

## DUBOKO HLAĐENJE

Duboko hlađenje je proces koji ima veliki značaj za niz industriskih primena u industriji kao naprimer :

Avioindustrija	Prerada drveta	Autoindustrija
Vojna industrija	Mašingradnja	Rudarstvo
Proizvodnja papira	Prehrambena industrija	Medicinska oprema
Prerada plastike	Alatna industrija	Motosport

Šta je razlog da se duboko hlađenje primenjuje u toliko različitih oblasti. Pre svega to su uštede u pogledu :

- Povećanja trajnosti radnih predmeta – uglavnom se kreću oko 300 do 400%.
- Smanjuju se trokovi održavanja
- Povećava se produktivnost
- Poboljšanje funkcionalnost – primer moto trka, golf štapova i td.

Šta je to što se menja primenom dubokoh hlađenja:

- ◇ Povećanje otpornosti na habanje
- ◇ Povišenje čvrstoće materijala
- ◇ Dobijanje dimenzionalne stabilnosti
- ◇ Promene u strukturi – sitnije zrno.
- ◇ Posebno se povišava otpornost na abrazivno habanje
- ◇ Smanjuju se vibracije
- ◇ Povišenje tvrdoće
- ◇ Lakša obrada – naknadno brušenje ili poliranje

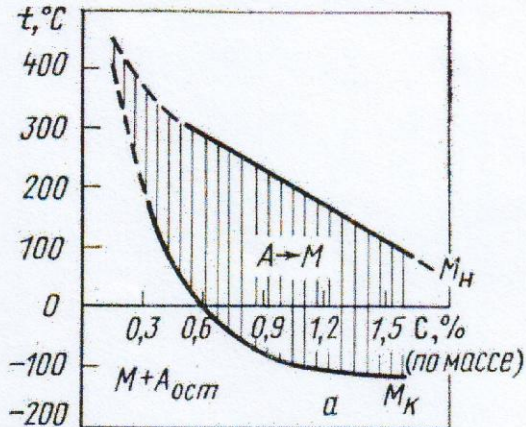
U ovoj knjizi od posebnog interesa je uticaj dubokog hlađenja na alate. U tabeli T1 je dat pregled nekih iskustava sa alatima, prema podacima američke industrije:

Tabela T1

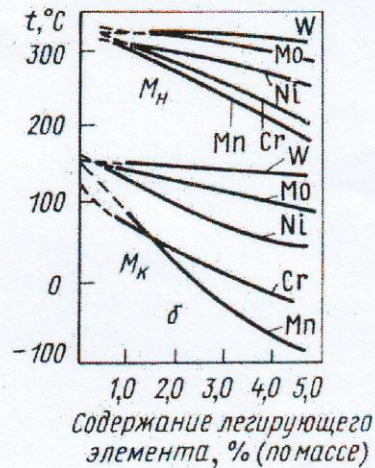
Tip alata	Tip kompanije	Tip materijala	Rezultat
Burgije	Avioindustrija	M42, M7 , C2	300%
Glodalo	Avioindustrija	M7	250%
Alat za ozubljenje	Proizv. transmisija	HSS sa TiN	350%
Provlakač	Alatnica	HSS	300%
Probijač	Proizv. transmisija	M7	600%
Čeono glodalo	Avioindustrija	C2 tvdi metal	400%
Nož	Prerada plastike	M7	600%
Valjak	Proizv. papira	M7	400%
Razvrtač	Alatnica	C2 tvrdi metal	600%
Alat - livenje pod prit	Livnica		300%
Zubarske burgije	Zubar. ordinacija	400 - prokron	500%
Testera - lančasta	Šumarija		400%
Alat za prosecanje	Metalni nameštaj	D2	1000%

## Osnovni fenomeni na kojima se zasniva proces

Duboko hlađenje je postupak kod kojeg se snižava količina zaostalog austenita u strukturi nakon kaljenja. Prilikom kaljenja kod čelika sa povišenim sadržajem ugljenika hlađenje na sobnu temperaturu nije dovoljno da dođe do potpune transformacije u martenzit. Temperature početka ( $M_s$ ) i temperatura kraja ( $M_f$ ) martenzitne transformacije suštinski zavise od sadržaja ugljenika u čeliku – slika 1.



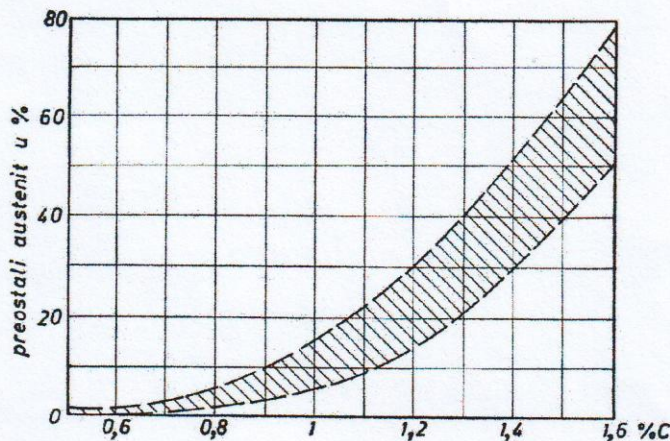
Sl. 1.



Sl. 2.

Prema nekim izvorima već 0,6% C ili prema drugim 0,65% C je granična vrednost kada temperatura  $M_f$  pada ispod 0°C. Kod legiranih čelika uticaj sadržaja legirajućih elemenata je veoma složen, posebno kod alatnih čelika koji su višestruko legirani. Na slici 2 dat je grafički prikaz uticaja legirajućih elemenata na tačku  $M_s$  (gore) i tačku  $M_f$  (dole).

Uticaj sadržaja ugljenika u čeliku na udeo zaostalog austenita pri kaljenju može se videti na slici 3. Naravno da tu treba uzeti u obzir i uticaj temperature kaljenja, trajanje zadržavanja na toj temperaturi, način hlađenja i td. Zato je data šrafirana oblast u kojoj se najčešće kreću dobijene vrednosti.

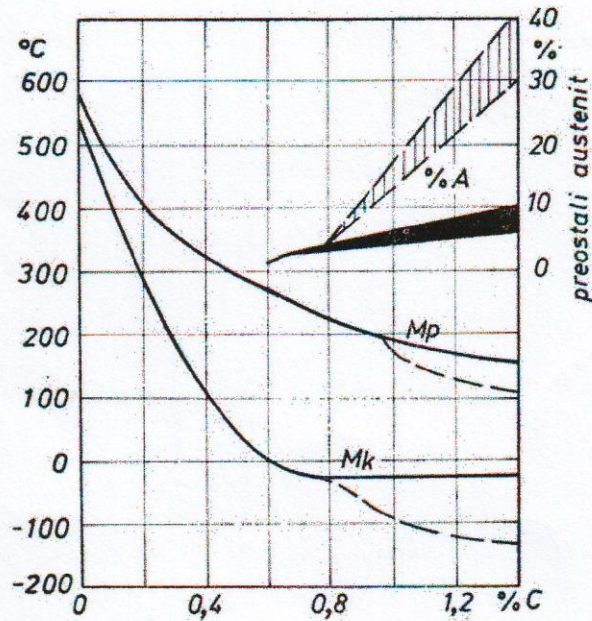


Sl. A.41. Uticaj sadržaja ugljenika na količinu preostalog austenita u ugljeničnom čeliku.

