



UNIVERZITET U ZENICI
Mašinski fakultet u Zenici



Seminarski rad iz predmeta
Termička obrada i površinske prevlake

Tema: Kaljenje, kaljivost i prokaljivost

Student :
Topalović Adnan

Mentor :
doc. dr. Nađija Haračić

Zenica, 15. juli 2005. godine

SADRŽAJ

1. Kaljenje	1
1.1. Tipovi kaljenja	1
1.1.1. Kaljenje sa kontinualnim hlađenjem (obično kaljenje)	1
1.1.2. Kaljenje u dvije sredine	2
1.1.3. Stepenasto kaljenje	2
1.1.4. Izotermno kaljenje	3
1.1.5. Kaljenje strujom fluida	4
1.2. Niskotemperaturno otpuštanje	5
1.2.1. Samootpuštanje	5
1.2.2. Otpuštanje sa korištenjem spoljne toplote	5
1.2.3. Višestruko otpuštanje	5
1.2.4. Duboko hlađenje	5
2. Kaljivost	9
3. Prokaljivost	10
4. Literatura	29

Ključne riječi: Kaljenje, kaljivost, prokaljivost, termička obrada.

1. KALJENJE

Pod *kaljenjem* se najčešće podrazumijeva proces termičke obrade u kome se dio čelika zagrijava na temperaturu iznad A_3 (ili iznad A_1), a zatim dovoljno brzim hlađenjem dovodi do nastajanja *neravnotežne strukture martenzita* kod većine konstrukcionih i alatnih čelika. *Osnovni cilj kaljenja je povećavanje tvrdoće.*

Slična operacija kod *visokolegiranih austenitnih čelika* odstupa od navedene definicije utoliko što se sprovodi zbog stabilizacije austenitne strukture koja je male tvrdoće, ali se zbog istog toka izvođenja naziva kaljenje. To je istovremeno i jedini slučaj kada se kaljenje obavlja kao *potpuno samostalna i završna operacija termičke obrade*. U svim drugim slučajevima kaljenje je samo jedna operacija iza koje dolaze uvijek i druge (npr. otpuštanje).

Operacija kaljenja se preduzima u okviru raznih procesa termičke obrade i sa različitim ciljevima:

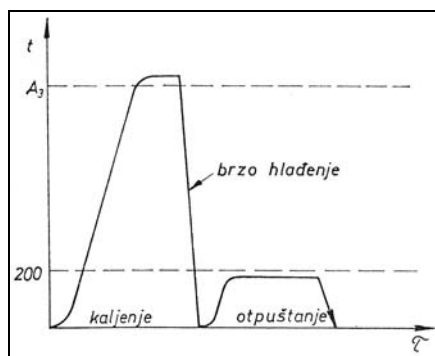
1. povećanje *tvrdoće alata* ili povećanje *kontaktne tvrdoće* jako opterećenih dijelova (kotrljajući ležajevi i slično). U ovim se slučajevima, poslije kaljenja, obavlja niskotemperaturno otpuštanje, pa je nosilac navedenih osobina struktura koja se sastoji od *kubnog martenzita i cementita*;
2. poboljšavanje mehaničkih osobina konstrukcionih čelika (ponekad i alatnih) koje nosi naziv *poboljšavanje* a sastoji se iz kaljenja i visokotemperaturnog otpuštanja. U ovom slučaju su nosioci povoljnih osobina *prelazni oblici strukture*, nastali raspadanjem martenzita (trustit i sorbit);
3. poboljšanje mehaničkih osobina konstrukcionih čelika (ponekad i alatnih) postupkom koji nosi naziv *disperziona ojačavanje* a sastoji se iz kaljenja na prezasićeni rastvor i otpuštanja (starenja). Cilj ovog postupka je izdvajanje iz prezasićenog rastvora *fino disperzovanih čestica ojačavajućih faza* (karbida, metalida, mješovitih kristala) koje poboljšavaju mehaničke osobine smanjenjem slobode kretanja dislokacija;
4. kaljenje je jedna od operacija u okviru termičke obrade *cementiranih dijelova*;
5. kaljenje je jedna od operacija u mnogim varijantama *termo-mehaničkih obrada*;
6. kaljenjem se povećava *stabilnost strukture austenitnih čelika* (hemijski postojanih ili manganskog čelika otpornog na habanje).

Prema načinu hlađenja, proces kaljenja se može izvesti na više načina, koji će u daljem izlaganju biti prikazani.

1.1. Tipovi kaljenja

1.1.1. Kaljenje sa kontinualnim hlađenjem (obično kaljenje)

Ovaj način kaljenja se obavlja tako što se komad zagrijan na temperaturu kaljenja stavlja u rashladno sredstvo, gdje se definitivno rashlađuje do temperature sredstva. Ovo je najprostiji način kaljenja i široko se primjenjuje, a naročito je pogodan za mehanizovane i automatizovane procese. Grafikon ovog načina kaljenja dat je na sl.1.1.

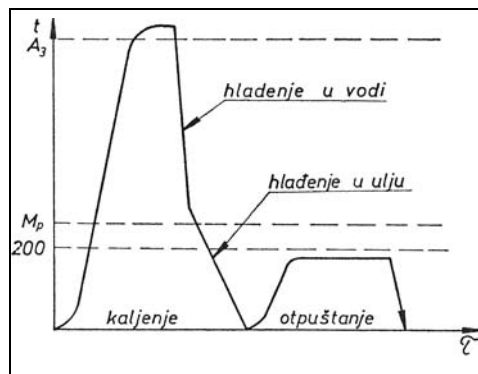


Sl. 1.1 Grafikon običnog kaljenja sa niskim otpuštanjem [1]

Obično kaljenje se primjenjuje u slučaju prostijih oblika komada i vrsta čelika koji nisu suviše osjetljivi na toplotne napone.

1.1.2. Kaljenje u dvije sredine

Kod čelika sa velikom kritičnom brzinom hlađenja, ako su komadi složenog oblika pa postoji opasnost nastajanja velikih toplotnih napona, ne može se primijeniti obično kaljenje u oštrom rashladnom sredstvu. Brzo hlađenje čelika, dok još nije počela martenzitna transformacija nema štetnih posljedica zbog velike žilavosti i male čvrstoće austenita, tako da se višak toplotnih napona rastereti lokalnim plastičnim deformacijama. Ovaj dio hlađenja može se obaviti bez posljedica u oštrom rashladnom sredstvu (npr. vodi). Kad počinje martenzitna transformacija i kada postoji opasnost od dejstva toplotnih napona, dalje hlađenje se može nastaviti u blažem sredstvu (npr. ulju), čime se mogu umanjiti ove opasnosti. Grafikon postupka kaljenja u dvije sredine prikazan je na sl.1.2.

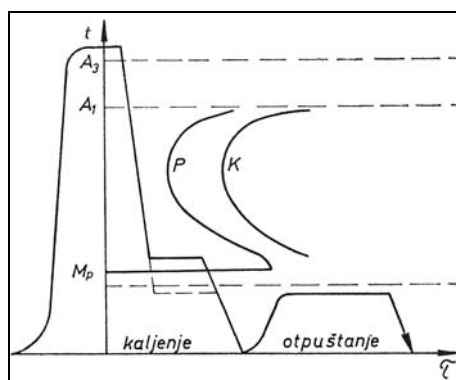


Sl. 1.2 Grafikon kaljenja u dvije sredine sa niskim otpuštanjem [1]

Ovaj postupak kaljenja vrlo je delikatan zbog vrlo kratkog vremena hlađenja, pri čemu se u tačno određenom trenutku mora promijeniti sredstvo hlađenja. Ovo kaljenje, pored velikog iskustva radnika, zahtijeva i savjestan rad. Postupak postaje znatno prostiji ako se oba sredstva za hlađenje nalaze u istom sudu, npr. ulje, koje mora biti teže, nalazi se u donjem dijelu suda a voda je iznad njega. Takav postupak se primjenjuje kod visokougleničnih alatnih čelika.

1.1.3. Stepenasto kaljenje

Nedostatak kaljenja u dvije sredine je u tome što je na kraju brzog hlađenja nastala temperaturna razlika na samom komadu i u tome stanju otpočinje martenzitna transformacija. Od ovakvog kaljenja povoljnije je stepenasto kaljenje koje se obavlja sa *izoternnim nastajanjem martenzita*, što je prikazano na sl.1.3.



Sl. 1.3 Grafikon stepenastog kaljenja šematski prikazan na termokinetičkom dijagramu [1]

Temperatura izotermnog nastajanja martenzita bira se oko (iznad ili ispod) temperature početka martenzitne transformacije, u oblasti stabilnog austenita, gdje ima uslova za izjednačenje većih temperaturnih razlika u komadu. Ovo izotermno zadržavanje treba prekinuti na vrijeme (prije nego počne transformacija) i obaviti dalje hlađenje u blažem rashladnom sredstvu. Postoji mogućnost lakog ispravljanja deformisanih dijelova poslije vađenja iz toplog kupatila a prije potpunog rashlađivanja i transformacije. Temperatura izoterme bira se obično nešto iznad temperature početka martenzitne transformacije dok kod brzoreznih čelika čak nešto ispod.

Dozvoljeno vrijeme zadržavanja u toplom kupatilu određuje se iz termokinetičkog dijagrama čelika. Nekoliko primjera za konstrukcione i alatne čelike dato je u tabeli 1.1.

Tabela 1.1 Dozvoljeno vrijeme zadržavanja [1]

Oznaka čelika		Temperatura izotermnog Zadržavanja (°C)	Najduže dopušteno vrijeme zadržavanja (sekunde)
DIN	JUS		
50 CrV 4	Č.4830	280 – 300	30
71 Si 7	Č.2135	200 – 240	50
100 Cr 6	Č.4146	280 – 300	50
145 Cr 6	Č.4340	250 – 300	50
C 70W 1	Č.1740	280 – 300	20
C 100W 1	Č.1940	220 – 250	50
105 CrW 6	Č.6440	250 – 300	20
S 3.3.2	Č.8780	400 – 540	180
S 18.0.1	Č.6880	400 – 550	240
S 12.1.2	Č.6882	400 – 550	300
S 6.5.2	Č.7680	400 – 580	180
S 18.1.2.5	Č.6980	400 – 580	180

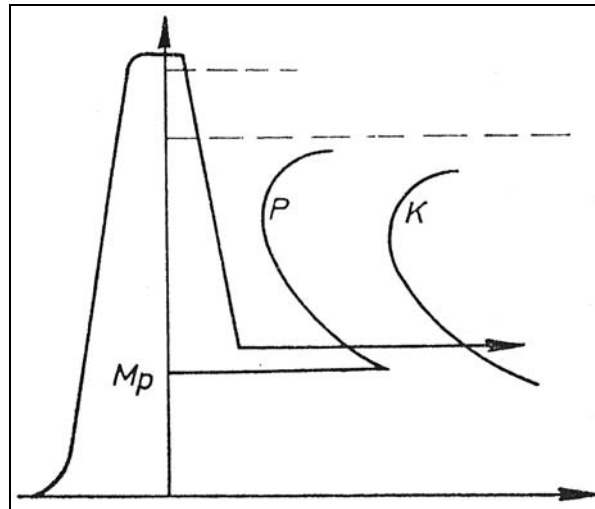
Visoka temperatura kupatila smanjuje brzinu hlađenja, pa se na ovaj način mogu kaliti samo komadi ograničenih dimenzija:

- ugljenični čelici do 15 mm debljine,
- niskolegirani do 40 mm i
- visokolegirani preko 40 mm.

Kod čelika za cementaciju, koji su male prokaljivosti, stepenasto kaljenje je moguće samo za cementirani sloj. Rashladna sposobnost toplog kupatila može se povećati snižavanjem temperature soli ili dodavanjem u kupatilo vode u maloj količini, jer ako se kupatilo prezasiti sa vlagom, zbog lijepljenja pare na površinu komada, opet dolazi do smanjenja rashladne sposobnosti.

1.1.4. Izotermno kaljenje

Izotermno kaljenje se obavlja na nekoj temperaturi iznad početka martenzitne transformacije M_p u oblasti donjeg beinita kao i stepenasto kaljenje u sonom kupatilu, s tom razlikom što se vrijeme zadržavanja u kupatilu ne ograničava već se, naprotiv, drži sve do kraja transformacije sl.1.4.



Sl. 1.4 Princip izoternog kaljenja [1]

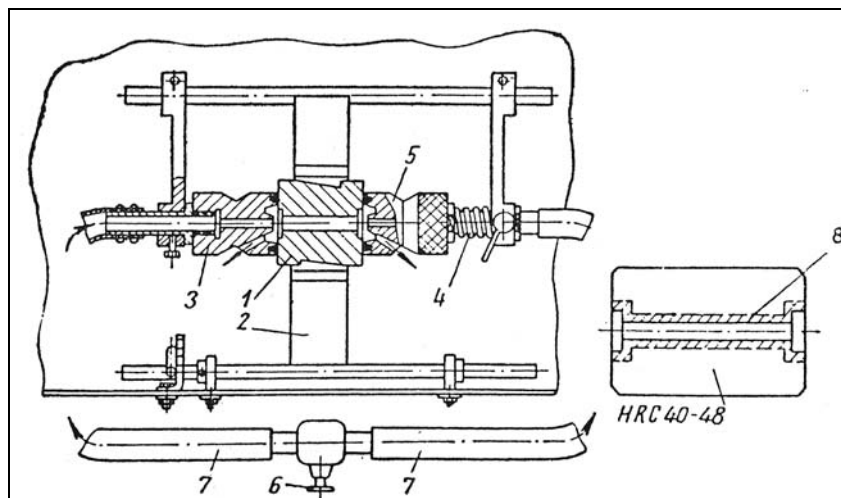
Pošto se u ovom slučaju transformacija austenita obavlja na temperaturi na kojoj je ograničena mogućnost difuzije ugljika, to neće ni doći do martenzitne transformacije već do transformacije u donji igličasti beinit (HRC 45 do 55), poslije čega nije potrebno niskotemperaturno otpuštanje.

Ovaj je način kaljenja stoga svrsishodan kada je potrebno postići manju tvrdoću i povećanu žilavost. Primjenjiv je kod čelika sa većom prokaljivošću, na sitnijim komadima i komadima nepogodnog oblika za kaljenje u ostrim rashladnim sredstvima.

