

Preizkušnje predelavnosti jekla v vročem

V uvodu je naveden kratek pregled dosedanjih raziskav predelavnosti jekel. Sledijo rezultati preizkušanja štirih jekel s torzijskim preizkusom v vročem. Določeni so optimalni intervali temperatur za vročo predelavo, faktorji predelavnosti, maksimalni momenti in predelovalne trdnosti. Prikazan je vpliv kristalizacije v bloku na predelavnost jekla.

UVOD

S predelavnostjo jekla v vročem označujemo mehansko obnašanje kovin in zlitin, če nanje vplivata temperatura in deformacija. Vročo predelavo v praksi vršimo z valjanjem in kovanjem, pa tudi s stiskanjem in vlečenjem.

Na boljšo ali slabšo predelavnost vpliva mnogo faktorjev — naj jih naštejemo le nekaj: kemična sestava jekla, homogenost, struktura, oblika in velikost kosa, temperatura, stopnja deformacije, trenje, hitrost deformiranja itd. Seveda se z razvojem predelavnih agregatov in postopkov pojavlja vedno znova vrsta tehnoloških problemov: racionalizira in intenzificira se tehnološke postopke, nova in modificirana jekla prinašajo nove predelavne probleme, predelavni agregati so vedno močnejši z večjimi stopnjami deformacije in deformacijskimi hitrostmi itd. Zato je razumljiva težnja najti način preizkušanja s katerim bi lahko določali čim več količin, važnih za vročo predelavo in kateri bi bil dovolj selektiven za razne faktorje, ki vplivajo na slabšo ali boljšo predelavnost.

Prva sistematična preizkušanja preoblikovalnosti izvirajo še pred drugo svetovno vojno. Preiskovali so več načinov: običajni kovaški preizkus, upogibni preizkus v vročem, udarni upogibni preizkus v vročem, natezni preizkus v vročem in način z vtiskanjem. Prve bolj sistematične preizkuse s torziranjem v vročem sta objavila C. L. Clark in J. Russ (Metals Technology, 1945), vendar sta delala še s preizkušanci, ki niso imeli stanjšanege dela v sredini. Preizkušanje na tak način kot je danes v veljavi je najbrž prvi uporabil D. E. R. Hughes (1). Preiskoval je vpliv temperature, preizkuševalne hitrosti, premera preizkušanca in naraščanje temperature preizkušanca med preizkusom. Sledila je vrsta raziskav na IRSID-u (C. Rossard, P. Blain, Ph. Portevin, F. E. White), na Montanistični visoki šoli v Leobnu (H. Trenkler, J. Langerweger), na Japonskem in v vzhodnih državah, tako

da je to danes skoraj že edini priznani preizkus predelavnosti jekla v vročem.

Kljub temu bomo na kratko opisali tudi druge preizkuse, ki imajo tudi svoje prednosti, največkrat pa slabosti.

NAČINI DOLOČEVANJA PREDELAVNOSTI JEKLA V VROČEM

1. **Direktni načini.** S temi so mišljeni preizkusi direktno na predelovalnih agregatih ali na način, ki dobro simulira predelovalni postopek. Kar se tiče določanja plasticitetnih lastnosti jekel ti načini ne pridejo v poštev, ker predstavljajo prav to, čemur se želimo izogniti — da bi namreč znanje in izkušnje nabirali s preizkušanjem v sami proizvodnji. Glede trdnostnih predelovalnih lastnosti jekla pa bi bile direktne meritve seveda idealne, toda ta veda je še mlada in je vprašanje, če se bo razširila v vsakodnevno prakso.

2. **Enostavni kovaški preizkus.** Največkrat se konec palice lopatasto razširi in glede na razpokanost robov sklepa na sposobnost jekla za predelavo. To je tudi klasičen način določevanja vpliva žvepla, odnosno nagnjenosti jekla k lomu v belem in rdečem žaru. Ta preizkus je zelo subjektiven, obenem pa mnogo premalo selektiven in prav nič ne pove o trdnostnih lastnostih jekla.

3. **Preizkus vtiskanja.** V ravno površino segretega jekla naj bi vtiskali okroglo ali stožčasto telo (podobno merjenju trdote). Ker je to statičen preizkus, ne more dati merila za trdnostne karakteristike jekla pri izredno velikih deformacijskih hitrostih, ki so običajne pri predelavah.

4. **Upogibni preizkus v vročem.** Predvsem je napetostno stanje (nategtlak) pri tem preizkusu popolnoma drugačno kot pri valjanju ali kovanju in jih zato ni mogoče spraviti v medsebojno odvisnost. Glede plasticitetnih lastnosti jekla je merilo pri tem preizkusu kot do pojava prve razpoke ali kaj podobnega. V splošnem pa ima ta preizkus zelo omejeno področje uporabnosti, npr. za določanje vpliva Cu na površinsko razpokanost (preizkus po Bornu).

5. **Udarni upogibni preizkus v vročem.** Kriterija preoblikovalnosti jekla sta udarno delo in upogibni kot. A. Niedentahl je pred mnogimi leti (1929) dosegel s tem preizkusom kar lepe rezultate, vendar zahteve takrat še niso bile tako velike in je bil glavni problem predelavnosti nagnjenost jekla k lomu v rdečem in belem žaru. Preizkus ni

občutljiv za vrsto drugih faktorjev, ki vplivajo na predelavnost, razen tega pa je nihanje rezultatov zelo veliko.

6. Udarni tlačni preizkus v vročem. S tem preizkusom se da zelo dobro določati preoblikovalno trdnost. W. Lueg in H. G. Müller (2) sta z jeklom C 45 ugotovila, da je preoblikovalna trdnost v eksponencialni zvezi s preoblikovalno hitrostjo. Ugotovila sta tudi, da preizkus nad 1100°C ni več uporaben, ker ni mogoče več zasledovati trenja med vzorcem in tlačnim pestom.

7. Natezni preizkus v vročem. Kriterija plastičnih lastnosti jekla sta raztezek in kontrakcija. A. Portevin s sodelavci (Revue de Métallurgie, 1936) je s tem preizkusom in prav tako s torzijskim in upogibnim ugotovil zelo jasno izraženo zmanjšanje plastičnosti k rdečemu lomu nagnjenega jekla med 900 in 1100°C. Tudi danes se še smatra, da je natezni preizkus v vročem zelo dober preizkus za določanje plastičnih lastnosti jekla. Zelo je selektiven za razlike v kemični sestavi, stopnji homogenosti jekla in kristalni strukturi. Ph. Portevin sodi, da je za določanje vpliva drobnih strukturnih faz, kot so nitridi, celo boljši kot torzijski preizkus v vročem. Nasprotno pa je z uporabnostjo tega preizkusa za določanje trdnostnih lastnosti jekla pri preoblikovanju. Problem je že v stroju, ki mora omogočati zelo velike deformacijske hitrosti. Niso še popolnoma raziskana nape-

lostna stanja v bližini preloma, čeprav je znano, da so triosna. Po ruskih podatkih (Paškov) so deformacijske hitrosti na mestu kontrakcije tudi do 16-krat večje kot jih registrira stroj. To povečanje hitrosti deformacije na mestu kontrakcije pa je zelo odvisno od temperature, vrste jekla in oblike preizkušanca. Korelacija z napetostmi pri vroči predelavi je skorajda nemogoča.

V tabeli 1 so pregledno navedene zaznavnosti posameznih metod preizkušanja predelavnosti jekla (3). Vidimo torej, da je torziranje v vročem edini preizkus, ki v vseh pogledih zadovoljuje. Je dovolj občutljiv za vrsto in stanje jekla, daje dokaj velike preoblikovalne hitrosti, objektivno oceni plastičnost jekla in daje dovolj realne podatke o preoblikovalnih trdnostih jekla. V naslednjem poglavju sledi zato nekaj podrobnejših podatkov o tem preizkusu in pregled najvažnejših raziskav.

