

Termomehanična predelava jekla

Članek prinaša analizo bibliografije o termomehanični predelavi jekla in opis lastnih preizkusov o vplivu termomehanične predelave na mehanske lastnosti v vročem jekla z 0,3 % C, 2,9 % Si in 7,6 % Cr.

UVOD

Po zelo splošni definiciji je termomehanična predelava jekla »uporaba deformacije pred aloptroko transformacijo jekla z namenom, da dobimo kovino, ki ima boljše mehanske karakteristike«. Več je postopkov, ki ustrezajo tej definiciji. Razdelimo jih v dve grupi: termomehanična predelava pri visokih temperaturah, angleško hot — cold working (v nadaljevanju teksta TMPVT) in termomehanična predelava pri nizkih temperaturah, angleško »ausforming« (v nadaljevanju teksta TMPNT).

Pri obeh postopkih deformiramo avstenit tako, da ne more rekristalizirati ali rekristalizira le omejeno in predno se transformira v strukturne sestavine jekla, ki so obstojne pri nizki temperaturi. TMPVT izvršimo pri visokih temperaturah, pri katerih je avstenit stabilen, zato jo lahko uporabljamo pri praktično vseh jeklih in brez znatnih sprememb v tehnologijo valjanja. Potrebno je le določiti optimalne parametre: redukcijo, končno temperaturo valjanja in način ohlajanja. TMPNT izvršimo pri nižjih temperaturah, pri katerih je avstenit metastabilen. Za ta postopek so torej primerna jekla, ki imajo v izotermnem in kontinuirnem TT diagramu zadosti veliko področje metastabilnega avstenita, da je mogoče predelavo izvršiti pred začetkom perlitne ali bainitne transformacije.

Po predelavi je potrebno jeklo ohladiti tako, da se avstenit spremeni v martenzit. Perlitna in bainitna premena zmanjšata trdnost jekla, ne da bi ustrezno povečala njegovo plastičnost. TMP občutno poboljša trdnostne lastnosti jekel, poveča popuščno obstojnost, utripno trdnost in obstojnost proti obrabi ter toplotnim udarom. Ne poveča trdnosti jekla, pač pa da martenzitni strukturi plastičnost, ki prepreči nastanek krhkega preloma brez deformacije ter pride tako do izraza naravna trdnost martenzita.

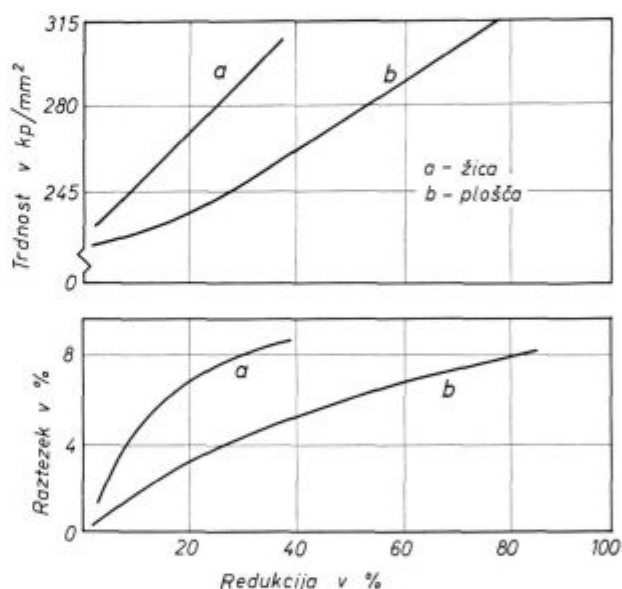
V strokovnem tisku je zelo veliko vjrov o TMP jekla, samo med leti 1960 in 1965 je bilo približno 200 člankov (Duckworth in Taylor 2). V tem članku smo se omejili na analizo izbranih dosegljivih publikacij, ki so izšle po letu 1962. Popolne

bibliografije o TMP jekla ne bi mogli dati tudi če bi analizirali mnogo več člankov, kajti članke o tem postopku stalno objavljajo strokovni časopisi. V članku smo na kratko rezimirali tudi rezultate naših preizkusov o vplivu TMP na mehanske lastnosti kromovega jekla v vročem.

1. PARAMETRI TMP

1.1. Parametri TMPNT

Osnovni parametri so stopnja in temperatura predelave ter ohlajanje jekla po predelavi. Matas, Hill in Hunger (1) so ugotovili, da raste natezna trdnost jekla približno sorazmerno s stopnjo predelave (slika 1) in da je predelava z vlečenjem bolj učinkovita od predelave z valjanjem. Ta raz-

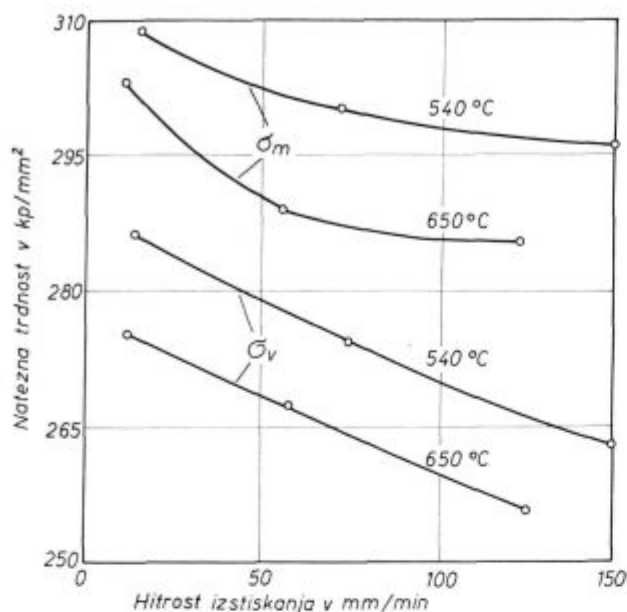


Slika 1

Vpliv termomehanične predelave z vlečenjem in z valjanjem na trdnost in razteznost jekla z 0,6 % C in 5,0 % Ni. Temperature vlečenja 425 °C, temperatura valjanja 425 do 540 °C, kaljeno s temperature predelave in 2 uri žarjeno pri 110 °C.

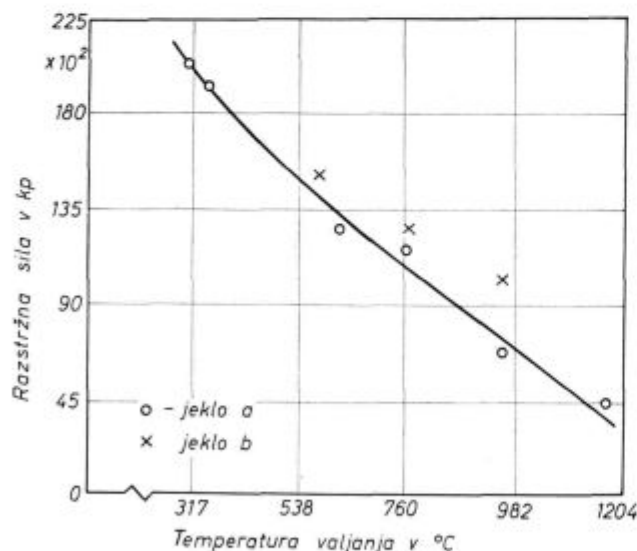
loček verjetno lahko pripišemo razločku v realni stopnji pregnetenja, ki je posledica razlik v toku materiala pri odprtem in zaprtem kalibru in katerega geometrično definirana stopnja redukcije ne zajame. Duckworth in Taylor (2) navajata, da se poveča trdnost za 0,4 do 1,4 kp/mm² za vsak procent stopnje predelave. Justufson in Zackay (3), ki sta med pionirji TMP, sta ugotovila, da se utr-

ditev jekla zmanjšuje s hitrostjo predelave (slika 2). Razlaga je, da je pri večjih hitrostih predelave zaradi adiabskega segrevanja izvrši neka vrsta



Slika 2
Vpliv hitrosti iztiskanja na trdnost jekla

poprave deformirane strukture. O tem ni drugih podatkov, vendar lahko ta parameter zanemarimo v primerjavi z drugimi. Po Matasu in sodelavcih raste dosežena trdnost jekla pri isti redukciji s padanjem temperature predelave avstenita (slika 3). Vsaka transformacija avstenita po predelavi



Slika 3
Vpliv temperature valjanja na razdržno silo pri 50 % redukciji

a) jeklo z 0,4 % C; 1,1 % Mn; 1,8 % Si; 1,1 % Ni; 2,1 % Cr; in 0,3 % Mo.
b) podobno jeklo z 0,3 V.

v perlitni ali bainitni stopnji poslabša lastnosti jekla in sicer zmanjša trdnost in mejo plastičnosti, ne da bi se ustrezno povečala plastičnost jekla. Predelano jeklo je zato potrebno kaliti na martenzit in nato s temperaturo popuščanja vplivati na razmerje med trdnostjo in plastičnostjo.