1.1.5. Kaljenje strujom fluida

U savremenoj tehnologiji se teži kaljenju koje se izvodi isticanjem fluida velikom brzinom iz specijalnih hladilica (*mlaznica*) ili tuševa, podešenih površini komada, često kombinovanih sa alatima za držanje komada koji sprečavaju njegovo deformisanje i usmjeravaju hlađenje po intenzitetu na određene površine komada. Kao primjer takvog alata na sl.1.5 prikazan je takav pribor za pridržavanje i usmjereno kaljenje strujom fluida upravo radne površine alata za presovanje zavrtnja.

U ovom slučaju se brzinom isticanja fluida i trajanjem hlađenja može hlađenje regulisati, sa dobrim uslovima za ponovljivost procesa, što omogućava automatizaciju ove operacije.



Sl. 1.5 Pribor za kaljenje alata za presovanje zavrtnja [1]

1.2. Niskotemperaturno otpuštanje

Poslije kaljenja primjenjuje se *niskotemperaturno otpuštanje* čiji je cilj da čeliku koji će se koristiti u tvrdom stanju smanji krutost i nestabilnost strukture (sklonost ka starenju). Ovo otpuštanje je obavezno poslije svakog kaljenja alata, sličnih dijelova i cementiranih i kaljenih dijelova.

Prema načinu izvođenja niskotemperaturnog otpuštanja, razlikuju se sljedeći procesi otpuštanja:

- samootpuštanje uz korištenje toplote kaljenja,
- otpuštanje sa korištenjem spoljne toplote i
- višestruko otpuštanje.

1.2.1. Samootpuštanje

Ako se pri kaljenju komad u rashladnom sredstvu ne rashladi potpuno već se u jezgru zadrži izvjesna količina toplote, može se prekinuti hlađenje (vađenjem komada iz rashladnog sredstva), toplotom iz jezgra zagrijati površinski sloj i na taj način obaviti otpuštanje. Ovakav proces se može kontrolisati posmatranjem boja oksida na površini koje su kod ugljeničnih i niskolegiranih čelika zavisne od temperature. Površina izvađenog komada iz rashladnog sredstva se očisti šmirglom i po dostizanju željene boje ne površini komad se definitivno rashlađuje u ulju.

Samootpuštanje se može primijeniti samo kod komada *ravnomjernih presjeka i prostog oblika*, a za njegovo izvođenje je potrebno iskustvo radnika.

Sličan se postupak primjenjuje sa uspjehom kod *indukcionog kaljenja*, ako se hladilica isključi prije potpunog rashlađivanja kaljenog sloja.

1.2.2. Otpuštanje sa korištenjem spoljne toplote

U najvećem broju slučajeva komadi se pri kaljenju potpuno rashlađuju, a za otpuštanje se zagrijavaju na temperaturu otpuštanja (150 do 250°C). Ovo otpuštanje se može obaviti i u *zagrijanom ulju, sonim kupatilima* ili specijalnim *pećima sa cirkulacijom atmosfere*. Dijelovi od konstrukcionih čelika (cementirani, karbonitrirani, površinski kaljeni itd.) otpuštaju se na ovaj način na temperaturama 150° do 250°C, a alatni na 180° do 250°C.

1.2.3. Višestruko otpuštanje

Struktura kaljenog čelika nije stabilna zbog prisustva dviju nestabilnih komponenata: martenzita (veće zapremine nego ferit i perlit) i preostalog austenita (manje zapremine nego ferit i perlit). Zbog ovih nestabilnih komponenti, čije je raspadanje povezano sa promjenama zapremine, kaljeni čelik je *sklon starenju* pri kojem će, pored promjena osobina, doći i do promjena dimenzija i oblika dijela. Kod kaljenih dijelova koji treba da zadrže trajno svoj oblik i dimenzije (na primjer kod specijalnih i mjernih alata, kotrljajućih ležajeva itd.) primjenjuju se posebni oblici otpuštanja prije definitivne obrade na mjeru. Svrha ovog otpuštanja je stabilizacija strukture, čime se postiže i trajna stabilnost oblika i dimenzija.

1.2.4. Duboko hlađenje

Pri kaljenju mnogih čelika (na primjer sa višim sadržajem ugljika) rashlađivanjem do sobne temperature nije još dostignuta temperatura M_k kraja martenzitne transformacije. Zbog toga će se u strukturi čelika koji je kaljen na uobičajeni način i rashlađen samo do sobne temperature nalaziti uvijek *preostali austenit*. Ovo će naročito biti slučaj kod čelika sa višim sadržajem ugljika i legiranih elemenata koji stabilizuju austenit. Duboko hlađenje ispod

temperature kraja martenzitne transformacije M_k predstavlja, u stvari, produžetak procesa kaljenja (transformacije) i može se smatrati kao *drugi stepen kaljenja*.

E. Scheil je 1928. godine ukazao na to da duboko hlađenje omogućuje transformaciju austenita u martenzit. Ideja o ovakvoj mogućnosti postojala je još u prošlom stoljeću (Austenit R. i Anosov P. za ovu svrhu primjenjivali su tečni vazduh), ali primjena u termičkoj obradi čelika je otpočela najprije u Sovjetskom Savezu 1937. godine (A. Guljajev), a u ostalim zemljama nešto kasnije (1942. u SAD).

I pored potvrđenih rezultata, ovaj postupak nije u širokoj primjeni, mada je u izvjesnim slučajevima opravdan. Prije svega, ovakva obrada se može smatrati svrsishodnom kod čelika čija je temperatura M_k ispod 20°C . To je slučaj i kod ugljeničnih čelika sa većim sadržajem ugljika od 0,6%, a kod legiranih i sa nižim sadržajima (0,4 pa čak do 0,15% kod niskolegiranih i srednjelegiranih), praktično kod svih alatnih čelika. Ovakvo uopštavanje nije svuda prihvaćeno, posebno zbog toga što postoje i druge metode za uklanjanje preostalog austenita (na primjer višestruko mežužarenje).

Duboko hlađenje smanjuje količinu preostalog austenita, pa cilj ove obrade može biti *povećanje tvrdoće, stabilnosti dimenzija i poboljšavanje magnetnih osobina*. Prema A. Guljajevu i V. Vorobjevu, efekat dubokog hlađenja u pogledu povećanja tvrdoće biće utoliko veći ukoliko je kod posmatranog čelika niža temperatura početka martenzitne transformacije M_p . Stoga se u posmatranom slučaju *može, na osnovu visine M_p , odlučivati o svrsishodnosti dubokog hlađenja*. Temperatura dubokog hlađenja t_R zavisi od temperature kraja martenzitne transformacije M_k . Dalja uticajna veličina je temperatura stabilizacije preostalog austenita t_s . Ako je ova temperatura (t_s) niža od sobne temperature, može između kaljenja i dubokog hlađenja biti proizvoljno duga pauza. U protivnom, duboko hlađenje mora se obaviti neposredno poslije kaljenja – kao produžetak kaljenja.

Rezultati koji se mogu postići dubokim hlađenjem u pogledu povećanja tvrdoće, prema A. Guljajevu, prikazani su u tabeli 1.2.

Tabela 1.2 Tvrdoće poslije dubokog hlađenja [1]

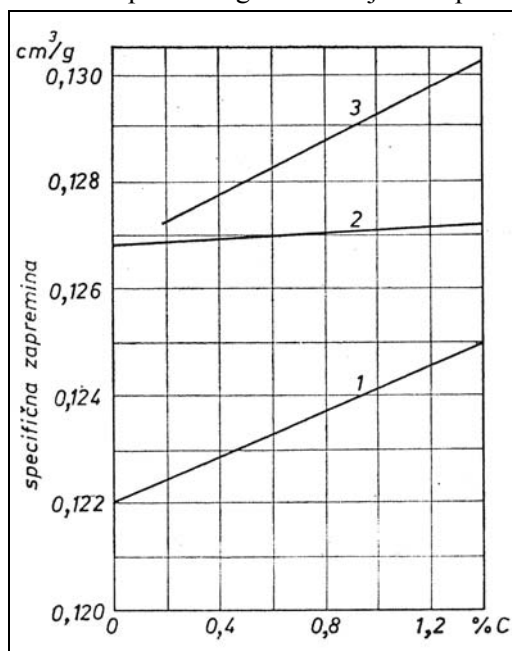
Oznaka čelika po GOST-u i JUS-u ili hemijski sastav		Martenzitne temperature		Količina austenita (%)		Priraštaj tvrdoće poslije dubokog hlađenja
GOST	JUS	M_p ($^\circ\text{C}$)	M_k ($^\circ\text{C}$)	prije	poslije	
				dubokog hlađenja		
U 7	Č.1741	300 ÷ 250	– 50	3 ÷ 5	1	0,5
U 8	Č.1840	250 ÷ 225	– 55	4 ÷ 8	1 ÷ 6	1
U 9 ... C=0,85 ÷ 0,94% Cr=0,20% Ni=0,15% i Cu=0,20%	–	225 ÷ 210	– 55	5 ÷ 12	3 ÷ 10	1 ÷ 1,5
U 10	Č.1940	210 ÷ 175	– 60	6 ÷ 18	4 ÷ 12	1,5 ÷ 3
U 12	Č.1946	175 ÷ 160	– 70	10 ÷ 20	5 ÷ 14	3 ÷ 4
9 HS C=0,9%...Si=1,4% Mn=0,45% Cr=1,1%	–	210 ÷ 185	– 60	6 ÷ 17	4 ÷ 17	1,5 ÷ 2,5
ŠH 15	Č.4146	180 ÷ 145	– 90	9 ÷ 28	4 ÷ 17	3 ÷ 6
HVG	Č.6440	155 ÷ 120	– 110	13 ÷ 45	2 ÷ 17	5 ÷ 10

Iz navedenih podataka se vidi da u najvećem broju slučajeva zadovoljava temperatura rashlađivanja t_R – 70° do -80°C , ali može biti i niža (što se može postići mješavinom benzina i suhog leda). Primjena je svrsishodna i sa dobrim uspjehom ako se duboko hlađenje koristi u slučajevima kada je preostalog austenita više od 10% do 15%. Ispod ove količine se austenit stabilizuje, pa se duboko hlađenje mora obaviti neposredno poslije kaljenja. Ova pauza ne treba ni u ostalim slučajevima da bude duža od 15 minuta, a ako se prije rashlađivanja obavi nisko otpuštanje potpuno je onemogućen efekat dubokog hlađenja.

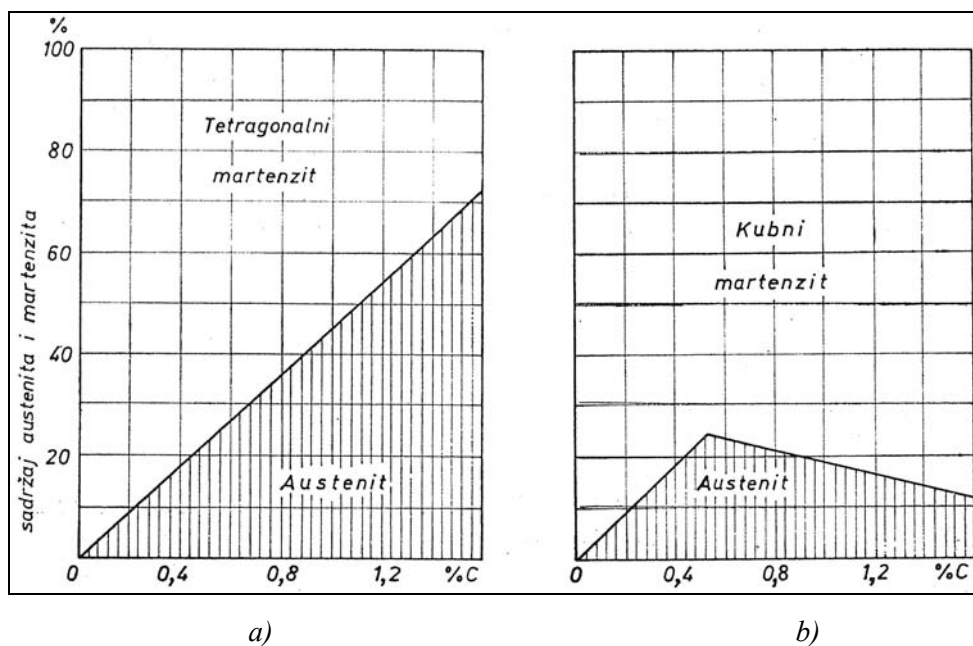
Ovaj postupak koristi se kod termičke obrade alata i dijelova za koje je potrebna velika i trajna tačnost. Problem preostalog austenita i trajne tačnosti dijelova može se rješavati i drugim postupcima.

Specifična zapremina martenzita je najveća a austenita najmanja u odnosu na ostale oblike strukture čelika. Ove razlike u zapremini zavisne su od sadržaja ugljika sl.1.6. U idealnom slučaju se može zamisliti takav odnos učešća martenzita i preostalog austenita poslije kaljenja pri kome neće doći do promjene zapremine pa ni do deformisanja.

Ako se pođe od specifičnih zapremina sa sl. 1.6, do deformacije poslije kaljenja neće doći ukoliko je odnos udjela martenzita i preostalog austenita jednak prikazanom na sl. 1.7.



Sl. 1.6 Zavisnost specifične zapremine raznih oblika strukture od sadržaja ugljika u čeliku na sobnoj temperaturi: 1 – austenit; 2 – ferit i perlit; 3 – martenzit; [1]



Sl. 1.7 Odnos količine preostalog austenita i martenzita u ugljeničnom čeliku, pri kome poslije kaljenja ne dolazi do promjene zapremine: a) tetragonalni martenzit i austenit; b) kubni martenzit i austenit; [1]

Takav udio sastavnica strukture ne može se postići običnim postupkom kaljenja. S druge strane, u čeliku sa većim sadržajem ugljika takav odnos austenita i tetragonalnog martenzita, koji neće dovesti do deformacije pri kaljenju, doveo bi do neprihvatljivog pada tvrdoće. Povoljniji uslovi se mogu postići poslije niskog otpuštanja (120° do 150°C), koje ne vodi bitnom smanjenju tvrdoće. To je moguće postići samo ako poslije otpuštanja u martenzitu ostane rastvoreno još 0,4% do 0,5% C. U ovom slučaju je potreban znatno manji sadržaj preostalog austenita, pošto martenzit sadrži samo 0,4% do 0,5% ugljika, tako da će udio martenzita biti prema sl.1.7.b, pa ni u ovom slučaju kod visokougleničnih čelika neće doći do opadanja tvrdoće. Neophodna količina preostalog austenita može se postići određenim postupkom koji se mora utvrditi za svaku vrstu čelika. Tako A. Guljajev navodi za čelik U 12 (Č.1946) sljedeće rezultate tabela 1.3.

