

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET**

**SPECIJALNI ČELICI
-skripta-**

dr. sc. Stjepan Kožuh, doc.

Sisak, 2010

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O ČELICIMA	2
2.1. Specijalni čelik	2
2.2. Fazne pretvorbe u čeliku	3
2.3. Utjecaj legirajućih elemenata u čeliku	7
2.4. Utjecaj nečistoća (primjesa)	14
3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI	16
3.1. Opći konstrukcijski čelici	19
3.1.1. Nelegirani čelici za nosive konstrukcije	19
3.1.2. Čelici za strojogradnju	24
3.2. Sitnozrnati mikrolegirani čelici povišene čvrstoće	24
3.2.1. Osnovni procesi povišenja čvrstoće čelika	27
3.2.2. Mikrolegirani normalizirani sitnozrnati čelici	31
3.2.3. Poboļšani sitnozrnati čelici	36
3.2.4. Konstrukcijski čelici s niskim sadržajem perlita ili bez perlita	37
3.3. Konstrukcijski čelici namijenjeni primjeni pri ≈20°C (zajamčen sastav i svojstva)	38
3.3.1. Čelici za cementaciju	38
3.3.2. Čelici za poboljšavanje	43
3.3.3. Čelici za opruge	50
3.3.4. Čelici poboljšane rezljivosti	52
3.3.5. Čelici za nitriranje	53
3.4. Posebni konstrukcijski čelici	58
3.4.1. Korozijski postojani (nehrđajući) čelici	58
3.4.1.1. <i>Feritni nehrđajući čelici</i>	58
3.4.1.2. <i>Austenitni nehrđajući čelici</i>	61
3.4.1.3. <i>Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici</i>	68
3.4.1.4. <i>Martenzitni nehrđajući čelici</i>	71
3.4.2. Čelici otporni na trošenje	77
3.4.3. Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama	78
3.4.3.1 <i>Vatrootporni čelici</i>	79
3.4.4. Čelici za rad pri niskim temperaturama	82
3.4.5. Visokočvrsti čelici	85
3.4.5.1. <i>Niskolegirani niskopopušteni čelici</i>	86
3.4.5.2. <i>Visokolegirani viskopopušteni Cr-Mo-V visokočvrsti čelici</i>	88
3.4.5.3. <i>Visokočvrsti korozijski postojani precipitacijski očvrnuti čelici</i>	89
3.4.5.4. <i>Termomehanički obrađeni čelici</i>	94
3.4.5.5. <i>Hladno oblikovani nelegirani ili niskolegirani čelici</i>	98
3.4.5.6. <i>Maraging čelici</i>	98
4. ALATNI ČELICI	100
4.1. Nelegirani (ugljični) alatni čelici	102
4.2. Legirani alatni čelici	104
4.2.1. Niskolegirani alatni čelici za hladan rad	104

4.2.2. Visokolegirani alatni čelici za hladan rad	108
4.2.3. Alatni čelici za topli rad	111
4.2.4. Brzorezni čelici	114
4.2.5. Sinterirani alatni čelici	118
5. LITERATURA	126

1. UVOD

Željezo u čistom obliku nije primjenjivo za tehničku upotrebu pa uglavnom služi samo za neke specijalne namjene. Nasuprot tome, čelik ima znatno bolja mehanička svojstva i šire područje primjene u industriji i svakodnevnom životu.

U literaturi postoji nekoliko definicija čelika. Europske norme definiraju čelik kao željezni materijal pogodan za toplu preradu. Također, čelik se može definirati kao slitina (legura) željeza i ugljika (<2%) sa ili bez dodatka ostalih legirajućih elemenata. Važnost čelika u razvoju civilizacije očituje se u činjenici da je trenutna godišnja količina proizvedenog čelika u svijetu oko deset puta veća od ukupne proizvedene količine svih ostalih metala i legura. Godišnje se u svijetu proizvede više od milijardu tona čelika.

Čelik je deformabilna željezna legura koja pored ugljika sadrži i određene primjese koje mogu biti korisne ili štetne. Korisne primjese u čeliku su npr. krom, nikal, molibden itd., dok su štetni uglavnom fosfor i sumpor. Pored navedenih elemenata čelik može sadržavati i oligoelemente (bakar, kositar, arsen i dr.), te plinove (kisik, dušik, vodik) koji u pravilu pogoršavaju svojstva konačnog proizvoda.

Višestruka upotreba čelika prvenstveno proizlazi iz njegovih uporabnih svojstava odnosno mogućnosti postizanja dobre kombinacije čvrstoće, žilavosti, rastezljivosti, oblikovanja deformiranjem, promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom itd. Osnovna svojstva čelika ovise o kemijskom sastavu, mikrostrukturi, te stanju, obliku i dimenzijama gotovog proizvoda. Zbog ekonomičnog načina proizvodnje (u odnosu na druge metalne materijale) i povoljnih svojstava čelik može poslužiti za raznovrsnu primjenu. Čelik se kao materijal koristi u svim granama industrije, prometu, građevinarstvu, poljoprivredi, obrtništvu kao i svim drugim djelatnostima.

S obzirom na stupanj napretka na području razvoja novih vrsta čelika i na području metalurške proizvodnje i toplinske obradbe većina različitih vrsta (ne i ukupne mase) proizvedenih čelika u svijetu pripada skupini specijalnih (posebnih) čelika. Skupini specijalnih čelika tako pripadaju svi plemeniti, te velika većina kvalitetnih čelika.

2. OPĆENITO O ČELICIMA

2.1. Specijalni čelik

Ovisno o kemijskom sastavu čelike se može podijeliti u dvije osnovne grupe: specijalni (posebni) i masovni čelici. Pojam "specijalni" čelik podrazumijeva željezne legure koje se svojim posebnim svojstvima razlikuju od uobičajenih masovnih čelika. Takva posebna svojstva se mogu postići na tri načina: utjecajem na kemijski sastav, proizvodnjom te preradom čelika. Čelik se smatra posebnim ukoliko su mu svojstva poboljšana barem jednim od tri spomenuta načina.

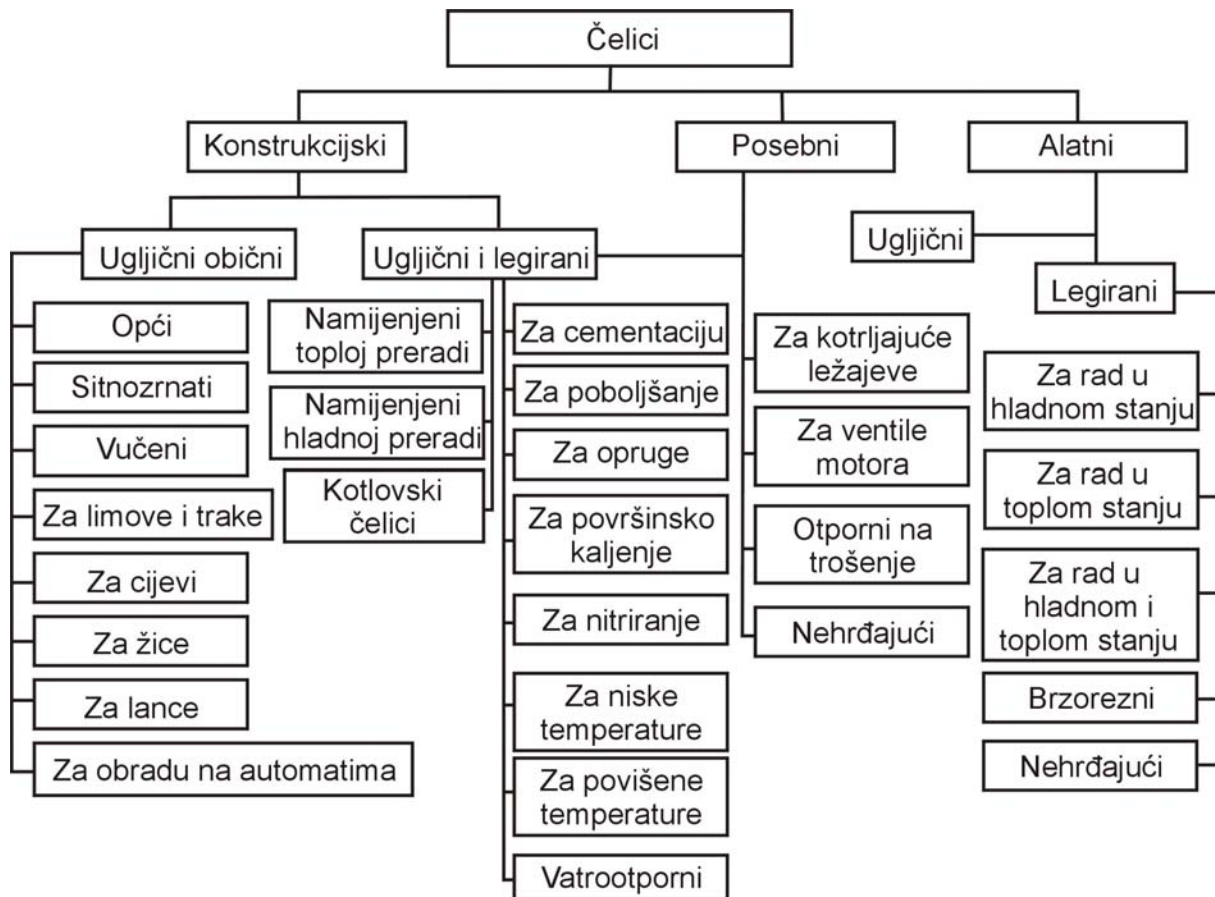
E. Houdremont definira specijalne čelike kao željezne legure, koje odgovaraju definiciji čelika, ali se od "običnih" (masovnih) čelika razlikuju po specijalnim svojstvima. Specijalni čelici su uglavnom legirani s jednim ili više elemenata. Dobivanje specijalnih čelika najčešće se provodi pojedinačnim ili kombiniranim legiranjem sa silicijem, manganom, kromom, niklom, volframom, molibdenom, vanadijem, kobaltom, titanom, bakrom, aluminijem, borom, niobijem, tantalom i dr. Glavni uvjet da bi neki od navedenih elemenata bio legirajući je da njegov maseni udio bude viši od određene granične vrijednosti, tablica 2.1.1. Ukoliko se u nekom čeliku utvrdi niži udio elementa od granične vrijednosti navedene u tablici 2.1.1 tada se takav element smatra primjesom koja je u čelik dospjela nenamjerno tijekom procesa proizvodnje.

Tablica 2.1.1. Granične vrijednosti sadržaja elemenata između nelegiranih i legiranih čelika (HRN EN 10020:2000)

Element	Granična vrijednost (mas. %)	ISO 4948/1	HRN C.B0.002
Al	0,30	0,10	0,10
B	0,0008	0,0008	
Bi	0,10	0,10	0,10
Co	0,30	0,10	0,10
Cr	0,30	0,30	0,30
Cu	0,40	0,40	0,40
La (lantanidi)	0,10	0,05	
Mn	1,65 ^{a)}	1,65	0,80 (1,80)
Mo	0,08	0,08	0,08
Nb	0,06	0,06	
Ni	0,30	0,30	0,30
Pb	0,40	0,40	
Se	0,10	0,10	
Si	0,60	0,60	0,60
Te	0,10		
Ti	0,05	0,05	0,05
V	0,10	0,10	0,01
W	0,30	0,10	0,10
Zr	0,05	0,05	
ostali (osim C, P, S i N)	0,10		

a) Ako je utvrđen samo najveći udjel mangana, granična je vrijednost 1,80% i ne primjenjuje se pravilo 70%.

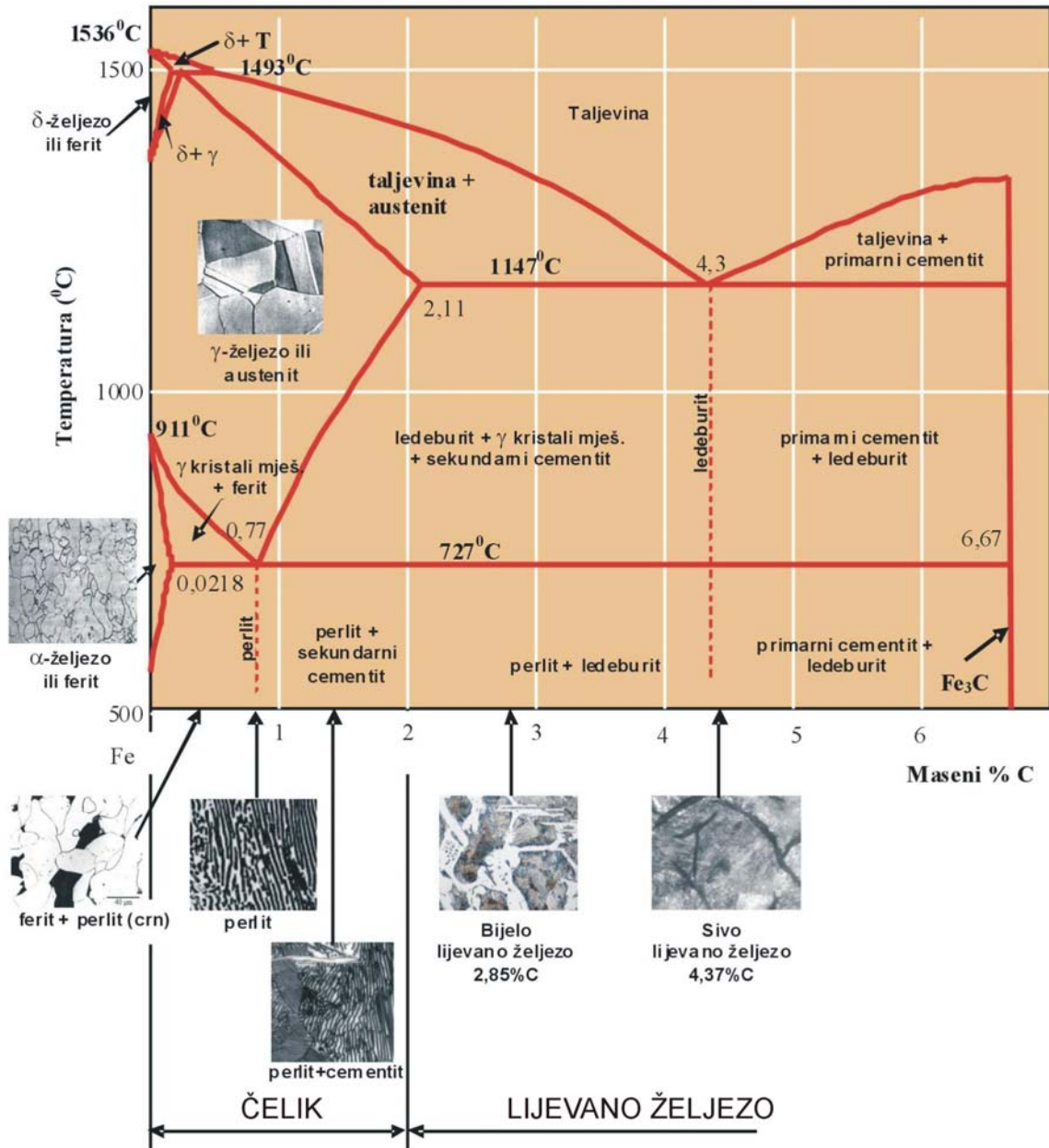
Ukoliko je zbroj masenih udjela svih legirajućih elemenata prisutnih u čeliku ispod 5% takav čelik se smatra niskolegiranim. Visokolegirani čelik sadrži ukupno $\geq 5\%$ legirajućih elemenata. Međutim, u skupinu specijalnih čelika mogu se ubrojiti i ugljični nelegirani čelici posebnih svojstava (npr. kvalitetni konstrukcijski čelici, alatni nelegirani čelici, čelici za hladno oblikovanje i dr.), slika 2.1.1.