1.2. Parametri TMPVT

Nismo našli podatkov o vplivu različnih načinov predelave in malo je podatkov o vplivu hitrosti predelave. Sokolkov, Lozinski in Čuprakova (4) pravijo, da vpliva TMPVT pozitivno na lastnosti zlitin tipa nimonic in krom-nikelj-manganovega jekla pri visokih temperaturah, le če je bilo valjanje izvršeno z določeno hitrostjo, ki ustvari posebno oblikovane kristalne meje. Vpliv stopnje predelave sta prva raziskovala Bernštein in Rahšadt (5). Dognala sta da stopnja predelave v 1 prehodu v intervalu med 15 in 75 % ne vpliva izrazito na trdnost jekla za vzmeti 55 HGR (0,5 C, 1 Mn, 1 Si in 0,003 B). Lastnosti so celo nekoliko slabše po veliki predelavi v enem prehodu zaradi notranjih poškodb v valjancu. Bron in Levites (6) navajata za jeklo iste vrste, da je največja utrditev pri stopnji predelave med 25 in 50 %. Guljaev in Sigarov (7) pa sta ugotovila, da raste utrditev enakomerno s stopnjo predelave do 80 % v jeklu z 0,5 C, 1,5 Cr, 4 Ni in 0,3 Mo. White (8) navaja, da je optimalni interval stopnje predelave 15 do 40 % v enem prehodu. Izgleda, da tu še ni enotnega mišljenja, ampak da je ta parameter odvisen od vrste jekla, načina predelave in temperature predelave in ohlajanja. Ni pa mogoče pričakovati večjega uspeha, če je stopnja predelave manjša od 15 %.

Prokoškin, Zubin in Akimov (9) so dognali, da je bolje, če visoko stopnjo predelave dosežemo z več prehodi med valji (tabela 1). Po močni redukciji v enem prehodu je utrditev topološko neenakomerna, nekatera mesta v mikrostrukturi jekla so manj utrjena in od takih mest je odvisna trdnost jekla. Če se izvrši predelava v več prehodih je večja gostota dislokacij v jeklu, drsne lamele so krajše in številnejše ter enakomernije razdeljene v manjših kristalnih zrnih. Iz takega drobnozrnatega avstenita nastane pri ohlajanju zelo fin martenzit. Učinkovita pa je večja skupna predelava le če spremembe v intervalih med redukcijami ne eliminirajo pozitivnega vpliva parcialnih redukcij.

Ni zanesljivih podatkov o vplivu temperature predelave na utrditev jekla. Po že omenjenem Matasu in sodelavcih (slika 3), pada utrditev jekla sorazmerno z rastjo temperature predelave tudi pri TMPVT. Prokoškin in sodelavci (10) pa so ugotovili, da temperatura predelave v intervalu med 750 in 900 °C praktično ne vpliva na lastnosti predelanega jekla z 0,45 C; 5,2 Cr; 1,6 Ni; 1,6 Mo; 1,3 Si in 0,2 V. Ruski avtorji zanemarjajo vpliv temperature in je pri njihovih preizkusih predelava običajno izvršena z valjanjem med 900 in 1000 °C le pri nerjavnih jeklih in posebnih zlitinah uporabljajo

Tabela 1 — Vpliv števila prehodov pri TMPVT s skupno redukcijo 60 % na mehanske lastnosti vzmetnega jekla 55 HGR

	Število prehodov in redukcije	Trdota RC	Trdnost kp/mm ²	Meja plastičnosti kp/mm ²	Raztezek %	Kontrakcija %	Gostota dislokacij cm ⁻³
	0	56	206	154	2,5	14	—
1	60 %	56	237	195	8,1	30	2,2 · 10 ¹¹
2	30 + 30 %	57	245	206	9,4	31,3	—
3	20 + 20 + 20 %	58	250	216	9,9	31,8	4,7 · 10 ¹¹

Pogoji TMPVT: Temperatura začetka valjanja 900°, brez vmesnega žarenja med prehodi, kaljenje v olju, popuščanje 50 min. pri 220° C.

višje temperature. Izgleda, da se temperatura predelave ravna po odpornosti jekla proti deformaciji in po njegovi rekristalizacijski hitrosti. Čim hitrejša je rekristalizacija pri predelavi razdrobljene strukture jekla, t. j. čim manjša je njena odpornost proti rekristalizaciji, tem manjša naj bo temperatura predelave. Dregan in Bernštejn (11) sta ugotovila, da se lastnosti ne poslabšajo tudi če jeklo po predelavi rekristalizira in nastanejo le drobna zrna avstenita. Lastnosti se močno pokvarijo ko

nato avstenitna zrna zrastejo zaradi sekundarne rekristalizacije.

Po predelavi je potrebno jeklo ohladiti tako hitro, da se avstenit pretvori v martenzit, kajti, kot pri TMPNT, premena v perlitni ali bainitni stopnji zmanjša trdnost, ne da bi se ustrezno povečala plastičnost jekla. Nekatera jekla je potrebno kaliti, pri mnogih, n. pr. pri vzmetnem jeklu 55 HGR (tabela 2) tudi pospešeno ohlajanje valjanca v zračnem toku ne poslabša znatno trdnosti jekla.

Tabela 2 — Vpliv načina ohlajanja in pogojev popuščanja na mehanske lastnosti vzmetnega jekla 55 HGR. V števcu so lastnosti po ohladitvi v zračnem toku, v imenovalcu po kaljenju v vodi (Kaljner, Kossovski in Bernštejn 12). Skupna stopnja predelave v več prehodih 70 %.

Popuščanje		Trdnost kp/mm ²	0,2 meja kp/mm ²	Raztezek %	Kontrakcija %
Temperatura °C	Trajanje ure				
brez popuščanja		240	218	6,5	18
		274	260	4,5	13
240	1	237	223	6,0	19
		258	235	7,0	19
240	4	253	218	6	18
		268	224	6,3	18
400	0,66	180	167	6,5	33
		192	172	7,0	34
650	0,5	156	130	11	48
		156	140	11,5	39
240 ¹	1	180	98	1	1
650 ¹	0,5	102	87	6,5	30

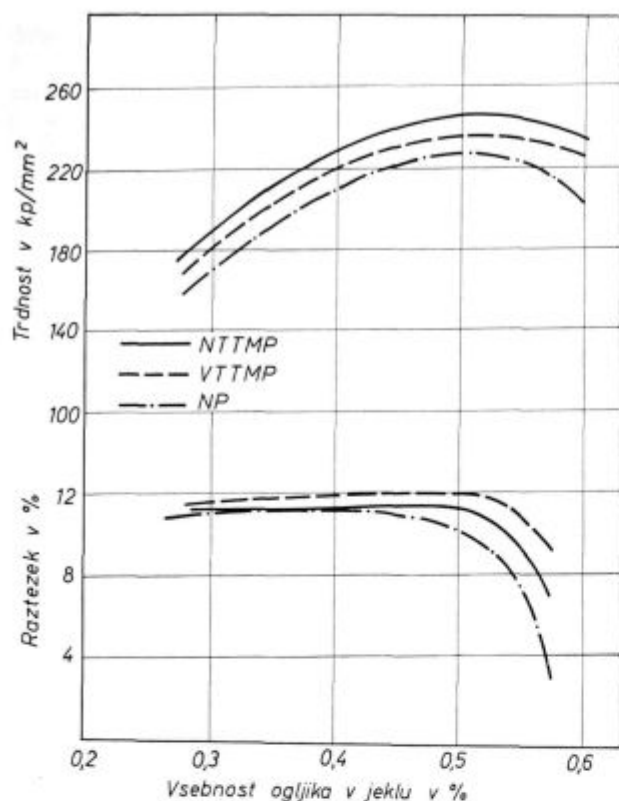
1. Konvencionalno termično obdelano jeklo

2. JEKLA PRIMERNA ZA TMP

2.1 Splošne zahteve

Za TMPVT so primerna praktično vsa jekla pod pogojem, da nima sekundarna rekristalizacija v njih tolikšne hitrosti, da je ni mogoče preprečiti z ohlajanjem po valjanju. Hyspecka in Mazanec (13, 14) sta valjala jekla z 0,27 do 0,57 C; 1 Si; 2 Cr; 2 Ni in 0,45 Mo z redukcijo 85 % pri padajoči tem-

peraturi 900 do 700° C in izotermno pri 550° C. Po valjanju sta vzorce takoj kalila v olju. Njuni rezultati (slika 4) kažejo, da je optimum mehanskih lastnosti jekla pri približno 0,5 % C, kar trdi tudi Duckworth (15). Pri 0,52 % C so bili prelomi preizkušancev žilavi po TMP, in krhki po klasičnem kaljenju, pri 0,58 % C pa v obeh primerih krhki. To kaže, da je nepriporočljivo povečati ogljik v podobnih jeklih nad 0,5 %, če so namenjena za TMPVT.