Sl. 3

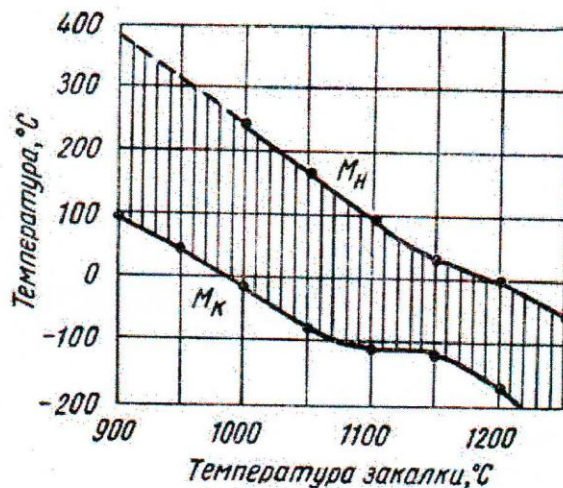
Količinu zaostalog austenita povišavaju Mn, Cr i Ni, dok Al i Co smanjuju udeo zaostalog austenita.

Kod alatnih čelika koji sadrže ugljenjik iznad 0,8%, veliki uticaj na sadržaj zaostalog austenita ima temperatura kaljenje. Kada se kali sa niskih temperatura, koje prelaze  $A_1$  liniju za 20 °C, tada nema rastvaranja sekundarnih karbida u strukturi austenita, tako da se nakon kaljenja dobija malo zaostalog austenita (zacrnjena oblast na slici 4), tako da se kod čelika sa 1,4%C dobije do 10% Az. Ako se kali sa temperatura iznad  $A_3$ , tada se sekundarni karbidi rastvaraju u austenitu, spaštaju se linije Ms i Mf, u u strukturi nakon kaljenja preostaje i do 40% Az – označeno isprekidanim linijama, odnosno šrafirana oblast.



Sl.4.

Uticaj temperature kaljenja još je značajniji kod visoko legiranih čelika, kao naprimer kod čelika sa 1,3%C ; 12%Cr i 0,8%V. Ovde se može desiti da se Ms temperatura spusti čak do 0°C, a da Mf padne na -200°C, kao što se vidi na slici 5.



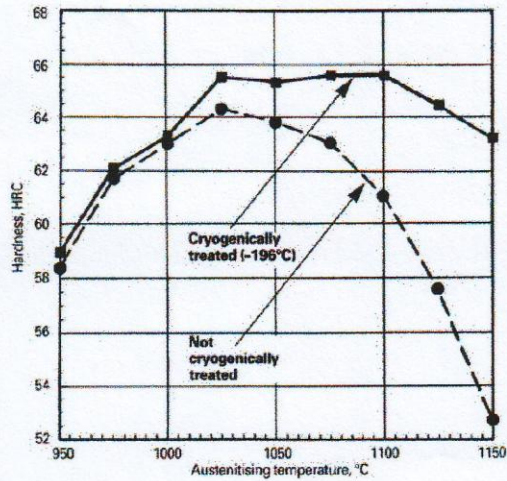
Sl. 5.

Posebno je bitna brzina hlađenja između Ms i Mf temperature za dati čelik. Sporo hlađenje pospešuje udeo zaostalog austenita. Ako se pri tome proces hlađenja potpuno zaustavi (držanjem uzorka na sobnoj temperaturi ili slično) može doći do efekta stabilizacije austenita. Sa druge strane, naglo hlađenje od Ms do Mf može dovesti do pojave izuzetno velikih unutrašnjih napona sa svim negativnim posledicama (deformacija, pucanje). Stabilizacija austenita jako zavisi od temperature na kojoj je izvršen prekid hlađenja, odnosno od procenta transformacije podhlađenog austenita u martenzit. Na primer, ako je transformisano 90 do 95% dovoljan je prekid hlađenja u trajanju od desetak minuta i da se više daljim nastavkom hlađenja ne može više zaostali austenit pretvoriti u martenzit. Kod 85% transformacije taj prekid može biti i nekoliko časova, a za 70-75% transformacije prekid može biti i više meseci. Naravno da ovaj fenomen u određenoj meri zavisi od vrste čelika. Na primer, kod alatnog ugljeničnog čelika Č1840, ako se hlađenje prekina na sobnoj temperaturi i komad naknadno proba duboko hladiti nakon dva dana, neće se dobiti prelaz u martenzit ni na temperaturi od minus 196°C. Ovde se pojavljuje veličina Ts – temperatura stabilizacije. Ako je ova temperatura niža od sobne, tada se može napraviti dugačka pauza između kaljenja i nastavka dubokog hlađenja. U protivnom, pauza mora biti što kraća, a preporučuje se od dvadesetak sekundi do maksimalno 15 minuta (što treba koristiti sa rezervom).

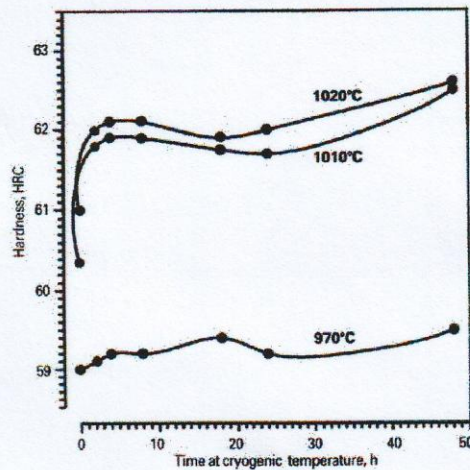
Zaostali austenit čini strukturu čelika mekanom i nestabilnom. Naprimer, ako u toku eksploatacije dođe do zagrevanja ( $> 150^{\circ}\text{C}$ ) deo zaostalog austenita se može transformisati u martenzit, što će biti praćeno promenom osobina i dimezija radnog predmeta. Stoga treba odmah nakon kaljenja izvršiti duboko hlađenje sa ciljem da se sav austenit transformiše u stabilniji oblik strukture.

