke struktur teh preizkušancev prikazuje slika 6. Posnetke osnovne ne-deformirane strukture (pri slikah je oznaka OS) smo naredili na vzorcih, odrezanih tik za torzijskim cilindričnim delom, torej na mestu, kjer se



Slika 6

Jeklo Č. 4751 — UTOP Mo 1: Strukture po segretju na temperature in deformiranju (OS — osnovna struktura, DS — deformirana struktura)

Fig. 6

Steel Č. 4751 — UTOP Mo 1: Structure after heating sample to the temperature, and after the deformation (OS — basic structure, DS — deformed structure).

preizkušanec ni deformiral. Strukturo deformiranega dela (na slikah je oznaka DS) pa smo opazovali in slikali na rezu po vzdolžni osi torziranega cilindra. Slike so narejene približno 0,25 mm pod površino.

Na 1300 °C nastane zelo groba avstenitna struktura. Med deformacijo ali po njej se struktura rekristalizira v prav tako groba zrna. Na 1250 in 1200 °C nastaja srednje groba struktura, medtem ko je na 1100 °C struktura drobnozrnata.

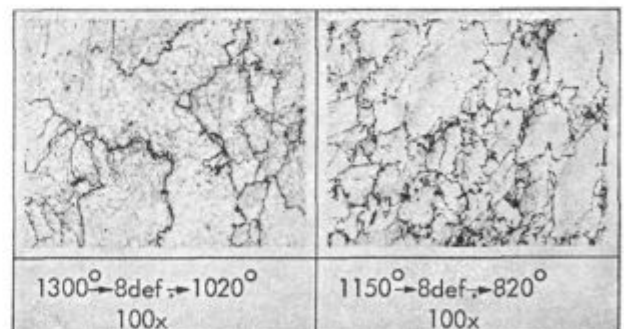
Deformiranje po načinu simuliranega valjanja smo izvedli dvakrat — prvič za pregled struktur in drugič za lastnosti jekla.

Za pregled struktur smo izvedli preizkusa v območju 1300 do 1020 °C in 1150 do 820 °C. Strukturi prikazuje slika 7. Deformiranje pri višjih temperaturah da grobo strukturo z opazno deformiranimi avstenitnimi zrni in brez sledu dinamične ali statične rekristalizacije. Očitno je, da so posamezne deformacije premajhne, da bi pri teh visokih temperaturah jeklo rekristaliziralo. Tudi pri deformiranju med 1150 in 850 °C jeklo ne rekristalizira, vendar je struktura bistveno drobnejša.

Za lastnosti jekla smo naredili simulacijske preizkuse v naslednjih temperaturnih območjih:

1300—1100 °C
1200— 920 °C
1150— 880 °C
1100— 850 °C
1050— 820 °C
950— 800 °C
830— 720 °C

Temperaturni interval predelave pod Ac₁ točko (830—720 °C) je verjetno preozek za tehnično rabo, vredno pa je omeniti, da se v njem to jeklo lažje predeluje kot v intervalu 1000—800 °C. Vzrok je v manjši predelovalni trdnosti ferita. Celo predelavnost je precej boljša kot v avstenitnem področju (glej sliko 5).



Slika 7

Jeklo Č. 4751 — UTOP Mo 1: Strukturi po simuliranem deformiranju v temperaturnih intervalih 1300 do 1020° C in 1150 do 820° C

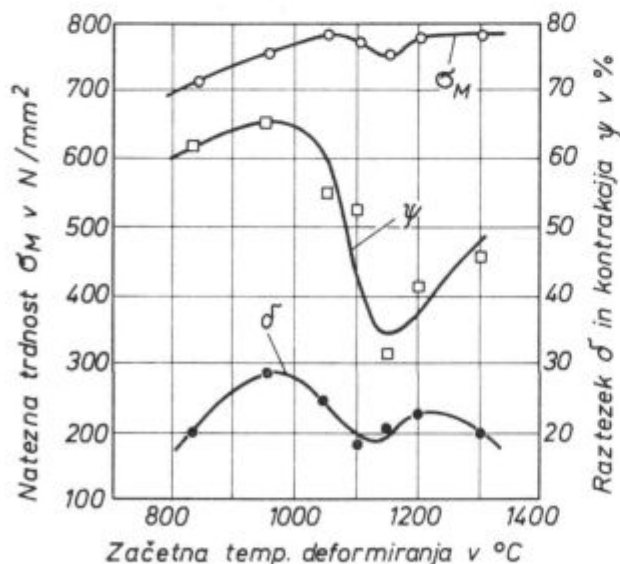
Fig. 7

Steel Č. 4751 — UTOP Mo 1: Structures after simulated deformation in the intervals 1300 to 1020° C and 1150 to 820° C.

Po deformiranju smo preizkušance mehko žarili 4 ure na 800 °C. Nato smo površino postružili tako, da so nastali preizkušanci za natezni preizkus z merilno dolžino 25 mm in debelino 6 mm. Pri natezih preizkusih smo merili natezno trdnost, raztezek in kontrakcijo.

Diagram na sliki 8 prikazuje odvisnost mehanskih lastnosti od začetne temperature deformiranja. Izrazito dobre mehanske lastnosti dobimo, če jeklo predelujemo pri temperaturah od 1000 °C navzdol, torej pri temperaturah, pri katerih ima jeklo še drobnozrnato avstenitno strukturo s sorazmerno precej karbidi. Tako predelano jeklo ima majhno natezno trdnost in izredne plastične lastnosti — kontrakcijo, ki presega 60 % in raztezek med 20 in 30 %. S povečanjem začetne temperature od 1000 do 1150 °C se izrazito poslabša kontrakcija, pa tudi raztezek. V tem temperaturnem intervalu se tudi zaključuje raztapljanje karbidov. Metalografski pregled preizkušanca, ki je bil deformiran z začetno temperaturo 1150 °C, je pokazal precej izrazito verižno razporeditev karbidov. Med ohlajanjem in deformiranjem so se karbidi izločali predvsem po mejah, podmejah in dvojčičnih črtah. Pri višjih temperaturah ima jeklo na začetku deformiranja vedno čisto avstenitno strukturo. Ker je višja tudi končna temperatura deformiranja, ne pride do verižnega izločanja karbidov in njihova razporeditev po mehkem žarjenju je mnogo enakomernejša. Zato se tudi raztezek in kontrakcija nekoliko izboljšata. Najenakomernejšo razporeditev karbidov pa ima jeklo, deformirano z začetnimi temperaturami 1100 °C ali nižjimi.