Slika 4

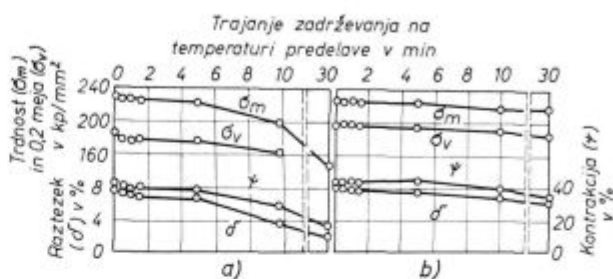
Vpliv vsebnosti ogljika v jeklu na trdnost in raztezek legiranih jekel za poboljšanje

Za TMPNT so primerna jekla, ki imajo v TT diagramu zadosti veliko področje metastabilnega avstenita in nosova perlitne in bainitne premene dovolj odmaknjena, da pri predelavi ne pride do ene ali druge transformacije, marveč le do nastanka martenzita. Taka so legirana jekla, ki vsebujejo krom, nikelj, mangan, silicij, molibden in druge elemente in so namenjena za poboljšanje, ali pa tudi ne.

Pozitivne rezultate pa je dal tudi preizkus TMPVT nelegiranega jekla z 0,4 C in 0,6 Mn v industrijskih razmerah, ki so ga izvršili Andrejeva

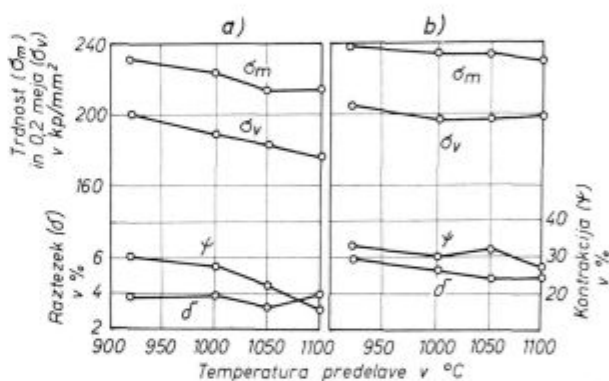
in sodelavci (16). Rezultate navajamo v tabeli 3. Uspeh sta dosegla Kristal in Rjazancev (28) tudi z TMPVT mehkejšega jekla z 0,2 C in 0,5 Mn.

TMPVT je lažje izvršiti, če jeklo po predelavi počasi rekristalizira. Bernštein in Zueva (17) navajata, da mangan in nikelj zavirata rekristalizacijo jekla po TMPVT, vendar je nasprotni pospeševalni vpliv ogljika mnogo močnejši. Prokoškin in sodelavci (18) so ugotovili, da v jeklih 55 HGR,



Slika 5

Vpliv zadrževanja na temperaturi predelave po valjanju na mehanske lastnosti jekla 55 HGR brez dodatka cirkona (a) in z dodatkom cirkona (b). Temperatura valjanja 970 °C, redukcija 40 %, kaljenje v olju, popuščanje 1 uro pri 200 °C.



Slika 6

Vpliv temperature TMPVT na mehanske lastnosti jekla 55 HGR brez dodatka cirkona (a) in z dodatkom cirkona (b)

Tabela 3 — Mehanske lastnosti jekla tipa 40 (0,4 C; 0,6 Mn) po TMPVT (števec) in konvencionalni predelavi in termični obdelavi (imenovalec) v odvisnosti od temperature popuščanja

Temperatura popuščanja °C	Trdnost kp/mm²	0,2 meja kp/mm²	Raztezek %	Kontrakcija %	Zilavost kp/cm²
200	201	160	7	40	3,5
	145	127	2	16	3
300	181	150	7,5	39	3
	146	124	7	35	4
400	141	126	8,5	53	8
	120	112	8,5	50	8,5
500	135	120	11	55	11
	102	90	12	60	12
600	101	91	17	60	13
	80	68	16	60	20

55 CG2P (0,55 C; 1,6 Mn in 1 Cr) in 40 X HSVF (0,4 C; 1 Si; 1,5 Ni; 1 W in 0,2 V) dodatek mišmetala (0,3 %), cirkona (0,12 %) ali cera (0,15 %) močno zavre sekundarno rekristalizacijo predelanega jekla in ohrani drobnozrnato strukturo avstenita. Zato čas zadržanja na temperaturi valjanja 920° C praktično ne vpliva na mehanske lastnosti jekla (slika 5). Dodatek cirkona v jeklo zmanjša na zanemarljivo stopnjo tudi vpliv temperature predelave jekla (slika 6).

2.2 Jekla za vzmeti

V sovjetskem strokovnem tisku je mnogo član- kov o TMPVT jekel za vzmeti predvsem o že več- krat omenjenem jeklu 55 HGR. Ker so avtorji obravnavali v praktično vseh preizkusih vplive raz- ličnih tehnoloških parametrov in dosegli dobre re- zultate, lahko sklepamo, da se v SZ TMPVT upo- rablja za izdelavo vzmeti. V ameriškem tisku je malo podatkov. Marshall in sodelavci (19) trdijo, da se vzmeti za tovornjake izdelujejo po ausform- ing postopku. Clark in Harwood (20) sta nekoliko konkretnjša v članku, v katerem obravnavata upo-

rabo TMP za različne izdelke, katere potrebuje motorna industrija. Taki izdelki so trdni in žilavi ter še posebej primerni za dinamično ali na utru- jenost obremenjene dele vozil. Teža vzmeti za to- vornjak se je zmanjšala za 1/3 z uporabo z TMPNT izdelanih vzmeti, pri isti teži vzmeti pa se lahko dovoljena obremenitev poveča skoraj na dvojno velikost. Če želimo, da bo TM predelano jeklo lahko tekmovalo s standardnim jeklom za vzmeti SAE 5160, mora biti vzmetni sklop boljši, kriterij za presojo pa so cena jekla, uporabnost vzmeti in izdelavni stroški. Od vseh preizkušenih jekel za vzmeti se je za TMP najbolj obneslo jeklo D6A. To jeklo je dražje od standardnega jekla SAE 5160, zaradi zmanjšanja števila listov in teže vzmeti, ki sta mogoča zaradi boljših lastnosti (tabela 4), pa postane gospodarsko primernejše. TMP je še bolj primerna za izdelavo torzijskih vzmeti, ki se po valjanju le malo mehansko obdelujejo. Po sedanjih izkušnjah sta najbolj primerni za torzijske vzmeti jekli H 11 (0,4 C; 1 Si; 5 Cr; 1,3 Mo in 0,5 V) in D6A. Zelo dobre mehanske lastnosti omogočajo, da se uporabi dimenzijsko manjše vzmeti, kar mnogo- krat zelo olajša delo konstrukterja.

Tabela 4 — Lastnosti jekel za listaste vzmeti

Jeklo in predelava ali obdelava	Področje obremenitve pri čistem upogibu kp/mm ²	Število upogibov do preloma
D6A, TMPNT	70-150	250.000
(0,5 C; 1 Cr; 1 Mo in 0,5 Ni)	70-155	235.000
Valjana površina	70-150	1.000.000
Brušena površina	135-215	100.000
SAE 5160 klasično toplotno obdelano		
(0,6 C; 0,9 Mn; 0,8 Cr)	50-100	100.000
Neobdelana površina	63-145	20.000
Peskana površina	35-115	100.000

2.3 Orodna jekla

Clark in Harwood navajata, da se pri firmi Ford zelo zanimajo za TMP različnih orodnih jekel, ker s to predelavo dobijo jekla visoko trdnost in žila- vost, odpornost proti utrujenosti v hladnem in v vročem ter visoko trdoto v vročem, kar so vse pogoji za dobra orodja. Orodja za hladno kovanje, kovičenje, prebijanje in iztiskanje, izdelana s TMP, so imela pri istih pogojih dela za do 500 % večjo življenjsko dobo, kot orodja izdelana s klasično termično obdelavo (tabela 5). Trn za vroče prebi- janje zobnikov, izdelan iz jekla H 12 (0,35 C; 5 Cr; 0,4 V; 1,5 W in 1,5 Mo) je zdržal povprečno 14000 prebijanj, trn iz istega jekla izdelan s TMPNT (680° C, 50 %) pa je zdržal povprečno 25000 prebi- janj. Za uveljavitev TMP orodnih jekel sta dve poti: uporabljati cenejša legirana jekla, katerim daje TMP enake lastnosti kot klasična toplotna obdelava bolj legiranim jeklom ali pa tem jeklom povečati s TMP zdržljivost. Po mnenju Clarka in

Harwooda bodo prihranki pri uporabi v obeh pri- merih pokrili stroške TMP.

Telang in Clark navajata, da dobi jeklo z 0,5 C; 2 W; 2,6 Mo in 4,5 Cr s TMPNT trdnost 320 kp/mm². Pri tej trdnosti ima raztezek 8 % in precejšnjo ži- lavost, tako da je zelo primerno za orodja. Z oro- djem iz jekla H 11, ki je bilo izdelano s TMP, je bilo izdelano 3-krat več vijakov 5/16", kot z orodjem iz višje legiranega jekla T5 (0,8 C; 4 Cr; 2 V; 18 W in 8 Co), ki je bilo klasično termično obdelano in je bilo za 1 do 2 Rc trše. Delo z orodjem iz jekla H 11 so prekinili zaradi obrabe, orodja iz jekla T5 pa se navadno pokvarijo zaradi utrujenosti jekla.

