

Kaljivost jekel - osnova za boljšo ekonomiko, pravilnejšo in lažjo izbiro jekel

Jominyjeva metoda določanja kaljivosti se je za srednje kaljiva jekla uveljavila po vsem svetu. Tudi v jugoslovanskih podjetjih jo precej uporabljajo, vendar premalo izkoriščajo informacije, ki jih preizkušanje po metodi omogoča. Metoda s svojo reproduktivnostjo in preprosto izvedbo odlično služi kot kriterij za kontrolo kvalitete jekla, lahko pa nam mnogo pomaga že pri izbiri jekla za določene potrebe, ali pa nam olajša oceno potrebnih pogojev toplotne obdelave.

S člankom želimo pomagati pri razširjanju uporabe te metode in prikazati njene možnosti. Zato so podane najnужnejše teoretične osnove; kratek opis metode in standardiziranih pogojev preizkušanja ter različne možnosti praktične uporabe rezultatov. S številnimi primeri so prikazane različne možnosti praktične uporabe rezultatov preizkušanja s pomočjo nomogramov, ki omogočajo neposredne informacije. V članku so podani ti nomogrami za praktično uporabo.

Poseben pomen imajo pasovi garantirane kaljivosti. Železarna Ravne trenutno razpolaga s pasovi garantirane kaljivosti za večino svojih jekel. Ti pasovi so izdelani s statistično obdelavo rezultatov preizkušanja velikega števila šarž na osnovi 95 % statistične gotovosti. Specifikacija zahtev garantirane kaljivosti so največkrat nepravilne, zato so v članku prikazani tudi standardni načini zahtev kaljivosti po vzoru SAE in AISI standardov.

UVOD

Zaradi mehanizacije, avtomatizacije, povečanja produktivnosti in predvsem zaradi zahtev po enakomernosti lastnosti toplotno obdelanih jeklenih izdelkov zahteva potrošnik od proizvajalca jekla jamstvo kvalitetnih lastnosti. Ena najvažnejših zahtev je kolikor mogoče enakomerna kaljivost jekla v garantiranih mejah in na zadovoljivem povprečnem nivoju.

Kaljivost je značilna lastnost jekla, ki je odločilna pri izvajanju toplotne obdelave, obenem pa predstavlja važno merilo za uporabnost jekla. Še poseben praktičen pomen ima, če jo lahko vnaprej predvidevamo.

Razumljivo je, da mora proizvajalec dobro poznati vse značilne lastnosti svojih jekel, če hoče resno jamčiti potrošniku njihovo uporabnost. Za spoznavanje lastnosti jekla, predvsem pa za resno

jamstvo kvalitetnega nivoja in enakomernosti je potrebna dovršena metodika preizkušanja, smotrna in dosledna tekoča kontrola, sistematična dokumentacija in statistična obdelava podatkov. Po statistični obdelavi rezultatov velikega števila poizkusov lahko proizvajalec daje svojemu potrošniku podatke o povprečnih lastnostih svojih jekel in z določeno statistično gotovostjo jamči meje odstopanj od povprečja.

Pri reševanju problemov toplotne obdelave jekla in kontrole kaljivosti je odločilne važnosti izbira metode preizkušanja, ki zadošča zahtevam s svojo enostavnostjo, zadovoljivo točnostjo in reprodukcijsko vrednostjo rezultatov. Rezultati preizkusne metode ne smejo služiti le medsebojnim primerjavam, ampak morajo biti predvsem praktičnega značaja, da lahko nudijo oporo pri izbiri pogojev toplotne obdelave za dosego zahtevanih lastnosti.

Preizkušanje kaljivosti pri konstrukcijskih jeklih je zaradi specifičnih potreb in odločilnega vpliva na mehanske lastnosti pri različnih vrstah in različnih dimenzijah posebno važno za oceno enakomernosti lastnosti toplotno obdelanega jekla po vsem preseku. Pri teh preizkusih kaljivosti želimo najti neko značilno vrednost, ki naj omogoči predvidevanje sposobnosti za poboljšanje. Ta vrednost naj omogoča določitev največjega preseka jekla, ki ga je še mogoče po vsem preseku poboljšati. Pod primerjalno kaljivostjo razumemo nagnjenost jekla k tvorbi martenzita pod enakimi pogoji avstenitizacije in ohlajevanja. Enakomerne lastnosti zagotavlja le poboljšanje preko martenzita. Zaradi tega spoznanja je Grossmann² s sodelavci razvil metodo, ki daje karakteristično vrednost za sposobnost poboljšanja. Problem predvidevanja lastnosti na osnovi kemijske sestave in pogojev toplotne obdelave so skušali najprej rešiti z računskimi metodami. Novejše raziskave so pokazale, da splošno veljavne računske metode preveč odstopajo od praktičnih ugotovitev, zato so se bolj uveljavili praktični poizkusi, med katerimi ima znani Jominyjev poizkus najvažnejše mesto.

Glavna prednost Jominyjevega poizkusa je preprosta izvedba, široko območje uporabnosti in predvsem dobra reprodukcijska vrednost rezultatov. Dovolj natančno daje podatke o doseženi trdoti za vse ohlajevalne hitrosti od 600 — 2^o C/sekundo z enim samim preizkusom. Seveda je tudi uporabnost Jominyjevega poizkusa omejena. Ta

metoda v standardni izvedbi ni dobro uporabna za plitko kaljiva jekla in prav tako ne za jekla, ki kalijo na zraku in se odlikujejo z veliko prekalilno sposobnostjo. Z ustreznimi spremembami in dodatnimi napravami si modificirani Jominyjev poizkus vedno bolj utira pot tudi na ta področja.

Vrednost Jominyjevega poizkusa kot metode, ki jo proizvajalec uporablja za kontrolo in predvidevanje kalilnih lastnosti jekla, je prišla prav do izraza šele z uvedbo pasov garantirane kaljivosti in z izdelavo in uporabo raznih nomogramov. Nomogrami podajajo medsebojne odvisnosti dimenzij kaljenih kosov, različnih kalilnih globin, ugotovljenih Jominyjevih krivulj in ohlajevalnih intenzivnosti kalilnih sredstev. Nomogrami so izdelani na osnovi ustreznih ohlajevalnih hitrosti po preseku kaljenega kosa in Jominyjeve probe na različnih oddaljenostih od kaljenega čela. S številnimi praktičnimi poizkusi so statistično potrjeni.³

Če napravimo Jominyjev poizkus, lahko iz Jominyjeve krivulje s pomočjo teh nomogramov z zadovoljivo natančnostjo predvidevamo potek trdot po vsem preseku različnih dimenzij kosov, kaljenih z različno ohlajevalno hitrostjo. Če Jominyjevo probo po čelnem kaljenju še popustimo na zahtevano temperaturo, dobimo še podatke o spremembi trdot pri popuščenju. Jominyjeva krivulja v popuščenem stanju daje podatke o poteku trdot po preseku kosa v poboljšanim stanju.

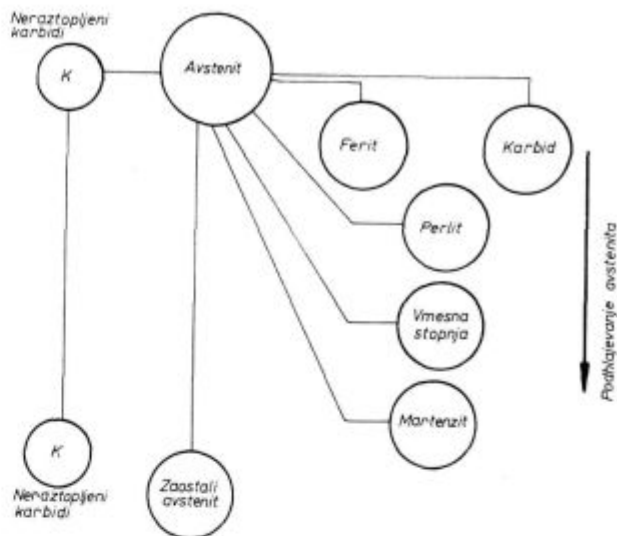
Zal moramo ugotoviti, da je Jominyjev poizkus razmeroma malo znan in uporabljan. Poleg tega pa še tisti, ki ga kot ocenjevalni kriterij zahtevajo ali izvajajo, malokateri natančneje vedo, kakšne podatke nam Jominyjev poizkus lahko daje in kaj lahko iz rezultatov sklepamo za prakso toplotne obdelave. Največ se uporablja kot kontrolna metoda brez prave uporabne osnove. Odločitve pri toplotni obdelavi največkrat prepuščamo ugibanju na podlagi izkustev, medtem ko bi nam Jominyjev poizkus pri tem služil s praktičnimi podatki za jeklo, ki ga toplotno obdelujemo pri danih pogojih.

Preden preidemo na obravnavo in kritično ocenjevanje poizkusov za določanje kaljivosti jekla, moramo nekoliko osvežiti teoretske osnove kaljenja in kaljivosti.

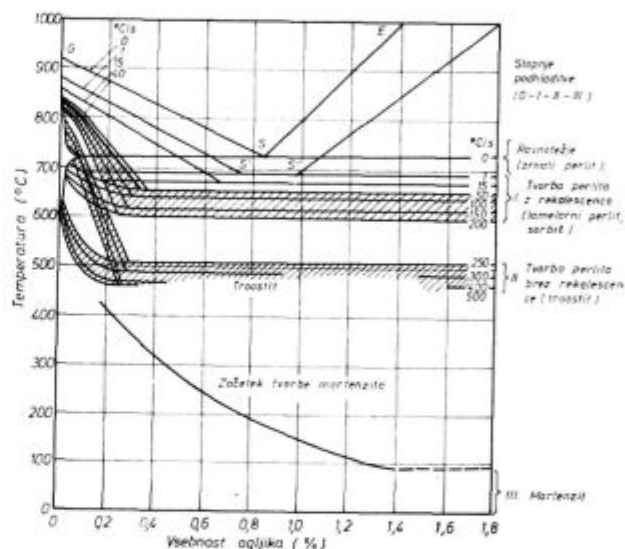
OSNOVE KALJENJA IN KALJIVOSTI

— Osnovni pojmi

S pojmom kaljivosti označujemo sposobnost, ki omogoča, da s hitro ohlavitvijo jekla iz avstenitnega območja zadržimo premeno avstenita v perlit. Pri določeni hitrosti ohlajevanja, ki je odvisna od vrste jekla in temperature avstenitizacije, nastane vmesnostopenjska struktura, pri še večji hitrosti pa martenzit. (Slika 1) S tem dosežemo visoko trdoto, ki se pri manjši prekaljivosti jekla omejuje na površino ali obrobno plast. Če dosežemo visoko trdoto po vsem preseku, pa pravimo, da jeklo prekali.



Slika 1
Produkti premen avstenita

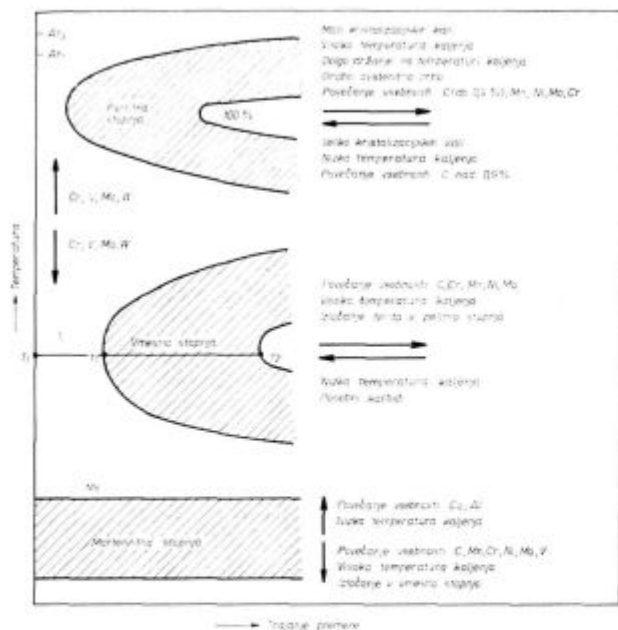


Slika 2
Vpliv podhladitve za oglikova jekla (Wever — Rose)⁴

Znani Wever-Rosejev⁶ diagram (slika 2) prikazuje, kako se evtektoidna točka S v diagramu železo — cementit z rastočo hitrostjo ohlajevanja pomika proti nižji vsebnosti ogljika in obenem tudi k nižji temperaturam.

Najmanjšo hitrost ohlajevanja, ki ravno še zadošča, da dobimo po kaljenju v jeklu martenzit, imenujemo **kritično ohlajevalno hitrost**. Ta je odvisna od sestave jekla. Z naraščanjem vsebnosti ogljika do 0,9 %, s povečevanjem vsebnosti legirnih elementov ter z zviševanjem kalilne temperature se kritična ohlajevalna hitrost zmanjšuje, kar kaže pomikanje premenskih območij k daljšim časom (sl. 3).

Kritična ohlajevalna hitrost je pri oglikovih nelegiranih jeklih zelo velika, zato kalimo ta jekla v vodi. V notranjosti večjih profilov so ohlajevalne hitrosti manjše kot na površini in ne dosega



Slika 3
Vplivi na kinetiko premen

kritične ohlajevalne hitrosti. Zato ostane v srednjem delu preseka jeklo nekaljeno.

Pri metalografskem pregledu kaljenega nelegiranega podvektoidnega jekla lahko pri večjih dimenzijah ugotovimo strukture od martenzita na površini preko vmesnih struktur do ferita in perlita v sredini. Enako kot struktura, je tudi trdota jekla po preseku različna.

Ohlajevalna hitrost, ki jo jeklo pri kaljenju doseže, je odvisna od:

- specifične toplote in toplotne prevodnosti jekla,
- ohlajevalne intenzivnosti kalilnega sredstva,
- velikosti, oblike in površine komada.

Kalilna sredstva se po ohlajevalni intenzivnosti med seboj zelo razlikujejo. Ohlajevalno intenzivnost kalilnega sredstva določimo s praktičnim poizkusom in jo izrazimo s **faktorjem ohlajevalne intenzivnosti H**.

V literaturi^{7, 8, 15, 23} najdemo orientacijske vrednosti faktorjev ohlajevalne intenzivnosti za različne načine ohlajevanja in kalilna sredstva.

Normalnemu kaljenju v vodi ustreza največkrat vrednost $H = 2$, normalnemu kaljenju v olju pa $H = 0,4$. Pri ostrejšem ohlajevalnem sredstvu, ali pri močnejšem mešanju sredstva, ali gibanju komadov pri kaljenju je vrednost H ustrezno večja.

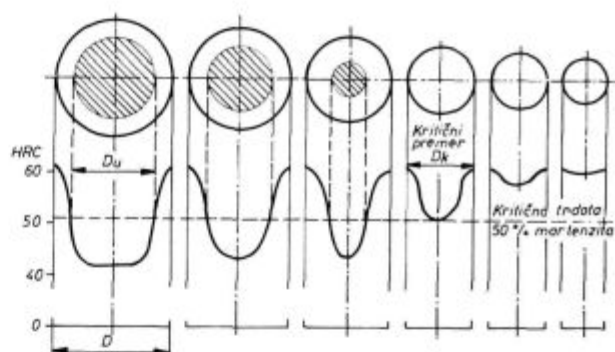
— Ohlajevalna intenzivnost H

Pri določanju kaljivosti in pri praktični uporabi podatkov o kaljivosti je velike važnosti ohlajevalna sposobnost kalilnih sredstev, ki jo moramo na primeren način označiti. Med različnimi načini označevanja ohlajevalne intenzivnosti

je najpomembnejši način, ki ga je razvil Grossmann in se že dolgo uporablja v ZDA ter tudi v Evropi.

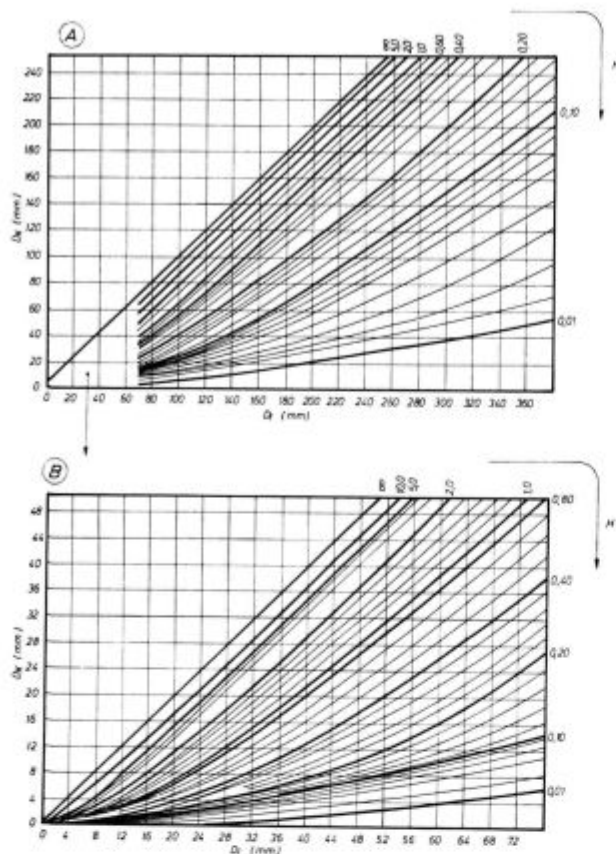
Skušajmo prav na kratko razložiti osnovo tega označevanja ohlajevalne intenzivnosti.