Slika 2.1.1. Opća podjela čelika prema namjeni

2.2. Fazne pretvorbe u čeliku

Dijagram željezo-ugljik jedan je od najvažnijih dijagrama u tehničkoj praksi. Legure Fe-C kristaliziraju prema dijagramu stanja koji ima peritektički, eutektički i eutektoidni dio, slika 2.2.1. Željezo je magnetično, sivo-bijele boje, duktilno, mekano i srednje čvrstoće. Stabilna kristalizacija čistih Fe-C legura može nastupiti samo kod ekstremno sporog hlađenja. Ovisno o temperaturi i sastavu, atomi ugljika u tom slučaju ulaze u rešetku željeza tvoreći tako intersticijske kristale mješance (δ , γ , α) ili kristale grafita.



Slika 2.2.1. Dijagram stanja Fe-C

U mikrostrukтури čelika mogu se javiti slijedeće faze i konstituenti:

- ferit,
- austenit,
- cementit,
- perlit,
- ledeburit,
- bainit,
- martenzit.

δ -ferit (δ -Fe) - predstavlja krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza, nemagnetičan je, te se javlja odmah nakon skrućivanja, njegova maksimalna topljivost ugljika iznosi 0,09% C pri ~1456 °C.

Austenit (γ -Fe) - predstavlja intersticijsku krutu otopinu ugljika u površinski centriranoj kubičnoj rešetci (FCC) željeza. Maksimalna topljivost ugljika u γ -Fe iznosi 2,06% kod 1147 °C. Nestabilan je na sobnoj temperaturi, ali se može pod određenim uvjetima dobiti i na sobnoj temperaturi. Tvrdoća austenita je 170-220 HB te je vrlo žilav. Austenit ima najmanji specifični volumen u odnosu na sve mikrostrukturne faze čelika.

α -ferit (α -Fe) – predstavlja intersticijsku krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza. Maksimalna topljivost ugljika u α -Fe iznosi 0,025% kod 723 °C i samo 0,008% na sobnoj temperaturi. To je najmekša faza u dijagramu Fe-Fe₃C, tvrdoće oko 60 HB.

Cementit (Fe₃C) – metastabilan intersticijski spoj koji sadrži 6,67 mas.% ugljika, tvrd i krhak željezni karbid (tvrdoće oko 800 HV) koji pravilno rasprostranjen doprinosi porastu tvrdoće čelika.

Perlit - eutektoidna smjesa ferita i cementita koja sadrži 0,8% ugljika, te nastaje pri 723 °C vrlo polaganim hlađenjem. Lamelarna struktura perlita sastoji se od bijele feritne osnove ili matrice (koja čini većinu eutektoidne mješavine) i tankih pločica cementita.

Ledeburit - eutektična mješavina austenita i cementita koja sadrži 4,3% ugljika te nastaje kod 1147 °C.

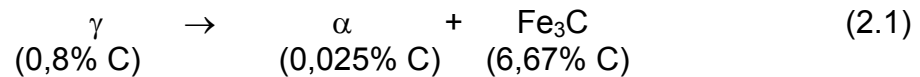
Bainit - Kada se čelik hladi brzinom između gornje i donje kritične brzine hlađenja na nižim temperaturama (između temperature stvaranja perlita i martenzita) tada se dobiva struktura sastavljena od ferita i cementita, ali različita od perlita. To je struktura međustupnja ili međustruktura nazvana bainit. Brzina difuzije atoma ugljika na ovoj temperaturi tako je mala da se atomi ugljika ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvoriti lamele cementita. Zbog toga se umjesto lamela ferita i cementita stvaraju samo lamele ferita na čijim granicama se izdvaja cementit u obliku sitnih, kuglastih čestica.

Martenzit – prezasićena kruta otopina ugljika u volumno centriranoj tetragonalnoj rešetci (BCT). Nastaje kada se čelik austenitne mikrostrukture ohladi na određenu, dovoljno nisku temperaturu (M_s - temperatura početka stvaranja martenzita; M_f - temperatura završetka stvaranja martenzita) donjom kritičnom brzinom hlađenja. U mikrostrukтури takvog tzv. kaljenog čelika martenzit se javlja u obliku nakupina igličastih kristala, koji se sijeku pod određenim kutevima. Pretvorba je bez difuzije, zavisna samo o temperaturi, a ne i o vremenu (atermička reakcija). Nestabilan je, tvrd (728 HB) i krhak, te je odgovoran za veliku tvrdoću kaljenih čelika. Martenzit ima najveći specifični volumen u odnosu na sve mikrostrukturne faze čelika.

Najvažnije reakcije kod čelika odnose se na transformaciju iz austenitnog područja kod različitih brzina hlađenja. Kod veoma polaganog hlađenja (npr. hlađenje u peći) nastale mikrostrukture mogu se predvidjeti prema reakcijama u čvrstom stanju iz ravnotežnog faznog dijagrama. Ukoliko je hlađenje brže ovaj dijagram nije dostatan za pretpostavku o faznim transformacijama i nastalim mikrostrukturama.

Sporo hlađenje eutektoidnog čelika s 0,8 mas.% C karakterizira slijedeće:

- na temperaturi iznad 723 °C čelik ima austenitnu mikrostrukturu,
- kod 723 °C dolazi do eutektoidne reakcije:



Eutektoidni čelik ima u uvjetima sporog hlađenja perlitnu mikrostrukturu, koja se sastoji od naizmjenično raspoređenih lamela ferita i cementita. Lamelle ferita su znatno deblje od lamela cementita te se mogu vidjeti kod većeg povećanja svjetlosnog mikroskopa (npr. pri povećanju 500x).

Sporo hlađenje podeutektoidnog čelika s 0,4 mas.% C karakterizira slijedeće:

- na temperaturi iznad 800 °C čelik ima austenitnu mikrostrukturu,
- na temperaturi malo iznad 723 °C mikrostruktura čelika sastoji se od ferita s 0,025% C i austenita eutektoidnog sastava s 0,8% C,
- na temperaturi ispod 723 °C austenit eutektoidnog sastava raspada se u perlit, pa se mikrostruktura sastoji od ferita (proeutektoidnog) i perlita.

Kada se podeutektoidni čelik hladi polako ispod linije Ar₃ (911 °C) dolazi do precipitacije ferita na granicama austenitnog zrna. Ukoliko je hlađenje brže ili su zrna austenita veoma velika tada ferit, koji je kristalografski orijentiran kao i austenit, više neće precipitirati na granicama austenitnog zrna kao ekvialsijalna zrnca, već u obliku iglica ili pločica, pa nastaje tzv. Widmanstättenova struktura.

Sporo hlađenje nadeutektoidnog čelika s 1,2 mas.% C karakterizira slijedeće:

- na temperaturi iznad 840 °C čelik ima austenitnu mikrostrukturu,
- na temperaturi malo iznad 723 °C mikrostruktura se sastoji od austenita i sekundarnog cementita, koji se izlučuje na granicama austenitnog zrna,
- na temperaturi malo ispod 723 °C austenit eutektoidnog sastava raspada se u perlit, pa se mikrostruktura čelika sastoji od perlita i cementita.

Ukoliko se čelik hladi s povećanom brzinom nedovoljno je vremena za završetak procesa difuzije, ili difuzija uopće ne započinje (difuzija je "beskonačno" spora). To se često događa u proizvodnji, gdje se uslijed ubrzanog hlađenja fazni preobražaji odvijaju pri nižim temperaturama od ravnotežnih ili do njih uopće ne dolazi. U tom slučaju, mikrostruktura čelika može se razlikovati od one koju daje ravnotežni dijagram stanja.

2.3. Utjecaj legirajućih elemenata u čeliku

Najčešći legirajući elementi prisutni u čelicima su krom, nikal, mangan, silicij, volfram, vanadij i molibden. U posebnim slučajevima čelik se može legirati kobaltom, titanom, aluminijem, niobijem i dr. Legirajući elementi se u čeliku pojavljuju:

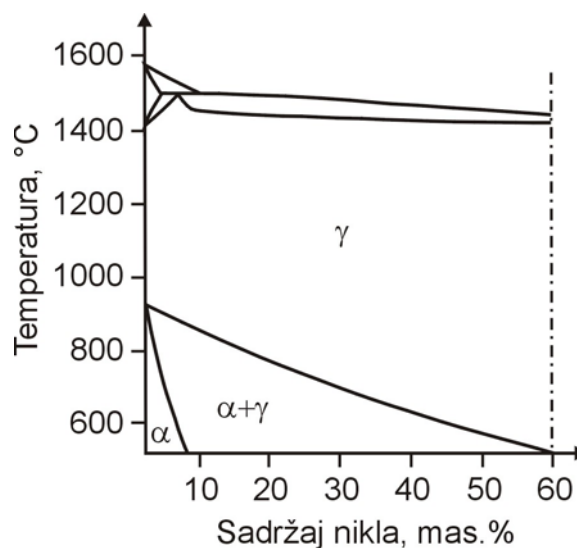
- otopljeni u α -željezu ili γ -željezu,
- kao spojevi (karbidi, intermetalni spojevi),
- kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, sulfidi, fosfidi).

Poznato je da niti jedna skupina materijala ne može legiranjem toliko mijenjati svojstva kao čelik. Čeliku se dodaju određeni elementi kako bi se postiglo željeno svojstvo ili kombinacija svojstava gotovog proizvoda.

S obzirom na afinitet prema ugljiku legirajući elementi se mogu podijeliti na karbidotvorce (npr. krom, volfram, molibden, vanadij, titan, niobij, tantal) i nekarbidotvorce (npr. nikal, mangan, kobalt). Karbidotvorci se najčešće spajaju s ugljikom u karbide Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , W_2C , WC , Mo_2C , VC , V_4C_3 , TiC , TaC , NbC , Fe_3C i dr., ali mogu također dijelom supstituirati u kristalnu rešetku željeza te stvarati intermetalne spojeve (npr. FeCr , Fe_2Mo i dr.).

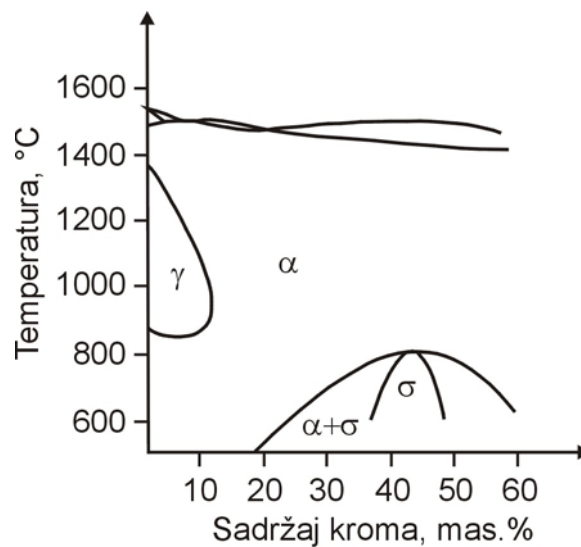
Prema utjecaju na dijagram stanja Fe-C (slika 2.2.1.) legirajući elementi se dijele na one koji proširuju područje austenita pa se nazivaju gamageni elementi i one koji proširuju područje ferita pa su to alfageni elementi.

Područje austenita uglavnom proširuju nikal, mangan, kobalt itd. Na slici 2.3.1 može se primijetiti da legure s više od 10% Ni nemaju potpune transformacije $\gamma \rightarrow \alpha$, tj. više ne ispunjavaju potpuno jedno od uvjeta kaljivosti pa nisu potpuno zakaljive. Legure koje sadrže više od 60% Ni nisu uopće zakaljive pa i pri sobnoj temperaturi (ili ispod nje) ostaju austenitne.



Slika 2.3.1. Dijagram stanja Fe-Ni

Legirajući elementi koji proširuju područje ferita najčešće su krom, volfram, molibden i vanadij. Analizira li se dijagram stanja Fe-Cr (slika 2.3.2) može se zaključiti da mogućnost transformacije $\gamma \rightarrow \alpha$ postoji samo u legurama koje sadrže ispod 10% kroma, tj. samo takve legure ispunjavaju jedan od nužnih uvjeta kaljivosti. Međutim, u oba slučaja (Fe-Ni i Fe-Cr) u obzir nije uzet sadržaj ugljika koji je važan čimbenik za pojavu zakaljivosti. Ukoliko bi se u obzir uzeo i utjecaj ugljika tada bi se binarni dijagram stanja Fe-Le (Le – legirajući element) pretvorio u ternarni dijagram Fe-C-Le. Istovremenim legiranjem s nekoliko legirajućih elemenata njihovo djelovanje na dobivanje ferita ili austenita se ne zbraja (npr. legura s 18% Cr i 7% Ni pri 20 °C je austenitna, a ne feritna, kako bi se moglo zaključiti s obzirom na visoki sadržaj kroma).

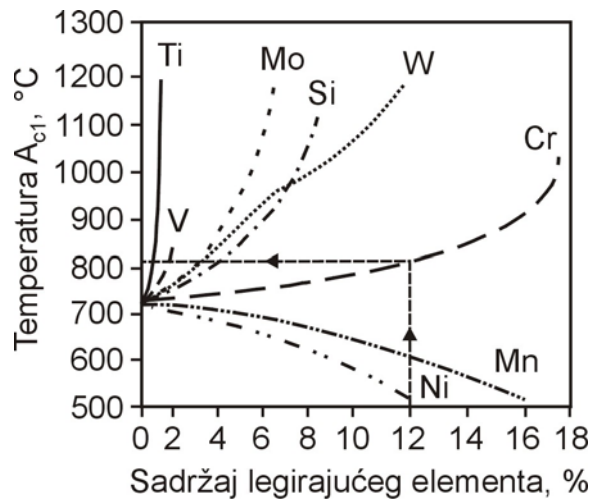


Slika 2.3.2. Dijagram stanja Fe-Cr

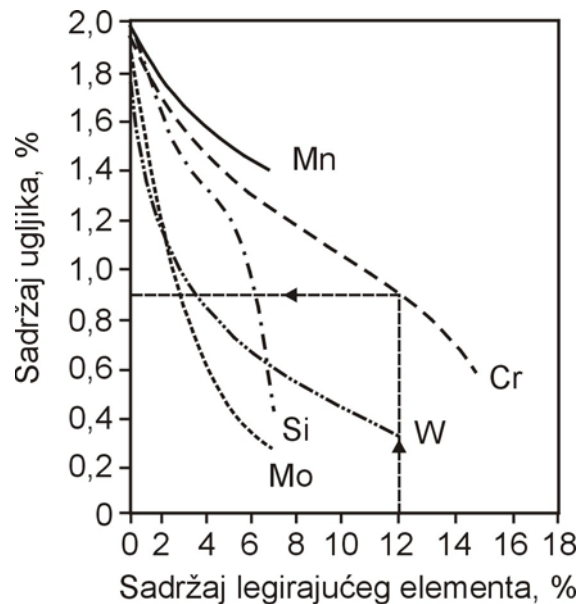
Tijekom sporog zagrijavanja čelika pri temperaturi Ac_1 (723 °C) započinje odvijanje transformacije $\alpha \rightarrow \gamma$ te raspad karbida prema slijedećim jednadžbama:



Utjecaj glavnih legirajućih elemenata na vrijednost temperature Ac_1 i maksimalno zasićenje austenita ugljikom prikazan je slikom 2.3.3. Legirajući elementi koji stvaraju karbide dovode do povišenja temperature Ac_1 posebice zato što su karbidi (npr. TiC, VC) toplinski postojani, slika 2.3.3a.