Glava za kovičenje iz jekla S5 (0,55 C; 0,85 Mn; 2 Si; 0,25 Cr; 0,2 V in 0,4 Mo), toplotno obdelana na 61 Rc, je zdržala 46 ur, s TMPNT izdelane glave iz jekla H 11 pa 65 ur. Izkušnje kažejo, da daje TMP jeklu večjo odpornost proti izmenični mehanski in toplotni obremenitvi, ki je navadno vzrok preloma orodij za delo v vročem, zato se s TMP izdelana

Tabela 5 — Vzdržljivost nekaterih orodij

Orodje	Jeklo in obdelava ali predelava	Št. kosov
Kladivo za kovičenje	T5, konvencionalna obdelava (0,5 C; 4 Cr; 2 V; 18 W in 8 Co)	200.000
Kladivo za kovičenje	H 11, ausforming (0,4 C; 1 Si; 5 Cr; 1,3 Mo in 0,5 V)	600.000
Kladivo za udarjanje vgreznjene glave vijakov	T5, konvencionalna toplotna obdelava	30.000
Kladivo za udarjanje vgreznjene glave vijakov	H 11, ausforming	70.000
Trn za hladno prebijanje	M2, konvencionalna toplotna obdelava (0,85 C; 4 Cr; 2 V; 6 W in 5 Mo)	77.000
Trn za hladno prebijanje	H 11, ausforming	120.000

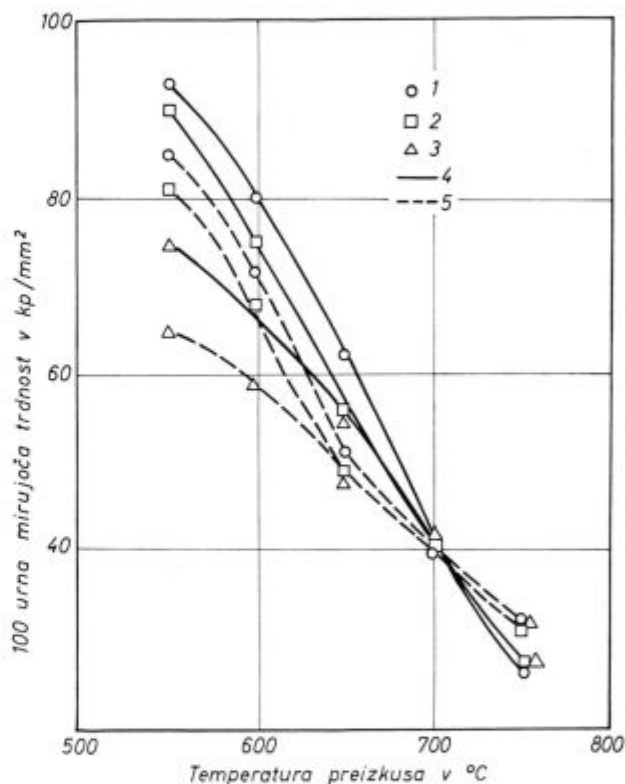
orodja izločijo zaradi obrabe. Zaradi boljše žilavosti, ki jo daje TMP v primerjavi s klasično toplotno obdelavo, bo mogoče še povečati obrabno trdnost jekel z večjo vsebnostjo ogljika. Zelo je verjetno da bosta jekli H 11 in H 12 (0,35 C; 1 Si; 5 Cr; 0,4 V; 1,3 W in 1,5 Mo) uspešno zamenjali dražji in bolj legirani jekli T5 in M2 (0,85 C; 4 Cr; 2 V; 6,25 W in 5 Mo) pri izdelavi orodij za delo v hladnem.

Mihčev in sodelavci (22) so ugotovili, da se s TMP poveča tudi rezna obstojnost nožev. Optimalna stopnja predelave je 25 do 30 %. Karpov (23) je s TMP jekla P18 (0,75 C, 18 W, 4,2 Cr, 1,2 V) povečal obstojnost svedrov pri vrtanju kaljenega jekla za 20 do 30 %.

2.4. Jekla in zlitine za uporabo pri visokih temperaturah

Sadovski in sodelavci (24) trdijo, da se s TMP izboljšajo mehanske lastnosti jekel v toplem. Na pravili so številne preizkuse na zlitinah tipa nimonic, na nerjavnem krom-nikelj-titanovem jeklu s 33 % (A) oz. 20 % niklja (C), ki se utrjuje zaradi izločanja intermetalne faze nikelj-titan, na čistem niklju in na krom-nikelj-manganovem jeklu (C). TMP so izvršili s 25 — 30 % redukcijo z valjanjem pri hitrosti 1,5 m/min. Temperature valjanja so bile: 1080° C za zlitine nimonic, 1150° C za jeklo A, 1100° C za jeklo B ter 800° C za čisti nikelj. Vse vzorce so po valjanju gasili v vodi in jih nato žarili pri 750 ali 700° C. Na sliki 7 vidimo kako TMP vpliva na 100-urno natezno trdnost zlitine nimonic in jekel A in B. Trdnost po TMPVT je večja od trdnosti primerjalnega jekla, razlika pa se zmanjšuje z naraščanjem temperature in nad 700° C ima celo večjo trdnost jeklo, ki je bilo valjano na normalen način. To dognanje se ujema s starejšimi dognanji Zackaya in Justufsona (3).

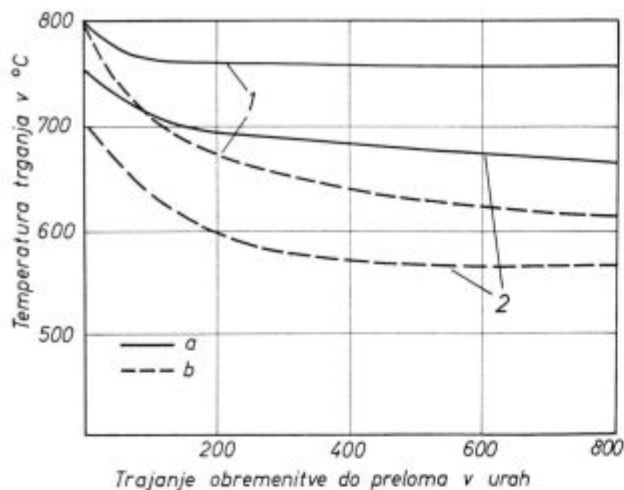
Zanimivo je dognanje, da TMPVT poviša temperaturo pojava interkristalnega preloma (slika 8), poviša torej temperaturo, ko se začne deformacija



Slika 7

Vpliv temperature preizkusa na 100-urno mirujočo trdnost za zlitino nimonic (1) in krom-nikelj-titanovi jekli A in B (2 in 3) po TMPVT (4) in navadni termični obdelavi (5).

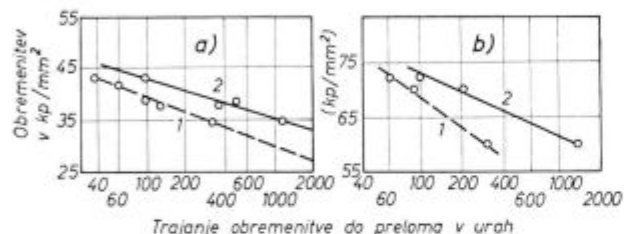
pri statični obremenitvi v vročem z drsenjem kristalnih zrn drugo ob drugim, to je ekvikohezijsko temperaturo. Nad to temperaturo je trdnost urejene notranjosti kristalnih zrn večja od trdnosti kristalnih mej. Sadovski in soavtorji smatrajo, da ima TMPVT za posledico nastanek kristalnih mej z žagasto obliko, ki zavira drsenje kristalnih zrn drugo ob drugem. Nad 700° C so difuzijski pojavi že dovolj močni, da se žagaste meje pretvorijo v gladke. TMPVT izboljša tudi mehanske lastnosti



Slika 8

Vpliv TMP na temperaturo pojava interkristalnega preloma zlitine nimonik pri dolgotrajnih statičnih preizkusih.

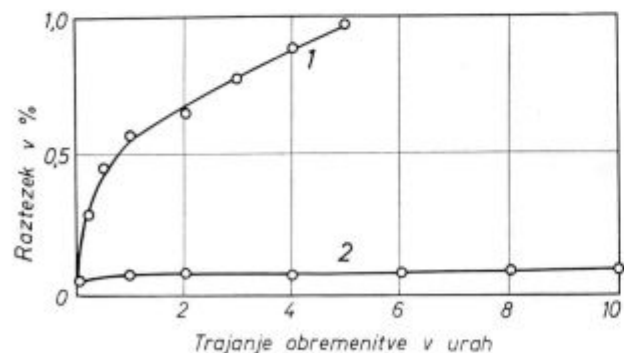
- 1 — temperatura pojava interkristalnega preloma,
2 — temperatura čisto interkristalnega preloma.
a — TMPVT
b — navadna predelava.