TORZIJSKI PREIZKUS V VROČEM

1. Količine, ki označujejo predelavnost. Za račun sile, potrebne za določeno vrsto predelave in dimenzioniranje predelavnih naprav je pomembna količina **predelovalna odpornost** k_w :

$$k_w = k_f + k_n + k_t \text{ (kp/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

Koeficienta k_n in k_t upoštevata notranje trenje materiala in trenje med materialom in orodjem

Tabela 1

Količine	Preizkus v vročem							Razne formule
	Kovaški	Vtiskanje	Upogibanje	Udarni upogibni	Natezni	Udarni tlačni	Torzijski	
Kemična sestava	—	—	+	—	+	+	+	—(0)
Stopnja homogenosti	—	—	—	—	+	—	+	0
Kristalna zgradba	—	0	—	—	+	—	+	0
Temperatura	—	—	×	—	×	×	+	×
Preoblikovalna hitrost	0	0	—	0	×	+	+	0
Stopnja preoblikovanja	—	0	0	0	—	+	+	0
Posledice preoblikovanja	—	0	0	0	0	—	+	0
Preoblikovalna trdnost	0	0	0	0	—	+	+	—
Plastičnost subjektivno	—	—	+	+	+	0	+	0
Plastičnost objektivno	0	0	0	0	—	0	+	0
Uporabnost za prakso	—	—	+	—	±	+	+	0

Razlaga znakov: zaznavnost (občutljivost, selektivnost, uporabnost) je:
+ dobra, — srednja, 0 slaba, × le v določenem področju.

(valjem, kladivom) in sta torej odvisna od postopka predelave. **Predelovalna trdnost** k_f pa je čista lastnost materiala in predstavlja odpornost materiala proti plastični deformaciji pri enoosnem napetostnem stanju. Lueg in Müller (2) sta s tlačnimi preizkusi ugotovila, da je predelovalna trdnost v eksponentialni zvezi s predelovalno hitrostjo:

$$k_f = k_{f0} \cdot \varphi^x \quad (T = \text{konst.}) \quad (2)$$

k_{f0} = predelovalna trdnost pri $\varphi = 1 \text{ s}^{-1}$,
 φ = predelovalna hitrost v s^{-1} ,
 T = temperatura v $^{\circ}\text{C}$.
 x = eksponent, ki zavisi od predelovalne hitrosti,

Ista odvisnost velja tudi za natezni in torzijski preizkus. **Deformacija pri torziji** je odvisna od oblike preizkušanca in torzijskega (vzvojnega) kota:

$$\gamma = \frac{r}{l} \cdot N \quad (3)$$

γ = deformacija pri torziji (strižni kot),
 r = polmer preizkušanca,
 l = dolžina preizkušanca
 N = torzijski kot

Predelovalno hitrost lahko nato izrazimo kot spremembo deformacije s časom t :

$$\Psi = \frac{d\gamma}{dt} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (4)$$

Silo, odnosno napetost pri torzijskem preizkusu izračunamo iz momenta — tega namreč med preizkusom merimo. Enačba (2) izražena z momenti se glasi:

$$M = M_0 \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^x \quad (T = \text{konst.}) \quad (5)$$

M = vrtilni moment v kpcmm ali kpmmm
 M_0 = moment pri predelovalni hitrosti $\varphi = 1 \text{ s}^{-1}$
 T = temperatura v $^{\circ}\text{C}$

Momenta sta proporcionalna strižnima napetostima τ in τ_0 , zato lahko pišemo tudi:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^x \quad (\text{kp/mm}^2) \quad (6)$$

Rossard in Blain (4) sta izračunala strižno napetost iz momenta po enačbi:

$$\tau = \frac{(x+3) \cdot M}{2 \pi r^3} \quad (\text{kp/mm}^2) \quad (7)$$

Po kriteriju Tresca

$$k_f = 2 \tau \quad (8)$$

sledi končna enačba za predelovalno trdnost:

$$k_f = \frac{(x+3) M}{\pi r^3} \quad (\text{kp/mm}^2) \quad (9)$$

Faktor x izračunamo iz enačbe (5).

V enačbi (4) je izražena predelovalna hitrost s spremembo torzijske deformacije s časom. Ker gre pri predelavi predvsem za natežno enoosno napetostno stanje, je treba najti zvezo med strižno in natežno deformacijo. Rossard in Blain sta jo izračunala po kriteriju Von Mises-a (drsenje po oktaederski ploskvi). Po tem kriteriju je deformacija:

$$\text{— za torzijo } \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \gamma$$

$$\text{— za nateg } \sqrt{2} \cdot \epsilon$$

$$\sqrt{2} \cdot \epsilon = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \gamma$$

$$\epsilon = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$$\epsilon = \frac{r \cdot 2 \pi}{1 \cdot \sqrt{3}}$$

Hitrost deformacije (predelovalna hitrost) je potem:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = h = \frac{r \cdot 2 \pi}{1 \cdot \sqrt{3}} \cdot n \quad \text{za } n = \frac{\text{obrati na}}{\text{sekundo}} \text{ in}$$

$$h = \frac{r \cdot 2 \pi}{1 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{n}{60} \quad \text{za } n = \frac{\text{obrati na}}{\text{minuto}}$$

Za zelo razširjeni torzijski preizkušanelec, premera 6 mm in dolžine 50 mm (IRSIDov preizkušanelec) izračunamo predelovalno hitrost kratko iz enačbe:

$$h = 0,0036 \cdot n \quad (\text{s}^{-1}) \quad n = \frac{\text{obr.}}{\text{min.}}$$

Za predelovalno hitrost izraženo z odstotkom deformacije na sekundo pa velja:

$$h = 0,36 \cdot n \quad (\% \cdot \text{s}^{-1}) \quad n = \frac{\text{obr.}}{\text{min.}}$$

Za preizkušanelec leobenske šole (premer 10 mm, dolžina 50 mm) pa velja

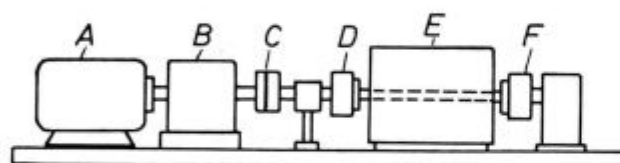
$$h = 0,60 \cdot n \quad (\% \cdot \text{s}^{-1}) \quad n = \frac{\text{obr.}}{\text{min.}}$$

Te predelovalne hitrosti veljajo le za površino vzorca.

Langerweger in Trenkler (5) sta izmerila tudi aksialne napetosti med torziranjem. Opazne aksialne napetosti se pojavijo šele za maksimalnim momentom, to je po nekaj obratih. Maksimalni moment, ki ga rabimo za račun preoblikovalne trdnosti, nastane torej v enoosnem napetostnem stanju. V gama področju so natezne napetosti med 0,4 do 0,85 kp/mm^2 , v dvofaznem so napetosti tlačne do največ 0,3 kp/mm^2 , v alfa območju pa zopet majhne tlačne napetosti. Na A_1 in A_3 temperaturi ni aksialnih napetosti.

Kriterij preoblikovalne sposobnosti jekla (plastičnosti) je število obratov do preloma preizkušanca. Razen od vrste jekla zavisi to število še od več drugih faktorjev: oblike vzorca, temperature, vrtilne hitrosti itd. To je zelo objektivni in zanesljiv kriterij, ki ga je lahko uporabiti v praksi. Smatra se, da jeklo ni več sposobno za predelavo (valjanje, kovanje), če vzdrži manj kot 4 do 5 obratov do loma (preizkušavec premera 10 mm in dolžine 50 mm). To velja, če je bil preizkušavec narejen iz predelanega materiala, za lite preizkušance pa bi bil analogen kriterij 1 do 2 obrata do loma.

2. Izvedbe naprav in preizkušanci. V bistvu so si naprave, katerih skice najdemo v strokovni literaturi, zelo podobne (slika 1). Motor A z reduktorjem B vrtita preko sklopke C glavo D, v katero je vpet en konec preizkušanca. Najboljše izvedbe imajo možnost kontinuirnega spreminjanja obratov od 0 do 1000 obr./min. Ker so predelovalne hitrosti v praksi še večje kot jih daje ta preizkus pri 1000 obr./min so v SSSR izdelali stroj, ki mu lahko spreminjajo obrate od 18 do 3000 obr./min.