(a)



(b)

Slika 2.3.3. Utjecaj sadržaja legirajućih elemenata na temperaturu transformacije $\alpha \rightarrow \gamma$ (a) i maksimalni sadržaj ugljika u austenitu (b)

Prema sadržaju fosfora i sumpora, kao i prema čistoći, čelici su podijeljeni u tri kvalitetne grupe:

- obični čelik (ukupno P i S max. 0,100%),
- kvalitetni čelik (P i S maksimalno po 0,045%) i
- plemeniti čelik (P i S maksimalno po 0,035 % ili 0,030 %).

Elementi koji ulaze u sastav čelika mogu se podijeliti na:

- korisne elemente – legirajući elementi (Cr, Ni, Mo, Cu, W, V, Al, Ti),
- štetne elemente – ostaci troske u čeliku (Si, Mn, P, S, N, H, O, te nemetalni uključci).

Ugljik

Budući da je ugljik sastavni dio čelika (maksimalno 2%) ne smatra se legirajućim elementom iako ima najveći utjecaj na svojstva čelika. Porastom udjela ugljika u čeliku raste čvrstoća i granica razvlačenja, a smanjuje se duktilnost i žilavost. Važan utjecaj ugljika je u osiguravanju zakaljivosti nelegiranih i legiranih čelika. Zakaljivost čelika predstavlja mogućnost kaljenja. Pritom je kod nelegiranih čelika uvjet da je sadržaj ugljika veći od 0,25%. Prokaljivost predstavlja dubinu zakaljenog sloja koja ovisi o kemijskom sastavu čelika i veličini zrna austenita. Jako prokaljiv legirani čelik može se zakaliti i na debljim presjecima, a ugljični samo do debljine 16 mm.

Aluminij

Aluminij se najčešće koristi kao sredstvo za dezoksidaciju. Dodatkom aluminija čelik postaje manje osjetljiv prema starenju, te se potpomaže stvaranje sitnijeg zrna. Sposobnošću stvaranja nitrida aluminij predstavlja veoma važan legirajući element za nitiranje (stvara spoj AlN). Također, reakcijom aluminija s niklom ili titanom mogu nastati intermetalni spojevi Ni_3Al i Ni_3Ti .

Bakar

Bakar se rjeđe koristi kao legirajući element jer se pri visokim temperaturama nakuplja ispod površinskog sloja ogorine te uzrokuje površinsku osjetljivost tijekom kovanja ili valjanja (tzv. crveni lom). Dodatkom bakra može se povisiti omjer granica razvlačenja/vlačna čvrstoća, a ukoliko ga ima iznad 0,4% tada omogućava precipitacijsko očvršćivanje.

U kotlovskim limovima iz nelegiranih čelika bakar u sadržaju do $\approx 0,35\%$ povisuje postojanost prema atmosferskoj koroziji. Bakar može pozitivno djelovati na postojanost prema djelovanju različitih kiselina ukoliko mu sadržaj ne prelazi 1% (npr. viskolegirani čelici otporni na kiseline).

Bor

Bor u nehrđajućim austenitnim čelicima omogućava precipitacijsko očvršćivanje (povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće), ali snižava otpornost prema općoj koroziji. Dodatkom bora se s jedne strane poboljšava prokaljivost nisko i srednje ugljičnih čelika, ali s druge strane pogoršava se njihova zavarljivost.

Kobalt

Kobalt ne stvara karbide ali utječe na sprječavanje rasta zrna pri visokim temperaturama. Zbog poboljšavanja vlačne čvrstoće i postojanosti na popuštanje pri povišenim temperaturama kobalt se dodaje brzoreznim, alatnim i konstrukcijskim čelicima koji su namijenjeni za rad pri povišenim temperaturama. Nepoželjan je u

čelicima za dijelove nuklearnih energetskih postrojenja jer stvara radioaktivan izotop ^{60}Co .

Krom

Krom omogućava kaljenje čelika u ulju (čak i na zraku) budući da povisuje prokaljivost čelika i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita (M_s). Zbog afiniteta prema ugljiku krom lako stvara karbide pa se često dodaje čelicima za izradu reznih alata. Karbidi kroma povećavaju otpornost na trošenje čime se povećava izdržljivost i trajnost oštrice proizvedenog alata. Dodatkom kroma kao legirajućeg elementa povisuje se toplinska čvrstoća, vatrootpornost i otpornost na djelovanje komprimiranog vodika. Nužni uvjet za korozivnu postojanost čelika pri sobnoj temperaturi je legiranje s minimalno 12% kroma. Ukoliko se uz krom (feritotvorac) ne dodaju elementi koji proširuju područje austenita (npr. Ni, Mn) niskouglični čelik s $<0,1\% \text{ C}$ i $>15\% \text{ Cr}$ posjedovati će postojanu feritnu mikrostrukturu od sobne temperature pa do temperature solidusa. Legiranje kromom utječe na sklonost pojavi krhkosti nakon popuštanja, ali se to može izbjeći dodatnim legiranjem s molibdenom.

Mangan

Mangan se najčešće koristi kao dezoksidator i desulfurizator tijekom proizvodnje čelika. Zbog velikog afiniteta prema sumporu mangan stvara sulfid MnS (slika 2.3.4) čime se sprječava negativno djelovanje sulfida FeS . Sprječavanje nastanka sulfida FeS je naročito važno kod čelika za automate (obrada odvajanjem čestica na automatima) koji zbog lakše obradljivosti moraju sadržavati čak do 0,4% sumpora. Mangan proširuje područje austenita, tj. snižava temperaturu A_{c3} i A_{c1} u odnosu na ugljične čelike. Legiranjem s manganom povećava se prokaljivost čelika, a u nezakaljenim čelicima poboljšava se čvrstoća i žilavost. Dodatak svakih 1% mangana može dovesti do povišenja granice razvlačenja konstrukcijskih čelika za oko 100 N/mm^2 . Čelici poprimaju austenitnu mikrostrukturu, neovisno o sadržaju ugljika, ukoliko je sadržaj mangana veći od 12%.



Slika 2.3.4. Sulfidni uključak (MnS) u čeliku sa 0,35 %C

Molibden

Legiranjem s molibdenom (najčešće u kombinaciji s ostalim legirajućim elementima) povećava se prokaljivost i čvrstoća čelika, a sprječava pojava visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Iz tog razloga, konstrukcijski čelici sadrže od 0,2 do 5% molibdena. Molibden je karbidotvorac pa utječe na sitnozrnatost čelika i na otpornost na trošenje (npr. brzorezni čelici). U kombinaciji s kromom molibden povećava otpornost čelika prema općoj i jamičastoj koroziji.

Nikal

Nikal kao legirajući element proširuje područje austenita, te zbog vrlo slabog afiniteta prema ugljiku ne stvara karbide. Legiranjem s niklom može se povisiti žilavost konstrukcijskih čelika kao i korozijska postojanost (uz minimalni dodatak 12% kroma). U precipitacijski očvrnutim (PH) čelicima nikal stvara intermetalne spojeve Ni_3Ti i/ili Ni_3Al . Zbog ekonomskih razloga (visoka cijena) nikal se gotovo uvijek legira u kombinaciji s drugim legirajućim elementima.

Niobij i tantal

Niobij i tantal zbog identičnog djelovanja na svojstva dolaze skoro uvijek zajedno kao legirajući elementi u čeliku. Budući su izrazito jaki karbidotvorci uglavnom se primjenjuju za stabilizaciju čelika postojanih na djelovanje kiselina. Niobij pored karbida može stvarati nitride i karbonitride, potpomagati nastanak sitnijeg zrna u čeliku i olakšavati precipitacijsko očvršćavanje. Kao legirajući element niobij se dodaje sa ili bez dodatka vanadija u zavarljive sitnozrnate čelike povišene granice razvlačenja i čvrstoće (HSLA čelici) te u neke ultračvrste PH-čelike.

Olovo

Olovo se koristi kao legirajući element kod čelika za obradu odvajanjem čestica na automatima jer pozitivno utječe na lomljenje strugotine i postizanje čiste obrađene površine. Olovo je netopivo u čeliku, te ne utječe na mehanička svojstva čelika.

Silicij

Silicij se često koristi kao sredstvo za dezoksidaciju, te kao legirajući element koji povisuje čvrstoću, otpornost prema trošenju i granicu razvlačenja (npr. čelici za izradu opruga). Budući da silicij izrazito povisuje otpornost prema djelovanju topline neizbježan je legirajući element koji se dodaje vatrootpornim čelicima (do 2,5%).

Titan

Titan zbog svog izraženog afiniteta prema kisiku, dušiku, sumporu i ugljiku djeluje izrazito dezoksidirajuće, denitrirajuće i desulfurirajuće. Vezanjem s ugljikom titan stvara vrlo stabilan karbid TiC pa se zajedno s niobijem i tantalom primjenjuje za stabilizaciju nehrđajućih čelika. Ukoliko se nalazi u većim udjelima može djelovati na precipitacijsko očvršćivanje stvaranjem intermetalnih spojeva Ni₃Ti ili Ni₃(Ti, Al).

Vanadij

Dodatkom vanadija kao legirajućeg elementa može se postići usitnjavanje primarnog austenitnog zrna. Budući je vanadij jaki karbidotvorac i nitridotvorac u udjelima iznad 0,4% povisuje otpornost na trošenje stvaranjem stabilnog karbida VC ili V₄C₃. Sposobnost stvaranja karbida VC ili V₄C₃ iskorištena je pri proizvodnji brzoreznih čelika, te alatnih i konstrukcijskih čelika namijenjenih za rad pri povišenim temperaturama.

Volfram

Volfram kao legirajući element pripada skupini karbidotvoraca. Legiranjem čelika volframom sprječava se rast zrna, a time se posredno utječe i na povišenje žilavosti čelika. Budući da stvara karbide izrazito otporne na trošenje volfram predstavlja nužni legirajući element za brzorezne čelike.

Ostali legirajući elementi

Dušik

Dušik u većini slučajeva predstavlja nepoželjni element (nečistoća), ali se ponekad dodaje i kao legirajući element. Već 0,01% dušika povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali smanjuje deformabilnost i žilavost čelika. Brzim hlađenjem dušik može ostati zarobljen u rešetci željeza. U nelegiranim i niskolegiranim čelicima nije poželjan jer povećava sklonost takvih čelika prema starenju, posebno kod hladno deformiranih čelika (deformacijsko starenje). Pojava starenja rezultira porastom čvrstoće i smanjenjem žilavosti. Porastom temperature (200-300 °C) atomi dušika mogu difundirati u područje dislokacija već za vrijeme deformacije uz istovremeno stvaranje nitrida. Zbog toga takav čelik ne smije biti izložen deformaciji pri temperaturi 200-300 °C jer postoji opasnost od pojave "plavog loma". Ukoliko se uz dušik dodaju elementi koji imaju veći afinitet prema dušiku od željeza (npr. aluminij, titan, niobij) dolazi do povlačenja dušika iz čvrste otopine u nitride, a čelik postaje otporan na starenje. U slučaju austenitnih nehrđajućih čelika dušik predstavlja legirajući element jer kao intersticijski element znatno povećava granicu razvlačenja, te proširuje područje austenita. Legiranjem dušikom može se zamijeniti dodatak određene količine vrlo skupog nikla. Dušik se kao legirajući element najčešće dodaje u količini do ≈0,25%.

Cirkonij

Cirkonij je izrazito djelotvoran za dezoksidaciju i odsumporavanje. Sulfidi cirkonija su još manje štetni od sulfida mangana. Cirkonij kao karbidotvorac utječe na usitnjenje zrna pa se dodaje u niskolegirane sitnozrnate čelike namijenjene poboljšanju.

2.4. Utjecaj nečistoća (primjesa)

Fosfor

Fosfor je nepoželjna primjesa u čeliku, te njegov maseni udio treba biti što je moguće niži (ispod 0,06%). Fosfor u čeliku tijekom skrućivanja dovodi do pojave primarnih segregacija. Izrazito spora difuzija fosfora u željezu uzrokuje nemogućnost njegove jednolike raspodjele. Nakon prolaska fronte skrućivanja primarni dendritni kristali siromašni su fosforom i legirajućim elementima, dok ostatak taline sadrži fosfor i većinu nemetalnih uključaka. Toplim oblikovanjem se dendritna lijevana mikrostruktura trakasto izdužuje. Poznato je da je fosfor uzročnik krhkosti čelika, tablica 2.4.1. Krhkost čelika je izraženija čim je prisutan viši sadržaj ugljika, te što je viša temperatura austenitizacije. U iznimnim slučajevima neki čelici mogu imati povišen sadržaj fosfora radi poboljšanja rezljivosti (npr. čelici za obradu na automatima). Također, ponekad se korozijski postojanim austenitnim čelicima može dodati određena količina fosfora (do 0,1%) koji može povisiti granicu razvlačenja efektom precipitacije. Segregacije fosfora su nepoželjne u čelicima jer predstavljaju štetnu nehomogenost strukture.

Tablica 2.4.1. Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika

Sadržaj fosfora, %	Granica razvlačenja, N/mm ²	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Tvrdoća, HB	Kontrakcija, %	Žilavost, J/cm ²
0	280	340	1000	30	340
0,2	360	410	1250	30	200
0,4	440	480	1550	25	0

Kisik

Kod niskougličnih čelika često je povišen maseni udio kisika što dovodi do pojave oksida željeza (FeO). Prisutnost oksida FeO, kao i sulfida FeS, dovodi do pojave "crvenog loma". Kisik povećava sklonost starenju čelika. Ovisno o raspodjeli i sadržaju kisik može utjecati i na smanjenje žilavosti čelika. Kisik se iz taline može ukloniti dezoksidacijom čelika pri čemu nastaje Al_2O_3 i SiO_2 .

Sumpor

U zavisnosti od načina proizvodnje u čelicima uvijek ostaje 0,005 do 0,006%. Sumpor je glavni element odgovoran za pojavu segregacija (sulfida) u čeliku. Sulfid željeza (FeS) uzrokuje pojavu "crvenog" i "bijelog loma" (nastaje pri početnim temperaturama valjanja ili kovanja). Budući da talište sulfida FeS iznosi $985\text{ }^\circ\text{C}$, a topla prerada se provodi na temperaturi iznad $1000\text{ }^\circ\text{C}$, rastaljivanjem FeS dolazi do pojave "crvenog loma" i smanjenja žilavosti. Zbog toga se čelici s višim sadržajem sumpora ne mogu deformirati u toplom stanju. Štetan utjecaj FeS uklanja se dodatkom mangana i stvaranjem sulfida MnS koji ima znatno višu temperaturu taljenja ($1610\text{ }^\circ\text{C}$) od temperature tople prerade čelika. Sumpor se namjerno dodaje u slučaju čelika namijenjenih obradi odvajanjem čestica na automatima. Razlog dodavanja sumpora takvim čelicima je taj što on snižava trenje između obratka i alatne oštrice te omogućava lakše lomljenje strugotine.