Vzemimo vrsto okroglih palic različnih premerov iz nelegiranega ali malolegiranega jekla in jih kalimo na enak način v istem ohlajevalnem sredstvu. Splošno je znano, da ugotovimo pri večjih premerih na prelomu ali pa na jedkanem obrusu v sredini nekaljeno cono, ki je na sliki 4 označena s premerom D_u . Krivulja poteka trdote ima pri tem najstrmejši padec in običajno prevojno točko. Tu je meja tako imenovane kalilne globine. Mikroskopska preiskava pokaže na tem mestu preseka približno 50 % martenzita. Grossmann je tej točki ustrezno trdoto imenoval **kritična trdota**. Pri zmanjševanju premera palice pridemo do nekoga določenega premera, pri katerem ravno že izgine nekaljena cona in pri tem dobimo v sredini preseka kritično trdoto ter mikrostrukturo s 50 % martenzita. Ta premer palice imenujemo po Grossmannovi definiciji **kritični premer (D_k)**. Kritični premer je odvisen od načina kaljenja in kalilnega sredstva. Zato je Grossmann razvil za medsebojne primerjave še pojem **idealnega kritičnega premera (D_t)**, ki pripada neki fiktivni ohlajevalni intenziv-



Slika 4
Potek trdote po preseku različno debelih palic²³

nosti $H = \infty$. To je tista ohlajevalna intenzivnost, pri kateri bi temperatura površine v trenutku začetka ohlajevanja v neskončno kratkem času dosegla temperaturo okolice. Torej je s kritičnim premerom in ohlajevalno intenzivnostjo H kaljivost popolnoma določena, idealni kritični premer pa nam služi kot osnova za medsebojne primerjave in ga določamo s pomočjo snopa krivulj na slikah 5 A in 5 B. Če smo npr. določili kritični premer $D_k = 45$ mm in ohlajevalno intenzivnost $H = 0,8$, dobimo iz slike 5 B idealni kritični premer $D_t = 70$ mm. Ta vrednost idealnega kritičnega premera predstavlja karakteristiko jekla, ki označuje kaljivost, neodvisno od kalilnega sredstva in načina kaljenja. S pomočjo te vrednosti lahko pretvarjamo rezultate kaljivosti enega kalilnega sredstva na pričakovano kaljivost v drugem kalilnem sredstvu ali z drugim načinom kaljenja.



Slika 5

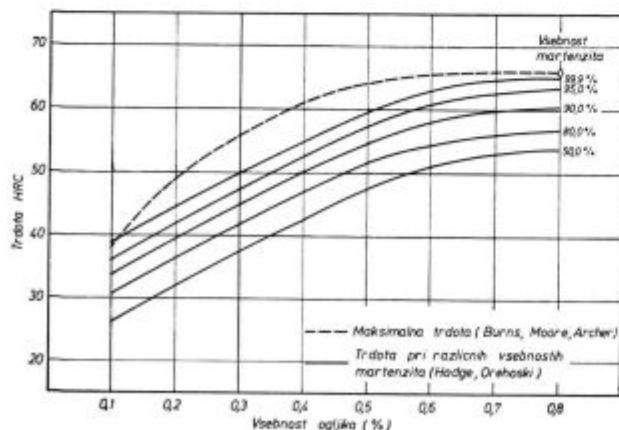
Zveza med idealnimi kritičnimi premeri D_i in kritičnimi premeri D_k pri različnih ohlajevalnih intenzivnostih

— Vpliv legirnih elementov na kaljivost

Posebna skupina legirnih elementov se veže z ogljikom v karbide, zato je poznano ime karbidotvorni element. Karbidotvorna moč narašča pri teh elementih v sledečem vrstnem redu:

Mn, Cr, W, V, Mo, Ti, Nb, Ta.

Ti karbidotvorni elementi pomikajo eutekoidno točko S v diagramu železo cementit proti levi, t. j. proti nižjim vsebnostim ogljika.



Slika 6

Vpliv vsebnosti ogljika in deleža martenzitne strukture na trdoto jekla

Znano je, da legirni elementi le neznatno vplivajo na doseženo trdoto določene strukture. Trdota, ki jo jeklo doseže pri določenem deležu martenzita, je odvisna v glavnem od vsebnosti ogljika v jeklu⁹ (sl. 6). Legirni elementi pa odločilno vplivajo na globino kaljene plasti — torej na sposobnost prekaljivosti jekla. Vsi navedeni elementi zmanjšujejo kritično ohlajevalno hitrost jekla in prav zato vsi, razen kobalta, povečujejo kalilno globino. Posebno Mn in Ni močno povečata kalilno globino, zato jih dodajamo jeklom, od katerih pričakujemo z dobro prekaljivostjo pobojšanje velikih presekov.

Vsi karbidotvorni elementi, posebno Cr, W, V in Mo zahtevajo zvišanje kalilne temperature v primeri z nelegiranimi jekli, če jih dodajamo za povečanje prekaljivosti. S tem dosežemo raztapljanje karbidov. Če se karbidi zaradi prenizke kalilne temperature ne raztopijo, ostanejo karbidi pri kaljenju nespremenjeni, v karbidih vezani elementi pa izgube svoj vpliv na prekaljivost (sl. 1).

To ugotovitev lahko potrdimo s preprostim praktičnim primerom.

Nadevtektoidno orodno jeklo, legirano z volframom (1,2 % C in 1 % W), pod normalnimi pogoji kaljenja (780° C — voda) plitko kali. Površina je trda, martenzitna struktura sega le v globino 2 do 3 mm, jedro pa je žilavo. Če kalilno temperaturo zvišujemo, bo globina kaljene plasti naraščala, pri temperaturi 1100° C pa vidimo, da komad preseka 20 × 20 mm popolnoma prekali. Naj omenimo, da v tem primeru tega ne želimo. Zaradi že prej omenjenih vplivov s povišanjem kalilne temperature seveda lahko dosežemo, da tudi nelegirana ogljikova jekla prekalijo. Vendar je v takem primeru kalilna temperatura navadno že previsoka in postane jeklo grobozrnato ter kaže znake pregretja, kar slabo vpliva na žilavost.

— Razdelitev jekel po kaljivosti

V metalurgiji nam daje razdelitev jekel po uporabi dve osnovni skupini: konstrukcijska in orodna jekla.

Konstrukcijska jekla so sestavljena tako, da v glavnem vsa prekalijo (seveda, do gotove debeline), medtem ko z ozirom na prekaljivost razdelimo orodna jekla v dve podskupini:

— Orodna jekla, ki ne prekalijo. Često jih imenujemo plitko kaljiva jekla, ker pri kaljenju postanejo zelo trda na površini, v sredini pa ohranijo veliko žilavost.

— Orodna jekla, ki prekalijo in dosežejo visoko trdoto enakomerno po vsem preseku.

Te različne lastnosti jekel so odločilne pri izbiri primerne metode za določanje kaljivosti.

JOMINYJEV PREIZKUS KALJIVOSTI

— Področja uporabnosti standardnega Jominyjevega preizkusa

Jominyjev preizkus kaljivosti je postal po vsem svetu standardna metoda za določanje in kontrolo kaljivosti. Tudi področje uporabnosti tega preizkusa se je zelo razširilo. Dandanes nam služi pri skoraj vseh vrstah konstrukcijskih nelegiranih in legiranih jekel. Pri **cementacijskih jeklih** nam služi za določanje osnovne kaljivosti cementacijskega jekla, poleg tega pa se je v zadnjih letih razvila še posebna metoda za določanje obrobne kaljivosti¹¹ cementiranih jekel, za kar se uporabljajo cementirane jominyjeve probe. Posebno uporabna je ta metoda za vsa nelegirana in legirana **jekla za poboljšanje**, vedno bolj pa si utira pot tudi v področje nizkolegiranih **orodnih jekel**.

Prednost jominyjevega preizkusa pred vsemi ostalimi metodami za določanje kaljivosti je v tem, da z enim samim razmeroma preprostim poizkusom omogoča hitro določitev stopnje kaljivosti za široko in zvezno območje vseh ohlajevalnih hitrosti, ki pridejo praktično v poštev. Na eni sami probi dobimo kalilne karakteristike in tudi dejanske trdote za celo vrsto ohlajevalnih hitrosti.

Prav posebno primeren je jominyjev preizkus za jekla, katerih kritična ohlajevalna hitrost ne presega 38° C/sek.

Natančnost poizkusa se nekoliko zmanjša pri največjih in najmanjših ohlajevalnih hitrostih. Zato ta poizkus v standardni izvedbi ni dovolj točen, da bi ga lahko uporabljali za oceno tvorbe martenzita v velikih kosih iz plitko kaljivega nelegiranega ali nizkolegirane jekla.

Prav tako ta poizkus ni uporaben pri drugi skrajnosti — pri jeklih, ki kalijo na zraku.

Pogoji ohlajevanja probe so točno določeni in ves postopek je normiran po **JUS C.A2.051 — 1959**.

— Priprava probe in kratek opis standardnega poizkusa

Celoten preizkus je predpisan po **JUS**, zato bomo v naslednjem le opozorili na nekaj najvažnejših in odločilnih zahtev.

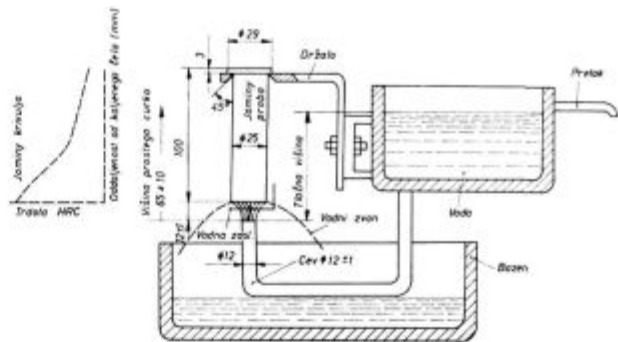
Standardna jominyjeva proba $\varnothing 25 \times 100$ mm mora biti stružena iz palice, kovane ali valjane na 30 mm \varnothing . Zaradi izcej in drugih metalurških vplivov ne smemo vzeti probe iz nekega dela večjega profila, ampak mora ta predstavljati celoten presek. Če je na probi kakršna koli napaka, jo brezpogojno zavržemo in vzamemo drugo.

Obliko in dimenzije probe ter skico kalilne naprave za jominyjev preizkus kaže slika 7.

Izceje posameznih elementov, predvsem C, Mn in Cr lahko povzročijo, da je kaljivost jekla v posameznih predelih različna. V splošnem bodo imele probe, vzete pri glavi ingota, boljšo kaljivost od onih iz sredine in noge ingota.

Struktura jekla pred kaljenjem lahko močno vpliva na kalilne karakteristike, ki jih s poizkusom dobimo. Zato kovano ali valjano palico pred struženjem na končno dimenzijo probe obvezno normaliziramo, pri orodnih jeklih pa žarimo.

Normalizirano ali žarjeno proba damo v peč, ki je na predpisani kalilni temperaturi in jo držimo 30 minut na



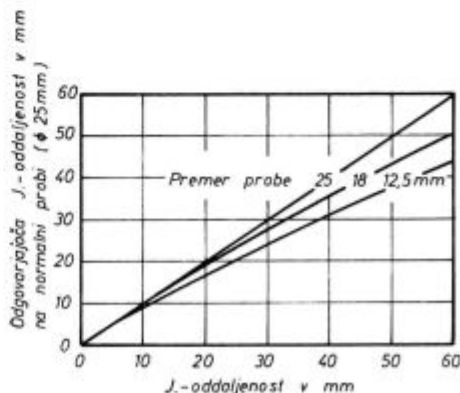
Slika 7
Skica naprave za Jominy preizkus

temperaturi. (Stahl-Eisen Prüfblatt 1650-61 priporoča čas ogrevanja probe do kalilne temperature 30–40 minut in čas držanja na temperaturi 20 minut. V kolikor je čas ogrevanja krajši, mora biti skupen čas ogrevanja in držanja na temperaturi najmanj 50 minut.) Čas ogrevanja na kalilni temperaturi lahko precej vpliva na rezultate jominyjevega preizkusa. Pri tem moramo paziti, da posebno na čelni ploskvi preprečimo razogljčenje in skajanje. Če nimamo v peči varovalne atmosfere, zaščitno proba tako, da jo postavimo v posodico iz ognjeodpornega jekla tako, da stoji čelna ploskev na grafitni podlagi, oglju ali litoželeznih ostružkih.

Po 30-minutnem ogrevanju na kalilni temperaturi vzamemo proba iz peči, jo največ v 5 sekundah vstavimo v jominyjevo napravo in kalimo z vodnim curkom, ki smo ga pred tem točno uravnali. Višina prostega curka mora znašati 65 ± 5 mm. Premer cevi je 12 ± 1 mm. Držalo probe mora biti suho. Med poizkusom mora biti zrak v prostoru mirujoč. Razdalja ustja cevi od čelne ploskve probe mora biti 12 ± 1 mm.

Temperatura vode od 0–60° C ali dodatki do 6 % NaOH razmeroma malo vplivajo na rezultate. Kljub temu je predpisana temperatura vode 5–30° C. Čelno ohlajanje probe z vodnim curkom traja do popolne ohladitve, najmanj pa 10 minut. Šele po tem času lahko proba ohladimo v vodi.

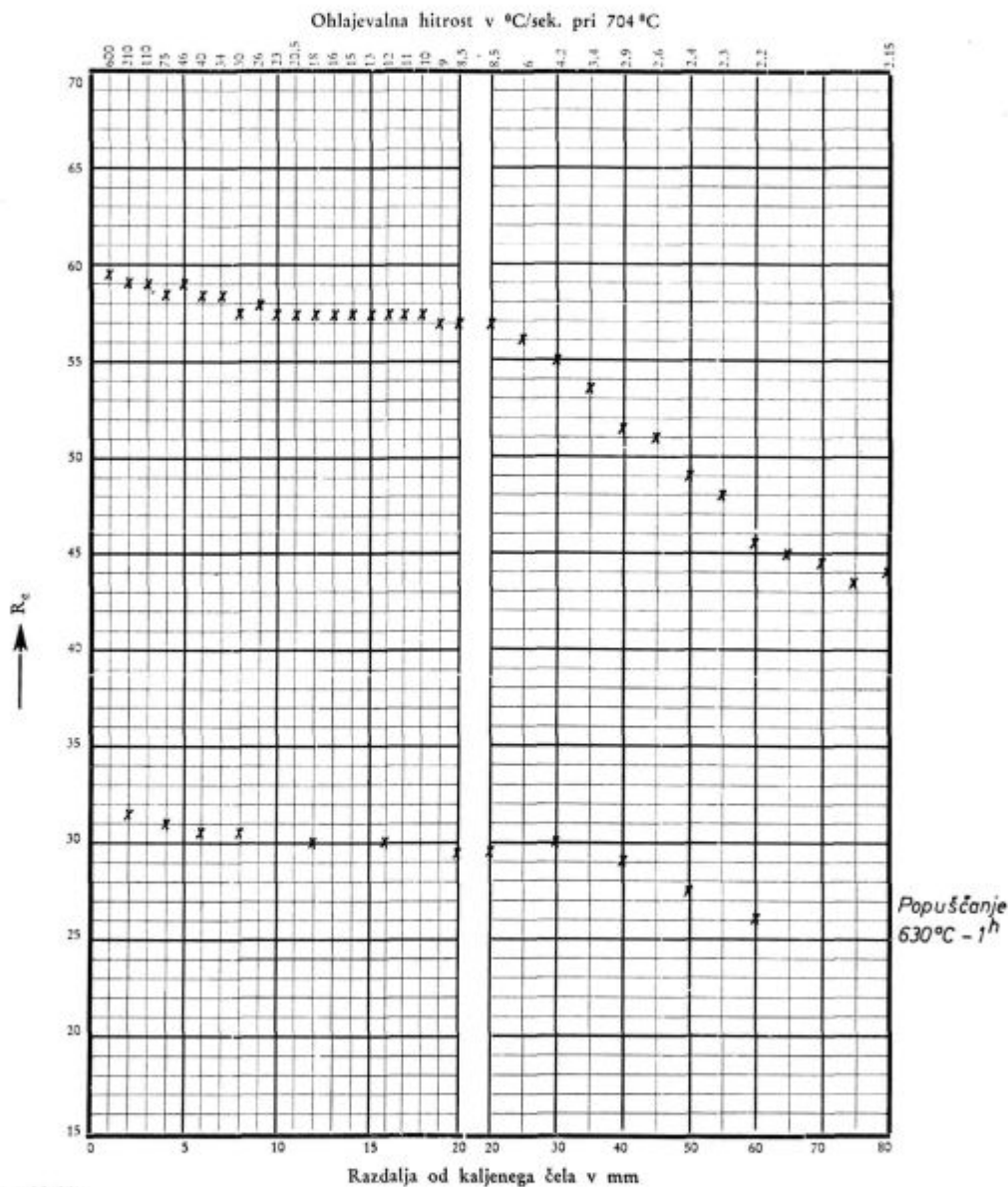
Če so palice jekla, ki ga želimo preizkusiti, tanjše od 25 mm, si lahko pomagamo z jominyjevimi probami manjših premerov. Praktični poizkusi so pokazali, da je potek trdot vzdolž probe podoben in, da je tako odstopanje od normalnih pogojev dopustno le, če sorazmerno z zmanjšanjem premera probe zmanjšamo tudi premer šobe, iz katere brizga voda. Na tak način dajo celo jominyjeve probe do premera 12,5 mm rezultate z reprodukcijo vrednostjo. Pri tankih probah je učinek stranskega odvajanja toplote nekoliko večji, zato priporoča **Wys²³** popravke, ki jih podaja slika 8.



Slika 8
Popravki za jominyjeve probe različnih premerov²³

Jominy preizkus št. 532

Izhodni profil $\phi 30$ mm	Šaržna št. 7330	Kvaliteta Č. 4830 VCV150	Št. kontrolnega lista									
C 0,48	Si 0,28	Mn 1,06	P 0,011	S 0,025	Cr 1,14	Ni	W	Mo	V 0,08	Co	Temperatura °C	
										normalizacije	kaljenja	
										870	840	



REZULTATI:

J	25	30	35	40	45	50	55	D ₁	Zrno	Krivulja JE — X v predpisa- nem območju
mm						47		$\phi 173$	8	

Označiti odstopanja od predpisanih vrednosti!