A - Motor
B - Reduktor
C - Sklopka
D - Vrteča glava
E - Peč
F - Trdna glava

D-69-021

Slika 1

Naprava za torzijski preizkus v vročem

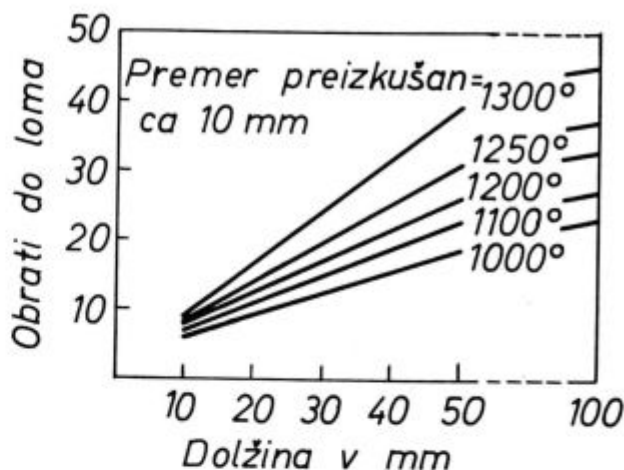
Preizkušavec je v peči E, ki naj zmore temperature do 1350° C. Navadno imajo peči z navitjem iz platinske žice. Drugi konec preizkušanca je vpet v trdno glavo F, ki pa mora biti v vzdolžni osi preizkušanca gibljiva zaradi dilatacij pri segrevanju.

Registrirati je treba naslednje količine: vrtilne momente, obrate do preloma in čas. Spremembe teh količin se lahko prenašajo na registrirni instrument z zelo hitrim pomikom papirja, ali pa se spremembe prenašajo na mehanske ure in te snemajo s filmsko kamero.

3. Vplivi pri preizkušanju. Rezultat preizkusa lahko zelo zavisi od razmer preizkušanja. Pri tem je več faktorjev zelo vplivnih — opisali bomo najvažnejše.

a) Vpliv oblike preizkušanca. Danes uporabljajo za natančne meritve izključno preizkušance s posebno merilno dolžino v obliki stanjšane dela v sredini. Žal pa ni enotnih mer za preizkušance in je s tem zelo otežkočena primerjava rezultatov raznih avtorjev. Langerweger in Trenkler (5)

navajata, da obstoja okoli 20 različnih preizkušancev s premeri od 3 do 18 mm in merilnimi dolžinami med 2,8 do 190 mm. Ista avtorja predlagata standardni meri: premer 10 mm in dolžino 50 mm. V Franciji, od koder izvira mnogo raziskav predelovalnosti jekla pa imajo te mere: premer 6 mm in dolžino 50 mm.

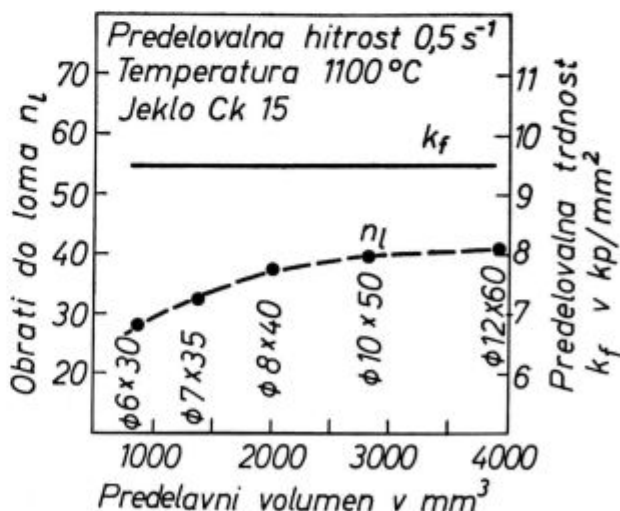


D-69-021

Slika 2

Odvisnost števila obratov do preloma od merilne dolžine

Langerweger in Trenkler (5) sta obširno raziskovala vpliv oblike preizkušanca. Za različne premere med 6 in 12 mm nista našla zakonitih razlik, dočim so očitne razlike pri različnih dolžinah (odnosno volumnih). Slika 2 kaže število obratov do preloma v odvisnosti od merilne dolžine (pri enakem premeru 10 mm). Z dolžino torej zelo narašča število obratov do preloma. Slika 3 pa kaže naraščanje obratov z večanjem preoblikovalnega volumna. Ni pa od volumna odvisna preoblikovalna trdnost.

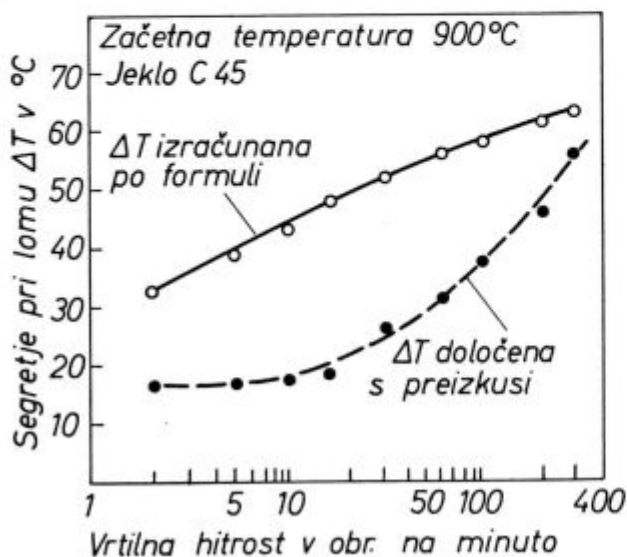


D-69-021

Slika 3

Število obratov do loma v odvisnosti od predelavnega volumna

b) *Povečanje temperature preizkušanca med preizkusom.* Pred pričetkom preizkusa je preizkušaneč sicer segret na določeno temperaturo peči, vendar se med torziranjem lahko dodatno segreje. Za koliko se segreje, zavisi od temperature preizkušanja in od vrtilne hitrosti. Na maksimalni moment, ki ga dosežemo že po nekaj obratih to nima bistvenega vpliva. Pri natančnih preiskavah pa je naraščanje temperature treba upoštevati. Primer dodatnega segretja jekla C 45 kaže diagram na sliki 4.

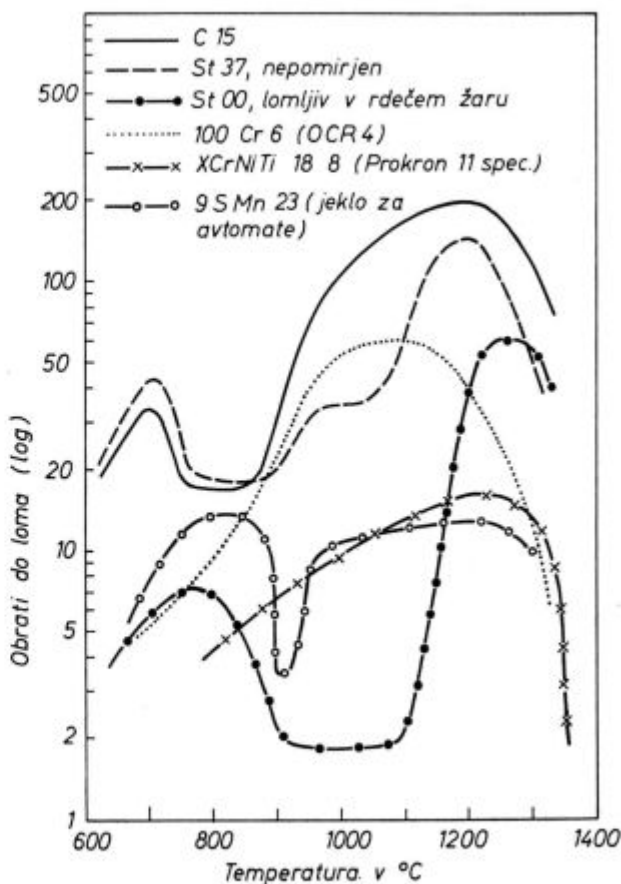


Slika 4

Segrevanje jekla med preizkusom

c) *Vpliv temperature preizkušanja.* Diagram na sliki 5 prikazuje plastične lastnosti nekaj vrst jekel v odvisnosti od temperature preizkušanja (3). Različna jekla imajo zelo različne tipe krivulj, vendar se lahko tudi različne taline istega jekla zelo razlikujejo med seboj, posebno v številu obratov do loma. V splošnem lahko rečemo, da v gama področju obrati do loma rastejo do neke optimalne predelovalne temperature, nato pa padajo. V dvofaznem področju (alfa + gama) je predelovalnost običajno slabša, pod A_1 točko pa lahko zopet malo naraste. Pri jeklu St 00, ki je nagnjeno k lomu v rdečem žaru, je predelovalnost v območju 900 do 1100°C izrazito nizka.