Iz vseh raziskav jekla UTOP Mo 1 lahko ugotovimo:



Slika 8

Jeklo Č. 4751 — UTOP Mo 1: Mehanske lastnosti v odvisnosti od začetne temperature deformiranja

Fig. 8

Steel Č. 4751 — UTOP Mo 1: Mechanical properties depending on the initial temperature of deformation.

— da je to jeklo s stališča tehnološke predelavnosti sorazmerno dobro predelavno vse od 1300 °C navzdol in celo v ozkem feritno karbidnem področju pod A_{c1} točko, vendar pa

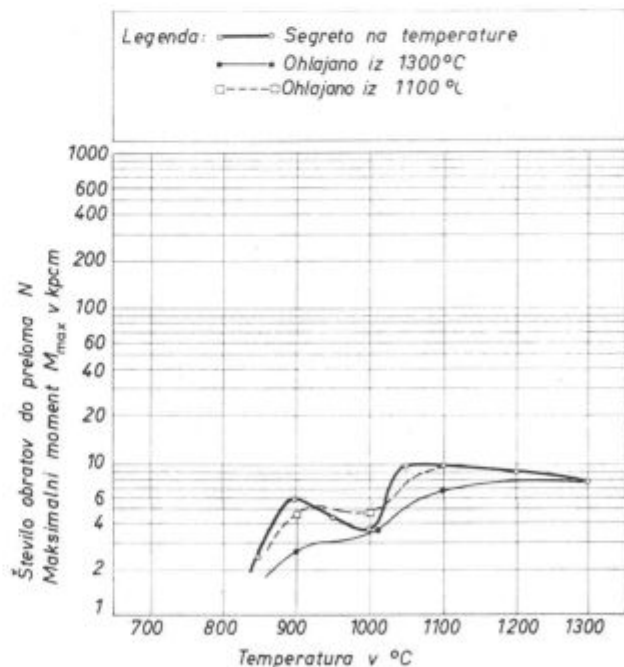
— glede na lastnosti jekla po predelavi ni priporočljivo valjati jeklo pri začetnih temperaturah 1100 do 1200 °C. Neugodna razporeditev karbidov, ki pri tem nastane, ima lahko slabe posledice tudi pri kasnejši uporabi jekla.

Optimalna temperatura začetka predelave je torej med 100 in 1050 °C, alternativno pa še temperature med 1200 in 1250 °C.

3. Jeklo Č. 4588, 21-4-N

Predelavnosti jekla 21-4-N, določene po načinih segrevanja in ohlajanja na temperature preizkusov, so prikazane na sliki 9. V splošnem je predelavnost tega jekla zelo slaba. Pri načinu preizkušanja s segrevanjem preizkušancev je med 900 in 1050 °C izrazito poslabšanje predelavnosti zaradi raztapljanja karbidov. Od 1050 do 1300 °C se predelavnost spremeni zelo malo, tako da je na osnovi te krivulje težko določiti zgornjo dopustno temperaturo pred predelavo. Za predelavnost, ki smo jo določili z ohlajanjem iz temperatur 1300 in 1100 °C pa velja, da je tem slabša, čim višja je temperatura prvotnega segrevanja.

Strukture tega jekla po segretju in deformiranju na teh temperaturah kaže slika 10. Pri 1300 °C je struktura grobozrnata in brez karbidov, nitridi pa so združeni v perlitu podobnih skupkih.



Slika 9

Jeklo Č. 4588; 21-4-N: Krivulje predelavnosti, dobljene s segrevanjem in ohlajanjem preizkušancev na temperature preizkusov

Fig. 9

Steel Č. 4588, 21-4-N: Workability curve obtained by heating and cooling of samples to the testing temperature.

Ti nitridni skupki so samo v sredini nedeformiranega vzorca, ki je debel 10 mm, v deformiranem delu, ki je debel le 6,5 mm, pa jih tudi v sredini skoraj ni. Sklepamo, da dušik pri tej temperaturi izhaja iz jekla. Po deformaciji je struktura rekristalizirana in še bolj grobozrnata. Pri 1200 °C je zrnatost srednja, kristalna zrna so nenormalno oblikovana, ker so migracijo kristalnih mej neenakomerno ovirali izločki po kristalnih mejah in v matrici, in karbidi še niso popolnoma raztopljeni. Zelo pomembno pa je, da se nitridi pri 1200 °C že začenjajo zbirati v prej omenjene, vendar manjše perlitne skupke. Na tej temperaturni jeklo tudi več ne rekristalizira.

Pri 1100 °C je osnovna struktura drobozrnata z drobnimi izločki v matrici, po kristalnih mejah in dvojčičnih lamelah. V strukturi pri 1000 °C je opazno močno kristalno, oziroma dendritsko izcejanje.

Deformiranje po načinu simuliranega valjanja:

Za preiskavo struktur smo preizkušance deformirali v štirih temperaturnih intervalih:

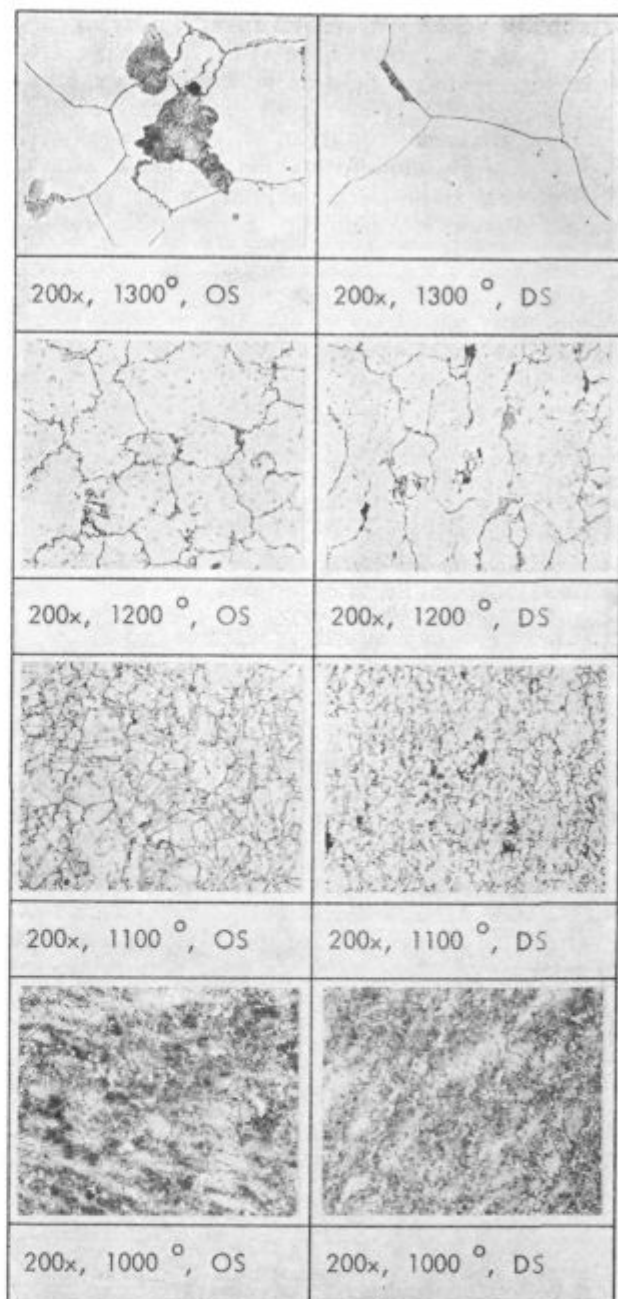
- 1300 do 1050 °C
- 1200 do 950 °C
- 1100 do 850 °C
- 1000 do 850 °C

Strukture na nedeformiranem (OS) in deformiranem (DS) delu preizkušancev kaže slika 11. Struktura pri 1300 °C je grobozrnata; zaradi sorazmerno počasnega ohlajevanja do 1050 °C opazimo v zrnih potemtivne, ki jih povzročajo drobni izločki. Struktura po osmih deformacijah med 1300 in 1050 °C ni rekristalizirana. Na posnetkih osnovne in deformirane strukture po deformacijah med 1200 do 950 °C opazimo značilnosti, ki smo jih že omenili — neenakomerno oblikovana struktura, pri čemer se nedeformirana in deformirana struktura dosti ne razlikujeta, predvsem pa opazimo izrazite perlitno oblikovane skupke nitridov. Pomembna je tudi ugotovitev, da se pri 1200 °C karbidi začno preurejati iz krogličaste oblike v tanek karbidni film po kristalnih mejah; dejansko so vsa kristalna zrna obdana s tem filmom. Celo pri sferoidnih karbidnih delcih, ki so blizu kristalne meje, se vidi, kako se iztekajo v ta film. Po deformiranju med 1100 in 850 °C še opazimo strukturo zaradi delnega raztapljanja in kasnejšega izločanja karbidov in nitridov, po deformiranju med 1000 in 850 °C pa zrn ne vidimo več, temveč le večje in drobnejše karbide in nitride.

Za določitev mehanskih lastnosti smo izvedli deformiranja na enake načine kot za strukture, to je v območjih

- od 1300 do 1050 °C
- 1200 do 950 °C
- 1100 do 850 °C in
- od 1000 do 850 °C

s tem, da smo vsak način deformiranja izvedli dvakrat.



Slika 10

Jeklo C.4588, 21-4-N: Strukture po segretju na temperature in deformiranju (OS — osnovna struktura, DS — deformirana struktura)

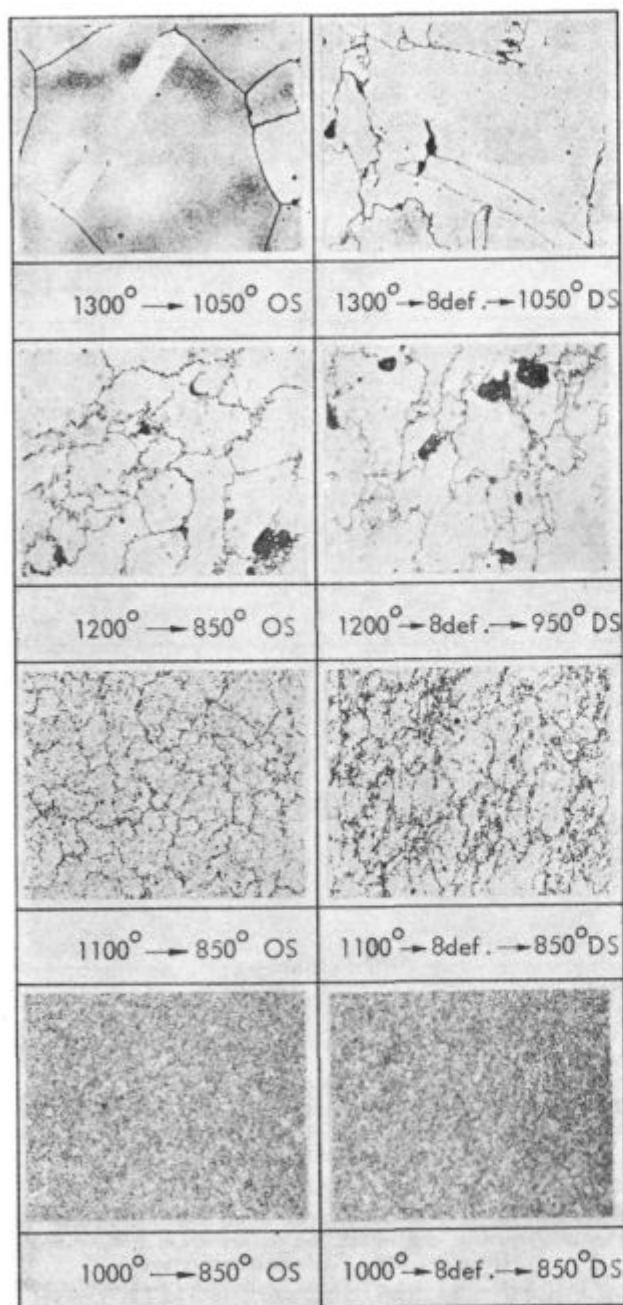
Fig. 10

Steel C.4588, 21-4-N: Structures after heating sample to the temperature, and after the deformation (OS — basic structure, DS — deformed structure).