Meril: Kontroliral:

Slika 9
Primer formularja za jominyjev preizkus

V posebnih primerih še tanjših dimenzij lahko za informacijo o kaljivosti izdelamo in preizkusimo posebne vrste prob ob primerno prirejenih pogojih preizkušanja^{17, 18, 19}.

Po kaljenju probo na dveh nasprotnih ploskvah vzdolžno odbrusimo za 0,4 mm (Stahl-Eisen Prüfblatt I650-61 predpisuje 0,8 mm) in nato na teh ploskvah izmerimo trdoto po Rockwellu C. Pri brušenju moramo biti zelo previdni, da ne pride zaradi pregrevanja ob prevelikih pritiskih ali zamazanih ploščah do sprememb strukture. S posebnim postopkom jedkanja¹⁷ lahko ugotovimo, če je nastopilo pri brušenju lokalno ogretje in s tem popuščanje kaljene strukture.

Trdoto merimo do razdalje 20 mm od kaljenega čela na vsak milimeter, dalje pa na vsakih 5 mm. V diagram vnašamo srednjo vrednost trdot za enaki razdalji na obeh straneh probe. Rezultatov pod 20 HRC zaradi premajhne natančnosti meritve ne upoštevamo. V formular vpišemo poleg meritev trdot še:

- kemijsko analizo in eventualna odstopanja od predpisanih analizičnih mej,
- temperaturo normalizacije (žarjenja) in kaljenja,
- velikost avstenitnega zrna, ki jo določimo s posebno probo ϕ 20 mm iz istega jekla, kaljeno iz iste temperature.

Po želji lahko probo po merjenju trdot popustimo na določeni temperaturi in nato ponovno merimo trdote vzdolž probe. Tako dobimo jominyjevo krivuljo v popuščenem oziroma v poboljšanem stanju.

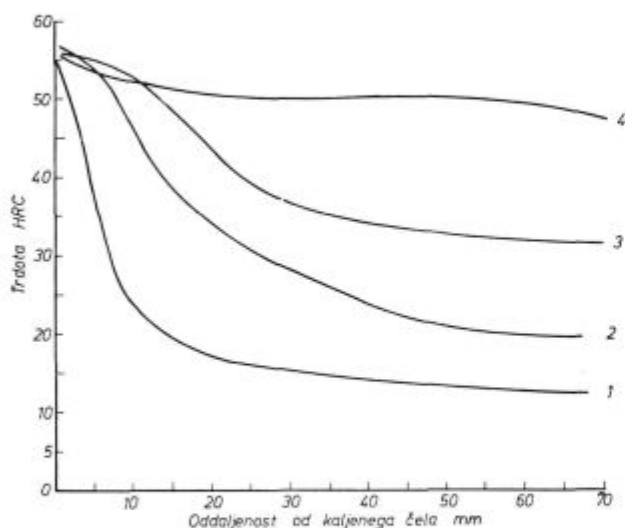
Slika 9 kaže vzorec formularja za neposredno vnašanje rezultatov jominyjevega poizkusa v diagram. Tak formular uporabljamo pri rednem delu v železarni Ravne.

Večkrat želimo rezultate poizkusa še iz vrednotiti na poseben način, tako da jih lahko med seboj primerjamo.

— Vrednotenje kaljivosti in primerjava rezultatov jominyjevega poizkusa

Kot karakteristično vrednost za vrednotenje in medsebojno primerjavo jominyjevih poizkusov podajamo največkrat razdaljo od kaljenega čela

Št.	Kvaliteta	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Normalizacija	Kaljenje
1	Č 1420	0,33	0,20	0,62	0,023	0,020	0,03	0,00	-	880*	850*
2	Č 48B	0,42	0,23	0,60	0,029	0,022	1,05	-	-	870*	840*
3	Č 4732	0,40	0,29	0,63	0,025	0,028	1,10	-	0,21	870*	840*
4	Č 5431	0,36	0,25	0,61	0,030	0,029	1,60	1,55	0,23	870*	840*



Slika 10
Primerjava Jominy krivulj različnih vrst jekel za poboljšanje

za neko določeno trdoto kot »indeks kaljivosti«. Na primer: $J 50 = 47$ mm pomeni, da imamo na jominyjevi probi pri oddaljenosti 47 mm od kaljenega čela trdoto 50 HRC. Največkrat vzamemo kot karakteristiko določene vrste jekla trdoto na tistem delu krivulje, kjer je padec trdote najhitrejši (tabela 1). Za to trdoto primerjamo pripadajoče oddaljenosti od kaljenega čela.

V nekaterih primerih močno prekaljivih jekel pa primerjava oddaljenosti za določeno trdoto ni primerna zaradi položaja jominyjevih krivulj. V takih primerih se odločimo za primerjave trdot pri izbrani karakteristični J.-oddaljenosti od kaljenega čela.

Rezultate jominyjevega poizkusa prikažemo s krivuljo, ki podaja odvisnost trdote od ohlajevalne hitrosti oziroma ustrezne oddaljenosti od kaljenega čela probe.

Že sam potek jominyjeve krivulje nam omogoča hitro in neposredno selekcijo jekel na osnovi kaljivosti. Na pogled lahko takoj ločimo jekla, ki kalijo plitko od onih, ki kalijo globoko (slika 10).

PRAKTIČNA UPORABA REZULTATOV JOMINYJEVEGA POIZKUSA KALJIVOSTI

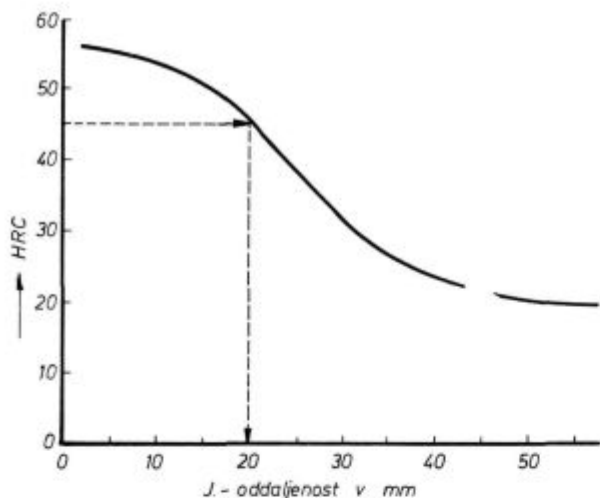
— Lamontova metoda določanja ohlajevalne intenzivnosti H z jominyjevim poizkusom

Grossmannov kriterij za oceno ohlajevalne intenzivnosti je osvojila velika večina raziskovalcev kaljivosti.

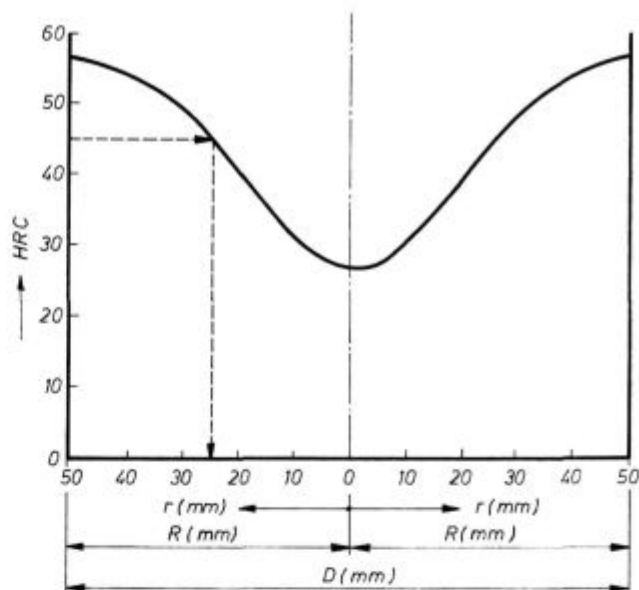
Lamont¹⁵ je razvil metodo za določanje karakteristične številčne vrednosti H za ohlajevalno intenzivnost na osnovi jominyjevega poizkusa in kaljenja okrogle palice iz istega jekla. Premer palice mora biti tolikšen, da ta pri pogojih, za katere določamo vrednost H, le delno kali po preseku.

Vzemimo, da je kaljivost nekega jekla prikazana z jominyjevo krivuljo na sliki 11. Palico določenega premera smo po kaljenju prelomili, prelom previdno zbrusili in merili trdoto po preseku. Potek trdot po preseku kaljene palice ϕ 100 mm iz istega jekla je prikazan za primer z U — krivuljo na sliki 12. Pogoji avstenitizacije morajo biti pri jominyjevem poizkusu in pri kaljenju palice enaki. Nato izberemo neko vrednost trdote, npr. 45 HRC, ki jo najdemo na jominyjevi in na U — krivulji. Na sliki 11 je ta trdota pri J. — oddaljenosti 20 mm od kaljenega čela in na sliki 12 pri oddaljenosti $r = 25$ mm od sredine kaljene palice s premerom $D = 100$ mm ($R = 50$ mm). Za izbrano trdoto 45 HRC določimo v tem primeru za kalilno globino razmerje $r : R = 0,5$.

Lamont¹⁵ je izdelal diagrame, ki kažejo zvezo med ohlajevalno intenzivnostjo H, jominyjevo oddaljenostjo od kaljenega čela in premerom okroglih palic za različna razmerja kalilne globine $r : R$. Ti diagrami so prikazani na slikah 13/1 do 13/11.



Slika 11
Jominyjeva krivulja nizkolegiranega jekla



Slika 12
U-krivulja trdot po preseku kaljene palice $\varnothing 100$ mm iz jekla, za katerega prikazuje slika 11 jominyjevo krivuljo

V navedenem primeru določimo ohlajevalno intenzivnost iz diagrama na sliki 13/6 za $r : R = 0,5$. Za $D = 100$ mm in $J = 20$ mm oddaljenost = 20 mm dobimo presečišče na krivulji ohlajevalne intenzivnosti $H = 1,4$.

Ko tako določimo H — vrednost ohlajevalne intenzivnosti za neko jeklo in določen način kaljenja, lahko to vrednost ohlajevalne intenzivnosti upoštevamo tudi za druga jekla in druge debeline, dokler obdržimo nespremenjene pogoje ohlajevanja.

Vzemimo, da smo za neko drugo jeklo kalili palico s premerom 60 mm in v sredini te palice izmerili enako trdoto kakor na jominyjevi probi pri oddaljenosti 23 mm od kaljenega čela. Iz slike 13/1 dobimo ohlajevalno intenzivnost $H = 0,35$. Če doseže jedro palice s premerom 120 mm enako trdoto kot jominyjeva proba pri oddaljenosti 34 mm od kaljenega čela, dobimo iz iste slike ohlajevalno intenzivnost $H = 2,0$.

Če doseže npr. palica s premerom 130 mm pri razmerju $r : R = 0,6$ (to je 26 mm pod površino pri $r = 39$ in $R = 65$) enako trdoto kot jominyjeva proba pri oddaljenosti 30 mm od kaljenega čela, dobimo iz slike 13/7 ohlajevalno intenzivnost $H = 0,7$.

Slika 13/11 se nanaša na površino kaljene palice. Tako ne daje jominyjev poizkus samo informacij o poteku trdot po preseku kaljenih palic, ampak tudi podatke o pričakovanih trdotah na površini kaljenih delov.

— Uporaba Lamontove metode in diagramov pri izbiri jekel za določene zahteve

Opisana Lamontova metoda z diagrami na slikah 13/1 do 13/11 nam nudi prav pomembno pomoč tudi pri praktični izbiri jekel za določene

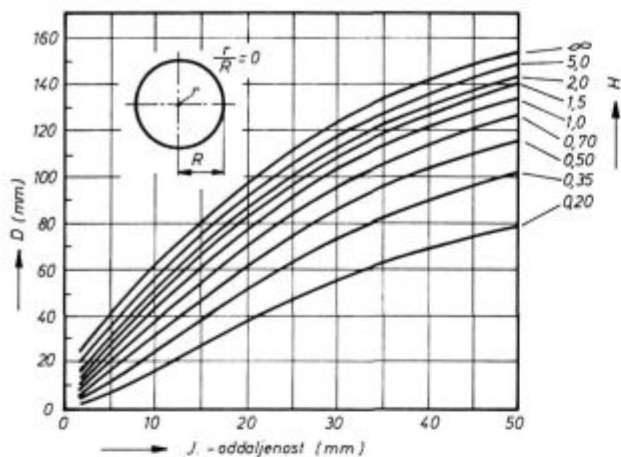
zahteve kaljivosti pri danih omejitvah pogojev (kalilno sredstvo in način kaljenja, dimenzije, kalilne karakteristike jekla). V principu je taka uporaba diagramov že opisana, vendar si kljub temu oglejmo še nekaj praktičnih primerov:

Vzemimo, da želimo vedeti, do katerega največjega premera bo jeklo določene vrste doseglo neko minimalno zahtevano trdoto po vsem preseku. Ohlajevalna intenzivnost je pri razpoložljivem postopku in pogojih kaljenja npr. $H = 0,35$. Ker gre za trdoto v sredini, uporabimo diagram na sliki 13/1 za $r : R = 0$. Za trdoto, ki jo zahtevamo, moramo poznati pripadajočo $J = 20$ mm oddaljenost. Vzemimo, da je ta oddaljenost za dano vrsto jekla 34 mm. Iz omenjenega diagrama na sliki 13/1 dobimo odgovor na postavljeno vprašanje: $D = 80$ mm.

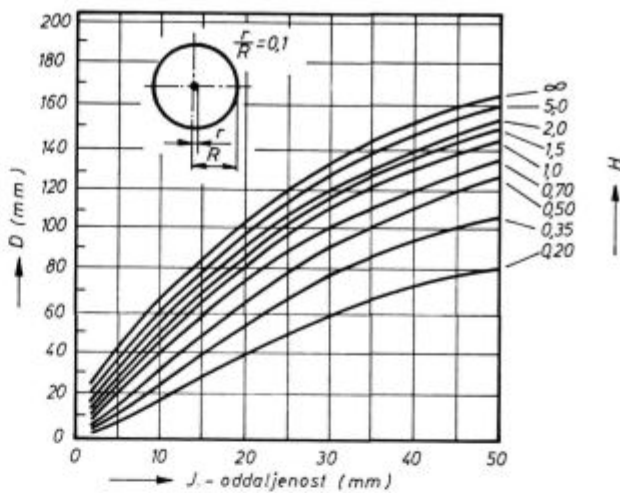
Jeklo, za katerega je prikazana jominyjeva krivulja na sliki 11 in U-krivulja na sliki 12, doseže trdoto 55 HRC na $J = 6$ mm oddaljenosti. To trdoto lahko pričakujemo v sredini preseka palice pri kaljenju s $H = 0,35$ le do $D_{\text{maks}} = 15$ mm. Lahko pa bi želeli doseči pri istem jeklu trdoto 55 HRC v sredini palice s premerom $D = 40$ mm. Isti diagram na sliki 13/1 nam pokaže, da je to mogoče, če dosežemo pri kaljenju ohlajevalno intenzivnost $H = 5$.

Poglejmo še en primer za isto vrsto jekla. Želimo določiti potrebno ohlajevalno intenzivnost, s katero bi pri palici $\varnothing 80$ mm dosegli trdoto 55 HRC do globine 8 mm pod površino. Znani podatki so $J_{35} = 6$ mm, $D = 80$ mm, $R = 40$ mm. Razmerje kalilne globine izračunamo:

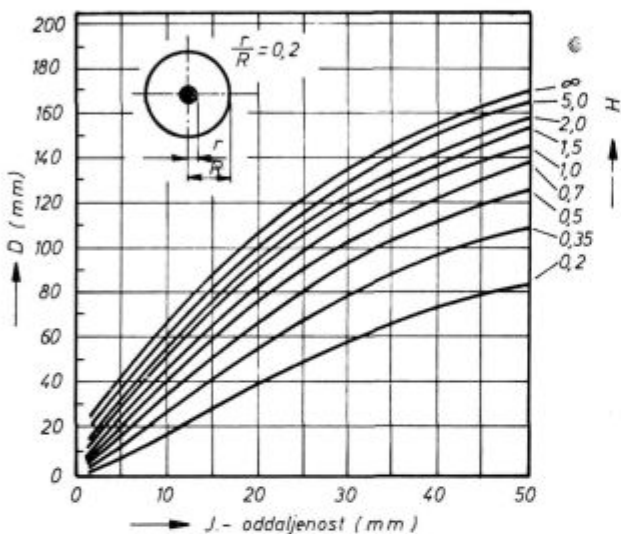
$$\frac{r}{R} = \frac{40 - 8}{40} = \frac{32}{40} = 0,8$$