Vodik

Vodik predstavlja nepoželjan (štetan) element u čeliku. Vodik pripada skupini elemenata s najmanjim promjerom atoma pa je brzina difuzije vodika u željezu vrlo visoka, tj. viša od brzine difuzije ugljika. Štetnost vodika se očituje u tome što on snižava žilavost, a da pri tome ne raste čvrstoća i granica razvlačenja. Ukoliko prođe u čelik vodik dovodi do razugliččenja površine čeličnog proizvoda, te razara stabilne karbide (npr. Fe_3C stvarajući metan CH_4) i metalnu vezu između kristalnih zrna.

3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Konstruktivni čelici se koriste kod izrade karakterističnih konstruktivnih dijelova strojeva i uređaja. Najčešće služe za izradu vratila, osovina, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, kućišta itd. S obzirom na mehanička svojstva konstruktivni čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (radi izbjegavanja pojave krhkog loma), visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Pored toga, konstruktivni čelici moraju biti otporni na trošenje i koroziju, te obradivi odvajanjem čestica (rezanje), zavarljivi, skloni hladnom oblikovanju (savijanje, štancanje, duboko vučenje) itd.

Općenito se konstruktivni čelici mogu podijeliti na ugljične (nelegirani) i legirane (tablica 3.1). Konstruktivni čelici (nelegirani i legirani koji sadrže C < 0,60%) često se primjenjuju za izradu strojeva i uređaja koji rade u neagresivnim sredinama i pri temperaturama od -25 do 300 °C, kao i za nosive i građevinske konstrukcije.

Tablica 3.1. Podjela konstruktivnih čelika s obzirom na kemijski sastav

UGLJIČNI (NELEGIRANI) ČELICI	
Opće namjene	Posebne namjene
<ul style="list-style-type: none"> • obična kvaliteta • kvalitetni čelici 	<ul style="list-style-type: none"> • za građevinarstvo • za brodogradnju i željeznice • za kotlove i posude pod tlakom • za karoserijske limove • za cijevi, žice, zakivke • za zavarene lance • čelici za automate • za elektrotehniku

LEGIRANI ČELICI	
Opće namjene	Posebne namjene
<ul style="list-style-type: none"> • za poboljšanje • za površinsko kaljenje • za cementaciju • za nitriranje 	<ul style="list-style-type: none"> • za opruge • za kotrljajuće ležajeve • za rad pri niskim temperaturama • za ventile • čelici povišene čvrstoće ($R_{p0.2} > 360$ MPa) (mikrolegirani)

a) Ugljični (nelegirani) konstruktivni čelici

Ugljični čelici običnog kvaliteta svrstavaju se pretežno prema mehaničkim svojstvima te se koriste za slabije opterećene dijelove strojeva, uređaja, vozila ili za šipke i rešetke (npr. čelik S185). Svi nelegirani čelici običnog kvaliteta primjenjuju se u sirovom stanju (bez toplinske obradbe).

Srednje ugljični čelici (0,25-0,60% C) koriste se uglavnom u normaliziranom stanju, a u poboljšanom stanju služe za dijelove manjih presjeka. Čelici sa 0,5-0,60% ugljika primjenjuju se za dijelove otporne na trošenje, kao npr. zupčanici, pužni transporter, ekscentri, klinovi. Sitni strojni dijelovi izrađuju se također od srednje ugljičnih čelika isporučenih u obliku limova, traka, žica, vučenih ili hladno valjanih šipki.

Čelici za građevinarstvo uglavnom su meki (niskougljični C < 0,25%) čelici u obliku profila, limova, šipki, žica za armirani beton.

Čelici za brodogradnju su u obliku limova i profila od mekog čelika (zavarljivog), a za željeznicu u obliku posebnih valjanih proizvoda i otkovaka od nisko i srednje ugljičnih čelika (kotači, tračnice, osovine vagona).

Karoserijski limovi su čelici sa približno 0,1% ugljika, visoke čistoće (P i S < 0,035%), dobro se izvlače i imaju glatku površinu (npr. čelik DC04).

Čelici za žice (0,3-1,0% C) služe za čelične sajle, žice kotača (npr. kod bicikla), žice kišobrana, žičane mreže i opruge najvišeg kvaliteta.

Čelici za automate (valjane ili vučene šipke – npr. čelici 10S20, 45S20) koriste se za izradu sitnih dijelova poput zavrtnjeva i navrtki na automatskim strojevima. To su ugljični čelici sa povećanim sadržajem fosfora (do 0,11%), sumpora (do 0,3%) ili olova (0,35%), što im daje lako lomljivu isprekidanu strugotinu. Zahvaljujući olovu postiže se veća brzina rezanja i bolja kvaliteta rezane površine.

b) Legirani konstrukcijski čelici

Legirani čelici za poboljšanje (0,25-0,60% C) mogu biti:

- manganski (1,20-1,60% Mn) – za osovine vratila, Mn-Si za veće zupčanike;
- kromovi (1-1,5% Cr-Si) - za jako opterećena koljenasta vratila, zupčanike;
- krom-molibdenski (1% Cr; 0,2% Mo) - za sitnije žilave dijelove,
- krom-niklovi (0,6-1,5% Cr i 1-3,5% Ni) - zupčanici mjenjača, dijelovi turbina koji rade na temperaturama do 500 °C.

Za površinsko kaljenje koriste se Cr-Mn i Mn-Si čelici sa 0,3-0,5% ugljika. Za cementaciju upotrebljavaju se čelici sa C < 0,25% i legirani sa Cr, Cr-Mn, Cr-Mo i Cr-Ni. Tako se kromovi čelici (npr. čelik 15Cr3) koriste za bregaste osovine, osovine klipova, vretena i drugih dijelova izloženih trošenju. Slično ovome i krom-niklovi i krom-manganski čelici za cementaciju upotrebljavaju se za izradu zupčanika mjenjača i diferencijala (npr. čelici 15CrNi6, 16MnCr5), a krom-molibdenski čelici za bregaste osovine, zupčanike, kardanske zglobove (npr. čelik 25CrMo4). Čelici za nitiranje (npr. 34CrAlNi7, 34CrAlMo5) postižu traženu površinsku tvrdoću (900-950 HV) sitno dispergiranim nitridima aluminijska, kroma i molibdena, bez naknadne toplinske obradbe (neophodno je prethodno poboljšanje). Ugljik se ograničava na 0,45% radi sprječavanja stvaranja karbida kroma i molibdena koji imaju manju tvrdoću nego nitridi. Nitriranju se podvrgavaju cilindri motora i pumpi, zupčanici, kalupi za lijevanje pod pritiskom, alati za prešanje, probijači i sl.

Čelici za opruge trebaju imati visoku granicu razvlačenja, zadovoljavajuću istezljivost, te odgovarajuću dinamičku izdržljivost (npr. opruge automobila, odbojnici vagona, oslonci temelja strojeva). Posebno se za neke primjene traži otpornost na koroziju i povišene temperature. Tražena svojstva postižu se hladnom deformacijom (valjanje, vučenje) ili toplinskom obradbom. Svojstva elastičnosti poboljšava dodatak 0,15-1,8% silicija, a prokaljivost se kod većih presjeka povećava dodacima 1% mangana ili 1% kroma. Tako se npr. čelik 38Si7 primjenjuje za podloške i opruge, 51Si7 za konične vagonске opruge, spiralne vagonске opruge, 67SiCr5 za spiralne opruge za udarna opterećenja, torzione opruge, opruge ventila, 50CrV4 za najopterećenije opruge vozila.

Čelici za kotrljajuće ležajeve trebaju imati veliku tvrdoću i otpornost na trošenje, sposobnost obradljivosti rezanjem i deformiranjem, dobru prokaljivost uz minimalnu deformaciju. To su uglavnom kromovi čelici s visokim sadržajem ugljika i najviše čistoće (sastava 1% C i 0,50-1,50% Cr). Toplinska obradba se sastoji od kaljenja sa 850 °C u ulju i niskog popuštanja (160 °C).

Čelici za rad pri niskim temperaturama sadrže nikal ili mangan i nizak sadržaj ugljika (0,10-0,15%). Pri 3-5% nikla temperatura prelaska u krhko stanje je oko -100 °C, a pri 8-10% nikla oko -200 °C. Uglavnom služe za izradu transportnih i stacionarnih rezervoara za suhi led (CO₂) ili tekući metan (CH₄). Za rad na još nižim temperaturama (npr. za skladištenje i transport tekućih tehničkih plinova) koriste se austenitni Cr-Ni čelici sa niskim sadržajem ugljika ili Cr-Mn-Ni-N-čelici.

Čelici za ventile motora sa unutarnjim sagorijevanjem izloženi su pri radu visokim temperaturama (do 900 °C) i cikličkim promjenama temperature. Stoga moraju zadržati dobra mehanička svojstva na povišenim temperaturama i da budu vatrootporni. Najčešće se primjenjuju visokolegirani kromovi čelici X45CrSi19-3 (0,40% C; 3,2% Si; 9,0% Cr), X45CrMoV15 (0,5% C; 16,5% Cr; 2,0% Mo), a za najopterećenije ventile X6CrNiMoTi17/12/2 (0,45% C; 1,5% Si; 14,5% Cr; 1,3% Ni i 3% W). Za slabije opterećene usisne ventile može odgovarati čelik 67Si7 (0,6% C; 1,7% Si i 0,7-1% Mn).

Čelici povišene čvrstoće (mikrolegirani čelici) razvijeni su posljednjih tridesetak godina s ciljem da se smanji masa konstrukcije: mostova, brodova, rezervoara, cisterni, cijevi pod pritiskom i sl. Tehnologija mikrolegiranja omogućila je proizvodnju nove kategorije čelika, koji predstavljaju konvencionalne ugljične čelike sa minimalnim dodacima legirajućih elemenata (manje od 0,50%), radi povećanja granice razvlačenja, čvrstoće i tvrdoće. Prvi put je ova tehnika bila primijenjena na čeličnim limovima. Znatno kasnije mikrolegiranje je iskorišteno za proizvodnju šipki da bi se izbjegla toplinska obradba poslije kovanja. Posebno je važna primjena ovih čelika za transportna sredstva gdje smanjenje mase direktno utječe na moguće opterećenje. Trenutno se čelici povišene čvrstoće isporučuju u svim standardnim valjanim oblicima kao što su: limovi, trake, ploče, nosači, šipke i specijalni profili. Za ove čelike karakteristična je anizotropija mehaničkih svojstava, jer se obradljivost deformiranjem i čvrstoća znatno mijenjaju u odnosu na smjer valjanja.

3.1. Opći konstrukcijski čelici

Opći konstrukcijski čelici obuhvaćaju najširu grupu konstrukcijskih čelika, a najčešće se primjenjuju kod nosivih zavarenih konstrukcija velike mase. Ova skupina čelika najčešće se koristi za izradu mostova, dizalica, nosača, brodskih konstrukcija, dijelova vozila, opreme u industriji nafte i plina i dr. Opći konstrukcijski čelici dijele se na:

- a) nelegirane čelike za nosive konstrukcije i
- b) čelike za strojogradnju.

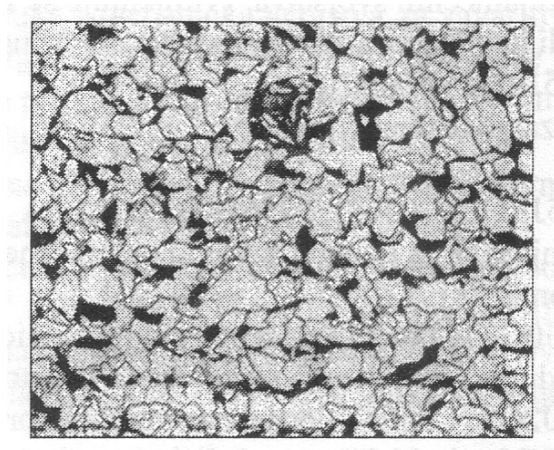
3.1.1. Nelegirani čelici za nosive konstrukcije

Čelici za nosive konstrukcije trebaju ispuniti određene zahtjeve u pogledu nosivosti i sigurnosti. Navedeni zahtjevi mogu se ostvariti ukoliko čelik ima dovoljno visoku granicu razvlačenja, vlačnu i tlačnu čvrstoću, savojnu čvrstoću, smičnu čvrstoću i žilavost. Zavarljivost spada među glavna tehnološka svojstva koje trebaju posjedovati čelici za nosive konstrukcije. Preduvjet za dobru zavarljivost je što niža vrijednost ekvivalenta ugljika (C_E):

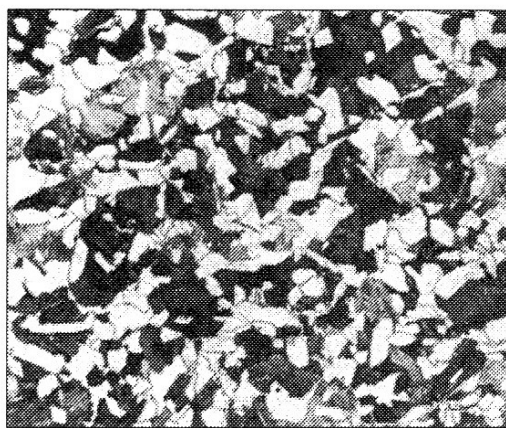
$$C_E = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10} \quad (3.1)$$

Vrijednost ekvivalenta ugljika prihvatljiva za čelike za nosive konstrukcije iznosi $<0,4$.

Čelici za nosive konstrukcije su uglavnom nelegirani te posjeduju feritno-perlitnu mikrostrukturu (slika 3.1.1). Ukoliko se takvi čelici nakon toplog oblikovanja normaliziraju u mikrostrukturi će prevladavati sitnije zrno. Također prisutnost sitnijeg zrna se može poboljšati dodavanjem aluminija koji stvara nitrid AlN, te sprječava rast zrna tijekom zagrijavanja čelika.



(a)



(b)

Slika 3.1.1. Feritno-perlitna mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika
a) čelik s 0,1% ugljika (povećanje 200x)
b) čelik s 0,25% ugljika (povećanje 200x)

Budući da kod ove skupine čelika kemijski sastav nije zajamčen, te zbog veće prisutnosti nečistoća u odnosu na ostale čelike, opći konstrukcijski čelici nisu predviđeni za toplinsku obradbu. Čelici za nosive konstrukcije uglavnom se klasificiraju na osnovi vrijednosti granice razvlačenja i udarne radnje loma (tablice 3.1.1-3.1.4). U tablicama 3.1.1-3.1.4 navedeni su načini označavanja konstrukcijskih čelika prema normi EN 10027-1.