Pred preizkušanjem smo po en preizkušaneč gasili (1100 °C, voda), drugega pa smo preizkusili brez toplotne obdelave. Rezultati nateznih preizkusov so prikazani na diagramu na sliki 12. Najboljše raztezke in kontrakcije dobimo, če začnemo predelavo pri 1300 °C. Toda tega ne moremo upoštevati iz naslednjih razlogov: pri tej temperaturi izhaja dušik iz jekla, globlje v jeklu pa

se zbira v velike nitridne skupke. V vsakem primeru pa s tem preprečimo vpliv dušika na lastnosti tega jekla pri delu na visokih temperaturah (npr. pri ventilih, ko se zaradi izločevalnih učinkov povečata toplotna trdnost in obrabna obstojnost).

Pri začetni temperaturi deformiranja 1200 °C dobimo zelo slabe lastnosti jekla, celo v gašenem stanju. Vzrok je razumljiv iz prejšnjih metalo-

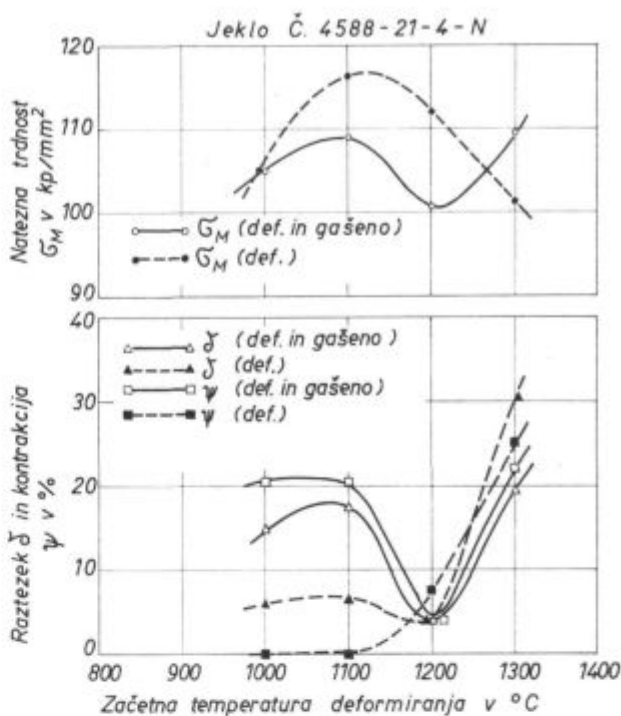


Slika 11

Jeklo C. 4588, 21-4-N: Strukture po simuliranem deformiranju v štirih temperaturnih intervalih (OS — osnovna struktura, DS — deformirana struktura)

Fig. 11

Steel C. 4588, 21-4-N: Structures after simulated deformation in four temperature intervals (OS — basic structure, DS — deformed structure)



Slika 12

Jeklo C. 4588, 21-4-N: Mehanske lastnosti v odvisnosti od začetne temperature deformiranja

Fig. 12

Steel C. 4588, 21-4-N: Mechanical properties depending on the initial temperature of deformation.

grafskih razlag: pri tej temperaturi velik del karbidov še ne gre v raztopino, obenem pa je temperatura že dovolj visoka, da poteka intenzivno preurejanje karbidov iz sferoidov v film po kristalnih mejah. Tega bistveno ne spremene niti delne deformacije pri ohlajevanju. Tudi naknadno gašenje (1100 °C, voda) ne spremeni strukture, zato tudi raztezek in kontrakcija ostaneta tako slaba kot v deformiranem stanju.

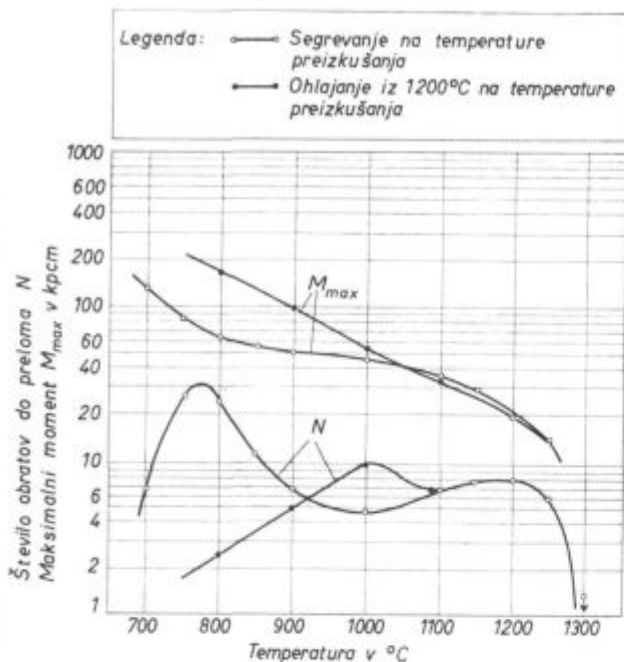
Pri začetnih temperaturah deformiranja 1100 in 1000 °C so lastnosti že bistveno boljše, posebno v gašenem stanju.

Rezultati preiskav jekla 21-4-N so torej naslednji:

Iz predelavnosti, določene s torzijskimi preizkusi, nismo mogli določiti optimalne zgornje temperature predelave tega jekla, saj se število obratov do preloma od 1050 do 1300 °C bistveno ne spremeni. Raziskave struktur in lastnosti po deformiranju pa pokažejo, da tega jekla v nobenem primeru ne smemo pred predelavo segrevati na višje temperature od 1150 °C. Glede na to, da so segrevanja v praksi mnogo daljša kot pri naših preizkusih, bi bila še ustrežnejša najvišja temperatura 1100 °C, oziroma optimalni temperaturni interval predelave od 1100 do 850 °C.