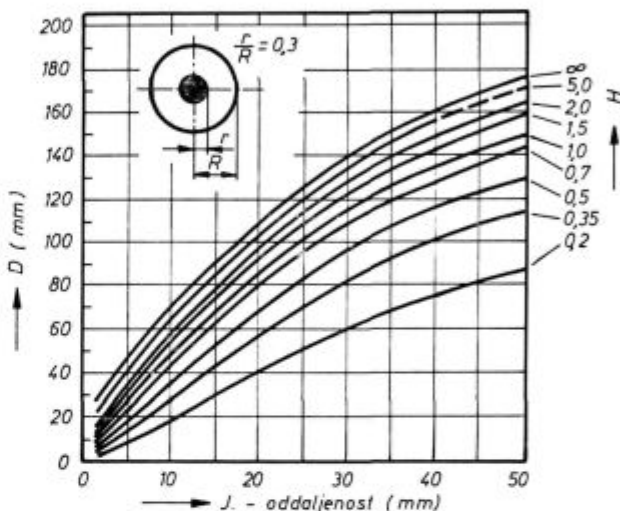
Slika 13/1



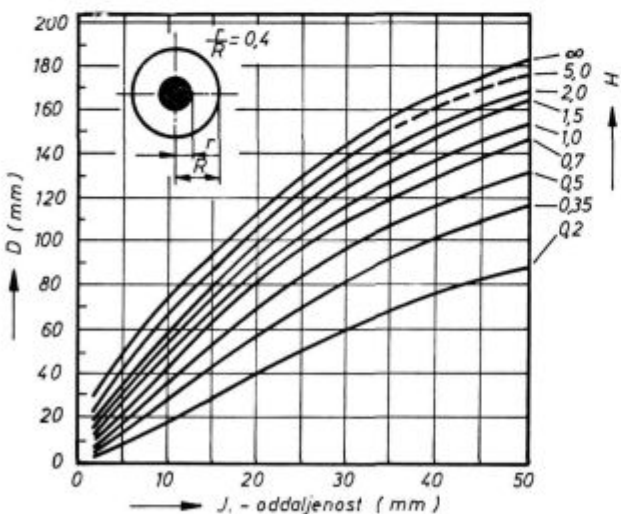
Slika 13/2



Slika 13/3

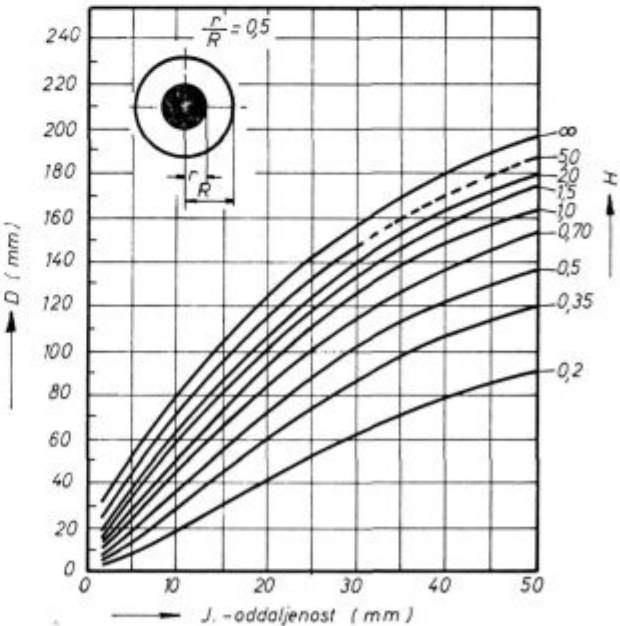


Slika 13/4



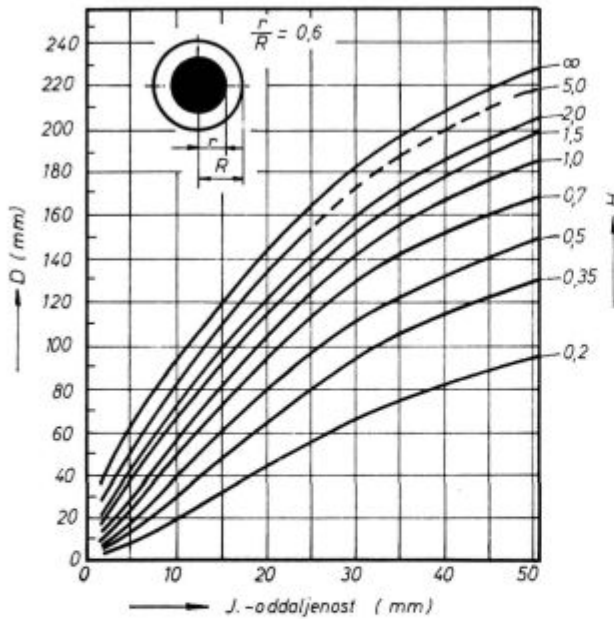
Slika 13/5

Slike 13/1 do 13/6



Slika 13/6

Zveza med ohlajevalno intenzivnostjo H , premerom okrogle palice D , J - oddaljenostjo in razmerjem kalilne globine $r : R$



Slika 13/7

Iz slike 13/9 določimo potrebno ohlajevalno intenzivnost $H = 3$, torej normalno kaljenje v vodi. Pri takem kaljenju bo palica $\varnothing 80$ mm dosegla v sredini trdoto, ki ustreza oddaljenosti od kaljenega čela $J = 17$ mm (glej sl. 13/1). Iz jominyjeve krivulje odčitamo pričakovano trdoto 48 HRC.

Pri tem moramo opozoriti, da niso samo ti podatki potrebni za odločitev o načinu kaljenja. Pokažejo nam le možnosti! Tej informaciji moramo dodati še izkušnje kalilca, ki nam povedo, če jeklo pri dani obliki in debelini prenese potrebno ohlajevalno intenzivnost pri kaljenju. Z jeklom za kaljenje v olju dosežemo iste trdote pri precej debelejših palicah, če ga kalimo v vodi. Tega pa si vedno ne moremo privoščiti zaradi nevarnosti pokanja in deformacij.

Po vseh opisanih primerih ni potrebno posebej omenjati, da s pomočjo Lamontovih diagramov iz podatkov jominyjeve krivulje lahko konstruiramo pričakovano U — krivuljo poteka trdot po preseku za kateri koli premer in katero koli ohlajevalno intenzivnost H.

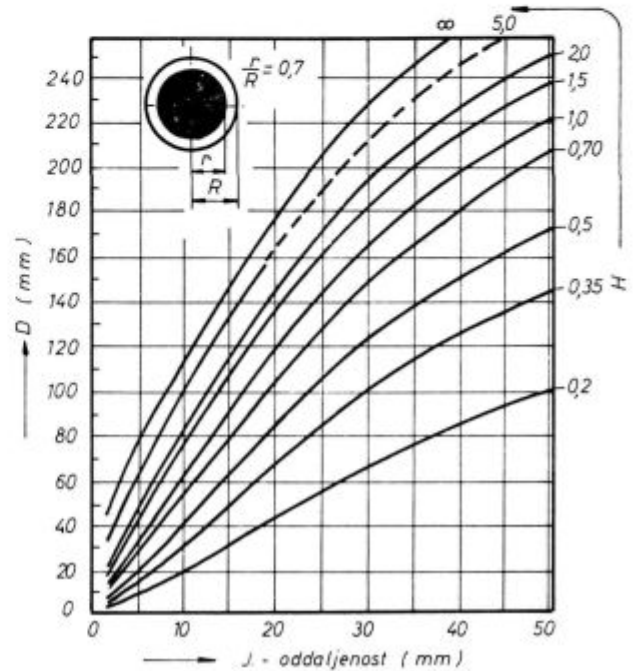
— Določanje poteka trdot po presekih kaljenih palic različnih dimenzij

Za določanje celotnega poteka trdot po preseku je Wyss²³ objavil nomograme, ki so za tako uporabo še primernejši od Lamontovih diagramov.

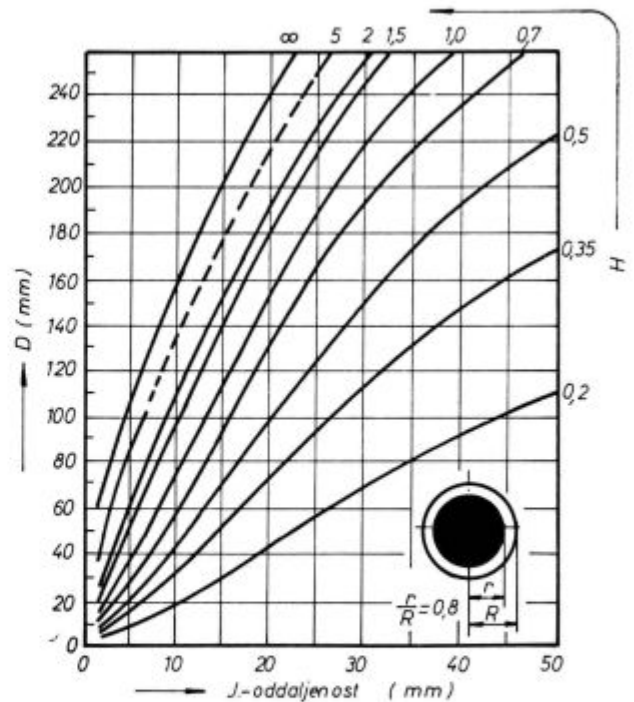
Oglejmi si osnove in razvoj takih nomogramov:

Trdota in mikrostruktura sta pri določeni vrsti jekla v odvisnosti od hitrosti ohlajevanja. Če se spomnimo, da nastopajo vzdolž jominyjeve krivulje kontinuirne spremembe ohlajevalne hitrosti, dobimo vzdolž probe tudi kontinuirne spremembe trdot v odvisnosti od nastalih mikrostruktur. Če hočemo ugotoviti potek trdot in spremembe mikrostruktur po preseku kaljene okrogle palice ali kakršnega koli drugačnega dela, moramo le po-

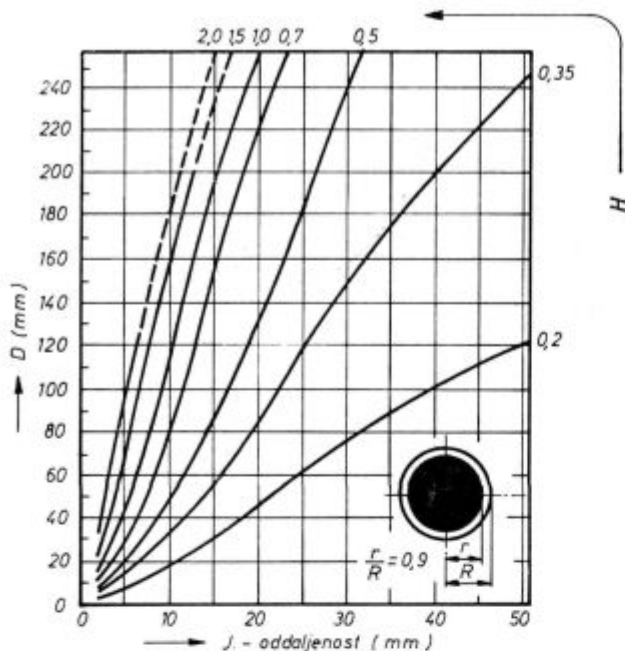
iskati medsebojno zvezo posameznih točk na preseku kaljenega kosa in oddaljenosti od kaljenega čela jominyjeve probe. Torej iščemo položaje na jominyjevi probi in na kaljenem kosu, ki imajo enake ohlajevalne hitrosti. Pri tem nastopajo težave, ker ohlajevalne hitrosti ne moremo preprosto določiti brez posebnega dogovora. Med ohlajevanjem namreč nastopajo premene, sproščanje toplote, zadrževanja padca temperature, rekalescenca in podobno.



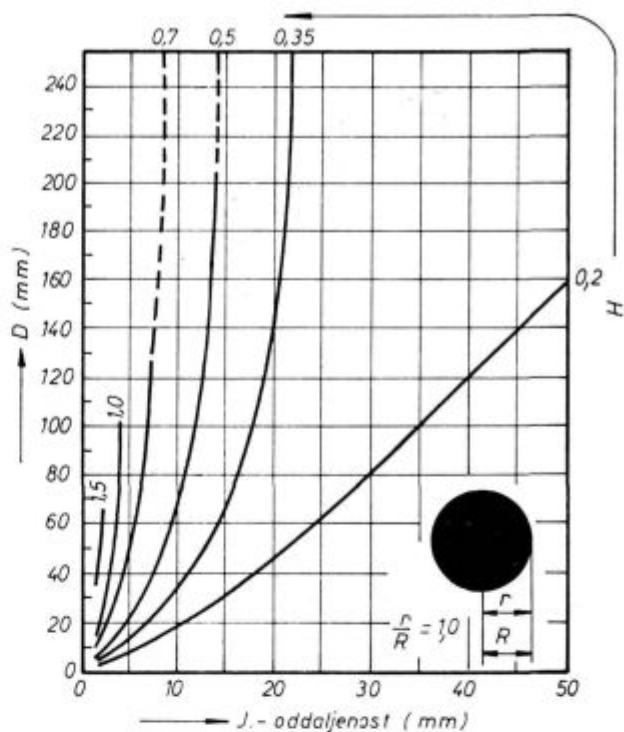
Slika 13/8



Slika 13/9



Slika 13/10



Slika 13/11

Slike 13/7 do 13/11

Zveza med ohlajevalno intenzivnostjo H , premerom okrogle palice D , J — oddaljenostjo in razmerjem kalilne globine $r : R$

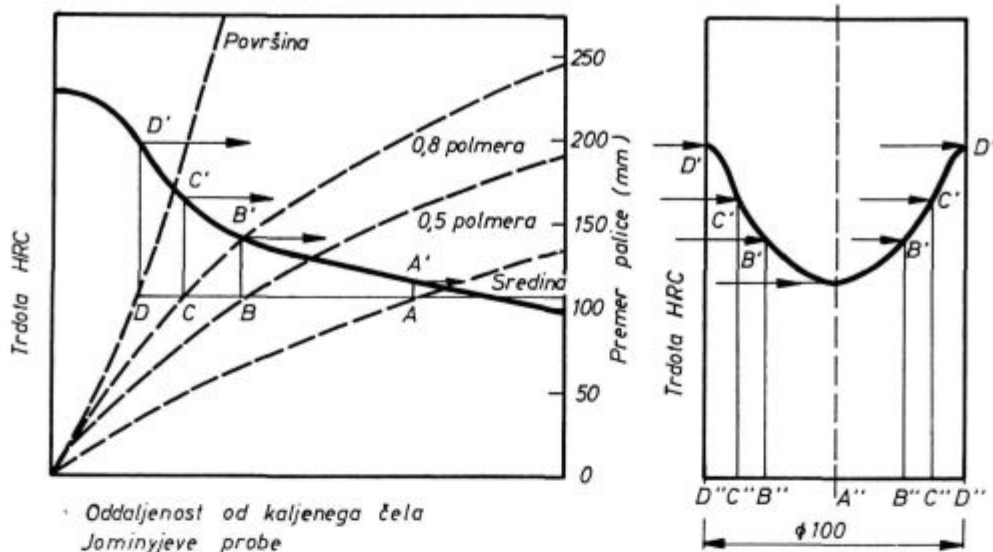
Kot merilo ohlajevalne hitrosti so največkrat upoštevali ohlajevalno hitrost kot tangento na krivuljo ohlajevanja (temperatura—čas) pri 700°C , ker v tem območju ni več premen.

Ker že poznamo Lamontove diagrame, nam bo lahko razumljivo, da s krivuljami za površino palice, različne deleže polmera in za sredino palice povežemo različne premere palic z ustreznimi oddaljenostmi od kaljenega čela jominyjeve probe na bazi enakih ohlajevalnih hitrosti. Lahko si pripravimo diagrame za neposredno prekrivanje jominyjevih krivulj (glej shemo na sliki 14). Diagram za prekrivanje mora imeti razdelitev na abscisi enako kakor jominyjev diagram, a velja za določene ohlajevalne pogoje (ohlajevalno sredstvo in način ohlajevanja), ki jih lahko označimo s faktorjem ohlajevalne intenzivnosti H . S takim diagramom lahko neposredno odčitavamo potek trdot po preseku in načrtamo U — krivuljo za določen premer in ohlajevalno intenzivnost. Na sliki 14 ustreza npr. ohlajevalna hitrost (s tem tudi trdota in mikrostruktura) na površini palice $\varnothing 100\text{ mm}$ ohlajevalni hitrosti jominyjeve probe na oddaljenosti D od kaljenega čela. Na tem mestu smo izmerili trdoto D' in jo zato lahko pričakujemo na površini palice $\varnothing 100\text{ mm}$. Na enak način določimo tudi trdoto v sredini preseka in na vmesnih položajih med površino in središčem preseka palice. Tako preprosto in hitro nastane U — krivulja trdot.

Nekako na podoben način je podana zveza med kaljenimi kosi, jominyjevimi probami in TTT — diagrami določene vrste jekla. TTT diagrami nam dajejo zelo dobre in pregledne informacije o obnašanju določene vrste jekla pri toplotni obdelavi. Te odvisnosti bomo obravnavali posebej, v nadaljnjem pa se omejimo le na jominyjev preizkus.

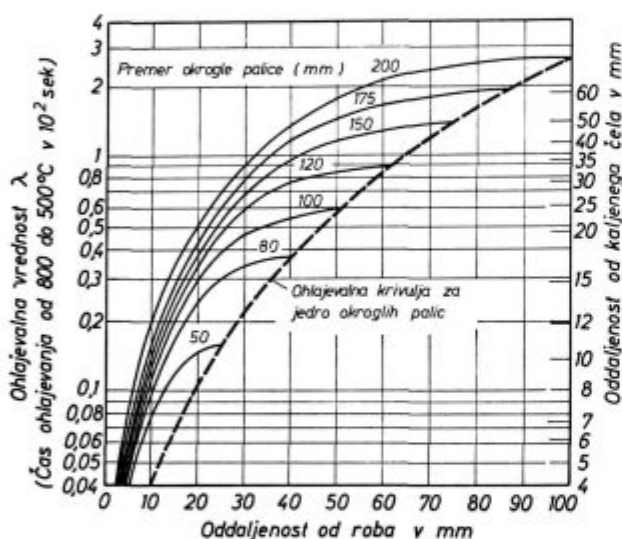
Z razvojem in širšo uporabo TTT diagramov pa je le prišlo do nekaterih sprememb v osnovi preračunavanja podatkov o kaljivosti:

Vemo že, da praktični ohlajevalni pogoji jekla sledijo precej zamotanim eksponencialnim funkcijam in zato podatki o ohlajevalni hitrosti veljajo samo v zelo ozkem temperaturnem območju. To za praktično toplotno obdelavo in predvsem za praktično neposredno uporabo informacij iz TTT diagramov ni bilo primerno. Nekateri avtorji²¹ so odsvetovali uporabo ohlajevalne hitrosti za označevanje ohlajevalnih pogojev. Menili so, da bi boljše služila vrednost, ki naj bi obsegala potek ohlajevanja za določeno širše temperaturno območje. Ta karakteristična vrednost ne bi smela biti odvisna od temperature avstenitizacije. Tako ohlajevalno vrednost so označili²¹ z λ in jo definirali kot čas ohlajanja od 800 do 500°C^{22} , izražen v sekundah. Vrednost je priporočljivo množiti z 10^{-2} , da dobimo uporabnejše številke.