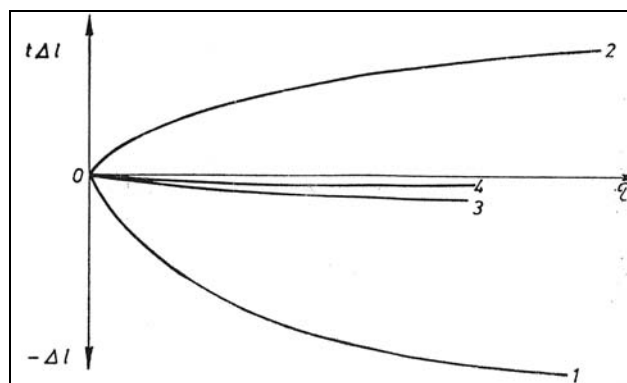
Tabela 1.3 Uticaj preostalog austenita na deformacije i tvrdoću

Režimi termičke obrade	deformacija (%)	preostali austenit (%)	HRC
U 12			
– kaljen sa 770°C , hlađen u vodi sa završetkom u ulju	0,28	15	65
– kaljen sa 830°C u šaltri na 175°C dva do minuta, 38 minuta otpuštan u peći na 200°C pa sporo hlađen u peći	0,08	38	61
HG			
– kaljen u ulju sa 800°C	0,11	18	65
– kaljen sa 890°C u šaltri sa 200°C 30 minuta, sporo hlađen na sobnu temperaturu	0,01	32	61

Na čeliku HG (sa oko 1,4% C ... 0,6% Mn ... 1,45 Cr), koji nosi naziv «malo – deformacijski», kao što se vidi iz navedenog pregleda, rezultati su bolji.

Drugi problem kaljenih dijelova visoke tvrdoće je nepostojanost oblika i dimenzija komada u dugotrajnoj upotrebi. I u ovom slučaju uzrok promjena dimenzija je raspadanje martenzita i preostalog austenita. Otpuštanjem čelika na 120° do 150°C može se stabilizovati martenzit, ali za transformaciju preostalog austenita potrebne su više temperature (od oko 250°C), koje dovode do većeg pada tvrdoće (59 do 56 HRC), što se ne može uvijek tolerisati.

Ovaj problem se može riješiti primjenom pravilne termičke obrade, kao što to pokazuje primjer na sl.1.8.



Sl. 1.8 Promjene dimenzija kaljenih dijelova tokom vremena za razne postupke termičke obrade: 1 – kaljenje bez otpuštanja; 2 – kaljeno i otpuštanje na 100° do 150°C ; 3 – kaljeno, duboko hlađeno i otpuštanje na 100° do 150°C ; 4 – otpuštanje na 250° do 300°C ; [1]

Interesantan pokušaj je objavio G. Liebmann (Zeis-Jena) koji je vršio otpuštanje na 120°C u trajanju od 90 časova, poslije čega je martenzit sadržavao od 0,4% do 0,5% C, pri čemu je težio da se *reguliše količina austenita tako da kompenzira opadanje zapremine pri raspadanju martenzita* u toku dugotrajnog starenja. Rezultati koje je postigao na čeliku 100 Cr 6 (Č.4146, čelik za kotrljajne ležajeve) dati su u tabeli 1.4.

Tabela 1.4 Rezultati ispitivanja za dugotrajno starenje ovisno o sadržaju austenita [1]

Trajanje starenja godina	Promjene dužine od 70 mm u μm za količinu austenita %		
	10	13	18
1	-0,2	0	+0,65
2	-0,25	+0,03	+0,93
3	-0,30	+0,04	+1,10
4	-0,32	+0,05	+1,18
5	-0,34	+0,07	+1,30
6	-0,36	+0,08	+1,37

Potrebna količina preostalog austenita kod čelika iz tabele 1.3 postiže se primjenom već pomenutog postupka otpuštanja, uz variranje temperature kaljenja:

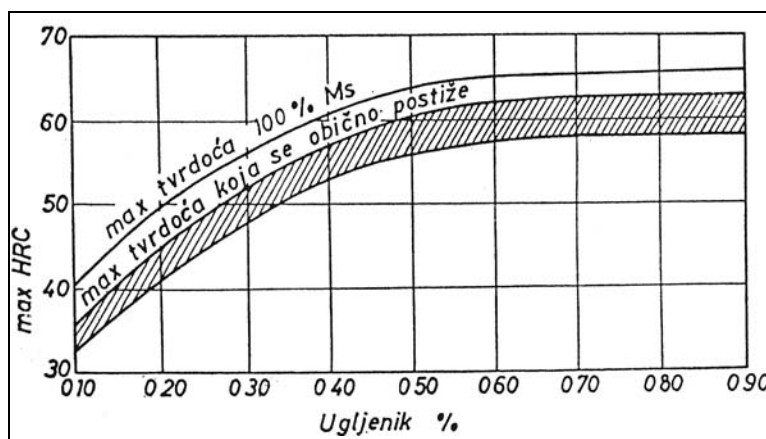
- za 10% preostalog austenita kaljenje sa $A_1 + 10^\circ\text{C}$, duboko hlađenje i opisano otpuštanje;
- za 13% austenita kaljenje sa $A_1 + 20^\circ\text{C}$ i otpuštanje i
- za 18% austenita kaljenje sa $A_1 + 80^\circ\text{C}$ i otpuštanje.

Iz prikazani rezultata u tabeli 1.4 vidi se da će pri količini od 13% preostalog austenita biti najmanje promjene dimenzija.

2. KALJIVOST

Kaljivost kod čelika zavisi, u najvećoj mjeri, od sadržaja ugljika a sasvim malo od prisustva legirajućih elemenata i od veličine zrnaca austenita. Ova dva posljednja faktora utiču uglavnom, na stepen teškoća postizanja maksimalne tvrdoće kod jednog određenog sadržaja ugljika.

Kaljivost čelika se izražava tvrdoćom (HRC) koja se može postići na tankim kaljenim probama. Treba imati u vidu da se kod komada većih dimenzija nego što je laboratorijska proba, nikada ne može postići maksimalna tvrdoća. Zavisnost maksimalne tvrdoće od sadržaja ugljika je prikazana na sl. 2.1 a primjer razlike između ovakvih tvrdoća i onih koje se u stvarnim uslovima mogu ostvariti daje, prema F. Sisco, sl. 2.2.



Sl. 2.2 Odnos maksimalnih tvrdoća pri 100% martenzita (kaljivosti) prema ostvarivim tvrdoćama koje se najčešće postižu [1]

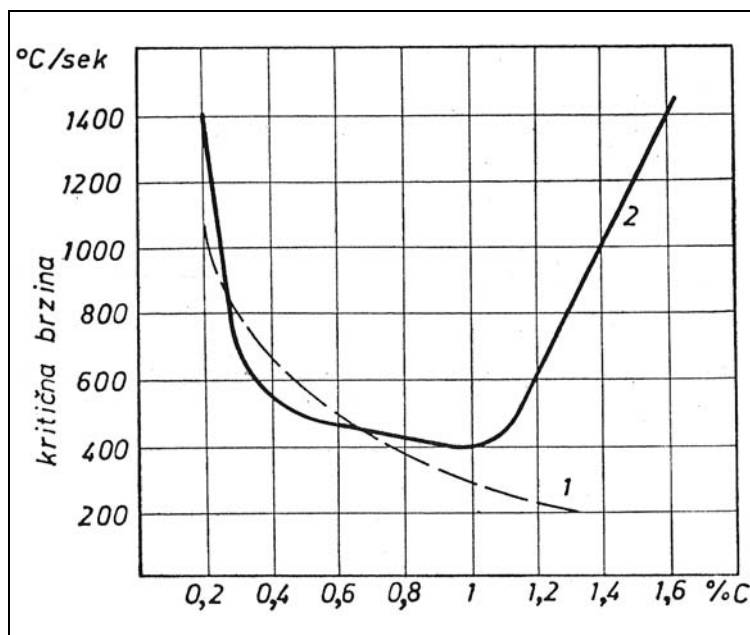
3. PROKALJIVOST

Ako se pod prokaljivošću podrazumijeva dubina prodiranja martenzitne transformacije bez obzira na uslove hlađenja i veličinu i oblik komada, onda bi se ova osobina mogla definisati kao sposobnost austenita nekog čelika za pothlađenje ispod temperature martenzitne transformacije. Međutim, prema većini postojećih definicija smatra se da se ova sposobnost odnosi na martenzitnu transformaciju a ne na pothlađenje. Nesporazum u ovom drugom slučaju dolazi zbog mogućeg prisustva preostalog austenita pa se može dobiti pogrešan sud o prokaljivosti, jer će se pri većem prisustvu preostalog austenita, zaključiti o maloj prokaljivosti možda baš za neki čelik koji ima veliku prokaljivost. Nedostatak svih razmatranja o prokaljivosti je nedovoljno poznavanje uticaja preostalog austenita na prokaljivost. Ako se izuzmu tehnološki uticaji na nastajanje preostalog austenita, može se lako zaključiti da će njegova količina zavistiti, u najvećoj mjeri, od individualnih osobina čelika, na primjer, od hemijskog sastava. Tako je poznata protivriječnost da se legiranjem povećava prokaljivost a isto tako se povećava i količina preostalog austenita.

Najvažniji faktori koji utiču na prokaljivost čelika su:

- hemijski sastav čelika,
- krupnoća zrnaca austenita i
- homogenost austenita.

Hemijski sastav čelika, u najvećoj mjeri, utiče na prokaljivost a kao prvo dejstvo svih legirajućih elemenata se može navesti pomjeranje kritične tačke iz termokinetičkog dijagrama udesno, odnosno smanjenje kritične brzine hlađenja. Kritičnu brzinu hlađenja smanjuju već prateći elementi i nečistoće kod ugljeničnih čelika u odnosu na čiste legure Fe-C, što se može vidjeti na sl. 3.1.



Sl. 3.1 Uticaj ugljika na kritičnu brzinu hlađenja kod čiste legure Fe-C (1) i ugljeničnog čelika (2) [1]

Uticaj legirajućih elemenata na prokaljivost je velik, da bi se on mogao ilustrovati, usvojen je, danas uobičajeni, način prikazivanja preko veličine takozvanog *idealnog kritičnog prečnika* (D_i). Prema M. Grossmannu, *kritični prečnik* je prečnik cilindričnog komada od čelika koji poslije kaljenja, u određenim uslovima hlađenja, ima tvrdoću u jezgru komada koja bi odgovarala tvrdoći kaljene strukture datog čelika sa 50% martenzita. Ovako definisan kritični prečnik (D_k) služi i kao mjerilo prokaljivosti. Veličina kritičnog prečnika zavisi i od uslova hlađenja, stoga je uz njega neophodno dati ove uslove, što se prema Grossmannu čini preko

takozvane *rashladne sposobnosti sredine* za kaljenje (H). Veličina rashladne sposobnosti u zavisnosti od uobičajenih uslova hlađenja dana je u tabeli 3.1

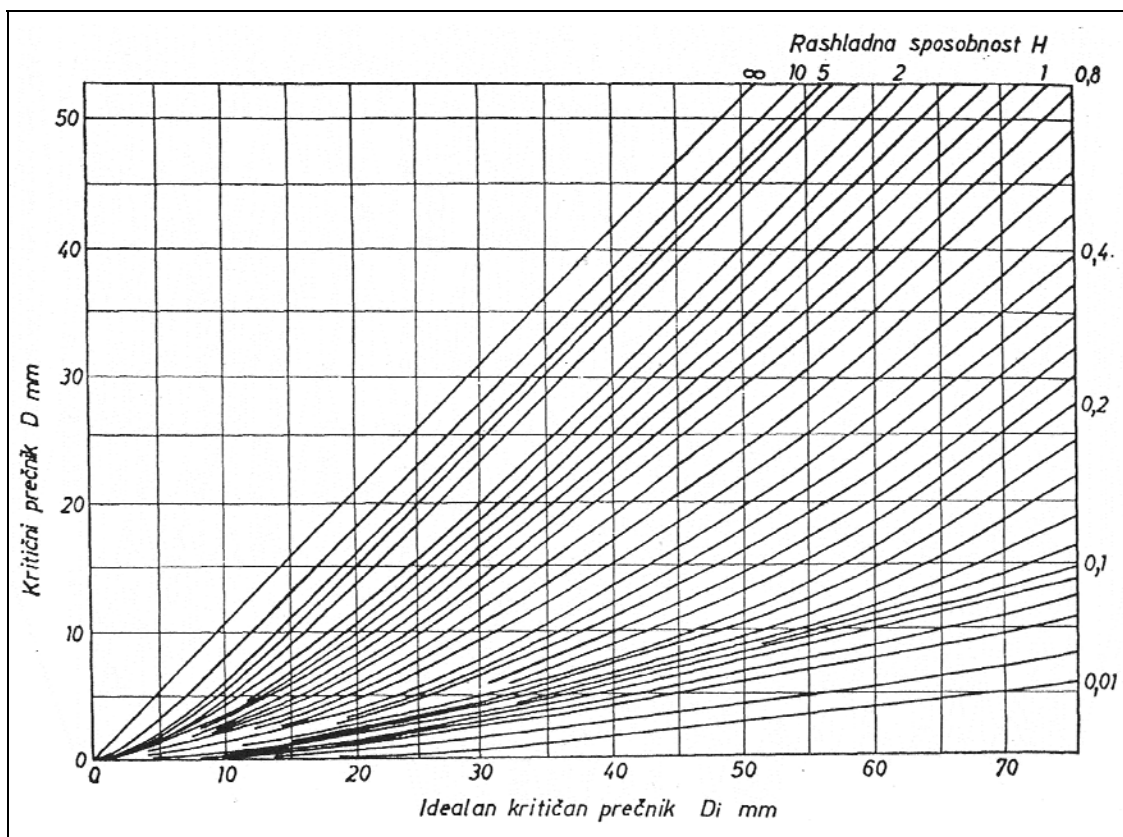
Tabela 3.1 Veličina rashladne sposobnosti u ovisnosti od uobičajenih uslova hlađenja [1]