Smanjenjem količine zaostalog austenita postižu se sledeća poboljšanja :

**Povišenje tvrdoće** – direktno zavisi od vrste čelika i udela zaostalog austenita u strukturi pre dubokog hlađenja. Na primer, kod ugljeničnog alatnog čelika sa 0,8%C i sadržajem zaostalog austenita od 3 do 5%, povećanje tvrdoće može biti samo 1 HRC. Kod legiranog čelika Č6440 sa sadržajem zaostalog austenita 10 do 17% može se dobiti porast tvrdoće i do 10 HRC. Tvrdoća jako zavisi i od temperature kaljenja, jer se pri tome suštinski menja sadržaj legirajućih elemenata u austenitu na temperaturi kaljenja. Tipičan primer je dat na slici 6, koji se odnosi na rezultate dobijene u istraživanju D.N.Collins-a i J. Dormer-a sa Univerziteta u Dublinu (HTM 1997.3.p-71-74), a odnose se na alatni čelik D2.



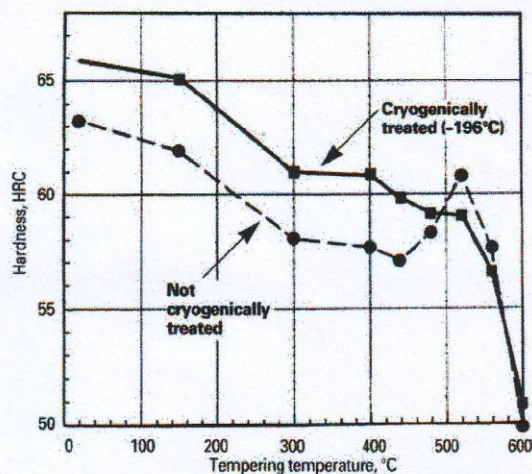
Sl. 6. Uticaj temperature kaljenja na tvrdoću čelika D2 – duboko hlađenog na  $-196^{\circ}\text{C}$  i naknadno otpuštenog na  $200^{\circ}\text{C}$ .



Sl. 7. Uticaj vremena držanja na  $-196^{\circ}\text{C}$  na rezultate tvrdoće čelika D2.

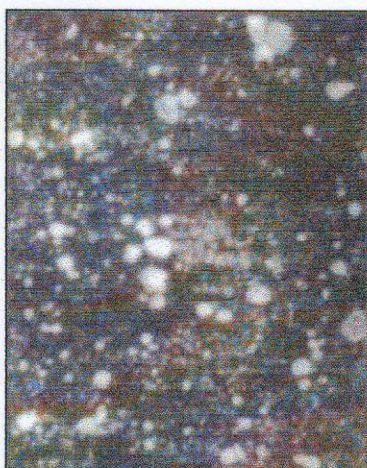
Prema rezultatima datim na slici 7 jasno se vidi da trajanje držanja uzorka u kontejneru sa tečnim azotom ima veliki uticaj na rezultate tvrdoće. Kratko držanje u trajanju ispod 5 časova ne treba koristiti. Maksimalne vrednosti tvrdoće će se dobiti za trajanje držanja 48 časova.

Tvrdoća često jako zavisi i od celokupnog procesa termičke obrade, odnosno od temperature na kojoj se vrši otpuštanje nakon dubokog hlađenja – slika 8. Rezultati su veoma interesantni jer se dobija odsustvo efekta sekundarne tvrdoće kod čelika D2, a koji je prisutan za termičku obradu bez dubokog hlađenja.

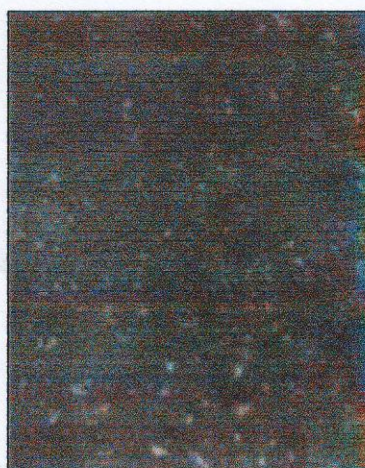


Sl. 8. Uticaj temperature i dubokog hlađenja na tvrdoću čelika D2.

**Povišenje čvrstoće materijala** – se može postići zbog dejstva nekoliko faktora koji su posledica dubokog hlađenja. Prvo, prilikom dubokog hlađenja postiže se smanjenje dimenzija zrna 50% do 75%. Kao drugo, dobija se mnogo bolja ravnomernost raspodele karbida. Treće, pri dubokom hlađenju nastaju mikro fini karbidi koji uspešnije povećavaju mehaničke osobine, posebno pri ispravnom naknadnom otpuštanju. Na slikama 9 i 10 je dat izgled strukture alatnog čelika nakon kaljenja (pre DH) i na kon postupka dubokog hlađenja.

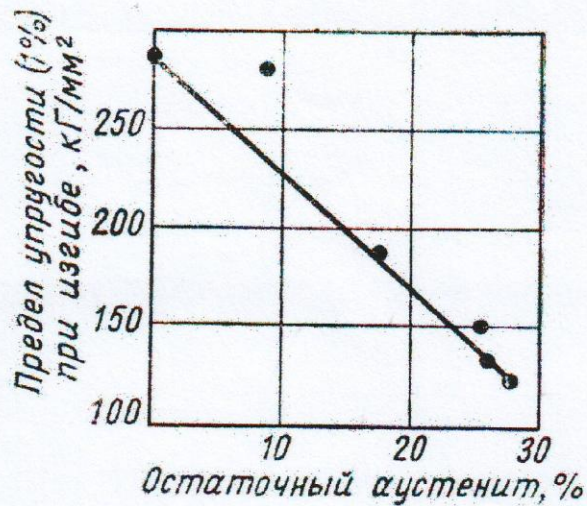


1000x pre  
Sl. 9



posle DH  
Sl. 10.

Na slici 11 data je zavisnost granice elastičnosti pri savijanju od sadržaja zaostalog austenita, kod ugljeničnog alatnog čelika sa 1%C. Potpuno se jasno vidi da čelik sa 25% Az ima skoro tri puta manju vrednost granice elastičnosti pri savijanju nego isti čelik bez zaostalog austenita.



Sl. 11.

Kod legiranih alatnih čelika, kao naprimer čelik sa : 0,7%C; 2%Mn; 0,25%Si; 1%Mo – prisustvo zaostalog austenita u kombinaciji sa temperaturom otpuštanja (slika 12.) imaju veliki uticaj na sniženje savojne čvrstoće. Kada se otpuštanje izvede na višljjoj temperaturi (200°C) ne sme biti ni 8% Az da bi se izbeglo naglo sniženje savojne čvrstoće, a kada se otpuštanje izvede na 150°C kritična vrednost je oko 15% Az.