d) *Vpliv hitrosti preizkušanja.* Slika 6 prikazuje odvisnost števila obratov do loma od vrtilne hitrosti (obr./min logaritemsko) in v dveh logaritemskih koordinatah odvisnost maksimalnega momenta od vrtilne hitrosti (5). Leva diagrama veljata za jeklo C 15, desna pa za Ck 45. Dočim maksimalni moment pri obeh jeklih linearno narašča z logaritmom vrtilne hitrosti je odvisnost obratov do loma manj enostavna. Pri jeklu Ck 45 z večjo vrtilno hitrostjo narašča število obratov do loma do maksimuma, nato pa pada. To padanje

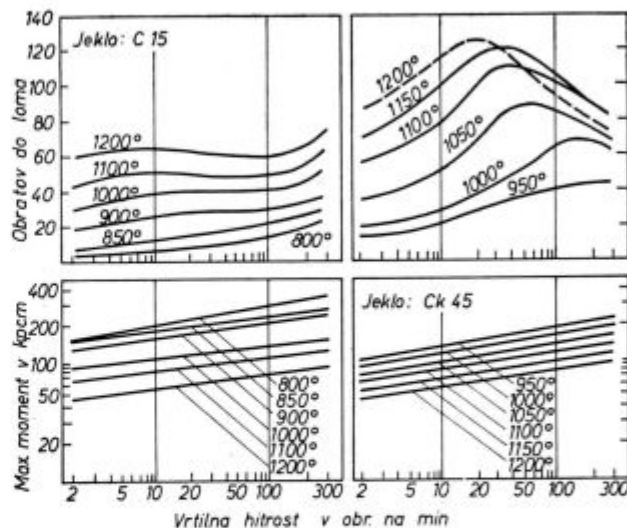


Slika 5

Plastičnost nekaterih vrst jekel

razlagajo s tem, da začne deformacijska hitrost presežati rekristalizacijsko. Pri jeklu C 15 pa je naraščanje obratov do loma — razen pri nižjih temperaturah — manj očitno.

e) *Vpliv sestave jekla.* Legirni elementi ne vplivajo na preoblikovalnost jekla vedno le dobro ali

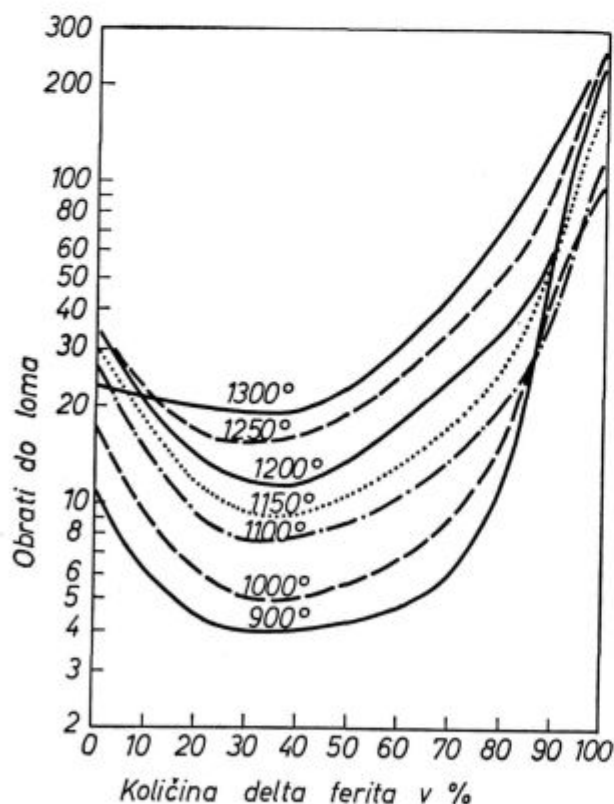


Slika 6

Število obratov do loma in maksimalni moment v odvisnosti od vrtilne hitrosti

slabo. Nekateri od njih vplivajo včasih slabo, v določenih količinah ali zvezah pa celo dobro. Aluminij: če je vezan v nitride vpliva slabo, v avtomatskih jeklih z S pa vpliva dobro.

Antimon, arzen, svinec, bor, baker, molibden, niob, kisik, selen, silicij, dušik, bizmut, volfram, in kositer poslabšajo predelavnost jekla. Znan in zelo raziskan je tudi škodljiv vpliv žvepla (lom v rdečem in belem žaru). Predelavnost avtomatskih jekel z žveplom izboljšamo s povišano količino Mn, katerega sulfidi se pri strjevanju jekla ne razporejajo v kristalnih mejah. Cer in druge redke zemlje pri nekaterih legiranih jeklih izboljšajo predelavnost. Krom do 12 % poslabšuje predelavnost, nad to količino pa jo izredno izboljša. Prav pri feritnih jeklih so dosegli do sedaj največ obratov do loma (več kot 2000). Ogljik: na osnovi starejših raziskav je razširjeno mišljenje, da imajo najboljšo predelavnost jekla z 0,15 % C. Novejše raziskave tega niso mogle potrditi, niti niso mogle odkriti druge jasne odvisnosti. V nerjavječih avstenitnih jeklih pa ogljik zelo znižuje predelavnost. Vpliv kobalta ni raziskan. Mangan in nikelj izboljšata predelavnost. Fosfor nima očitnega vpliva. Vanadij ugodno vpliva do 1,6 %, nad to količino nima vpliva. Vodik je brez vpliva. Cirkon izboljša predelavnost, posebno pri legiranih jeklih.

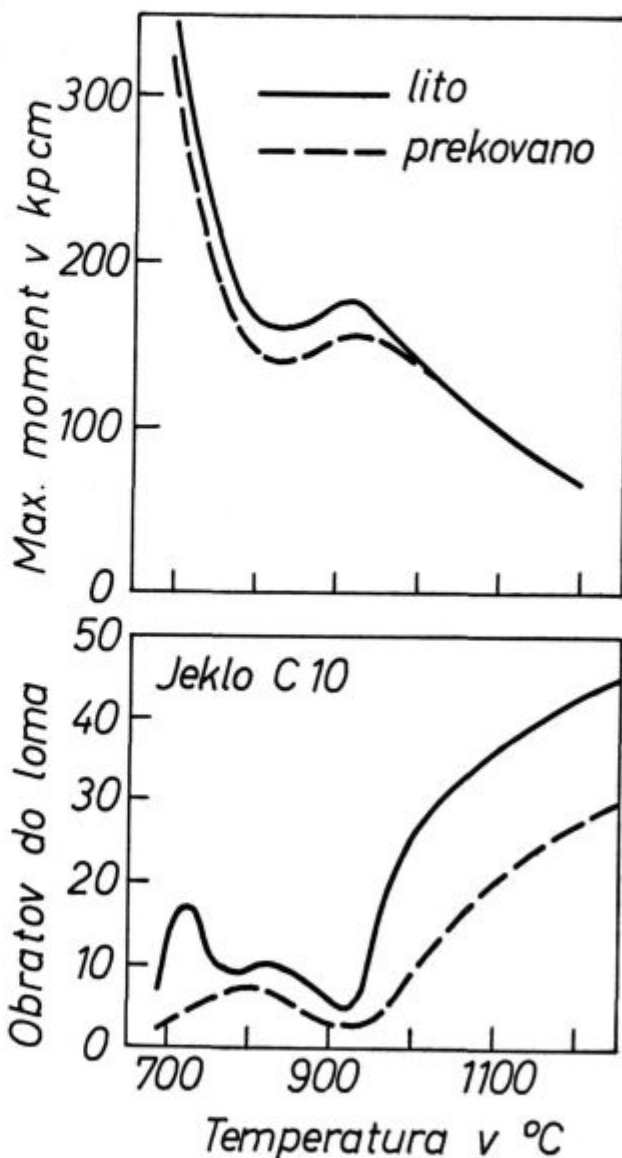


Slika 7

Predelavnost jekel z različnimi količinami delta ferita

f) Vpliv strukturnih nehomogenosti: Večje količine vključkov odnosno kisika povzročajo težave pri valjanju. Nad 400 ppm kisika skoraj že onemogoča predelavo pod 1100° C. Zanimiv je vpliv odnosa alfa in gama faze na predelavnost. Že pri nelegiranih jeklih je predelavnost v dvofaznem območju zelo slaba. Bolj važen pa je vpliv dvofazne strukture v CrNi jeklih. To področje je raziskovalo že več avtorjev, kajti že desetletja obstoja problem predelave teh jekel zaradi vpliva dvofaznosti. Diagram na sliki 7 (po Elfmarku) kaže odvisnost predelavnosti (obratov do loma) od količine delta ferita v jeklu. Preizkušana jekla so vsebovala 24 % Cr in razne količine Ni.