Tablica 3.1.1. Način označavanja konstrukcijskih čelika prema normi EN 10027-1

Glavna oznaka		Dodatne oznake za čelik				Dodatne oznake za čelični proizvod	
G	S	n	n	n	an	+an	+an
Glavne oznake		Dodatne oznake					
slovo	mehaničko svojstvo	za čelik				za čelični proizvod	
		skupina 1 ²⁾			skupina 2 ³⁾		tablice
G = čelični ljev (gdje je potrebno) S = konstrukcijski čelik	nnn = min granica razvlačenja (R_e), N/mm ² za područje najmanjih debljina	Udarni rad loma, J		Ispit. temp.		C = posebno hladno obradljivo D = za prevlake vrućim uranjanjem E = za emajliranje F = za kovanje H = šuplji profili L = za snižene temperature M = termomehanički valjano N = normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano O = Offshore P = za žmurje Q = poboljšano S = za brodogradnju T = za cijevi W = otporan na atmosferilije an = znakovi propisanih dodatnih kemijskih elemenata, npr. Cu, ako je potrebno zajedno s jednoznamenkastim brojem koji je 10 × srednja vrijednost (zaokružena na 0,1 %) propisanog područja masenog udjela tog elementa	3.1.2. 3.1.3. 3.1.4.
		27 J	40 J	60 J	° C		
		JR	KR	LR	20		
		J0	K0	L0	0		
		J2	K2	L2	-20		
		J3	K3	L3	-30		
		J4	K4	L4	-40		
		J5	K5	L5	-50		
J6	K6	L6	-60				
		A = otvrdnuto izlučivanjem M = termomehanički valjano N = normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano Q = poboljšano G = druge značajke, ako je potrebno, s 1 ili 2 brojke					
1) n = brojni znak, a = abecedni znak, an = abecedno-brojni (alfanumerički) znak 2) Oznake A, M, N i Q u skupini 1 važe za sitnozrnate čelike 3) Oznake skupine 2, osim kemijskih znakova, mogu biti upotpunjene s jednom ili dvije brojke u svrhu razlikovanja kvalitete prema pripadajućoj normi za proizvod							

Tablica 3.1.2. Oznake posebnih zahtjeva

Oznaka	Značenje
+H	prokaljivost
+Z15	najmanje suženje u smjeru okomitom na površinu 15 %
+Z25	najmanje suženje u smjeru okomitom na površinu 25 %
+Z35	najmanje suženje u smjeru okomitom na površinu 35 %

NAPOMENA: Oznake se odvajaju znakom plus (+) od prethodnih. Te oznake načelno označavaju posebne zahtjeve. Iz praktičnih razloga također služe kao dodatne oznake čeličnih proizvoda.

Tablica 3.1.3. Oznake vrsta prevlaka

Oznaka	Značenje
+A	vruće aluminirano
+AR	platirano aluminijem
+AS	prevučeno Al-Si legurom
+AZ	prevučeno Al-Zn legurom (> 50% Al)
+CE	elektrolitički prevučeno kromom/kromovim oksidom
+CU	prevlaka bakra
+IC	anorganska prevlaka
+S	vruće kositreno
+SE	elektrolitički kositreno
+T	vrućim uranjanjem prevučeno olovo-kositar legurom
+TE	elektrolitički prevučeno olovo-kositar legurom
+Z	vruće pocinčano
+ZA	prevučeno Zn-Al legurom (> 50% Zn)
+ZE	elektrolitički pocinčano
+ZF	vruće Zn-Fe (difuzijski žarene) prevlake
+ZN	elektrolitički prevučeno Zn-Ni legurom

NAPOMENA: Oznake se odvajaju znakom plus (+) od prethodnih. Radi otklanjanja zamjene s drugim oznakama, može se kao predmetak staviti slovo S, npr. +SA.

Tablica 3.1.4. Oznake stanja obradbe

Oznaka	Značenje
+A	meko žareno
+AC	žareno za dobivanje kuglastog karbida
+AR	valjano (bez nekih posebnih uvjeta valjanja i/ili toplinske obradbe)
+AT	otapajuće žareno
+C	hladno očvrsnuto
+Cnnn	hladno očvrsnuto na vlačnu čvrstoću, najmanje nnn N/mm ²
+CR	hladno valjano
+DC	stanje isporuke prepušteno proizvođaču
+FP	obrađeno na feritno-perlitnu strukturu i područje tvrdoće
+HC	toplo valjano i hladno otvrdnuto
+LC	lagano hladno vučeno / valjano
+M	termomehanički oblikovano
+N	normalizirano ili normalizacijski oblikovano
+NT	normalizirano i popušteno
+P	otvrdnuto precipitacijom
+Q	gašeno
+QA	gašeno na zraku
+Q0	gašeno u ulju
+QT	poboljšano (kaljeno i popušteno)
+RA	rekristalizacijski žareno
+S	obrađeno za hladno rezanje
+T	popušteno
+TH	obrađeno na područje tvrdoće
+U	neobrađeno
+WW	toplo obrađeno

NAPOMENA: Oznake se odvajaju znakom plus (+) od prethodnih. Radi otklanjanja zamjene s drugim oznakama može se kao predmetak staviti slovo T, npr. +TA.

Čelici za nosive konstrukcije posjeduju granicu razvlačenja od 190 do 370 N/mm², vlačnu čvrstoću od 330-700 N/mm² te istezanje od 10 do 28%. Iznos granice razvlačenja je viši ukoliko je viši sadržaj ugljika i udio perlita u mikrostrukтури. Čvrstoća se može povisiti dodatkom mangana i silicija (mangan mora biti <1,65% jer povisuje prokaljivost). Porastom omjera Mn/C raste i udarna radnja loma.

Čelici za nosive konstrukcije uglavnom se primjenjuju u temperaturnom području od -40°C do +50°C. U tablici 3.1.5 navedene su podskupine zavarljivih čelika za nosive konstrukcije.

Tablica 3.1.5. Podskupine čelika za nosive konstrukcije

Podskupine	Oznaka (EN 10027)	Primjena
0	S185 (Č0000)	Čelik trgovačke kvalitete bez zajamčenih svojstava. Primjenjuje se za niskopterećene dijelove ili kao čelik za armirano-betonske konstrukcije.
A	S235 (Č0270) S235JRG1 (Č0370) S275JRG2 (Č0460)	Slabije zavarljivi čelici. Primjenjuju se za niže opterećene konstrukcije spojene zakovicama i vijcima.
B	S235JRG2 (Č0361) S275JRG2 (Č0461) S355JRG2 (Č0561)	Uglavnom se primjenjuju za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje nema opasnosti od krhkog loma. Zajamčena udarna radnja loma pri +20°C.
C	S235J0G3 (Č0362) S275J0G3 (Č0462) S355J0G3 (Č0562)	Koriste se kod izrade statički i dinamički opterećenih konstrukcija zajamčene udarne radnje loma pri 0°C.
D	S235J2G3 (Č0363) S275J2G3 (Č0463) S355J2G3 (Č0563)	Čelici otporni na krhki lom (statički i dinamički opterećene zavarene konstrukcije) pri nižim temperaturama (udarna radnja loma 27J pri -20°C).

3.1.2. Čelici za strojogradnju

Čelici za strojogradnju se primjenjuju za strojne dijelove koji se gibaju u odnosu na druge dijelove stroja ili prenose sile i momente. Najčešće se koriste za izradu osovina u kliznim ležajevima, vretena, slabije opterećenih zupčanika, te raznih klinova, vijaka, ručica, poluga i sl. U pogledu zavarljivosti i žilavosti prema čelicima za strojogradnju nema nikakvih zahtjeva. Ova skupina konstrukcijskih čelika slabije je zavarljiva zbog viših udjela ugljika, ali iskazuje višu čvrstoću ($500-700 \text{ N/mm}^2$) i nižu istezljivost (10-20%) od čelika za nosive konstrukcije. Iako imaju viši sadržaj ugljika nisu namijenjeni za kaljenje. Karakteristični čelici ove skupine prema EN 10027 su: E295 (Č0545) s oko 0,3% C, E335 (Č0645) s oko 0,4% C, te E360 (Č0745) s oko 0,5% C.

3.2. Sitnozrnati mikrolegirani čelici povišene čvrstoće

Povećanje čvrstoće čelika, uz istovremenu uštedu legirajućih elemenata, ostvaruje se primjenom postupka mikrolegiranja. Mikrolegiranje se koristi prvenstveno kod izrade konstrukcijskih čelika koje karakterizira visoka granica razvlačenja, zadovoljavajuća plastičnost, neznatna sklonost krhkom lomu, te dobra zavarljivost.

Razvoj zavarljivih konstrukcijskih čelika započinje krajem 20-ih godina prošlog stoljeća. U početku proizvodnje takvih čelika osnovni cilj bio je povećanje čvrstoće, odnosno granice razvlačenja. Međutim, polazeći od sve naglašenijih potreba za uštedom materijala i energije u posljednje vrijeme sve se veći značaj usmjerava prema žilavosti, zavarljivosti i sposobnosti oblikovanja.

Za sve moderne visokočvrste zavarljive čelike karakteristično je da su mikrolegirani s niobijem, vanadijem, titanom ili nekim drugim mikrolegirajućim elementom. Razlika u odnosu na uobičajen sastav konstrukcijskih čelika je u relativno niskom sadržaju ugljika i dodatku mikrolegirajućeg elementa.

Sadržaj mikrolegirajućeg elementa u mikrolegiranim čelicima iznosi od 0,01 do 0,1% a sadržaj ugljika je vrlo nizak (0,02-0,20%). Mikrolegirajući elementi ne mijenjaju osnovnu vrstu čelika tj. nelegirani čelik ostaje nelegiran, niskolegirani čelik ostaje niskolegirani.

Djelovanje mikrolegirajućih elemenata u čeliku je različito. Oni mogu stvarati kristale mješance (čvrste otopine) ili spojeve kao što su nitridi, karbidi i karbonitridi. Dodatak mikrolegirajućih elemenata koji stvaraju karbide i nitride (kao npr. niobij, vanadij, titan) ima značajnu primjenu za povišenje čvrstoće pri proizvodnji čelika. Najznačajnije djelovanje izraženo im je kroz usitnjenje zrna i precipitaciju (očvršćivanje izlučenim česticama). Na taj način nadomješta se pad čvrstoće izazvan

snižanjem sadržaja ugljika, odnosno udjela perlita, te se omogućava daljnji porast čvrstoće.

Mikrolegirajući elementi koji stvaraju stabilne karbide, nitride i karbonitrde pri termomehaničkoj obradbi čelika imaju značajan utjecaj na mehanizme ojačanja i omekšanja, stoga takvi čelici već u valjanom stanju imaju visoka mehanička i tehnološka svojstva.

Razlikujemo dva načina (tehnologije) proizvodnje mikrolegiranih čelika. Jedan način je tzv. kontrolirano valjanje u određenom temperaturnom intervalu uz određeni "plan" smanjenja debljine, a drugi predstavlja kombinaciju valjanja i toplinske obradbe (tzv. termomehanička obradba).

Kombiniranjem kemijskog sastava i termomehaničke obradbe moguća je kontrola strukture, morfologije i veličine austenitnog zrna za vrijeme toplog valjanja, s ciljem da se nakon $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije postigne optimalna feritna struktura.

Iako su mikrolegirani čelici pronašli široku primjenu te se već niz godina nalaze u proizvodnji i eksploataciji, njihova uporabna svojstva se stalno proučavaju radi usavršavanja tehnologije proizvodnje i prerade, kao i proširenja mogućnosti primjene.

Osnovna razlika između mikrolegirajućih i ostalih legirajućih elemenata u čeliku uočava se na osnovi njihova sadržaja u leguri (gornja granica koncentracije mikrolegirajućih elemenata izražava se u desetom dijelu postotka). Mikrolegirajući elementi djeluju preko vezanja pratećih elemenata ili preko izlučivanja drugih faza u osnovnoj masi (matriks) čelika.

Intenzitet djelovanja mikrolegirajućih elemenata postaje jasniji ako se istakne činjenica da se željeni efekti (dobivanje potrebnih svojstava) mogu postići samo sa jednim mikrolegirajućim atomom između 1000 atoma željeza. Nasuprot tome, kod klasičnih legirajućih elemenata taj odnos iznosi od 1:100 do 1:5. Mikrolegirajući elementi utječu na:

- povišenje tvrdoće ferita zbog nastanka kristala mješanaca,
- povišenje tvrdoće ferita zbog izlučenih čestica,
- smanjenje veličine zrna ferita zbog usporavanja (kašnjenja) i pothlađenja $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije (zbog otopljenih čestica u austenitu),
- smanjenje veličine zrna zbog nastanka klica (u austenitu izlučenih spojeva),
- smanjenje veličine zrna zbog "kočenja" rekristalizacije austenita.

Pretpostavlja se da mikrolegirajući elementi dovode do očvršćivanja stvaranjem čestica (precipitata), koje nastaju difuzijom mikrolegirajućih elemenata (uključujući dušik i ugljik) u područje iz kojeg je izdifundirala određena količina željeza.

Dodatak dušika je djelotvoran kod čelika koji sadrže aluminij. Vezivanje dušika u fino dispergirane nitrde, naročito nakon normalizacije, dovodi do usitnjenja zrna a time i do povišenja granice razvlačenja i neosjetljivosti na krhki lom.

Dodatak niobija djeluje kao dodatno usitnjenje zrna, pri čemu se znatno pospješuje djelovanje već prisutnog AlN. Najveće usitnjenje zrna dobije se dodatkom niobija uz istovremeno povišen sadržaj dušika.

Pri dodatku vanadija uzrok povećanju granice razvlačenja je izlučivanje vrlo sitnih čestica vanadijevog karbonitrida za vrijeme hlađenja kroz α -područje, jer je ovo izlučivanje lakše i brže od izlučivanja AlN.

Istovremeno mikrolegiranje s niobijem i titanom značajno povisuje granicu razvlačenja u normaliziranom stanju. Dodatnim popuštanjem ovaj efekt izostaje zbog okrupnjavanja karbonitrida. Povećan sadržaj dušika u ovom slučaju ostaje bez utjecaja.

Djelovanje niobija i vanadija, uz povišen sadržaj dušika, značajno povisuje granicu razvlačenja. Visoka temperatura otapanja karbida, nitrida i karbonitrida sprječava porast austenitnog zrna te time dovodi do nastanka mikrostrukture sa sitnijim zrnom.

Toplinskom obradbom, posebno u kombinaciji s toplim oblikovanjem, može se "upravljati" procesima otapanja i izlučivanja tako da se mikrostruktura i mehanička svojstva čelika bitno promijene. Aluminij također stvaranjem nitrida utječe na svojstva čelika, iako izlučivanjem Al-nitrida ne dolazi do precipitacijskog očvršćivanja. U tablici 3.2.1 prikazan je utjecaj mikrolegirajućih elemenata na mikrostrukturu i svojstva čelika.