Slika 9

Odvisnost med časom do preloma in obremenitvijo pri 650 °C (a) in 500 °C (b) za krom-nikelj-manganovo jeklo po gašenju (1) in po TMPVT (2).

krom-nikelj-manganovega jekla (slika 9). TMP zmanjša hitrost deformacije v vročem pri isti obremenitvi, npr. hitrost lezenja (slika 10). Zato je izboljšanje v mehanskih lastnostih mnogo bolj jasno, če ga izrazimo s prelomno trdnostjo po dolgotrajni statični obremenitvi, ali pa s primerjavo hitrosti lezenja, kot s trdnostjo pri kratkotrajni



Slika 10

Krivulje lezenja tehničnega niklja pri temperaturi 500 °C in obremenitvi 12 kp/mm².

- 1 — klasična predelava,
2 — TMPVT.

statični obremenitvi. Sokolkov in soavtorji (4) tolmačijo izboljšanje mehanskih lastnosti v vročem na podoben način. Trdijo pa, da nastanejo žagaste kristalne meje le pri določeni hitrosti predelave, ki je značilna za posamezna jekla. S temperaturo predelave raste amplituda nazobčanosti kristalnih mej, vzporedno s tem pa se zmanjšuje učinkoviti vpliv teh mej. Lozinski in soavtorji (25) navajajo, da je jeklo predelano po TMPVT bolj odporno proti menjajočim se obremenitvam pri temperaturah 650 in 850 °C, kot klasično predelano ali termično obdelano jeklo.

Naši preizkusi so pokazali, da TMP povečuje plastičnost jekla pri visoki temperaturi in njegovo odpornost proti širjenju interkristalnih razpok, zmanjšuje pa trdnost jekla. Poizkuse smo napravili z jeklom z 0,3 C; 2,9 Si in 7,6 Cr. Temperatura segrevanja pred predelavo in temperatura kaljenja primerjalnih vzorcev je bila 1040 °C. Predelavo smo izvršili z valjanjem jekla pri temperaturah približno 600, 745, 860 in 945 °C ter z vlečenjem jekla pri 600 °C. Po predelavi smo vzorce kalili v vodi, žarili 2 uri pri 720 °C in 20 min. trgali pri 600 in 700 °C. Rezultate podajamo v tabeli 6. Trdnost predelane jekla je pri 600 °C za 5 do 10 % manjša, pri 700 °C pa za 10 do 20 % manjša od trdnosti jekla, ki je bilo poboljšano na klasični način. Pri 600 °C je razteznost boljša za povprečno 20 do 35 %, kontrakcija pa za 30 do 40 %; pri 700 °C sta razliki 35 do 75 in 60 do 65 %. Prelomne površine so bile čisto intrakristalne ali intrakristalne z majhnimi dekohezijskimi razpokami na vzorcih TMP jekla in interkristalne z močnimi dekohezijskimi razpokami na jeklu, ki je bilo termično obdelano na klasičen način.

Mikroskopsko opazovanje je še bolj odkrilo razliko med obema vrstama vzorcev. V strukturi ni bilo med njimi nobenih opaznih razlik, zelo pa sta se obe vrsti vzorcev razlikovali po obliki, velikosti in številu razpok ob prelomni površini preizkušancev. V jeklu, poboljšanem na klasičen način, so bile razpoke izrazito interkristalne, redke, zelo velike in pokončne na smer vlečenja (sliki 11 in 12).



Slika 11

x 100, klasično toplotno obdelano, temperatura trganja 600 °C.

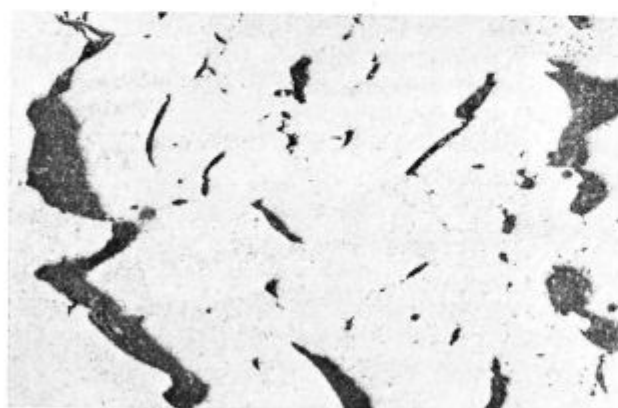
Tabela 6 — Mehanske lastnosti jekla z 0,3 C; 2,9 Si in 7,6 Cr po TMP. Stevilke v tabeli so srednja vrednost 2 preizkusov

Način in temperatura predelave	Valjanje 945° C				Valjanje 860° C				Valjanje 745° C			
	20		35		20		35		20		35	
Približna stopnja redukcije (%)												
Temperatura preizkusa (°C)	600	700	600	700	600	700	600	700	600	700	600	700
Trdnost (kp/mm ²)	22,6	9,5	22,7	9,6	20	10,1	23,4	9,9	21,3	9,1	22,7	11,1
Raztezek (%)	50	53	53	48	46	41	47	41	43	51	34	40
Kontrakcija (%)	83	74	85	74	83	73	85	70	77	70	83	72
Oblika preloma ¹	1	2,3	1	1	1	2,3	1	2,3	1,2	3,2	1	1,2

	Valjanje 600° C				Vlečenje 600° C				Klasična toplotna obdelava (a)	
	20		35		20		35			
Približna stopnja redukcije (%)										
Temperatura preizkusa (°C)	600	700	600	700	600	700	600	700	600	700
Trdnost (kp/mm ²)	22	8,6	21,2	8,6	22,3	8,8	21,7	9,8	23,4	10,9
Raztezek (%)	44	53	41	49	51	57	46	53	37	30
Kontrakcija (%)	83	72	84	73	84	72	68	71	62	44
Oblika preloma ¹	1	1	1	1,2	1	2,3	1	2,3	3	4

a) Temperatura kaljenja 1040° C

Oblika preloma: 1 — intrakristalen; 2 — intrakristalen z majhnimi znaki dekohezije po kristalnih mejah, 3 — mešan z jasnimi znaki dekohezije po kristalnih mejah; 4 — interkristalen z močnimi znaki dekohezije po kristalnih mejah.



Slika 12

x 100, klasično toplotno obdelano, temperatura trganja 700 °C.

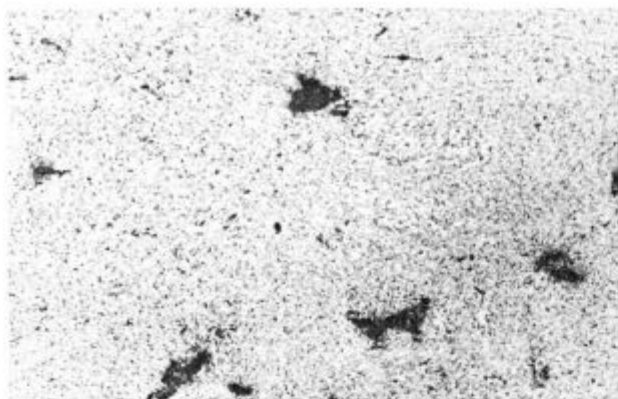


Slika 13

x 200, vlečeno pri 600 °C, redukcija 34 %, temp. trganja 600 °C.

Podobne, vendar mnogo manjše so bile razpoke na vzorcih, ki so bili vlečeni pri 600° C (sliki 13 in 14). Na valjanih vzorcih so bile razpoke drugačne. Na preizkušancih, ki so bili trgani pri 600° C so bile razpoke majhne, zelo številne in raztegnjene v

smeri vlečenja (slike 15, 16, 17 in 18). Na obruskih je bilo mogoče videti, da niso nastale na kristalnih mejah, ampak na vključkih titanovega karbida ali karbonitrida. Na vzorcih, ki so bili trgani pri 700° C so bile razpoke tudi zelo



Slika 14
x 200, isto kot sl. 13, temperatura trganja 700 °C



Slika 15
x 200, valjano pri 945 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 600 °C



Slika 16
x 200, valjano pri 860 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 600 °C

številne (slike 19, 20, 21 in 22) manj raztegnjene v smeri vlečenja in le v redkih primerih jih je bilo mogoče za gotovo oceniti kot interkristalne. Na osnovi naših rezultatov je mogoče sklepati, da tem-

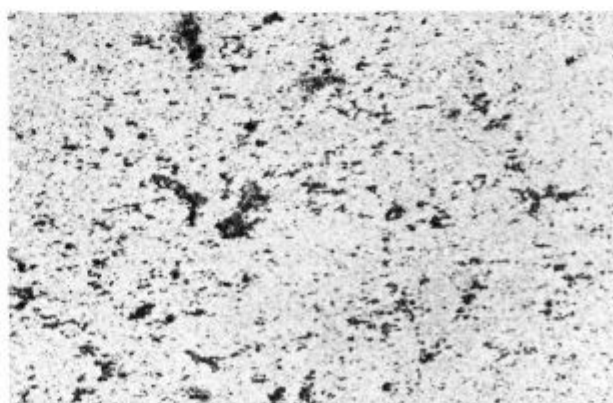
peratura in stopnja predelave ne vplivata na mehanske lastnosti jekla, na način nukleacije razpok in na način preloma preizkušene jekla pri trganju pri 600 in 700 °C.