Pri avstenitnih jeklih pada predelavnost z večjo količino delta ferita do minimuma pri okoli 30 % delta ferita. Čista feritna jekla pa imajo zelo dobro predelavnost.



Slika 8

Predelavnost litega in kovanega jekla

g) *Vpliv litega ali predelanega stanja.* Na sliki 8 je prikazan primer odvisnosti predelavnosti od temperature za dve stanji: lito (kontinuirni liv) in kovano za jeklo C 10 (5). V litem stanju je praviloma predelavnost slabša, vendar je v osnovi potek krivulj »predelavnost-temperatura« isti. Le pod A₁ točko lito jeklo ne kaže maksimuma, ki je značilen za predelano jeklo. Jeklo predelujemo sicer v obeh stanjih — prva predelava gre v litem stanju, naslednja pa že v delno predelanem. Največkrat je tudi res, da če jeklo vzdrži prvo predelavo, vzdrži tudi naslednje. To bi pomenilo, da je v nekaterih primerih neobhodno potrebno preizkušati jeklo v litem stanju, posebno če gre za kritične primere preoblikovalnosti nekega jekla. Po drugi strani pa opazimo, da večina raziskovalnih del temelji na preizkušanju predelanega jekla. Celo predlog za standardno preizkušanje jekla pred valjanjem predvideva ulitje probe in nato skovanje v utopu na pravilno obliko. Izgleda torej, da lahko določimo kriterij preoblikovalnosti tudi če so vzorci iz predelanega jekla.

REZULTATI PREIZKUSANJA PREDELAVNOSTI

Stroj za torzijske preizkuse na Metalurškem inštitutu. Za izdelavo tega stroja smo uporabili staro stružnico za izdelavo vijakov (TRUVOX), ki smo jo dobili v Železarni Ravne. Pogonski del smo spremenili tako, da omogoča spremembe vrtilnih hitrosti od 0,5 do 600 obratov na minuto v več stopnjah.

Med obema vpenjalnima glavama je silitna peč za temperature do 1350° C. Preizkušane je zaščiten pred neposrednim sevanjem silitov s cevjo iz ognja varnega jekla. Zaradi tega je tudi nihanje temperature preizkušanca minimalno ($\pm 2^\circ$ C).

Merjenje obratov. Jeziček na sklopki sproži ob polnem obratu rele, ki posreduje signal elektromagnetnemu števcu. Števec je na tabli, ki jo snema filmska kamera.

Merjenje momentov: Glava, ki se med preizkusom ne vrti je pritrjena s 100 mm dolgo in 5 mm debelo vzmetjo, ki s svojo elastičnostjo služi tudi za merjenje momentov. Moment, odnosno pot vzmeti se prenaša na mehanično uro na tabli za snemanje. Vzmet je izmenljiva.

Za preje omenjeno vzmet smo izmerili odvisnost odklona na mehanični uri od momenta tako, da smo v glavo vpeli ročico dolgo 500 mm, in jo obremenjevali z utežmi.

Registracija količin. Vsi merilci — števec obratov, ura za momente in stoparica za merjenje časa — so zbrani v tabli, katero snemamo z razdalje 1 m s 16 milimetrsko kamero. Za kratke preizkuse je snemanje neprekinjeno s frekvenco 8 ali 16 slik na sekundo, za daljše preizkuse (zelo plastična jekla ali majhne vrtilne hitrosti) pa zadostujejo

posamezni posnetki vsakih nekaj sekund. S projiciranjem filma z navadnim diapozitivnim projektorjem lahko registriramo vse količine — čas, obrate in odklon zaradi momenta. Za zelo natančne meritve je treba nato narisati diagram odvisnosti momenta od števila obratov.

Preizkusili smo jekla:

Č.5421 — ECN 200

Č.9683 — BRU

Č.6980 — BRC in

Č.4570 — Prokron 2 spec.,

katerih sestave so na tabeli 2.

Tabela 2 — Sestave preizkušanih jekel

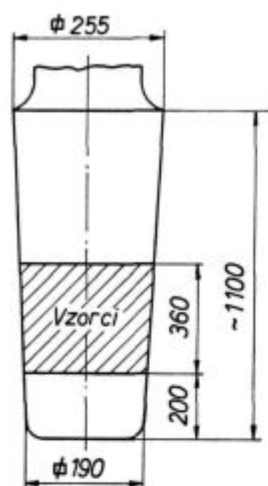
Element	ECN 200 Č. 5421 talina: 41190	BRU Č. 9683 talina: 13564	BRC Č. 6980 talina: 14252	Prokron 2 spec. Č. 4570 talina: 44547
C	0,16	1,18	0,78	0,22
Si	0,27	0,29	0,24	0,36
Mn	0,45	4,03	0,32	0,59
P	0,012	0,063	0,034	
S	0,022	0,006	0,004	0,018
Cr	1,89	4,09	4,13	17,3
Ni	1,94	0,25	0,40	1,79
Mo	0,03	0,60	0,60	0,14
V	0,01	3,46	1,5	
W		9,55	18,6	
Co		9,50	5,06	
Cu	0,15	0,17	0,12	0,15
Al _t	0,004			

Jekli ECN 200 in Prokron 2 spec. sta bili uliti v kokilo OKGV 255, jekli BRU in BRC pa v kokilo OSZK 240. Dimenzije blokov in lege preizkušancev so prikazane na sliki 9.

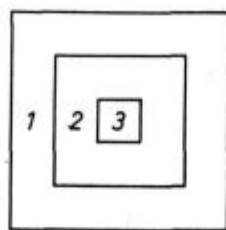
Mere preizkušancev: Prvotno smo se odločili za preizkušance z merami $\varnothing 10$ mm, $l = 50$ mm. Pri začetnih preizkusih z brzoreznimi jekli, ki imajo zelo visoko predelovalno trdnost, smo opazili, da so stroj in naprave na njem (sklopka, čeljusti) preslabi za momente, ki nastopajo pod 1000° C. Zato smo se odločili za standardni preizkušane z merami: premer 6 mm in dolžina 50 mm.

Preizkušanje predelavnosti z vzorci iz zunanje plasti bloka: Zunanja plast v bloku, ki se prva in najhitreje ohladi pri ulivanju jekla v kokilo, je najbolj drobnozrnata in homogena in predelava bloka je predvsem odvisna od te plasti. Zato so pri preizkušanju predelavnosti najbolj važni rezultati, ki jih dobimo z vzorci iz te plasti. S temi

Ingot OKGV 255

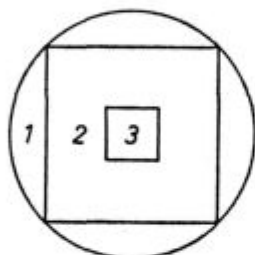
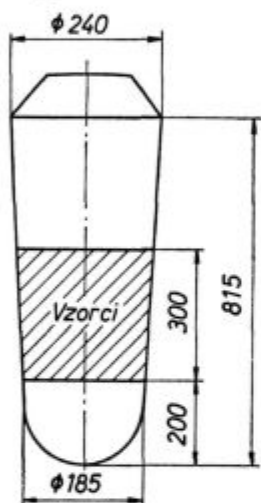