4. Jeklo Č. 4581, Prokron 9

Predelavnosti jekla Prokron 9, določene po načinih segrevanja in ohlajanja na temperature preizkusov, so prikazane na sliki 13. V ozkem zgor-



Slika 13

Jeklo C. 4581, Prokron 9: Krivulje predelavnosti, dobljene s segrevanjem in ohlajanjem preizkušancev na temperature preizkusov

Fig. 13

Steel C. 4581, Prokron 9: Workability curves obtained by heating and cooling samples to the testing temperature.

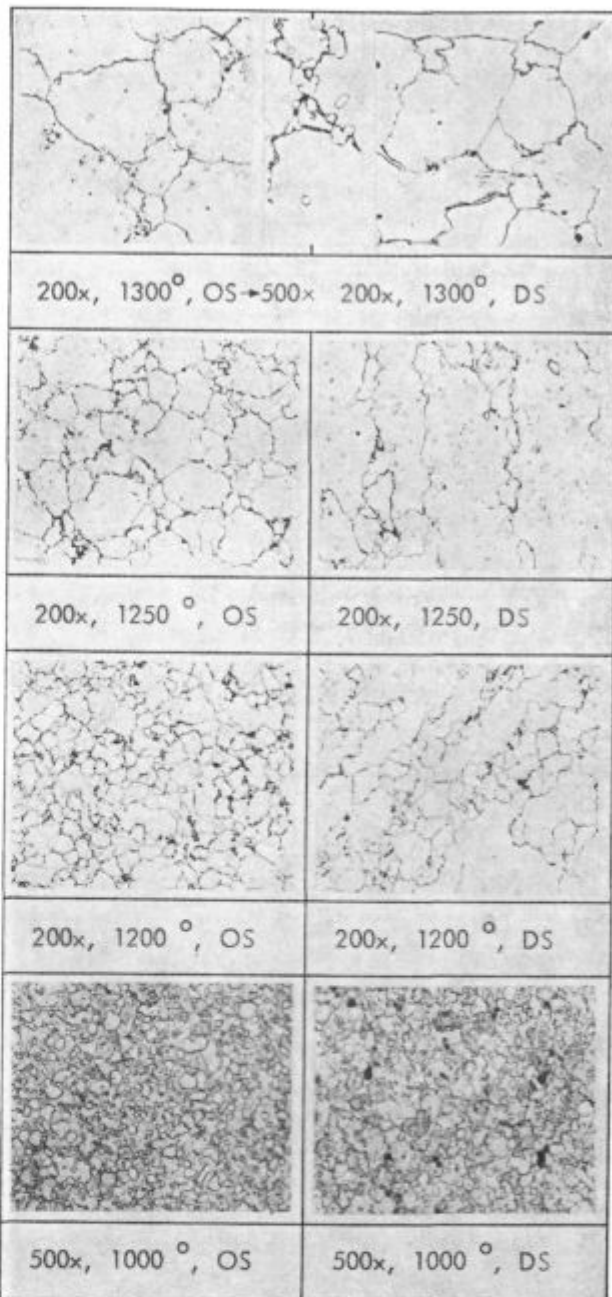
njem feritno karbidnem območju med 700 in 800° Celzija doseže predelavnost celo 30 obratov do preloma, nato pa se slabša do 1000 °C. Ta potek krivulje je značilen za jekla, ki se transformirajo v zelo širokem temperaturnem intervalu. Najboljša predelavnost je pri 1200 °C, medtem ko se pri 1300 °C jeklo poruši brez deformacije.

Pri preizkusih z ohlajanjem iz 1200 °C se pojavi izboljšanje predelavnosti pri 1000 °C, ker je v tem primeru struktura brez ferita. Pri nižjih temperaturah se predelavnost slabša, tako da predelava pod 850 °C ne bi bila več umestna. Na osnovi krivulj predelavnosti je priporočljiv temperaturni interval predelave od 1200 do 850 °C.

Strukture po segretju in deformiranju kaže slika 14. Pri 1300 °C je struktura grobozrnata in vsebuje še precej eutektičnih karbidov. Na vmesni sliki pri petstokratni povečavi vidimo tudi mrežnato razporejene karbide po kristalnih mejah. Deformirana struktura je podobna osnovni strukturi, ker se je jeklo prelomilo že po minimalni deformaciji.

Na 1250 °C je struktura že sorazmerno drobna, pri deformaciji pa nastajajo bolj groba, razpognjena zrna. Na 1200 °C je struktura že zelo drobozrnata.

Do sedaj omenjene strukture na 1300, 1250 in 1200 °C so jedkane na avstenitna kristalna zrna, v svetli osnovi pa je martenzit. Na 1000 °C nismo



Slika 14

Jeklo C. 4581, Prokron 9: Strukture po segretju na temperature in deformiranju (OS — osnovna struktura, DS — deformirana struktura)