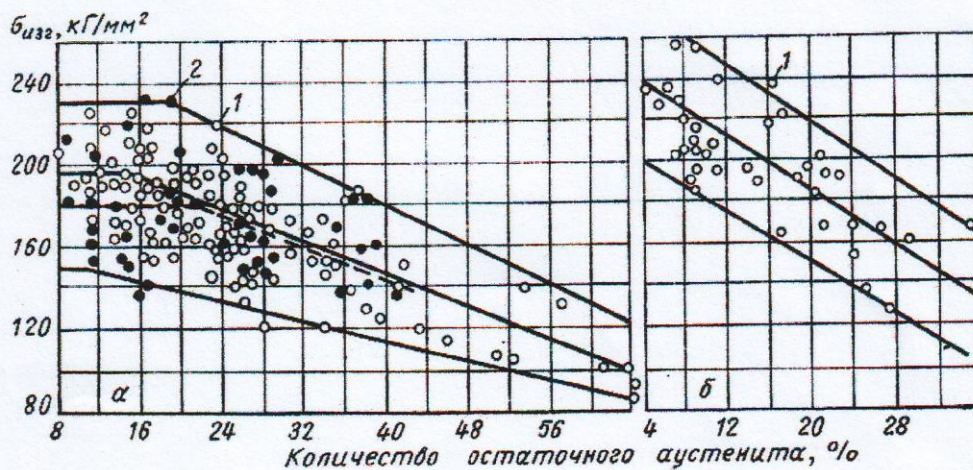
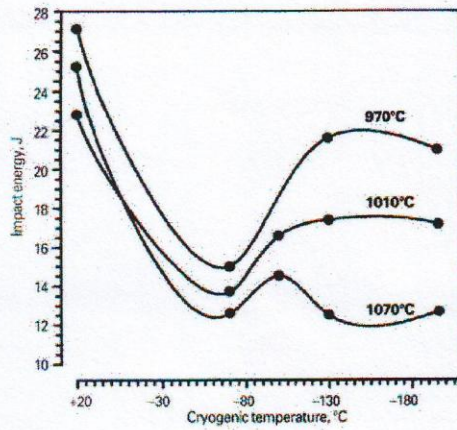


Рис. 94. Влияние количества остаточного аустенита на прочность стали типа 7ХГ2ВМ [138]:

а — отпуск при 150° С; б — отпуск при 250° С; 1 — закалка на воздухе; 2 — закалка в масле

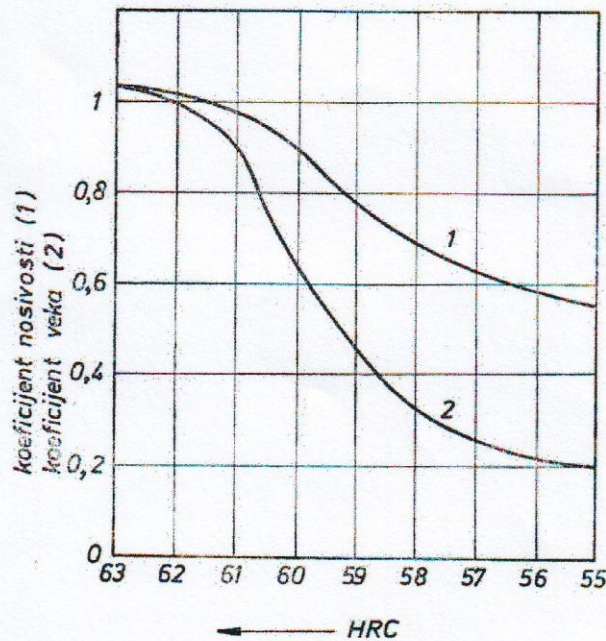
Sl. 12.

Interesantan je efekat temperature dubokog hlađenja na žilavost kod čelika D2 – slika 13. Sem temperature dubokog hlađenja, jako velik uticaj ima i temperatura kaljenja (austenitizacije).



Sl. 13. Žilavost čelika D2 u zavisnosti od temperature kaljenja i temperature dubokog hlađenja.

**Povišenje kontaktne nosivosti čelika** – koja se takođe često definiše kao otpornost na lokalnu plastičnu deformaciju. Poznato je da se već kod 2 do 5% Az pogoršava otpornost na lokalnu plastičnu deformaciju – slika 14.



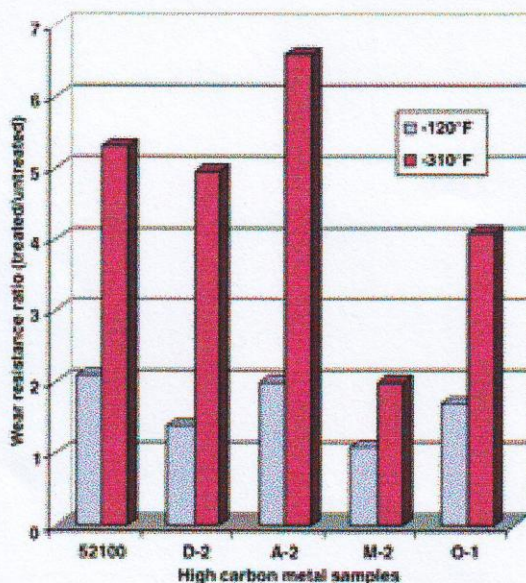
Sl. 14.

Otpornost na lokalnu plastičnu deformaciju može bitno da povisi tačnost alata, posebno onih koji su izloženi visokim opterećenjima i imaju male površine kontakta. Postoji jasno vidljiv uticaj tvrdoće na ovu vrednost, ali to jako zavisi od vrste čelika. Otpornost na lokalnu plastičnu deformaciju raste sa snižavanjem unutrašnjih zaostalih napona, profinjavanjem strukture i uklanjanjem Az. Poželjno je da karbidi budu što finiji i što ravnomernije



raspoređeni, a to se baš postiže najbolje sa dubokim hlađenjem, naravno kod čelika sa niskom tačkom  $M_f$ .

**Povišenje otpornosti na habanje** – posebno je uočljivo kod abrazivnog habanja. Na slici 15 dat je primer povišenja otpornosti na abrazivno habanje kod više vrsta alatnih čelika, i to uporedno za duboko hlađenje na  $-80^{\circ}\text{C}$  i  $-196^{\circ}\text{C}$ . Prema ovim rezultatima duboko hlađenje značajno povišava otpornost na habanje kog alatnih čelika i to neuporedivo više ako se hladi na temperaturu tečnog azota  $-196^{\circ}\text{C}$ .



Sl. 15.

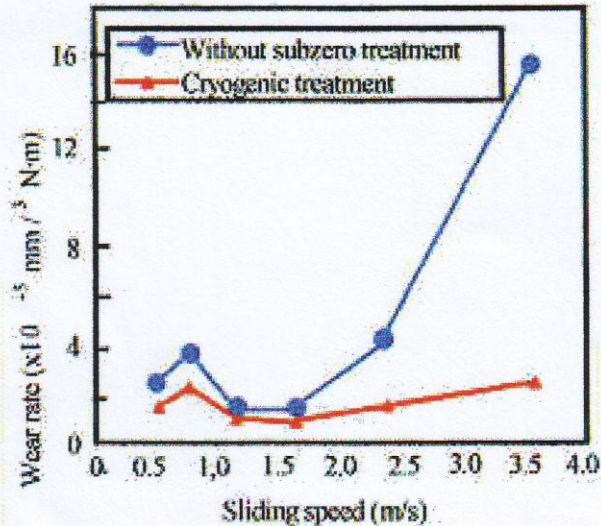
Sa druge strane postoje podatci koji pokazuju da se trajnost alata (otpornost na habanje) ne može bitno povisiti primenom dubokog hlađenja na  $-196^{\circ}\text{C}$  kao što je dato u tabeli T-2. Efekat dubokog hlađenja jako zavisi od sadržaja ugljenika u čeliku, ali i od sadržaja legirajućih elemenata.