Lega vzorcev v prečnem prerezu bloka



1 zunanja
2 srednja
3 notranja

Ingot OSZK 240



1 zunanja
2 srednja
3 notranja

Slika 9

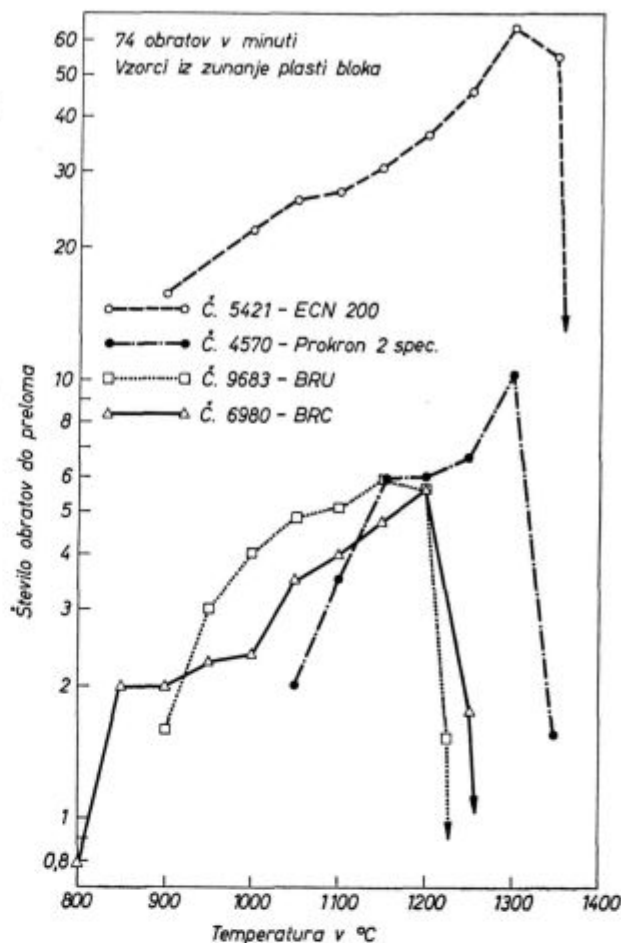
Lega vzorcev v prečnem prerezu bloka

rezultati bomo torej vrednostili predelavnost jekel. Odvisnost predelavnosti (števila obratov do preloma) od temperature, kaže slika¹⁰.

— Jeklo ECN 200 doseže najboljšo predelavnost med 1300 in 1350° C in sicer okoli 60 obratov do preloma. Pri nižjih temperaturah se predelavnost slabša in doseže pri 900° C le 15 obratov.

— Pri brzoreznih jeklih BRU in BRC je najboljša predelavnost pri 1200° C. Manj kot 2 obrata do preloma dosežeta ti jekli pri 1225° C (BRU) odnosno 1250° C (BRC) pri višji temperaturi (1250 odnosno 1275° C) pa se zlomita takoj in praktično brez momenta. Relativno dobro predelavnost kažeta obe jekli do 900° C.

— Jeklo Prokron 2 spec. ima relativno ozek interval optimalne predelavnosti med 1050 in 1300° C.



Slika 10

Predelavnost preizkušanih jekel v odvisnosti od temperature

Iz teh rezultatov moremo predpisati optimalni temperaturni interval valjanja, odnosno kovanja. Za zgornjo temperaturo tega intervala ni težav, ker pri vseh jeklih po prekoračitvi določene temperature predelavnost naglo pade. Zaradi varnosti predlagamo 20 do 30° C nižjo zgornjo temperaturo intervala. Težje je določiti spodnjo temperaturo vroče predelave. Jeklo ECN 200 ima npr. še pri 900° C zelo dobro predelavnost. Pri takih jeklih bodo o spodnji temperaturi vroče predelave odločale druge zahteve, npr. struktura ali mehanske lastnosti po vročem valjanju. Pri jeklih, ki se težje predelujejo, pa naj bi o spodnji temperaturi predelave odločal določen minimum obratov do preloma, ki ga jeklo še doseže. Za naš preizkušane in lito stanje v katerem smo jekla preizkušali, smo se odločili za najmanj 2 obrata do preloma (to vprašanje je tudi v strokovni literaturi zelo sporno). V praksi bo tudi lahko predelavnost pri nižjih temperaturah boljša kot jo pa določimo s torzijskim preizkusom — predelava namreč začne pri višji temperaturi in poteka diskontinuirno do nižjih temperatur, pri katerih je lita struktura že bolj ali manj razbita.

Na osnovi rezultatov navajamo na tabeli 3 zgornjo temperaturo in optimalni temperaturni interval vroče predelave.

Tabela 3 — Temperature vroče predelave

Jeklo	Zgornja temperatura vroče predelave °C	Optimalni interval vroče predelave °C
ECN 200	1350	1320
BRU	1200	1170—925
BRC	1200	1170—900
Prokron 2 spec.	1300	1270—1050

Faktor predelavnosti P: (predlaga J. Langerweger): Izberemo 200° C široko optimalno področje predelavnosti:

ECN 200	1100—1300
BRU	950—1150
BRC	1000—1200
Prokron 2 sp.	1100—1300

Število obratov do preloma n_{pr} pri spodnji temperaturi tega področja pomnožimo s srednjim naraščanjem števila obratov v tem področju $n/200^0$

$$P = n_{pr} \cdot n/200^0$$

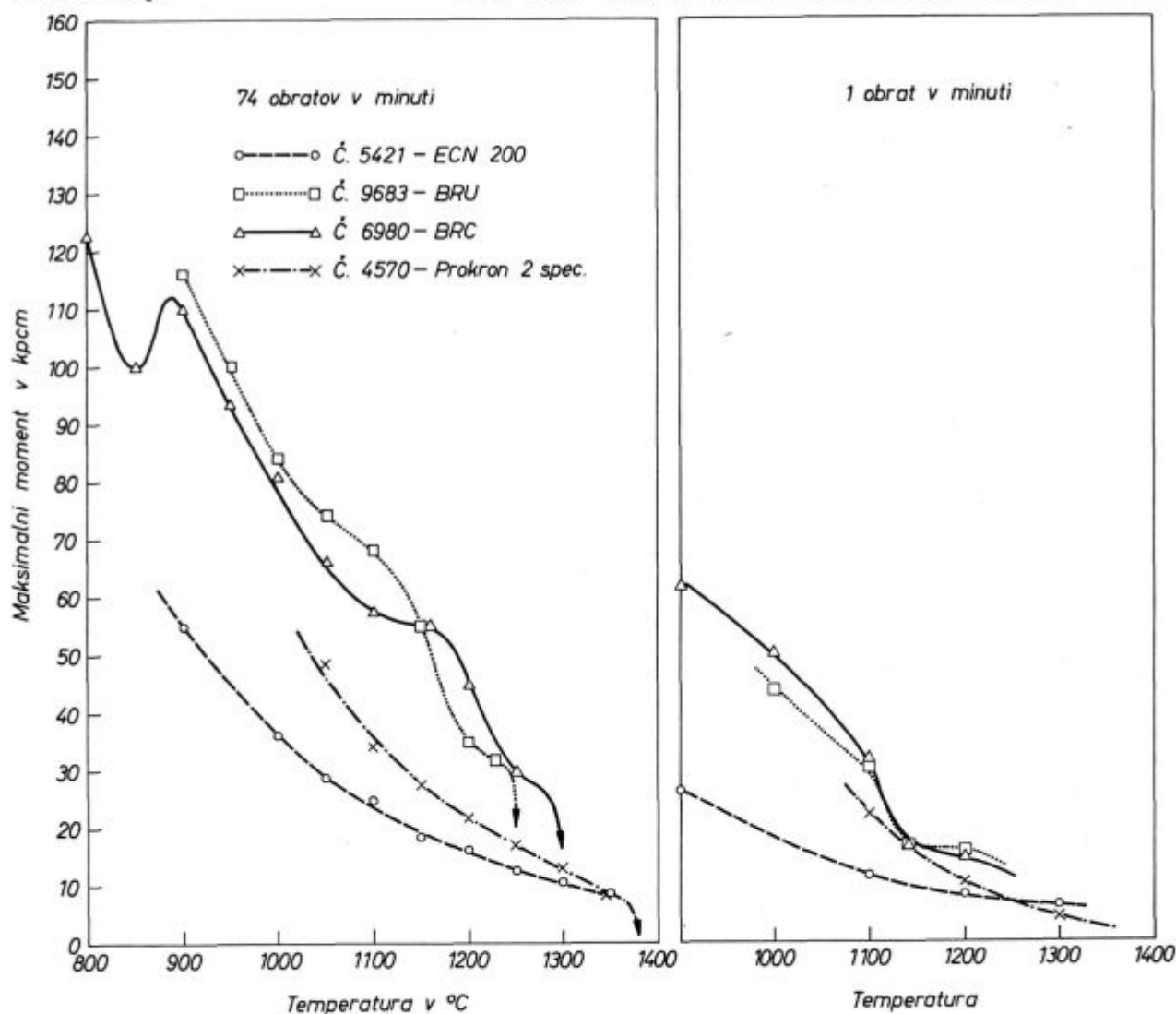
Na tabeli 4 so navedeni rezultati po tej enačbi za preiskovana jekla.