Fig. 14

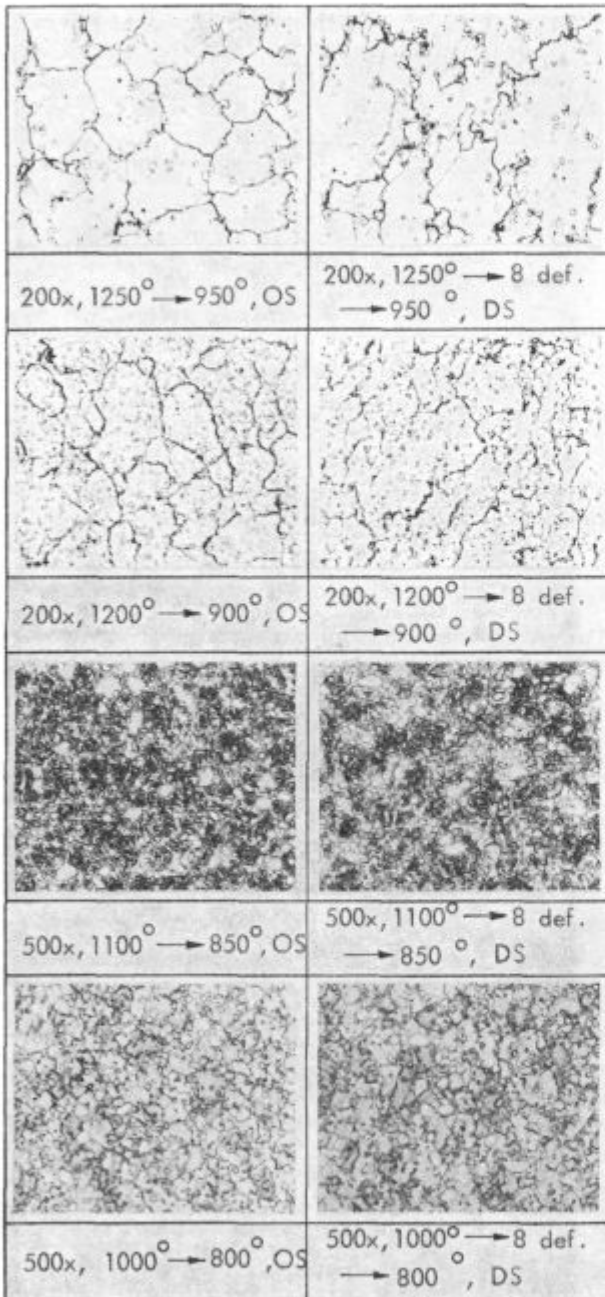
Steel C. 4581, Prokron 9: Structures after heating sample to the temperature, and after the deformation (OS — basic structure, DS — deformed structure)

uspeli z jedkanjem za odkrivanje avstenitnih zrn, ker so ta verjetno zelo drobna in njihove meje tečejo od enega do drugega karbidnega delca. Struktura po segrevanju in deformiranju na 1000° Celzija je torej martenzitno-karbidna.

Deformiranje po načinu simuliranega valjanja: Za preiskave struktur in posebej za ugotovitev

mehanskih lastnosti smo izvedli simulirana deformiranja v naslednjih temperaturnih intervalih:

1250—950 °C
 1200—900 °C
 1200—800 °C
 1100—850 °C
 1000—800 °C
 800—700 °C



Slika 15

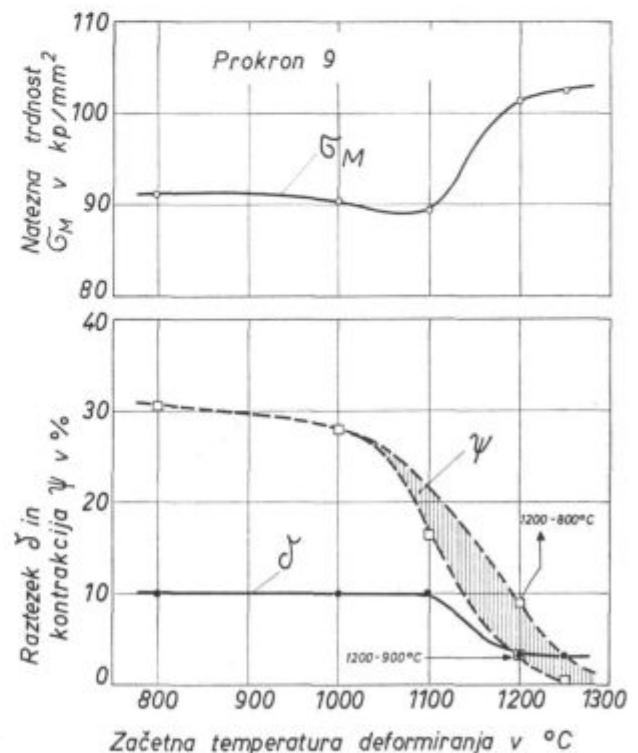
Jeklo C. 4581, Prokron 9: Strukture po simuliranem deformiranju v štirih temperaturnih intervalih (OS — osnovna struktura, DS — deformirana struktura)

Fig. 15

Steel C. 4581, Prokron 9: Structures after simulated deformation in four temperature intervals (OS — basic structure, DS — deformed structure).

Strukture po teh preizkusih prikazuje slika 15. Pri začetnih temperaturah 1250 in 1200 °C opazimo mrežasto strukturo, ki se po deformaciji delno razbije in delno spremeni v še bolj groba zrna. Pri strukturi na 1200 °C opazimo, da je precej bolj groba kot tista, prikazana v sliki 14, kljub isti temperaturi. To pomeni, da lahko tudi pri 1200 °C pride do močnejše rasti zrn, deformacija pa rast še pospeši. Strukture, ki ustrezajo začetni temperaturi 1100 °C — ali nižjim, so podobne tistim na sliki 14.

Preizkušance za mehanske preiskave smo po deformiranju žarili 4 ure na 790 °C, nato pa izvedli natezne preizkuse. Rezultati so prikazani na sliki 16. Po deformiranju iz začetnih temperatur 1250 in 1200 °C dobimo veliko trdnost (nad 100 kp/mm²) in zelo slab raztezek in kontrakcijo. Kontrakcija pri deformiranju iz 1200 °C pa se nekoliko izboljša, če je končna temperatura deformacij 800 °C, in ne 900 °C. Med 1200 in 1100 °C, oziroma 1000 °C se kontrakcija in raztezek močno izboljšata, natezna trdnost pa se zmanjša za približno 10 kp na kvadratni milimeter. Značilen prehodni interval med 1200 in 1100 °C lahko razložimo s strukturinimi spremembami podobno kot pri jeklu 21-4-N. Nad 1100 °C se začne intenzivno preurejanje sferoidnih karbidov v film po kristalnih mejah. Gle-



Slika 16

Jeklo C. 4581, Prokron 9: Mehanske lastnosti v odvisnosti od začetne temperature deformiranja

Fig. 16

Steel C. 4581, Prokron 9: Mechanical properties depending on the initial temperature of deformation.

de na to, da je segrevanje jekla v praksi precej daljše kot pri naših preizkusih, sodimo, da najvišja temperatura predelave tega jekla ne sme presegati 1100 °C.