Relativno hlađenje		faktor rashladne sposobnosti H za			
Sredstvo za hlađenje	komada	vazduh	ulje	vodu	rastvor soli
nema	nema	0,02	0,3	1,0	2,2
nema	srednje		0,4 – 0,6	1,5 – 3	
nema	jako		0,6 – 0,8	3,0 – 6	7,5
Jako ili mlazom			1,0 – 1,7	6,0 – 12	

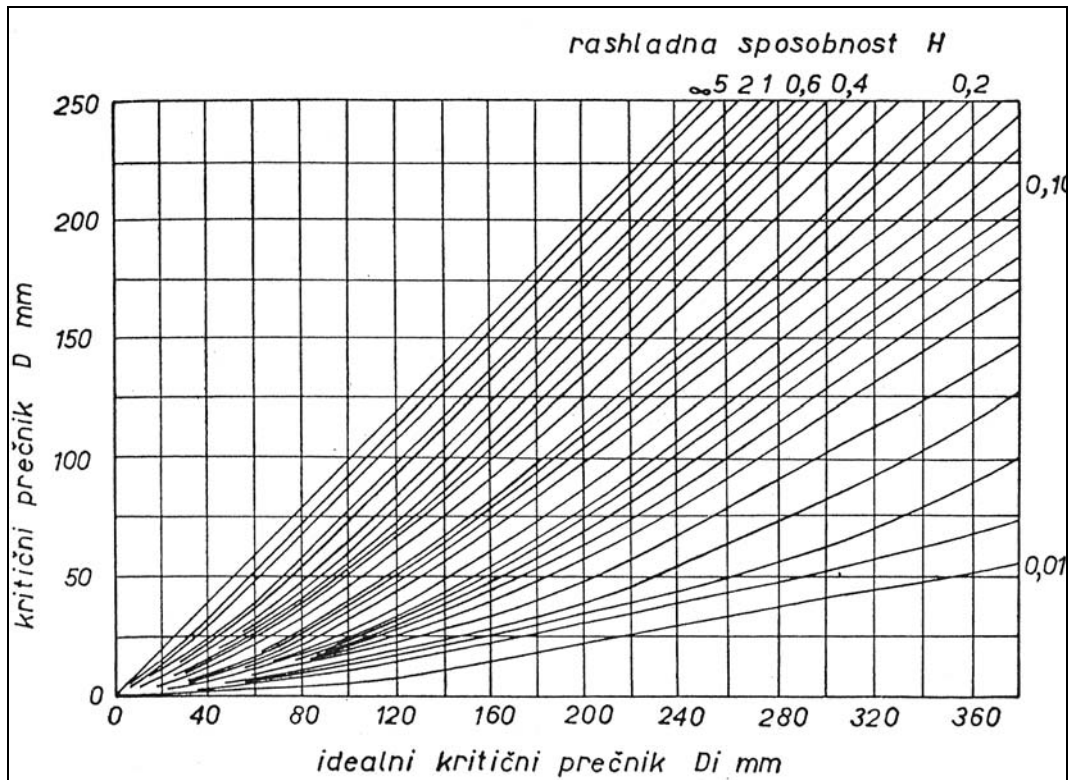
U cilju da se prokaljivost izrazi samo jednim brojem, Grossmann je uveo pojam *idealnog kritičnog prečnika*. Idealni kritični prečnik je, također, prečnik cilindričnog komada koji, poslije kaljenja, ima takvu tvrdoću jezgra da odgovara tvrdoći strukture sa 50% martenzita kod istog čelika, ali koji je pri kaljenju rashlađivan u idealnim uslovima za koje je $H = \infty$. Pod idealnim uslovima se smatra da je temperatura površine komada neposredno po unošenju u rashladnu sredinu – u beskonačno kratkom vremenu – opala od temperature kaljenja do sobne temperature. Prema ovome, idealni kritični prečnik D_i iskazuje veličinu prokaljivosti jednog čelika samo jednim brojem. Odnos između idealnog kritičnog prečnika i kritičnog prečnika uz razne uslove hlađenja dati su na sl. 3.2 i 3.3 za cilindrične dijelove a za ploču na sl. 3.4 i 3.5

Uticaj legirajućih elemenata je Grossmann izrazio na taj način što je prvo odredio idealan kritičan prečnik u zavisnosti samo od sadržaja ugljika i krupnoće zrna strukture sl.3.6 pa je ovaj množio faktorima koji su uzimali u obzir prisustvo i količinu legirajućih elemenata.

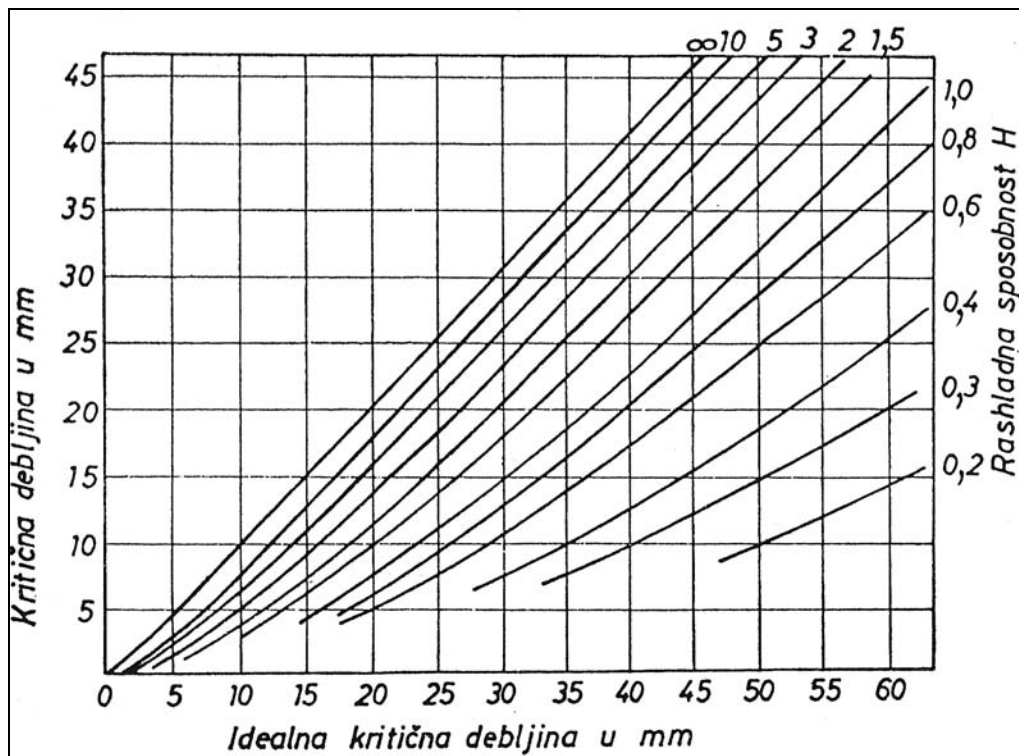
Faktore za pojedine legirajuće elemente u zavisnosti od količine prikazuje sl. 3.7.



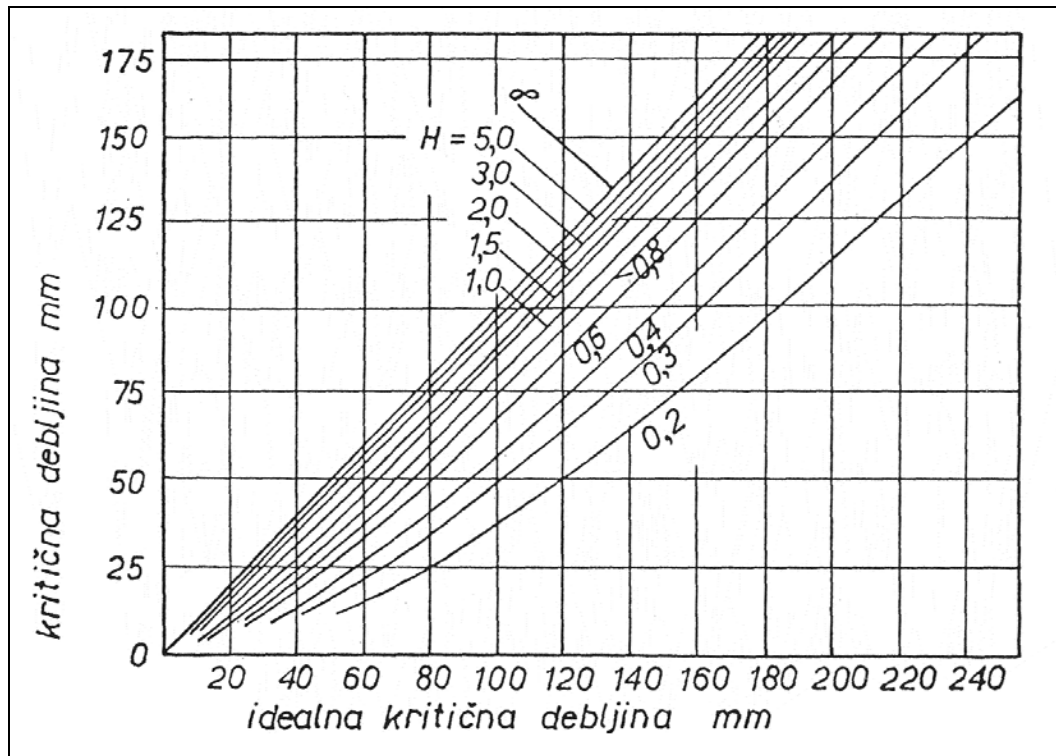
Sl. 3.2 Odnos idealnog kritičnog prečnika, kritičnog prečnika i uslova hlađenja za male prečnike cilindra [1]



Sl. 3.3 Odnos idealnog kritičnog prečnika, kritičnog prečnika i uslova hlađenja za velike prečnike cilindra [1]



Sl. 3.4 Odnos idealne kritične debljine ploče, kritične debljine i uslova hlađenja kod ploča malih debljina [1]



Sl. 3.5 Odnos idealne kritične debljine ploče, kritične debljine i uslova hlađenja kod ploča veće debljine [1]

Primjer: Treba da se odredi idealan kritični prečnik i kritičan prečnik za čelik sastava:

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo
(%)	0,45	0,3	0,6	1	0,2

Koji ima krupnoću zrna po ASTM-u ... 6

Sa sl. 3.6 za zadati sadržaj ugljika i krupnoću zrna je $D_i = 6,2 \text{ mm}$. Faktori legirajućih elemenata uzeti sa sl. 3.7 su:

Si = 0,3% ... 1,2
Mn = 0,6% ... 3
Cr = 1% ... 3,2
Mo = 0,2% ... 1,62

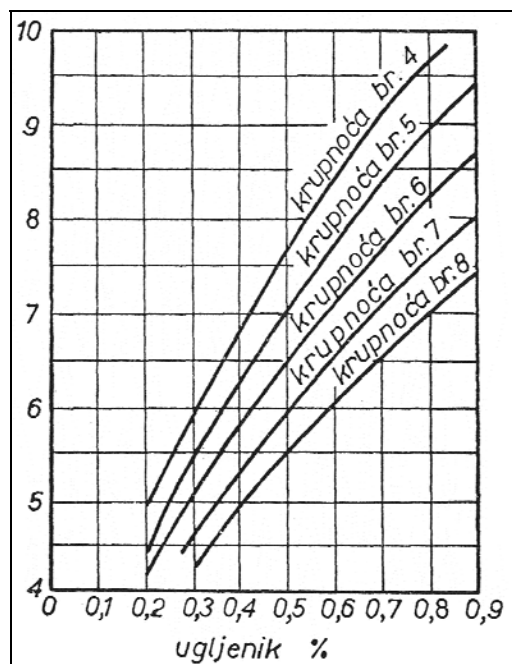
Idealan kritični prečnik je, prema tome:

$$D_i = 6,2 \cdot 1,2 \cdot 3 \cdot 3,2 \cdot 1,62 = 116 \text{ mm}$$

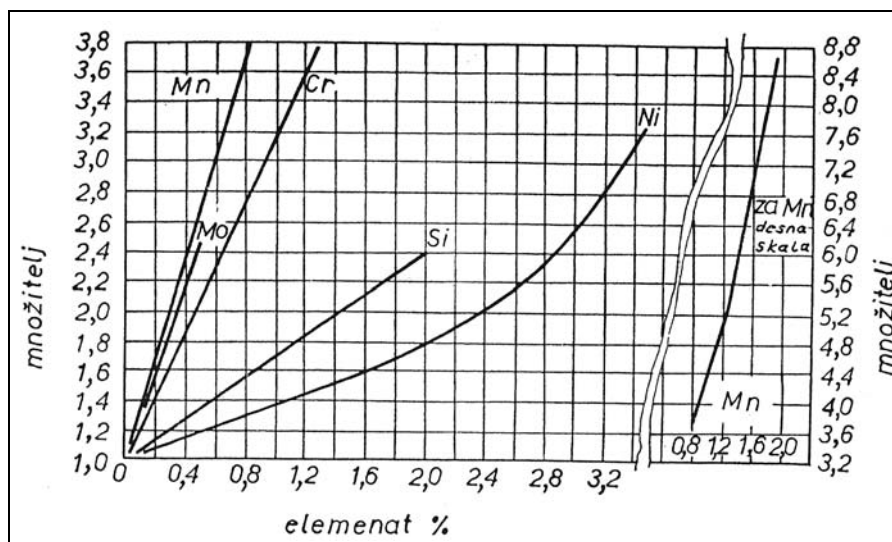
Ako je hlađenje pri kaljenju obavljeno u ulju bez kretanja biće $H = 0,3$ (tabela 3.1) pa je kritični prečnik:

$$D_k = 56 \text{ mm}$$

prema sl. 3.3.