Uslovi habanja su takođe veoma značajni. Istraživanja F. Menga i dr. sa Muroran Institute of Technology – Japan vršena na čeliku sa 1,44% C, 12,2% Cr, 0,84% Mo i 0,43% V, pokazala su da brzina relativnog klizanja drastično utiče na rezultate duboko hlađenih uzoraka – slika 16. Samo pri većim brzinama klizanja duboko hlađeni uzorak ima jasno vidljivu prednost. Stoga se rezultati ispitivanja na habanje moraju biti upoređivani sa rezervom ako se ne znaju tačni uslovi termičke obrade i tačni uslovi ispitivanja habanja.

Tabela T-2.

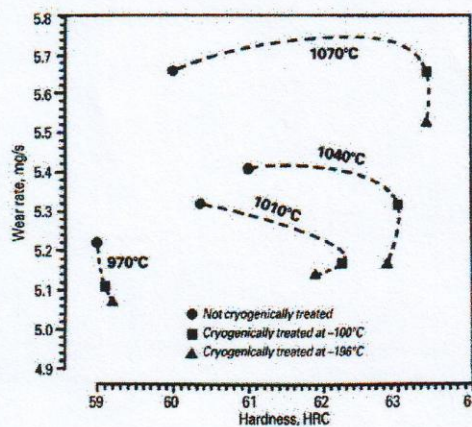
Vrsta čelika (AISI)	opis čelika	- 120	-310
D2	čelik sa visokim %C i Cr	316%	817%
A2	hromni čelik za rad na hladno	204%	560%
S7	Silicijumski alatni čelik	241%	503%
5210	čelik za ležajeve	195%	420%
O1	alatni čelih za rad na hladno	221%	418%
A10	Ugljenični alatni čelik	230%	264%
M2	Molibdenski brzorezni čelik	145%	225%

T1	Vilframov brzorezni čelik	117%	203%
P20	čelik za plastiku	94%	131%
440	martenzitni nerđajući čelik	123%	130%
430	feritni nerđajući čelik	128%	121%
303	austenitni nerđajući čelik	116%	119%
8620	Ni-Cr-Mo čelik	112%	104%
C 1020	ugljenični konstruktivni čelik	97%	98%



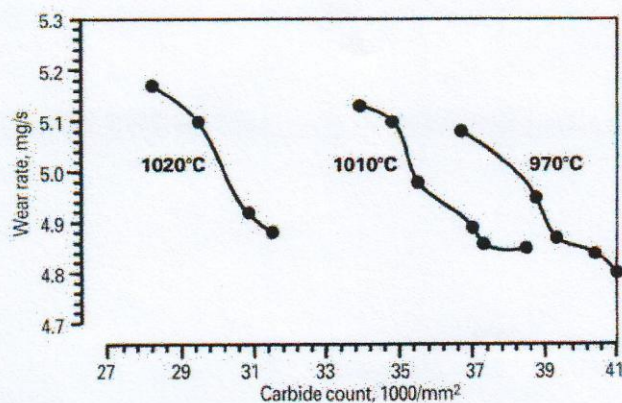
Sl. 16. Brzina habanja u zavisnosti od brzine klizanja – kaljeno sa 1020°C i otpušteno na 180°C. dužina klizanja 200m.

Za povišenje otpornosti na habanje treba pažljivo izabrati trajanje dubokog hlađenja na temperaturi od -196°C. Približno 10% bolji rezultat postiže se kada je držanje 48 časova umesto dva časa. Otpornost na habanje ne zavisi samo od tvrdoće čelika, već i od drugih parametara. To se može videti na slici 17, gde struktura i sastav metalne osnove (a to najviše zavisi od temperature kaljenja) pokazuju veliki uticaj na dobijene rezultate. Kod svake temperature kaljenja najbolja otpornost na abrazivno habanje dobijena je za slučaj primene dubokog hlađenja (trouglasta oznaka).



Sl. 17. Otpornost na habanje u zavisnosti od temperature kaljenja i dobijene tvrdoće

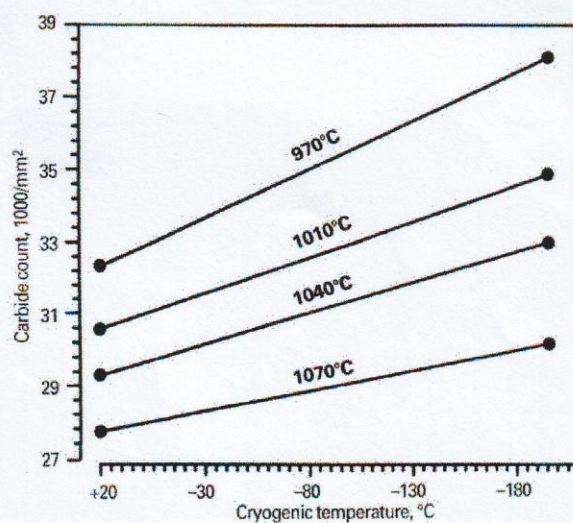
To se objašnjava dodatnim dejstvom dubokog hlađenja na izdvajanje fino dispergovanih karbida sa dimanzijama ispod 5  $\mu\text{m}$ . Na slici 18 data je zavisnost otpornosti na habanje od sadržaja finih karbida u čeliku D2, za razne temperature kaljenja uzorka.



Sl. 18.

**Profinjavanje strukture čelika** – se ogleda u dobijanju strukture sa ultrafinim karbidima. Sem raspada zaostalog austenita prilikom dubokog hlađenja stvaraju se uslovi za nukleaciju centara za izlučivanje ultrafinih karbida.

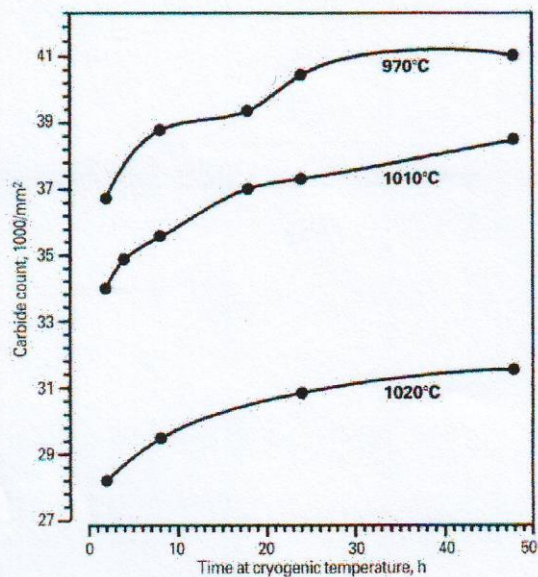
Količina ultrafinih karbida raste sa padom temperature pri dubokom hlađenju – slika 19. Pri tome se više finih karbida dobija kod kaljenja sa niže temperature austenitizacije.