IV. OBRAVNAVA REZULTATOV

Rezultate obravnavamo večinoma že pri opisu naših raziskav in preizkušanj. V splošnem lahko ugotovimo, da rezultati potrjujejo, da na predelavo jekla ne moremo gledati le s stališča najboljše predelavnosti, to je plastičnosti jekla in z ozirom na to določati parametre predelave. V tej raziskavi smo izbrali določen način deformiranja in ugotavljanja struktur in mehanskih lastnosti jekla po predelavi. Nedvomno so v določenih razmerah in pri nekaterih jeklih pomembni še drugi faktorji, kot so predelovalna trdnost, razni tehnološki predelovalni faktorji, npr. širjenje jekla in drugo. Mnoge težave nastopajo v proizvodnji pri mehkem žarjenju specialnih jekel, predelovalna industrija pa celo že od brzoreznih jekel pričakuje, da so sposobna za hladno oblikovanje, npr. vtiskavanje. Vprašanje je torej, ali lahko te posebne lastnosti dobimo le s posebnimi toplotnimi obdelavami in v koliki meri bi lahko na to vplivali tudi z ustrezno predelavo.

S torzijskimi preizkusi ugotavljamo, da ima večina jekel najboljšo predelavnost (največ obratov do preloma) pri temperaturah od 1200 do 1325 °C Celzija. Strukture in lastnosti po predelavi pa kažejo, da tako visokih temperatur predelave ne kaže uporabljati. Pri jeklu OC 100, ki je že pri 900 °C čisto avstenitno, je problem izredno naraščanje kristalnih zrn. Na rekristalizacijo pri teh visokih temperaturah, sorazmerno majhnih delnih deformacijah in včasih tudi počasnih deformacijah, ne moremo računati.

Problem visoko legiranih karbidnih ali celo ledeburitnih jekel je še bolj izrazit. S previsoko temperaturo lahko jeklo dobesedno uničimo, ker se posebni karbidi pred popolno raztopitvijo (če pod solidusom do nje sploh pride) začno intenzivno razporejati po kristalnih mejah. Videli smo, da tudi deformiranje ne popravi take strukture in celo še po žarjenju ali gašenju jekla lahko ugotavljamo slabe mehanske lastnosti.

V. SKLEPI

1. Torzijski preizkus pri visokih temperaturah smo izkoristili za poseben postopek deformiranja, s katerim smo simulirali valjanje. Osem približnih deformacij iz prakse smo preračunali v strižne deformacije, ki pri torziranju nastajajo 0,25 mm pod površino 6,5 mm debelega torzijskega cilindra. Uredili smo kontinuirno ohlajevanje preizkušanca s približno hitrostjo 60 °C/min od zgornje do spodnje temperature deformiranja.

2. S štirimi vrstami jekel smo raziskovali naslednje: določitev predelavnosti na standarden način in z ohlajevanjem iz višjih temperatur na nižje, deformiranje po načinu simuliranega valjanja, metalografske preiskave in natezne preizkuse.

3. Jeklo OC 100 ima torej najboljšo predelavnost (posebno pri ohlajevanju), čim višje je segreto pred deformiranjem, vendar ne prek 1250 °C. Metalografske preiskave pa pokažejo, da med 900 in 1000 °C začno kristalna zrna tega jekla močno naraščati. S tem je povezana tudi ugotovitev, da dobi to jeklo najboljše lastnosti po predelavi med 900 in 750 °C.

4. Pri utopnem jeklu UTOP Mo 1 seže maksimum predelavnosti celo do 1300 °C. Struktura in lastnosti pa kažejo, da ni umestno to jeklo segrevati nad 1150 °C.

5. Jeklo 21-4-N je avstenitno in vsebuje precej karbidov in nitridov. Na torzijski način ugotovljena predelavnost je precej slaba in se med 1050 in 1300 °C bistveno ne spremeni. Pri 1300 °C so karbidi že v raztopini, dušik pa izhaja iz jekla, bolj v notranjosti pa tvori perlitu podobne nitridne skupke. Pri 1200 °C je najbolj značilno intenzivno preurejanje sferoidnih karbidnih delcev v karbidni film po kristalnih mejah. Zato je ta temperatura najbolj neugodna za strukturo in lastnosti jekla po predelavi. To jeklo se torej v nobenem primeru ne sme segrevati pred predelavo na temperature, višje od 1150 °C, še boljše pa je le na 1100 °C.

6. Podoben primer je jeklo Prokron 9, ki je ledeburitne vrste in še pri 1300 °C vsebuje neraztopljene karbide. Tudi pri tem jeklu se nad 1100 °C Celzija začne intenzivno preurejanje karbidov na kristalne meje. Zato jeklo ne smemo segrevati prek 1100 °C.

ZUSAMMENFASSUNG

Für die plastische Verformung der Metalle sind im metallurgisch-technologischen Sinne von wesentlicher Bedeutung erstens die Fähigkeit des Metalles für die plastische Verformung oder wie man sagt, für die Warmumformbarkeit und zweitens das Gefüge und die Eigenschaften des Metalles die wir nach dem einen oder anderen Verformungsverfahren erhalten.

Die Warmumformbarkeit des Stahles wird oft mit dem Warmverdrehversuch bestimmt. Jedoch wird der Stahl bei diesem Versuch auf die Verformungstemperatur erwärmt und isothermisch verformt. Bei der Verformung im Betrieb (walzen, schmieden) wird der Stahl auf eine bestimmte

Temperatur erwärmt und kühlt während der Verformung ab.

Die Temperaturführung ist im beiden Fällen verschieden. Diese Tatsache ist wichtig bei den Stählen bei welchen sich das Gefüge in einem breiten Temperaturintervall ändert (A. Kveder, M. Taučer, Arch. Eisenhüttenwesen 45, 1974, Nr. 7, Juli 465-469).

Das andere Problem ist folgend: Ist die Verformung im Temperaturintervall im welchen sich der Stahl am besten verformen lässt auch die Versicherung für ein optimales Gefüge und Stahleigenschaften nach der Verformung? Im Artikel sind die Untersuchungen beschrieben, welche die Antwort auf diese Frage geben.