Tablica 3.2.1. Utjecaj mikrolegirajućih elemenata na mikrostrukturu i svojstva konstrukcijskih čelika

Mikrolegirajući elementi		Al	B	Nb	Te	Ti	V	Zr
	O	++	+			++	+	++
	S				(+)	++		++
	N	+	+	+		++	+	++
	C			+		+	+	+
Mikroskopski utjecaj	krupne (grube) izlučevine					+		+
	sitne (fine) izlučevine	+	(+)	+			+	+
	blokiranje dislokacija i granica zrna	+		+		+		
	utjecaj na oblik sulfida				+	+		+
Makroskopski utjecaj	povišenje čvrstoće na povišenim temperaturama	+				+		
	utjecaj na sposobnost toplog oblikovanja	-	(-)	-		+		
	usporavanje rekristalizacije			++		++	(+)	
	utjecaj na brzinu fazne transformacije	+	-	-, *), +		-, *), +	-	
	usitnjenje zrna	+		++		+	+	
	precipitacijsko očvršćivanje			++		++	+	
	poboljšavanje sposobnosti za hladno oblikovanje				+	+		+

(+) pozitivan utjecaj, (-) negativan utjecaj, *) ovisno o prethodnoj toplinskoj obradbi

3.2.1. Osnovni procesi povišenja čvrstoće čelika

Postojanje grešaka (dislokacija) u strukturi osnovni je razlog što metali nemaju onu čvrstoću koju bi im omogućile visoke sile razdvajanja u elementarnoj rešetci. Dislokacije iako snižavaju teoretsku čvrstoću omogućavaju plastično deformiranje pri određenom opterećenju. Stoga je za povišenje otpornosti prema promjeni oblika (granica elastičnosti, vlačna čvrstoća) potrebno otežati gibanje dislokacija, ali ne ga i potpuno onemogućiti jer bi se tada izgubila sposobnost materijala za promjenu oblika (udarna radnja loma, istezanje, kontrakcija).

Smicajno naprezanje, nužno za smicanje ravnina idealnog kristala (tj. kristala bez dislokacija i ostalih grešaka) naziva se teorijskom čvrstoćom (τ_{teor}) i iznosi:

$$\tau_{\text{teor}} = G\bar{b} / 2a\pi = G/10 \dots G/30 \quad (3.2)$$

gdje je:

G – modul smicanja metala, N/m^2

\bar{b} – burgersov vektor, m

a – parametar elementarne rešetke, m.

π - 3,14.

Jedan od mehanizama kočenja dislokacija temelji se na točkastim zaprekama tj. stranim atomima koji s osnovnim metalom tvore kristale mješance. Pri tom vrijedi izraz za prirast granice razvlačenja:

$$(\Delta R_e)_M = A \cdot G \cdot c^{1/2} \quad (3.3)$$

odnosno granica razvlačenja iznosi:

$$R_e = R + A \cdot G \cdot c^{1/2} \quad (3.4)$$

$$R = G \exp(-2\pi w/b) \quad (3.4a)$$

pri čemu je:

R – naprezanje potrebno za pokretanje dislokacija u monokristalu, N/mm^2

A – faktor ovisan o razlici polumjera atoma osnovnog i legirajućeg metala i razlici modula smicanja oba metala (ili metala i nemetala),

c – koncentracija legirajućeg elementa, atom.%,

w – širina dislokacije, mm.

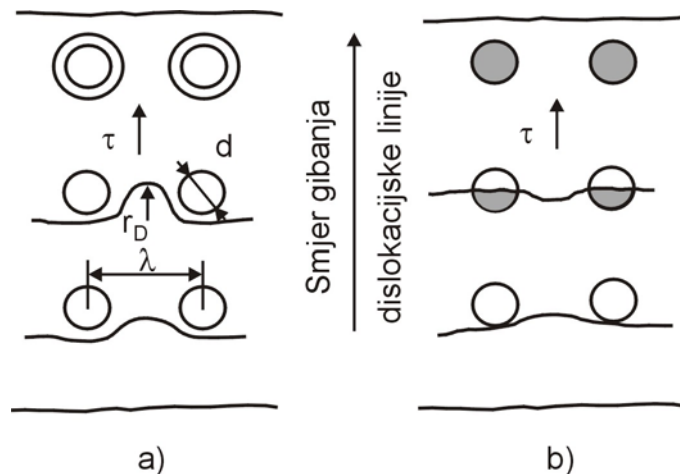
Nedostatak ovog mehanizma je što je za jako očvršćivanje potrebno dodati velike količine legirajućih elemenata, što nije opravdano tehnički i ekonomski.

Očvršćivanje dislokacijama (kao linijskim greškama) temelji se na povišenju gustoće dislokacija, koje onda postojećim dislokacijama u materijalu otežavaju gibanje. Nove se dislokacije unose u materijal plastičnom deformacijom, kaljenjem i termomehaničkom obradom. Ovaj mehanizam je vrlo učinkovit u pogledu iznosa očvršćivanja ali ako se pri unošenju novih dislokacija njihova gustoća približi graničnoj, nastupiti će koncentracija naprezanja što može dovesti do napuklina i loma.

a) Precipitacijsko očvršćivanje čelika

Povećanje granice razvlačenja mehanizmom precipitacije ovisi o metalno-fizikalnoj interakciji dislokacija i precipitata, koja se može opisati pomoću dva procesa: obilaženjem i rezanjem precipitata.

Precipitacijsko ili disperzijsko očvršćivanje čelika kvantitativno je opisao E. Orowan. On je utvrdio da submikroskopske čestice promjera od 5 do 15 nm na međusobnoj udaljenosti 15-45 nm učinkovito zaustavljaju gibanje dislokacija ukoliko je tvrdoća tih čestica dovoljno visoka, slika 3.2.1.



Slika 3.2.1. Shematski prikaz Orowanovog mehanizma očvršćivanja precipitatima:

- a) tvrdi precipitati i $d > 3$ nm; dislokacija "obilazi" čestice (jako očvršćivanje),
 - b) meki precipitati ili $d < 3$ nm; rezanje čestica, slabije očvršćivanje
- d - promjer precipitata, nm; λ - razmak između precipitata, nm

Na slici 3.2.1 prikazana je dislokacijska linija koja se kreće u smjeru označenim strelicom. Dislokacijska linija se u slučaju nailaska na tvrde precipitate (slika 3.2.1a) progiba u radijus $r_D = (\lambda - d)/2$ između dvije čestice precipitata. U tom slučaju dolazi do značajnog očvršćivanja, a tzv. Orowanovo naprezanje potrebno da se savije dislokacijska linija iznosi:

$$\tau_{OR} = G \cdot b / (\lambda - d) = G \cdot b / \lambda \quad (3.5)$$

pri čemu je:

λ - razmak između precipitiranih čestica, nm

d – promjer precipitiranih čestica, nm.

Preuređivanjem jednadžbe 3.5 dobije se:

$$\tau_{OR} = G \cdot b^2 / \lambda b = T / \lambda b \quad (3.5a)$$

gdje je T – linijski napon dislokacije, N.

U slučaju mekih precipitata (slika 3.2.1b) dolazi do prodiranja dislokacijske linije u precipitate te do njihovog rezanja i slabijeg očvršćivanja u odnosu na tvrde precipitate. Pri tom uz uvjet da je $d \ll 1$ nm vrijedi:

$$f = 0,82d / \lambda \quad (3.6)$$

gdje f predstavlja volumni udio precipitata (obično je 0,02-0,06 tj. 2-6% ukupnog volumena).

Povoljno djelovanje u cilju precipitiranja dovoljno čvrstih, sitnih i dispergiranih čestica (precipitata) imaju posebno elementi titan, vanadij i niobij koji s ugljikom i dušikom stvaraju karbide, nitrde i karbonitride.

b) Precipitacijski potencijal

Pri dovoljno visokoj temperaturi karbidi i nitridi mikrolegirajućih elemenata se djelomično ili potpuno otapaju. Hlađenjem do temperature transformacije $\gamma \rightarrow \alpha$ + karbid precipitati će prouzročiti porast čvrstoće čelika. Volumni udio precipitata kao i rezultirajuće očvršćavanje ovisiti će o veličini austenitnog zasićenja (superzasićenja) s mikrolegirajućim elementom, ugljikom i dušikom, što ovisi o temperaturi i sastavu čelika.

Općenito se superzasićenje definira pomoću precipitacijskog potencijala, P_{ppt} . Pretpostavlja se da je volumni udio precipitata proporcionalan s P_{ppt} te precipitacijsko očvršćavanje raste linearno s P_{ppt} . Pri definiranju P_{ppt} postoje dva krajnja slučaja:

1. Postoji dovoljno otopljenog ugljika (C) i dušika (N) koji se pri hlađenju spajaju sa mikrolegirajućim elementima (M) otopljenim u austenitu. Pritom je:

$$(M) < [(C) Z_M/12] + [(N) Z_M/14] \quad (3.7)$$

Na osnovi eksperimentalnih mjerenja može se očekivati da će kod najmanjeg sadržaja mikrolegirajućeg elementa u mikrolegiranom čeliku volumni udio precipitata biti proporcionalan s otopljenim mikrolegirajućim elementom (M). Pritom P_{ppt} iznosi :

$$P_{ppt} = (M) \quad (3.8)$$

2. Sadržaj ugljika i dušika u čeliku nije dovoljan za spajanje s otopljenim mikrolegirajućim elementom. To je slučaj kada je:

$$(M) > [(C) Z_M/12] + [(N) Z_M/14] \quad (3.9)$$

Precipitacijski potencijal je tada proporcionalan sa sadržajem otopljenog ugljika i dušika:

$$P_{ppt} = [(C) Z_M/12] + [(N) Z_M/14] \quad (3.10)$$

c) Očvršćavanje čelika usitnjenjem zrna

Očvršćavanje usitnjenjem zrna temelji se na činjenici da sitnija kristalna struktura ima veći broj granica zrna čime je potrebno veće naprezanje kako bi se izazvala plastična deformacija. U realnim uvjetima se nastoji postići sitnije austenitno zrno jer ono predodređuje veličinu feritnog zrna.

Budući da s primjenom očvršćavanja čelika pomoću precipitacije (Orowanov mehanizam) treba biti oprezan, jer se uz povišenje granice razvlačenja povisuje i prelazna temperatura žilavosti (udarna radnja loma), značajnu ulogu ima usitnjenje zrna. Osim dodatkom aluminija usitnjenje zrna se može postići i:

- djelovanjem elemenata Nb, V i Ti (pojedinačno ili kombinirano) s ciljem da se ti elementi spoje s ugljikom i dušikom u karbide, nitride i/ili karbonitride i tako

- pojačaju djelovanje AlN. Pri tom uglavnom nastaju NbC, NbN, VC, VN, Nb(C, N), V(C, N) te (Nb, V)(C, N) koji sprječavaju rast zrna,
- sniženjem završne temperature valjanja kako bi se uz već stvorene karbide i nitride otežala rekristalizacija austenita, te tako dobio usitnjen austenit koji će se ispod temperature Ar₁ pretvoriti u sitni perlit/ferit.

Spojevi vanadija uglavnom uzrokuju očvršćavanje po Orowanovom mehanizmu, dok spojevi niobija ponajprije usitnjavaju zrno i time uzrokuju očvršćavanje po Hall-Petchovom mehanizmu:

$$R_e = R_0 + K_e \cdot d^{-1/2} \quad (3.11)$$

gdje je:

R₀ – naprezanje potrebno za klizanje dislokacija (mrežno trenje), N/mm².

R_e – granica razvlačenja, N/mm².

d – srednji promjer zrna, mm

K – konstanta ovisna o vrsti materijala (“otpor granica zrna”).

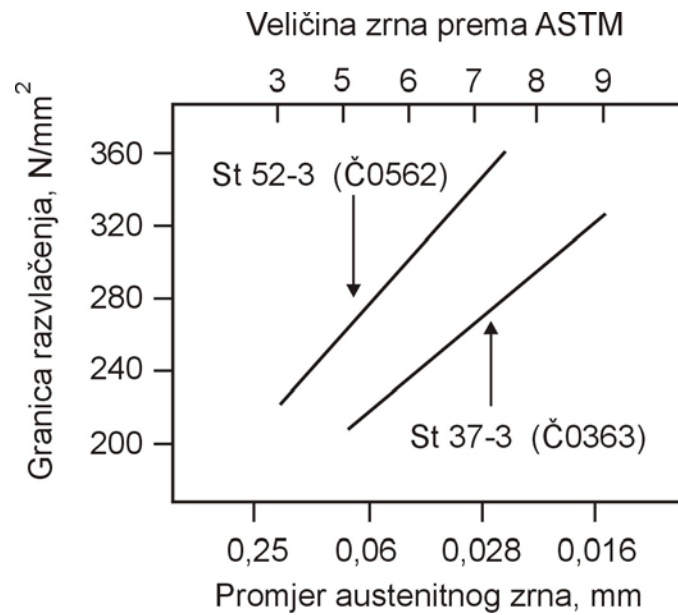
Veličina zrna utječe i na čvrstoću materijala, ali je taj utjecaj manji nego na granicu razvlačenja, pa zato sa sitnijim zrnom raste i omjer R_e/R_m. Glavna prednost Hall-Petchovog mehanizma odnosno usitnjenja zrna je istodobno povišenje granice razvlačenja i sniženje prelazne temperature žilavosti.

3.2.2. Mikrolegirani normalizirani sitnozrnati čelici

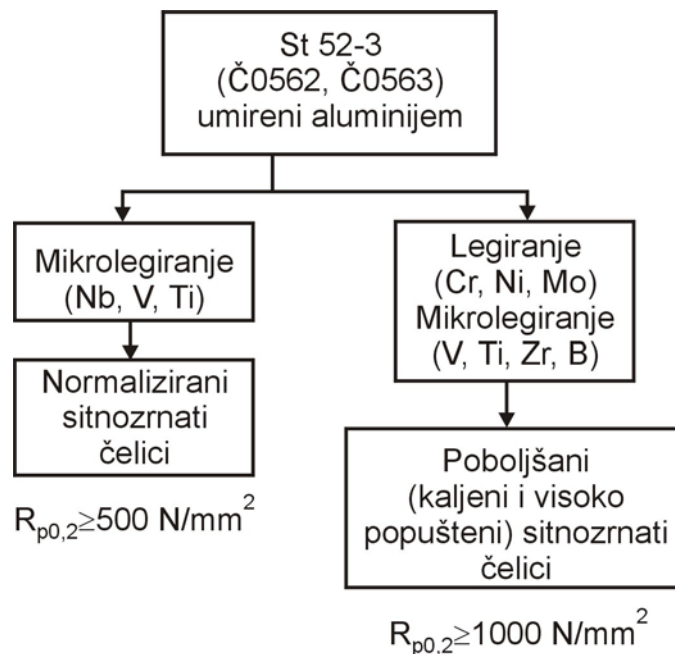
Sitnozrnati čelici su razvijeni prvenstveno iz čelika za nosive konstrukcije kao što su S355J0G3 (Č0562) i S355J2G3 (Č0563). Budući da su umireni aluminijem i silicijem imaju sitniju feritno-perlitnu mikrostrukturu, te zadovoljavajuću zavarljivost. Povišenjem udjela perlita (viši udio ugljika) može se postići visoka čvrstoća, ali tada opada zavarljivost i žilavost. Daljnim razvojem ove skupine čelika dodavani su mangan, nikel i krom kao legirajući elementi radi povišenja čvrstoće mehanizmom očvršćivanja pomoću kristala mješanaca (ferita). Međutim, posljedica takvog načina povišenja čvrstoće su pogoršana tehnološka svojstva (raste sklonost zakaljivanju pri zavarivanju).