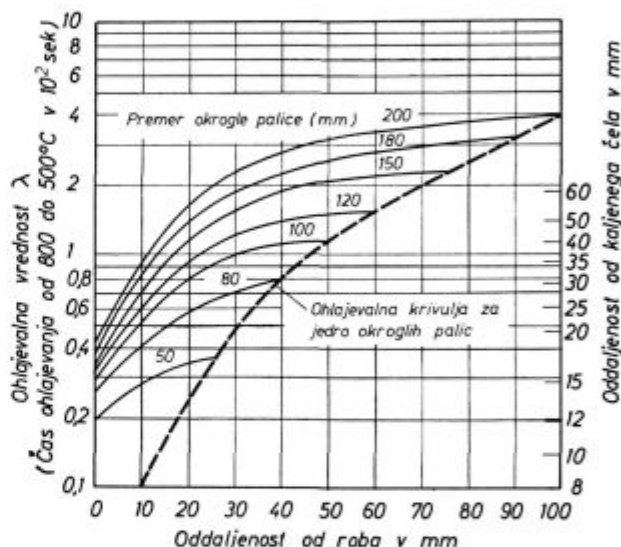
Slika 14

Diagram za prekrivanje Jominyjeve krivulje pri določanju pričakovanih trdot na površini in v notranjosti preseka kaljenih okroglih palic (shema)²¹



Slika 15

Spremembe ohlajevalnih vrednosti λ po preseku okroglih palic pri ohlajevanju v vodi²¹



Slika 16

Spremembe ohlajevalnih vrednosti λ po preseku okroglih palic pri ohlajevanju v olju²¹

V slikah 15 in 16 so zbrani in primerno izvednoteni podatki petnajstih glavnih literaturnih virov o praktičnih poizkusih z ohlajevanjem okroglih palic v vodi in v olju.

Ohlajevalna vrednost λ je podana na ordinati, na abscisi pa je merilo oddaljenosti od površine palice za krivulje, ki pripadajo navedenim premerom.

Določeni Jominyjevi oddaljenosti od kaljenega čela pripada seveda samo ena ohlajevalna vrednost λ in zato odčitamo to oddaljenost od kaljenega čela prav tako na ordinati kot enakovredno drugo merilo. Če so te ohlajevalne vrednosti podane še pri posameznih ohlajevalnih krivuljah

TTT diagramov, dobimo zvezo med strukturno sestavo in trdoto okroglih palic ter Jominyjevim poizkusom in TTT diagramom.

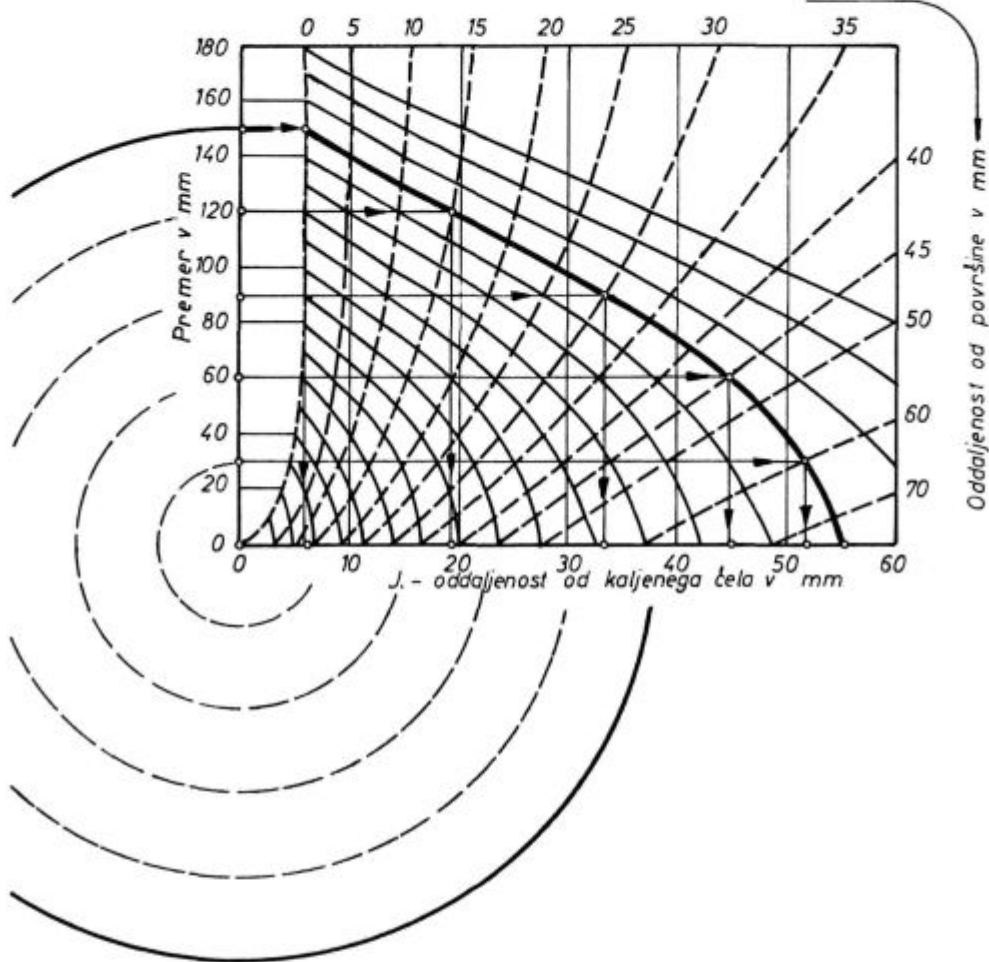
— Postopek uporabe nomogramov kaljivosti

V literaturi²³ so podani že omenjeni nomogrami kaljivosti za ohlajevalne intenzivnosti $H = 0,3; 0,4; 0,6; 1,0$ in $2,0$, kar obsega praktično celotno območje, ki pride v poštev od razmeroma milega kaljenja v olju do razmeroma intenzivnega kaljenja v vodi.

Slika 17 prikazuje tak nomogram kaljivosti za ohlajevalno intenzivnost $H = 1$. Na ordinati so podani premeri okroglih palic, na abscisi pa Jominyjeve oddaljenosti od kaljenega čela probe.

$$H=1$$

Mirno kaljenje v vodi
ali
izredno intenzivno kaljenje v olju
(s pretakanjem, oblivanjem ali brizganjem)



Slika 17

Zveza med potekom trdot na jominyjevi probi in potekom trdot po preseku okroglih palic v vodi¹²

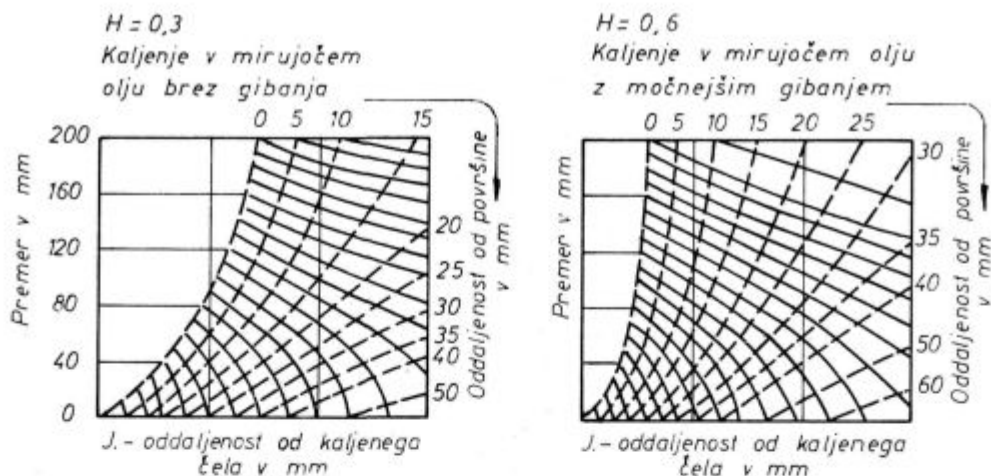
Vsaka izvlečena krivulja kaže zvezo med potekom trdote po preseku in pripadajočim potekom trdote vzdolž jominyjeve probe za določen premer palice. Premer palice, za katerega velja taka krivulja, izhaja iz izhodne točke na črtkani O — krivulji.

Na sliki 17 je za premer $\varnothing 150$ mm krivulja debeleje izvlečena, zveza med posameznimi točkami preseka in oddaljenostjo od kaljenega čela pa je podana s puščicami. Iz tega primera vidimo, da na površini palice s premerom 150 mm lahko pričakujemo tako trdoto, kakršno doseže jominyjeva proba iz istega jekla pri oddaljenosti približno 6 mm od kaljenega čela, če palico kalimo z ohlajevalno intenzivnostjo $H = 1$. Pri 15 mm pod površino dobimo praktično enako trdoto kakor pri oddaljenosti 19 mm od kaljenega čela jominyjeve probe itd. Enako postopek odčitavanja ponovimo

za druge premere. S koncentričnimi krogi so naznačene ustrezne plasti po preseku.

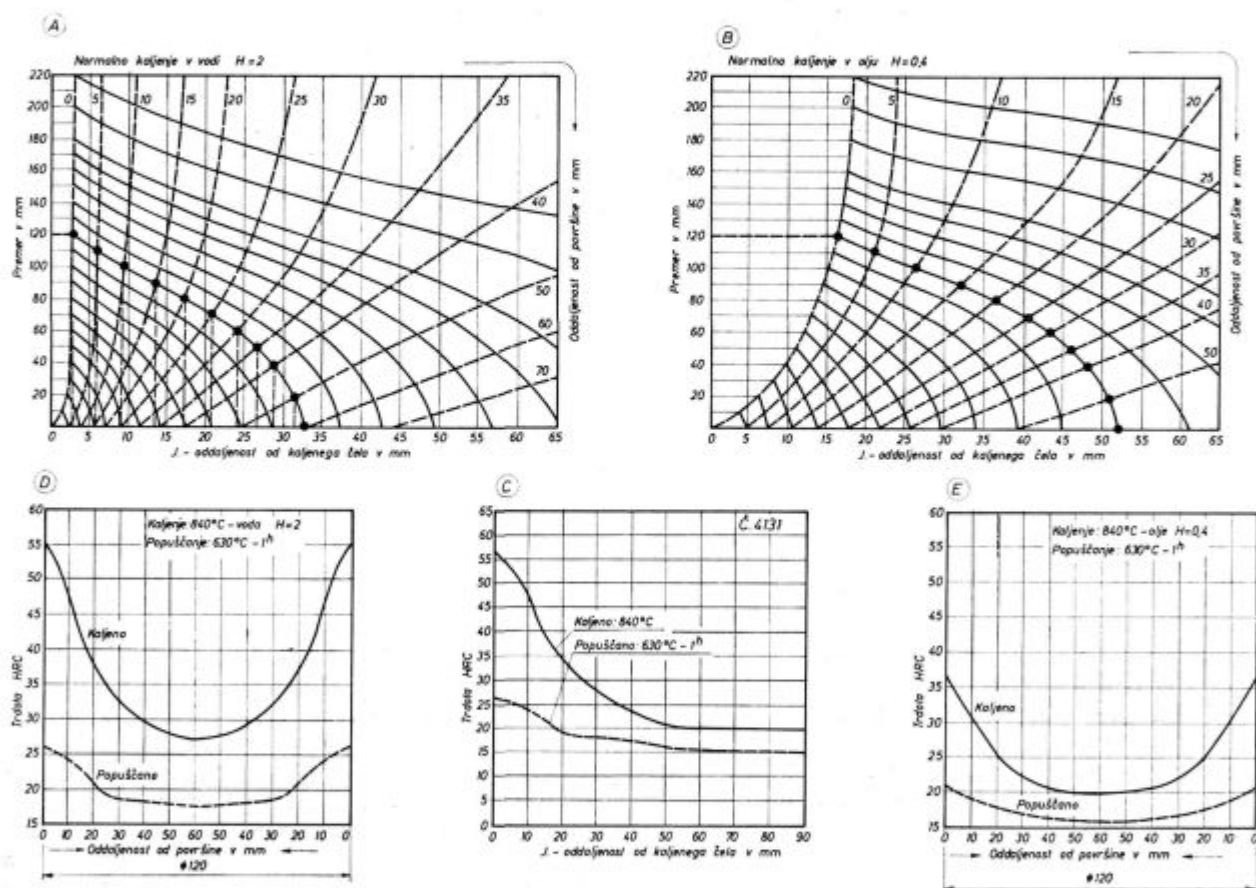
Na sliki 18 sta podana nomograma za $H = 0,3$ in $H = 0,6$. Prvi ustreza mirnemu kaljenju brez gibanja v olju, drugi pa intenzivnosti ohlajevanja v olju, ki je nekoliko večja od normalnega načina kaljenja v olju, torej kaljenju v olju z razmeroma močnim gibanjem ali celo oblivanjem.

Največ se uporabljata nomograma za $H = 0,4$ in za $H = 2$, ki sta prikazana na sliki 19. Ta slika skupno s tabelo preračunavanja za praktičen primer jekla Č.4131 $\varnothing 120$ mm nazorno prikazuje postopek uporabe teh nomogramov pri izdelavi U — krivulje za določen premer okrogle palice iz podatkov jominyjevega preizkusa. Ta postopek je velike praktične vrednosti in po izkušnjah v železarni Ravne nomogramsko določanje trdot po preseku dobro sovпада s praktičnimi meritvami.



Slika 18

Zveza med potekom trdot na jominyjevi probi in potekom trdot po preseku okroglih palic v olju²³



Slika 19 Določanje U-krivulje s pomočjo nomogramov²³ za Jominyjev preizkus. Premer za jeklo Č. 4131 — \varnothing 120 mm — kaljeno v vodi ali olju

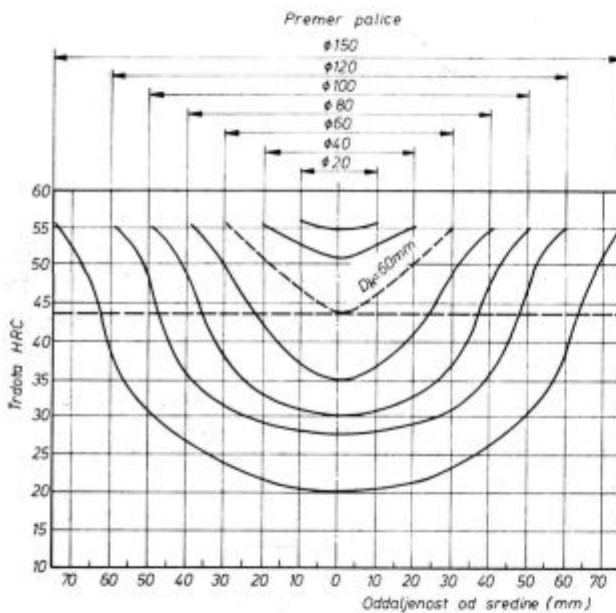
Na opisani način lahko iz enega jominyjevega poizkusa za določeno vrsto jekla in šaržo načrtamo U — krivulje trdot za celotno interesantno območje premerov.

Način prikazovanja U — krivulj je posebno priporočljiv, ker je dostopen vsakemu kalilcu. Če na osnovi velikega števila jominyjevih poizkusov

dobimo povprečno jominyjevo krivuljo za določeno vrsto jekla, dobimo lahko iz nje tudi povprečne (ali pa maksimalne in minimalne) U — krivulje te vrste jekla. Na slikah 20 in 21 sta podana primera povprečnih U — krivulj za jeklo Č.4131. Zelo nazorno je prikazana razlika med kaljenjem v vodi in v olju.

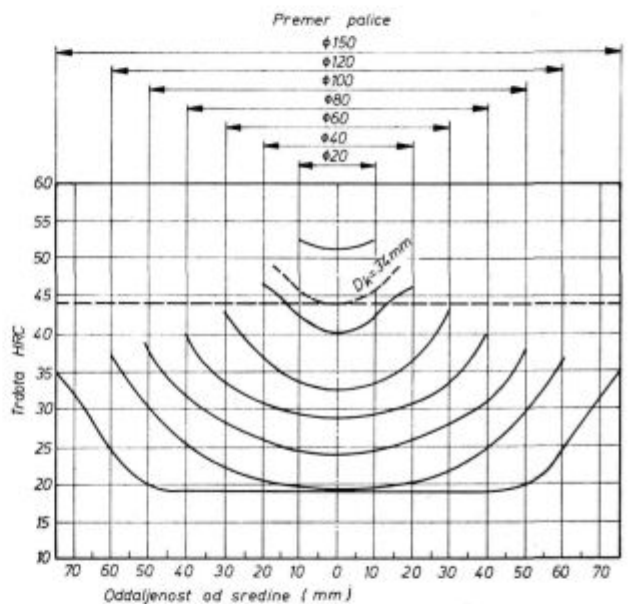
Tabela preračunavanja (za primer Č.4131 — \varnothing 120 mm)

Oddaljenost od površine v mm	Odgovarjajoča J-oddaljenost v mm za kaljenje		Pripadajoča trdota HRC za kaljenje \varnothing 120 mm v vodi H = 2			
	v vodi H = 2	v olju H = 0,4	v vodi H = 2		v olju H = 0,4	
			kaljeno	popuščano	kaljeno	popuščano
0	3	16	55	26	37	20,5
5	6,5	21	52,5	25	32,5	19
10	9,5	26,5	48	24	30	18,5
15	14	32	41	22,5	27	18
20	17	37	37	21	25	17,5
25	21	40,5	33,5	19	23	17
30	24	43,5	32	18,5	22	17
40	28,5	48	29	18,5	21	16,5
50	32	51	27,5	18	20	16
60	33	52,5	26,5	18	19,5	15,5



Slika 20

U-krivulje srednjih vrednosti trdot za jeklo Č. 4131 — kaljeno v vodi (H = 2)



Slika 21

U-krivulje srednjih vrednosti trdot za jeklo Č. 4131 — kaljeno v olju (H = 0,4)

Primer:

Valj \varnothing 100 mm doseže pri H = 0,35 v sredini trdoto 45 HRC. Enako trdoto doseže pri H = 0,35 v sredini kvadratna palica s stranico 92 mm, ploščata palica $68 \times 136 \text{ mm}$ ali platina debeline 63 mm (slika 27). Medsebojni odnosi se menjajo s spremembo ohlajevalne intenzivnosti.