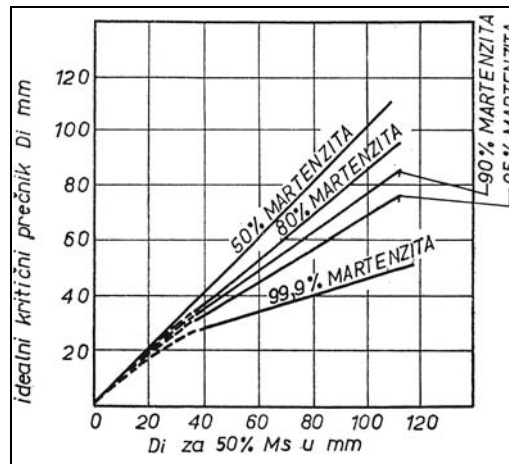
Sl. 3.6 Zavisnost idealnog kritičnog prečnika od sadržaja ugljika i krupnoće zrna [1]



Sl. 3.7 Množitelj za razne legirajuće elemente [1]

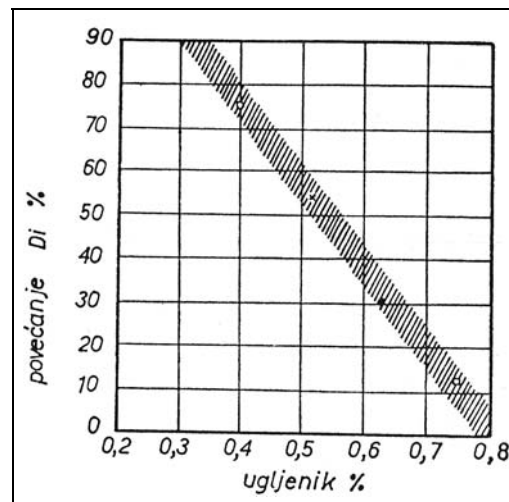
Postoji težnja da se idealni kritični prečnik izrazi i u slučajevima izabranih tvrdoća u kaljenom jezgru većih nego što se mogu dobiti pri strukturi sa 50% martenzita. Tako, u tehnici površinskog kaljenja gorionikom koristi se za prokaljivost onaj kritični prečnik pri kome će tvrdoća jezgra cilindričnog komada odgovarati tvrdoći strukture istog kaljenog čelika sa 99,9% martenzita (prokaljivost po Cubasti). Proširivanje oblasti definisanja idealnog kritičnog prečnika su izvršili Hodge i Orehoski, a rezultati su dati na sl. 3.8.

Vrlo velik uticaj na prokaljivost ima bor koji je uveden kao dodatak čeliku u toku drugog svjetskog rata u oskudici legirajućih elemenata. Količina bora dodata čeliku za koju se bilježi najveći porast prokaljivosti je 0,001%. Efekat bora je u toliko veći u koliko je bolje izvedena dezoksidacija čelika, a pošto se radi o vrlo malom dodatku bora, može se on uvoditi u rastopljeni metal zajedno sa sredstvom za dezoksidaciju što mu obezbjeđuje bolju raspodjelu po masi metala.



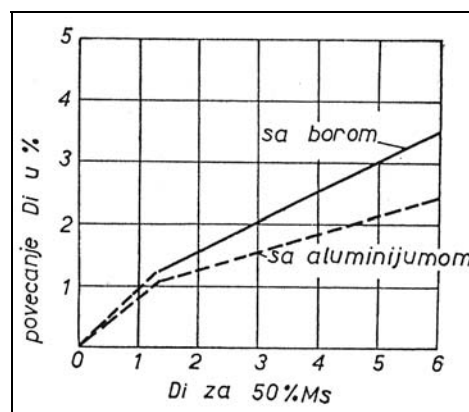
Sl. 3.8 Zavisnost idealnog kritičnog prečnika za veće sadržaje martenzita u kaljenom jezgru od slučaja za 50% martenzita [1]

Efekat bora je najveći kod konstrukcionih čelika sa nižim sadržajem ugljika, što se vidi preko porasta idealnog kritičnog prečnika na sl. 3.9.



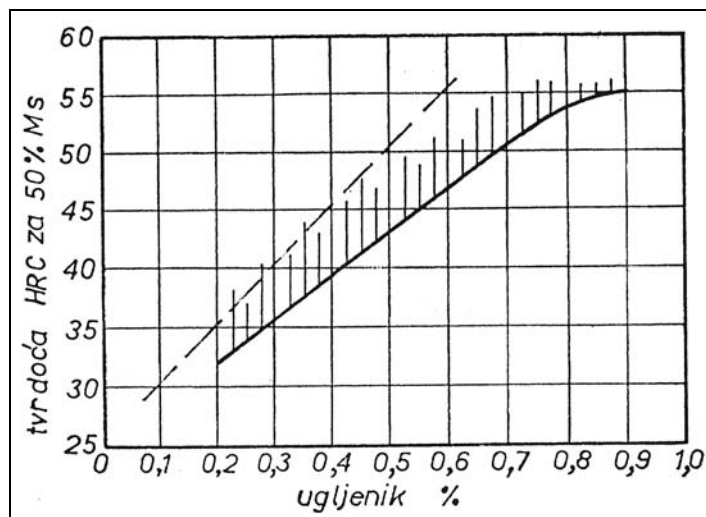
Sl. 3.9 Zavisnost porasta idealnog kritičnog prečnika od sadržaja ugljika u čeliku koji sadrži bor [1]

Poseban uticaj bora je na porast prokaljivosti za strukturu sa 100% martenzita što se može vidjeti poređenjem linija na sl. 3.10 sa linijama na sl.3.8



Sl. 3.10 Uticaj dodatka bora na odnos idealnih kritičnih prečnika pri 50% i 100% martenzita [1]

Provjeravana je tačnost Grossmannove metode i nađeno je da postoje odstupanja sračunatih vrijednosti od dobijenih ispitivanjem. Razlog za ovo je, prije svega, posljedica konvencije da se prokaljivost određuje na osnovu tvrdoće strukture sa 50% martenzita. Dok je kod potpunog kaljenja (sa 100% martenzita), tvrdoća gotovo nezavisna od legirajućih elemenata, dotle će kod strukture sa 50% martenzita legirajući elementi imati znatan uticaj na tvrdoću nemartenzitnog dijela strukture. Ovo se vidi na sl. 3.11 na kojoj šrafirana oblast pokazuje uticaj legirajućih elemenata na tvrdoću strukture sa 50% martenzita.



Sl. 3.11 Uticaj sadržaja ugljika na tvrdoću strukture sa 50% martenzita. Puna linija za ugljenični čelik a šrafirana oblast za nisko legirane i srednje legirane čelike. Isprekidana linija za legirane čelike [1]

Druga grupa ispitivanja je pokazala da način dezoksidacije čelika ima veliki uticaj na tačnost Grossmannovih faktora, a posebno je relativno veliko odstupanje u slučaju vrlo malih dodataka legirajućih elemenata. Iz ovoga proizlazi da je potreban još velik broj ispitivanja da bi se tačnije odredili Grossmannovi množitelji za pojedine elemente.

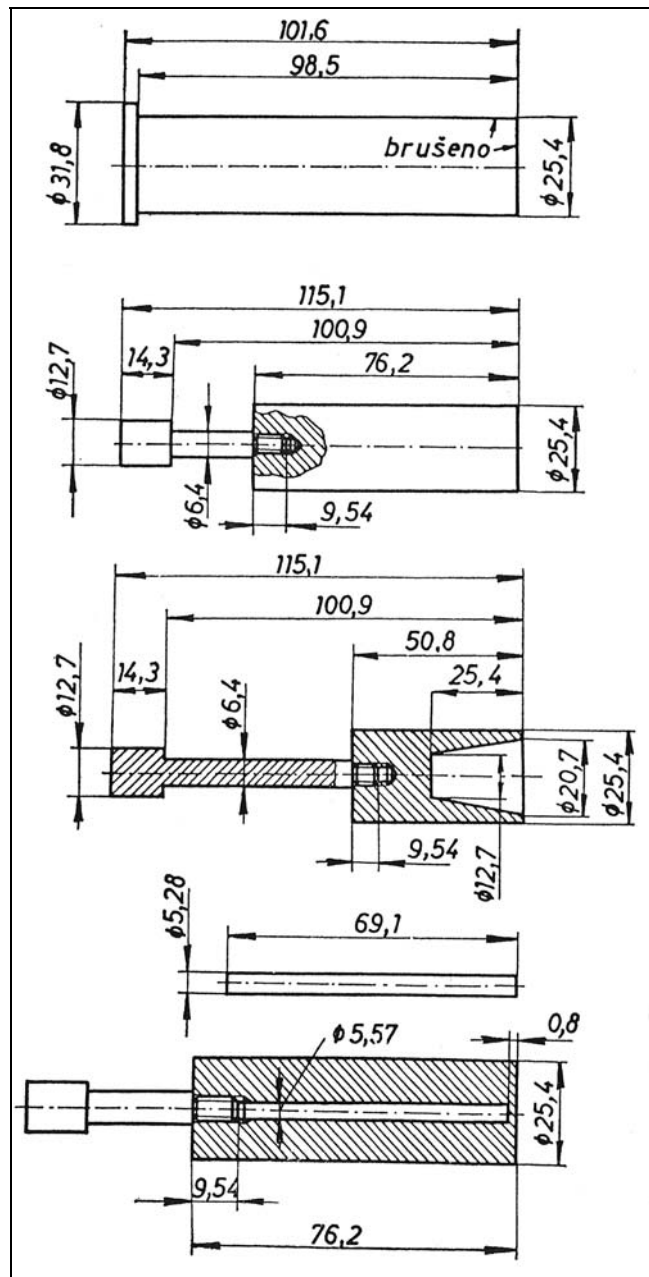
Praktično izvođenje Grossmannove probe na prokaljivost se izvodi na cilindričnoj epruveti obrađenoj stepenasto za razne veličine prečnika koja se kali pod određenim standardnim uslovima. Mjerenjem tvrdoće u jezgri presječenih cilindričnih uzoraka raznih prečnika, određuje se kritični prečnik pri kome tvrdoća odgovara tvrdoći strukture datog čelika za 50% martenzita. Pri ovome je način hlađenja definisan sa $H = \text{const}$. Kao što se vidi, postupak određivanja kritičnog prečnika po Grossmannu je složen i skup. Stoga je tražen brži i jeftiniji postupak a naročito takav kod kojeg se neće mijenjati uslovi hlađenja. Takav postupak je predložio 1939. godine, W. Jominy koji je svoju metodu zasnovao na čeonom hlađenju cilindričnog uzorka sa definisanim uslovima hlađenja.

Jominyjeva proba omogućuje da se dobije slika o prokaljivosti čelika samo jednom probom kaljenja pa je stoga i uvedena kao tehnološka proba svagdje u svijetu pa i kod nas je definisana standardom BAS EN ISO 642:2001 – ispitivanje prokaljivosti čelika čeonim kaljenjem (Jominy ispit), odnosno prije JUS C. A2. 051/1959.

Jominyjeva proba se izvodi sa standardnim ili posebnim oblicima epruveta koje su prikazane na sl. 3.12.

Na sl. 3.13 prikazan je šematski postupak kaljenja Jominyjeve probe. Uslovi hlađenja su normirani na taj način što se čelo probe hladi mlazom vode koji ističe iz cijevi slobodnog prečnika 1/2 cola (12,7 mm) čiji je otvor udaljen od čela epruvete također 1/2 cola. Brzina isticanja vode je definisana visinom stuba vode koji ističe slobodno iz cijevi (bez epruvete) a koja treba da bude 63,5 mm. Potrebna je temperatura vode za hlađenje od $24 \pm 2,5^\circ\text{C}$. Uzorak treba da bude zagrijan na temperaturu kaljenja i na njoj žaren 30 minuta pri čemu se moraju preduzeti mjere protiv oksidacije površine i njenog razugljičenja. Epruveta se iz peći mora, u

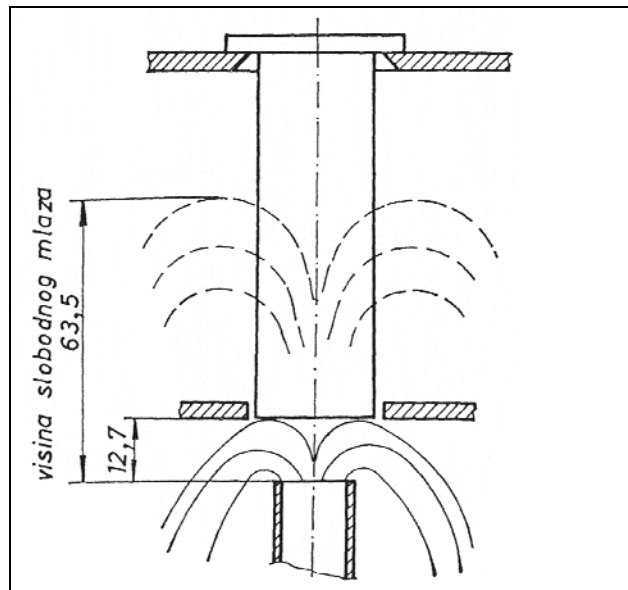
što kraćem vremenu, postaviti na uređaj za kaljenje. Poslije hlađenja do sobne temperature na cilindričnoj površini epruvete se obrusi na dubini $0,3\text{ mm}$ ravna površina sa jedne i druge strane na kojima se mjeri tvrdoća duž izvodnice cilindra polazeći od kaljenog čela.



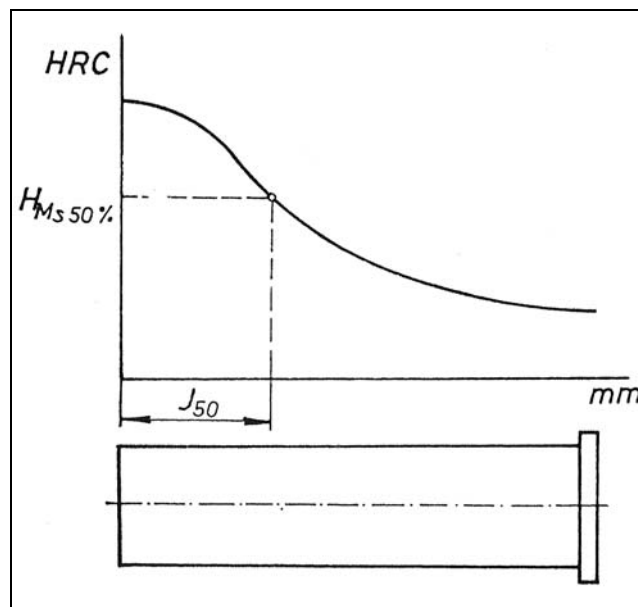
Sl. 3.12 Oblici epruveta za Jominyjevu probu: a) standardni oblik; b) skraćena epruveta; c) epruveta L za površinski kaljene čelike ili cementirane; d) za uzorke kod kojih postoje samo mali prečnici [1]

Rezultati mjerenja tvrdoće nanose se na dijagram u zavisnosti od rastojanja od čela probe. Primjer jedne snimljene linije tvrdoća kod Jominyjeve probe dat je na sl. 3.14.