Sl. 19. Uticaj temperature dubokog hlađenja na količinu finih karbida u čeliku D2.

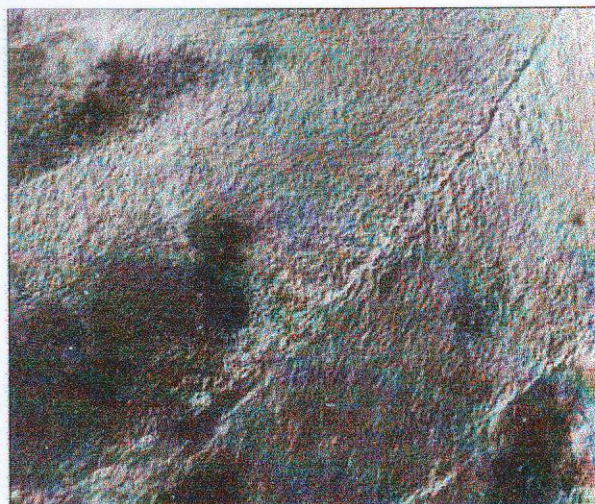
Niske temperature bitno smanjuju pokretljivost ugljenika u pothlađenom čeliku, tako da se pri dubokom hlađenju samo izvršu priprema razlaganja martenzita. Tek pri naknadnom otpuštanju na 200°C dolazi do formiranja finih (manjih od 5 mikrona) i ultrafinih karbida (od 20 do 60Å). Zbog male pokretljivosti atoma ugljenika na -196°C potrebno je dosta vremena

da se taj proces obavi, pa je trajanje dubokog hlađenja veoma uticajan faktor. Prema rezultatima prikazanim na slici 20 jasno se vidi da je potrebno minimum 24 časa držanja na temperaturi  $-196^{\circ}\text{C}$  da bi se profinila struktura, a to je u skladu sa više literaturnih izvora.



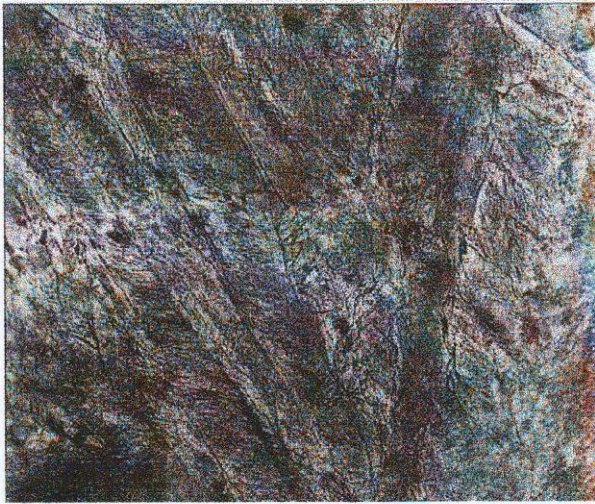
Sl. 20.

Na slici 21 se vidi struktura brzoreznog čelika M2 nakon dubokog hlađenja u tečnom azotu ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) dobijena pomoću TEM. Nakon kaljenja, dubokoh hlađenja i trostrukog otpuštanja na  $560^{\circ}\text{C}$  dobijena je struktura data na slici 22. Karbidi su sada krupniji nego na slici 21, ali su izuzetno sitni i fino dispergovani. Tako fini karbidi se ne mogu dobiti klasičnim kaljenjem i otpuštanjem – bez dubokog hlađenja.



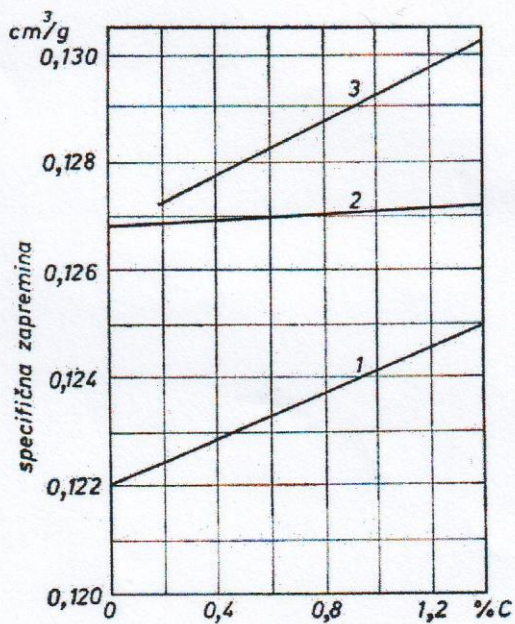
Sl. 21.

120.000x



Sl. 22. 60.000x

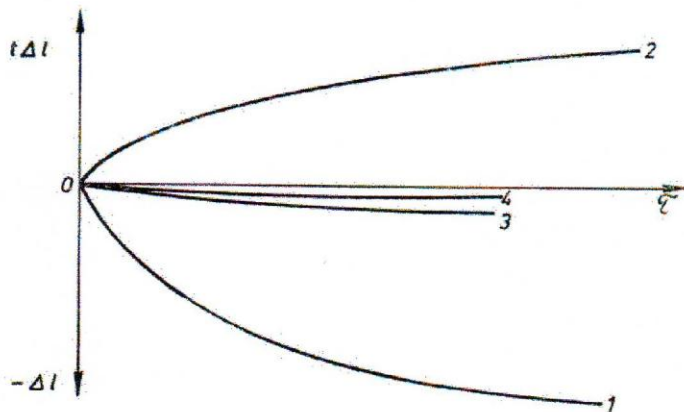
va se *stabilnost dimenzija* – dobija se pre svega na račun raspadanja Az i sprečavanja j deo strukture transformiše u stabilniji oblik u toku eksploatacije radnog predmeta (primer).



Sl. 23. Specifična zapremina raznih struktura u zavisnosti od sadržaja ugljenika u čeliku – 1. austenit ; 2. perlit i ferit ; 3. martenzit.