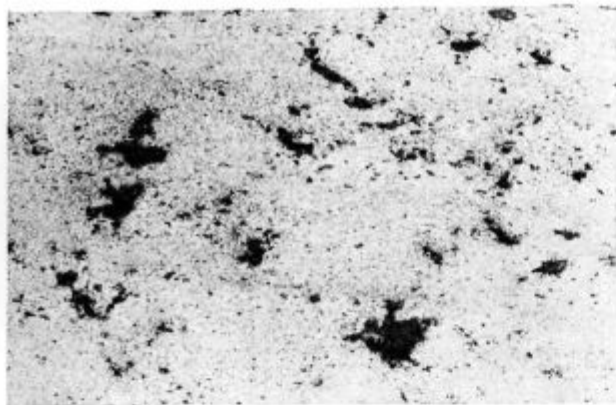
Slika 17
x 200, valjano pri 745 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 600 °C



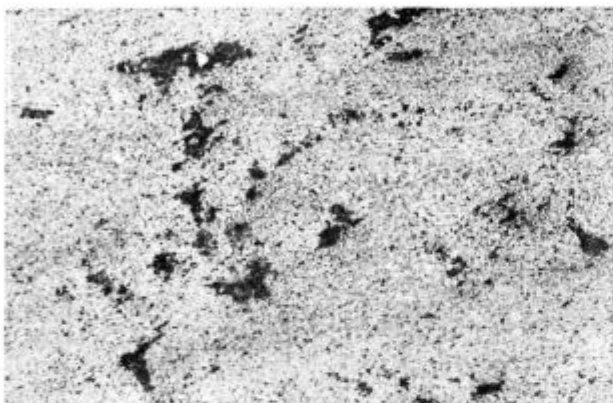
Slika 18
x 200, valjano pri 600 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 600 °C



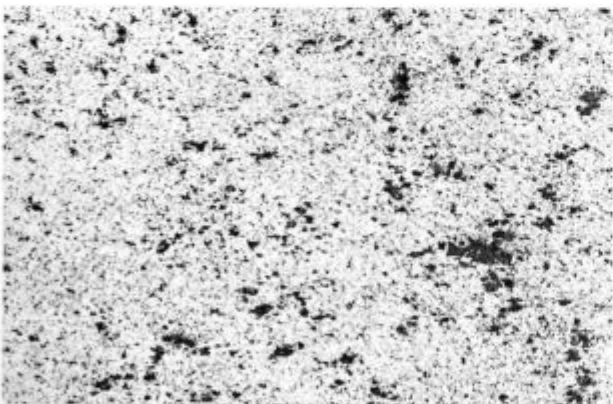
Slika 19
x 200, valjano pri 945 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura trganja 700 °C



Slika 20
x 200, valjano pri 860 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura
trganja 700 °C



Slika 21
x 200, valjano pri 745 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura
trganja 700 °C



Slika 22
x 200, valjano pri 600 °C, redukcija ca. 35 %, temperatura
trganja 700 °C.

2.5. Druga jekla

Justufson in Zackay navajata, da se TMP lahko izvrši na številne načine, npr. z valjanjem, vlečenjem, iztiskanjem, kovanjem, globokim vlečenjem z oblikovanjem z eksplozivom. To odpira

TMP perspektivo na mnogih področjih. Bernštejn in sodelavci (11,26) so TMP uporabili pri izdelavi cevi za naftno industrijo. Carter (27) omenja, da so v toku poizkusi za uporabi TMP pri izdelavi lopatic za parne turbine iz jekla z 0,1 C in 12 Cr, za izdelavo visokotrčnih vijakov in visoko obremenjenih delov motorjev, npr. različnih ročic, osi, gredi in zobnikov ter celo za predelavo jekla za ležaje. Dulis (29) in Perry (30) poročata, da je martenzitno jeklo z okoli 12 Cr in 0,20 C po TMP bolj odporno proti napetostni koroziji, vodikovi krhkosti in splošni koroziji kot isto jeklo, ki je dobilo isto trdnost s klasično termično obdelavo.

Marshall in sodelavci (19) trdijo, da so pri kovanju prednosti »ausforginga« precejšnje: boljše mehanske lastnosti odkovkov, lepša površina, manjši odrezek, manjše deformacije in izkrivljenje, ker ni potrebna naknadna termična obdelava odkovkov in manjši obseg mehanske obdelave. Velika prednost je v tem, da se da doseči zahtevane lastnosti z mehkejšim materialom. Za izdelavo visoko obremenjenih ročic so lahko npr. uporabili jeklo SAE 4340 (0,4 C; 0,9 Cr in 0,2 Mo) namesto že večkrat omenjenega bolj legiranega jekla H 11. Slabe strani so: večja uporaba energije za preoblikovanje, nekoliko večja obraba orodja (odpade, če uporabimo mehkejšo jeklo), strožje temperaturne tolerance za predelavo in nekoliko težja mehanska obdelava. Clark in Harwood navajata podatke po Banbergerju, da ima jeklo M 50 (0,8 % C; 4 % Cr; 1 % V in 4 % Mn) po TMP za 800 % oz. 330 % večjo trajnost do trenutka, ko je poškodovanih 5 % oz. 50 % ležajev v primerjavi s klasično termično obdelanim istim jeklom. TMP poveča odpornost jekla proti kotalni utrujenosti za 300 %.

3. MEHANIZEM UTRDITVE JEKLA PRI TMP

Ne bi mogli reči, da je popolnoma jasen mehanizem utrditve. Večina avtorjev meni, da se pri TMPNT metastabilni avstenit utrdi zaradi hladne deformacije, tej utrditvi pa se pridruži še utrditev zaradi nastanka fino zrnatega martenzita. Zaradi hladne predelave zraste gostota dislokacij. Brown, Thomas in Hardy (31) smatrajo, da se ureditev dislokacij utrdi zaradi izločenih karbidnih kali ali oblakov atomov ogljika. Duckworth (13) meni, da atomi ogljika utrdijo konfiguracijo dislokacij, katero podeduje martenzit od avstenita, ugodno pa vpliva tudi zelo drobnozrnati martenzit. Guljajev in Šigarev sta ugotovila, da so zaradi TMP pri 900, 750 in 550 °C razširjene črte (110) odboja rentgenskih žarkov. To jima je dokaz za trditev, da se med deformacijo izločajo iz avstenita karbidi. Tudi Mazanec in Hispecka smatrata, da je ta razlaga precej verjetna, menita pa, da je o tem premalo eksperimentalnih dokazov. Nam se zdi nekoliko dvomljiva trditev, da se karbidi ali karbidne kali izločajo med deformacijo pri temperaturi, ko je jeklo v homogenem avstenitem področju. Zdi se

nam verjetneje in s fizikalnega stališča mogoče, da se okoli mest z močno koncentracijo dislokacij zberejo neke vrste Cotellovi oblaki, ki so sestavljeni v glavnem iz ogljikovih atomov in so dislokacije zasidrane podobno kot pri nizkih temperaturah, ko je rezultat njihove interakcije z Cotellovimi oblaki meja plastičnosti jekla. Zaradi velike množine ogljika v jeklu in številnih dislokacij, je učinek zelo močan. Taki oblaki nastanejo že pri sobni temperaturi, pri katerih je gibljivost atomov ogljika premajhna, da bi lahko nastali izločki karbidov ali nitridov, zato se lahko oblikujejo pri visoki temperaturi v presledku med deformacijo in kaljenjem. Pri oblikovanju teh oblakov ostane ogljik v raztopini in ni nobenega izločanja, ki bi bilo v protislovju s stabilnostjo avstenita. Pač pa je s stališča stabilnosti avstenita mogoče, da nastanejo kali ali izločki pri ausforming predelavi. Vprašanje je le, če je čas, ki ga imajo karbidi ali kali na razpolago pred ohladitvijo dovolj dolg za tvorbo.

Zasidrana ureditev dislokacij je precej stabilna. Dregan in Bernštejn sta ugotovila, da se lastnosti jekla ne poslabšajo, pa čeprav po predelavi jekla rekristalizira in nastanejo iz zdrobljenih zrn avstenita nova drobna kristalna zrna. To je potrdil tudi Prokoškin s sodelavci. Lastnosti se poslabšajo, če se izvrši tako imenovana sekundarna rekristalizacija, pri kateri drobna avstenitna zrna, nastala s primarno rekristalizacijo, zrastejo na velikost, ki je značilna za temperaturo konca predelave, stopnjo predelave in sestavo jekla.