Pozitivno djelovanje legirajućih elemenata na usitnjenje perlitno-feritnog zrna posebice je važno radi povišenja granice razvlačenja (slika 3.2.2). Dezoksidacijom taline sekundarnim aluminijem dolazi do nastanka Al₂O₃ (koji prelazi u trosku), ali i AlN koji većim dijelom ostaje u čeliku jednoliko dispergirani u obliku vrlo finih čestica. Tijekom hlađenja taline nitrid AlN nastaje pri 1200 °C, a pri zagrijavanju se počinje raspadati iznad 1050°C (potpuno se raspada >1350 °C što odgovara temperaturi zone utjecaja topline tijekom zavarivanja). Zagrijavanjem takvih čelika do 1200 °C te valjanjem do uobičajenih temperatura valjanja zrno ostaje sitno ukoliko hlađenje nije bilo presporo (poželjno hlađenje na zraku). Čestice nitrida AlN “opkoljavaju” zrno austenita i sprječavaju njegov rast (npr. pri zavarivanju, normalizaciji). Spoznaje o

povoljnom utjecaju sitnijeg zrna dobivenog povoljnim djelovanjem nitrida AlN dovele su do daljnjeg razvoja sitnozrnatih čelika, slika 3.2.3.



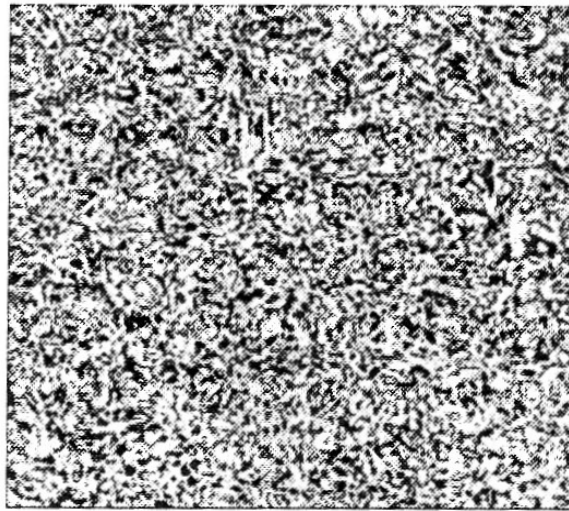
Slika 3.2.2. Ovisnost granice razvlačenja o veličini austenitnog zrna



Slika 3.2.3. Shematski prikaz razvoja sitnozrnatih mikrolegiranih čelika

Pored dodatka aluminija usitnjavanje zrna postiže se pojedinačnim ili kombiniranim (<0,1%) djelovanjem mikrolegirajućih elemenata (niobij, vanadij, titan) s ciljem da se spoje s ugljikom i dušikom u karbide, nitride i/ili karbonitride, te tako

pojačaju djelovanje nitrida AlN. Snižanjem završne temperature valjanja, uz prisutnost nitrida i karbida otežava se rekristalizacija austenita koji se ispod temperature Ar_1 pretvara u sitni perlit/ferit, slika 3.2.4. Sitnozrnati mikrolegirani čelici nisu osjetljivi na krhki lom. Dobra zavarljivost se postiže niskim masenim udjelom ugljika (<0,2%) i ekvivalentom ugljika ispod 0,4.



Slika 3.2.4. Feritno-perlitna mikrostruktura sitnozrnatog čelika

Mikrolegirajući elementi uglavnom djeluju stvaranjem karbida NbC i VC, nitrida NbN i VN te karbonitrida V(CN) i (Nb,V)(C,N) koji sprječavaju rast austenitnog zrna. Navedeni precipitacijski produkti su dovoljno gusto dispergirani, sitni, toplinski otporni i tvrdi da predstavljaju učinkovite zapreke gibanju dislokacija te utječu na usitnjenje zrna. Čelici proizvedeni na takav način uglavnom dobivaju naziv HSLA (eng. High Strength Low Alloyed) čelici. Feritno-perlitno zrno biti će to sitnije što je bilo sitnije austenitno zrno. Sitna austenitna zrna imaju veću ukupnu graničnu površinu nego krupna pa je broj feritnih klica veći.

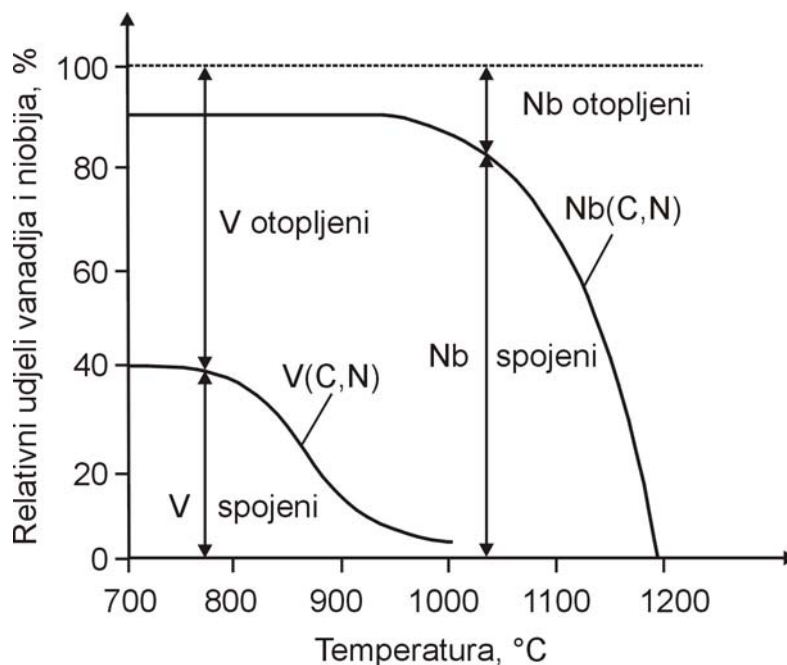
Osim povišenjem sadržaja perlita (povišenjem sadržaja ugljika) očvršćivanje čelika može se postići stvaranjem miješanog kristala, precipitacijskim očvršćavanjem i usitnjenjem zrna. Stvaranje miješanog kristala (npr. preko silicija) odražava se negativno na žilavost i zavarljivost. Utjecaj precipitacijskog očvršćivanja je znatno povoljnije, tablica 3.2.2.

Tijekom žarenja mijenjaju se udjeli vanadija i niobija spojeni u karbonitride, slika 3.2.5. Što je temperatura žarenja viša precipitirane čestice su grublje, a stupanj inkohherentnosti u austenitu veći, pa im je i utjecaj manji.

Tablica 3.2.2. Utjecaj mikrostrukture i procesa izlučivanja na svojstva konstrukcijskih čelika

Svojstvo	Djelovanje				
	Sadržaj perlita	Stvaranje miješanog kristala	Precipitacijsko očvršćivanje	Usitnjenje zrna	Utjecaj na uključke
Čvrstoća	+	+	+	+	0
Žilavost	-	-	-	+	+
Zavarljivost	-	-	- / 0	0	0
Sposobnost oblikovanja	-	- / 0	-	+ / 0	+

+ = poboljšanje; - = pogoršanje; 0 = bez utjecaja



Slika 3.2.5. Utjecaj temperature normalizacije na intenzitet otapanja V(C,N) i Nb(C,N) u čeliku s 0,2% C

Ukoliko je toplovaljanom čeliku završna temperatura valjanja bila iznad temperature A_{r3} nakon hlađenja mikrostruktura takvog čelika je grubozrnata. Da bi se postiglo usitnjenje zrna i omogućilo očvršćivanje po Hall-Petchovom mehanizmu potrebno je provesti normalizaciju (zagrijavanje do ~ 900 °C i hlađenje na zraku). Normalizacijom će se toplo valjani čelik dovesti u austenitno područje, te će mu se ukloniti nepoželjna sekundarna struktura (trakasta struktura, usmjerenost). Zagrijavanjem i kratkim zadržavanjem na ~ 900 °C omogućuje se spajanje aluminija i dušika u nitrid AlN koji se fino dispergira u austenitu. Nastale čestice nitrída AlN predstavljaju klice kristalizacije perlitno-feritnih zrna.

Izlučivanje čestica nitrida pojačava se ukoliko čelik sadrži određenu količinu niobija i/ili vanadija. Što je temperatura normalizacije viša to je viši udio otopljenog vanadija odnosno niobija, ali i grublje zrno austenita. Stoga učinak precipitacijskog očvršćivanja u slučaju normalizacije HSLA čelika podliježe kompromisu: ne pregrubo zrno pri temperaturi austenitizacije, ali dovoljno otopljenog niobija i/ili vanadija koji će precipitacijom "čuvati" sitnije zrno i djelovati kao zapreka za gibanje dislokacija. Prikaz djelovanja otopljenog odnosno precipitiranog niobija i vanadija naveden je u tablici 3.2.3.

Tablica 3.2.3. Djelovanje otopljenog i precipitiranog vanadija i niobija

	[M]_γ (otopljeno u austenitu)	MX (izlučeno kao nitrid i/ili karbid)	
Djelovanje	- usporenje difuzije - sniženje temperature transformacije $\gamma \rightarrow \alpha$	- usporenje rekristalizacije	- sprečavanje pogrubljenja zrna ("blokiranje" granice zrna) - otežanje gibanja dislokacija
Strukturne pojave	- usitnjenje zrna - očvrstnuće dislokacijama	- usitnjenje zrna - pojava teksture	- usitnjenje zrna - precipitacijsko očvrstnuće

Veličina, raspored i djelovanje karbida, nitrida i karbonitrida mikrolegirajućih elemenata ovisi o trenutku i temperaturi njihovog nastanka, tablica 3.2.4.

Tablica 3.2.4. Vrste karbida, nitrida i karbonitrida u mikrolegiranim čelicima

Vrsta i veličina čestica	Proces izlučivanja	Primjer nastalog spoja
Grubi, uglasti uključci; $\sim 10^4 \mu\text{m}$	Izlučivanje prije ili za vrijeme skrućivanja	TiN ZrN
Grube čestice; $\sim 10^2 \mu\text{m}$	Izlučivanja na granicama zrna	NbC TiC
Sitne čestice; $\sim 10^1 \mu\text{m}$	Izlučivanja inducirana oblikovanjem	NbC
Sitne čestice svrstane u nizove; $\sim 10^1 \mu\text{m}$	Izlučivanja na granici faza γ/α	NbC V(C, N)
Ekstremno sitne, djelomično koherentne čestice, klasteri; $< 10^1 \mu\text{m}$	Izlučivanja u α -fazi	NbC TiC V(C, N)

3.2.3. Poboljšani sitnozrnati čelici

Poboljšani sitnozrnati čelici razvijeni su u trećem stadiju razvoja čelika za nosive konstrukcije. Glavna karakteristika ovih čelika je da su kaljeni u vodi s temperature oblikovanja te dodatno popušteni pri temperaturi 680-710 °C. Zahtjevi u pogledu mogućnosti dobrog zavarivanja ove skupine čelika uvjetovali su da svi čelici iz ove skupine konstrukcijskih čelika sadrže ispod 0,2% ugljika. Niskougljični martenzit je najpogodniji za postizanje zadovoljavajuće kombinacije čvrstoće i žilavosti. U odnosu na feritno-perlitnu i bainitnu mikrostrukturu martenzit je izrazito neosjetljiv na krhki lom.

Mikrolegiranjem se povisuje temperatura početka nastanka martenzita ($M_s \approx 400$ °C) tako da pri hlađenju dolazi do poboljšavanja samopopuštanjem martenzita u površinskim slojevima uslijed djelovanja topline jezgre (javlja se poboljšana žilavost čelika). Mikrolegiranjem se može postići:

- smanjenje utjecaja debljine čelika tako da se postigne što viša prokaljenost (>90% martenzita i/ili bainita u sredini presjeka),
- dobivanje niskougljičnog martenzita ili donjeg bainita prilikom hlađenja na zraku,
- izbjegavanje nastanka ferita tijekom hlađenja na zraku - mogu nastati pukotine (povoljno je djelovanje molibdena, bora i kroma),
- treba paziti na moguće snižavanje M_s temperature i samopopuštanje martenzita,
- stvaranje sitnijeg zrna.

Pored legirajućih elemenata (Cr, Mn, Ni, Mo, Co) poboljšani sitnozrnati čelici dodatno se mikrolegiraju s vanadijem, titanom, cirkonijem i borom. Poboljšani sitnozrnati čelici se najčešće primjenjuju kod izrade kuglastih spremnika za plinove, mostova, dijelova građevinskih strojeva i dizalica, vozila, vagona, kućišta i rotora vodenih turbina, cjevovoda, dijelova brodova (npr. jarboli, štitnici pramca) itd.

3.2.4. Konstrukcijski čelici s niskim sadržajem perlita ili bez perlita

Osim klasičnih postupaka proizvodnje konstrukcijskih čelika u drugoj polovici 20-og stoljeća razvijena je nova tehnologija koja je obuhvaćala i toplinsku obradu pa je takav postupak nazvan termomehanička obradba. Takvim načinom proizvedeni čelici već u valjanom stanju posjeduju povoljnu granicu razvlačenja i otpornost prema krhkom lomu. Međutim, termomehanička obradba je djelotvorna samo ukoliko je sadržaj ugljika vrlo nizak, pa ne utječe na povišenje čvrstoće. Takvi čelici predstavljaju treću skupinu zavarljivih konstrukcijskih čelika povišene čvrstoće, koja se od prve dvije grupe (normalizirani, poboljšani) razlikuje po kemijskom sastavu, načinu proizvodnje i mehanizmu povišenja čvrstoće. Kemijski sastav konstrukcijskih čelika siromašnih perlitom i bez perlita prikazan je u tablici 3.2.5.

Tablica 3.2.5. Usporedba kemijskog sastava konstrukcijskog čelika St 52-3 sa čelicima siromašnim perlitom i bez perlita

Čelik	Kemijski sastav, mas. %				
	C	Si	Mn	Nb	V
St 52-3	0,16-0,20	0,10-0,55	1,20-1,50	-	-
Čelik siromašan perlitom	0,08-0,12	0,10-0,40	1,00-2,00	0-0,08	0-0,10
Čelik bez perlita	0,01-0,02	0,10-0,40	1,00-2,00	0-0,08	0-0,10

Čelici siromašni perlitom sadrže 0,08-0,12% ugljika, dok su čelici bez perlita odugličeni postupcima sekundarne metalurgije do ekstremno niskog sadržaja ugljika (maksimalno 0,02%). Izrazito nizak sadržaj ugljika onemogućuje stvaranje perlita. Zbog sniženog sadržaja ugljika izostaje njegov utjecaj na čvrstoću pa je kod takvih čelika potrebno primijeniti mikrolegiranje niobijem ili vanadijem radi povišenja čvrstoće. Niobij i vanadij zbog visokog afiniteta prema ugljiku i dušiku stvaraju tijekom hlađenja čelika fino raspoređene čestice karbonitrida.

Čelici siromašni perlitom ili bez perlita ispunjavaju zahtjeve u pogledu visoke granice razvlačenja, poboljšane žilavosti, te dobre zavarljivosti. Uglavnom se primjenjuju kao visokočvrsti, zavarljivi konstrukcijski čelici i to kod transporta plina i nafte, za izradu spremnika tekućina pod tlakom i pri niskim temperaturama (npr. tekući propilen i amonijak na temperaturi od -50 °C do 40 °C) itd.