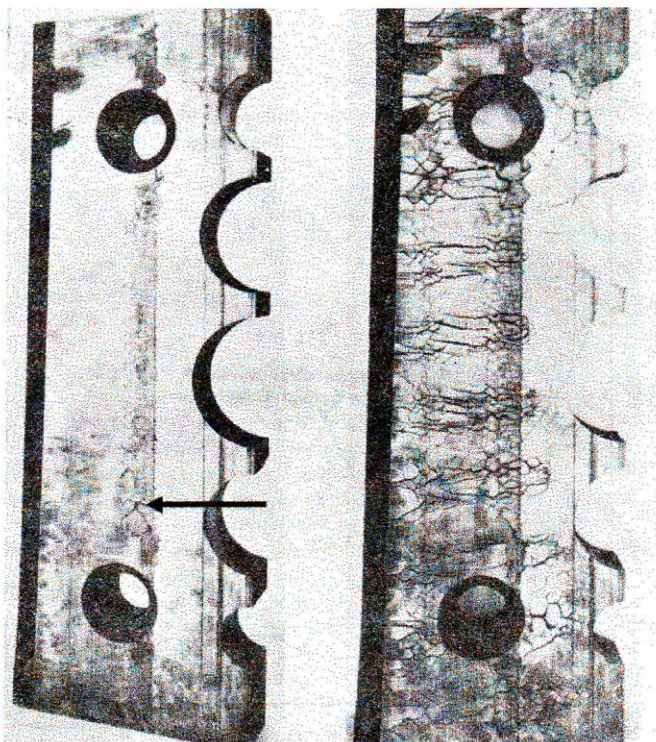
kaljenja alat može da ima manje ili više Az, koji se u zavisnosti od dejstva temperature ajnijih lokalnih opterećenja pretvara u stabilniji oblik strukture, zavisno od konkretne ature ili opterećenja. Najčešće je to struktura otpuštenog martenzita, što je praćeno i velikim povećanjem dimenzije predmeta (alata). Sa druge strane, tetragonalni zit već na niskim temperaturama prelazi u kubni martenzit, što je praćeno naglim

na dimenzija. Na slici 24. dat je pregled promene dimenzija zavisno od postupka termičke obrade koji je primenjen.



Sl. 24. Promena dimenzija alata sa vremenom – 1. Kaljeno bez otpuštanja ; 2. Kaljeno i otpuštanje na 100 do 150°C ; 3. Kaljeno, duboko hladeno i otpuštanje na 100 do 150°C ; 4. kaljeno, duboko hladeno i otpuštanje na 250 do 300°C.

**čava se sposobnost brušenja i poliranja** - sa čime se postižu značajne uštede u proizvodnji alata. Zaostali austenit pravi velike probleme pri završnom brušenju, posebno u čeliku nalazi u većim količinama. Na slici 25 dat je tipičan izgled pukotina nastalih pri brušenju.



Sl. 25. Pukotine od brušenja jedva vidljive (levo) i jako vidljive posle dejstva metode magnetnog fluksa (desno).

Tipične pukotine usled brušenja su plitke i u obliku nepravilne mreže, a samo retko su lokalizovane oko nekih otvora ili sličnih mesta sa efektom koncentracije unutrašnjih napona. Prilikom brušenja, ako se koriste oštrije režimi obrade, dolazi do lokalnih površinskih zagrevanja koja trenutno transformišu Az. Ako se ti zapreminski naponi superponiraju sa toplotnim lokalnim naponima kao i sa zaostalim naponima usled termičke obrade, dobijamo trenutno uslove za nastanak lokalnih (stoga i kratkih) plitkih pukotina.

Dubokim hlađenjem uklanjamo Az i stoga mnogo teže može nastati greška pri brušenju. Optimalnim postupkom dubokog hlađenja mogu se minimizirati unutrašnji zaostali naponi u radnom predmetu. Stoga se takvi alati ili slični predmeti mogu brusiti brže (uštede i do 50% vremena) a dobija se kvalitetnija brušena površina. Kod modernih alata za obradu plastike često se traži kvalitet obrađene površine poliran na "ogledalo". To podrazumeva hrapavost ispod 1 mikrona, i teško se postiže sem kod čelika koji su podvrgnuti dubokom hlađenju.

**Važna napomena** : Primena dubokog hlađenja daje veoma dobre rezultate ali se mora optimizirati kompletna tehnologija termičke obrade i to vodeći računa o vrsti čelika, tipu alata (odnosno radnog predmeta), tipu radnih uslova i ekonomskim aspektima .

### **Uređaji i postupci dubokog hlađenja**

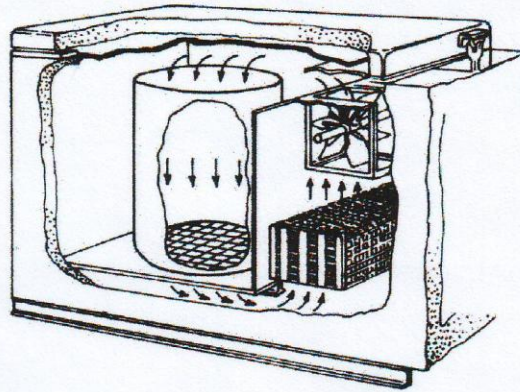
Zavisno od temperaturnog intervala i principa rada danas se u praksi sreću tri različite klase uređaja:

- Kupatila na bazi suvog leda
- Mehanički sistemi za hlađenje
- Sistemi koji koriste tečni azot

Svaki od ovih sistema ima određene prednosti i nedostatke, ali se pri izboru opreme uvek mora znati optimalna tehnologija za konkretni alat ili radni predmet.

**Kupatila na bazi suvog leda** – su veoma jednostavan uređaj i dugo godina se koriste u praksi. Kupatilo mora biti dobro izolovano sa ciljem smanjenja gubitaka kroz zidove, ali i zbog tačnijeg i boljeg kontrolisanja toka procesa. Treba da ima mešalicu sa ciljem postizanja ravnomernije temperature unutar kupatila i same šarže. Može se koristiti termopar sa automatskom kontrolom , ali održavanje tačne temperature pre svega zavisi od količine suvog leda (čvrstog CO<sub>2</sub>) koji se dodaje u kupatilo. Osnovni fluid koji čini kupatilo može biti – trihloretilen, alkohol, aceton ili kerozin. Ovi sistemi lako hlade na -50°C, teže se dobija -70°C, a neki izvori tvrde da se mogu koristiti i do -80°C.

**Mehanički sistemi za hlađenje** – su uređaji koji koriste izmenjivače toplote vezane sa sistemom za usmereno strujanje rashlađenog fluida – slika 26. Ovi sustemi se danas opremaju sa kompjuterskim upravljanjem, tako da mogu izuzetno tačno da hlade ili greju radne predmete po unapred zadatoj tehnologiji. To je veoma bitno za uslužne kalionice koje rade sa različitim čelicima, pa čak i sa različitim materijalima, uključujući i plasti, aluminijumske legure i td. Danas ti uređaji nisu preterano skupi i dosta su niski troškovi rada, ali mnogi izvori navode veoma visoke troškove održavanja, posebno kada se izgubi radni fluid. Kapacitet hlađenja je veoma ograničen, posebno kada se hladi ispod -60°C do -70°C. Najniža temperatura koja se može postići ide do približno -100°C, a to zavisi najviše od fluida koji se koristi; metilhlorid (-97°C); feron (-111°C); metanol (-97°C) ili pentan (-129°C).