Drobnozrnati martenzit, ki nastane iz avstenita podeduje ureditev dislokacij deformiranega avstenita. Jeklo se ugotovi zaradi martenzitne premene, ureditev dislokacij pa daje martenzitu potrebno plastičnost tako, da se lahko pokaže njegova velika naravna trdnost, ki sicer ne pride do izraza zaradi popolnoma krhkega preloma. Oblaki atomov okoli nakopičenj dislokacij so verjetno kali za nastanek karbidov. Pri popuščanju jekla se zato izločajo zelo številna in enakomerno razdeljena karbidna zrna, zato je popuščna obstojnost jekla višja. V TMP jeklu pogoji za izločanje karbidov ob mejah niso bolj ugodni kot pogoji za izločanje v notranjosti zrn, kot je to pri klasični toplotni obdelavi, zato TMP odpravi tudi popuščno krhkost.

Dokaz, da je nastala ureditev dislokacij precej stabilna, je neke vrste »dednost« lastnosti, ki jih dobi jeklo pri TMPVT. Ta pojav sta odkrila Bernštejn in Rahstadt na jeklu za vzmeti 55 HGR, potrdili pa so ga še drugi ruski avtorji. Ko sta TMP jeklo, popuščeno pri 250°C, s trdnostjo 215 kp/mm² žarila pri 600°C, da je doseglo trdoto 32 Rc in ga po 3-minutni avstenitizaciji pri 880°C kalila in popustila pri 250°C, je doseglo spet približno začetno trdnost. Kaljner, Kosovski in Bernštejn (12) so ugotovili, da se s povišanjem temperature vmesnega »mehkega žarjenja« poslabšajo pri ponovnem kaljenju pridobljene lastnosti. Supov in sodelavci (31) so poskusili razložiti pojav dednosti. Ugotovi-

vili so, da hladna deformacija izboljša lastnosti TM predelanega jekla, vendar se njegova trdnost s temperaturo hitreje zmanjšuje, kot če jeklo ni bilo hladno deformirano. Tudi po ponovnem kaljenju se zaradi hladne predelave nekoliko poslabšajo trdnostne lastnosti. Iz tega bi lahko sklepali, da je mehanizem utrditve pri TMPVT drugačen kot pri hladni deformaciji. Zanimivo je dognanje (18) da je sposobnost »dedovanja« tem večja čim višja je temperatura predelave. Iz tega bi lahko sklepali, da je struktura, ki jo dobi jeklo s TMPVT tem bolj stabilna, čim višja je temperatura predelave. V strokovnem tisku nismo dobili podatkov o tem ali so »dedne« tudi lasnosti, ki jih dobi jeklo pri TMPNT.

Ni jasno, zakaj dodatna hladna deformacija poveča trdnost TMP strukture, istočasno pa zmanjša njeno popuščno obstojnost in dednost. Deformacija hladnega martenzita se izvrši z drsenjem po drugih sistemih, kot so bili sistemi v avstenitu. Ta deformacija dodatno zasidra podedovano dislokacijsko ureditev avstenita in jeklo utrdi. Ker pa je s hladno predelavo pridobljena ureditev temperaturno malo obstojna, mogoče proces odprave te utrditve pri segrevanju jekla zmanjša stabilnost pri TMPVT nastale ureditve dislokacij.

Ruski avtorji navajajo, da TMPVT izboljša tudi mehanske lastnosti v zlitinah brez premene. Verjetno je način utrditve isti kot način, ki je znak utrditve jekel z ogljikom: sumiran vpliv zasidrane dislokacijske ureditve in drobnih zrn, odpade pa delež utrditve zaradi premene. Ruski avtorji navajajo, da je v takih materialih utrditev v zvezi z obliko kristalnih mej. Pri TMPVT dobijo kristalne meje žagasto obliko. Take meje pa lahko močnejše prispevajo k utrditvi le pri obremenitvi nad temperaturo ekvikohezije, ko se deformacija vrši z lezenjem kristalnih zrn drugo ob drugem. To je vzrok, da ima TMP jeklo višjo temperaturo interkristalnega preloma. Ko pa je temperatura dovolj visoka, da rekristalizacija poravnava nazobčane kristalne meje, postane trdnost TMP jekla manjša od trdnosti klasično predelanega jekla prav zato, ker je prvo bolj drobnozrnato, in ima nad temperaturo ekvikohezije več bolj šibkih kristalnih mej. Verjetno je tudi to razlog za večjo plastičnost in manjšo trdnost jekla pri temperaturah 600 in 700°C, katero smo ugotovili pri naših preizkusih. Interkristalni prelom nastane pri trganju v vročem zaradi koalescence vrzeli, ki tvorijo interkristalne razpoke na geometrično in deformacijsko najbolj neugodnih mestih. Razpoke rastejo zaradi nepretrganega dodatka vrzeli, katere ustvarja deformacija v toplem, dokler se preizkušane ne pretrga. Verjetno TMP ne zmanjša nastajanja vrzeli, pač pa povzroči, da se njihova koalescenca začne na mnogih mestih. Namesto redkih velikih razpok, ki hitro privedejo do preloma, nastane veliko manjših razpok in kovina se prelomi pri večji deformaciji.

SKLEP

Rezultati dela številnih raziskovalcev kažejo, da TMP ugodno vpliva na lastnosti jekla. Povečuje trdnost, mejo plastičnosti, plastičnost, utripno trdnost, vzmetnost, obrabno in kotalno trdnost, popuščno obstojnost, odpornost proti toplotnemu udaru korozijsko odpornost in odpravlja popuščno krhkost. Zato je mogoče pri istih jeklih s TMP doseči boljše mehanske lastnosti in večje obremenitve konstrukcijskih delov ali pa uporabiti za iste namene cenejša in manj legirana jekla. Slabe strani so razmeroma maloštevilne, med njimi sta najvažnejša dražja tehnologija in težja mehanska obdelava. Vprašamo se lahko zato zakaj se, kljub

mnogim prednostim, TMP sorazmerno počasi uveljavlja v industrijski praksi ali se vsaj malo piše o tem. Med vzroke lahko naštejemo predvsem pomanjkanje izkušenj pri tehnološki aplikaciji TMP pri izdelovalcih jekla in pomanjkanje izkušenj pri trajnem pogonu izdelkov izdelanih s TMP pri uporabnikih jekla. Razumljivo je, da uporabniki niso pripravljeni plačati večje cene za polizdelke ali orodja, dokler jim praksa ne bo pokazala, da se je razlika v ceni izplačala. Domnevamo pa, da se TMP uporablja v vojaški in letalski industriji, vendar o tem nismo našli v strokovnem tisku nobenih podatkov. Številne dobre strani zagotavljajo, da bo TMP jeklo poseglo v mnoga področja sodobne industrije.