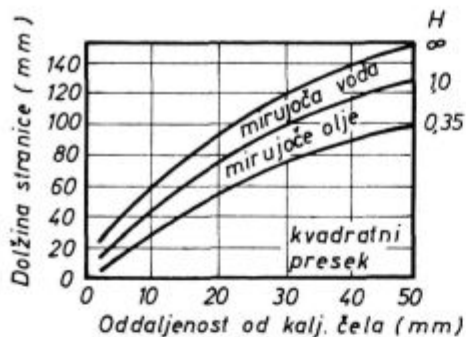
— Grossmann-Jominy metoda določanja kritičnega in idealnega kritičnega premera

Ta postopek ne potrebuje posebne razlage, zato ga prav na kratko opišimo.

Če upoštevamo Grossmannovo definicijo, da ima palica s kritičnim premerom v sredini preseka mikrostrukturo s 50 % martenzita, in ugotovitev,

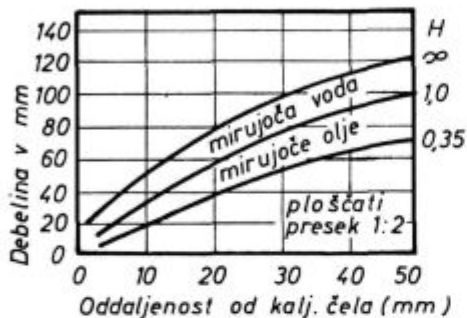
Iz opisanih nomogramov kaljivosti vidimo tudi, do katerih premerov lahko dovolj natančno na osnovi jominyjevega preizkusa določimo potek trdot po vsem preseku. Pri kaljenju v vodi dobimo te podatke nekako do premerov 150—200 mm, pri kaljenju v olju pa za premere do nekako 100—150 mm. Pri večjih presekih težko sklepamo o pričakovani kaljivosti na osnovi standardnega jominyjevega poizkusa. Za te primere so različni avtorji podali posebne predloge^{24, 25}.

Nomogrami kaljivosti so prikazani za okrogle palice. Pri drugačnih presekih si pomagamo s podatki na slikah 22—27.



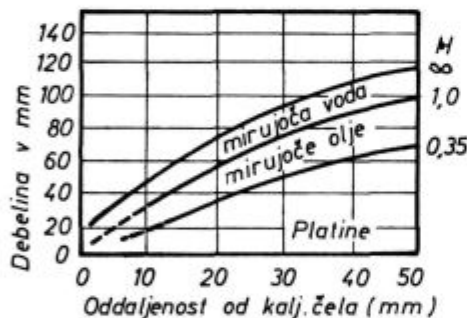
Slika 22

Položaj za Jominy probi, ki odgovarja sredini kvadratnega profila



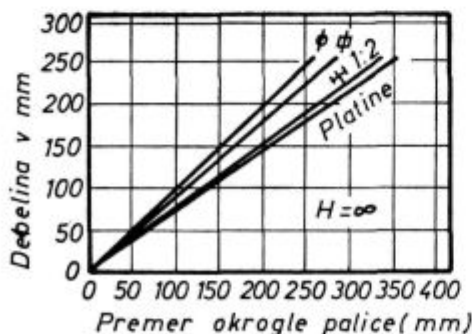
Slika 23

Položaj na Jominy probi, ki odgovarja sredini ploščatega preseka 1 : 2



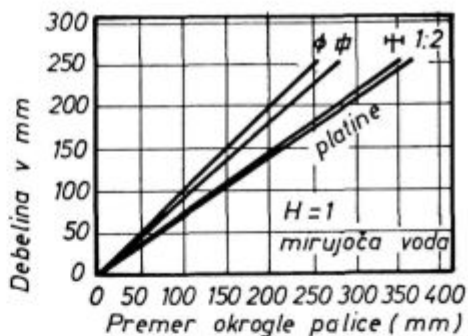
Slika 24

Položaj na Jominy probi, ki odgovarja sredini preseka platin



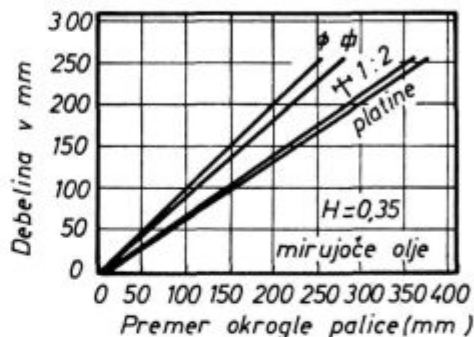
Slika 25

Odnos med različnimi profili pri idealnem ohlajevanju



Slika 26

Odnos med različnimi profili pri kaljenju v vodi



Slika 27

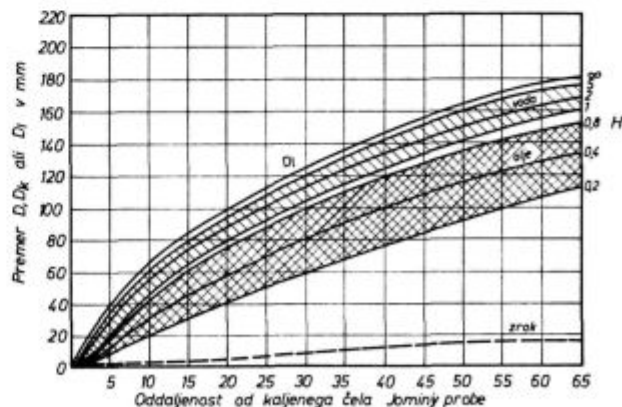
Odnos med različnimi profili pri kaljenju v olju

da je trdota odvisna v glavnem le od vsebnosti ogljika (Hodge-Orehoski), lahko iz slike 6 za določeno vrsto jekla ali šaržo odčitamo kritično trdoto. Za kritično trdoto odčitamo iz jominyjeve krivulje pripadajočo oddaljenost od kaljenega čela. Zato za J. — oddaljenost in merjeni, ocenjeni ali poznani faktor ohlajevalne intenzivnosti odčitamo iz diagrama na sliki 28 kritični premer D_K ali pa za $H = \infty$ idealni kritični premer D_i kot splošno karakteristiko kaljivosti preiskovanega jekla.

Poglejmo praktičen primer:

Podatki

Jeklo Č.4131 vsebuje 0,41 % C in jominyjeva krivulja je prikazana na sliki 19 c.



Slika 28

Medsebojna odvisnost Jominy probe in palic različnih premerov z odgovarjajočo trdoto v sredini preseka²⁹

Rezultati

- Kritična trdota je 43 HRC (slika 6).
- Pripadajoča J. — oddaljenost = 12 mm (slika 19 c).
- Kritičen premer za kaljenje:
V vodi s $H = 2$ znaša 60 mm (slika 28);
v olju s $H = 0,4$ znaša 35 mm (slika 28).
- Idealni kritični premer je 70 mm (slika 28).

JOMINYJEVE KRIVULJE V POPUŠCENEM STANJU

Studij vplivov popuščenja

Čelno kaljeno jominyjevo probo lahko po meritvi trdot v kaljenem stanju še popustimo. S tem vidimo, koliko se znižajo trdote na posameznih oddaljenostih od kaljenega čela pri popuščenju na določeno temperaturo. S tem dobimo torej podatke o poteku trdot pri določenem postopku poboljšanja.

Razumljivo je, da iz teh podatkov prav preprosto dobimo tudi U — krivulje trdot po preseku v poboljšanem stanju, kakor kaže slika 19.

Z večjim številom enako kaljenih jominyjevih prob, ki jih po kaljenju različno popustimo, lahko študiramo vpliv popuščenja v širokem območju popuščnih temperatur.

Pri plitko kaljivih jeklih — ta se v glavnem popuščajo le na nižje temperature in standardni jominyjev preizkus zanje sploh ni posebno interesanten — se s povečevanjem temperature popuščenja znižuje le trdota v začetnem delu jominyjeve krivulje.

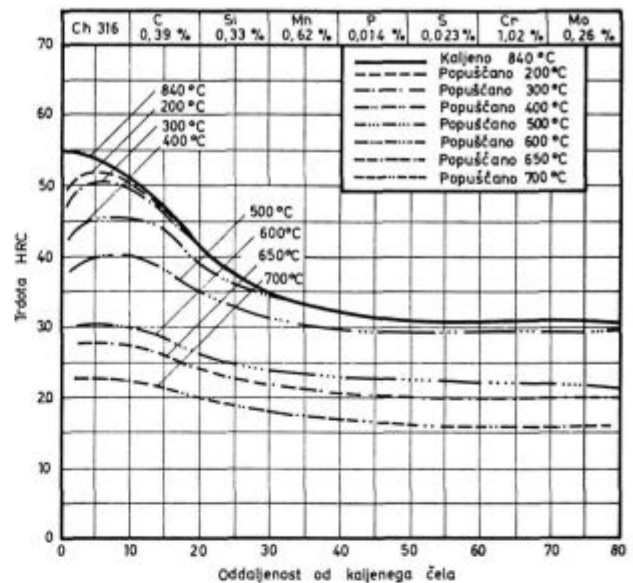
Pri srednje kaljivih jeklih vpliva popuščenje na nižje temperature le na znižanje začetnega dela jominyjeve krivulje. Pri temperaturah popuščenja nad 500°C pa se že zniža trdota po celotni dolžini jominyjeve probe. Prav to območje temperatur je interesantno pri legiranih jeklih za poboljšanje in zato je študij vplivov popuščenja zanje posebno zanimiv. Slika 29 kaže jominyjeve krivulje v popuščenem stanju za jeklo Č.4732.

Pri močno prekaljivih jeklih se kaže na jominyjevih krivuljah vpliv popuščenja enako po vsej dolžini probe. Tako dobimo vzporedne jominyjeve krivulje, kakršne kaže za jeklo Č.4751 slika 30. Na tej sliki vidimo efekt sekundarne trdote, ki je značilen za to legirano orodno jeklo za delo v vročem stanju. Trdota po popuščenju na 500 in 550°C je višja od trdote po kaljenju in to po vsej dolžini probe.

— Določitev premenske točke A_{c1} s popuščenjem jominyjevih prob

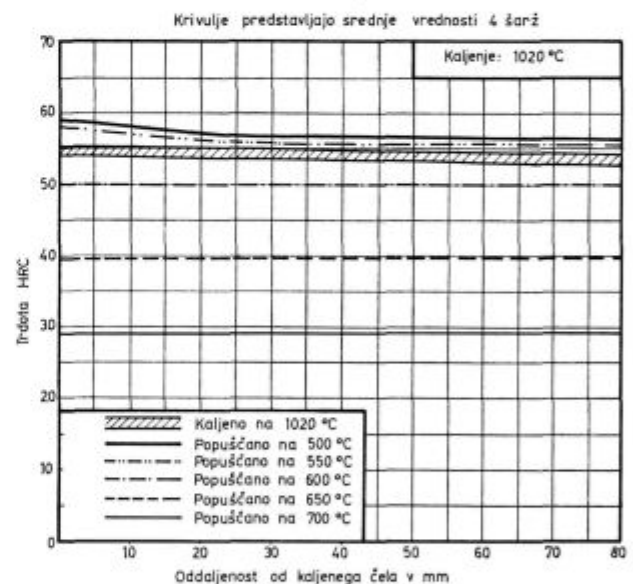
Če imamo na voljo dovolj kaljenih jominyjevih prob, lahko s postopnim zviševanjem temperature popuščenja dokaj natančno določimo lego premenske točke A_{c1} . Popuščna jominyjeva krivulja

Č.4732 - VCMo 140



Slika 29
Vpliv temperature popuščenja na Jominy probo

Č. 4751 - Utop Mo1



Slika 30
Vpliv temperature popuščenja na potek trdot Jominy prob kaljenih na 1020°C

se postopoma znižuje in pri temperaturi A_{c1} doseže minimalni nivo trdote ter postane vodoravna. Če prekoračimo temperaturo A_{c1} , pri popuščenju zopet nastopi delna avstenitizacija in po ohladitvi s popuščne temperature dobimo zopet nekoliko višjo trdoto.

Na tak način preprosto v kalilnici brez dilatometrije ugotovimo lego točke A_{c1} , s tem tudi najvišjo dovoljeno temperaturo popuščenja ter orientacijsko temperaturo žarjenja (pri podelkoidnih jeklih).

JOMINYJEVI PREIZKUSI PRI RAZLIČNIH TEMPERATURAH AVSTENITIZACIJE

S serijo jominyjevih preizkusov pri različnih temperaturah avstenitizacije lahko v kalilnici na preprost način brez posebnih pripomočkov tudi za nepoznano vrsto jekla določimo s precejšnjo zanesljivostjo najugodnejšo temperaturo kaljenja.

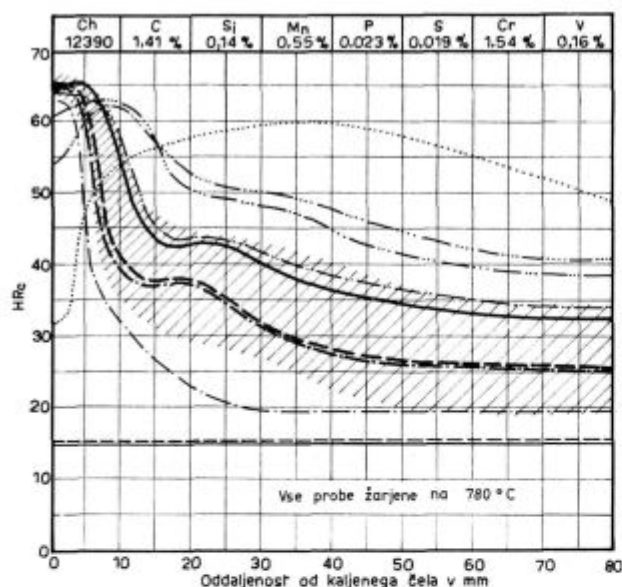
Prav tako lahko določimo orientacijsko temperaturo premenske točke A_{c1} . To je tista temperatura, ki pripada najvišji »horizontalni« jominyjevi krivulji, ki še ne kaže kalilnega efekta.

Pri nekaterih vrstah jekla zelo jasno ugotovimo začetek pojavov pregretja pri avstenitizaciji in pojav prekomerne količine zaostalega avstenita.

Slika 31 kaže zanimive vplive avstenitizacijske temperature za jeklo Č.4840 — Merilo special: vodoraven potek krivulj za 730 in 760°C kaže, da pri teh temperaturah ni bila dosežena avstenitizacija. Za isto šaržo smo na dilatometru določili temperaturo začetka premene A_{c1} 764°C.

Že pri 780°C je avstenitizacija močna, a še nepopolna. Dilatometriško določena temperatura konca premene je bila 776°C. To zopet potrjuje navedeno ugotovitev. Temperatura 780°C je sicer tik nad premeno v področju avstenita, a pri tako majhni temperaturni razliki bi bil za popoln potek premene potreben precej daljši čas. Temperature 810—890°C kažejo uporabno območje kalilnih

Č.4840 MERILO SP.



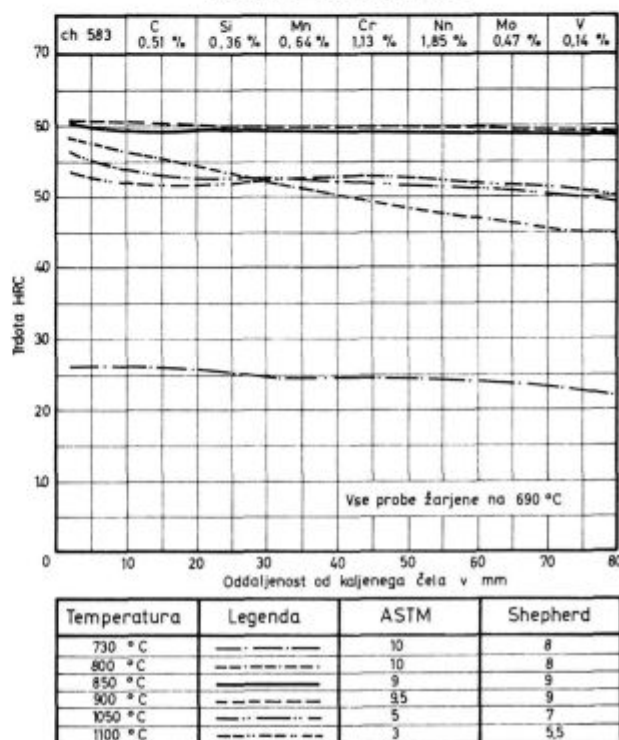
Temp. °C	Legenda	ASTM	Sheph.	Temp. °C	Legenda	ASTM	Sheph.
730	—	—	—	890	—	9	8
760	—	—	—	950	—	9	8
780	—	9	8	1000	—	—	—
810	—	9	8	1050	—	5	3
830	—	9	8		//////	pas gar. kaljivosti	
860	—	9	8				

Slika 31

Vpliv temperature avstenitizacije na kaljivost

temperatur. V tem intervalu moramo izbrati najboljšo temperaturo kaljenja z ozirom na potrebe kaljivosti, meroobstojnosti, trdote, obrabne obstojnosti rezilnosti ali podobne zahteve. Vse višje temperature kažejo jasne znake pregretja, znižanje trdote v začetnem delu in močno povečana prekaljivost. Poleg grobega zrna se pri najvišjih temperaturah pojavljajo tudi razpoke.