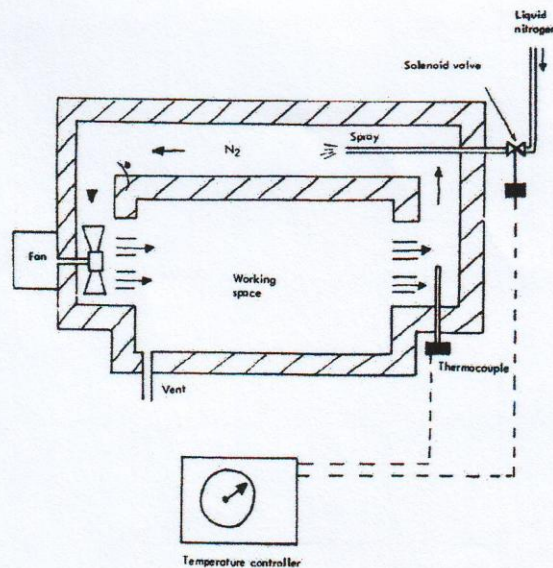


Sl.26. Mehanički sistem za duboko hlađenje.

**Sistemi bazirani na upotrebi tečnog azota** – razvijeni su da obezbede hlađenje do  $-196^{\circ}\text{C}$ . To je ravno temperaturi na kojoj isparava tečni azot. U prvo vreme korišćen je uređaj nalik na veliku termos bocu, sa dvostrukim zidovima i vakumiziranim međuprostorom. Međutim, ovaj tip uređaja ima izuzetno veliku brzinu hlađenja zbog direktnog uranjanja radnog predmeta u tečni azot. Kao posledica, često se pojavljivala krtost kod čelika. Drugi problem je opasnost da tečni azot prsne i dođe u dodir sa ljudskim telom, što ima za posledicu trenutno uništavanje tkiva. Treći problem je isparavanje tečnog azota kada se u njega stavi radni predmet, tako da su gubici dosta veliki.

Mnogo su efikasniji i lakše upravljivi sistemi sa komercijalnim imenom “Elenit” koje je razvila firma BOC (British Oxygen Company). Razvijena su dva sistema:

*Elenit sa gasnim hlađenjem* (slika 27) – gde se hlađenje vrši putem prinudnog strujanja gasovite faze azota. Donja granica temperature je  $-196^{\circ}\text{C}$ , a kapacitet hlađenja i brzina hlađenja se mogu korigovati dimenzijom komore, količinom azota koji se rasprskava u dizni i intenzitetom kretanja fluida u komori.

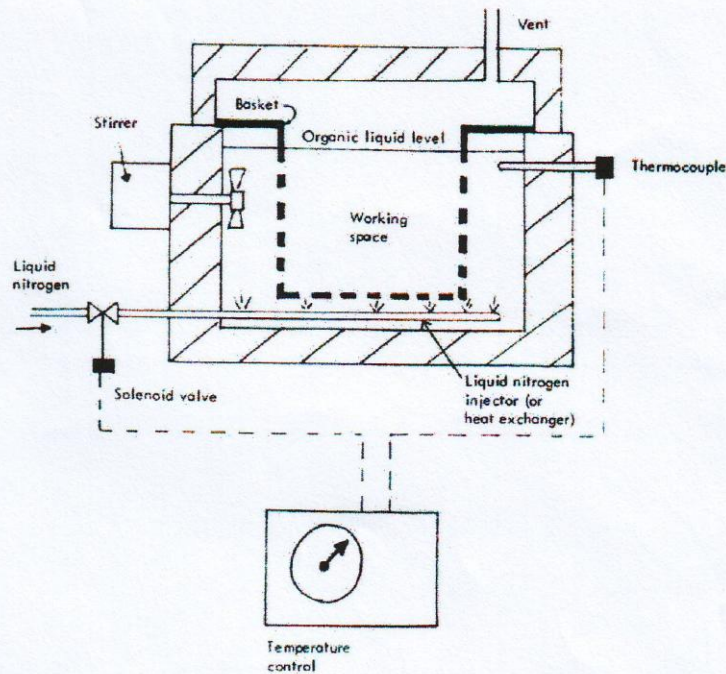


Sl. 27. Komora za duboko hlađenje sa raspršivanjem tečnog azota (gasni sistem).

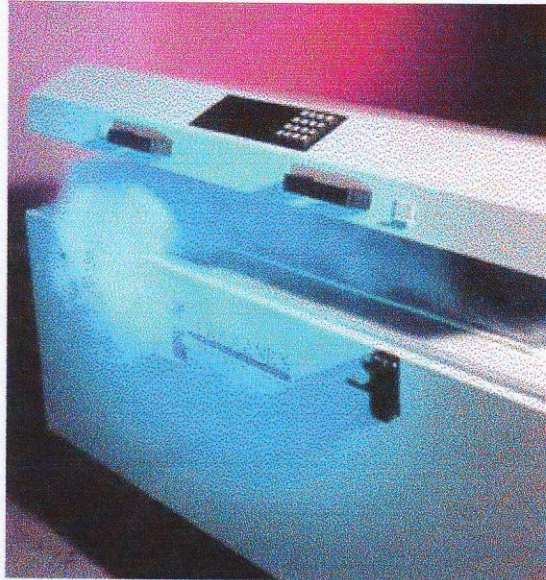




*Elenit sa tečnim hlađenjem* (slika 28) – gde se hlađenje vrši potapanjem radnog predmeta u tečno kupatilo (najčešće alkohol ili trihloretilen). Tečnost se hladi pomoću raspršivanja tečnog azota pomoću uređaja potopljenog na dno kupatila. Brzina hlađenja se može dobro podesiti zahvaljujući strujanju fluida u kupatili, variranju količine ubrizganog azota, izborom veličine šarže i td. Donja granica temperature kod ovog sistema je  $-150^{\circ}\text{C}$ .



Sl. 29. Kada za duboko hlađenje sa raspršivanjem tečnog azota (tečni sistem).



#### ***Završna napomena***

Duboko hlađenje se koristi mnogo šire nego što je primena kod čelika. U svetu, a posebno u USA gde se jako gleda na ekonomski aspekt procesa, duboko hlađenje se koristi za tretiranje titana, plastike, legura bakra (muzički instrumenti – trube i sl.), najlon, legure Al, materijali za kočnice na motorbiciklovima i trkačim automobilima, kompletni uređaji kao naprimer blok trkačeg motora, lančaste testere za seču šuma, golf štapovi, oružje (puške) i td. Zbog ušteda koje se postižu ili boljeg kvaliteta proizvoda, tehnologije dubokog hlađenja imaju mnogu korisnika, sa čime se značajno skida cena usluge za one potrošače koji nemaju sopstveni uređaj. Takav uređaj pravi troškove i kada se ne koristi, tako da je mnogo bolje koristiti usluge specijalizovanih firmi sa iskusnim osobljem.