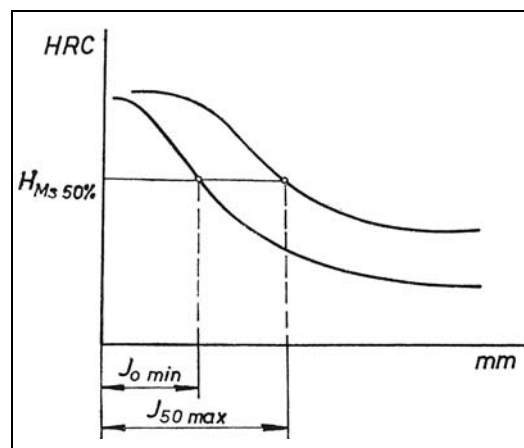
Iz karaktera linije tvrdoća se može dobiti slika o prokaljivosti ali postojala je težnja da se prokaljivost izrazi samo jednim brojem, kao kod Grossmannove metode. Tako je utvrđena prokaljivost po Jominyju kao ono rastojanje u mm od čela probe koje ima tvrdoću jednaku tvrdoći istog kaljenog čelika sa 50% martenzita u strukturi (J_{50}).



Sl. 3.13 Šema kaljenja Jominyjeve probe [1]



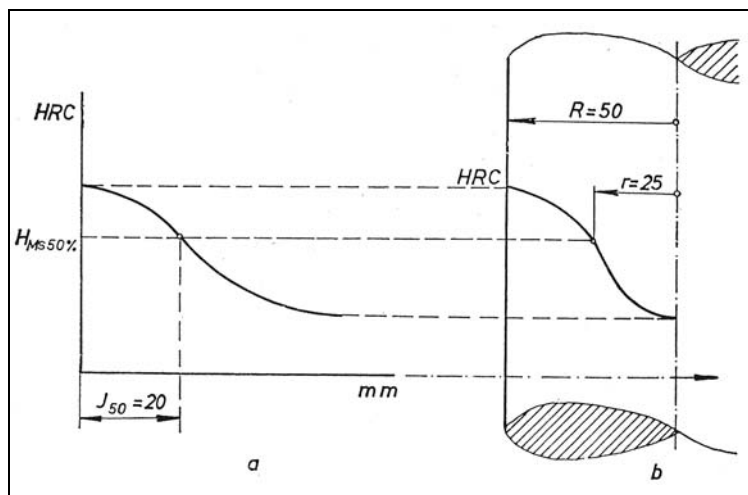
Sl. 3.14 Primjer karakteristične linije tvrdoće Jominyjeve probe [1]



Sl. 3.15 Šema Jominyjeve trake jednog čelika po standardu [1]

Pošto su kod standardnih čelika hemijski sastavi propisani sa određenim tolerancijama sadržaja pojedinih elemenata, to će kod iste vrste čelika postojati razlika u Jominyjevim linijama tako da će se samo za jedan čelik iz određene šarže moći nacrtati linija pada tvrdoća, dok će se za sve moguće čelike jednog standardnog kvaliteta dobiti, umjesto linije, traka manje ili veće širine u kojoj će ležati sve vrijednosti za dati čelik. Naročito veliki uticaj na širenje ove trake imaju postupci proizvodnje čelika a posebno način i sredstvo dezoksidacije. Šema ovakve trake je dana na sl. 3.15.

U tehnički razvijenim zemljama se često proizvode čelici koji najčešće pripadaju standardnim čelicima ali kod kojih je kontrola sastava mnogo strožija i jako kontrolisan postupak topljenja (na primjer u SAD čelik sa hromom, niklom i molibdenom sa oznakom 8640 kao običan čelik za poboljšavanje a posebno pripremljen uz kontrolu prokaljivosti nosi oznaku 8640 H). Kod ovih kvaliteta čelika se znatno sužava traka a posebno se donja linija penje. Pri ovome, treba imati u vidu da je čelik koji ima Jominyjevu liniju blizu gornje linije povoljniji kod obrade plastičnim deformisanjem i da se povoljnije ponaša u pogledu postizanja osobina poslije otpuštanja. Ako se želi povišena prokaljivost, proces topljenja se tako vodi da se ide ka minimumu sadržaja ugljika a ka povećanom sadržaju legirajućih elemenata, razumije se u granicama dopuštenim standardom za datu vrstu čelika. Ovdje upravo dolazi do odstupanja kod specijalno pripremljenih čelika (na primjer sa oznakom H u SAD) kod kojih se čak i prelaze okviri sastava propisanih standardom za običan kvalitet.



Sl. 3.16 Odnos linije prokaljivosti i linije rasporeda tvrdoće u cilindričnom komadu: a) linija prokaljivosti; b) linija rasporeda tvrdoće [1]

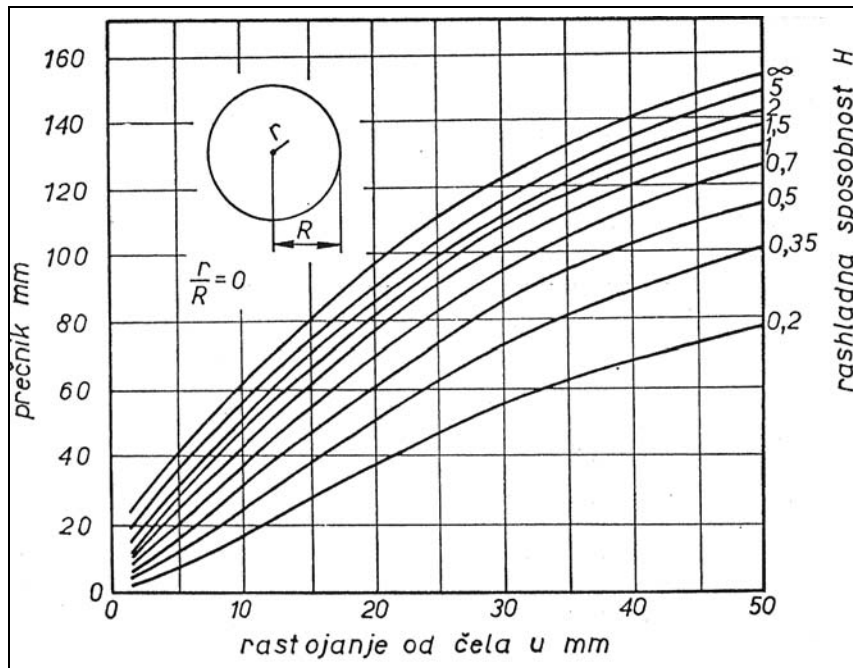
Podatak o prokaljivosti za jedan čelik, dat sa rastojanjem J_{50} izraženim u milimetrima pokazuje, kao što je rečeno, rastojanje od čela Jominyjeve probe na kome tvrdoća odgovara strukturi sa 50% martenzita. Ako od istog čelika imamo cilindričan komad ma kog prečnika poslije kaljenja, u opštem slučaju će nastati raspored tvrdoća, polazeći od površine komada ka jezgru kao što je to prikazano na sl. 3.16.

Sa ove slike se vidi da je za tvrdoću 45 HRC koja odgovara strukturi sa 50% martenzita rastojanje od čela Jominyjeve probe 20 mm a da se ta tvrdoća postiže kod stvarnog komada od istog čelika (hlađenog na određeni način) na rastojanju od jezgra komada 25 mm. Kako je radijus komada $R = 50$ mm, a dubina na kojoj je pomenuta tvrdoća je na radijusu $r = 25$ mm, to će za ovu tvrdoću dubinski odnos biti $r : R = 0,5$. J. Lamont je izradio za ovaj slučaj dijagrame zavisnosti prečnika stvarnog komada od veličine prokaljivosti po Jominyju i uslova hlađenja i za jedan određen dubinski odnos r / R . Ovi dijagrami za razne odnose r / R su dati na sl. 3.17 do 3.27.

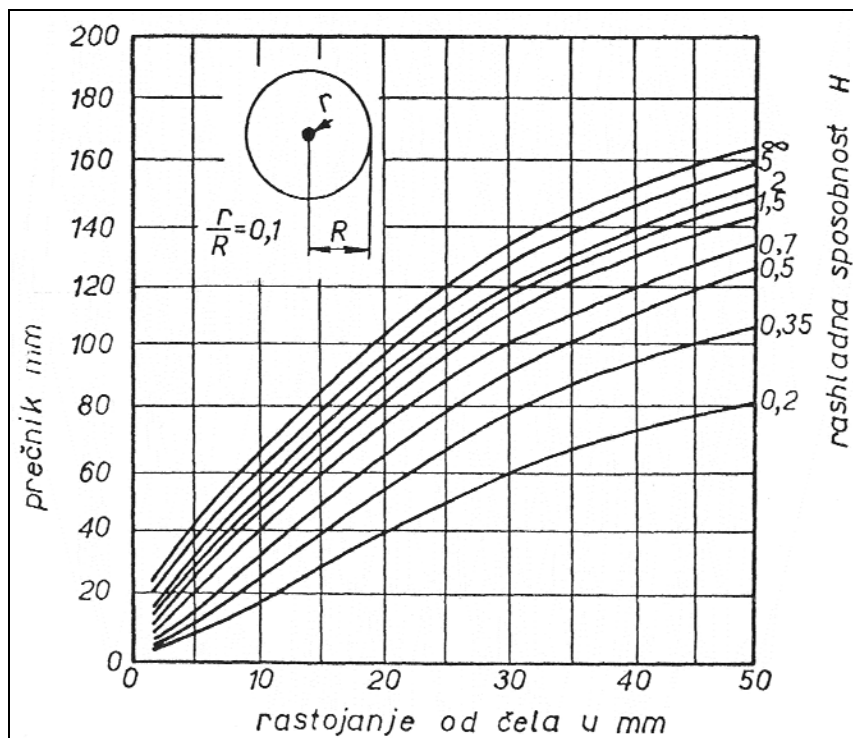
Na sl. 3.22 može se vidjeti da će u primjeru prikazanom na sl. 3.16, za prokaljivost čelika 20 mm i prečnik komada 100 mm, biti ostvaren odnos $r : R = 0,5$ ako se hlađenje obavi tako da je $H = 2$ (hlađenje u vodi uz srednje kretanje komada). Navedeni dijagrami daju mogućnost

rješavanja niza važnih zadataka u tehnologiji termičke obrade a, također, i pri izboru čelika za određenu prokaljivost. Mogućnosti koje pruža ovaj postupak su sljedeće:

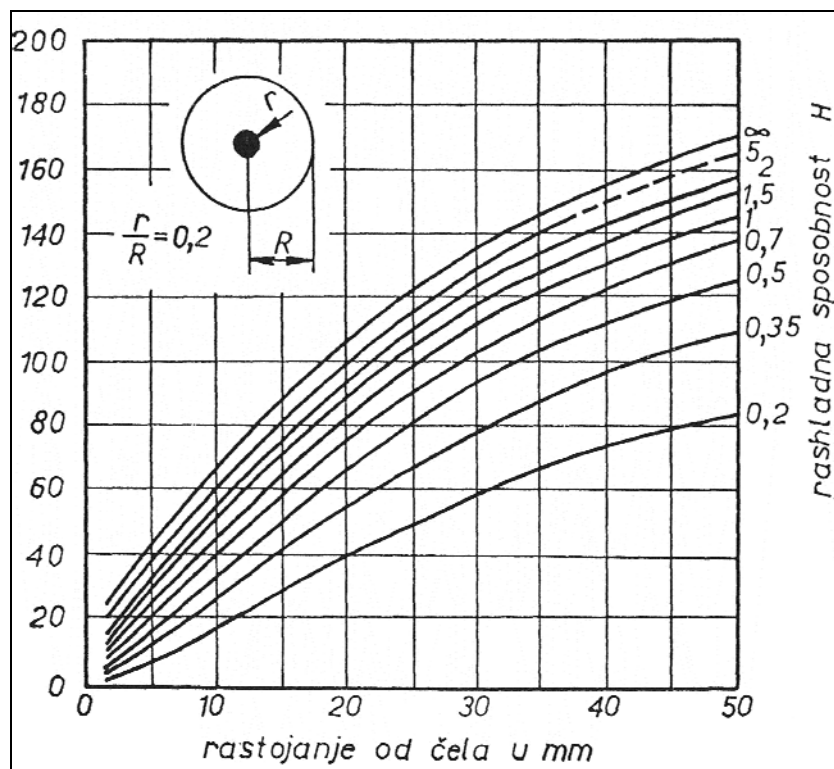
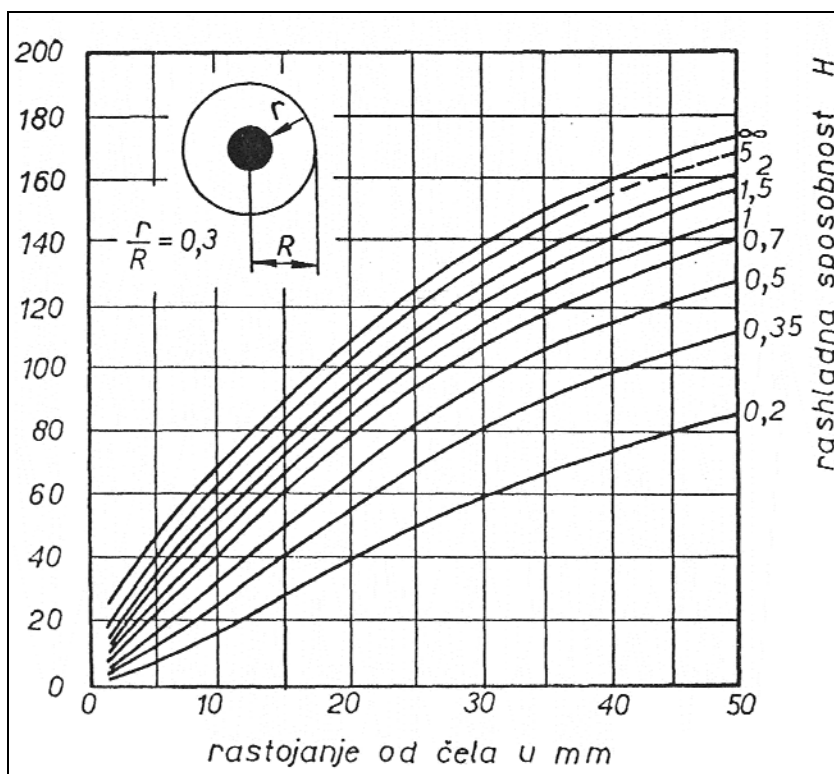
1. Za zadati prečnik komada i zadati čelik poznate prokaljivosti mogu se, za neophodni dubinski odnos, utvrditi uslovi hlađenja.
2. Za zadati prečnik komada i dopuštene uslove hlađenja, s obzirom na oblik i veličinu komada, može se preko neophodne prokaljivosti izabrati čelik.
3. Kod zadanog čelika i prečnika komada, uz poznate uslove hlađenja, može se utvrditi dubinski odnos tvrdoća itd.