Č. 5742 - Utop extra 2



Slika 32

Vpliv temperature avstenitizacije na kaljivost

Zanimiv je tudi primer za močno prekaljivo jeklo Č.5742 — Utop ekstra 2 na sliki 32. Po tej informaciji bi brez dvoma izbrali pravilno temperaturo kaljenja med 850 in 900°C. Z dodatnimi poizkusi v nekoliko širšem območju bi določili skrajne meje območja kalilnih temperatur.

UPORABA JOMINYJEVEGA PREIZKUSA PRI DOLOČANJU OBROBNE KALJIVOSTI CEMENTIRANIH JEKEL

V zadnjih letih je zavzel jominyjev preizkus zelo pomembno mesto tudi na področju preizkušanja kaljivosti in doseganja trdote cementiranih jekel. Metoda obrobne kaljivosti potrebuje precej obširno razlago, ki na tem mestu ni mogoča. Podrobnejši opis tega preizkušanja podaja članek v Železarskem zborniku¹¹.

PASOVI GARANTIRANE KALJIVOSTI

— Pomen in potreba garantirane kaljivosti

Lastnosti jekel in med njimi prav gotovo tudi kaljivost so močno odvisne od tehnoloških pogojev izdelave jekla. Zato se jekla, ki imajo praktično enako kemijsko sestavo, lahko precej razlikujejo po svojih tehnoloških, mehanskih in fizikalnih lastnostih. Take razlike opazimo pri jeklih različnih proizvajalcev, lahko pa jih zasledimo celo v odvisnosti od agregatov, v katerih je jeklo izdelano, čeprav v okviru enega podjetja in v principu enake tehnologije.

Potrošnik mora često kupovati jeklo od raznih proizvajalcev in še to v deljenih pošiljkah. Tako dobi iste vrste jekel z različnimi lastnostmi posebno glede kaljivosti. Ekonomična množična proizvodnja mu ne dovoljuje spreminjanja pogojev toplotne obdelave za majhne količine. Posledica je neenakomernost produktov. Razumljivo je, da je potrošnik v tem položaju začel zahtevati od proizvajalca zajamčeno kaljivost v določenih mejah. Treba je bilo najti ustrezno metodo za kvantitativno določanje kaljivosti, nato problem statistično rešiti z analizo normalnih variacij v lastnostih jekel pod določenimi pogoji in in standardizirati vrste jekel.

S tem, da proizvajalec jamči potrošniku kaljivost svojih jekel v določenih mejah, je potrošnik nekako zavarovan pred prejemom slučajne pošiljke jekla, ki bi pri toplotni obdelavi zaradi prevelike kaljivosti pokalo in v enaki meri tudi pred slučajno pošiljko jekla s tako nizko kaljivostjo, da se jeklo ne bi normalno kalilo ali pa bi zahtevalo poseben postopek. Pri takih potrebah so se na zahtevo tržišča v Ameriki razvili pasovi kaljivosti, ki so določali minimalne in maksimalne jominyjeve krivulje trdot za standardna legirana jekla. Če je tak pas pravilno izdelan, nam meje pasu z določeno statistično gotovostjo jamčijo območje trosenja trdot. Pri tem je v uporabi jekel možno medsebojno nadomeščanje brez potreb po spremembi tehnološkega postopka toplotne obdelave.

Hkrati z jamstvom enakomernosti kalilnih lastnosti jekla imajo pasovi kaljivosti velik pomen tudi pri ekonomični izbiri jekla za posamezne namene. V legiranih konstrukcijskih jeklih številni legirni elementi vsak na svoj način in z različno jakostjo vplivajo na kaljivost in druge lastnosti jekla. V okviru predpisanih analiznih mej so možne številne kombinacije vsebnosti legirnih elementov, ki medsebojno slabijo ali pa, jačajo določene vplive. Preudaren uporabnik jekla bo kaj hitro ugotovil, da je kemijska sestava, čeprav v skoraj nedosegljivo ozkih mejah, prav slabo jamstvo za doseganje zahtevanih povprečnih lastnosti in njihove enakomernosti. Tak logičen preudarek vsekakor navaja uporabnika, da kot prevzemni kriterij proizvajalcu jekla postavlja garancijo tehnoloških ali mehanskih lastnosti v določenih

sporazumnih mejah, ki so za potrošnika potrebne, za proizvajalca pa dosegljive. Kemijsko sestavo predpisuje le še orientacijsko, v toliki meri, da določa vrsto jekla in stopnjo legiranosti. Če omejitve kemijske sestave sploh zahteva s predpisanimi mejami, pri tem dopušča večje tolerance, ker mu je važnejša garancija lastnosti jekla.

Vse te ugotovitve ne predstavljajo ničesar novega, saj temelje na več kot dvajsetletnih izkušnjah v Združenih državah Amerike. Znani razvoj pasov kaljivosti H jekel v Združenih državah Amerike je privedel do dveh možnosti pri izbiri kvalitetnih prevzemnih kriterijev za konstrukcijska jekla. Lahko jih naročamo z omejitvami kemijske sestave ali pa z omejitvami kaljivosti ob nekoliko širših tolerancah kemijske sestave. Naprednejši potrošniki jekel so se kaj hitro ogreli na osnovi logičnega preudarka za drugo varianto. Že leta 1951, ko so bili pasovi garantirane kaljivosti komaj poznani, so nekatere vodilne ameriške jeklarne že prodale okrog 15 % svojega paličastega jekla na osnovi zajamčene kaljivosti.⁴ Po podatkih znane Bethlehem Steel Company je že leta 1956 delež jekel, prodanih na osnovi garantirane kaljivosti porasel na 75 %. Najnovejši podatki niso poznani, saj je ta kriterij v Združenih državah Amerike že tako udomačen, da nihče več ne dela o tem posebnih analiz.

Upoštevalo vse dragocene izkušnje razvoja pasov garantirane kaljivosti v Ameriki je železarna Ravne že leta 1960 izdelala statistično metodo za določevanje pasov garantirane kaljivosti na osnovi 95 % statistične gotovosti.¹ Dobrih sedem let smo intenzivno zbirali podatke o kaljivosti vseh jekel našega proizvodnega programa z jominyjevimi preizkusi. Rezultate preizkušanja smo v etapah obdelovali z osvojeno metodo matematične statistike. Železarna Ravne je tako pričakala pripravljena zahteve svojega tržišča, na katerem se z naglim razvojem motorne in strojne industrije, predvsem pa z uvajanjem serijske in delno mehansirane toplotne obdelave, že pojavljajo potrebe po pasovih garantirane kaljivosti za konstrukcijska jekla. Od začetka leta 1968 razpolaga železarna Ravne s pasovi garantirane kaljivosti za večino jekel svojega proizvodnega programa. Ti pasovi so izdelani na osnovi praktičnih preizkusov velikega števila šarž.

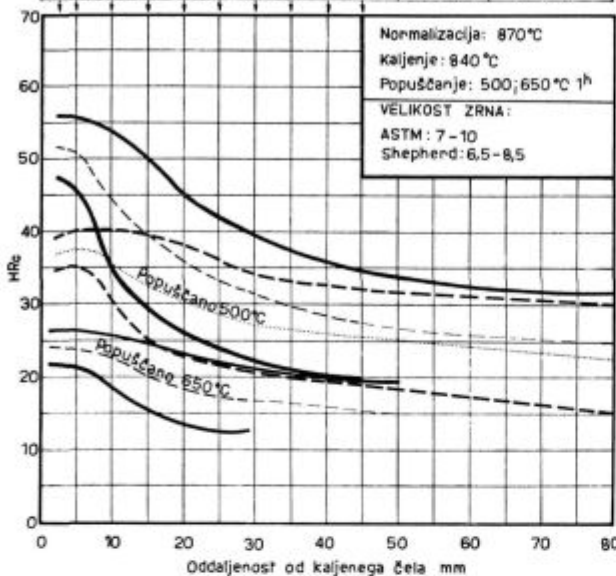
Slika 33 kaže primer pasu garantirane kaljivosti v kaljenem in popuščanem stanju za jeklo Č.4731-K.

— Uporaba pasov garantirane kaljivosti in specifikacija zahtev

Nekateri naročniki niso pravilno informirani o načinu uporabe jominyjevih pasov garantirane kaljivosti in kot prevzemni kriterij preprosto predpisujejo, da mora biti Jominy krivulja dobavljene šarže znotraj pasu. To so preveč splošne in neupravičene zahteve, saj na primer pri tanjših dimenzijah trdote, ki ustrezajo veliki oddaljenosti

Č 4731-K (VCMo 135-K)	C%	Mn%	Cr%	Mo%
	0,29 - 0,38	0,45 - 0,85	0,85 - 1,30	0,15 - 0,30

Premeri okroglih palic z enako trdoto	Položaj	Kaljivost
100	Površina	v vodi
10 26 54 70 86 100 112 124 135 142	Sredina	H=2
7 15 42 98	Površina	v olju
5 10 28 42 54 68 80 90 98 106	Sredina	H=0,4



Slika 33

Pas garantirane kaljivosti jekla Č. 4731 - K, VCMo 135 - K

od kaljenega čela, sploh ne pridejo v poštev. Zahteve morajo biti realne in vsklajene z dejanskimi potrebami. Zato je treba upoštevati območje naročenih dimenzij in z ozirom na to predpisati najprimernejše območje Jominy pasu kot kriterij za kvaliteten prevzem. Najbolje je, če se seznanimo z ameriškimi navodili^{5, 8} za uporabo pasov garantirane kaljivosti in za specifikacijo zahtev, ki so dovolj preizkušena, da jih lahko v nespremenjeni obliki prevzamemo tudi v naši praksi:

Pri uporabi pasov kaljivosti za posebne zahteve lahko izberemo določene točke na krivulji, kakor prikazuje slika 34. Celotna dolžina krivulje v zahtevah ni določena. Za vsak pas naj se v zahtevah trdote pri posameznih oddaljenostih od kaljenega čela navede v tabelah, ker odčitavanje iz diagrama ni dovolj točno. V tabelah se vrednosti trdot zaokrožijo na 0,5 HRC.

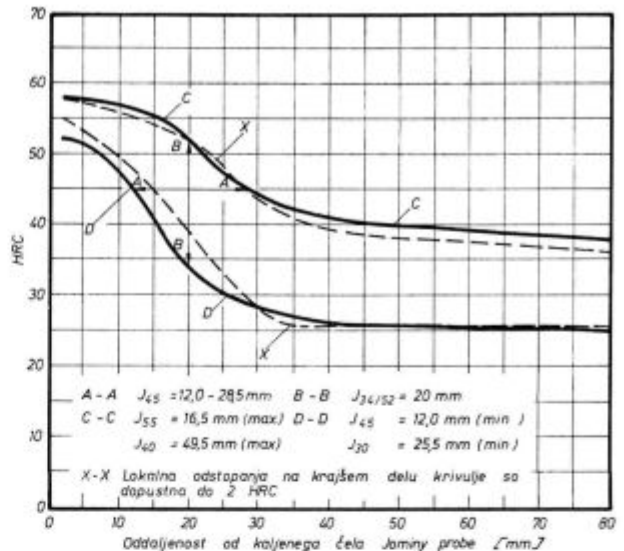
Pri določanju posebnih zahtev kaljivosti imamo sledeče osnovne načine^{5, 8}:

a) Predpišemo najmanjšo in največjo J. — oddaljenost za določeno trdoto. Ta primer kažeta točki A-A na sliki 34. V tem primeru se glasi pogoj:

$$J_{45} = 12,0 - 28,5 \text{ mm}$$

b) Predpišemo najnižjo in najvišjo trdoto pri določeni oddaljenosti od kaljenega čela Jominy probe. Ta primer kažeta točki B-B na sliki 34. Pogoj zapišemo:

$$J_{34/52} = 20 \text{ mm}$$



Slika 34

Načini za določanje posebnih zahtev kaljivosti

Oddaljenost od kaljenega čela izbere potrošnik na Jominy krivulji v skladu z območjem uporabnosti.

c) Predpišemo maksimalno trdoto na dveh oddaljenostih od kaljenega čela, kakor kažeta točki C-C na sliki 34.

d) Enako lahko predpišemo dvoje minimalnih trdot na poljubnih oddaljenostih od kaljenega čela, kakor kažeta točki D-D na sliki 34.

Seveda pri posebnih zahtevah lahko izberemo katerokoli točko na spodnji ali zgornji krivulji, ali pa tudi celoten pas, če je taka zahteva upravičena.

SAE in AISI priporočata v primerih, kjer se zahteva več kakor dve točki na pasu kaljivosti, toleranco 2 HRC na majhnem delu krivulje. To je potrebno, ker Jominy krivulje posameznih talin in tudi posameznih prob nekoliko odstopajo od mejnih normalnih pasov.

To odstopanje je le majhno v eni ali več točkah na celotni krivulji, kar prikazujeta črtkani krivulji v točkah x-x na sliki 34.

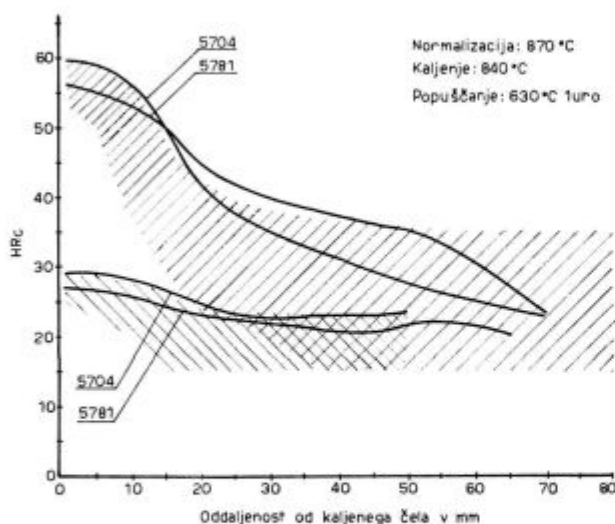
Pri dopuščanju odstopanja trdot od mejne krivulje je treba upoštevati tudi samo natančnost jominyjevega preizkusa in razne faktorje, ki znatno vplivajo na kaljivost, četudi včasih samo lokalno.

Samo izceje lahko povzročijo lokalno odstopanje 2—4 HRC.⁵

PREGLED PRIMEROV JOMINYJEVIH KRIVULJ ZA TALINE IZVEN ANALIZNIH MEJ JUS STANDARDOV

Nekaj naslednjih primerov nam bo služilo za ilustracijo vrednosti jominyjevega preizkusa v redni kontroli kvalitete ob uporabi pasov kaljivosti. Jominyjeve krivulje za taline izven analiznih mej JUS standardov nam bodo pokazale, kolikšna

Kvaliteta	C %	Mn %	Cr %		
Č 4131	0,38-0,44	0,50-0,80	0,90-1,20		(JUS)
Č 4131-K	0,37-0,45	0,45-0,85	0,85-1,25		(Predlog ŽR)



Šarža	C %	Mn %	Cr %	Odstopa
5704	0,54	0,69	1,03	C
5781	0,40	0,65	1,37	Cr

Slika 35

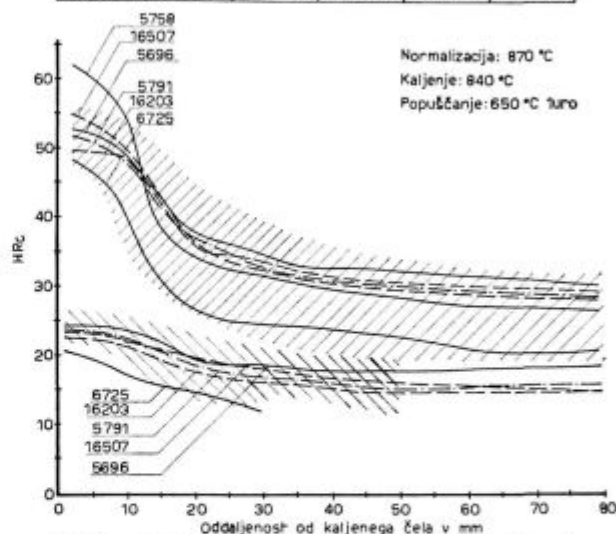
Jominy krivulje za taline izven analiznih mej

je občutljivost jominyjevega preizkusa za ugotavljanje kaljivosti nenormalnih šarž.

Slika 35 nam kaže za jeklo Č.4131 jominyjevi krivulji dveh šarž v primerjavi s pasom garantirane kaljivosti. Obe šarži sta odstopali od predpisanih analiznih mej. Talina 5704 kljub velikemu odstopanju vsebnosti ogljika razmeroma malo odstopa od zgornje meje pasu kaljivosti. Jominyjeva krivulja taline 5781 ima previsok krom, kar vpliva na povečanje prekaljivosti. V začetnem delu kaže jominyjeva krivulja normalno kaljivost, pri J. — oddaljenosti nad 13 mm pa so trdote previsoke. Pri kaljenju v vodi dobimo pri palicah do max. Ø 65 mm, pri kaljenju v olju pa do max. Ø 36 mm po vsem preseku popolnoma normalne lastnosti v pogledu kaljivosti (v skladu z nomogramom na sliki 19). Za manjše dimenzije torej lahko jamčimo normalno kaljivost kljub odstopanju v kemijski analizi.