Literatura

1. S. J. Matas, H. Hill in HP Munger: »Ausforming and Hot-Cold Working-Methods and Properties«; Phillip H. Smith, Mechanical Working of Steel I, Gordon and Breach, New York, 1964.
2. W. E. Duckworth in P. R. Taylor: »Ausforming of high — alloy steels«; Metallurgical Developments in high-alloy steels«; JSJ Special Report No 86, London, 1964.
3. V. M. Justufsson in V. F. Zackay: »Engineering Properties of Ausformed Steels«; Metal Progress 82, dec. 1962, 111—114.
4. E. N. Sokolov, M. G. Lozinjskij in E. N. Čuprakova: »Nekatorie osobnosti mehanizma gorjačej plastičeskoj deformaciji austenitnih stalej pri visokotemperaturnoj termomehantičeskoj obrabotke«; Issledovanja po visokopročnim splavam i nitevidnim kristallam, Akademia Nauk SSSR, Moskva, 1963.
5. M. L. Bernštejn in A. G. Rahštadt: »Termomehantičeskaja obrabotka resorno-pružičnih stalej i ee obratimost«; Stalj (Moskva), 1962, št. 4, 346—348.
6. D. J. Bron in J. J. Levites: »Svojstva stali 55 HGR posle VTMO i povtornoj zakaljkij«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1966, št. 9, 45—48.
7. A. P. Guljaev in A. S. Sigarev: »Termomehantičeskaja obrabotka stali i ee vlijanie na tonkuju strukturu i mehaničeskije i svojstva«; Issledovanja po visokopročnim splavam i nitevidnim kristallam, Akad. Nauk, SSSR, Moskva, 1963.
8. F. White: »L'influence d'un traitement thermomécanique au dessus du point AC 3 sur les propriétés des aciers martensitiques«; Poročilo IRSID-a, St. Germain en Laye, maj 1967.
9. D. A. Prokoškin, J. F. Zubin in V. A. Akimov: »Vlijanie visokotemperaturnoj termomehantičeskoj obrabotki na strukturu i svojstva konstrukcionoj stali«; Issledovanja po visokopročnim splavam i nitevidnim kristallam, Akademia Nauk SSSR, Moskva, 1963.
10. D. A. Prokoškin, A. G. Vasiljeva, V. V. Akimov in Ju B. Sinkarevič: »Vlijanie temperaturi deformaciji pri TMP na mehaničeskie svojstva i porog hladnolomnosti konstrukcionoj legirovannoj stali«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1966, št. 9, 51—54.
11. N. Dregan in M. L. Bernštejn: »Visokotemperaturnaja termomehantičeskaja obrabotka burilnih trub iz legirovannoj stali 38 HNM«; Stalj (Moskva), 1966, št. 10, 944—946.
12. V. D. Kaljner, L. D. Kossovskij in M. D. Bernštejn: »Termomehantičeskaja obrabotka resornih polos iz stali 55 HGR«; Stalj (Moskva), 1964, št. 3, 269—270.
13. L. Hyspecka in K. Mazanec: »Effect of Thermomechanical Treatment on the Properties of Structural Steels«; Journal of Iron and Steel Institute 205 (London), 1967, št. 12, 1261—1263.
14. L. Hyspecka in K. Mazanec: »Propriétés mécaniques des aciers après traitement thermomécanique«; Memoires Scientifiques de la Revue de Métallurgie 65 (Paris), 1968, št. 1, 17—25.
15. W. E. Duckworth: »Thermomechanical Treatment of Metals«; Journal of Metals (New York), 18, 1966, No. 8, 915—922.
16. V. V. Andrejeva, M. L. Bernštejn, V. M. Zajcev, V. A. Zaimovskij, P. A. Matevosian, M. J. Sorokin in J. N. Fadejev: »Promišljennije proizvodstvo sortovogo prokata stali 40 s termomehantičeskoj obrabotkoj«; Stalj (Moskva), 1966, št. 3, 256—258.
17. M. L. Bernštejn in O. M. Zueva: »Rekristalizacija mangančevih i nikeljevih stalej pri VT termomehantičeskoj obrabotke«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1966, št. 10, 69—70.
18. D. A. Prokoškin, A. G. Rahštadt in A. S. Supov: »Vlijanie mikrolegirovanija redkimi metallami na ustojčivost termomehantičeskogo upročnenija stali«; Stalj (Moskva), 1967, št. 3, 259—263.
19. C. W. Marshal, J. H. Gehrke, A. M. Sabrof in F. W. Boulger: »Ausforming of Alloy Steels«; Journal of Metals 18 (New York), 1966, No. 3, 328—336.
20. R. Clark, J. J. Harwood: »Ausformed Steels in Automotive Applications«; Metal Progress 89, 1966, No. 3, 81—86.
21. J. P. Telang in R. Clark: »Using Ausformed Steels for Tools«; Metal Progress 90, 1966, št. 2, 87—92.
22. V. Mihčev, R. Banov in M. Kinev: »Termomehantičeskaja obrabotka instrumentalnoj stali NTTMP«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1967, št. 9, 10—15.
23. L. P. Karpov: »Termomehantičeskaja obrabotka rastoščih rezcov«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov (Moskva), 1966, št. 4, 69—70.
24. V. D. Sadovskij, C. N. Petrova, E. H. Sokolov, M. G. Gajdukov, D. Ja. Kazan in L. V. Smirnov: »Vlijanie visokotemperaturnoj termomehantičeskoj obrabotki na svojstva žaropročnosti metallov in splavov«; Issledovanja po visokopročnim splavam i nitevidnim kristallam. Akademia Nauk SSSR, Moskva, 1963.
25. M. G. Lozinjskij, E. N. Sokolov, Ju. P. Surkov in A. N. Romanov: »Mikrostrukturnije osobennosti visokotemperaturnogo ustalostnogo razrušenija austenitnoj stali 40 H 12 N 8 98 MB podvergnutoj VTMO«; Fizika Metallov i Metallovedenie (Sverdlovsk) 23, No. 3, 1967, 528—534.

26. M. L. Bernštein, N. Dregan, J. Ju. Korobočkin, O. S. Williams, V. H. Kurilenko i T. M. Kovaljčuk: »Vozmožnosti i perspektivi primeneni termomehaničeskoj obrabotki trub«; Stalj (Moskva), 1965, št. 12, 1108—1110.
27. C. S. Carter: »Metallurgical Development in High Alloy Steels«; ISI Special Report No. 86, London, 1964.
28. M. A. Kristal in I. Ja. Rjazancev: »VTO stali St 3«; Metallovedenie i termičeskaja obrabotka Metallov (Moskva), 1966, št. 9, 28—29.
29. E. J. Dulis: »Metallurgical Development in High Alloy Steels«; ISI Special Report No. 86, London, 1964.
30. R. Perry: »Stress Corrosion Resistance of High Tensile Stainless Steels«; Metallurgical Development in High Alloy Steel, ISI Special Report No. 86, London, 1964.
31. A. V. Supov, D. A. Prokoškin, A. G. Rahšadt in V. A. Medvedev: »Vlijanie holodnogo naklepa na mehaničeskie svojstva i tonkuju strukturu stali podvergnutoj termomehaničeskoj obrabotke«; Stalj (Moskva), 1965, št. 9, 846—848.
32. G. T. Brown, H. J. Thomas in J. V. Hardy: »Enbrittlement in an Ausformed 12 % Chromium Steel«; Journal of the Iron and Steel Institute 203 (London), august 1964, 660—665.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel ist eine bibliographische Analyse über den Einfluss der thermomechanischen Behandlung auf die Stahleigenschaften. Die Ergebnisse der eigenen Versuche über den Einfluss dieserartiger Behandlung auf die mechanischen Eigenschaften bei höheren Temperaturen an einem Stahl von 0,3 % C, 2,9 % Si und 7,6 % Cr sind beschrieben. Die Materie ist in drei Teile geteilt. Im ersten Teil ist eine Analyse der Einflussfaktoren so wie Verformungsgrad, Verformungstemperatur, der Abkühlungsgeschwindigkeit von denen die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften abhängt, gegeben. Im zweiten Teil sind die Stahlsorten beziehungsweise die Stahlzusammensetzungen angegeben, welche für die thermomechanische

Behandlung in Betracht kommen. Im weiteren werden die vergüteten Eigenschaften, welche mit der thermomechanischen Behandlung bei den Federstählen, bei verschiedenen Werkzeugstählen und bei den temperaturbeständigen Stählen und Legierungen erreicht werden, behandelt. Im dritten Teil ist der Mikromechanismus der Aushärtung behandelt. Die Behauptungen, dass bei der Warmumformung zur Ausscheidung der Karbide im Austenit kommt, welche die Versetzungsanordnung des Austenites verfestigen, wird kritisch analysiert. Es wird angegeben aus welchen Gründen eine solche Ausscheidung nicht wahrscheinlich ist und verteidigt die Meinung, dass die Versetzungsanordnung von den Atomwolken des im Austenit aufgelösten Kohlenstoffs verankert wird.

SUMMARY

In this paper, the author analyses bibliographical data about the influence of thermomechanical treatment on steel properties, and describes the results of his own experiments about the influence of such treatment on mechanical properties for steel with 0,3 % C, 2,9 % Si and 7,6 % Cr at high temperatures. The paper consists of three parts. In the first part the author analyses the data for parameters of this process which have influence on the improvement of mechanical properties of steel. These parameters are the degree and temperature of treatment and cooling of steel after the treatment. In the second part compositions of steels are described which are suitable for thermomechanical treatment. Apart from this, improvement of properties obtained by thermomechanical

treatment of spring steel, of different tool steels, and of high-temperature steels and alloys is analysed. In the third part the hardening mechanism is discussed. A critical analysis of the statements is made that carbides and nuclei are precipitated from austenite during the treatment, and that they consolidate the arrangement of dislocations, formed in austenite during the treatment, or in processes of rearrangement of its dislocation structure during the short interval between the end of treatment and quenching of steel. Reasons are given why such precipitation does not seem to be probable, and the opinion is defended that dislocation arrangement is consolidated by atom clusters of carbon dissolved in austenite.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор анализирует библиографию о влиянии термомеханической переработки на свойства стали и описывает результаты собственных исследований такой переработки на механические свойства стали с содержанием 0,3 % C, 2,9 % Si и 7,6 % Cr. В первой части статьи автор анализирует данные о параметрах этого метода от которых зависит улучшение механических свойств стали. Эти параметры представляют степень и температуру переработки а также и охлаждение стали после процесса. В последующей части статьи рассматривается состав сталей которые наиболее пригодны для термомеханической переработки; затем рассмотрены свойства полученные улучшением как результат термомеханической пере-

работки рессорно-пружинной стали, разных марк инструментальной стали и наконеч сталей и сплавов предназначенных для употребления при высоких температурах. В третьей части рассмотрен механизм устойчивости. Критически проанализирована в особенности утверждение, что во время продолжительности процесса переработки происходит выделение карбидов или зародышей в аустените которые укрепляют устройство дислокации в коротком промежутке времени между концом переработки и закалки стали. Автор износит причины на основании которых он мнения, что такое выделение возможно и что дислокационное устройство укрепляют облака атомов углерода расплавленного в аустените.