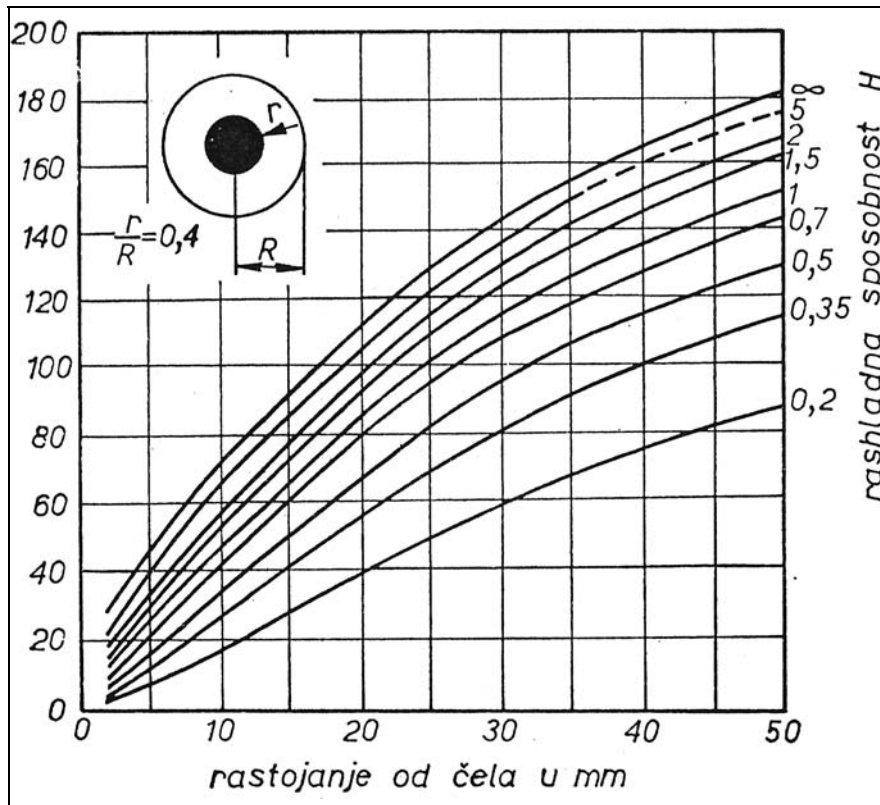


Sl. 3.17 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0$ [1]

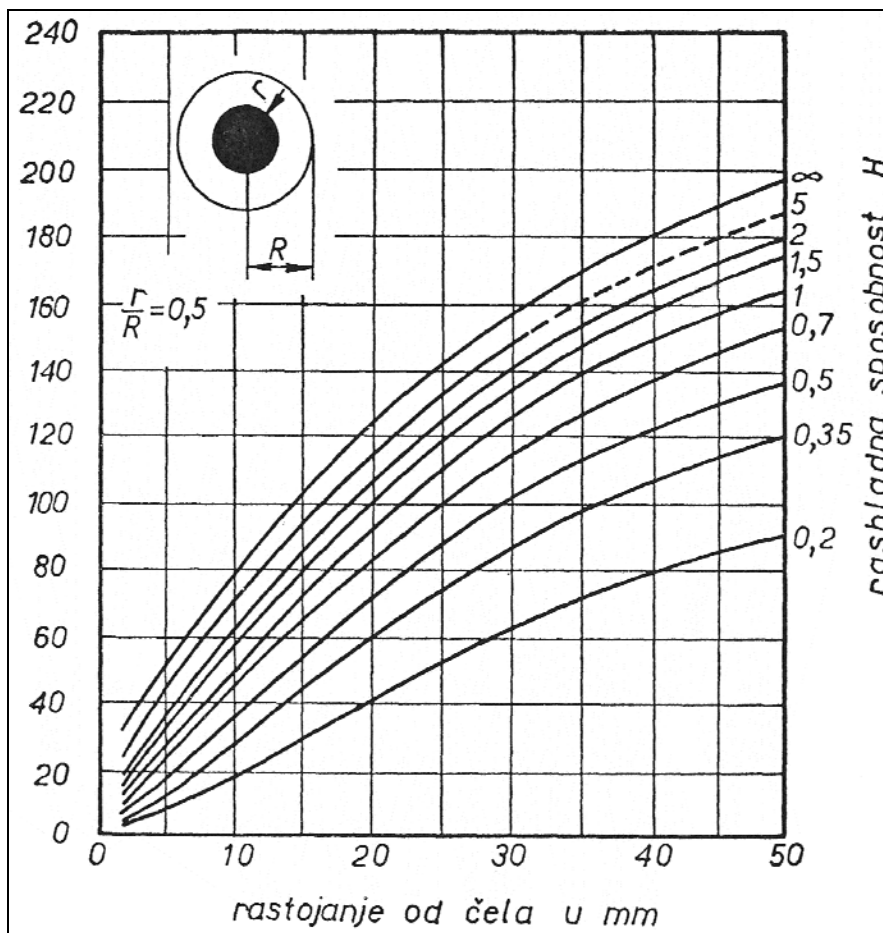


Sl. 3.18 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,1$ [1]

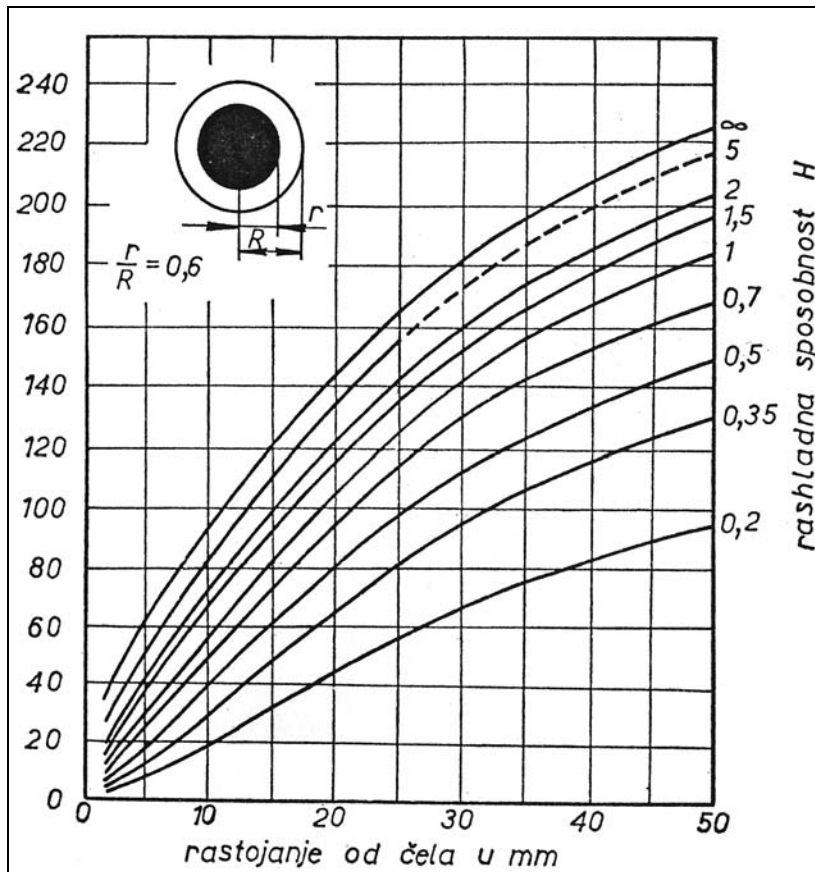
Sl. 3.19 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,2$ [1]Sl. 3.20 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,3$ [1]



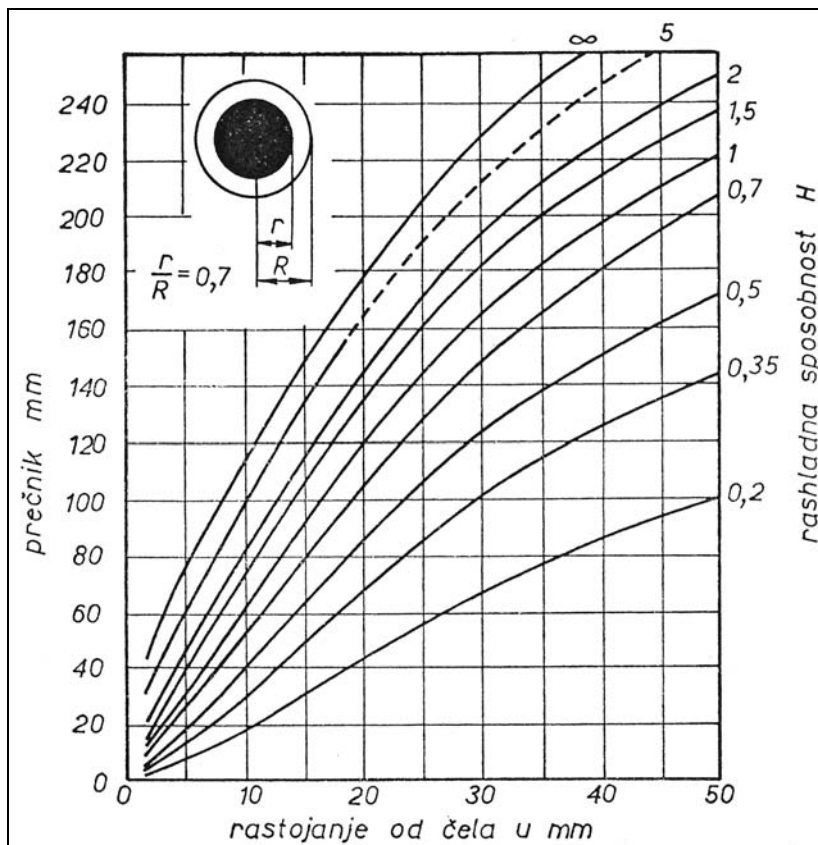
Sl. 3.21 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,4$ [1]



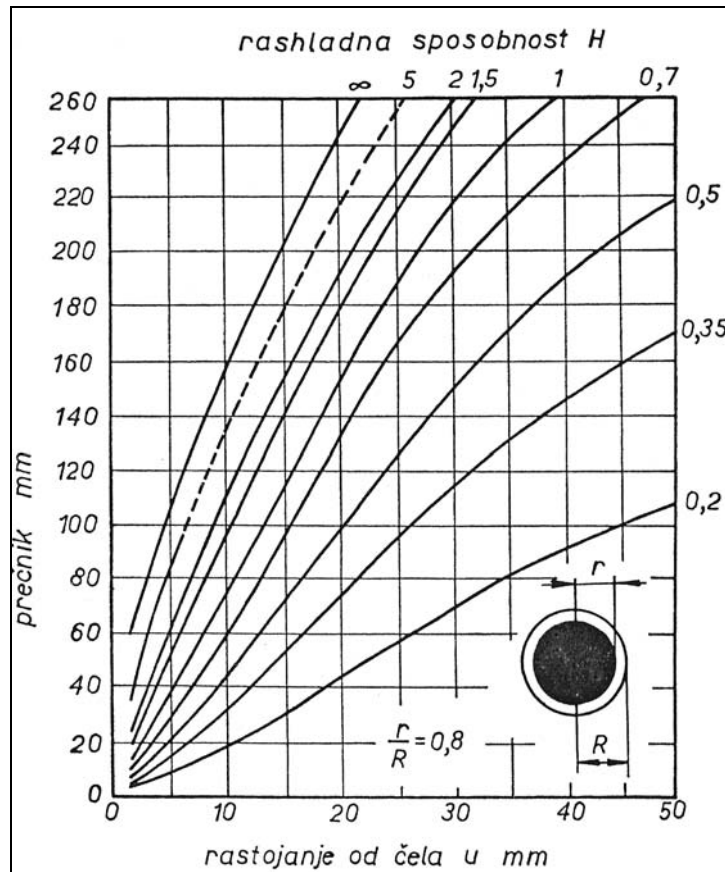
Sl. 3.22 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,5$ [1]



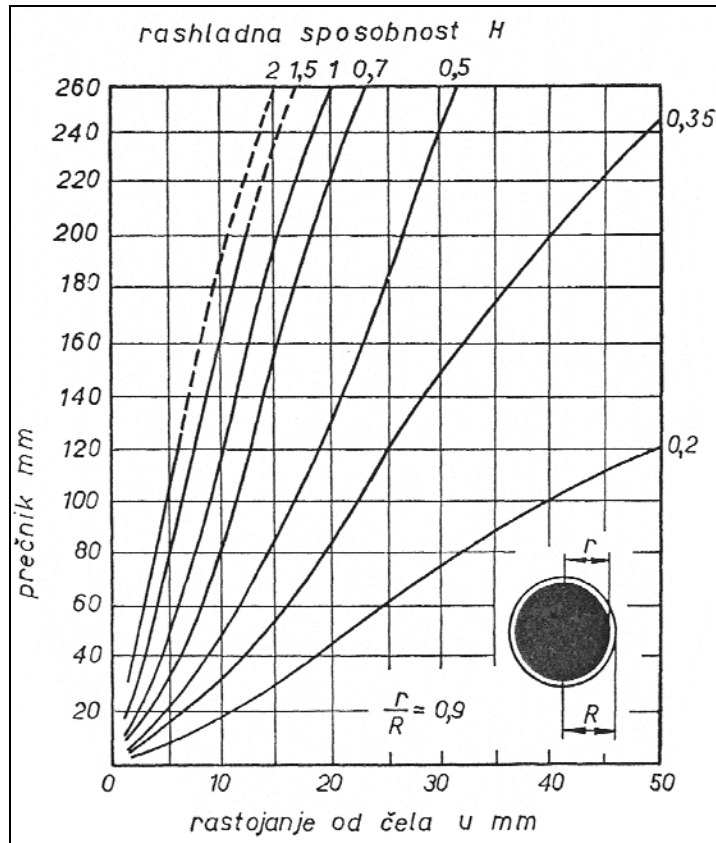
Sl. 3.23 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,6$ [1]