Tabela 4 — Faktorji predelavnosti

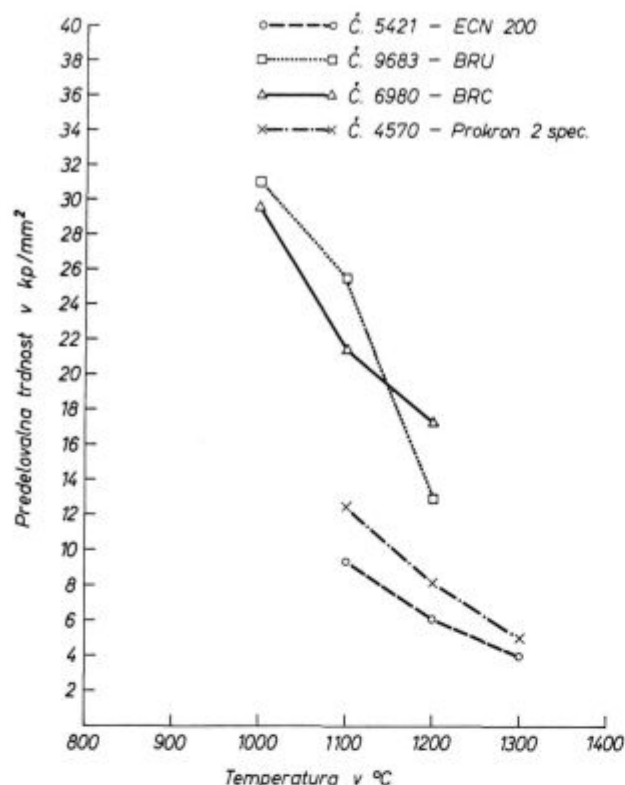
Jeklo	n_{pr}	Naraščanje predelavnosti $n/200^0$	Faktor predelavnosti P
ECN 200	27	0,18	4,86
BRU	3	0,014	0,042
BRC	2,4	0,0155	0,037
Prokron 2 sp.	3,5	0,0335	0,117

Ti faktorji najbolj izrazito pokažejo razlike v predelavnosti posameznih jekel.

Torzijski momenti: Na sliki 11 so narisane krivulje odvisnosti maksimalnega momenta od tem-



Slika 11
Maksimalni momenti v odvisnosti od temperature



Slika 12

Predelovalne trdnosti preizkušanih jekel v odvisnosti od temperature

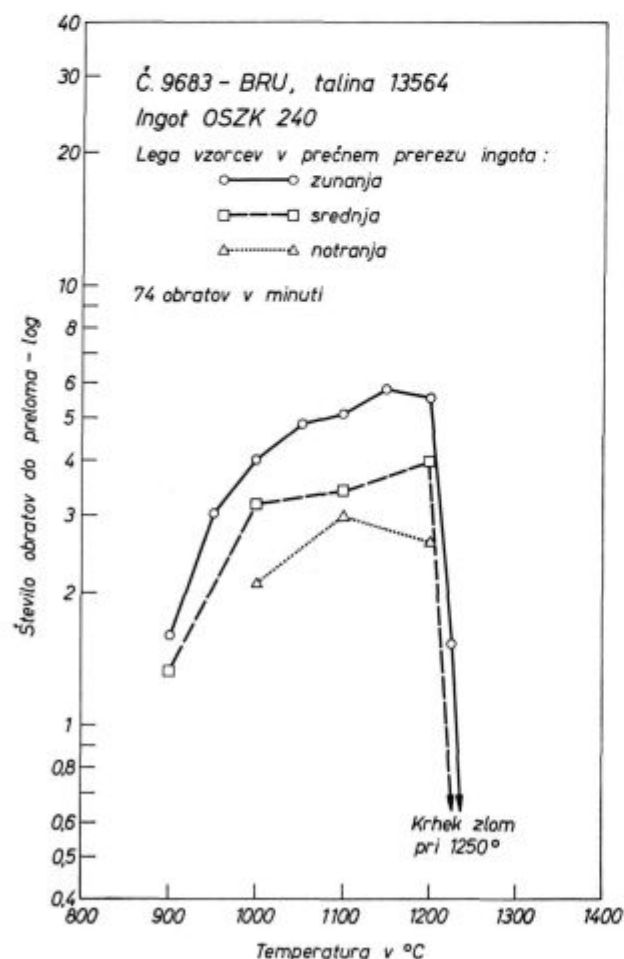
perature za vsa 4 jekla. Najmanjše torzijske momente ima jeklo ECN 200, srednje Prokron 2 sp., dočim imata brzorezni jekli izrazito večje momente. Jeklo BRC, ki smo ga preizkusili tudi pod 900° C, pokaže v dvofaznem območju padeč momenta, ki pa v alfa območju (pod 850° C) ponovno narašča. Pri krivuljah obeh brzoreznic jekel opazamo med 1100 in 1200° C kolena, ki sta v zvezi s strukturnimi spremembami (raztapljanje karbidov). Momenti pri manjši deformacijski hitrosti (1 obrat/minuto) so približno enkrat manjši.

Predelovalne trdnosti: Navedene so na tabeli 5 in sliki 12.

Tabela 5 — Predelovalne trdnosti

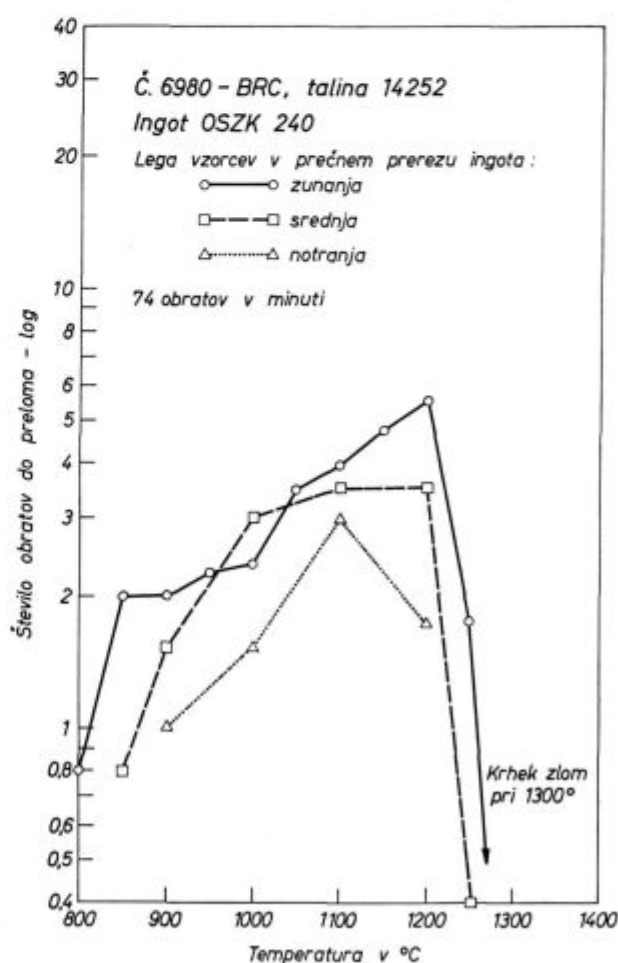
Jeklo	Predelovalne trdnosti v kp/mm ² pri temperaturi °C			
	1000	1100	1200	1300
ECN 200		9,3	6,05	4,0
BRU	31,0	25,5	12,9	
BRC	29,7	21,4	17,3	
Prokron 2 sp.		12,4	8,07	5,03

Vpliv kristalizacije v bloku: Znano je, da se kristalizacija v bloku, zaradi različnih ohlajevalnih hi-