Es sind vier Stahlsorten untersucht worden: unlegierter Werkzeugstahl (OC 100), nichtrostender Werkzeugstahl (Prokron 9), Stickstofflegierter Ventilstahl (21-4-N) und Warmarbeitsstahl (UTOP No. 1).

Die Warmumformung ist an Torsionsproben durchgeführt worden, welche die Verformung durch das Walzen simulieren. Die Proben sind auf die obere Temperatur erwärmt und dann im bestimmten Temperaturintervall abgekühlt worden. Bei allen Stählen sind mehrere Versuche mit verschiedenen Anfangs- und Endtemperaturen der Verformung durchgeführt worden. Nachher sind die Proben entsprechend wärmebehandelt, auf die mechanischen Eigenschaften, und metallographisch untersucht worden.

Es ist bei allen vier Stahlsorten festgestellt worden, dass diese nicht auf die Temperatur der besten Warmum-

formbarkeit erwärmt werden dürfen. Die meistausgeprägte Dishesharmonie zwischen der optimalen Warmumformungstemperatur und der Temperaturen für die besten Stahleigenschaften zeigte sich bei den Stählen 21-4-N und Prokron 9. Bei den beiden Stählen fangen bei den Temperaturen oberhalb 1150°C die Karbide aus den sferoidalen Teilchen in einen Karbidfilm auf die Korngrenzen zu übergehen. Die Folge ist eine ausserordentliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften vor allem der Dehnung und der Einschnürung.

Die wesentliche Feststellung der Untersuchungen ist, dass es bei der Bestimmung der optimalen Warmumformungstemperatur nicht nur die technologische Verformung, sondern auch das Gefüge und die Stahleigenschaften berücksichtigt werden müssen. Dieses ist besonders wichtig bei den legierten Karbidstählen.

SUMMARY

In plastic forming of metals hot workability of the metal, and the structure and properties of metal obtained at a corresponding temperature and deformation condition of working are of essential importance as metallurgical parameters.

Hot workability of steel is often determined by a hot torsion test. But in such a test steel is heated to a certain temperature and isothermally tested. In practical working (rolling, forging) steel is heated to a certain temperature and it cools during working. Temperature conduct during deformation is thus quite different in the both cases which can be of great importance for steel in which structure is changed in a very wide temperature range. (A. Kveder, M. Taučer, Arch. Eisenhüttenwesen 45 (1974), Nr. 7, July, 465-469).

The second problem can be formulated in this way: Is working in the temperature interval of the optimal steel workability also assurance for the optimal structure and steel properties after working? Paper presents the investigations which shall answer this question.

Four steel were investigated: unalloyed tool steel (OC 100), stainless tool steel (Prokron 9), valve nitrogen steel (21-4-N), and tool steel for elevated temperatures (UTOP Mo 1).

Deformation by torsion test was adjusted so that it simulated working by rolling. Test pieces were heated to the upper temperature, then cooled in a certain temperature interval. Eight partial deformations at the uniform temperature intervals were performed inside the total interval of cooling. More tests with various initial and final temperatures of deformation were made with all the steel. After this, test pieces were correspondingly heat treated, checked by tensile tests and metallographically investigated.

Investigations with all the four steel showed that they should not be heated to the temperatures of the optimal workability. The most pronounced disharmony between the optimal working temperatures and the steel properties was found for steel 21-4-N and Prokron 9. In both steel carbides start to rearrange from spheroidal form into carbide film on grain boundaries above 1150°C. Thus mechanical properties, especially elongation and contraction deteriorated a great deal.

Essential finding of the investigation is that in determining the optimal temperature conduct of working not only technological workability but also structure and steel properties must be taken into account. This is valid especially for alloyed carbide steel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При пластической деформации металлов с металлургическо-технологической точки зрения существенное значение представляет следующее: во первых, способность металла к пластической деформации т. е. пригодность к переработки и, во вторых, структура и свойства металла полученные тем или иным способом теплового или деформационного режима переработки.

Пригодность к переработки стали часто определяется испытанием на прочность при кручении в горячем состоянии. При этом сталь необходимо согреть и подвергнуть изотермическим испытаниям. При нормальной промышленной переработки (прокатка, ковка) сталь разогревают на определенную температуру, после чего она охлаждается во время деформации. Температурное управление деформацией в обоих примерах весьма различное; это имеет большое значение при сталях структура которых изменяется в очень широких температурных интервалах (A. Kveder, M. Taučer, Arch. d. Eisenhüttenwesens 45/1947/, Nr. 7, Juli, 465-469).

Вторую проблему можно формулировать с следующим вопросом: обеспечивает ли переработка в наиболее пригодном температурном интервале также оптимальную структуру и желательные свойства после переработки? В статье описаны исследования которые дали ответ также и на этот вопрос.

Для исследования выбраны четыре марки стали: нелегированная инструментальная сталь (OC 100), нержавеющей инструментальная сталь (Prokron 9), сталь для вентилей с азотом (21-4-N) и инструментальная сталь для работы в горячем состоянии.

Способом скручивания выполнена деформация, которая имитирует переработку прокатыванием. Образцы были согреты до верхнего температурного предела и охлаждены по определенному температурному интервалу. В равномерных температурных интервалах выполнены в промежутке 8 частичных деформаций. При всех испытанных сталях выполнено большое количество опытов с различными начальными и конечными температурами деформации. После этого образцы были соответственно термически обработаны и выполнено разрывное испытание и металлографическое исследование.

При всех исследованных сталях установлено, что разогревание до температуры самой лучшей пригодности для обработки не рекомендуется.

Самое выразительное несогласие между оптимальными температурами переработки а также что касается свойств установлено при сталях 21-4-N и Prokron 9. При обеих этих марок при температурах свыше 1150°C наступает перераспределение карбидов из формы сферолитных частиц в карбидный фильм расположен вдоль границ кристаллов. Последствие этого исключительное ухудшение механических свойств, главным образом растяжения и контракции.

Существенный вывод исследований состоит в том, что при определении оптимального температурного режима переработки необходимо учитывать не только технологическую пригодность к переработки, но также структуру и свойства стали. Это особенно важно при легированных карбидных сталях.