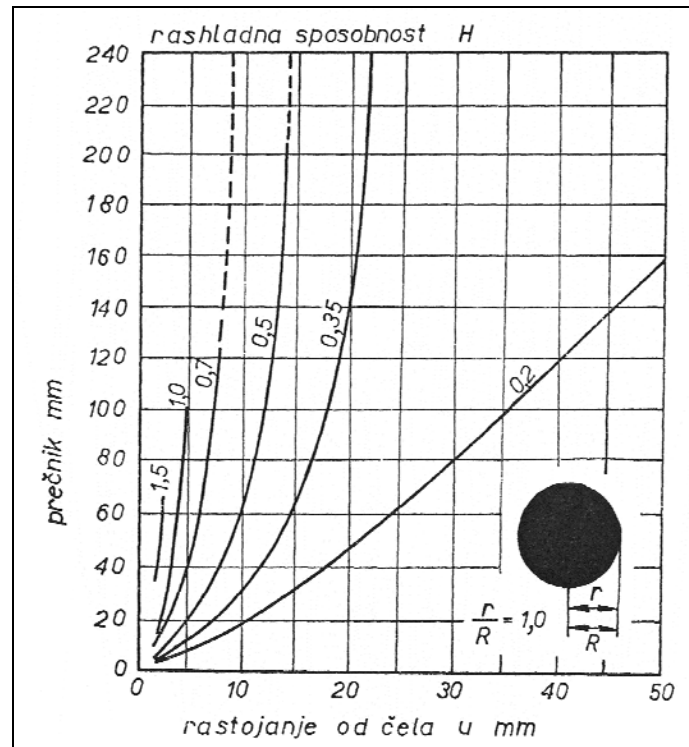
Sl. 3.24 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,7$ [1]



Sl. 3.25 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,8$ [1]



Sl. 3.26 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 0,9$ [1]



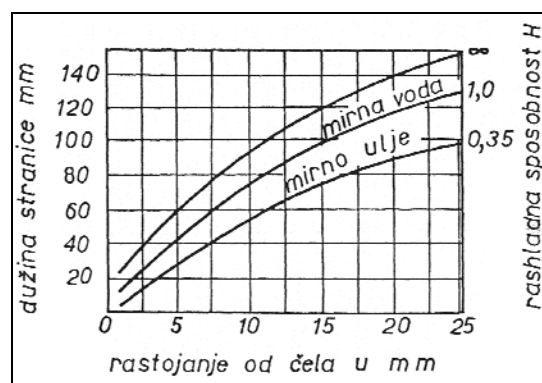
Sl. 3.27 Odnos prečnika komada i prokaljivosti za $r : R = 1$ [1]

J. Lamont je dao podatke i za druge karakteristične oblike komada ali sa znatno manje različitih uslova hlađenja i oni su dati na sl. 3.28, 3.29, 3.30. Ovi odnosi su svedeni na sredinu (jezgro) komada slično kao kod cilindrične probe za $r : R = 0$.

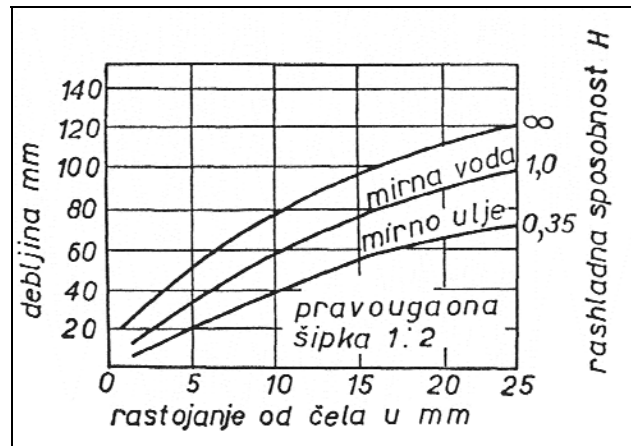
U slučaju poznavanja tačnih uslova hlađenja komada može se odnos prokaljivosti i stvarnog komada razmatrati i preko poznatih brzina hlađenja koje se uspostavljaju kod čeonog hlađenja Jominyjeve probe na pojedinim rastojanjima od čela. Za ovo se može koristiti dijagram na sl. 3.31 koji daje izmjerene brzine hlađenja na pojedinim rastojanjima od čela Jominyjeve probe hlađene u standardnim uslovima.

Isto tako je utvrđen eksperimentalno i odnos između prokaljivosti i idealnog kritičnog prečnika koji je dat na sl. 3.32.

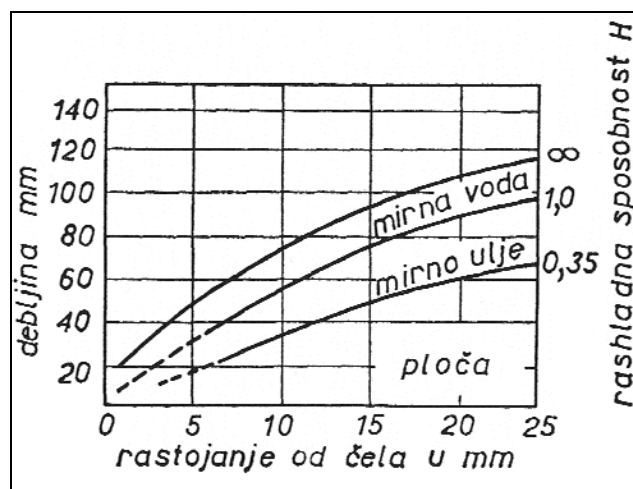
Povoljne osobine Jominyjeve probe su, pored lakog i jeftinog izvođenja, i velika pouzdanost rezultata koji se postižu na istom čeliku u raznim laboratorijama. Moguća je primjena iste probe i kao tehnološke probe pri proizvodnji čelika, jer je pokazano da livena struktura daje istu vrijednost prokaljivosti kao i struktura poslije obrade plastičnim deformisanjem. Ovo omogućuje izvjesne korekcije čelika još za vrijeme procesa proizvodnje.



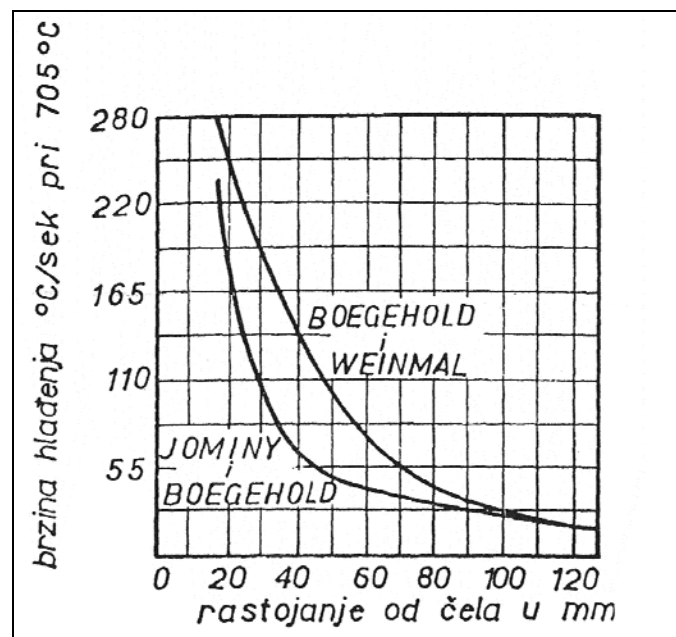
Sl. 3.28 Odnos veličine stranice kvadratne šipke i prokaljivosti za razne uslove hlađenja (svedeno na sredinu šipke – jezgro) [1]



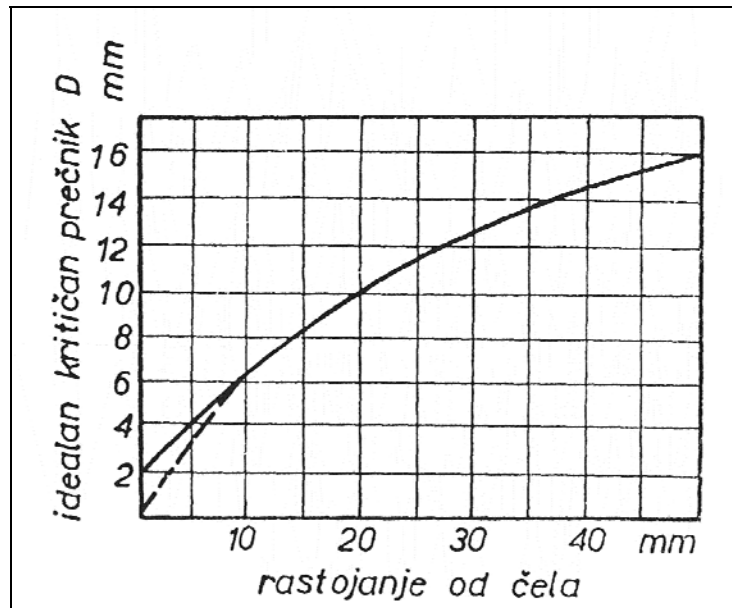
Sl. 3.29 Odnos debljine pravougaonog presjeka (1 : 2) i prokaljivosti za razne uslove hlađenja (svedeno na sredinu šipke – jezgro) [1]



Sl. 3.30 Odnos debljine ploče i prokaljivosti za razne uslove hlađenja (svedeno na sredinu ploče – jezgro) [1]

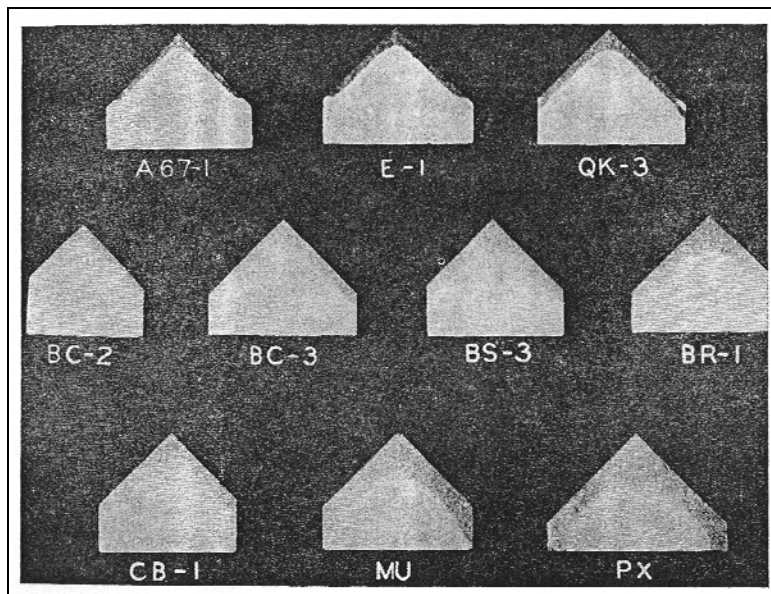


Sl. 3.31 Zavisnost brzine hlađenja od rastojanja od čela Jominyjeve probe prema raznim autorima [1]



Sl. 3.32 Odnos idealnog kritičnog prečnika i prokaljivosti po Jominyju [1]

Teškoća primjene prokaljivosti, u slučajevima kada su potrebne vrlo tačne brzine hlađenja, dolazi do mogućih grešaka, naročito u slučajevima kada je linija prokaljivosti sa malim padom (položena ili gotovo horizontalna), što je slučaj kod čelika koji imaju male kritične brzine hlađenja (na primjer čelici koji se kale na vazduhu). Postoji težnja da se u ovakvim slučajevima koriste druge metode za određivanje prokaljivosti. Takvu jednu probu je razvio B. Shepard za alatne visoko – ugljenične čelike. Ova proba prokaljivosti ima naziv *PV – test* (penetration – velocity) a odlično je primjenjiva kod čelika koji imaju idealni kritični prečnik između 12,7 i 19,1 mm. Metoda se zasniva na pojavi da grubo uglaćan i nagrizen presjek kaljenog komada, koji u strukturi sadrži manje od 50% martenzita, potpuno mijenja svoj izgled. Probni uzorak dužine 28,6 mm sa zaoštrenim vrhom pod uglom od 90° hladi se pod određenim uslovima mlazom vodenog rastvora soli tako da mlaz pada na ugao klina. Poslije kaljenja uzorak se presijeca i grubo polira pa nagriza. Pri ovome su moguće slike prokaljivosti prikazane na sl. 3.33.



Sl. 3.33 Izgled standardnih slučajeva PV – testa [1]

Pod prokaljivošću se podrazumijeva kod PV – testa rastojanje u *mm* od vrha klina do mjesta na kome prestaje zona sa 50% martenzita koja se lahko utvrđuje mjerenjem tvrdoće na tom mjestu koja iznosi 55 HRC (598 HV 10). Definisne veličine prema uzornim slučajevima sa sl. 3.33 su sljedeće:

A 67	0,162 <i>cola</i>	4,12 <i>mm</i>
Qk 3	0,227 "	5,77 <i>mm</i>
BC 3	0,256 "	6,40 <i>mm</i>
BR 1	0,342 "	8,68 <i>mm</i>
MU	0,446 "	11,33 <i>mm</i>

4. LITERATURA

- [1] Pantelić I. : Tehnologija termičke obrade čelika 1., Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 1974.
- [2] Haračić N. : Cementacija čelika za zupčanike mjenjača, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica, 2003.
- [3] Hadžipašić A. : Termička obrada, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica, 1993.
- [4] *** Čelik – Ispitivanje prokaljivosti čeonim kaljenjem (Jominy ispitivanje) BAS EN ISO 642 : 2001 (EN ISO 642 : 1999.)
- [5] *** Čelik – Ispitivanje prokaljivosti čeonim kaljenjem (Jominy ispitivanje) JUS C. A2. 051/1959.