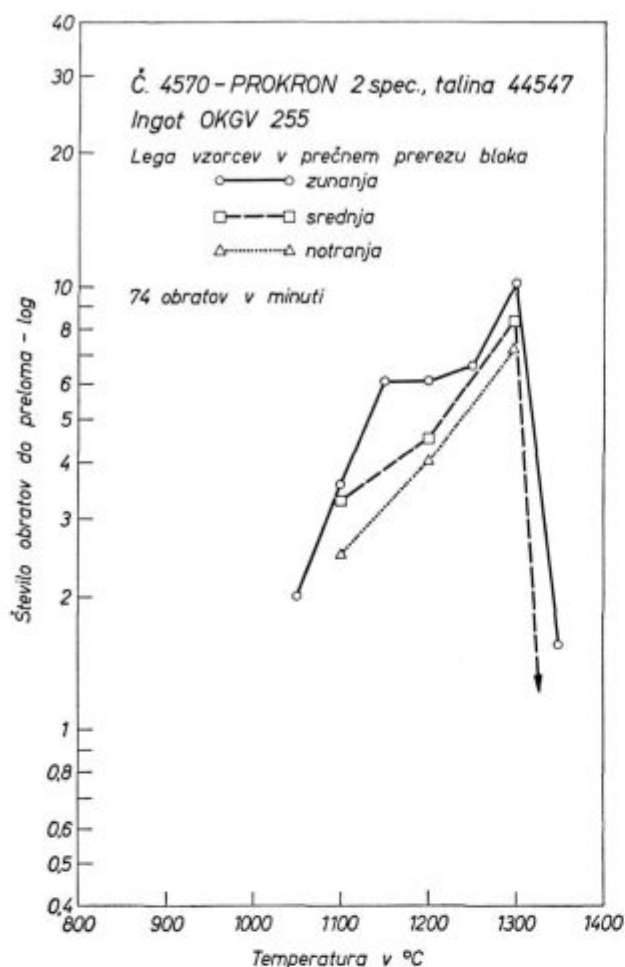
Slika 13

Plastičnost jekla BRU v odvisnosti od temperature in lege vzorcev v prečnem prerezu ingota



Slika 14

Plastičnost jekla BRC v odvisnosti od temperature in lege vzorcev v prečnem prerezu ingota



Slika 15

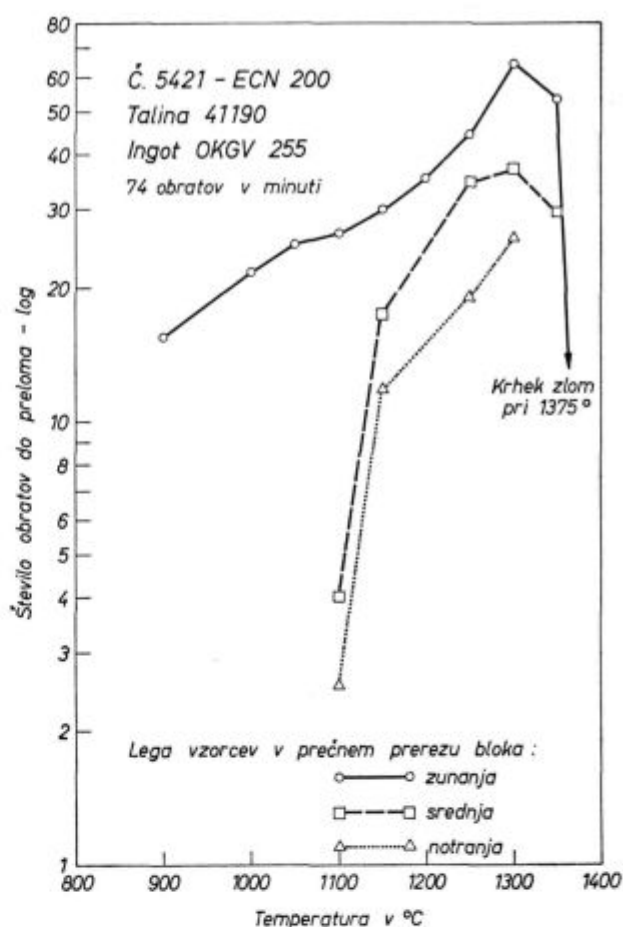
Plastičnost jekla Prokron 2 sp. v odvisnosti od temperature in lege vzorcev v prečnem prerezu ingota

trosti, spreminja od površine bloka do njegove sredine. Na površini se, zaradi hladilnega vpliva kokile, ingot hitro strdi in zato tu nastane plast drobnostnatih globularnih kristalov. V notranjost bloka je nato strjevanje transkristalizacijsko, sredina bloka, ki se ohlaja najbolj počasi, pa kristalizira ponovno globularno, vendar v velike kristale.

Vročo predelavo bloka omogoča zunanja plast drobnostnatih kristalov. Ustrezno debelino te plasti dobimo s pravilnim ulivanjem, predvsem s pravilno temperaturo in hitrostjo ulivanja. Notranjost bloka je zaradi grobih in usmerjenih kristalov in poroznosti mnogo slabše predelavna.

Iz blokov jekel, ki smo jih preizkušali, smo izrezali vzorce tudi iz srednjega in notranjega dela blokov. Lege teh vzorcev so prikazane na sliki 9. Odvisnost plastičnosti od temperature in lege vzorcev v prečnem prerezu bloka prikazujejo slike 13, 14, 15 in 16.

Razlike v predelavnosti glede na lego vzorcev v ingotu so pri vseh jeklih očitne. V srednji legi je plastičnost slabša, v notranjosti pa najslabša. Plastičnost hitroreznih jekel BRU in BRC — izražena z obrati do preloma — je v sredini približno enkrat



Slika 16

Plastičnost jekla ECN 200 v odvisnosti od temperature in lege vzorcev v prečnem prerezu ingota

slabša kot v zunanji plasti. Jeklo Prokron 2 spec. ne kaže tako velikih razlik, plastičnost se zmanjša le za 20 do 30 %. Relativno najbolj pa se poslabša plastičnost jekla ECN 200. V intervalu 1150 do 1350°C se zmanjša za okoli 70 %, pod 1150 pa se plastičnost jekla v notranjosti bloka nenavadno močno poslabša.

Preizkusi, ki smo jih izvršili, so uvod v sistematično preizkušanje predelavnosti domačih vrst jekel in raziskovanje raznih pojavov, ki spremljajo kristalizacijo jekel v bloku.

Literatura

1. D. E. R. HUGHES: Journal of the Iron and Steel Institut
2. W. LUEG, H. G. MÜLLER: Arch. Eisenhütt., 28, 1957, 508—516
3. J. LANGERWEGER: Technische Rundschau, 52, dec. 1967
4. C. ROSSARD: These de doctorat, 1960
5. J. LANGERWEGER, Trenkler, BHM, 112, jan. 1967, zv. 1, 20—33
6. M. F. E. White, These de doctorat, 1967
7. P. A. PORTEVIN, These de doctorat, 1962.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der Warmverformbarkeit wird das mechanische Verhalten der Metalle und Legierungen beim Einfluss der Temperatur und der Verformung bezeichnet. Schon im Anfang dieses Artikels sind im kurzen die Arten der Bestimmung der Warmverformung des Stahles, vor allem der Verdrehversuch, beschrieben. Es sind die Gleichungen für die Verformung beim Verdrehen, die Verformungsgeschwindigkeit und die Verformungsfestigkeit gegeben.

Die Prüfungsergebnisse werden von der Form des Prüfstückes, der Verformungstemperatur und Verformungsgeschwindigkeit, von der Stahlzusammensetzung und des Gefüges beeinflusst.

Es sind vier Stahlsorten, ECN 20 C, BRV, BRC und Prokron 2 spec. untersucht worden. Der optimale Temperaturintervall für die Warmverformung dieser Stähle und die Verformungsfestigkeiten sind bestimmt worden.

SUMMARY

Hot workability of steel means mechanical behaviour of metals and alloys when they are influenced by temperature and deformation. In the introduction of the paper methods of determining hot workability of steel are shortly described, especially the torsion test. Equations for the deformation by torsion, the rate of deformation, and the rate of workability are presented. The testing results are

influenced by the sample shape, testing temperature, rate of deformation, steel composition, structure, etc.

Four steels, ECN 200, BRU, BRC, and Prokron 2 spec. were tested. Optimal temperature interval for hot workability of these steels and for their workability strength were determined.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Под деформируемостью стали в горячем состоянии обозначаем механическое поведение при действии температуры и деформации. В начале статьи описан способ определения деформируемости стали в горячем состоянии в особенности при случаях кручения. Изнесены уравнения для деформации при кручении,

быстрота деформации и вязкость деформируемости. На результат испытания влияет форма образца, темпа испытания, быстрота деформации, состав и структура стали итд. Исследование выполнено на сталях марки: ECN 200, BRU, BRC и Prokron 2 spec. Определен оптимальный температурный интервал для горячей обработки этих сортов стали и вязкости деформаций.