Na sliki 36 je prikazana kaljivost šestih šarž jekla Č.4731, ki odstopajo od predpisane kemijske sestave pri enem ali pri več elementih. Med navedenimi šaržami so tri take, ki so imele analizo izven mej Č.4731, pač pa znotraj predlaganega razširjenega območja za jeklo z zajamčeno kaljivostjo Č.4731-K. Razen teh sta imeli dve talini C za 0,01 % izven analiznih mej, ena nad zgornjo, druga pa pod spodnjo mejo. Vse taline imajo jominyjeve krivulje v območju pasu kaljivosti za to jeklo. Položaj teh krivulj je popolnoma v skladu z razlikami v kemijski vsebnosti.

Kvaliteta	C %	Mn %	Cr %	Mo %	
Č 4731	0,30-0,37	0,50-0,80	0,90-1,20	0,15-0,25	(JUS)
Č 4731-K	0,29-0,38	0,45-0,85	0,85-1,30	0,15-0,30	(Predlog ŽR)



Šarža	C %	Mn %	Cr %	Mo %	Odstopa
5696	0,34	0,65	1,26	0,23	Cr
5791	0,34	0,66	1,26	0,25	Cr
16203	0,30	0,63	1,23	0,22	Cr
16507	0,38	0,64	1,06	0,38	C
6725	0,29	0,48	1,06	0,22	C, Mn
5758	0,63	0,97	0,15	0,15	zamenjava jekla

Slika 36

Jominy krivulje za taline izven analiznih mej

Na sliki 36 je prikazan primer, kako uporabimo jominyjev pas tudi za kontrolo eventualnih zamenjav jekla. Za talino 5758 kaže jominyjeva proba popolnoma drugačno krivuljo kaljivosti. S kontrolno kemijsko analizo je bila ugotovljena zamenjava jekla in logično potrjen potek jominyjeve krivulje.

Na sliki 37 so prikazane jominyjeve krivulje štirih šarž jekla Č.4732 z analiznimi odstopanji v primerjavi s predpisanim pasom garantirane kaljivosti.

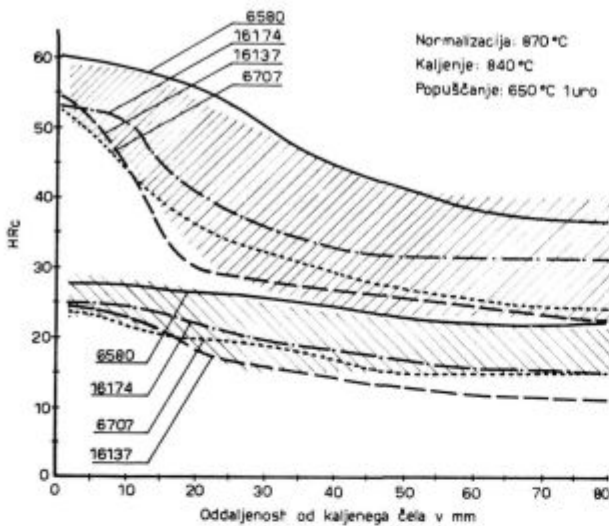
Kako se kaže odstopanje ogljika?

Talina 6580 je zaradi previsokega ogljika, previsokega molibdena in visoke vsebnosti kroma popolnoma izven pasu kaljivosti. Pod spodnjo mejo pasu pade talina 16137, ker so bile vsebnosti vseh glavnih elementov blizu spodnje analize meje, C pa prenizek. Preostali dve talini imata prenizek ogljik in zato nižjo začetno trdoto, zaradi visokega kroma in molibdena pa dobro prekalita in sta pri večjih oddaljenostih v območju pasu. Primerjava teh dveh talin z zelo podobnima analizama potrjuje ugotovljeno dejstvo, da ne moremo iz same kemijske sestave predvidevati točnega položaja Jominy krivulje.

Slika 38 prikazuje vpliv odstopanja vsebnosti kroma in molibdena od analiznih mej pri jeklu Č.4732. Položaj jominyjeve krivulje je močno odvisen od medsebojnega odnosa vsebnosti kroma in molibdena in hkrati tudi od ogljika in mangana.

Mnoge šarže z manjšimi odstopanji ogljika in kroma so pokazale jominy krivulje popolnoma

Kvaliteta	C %	Mn %	Cr %	Mo %	
Č 4732	0,38-0,45	0,50-0,80	0,90-1,20	0,15-0,25	(JUS)
Č 4732-K	0,37-0,45	0,45-0,85	0,85-1,30	0,15-0,25	(Predlog ŽR)

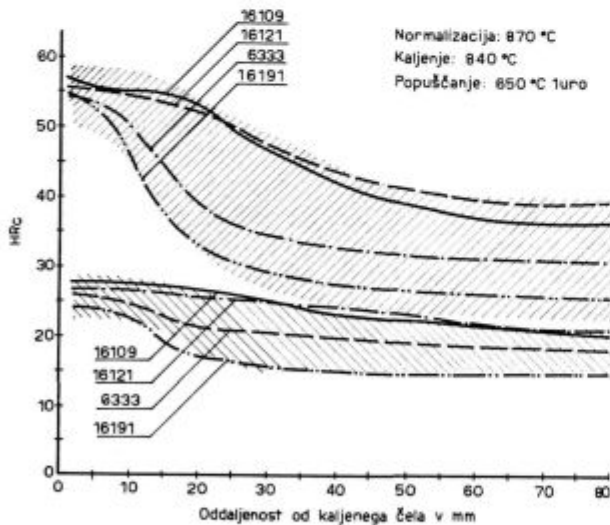


Šarža	C %	Mn %	Cr %	Mo %	Odstopa
6580	0,47	0,67	1,13	0,26	C in Mo
16174	0,37	0,61	1,20	0,23	C
6707	0,37	0,61	1,23	0,23	C
16137	0,37	0,53	0,95	0,19	C

Slika 37

Jominy krivulje za taline izven analiznih mej

Kvaliteta	C %	Mn %	Cr %	Mo %	
Č 4732	0,38-0,45	0,50-0,80	0,90-1,20	0,15-0,25	(JUS)
Č 4732-K	0,37-0,45	0,45-0,85	0,85-1,30	0,15-0,25	(Predlog ŽR)



Šarža	C %	Mn %	Cr %	Mo %	Odstopa
16109	0,42	0,70	1,35	0,16	Cr
16121	0,40	0,65	1,28	0,24	Cr
6333	0,41	0,61	1,02	0,28	Mo
16191	0,39	0,63	0,88	0,20	Cr

Slika 38

Jominy krivulje za taline izven analiznih mej

znotraj pasu, če sta bili vsebnosti kroma in molibdena primerno kompenzirani in nista bili hkrati na zgornji ali spodnji meji. Seveda ima velik vpliv pri teh mejnih vsebnostih tudi odstotek ogljika.

Mnogi avtorji pripisujejo velik vpliv velikosti avstenitnega zrna. Pri obsežnih raziskavah kaljivosti v toku tekoče kontrole nismo ugotovili trdnih zakonitosti o vplivu velikosti zrna na kaljivost jekla. Morda je to posledica premajhnih razlik velikosti zrna v toku statistične analize in obdelave podatkov.

Zaključki

Pri jugoslovanskih podjetjih — potrošnikih jekla lahko trdimo, da še vedno velja kemijska analiza za eno najbolj odločilnih meril pri kvalitetnem prevzemu jekla. Številni praktični primeri so pokazali, da zaradi analiznih odstopanj, četudi le posameznih elementov, izvržemo mnogo dobrega jekla, medtem ko z velikim, a zelo neupravičenim zaupanjem uporabljamo jekla, ki ustrezajo predpisanim analiznim mejam, četudi imajo slabo kaljivost in morda slabe lastnosti. V naprednem svetu se inštituti in druge raziskovalne ustanove intenzivno ukvarjajo s problemi na obširnem področju kaljivosti. Zadnji čas je, da tudi pri nas dosežemo na tem področju pomembnejši napredek. Železarna Ravne je opravila precej na tem področju. Vidimo, da razpolaga z velikim številom dokaj zanesljivih pasov garantirane kaljivosti, ker so ti izdelani s statistično obdelavo velikega, včasih ogromnega števila šarž. Pred nami stoji sedaj velika naloga, da začnemo te pasove tudi koristno in razumno uporabljati. Dosedanje izkušnje so nedvomno pokazale, da je potrebno čim bolj uvažati jominyjev preizkus kaljivosti in da so koristi, ki jih prinaša standardizacija pasov kaljivosti in predvsem njihova uporaba s tehničnega in ekonomskega stališča zelo pomembne.

Pas garantirane kaljivosti ne sme biti le kriterij za kontrolo in kvalitetni prevzem, ampak mora biti vodilo že pri izbiri jekla. Samo preizkušnje kaljivosti lahko služi enako konstrukterju, kakor kalilu ali kontrolorju, če ne omenjamo posebej raziskovalno razvojnega področja. Koristna uporaba podatkov o kaljivosti pa zahteva dobršno mero znanja in razumevanja pojavov.

Glavni namen referata je bil čim širše populariziranje jominyjevega preizkusa in praktičnega pomena pasov garantirane kaljivosti. Zato smo se pri obravnavanju kaljivosti tokrat omejili le na jominyjev preizkus in skušali podati vse pripomočke in navodila za praktično uporabo rezultatov preizkusa.

S tem nismo nameravali zmanjšati pomembnosti vseh drugih preiskav kaljivosti, ki jih bomo morali še posebej obravnavati.

Posebno pozornost bomo morali posvetiti razvoju in praktični uporabi TTT diagramov v povezavi s preizkusi kaljivosti in s prakse toplotne obdelave.

Literatura

1. Rodič J.: Izdelava in uporaba pasov kaljivosti, Nova proizvodnja (Ljubljana) 13 (1962) 2, str. 141—154.
2. Grossmann M. A., A. Asimow, S. F. Urban: Hardenability its Relation to Quenching and Some Quantitative Data, Hardenability of Alloy Steels, Am. Soc., Metals, Cleveland 1939, str. 121.
3. Houdremont E.: Handbuch der Sonderstahlkunde, Springer-Verlag — Berlin 1956.
4. Stuhlman: Eindrücke und Beobachtungen in amerikanischen Härtereien, Härtereitechnische Mitteilungen, Bd 7 (1951) H. 1, str. 23.
5. ASTM A 304-66: Standard specification for alloy steel bars to end-quench hardenability requirements, ASTM Standards, Part 3 ASTM, Philadelphia.
6. Wever F., A. Rose: Mitt. K. — Wilh. Inst. Eisenforsch., Bd 20 (1938), str. 55—60.
7. Grossmann M. A., E. C. Bain: Principles of Heat Treatment, ASM 5 izd., OHIO, 1964.
8. Metals Handbook 8th. Edition 1961 Vol. 1, str. 189—216, ASM, Metals Park, Ohio.
9. a) Hodge J. M., M. A. Orchoski: AIME Techn. Publ. No 1800 Met. Techn. 12 (1945).
9. b) Burns J. L., T. L. Moore, R. S. Anher: Quantitative Hardenability, Trans. Am. Soc. Met. 26 (1938) 1, str. 1—36.
10. Krainer H., M. Kroneis: Untersuchungen über die Austenitumwandlung legierter Baustähle bei Unterkühlung, Archiv für das Eisenhüttenwesen 22 (1951) H. 7/8, str. 231—244.
11. Rodič A.: Obrobna kaljivost cementacijskih jekel, Zvezarski zbornik 1967 1, str. 64—79, Kranj.
12. Peter W., A. Rose: Einfluss der Versuchsbedingungen bei der Stirnabschreckprüfung von Stählen, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 22 (1951) H. 9 10, str. 303—312.
13. Gerber W., U. Wyss: Die Härbarkeit und Vergütbarkeit der Stähle, Roil. Mitt. Bd 7 1948, str. 13—49.
14. Schottky H.: Die Abschreckhärbarkeit von Stählen und ihre Prüfung, Stahl und Eisen 70 (1950) H. 21, str. 909—925.
15. Crafts W., J. L. Lamont: Härbarkeit und Auswahl von Stählen, Springer — Verl. 1954.
16. Arend — Neuhaus: Die Härbarkeit des Stahles, Verl. Girardet — Essen 1955.
17. Ispitivanje prokaljivosti čelika po Jominy-u — JUS C. A 2. 051 — 1959.
18. VDEh, Stirnabschreckversuch zur Prüfung der Härbarkeit von Stählen, Stahleisenprüfblatt 1650—61.
19. ASTM — A 255-48 T: Method of end-quench test for hardenability of steel, ASTM, Philadelphia Pa.
20. Asimow M., W. F. Craig, M. A. Grossmann: Correlation between Jominy Test and Quenched Round Bars, S. A. E. J. Bd. 49 (1941), str. 283—292.
21. Peter W., H. Hassdenteufel, Aussagefähigkeit der stirnabschreckprüfung und des Zeit — Temperatur — Umwandlung — schaubildes für das Ergebnis der Härtung von Rundstäben, Stahl und Eisen 87 (1967) Nr. 8. 20 apr., str. 455—457.
22. Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Max — Planck — Institut für Eisenforschung und VDEh, Düsseldorf 1954 58.
23. Wyss U.: Auswertungsmöglichkeiten der Härbarkeitsprüfung nach Stirnabschreckmethode, Härtereitechnische Mitt. — Riebensahm, Bd. 6, H. 2, str. 9—40.
24. a) Post C. B., M. C. Fetzer, W. H. Fenstermacher: Trans. A. S. M. 35 (1945), str. 85.
24. b) Post jr. W.: Trans. A. S. M. 43 (1951), str. 454—479.
24. c) Vries G.: Trans. A. S. M. 41 (1949), str. 678—699.
25. Rose A., L. Rademacher: Weiterentwicklung des Stirnabschreckversuches zur Prüfung der Härbarkeit von tiefer einhärtenden Stählen; Stahl und Eisen 76 (1956) Nr. 23, str. 1570—1573.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Jominy Methode für die Untersuchung der Härbarkeit hat sich für mittelhärzbaren Stähle auf der ganzen Welt durchgesetzt. Sie wird auch in den jugoslawischen Betrieben meistens gebraucht. Es werden leider die Informationen, welche diese Methode darbietet, zuwenig ausgenutzt. Die Methode mit ihrer Reproduzierbarkeit und einfacher Ausführung ist ein ausgezeichnetes Mittel für die Qualitätskontrolle der Stähle. Sie kann uns aber auch bei der Auswahl der Stähle für bestimmte Zwecke behilflich sein, oder sie erleichtert uns die Bewertung der Wärmebehandlungsbedingungen.

Mit diesem Artikel möchten wir der Verbreitung dieser Methode beihelfen und dessen Möglichkeiten zeigen. In diesem Sinne sind die dringendsten theoretischen Grundlagen angegeben eine kurze Beschreibung der Methode und der genormten Untersuchungsbedingungen und die vielseitigen Möglichkeiten der praktischen Anwendung dieser

Ergebnisse. An zahlreichen Beispielen sind die verschiedenen Möglichkeiten der praktischen Verwertung der Untersuchungsergebnisse mit Hilfe der Nomogramme welche indirekte Informationen ermöglichen, gezeigt. Diese Nomogramme sind für den praktischen Gebrauch beigelegt.

Eine besondere Bedeutung haben die Zonen der garantierten Härbarkeit Hüttenwerk Ravne verfügt zur Zeit über die Zonen der garantierten Härbarkeit für die Mehrzahl ihrer Stähle. Diese Zonen sind mit der statistischen Bearbeitung der Versuchsergebnisse einer grossen Schmelzzahl auf Grund der 95 % statistischen Sicherheit ausgefertigt. Die Spezifikationen der Forderungen über die garantierte Härbarkeit sind meistens nicht richtig gestellt, deshalb sind in diesem Artikel auch die genormten Toleranzen der Härbarkeit nach SAE und AISI Normen gezeigt worden.

SUMMARY

Jominy method for determination of hardenability of steels with medium hardenability found its application all over the world. It is also often used in Yugoslav enterprises, but the obtained informations are not enough taken in account. This method can be used as an excellent criterion for testing steel quality due to its reproducibility and simpleness of the method. It can even be used to select the right steel quality for certain purposes, or it can facilitate estimating the necessary conditions for heat treatment.

The intention of the author is to extend the use of this method and show its applicability. Therefore the most important theoretical basis is presented; a short description of the method and standardized testing conditions, and

different possibilities for practical use of the results. Numerous examples show various possibilities for practical use of the results of testing using nomograms which give direct informations. The nomograms for practical use are given in the paper.

Hardenability bands have a special significance. Ironworks Ravne has at their disposal the hardenability bands for majority of their steels. These bands were established by a statistical treatment of the results of testing a great number of batches basing on 95 % statistical reliability. Specifications for requirements of guaranteed hardenability are very often incorrect therefore also standard ways for requirements of hardenability according to SAE and AISI standards are given in the paper.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение закаляемости методом по Jominy воспринято для средне прокаливаемых сталей по всему свету. Также этот метод имеет широкое применение в предприятиях Югославии, хотя недостаточно использована информация которая получена этим испытанием. Этот метод с хорошей возможностью репродукции и весьма простым выполнением служит как превосходный критерий для контроля качества стали, помогает при выборе стали для определенных потребностей, также позволяет оценить условия термической обработки. Задача этой статьи помочь увеличить употребление этого метода и указать на его возможности. Поэтому в статье приведены необходимые теоретические основания; короткое описание метода и описание стандартизованных условий исследования а также различные возможности практического применения результатов. На многочисленных примерах

приведены различные возможности практического применения исследований при помощи номограмм которые непосредственно разрешают получить необходимую информации. В статье эти номограммы приведены для практического применения.

Специальное значение имеют полосы с гарантии закаляемости. Металлургический цех Ravne (Югославия) имеет на распоряжении границы закаляемости почти для всех марок стали производства цеха. Эти полосы выработаны на основании статистической обработки результатов испытания многочисленного количества шихт в основе с 95 % статистической надёжности.

Спецификация требований гарантированной закаляемости в большинстве случаев неправильна, поэтому в статье рассмотрены стандартный способы закаляемости по образцу SAE и AISI стандартов.