3.3. Konstrukcijski čelici namijenjeni primjeni pri $\approx 20^{\circ}\text{C}$ (zajamčen sastav i svojstva)

Čelični proizvodi izrađeni od čelika iz ove skupine konstrukcijskih čelika prije primjene podvrgavaju se postupku kaljenja, tj. pretvorbi austenita u ugljični martenzit. Ukoliko se zakaljeni proizvod popušta nisko ($<250^{\circ}\text{C}$) njegovo stanje se naziva kaljenim, a ukoliko se popušta visoko ($>500^{\circ}\text{C}$) stanje mu se naziva poboljšanim. Učinak kaljenja procjenjuje se pomoću zakaljivosti i prokaljivosti čelika. Zakaljivost predstavlja sposobnost čelika da gašenjem poprimi što višu tvrdoću, a prokaljivost predstavlja sposobnost što jednoličnije tvrdoće.

3.3.1. Čelici za cementaciju

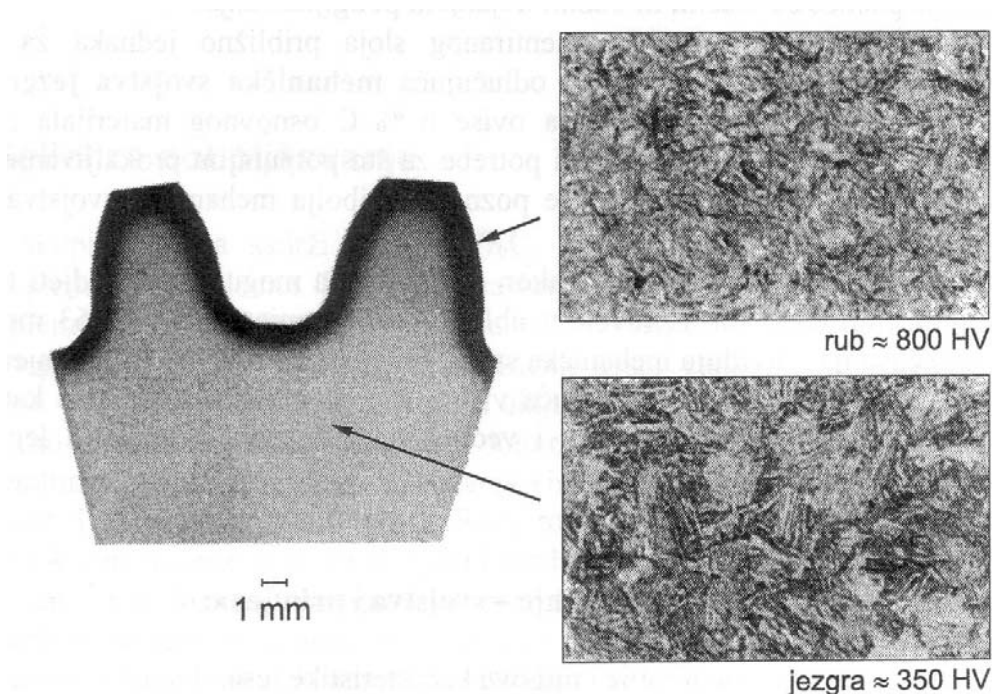
Čelici za cementaciju predstavljaju konstrukcijske čelike kojima se nakon obrade odvajanjem čestica pougljičava rubni sloj. Nakon pougljičavanja rubnog sloja provodi se kaljenje kako bi se postigla visoka otpornost na trošenje rubnih slojeva, te povišena žilavost nepougljičene jezgre. Čelici za cementaciju uglavnom sadrže 0,1-0,2% ugljika prije pougljičavanja, a mogu biti ili nelegirani ili niskolegirani (tablica 3.3.1). Nakon pougljičenja rubni sloj sadrži 0,8-0,9% ugljika, te se zakaljivanjem postiže tvrdoća 61-64 HRC.

Tablica 3.3.1. Čelici za cementaciju

Oznaka čelika		Sastav, "ostalo", %	Tvrdoća u isporučenom stanju, HB	Slijepo kaljeno ϕ 30 mm			Kaljenje	
DIN 17006	HRN			$R_{p0,2}$, N/mm ² min.	R_m , N/mm ²	A_5 , % min.	Jezgra, $^{\circ}\text{C}$	Rub, $^{\circ}\text{C}$
C10	Č1120	-	90-126	295	490-640	16	880-920;	-
C15	Č1220	-	103-140	355	590-790	14	voda	-
Ck10	Č1121	-	90-126	295	490-640	16	880-920;	-
Ck15	Č1221	-	103-140	355	590-790	14	voda	-
15Cr3	Č4120	-	118-160	440	690-890	11	870-900;	-
16MnCr5	Č4320	1Cr	140-187	590	780-1080	10	voda, ulje	810-840;
							850-880;	
20MnCr5	Č4321	1,2Cr	152-201	685	980-1280	7	850-880;	810-840;
20CrMo5	Č4721	0,25Mo	152-201	785	1080-1380	7	ulje	ulje
20MoCr4	Č7420	0,4Cr	140-187	590	780-1080	10	850-880;	810-840;
							ulje	
15CrNi6	Č5420	1,5Ni	152-201	635	880-1180	9	890-920;	-
18CrNi8	Č5421	2Ni	170-217	785	1180-1430	7	ulje	800-830;
							840-870;	

Budući da niskouglični čelici s 0,1-0,2% ugljika nisu skloni povišenju tvrdoće kaljenjem (tek čelici s 0,25% C) potrebno im je radi zakaljivanja i povećanja otpornosti na abrazijsko trošenje povisiti sadržaj ugljika u rubnim slojevima (0,8-0,9% C). Povišenje sadržaja ugljika postiže se postupkom pougličavanja (npr. granulat, solna kupka, plin). Ugljikom obogaćeni rub postaje zakaljiv, tj. gašenjem s odgovarajuće temperature austenitizacije postaje sklon poprimanju mikrostrukture visokougličnog martenzita otpornog na trošenje. U području toplinske obradbe čelika postupak pougličavanja i kaljenja pogljičenog sloja naziva se cementacija.

Nakon cementacije pougličena jezgra ostaje feritno-perlitna ukoliko proizvod nije prokaljen, tj. nastaje niskouglični martenzit u slučaju prokaljivanja (slika 3.3.1). Obje navedene mikrostrukture karakterizira visoka udarna radnja loma pa je konačni proizvod otporan na trošenje s znatnim iznosom žilavosti. Nakon cementacije površinski slojevi sadrže visokouglični martenzit.



Slika 3.3.1. Mikrostruktura cementiranog zupčanika izrađenog iz čelika 16MnCr5

U slučaju legiranih čelika poželjna je prokaljenost jer se cementirani čelici nisko popuštaju (≤ 220 °C) pa se žilavost jezgre postiže niskougličnim martenzitom. Čelici za cementaciju se rijetko visoko popuštaju, a ukoliko se to i dogodi tada se smatraju niskougličnim čelicima za poboljšanje. Visoko popuštanje ne kombinira se s postupkom pougličavanja jer bi pougličeni rub pri popuštanju na temperaturi >220 °C toliko omekšao da ne bi bio dovoljno otporan na trošenje.

Čelici za cementaciju mogu se podijeliti u tri grupe (tablica 3.3.1):

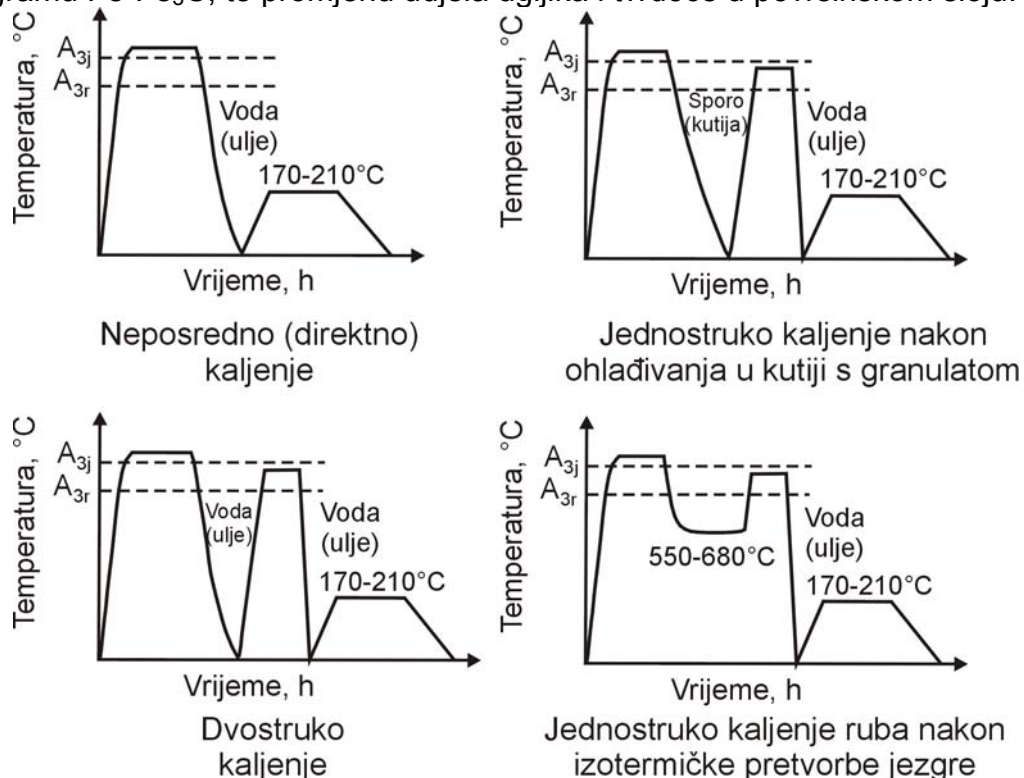
- kvalitetni čelici (npr. C10 i C15),
- nelegirani plemeniti čelici (npr. Ck10 i Ck15),
- legirani plemeniti čelici (npr. 15Cr3, 16MnCr5 itd.).

Plemeniti čelici razlikuju se od kvalitetnih po nižem sadržaju sumpora i fosfora, jednoličnosti svojstava (jezgra-rub), kvaliteti obrađenih površina, te manjem broju nemetalnih uključaka. Glavne grupe plemenitih čelika su:

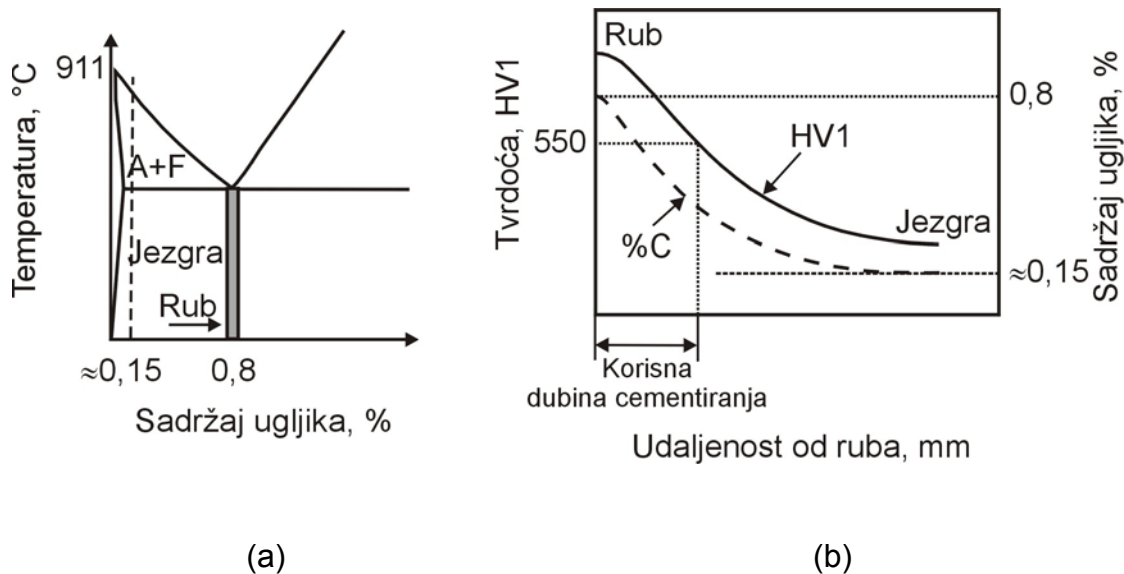
- čelici jednostruko legirani kromom,
- čelici legirani kromom i manganom,
- čelici legirani kromom i molibdenom,
- čelici legirani kromom i niklom.

Prvenstveni cilj legirajućih elemenata je utjecaj na jače prokaljivanje pri gašenju nakon pougličavanja. Legirajući elementi također utječu na brzinu procesa pougličavanja, sadržaj ugljika u površinskoj zoni, dubinu cementiranog (pougličanog) sloja. Karbidotvorci (kao npr. krom, molibden, vanadij, mangan) snižavaju koeficijent difuzije ugljika u austenitu, odnosno povećavaju udio ugljika u rubnom sloju, što može dovesti do intenzivnog stvaranja karbida, ali i do pojave površinskih pukotina.

Najčešće korišteni načini pougličavanja i kaljenja (cementacije) prikazani su slikom 3.3.2. Uglavnom se pougličavanje provodi u granulatu (drveni ugljen + $BaCO_3$), u kapljevitom sredstvu (rastaljene cijanidne soli) ili u plinovitom sredstvu (ugljikovodici). Direktno kaljenje se uglavnom primjenjuje nakon pougličavanja u solnoj kupki, a jednostruko kaljenje nakon sporog hlađenja u granulatu ili u plinu. Dvostruko kaljenje ili kaljenje nakon izotermičke pretvorbe nepougličene jezgre provodi se najčešće nakon pougličavanja legiranih čelika u granulatu ili plinu. Nakon završnog kaljenja kod navedenih postupaka primjenjuje se nisko popuštanje ($170-220\text{ }^{\circ}\text{C}$). Slika 3.3.3. prikazuje promjenu temperature nepougličene jezgre i pougličanog ruba u dijagramu Fe-Fe₃C, te promjenu udjela ugljika i tvrdoće u površinskom sloju.



Slika 3.3.2. Shematski prikaz dijagrama najčešćih postupaka cementacije
j – jezgra, r – rub sloja



Slika 3.3.3. Shematski prikaz promjene sadržaja ugljika (a) i tvrdoće (b) tijekom pougljičavanja

Jedan od glavnih problema pri propisivanju postupka pougljičenja i kaljenja je određivanje pravilne temperature gašenja. Budući da u isto vrijeme postoje mjesta s visokim sadržajem ugljika (rub s preko 0,8%) i niskim sadržajem ugljika (jezgra s ispod 0,2%) potrebno je izabrati kompromisnu temperaturu gašenja. Temperatura gašenja treba biti niža od one idealne za jezgru (temperatura kod koje se rubni sloj pregrijava što uzrokuje pogrubljenje martenzita i porast krhkosti) i viša od idealne za visokouglični rub (kod koje je nepotpuno zakaljivanje jezgre). U tom pogledu najmanje problema se javlja kod nelegiranih čelika, kod kojih se dopušta tzv. direktno kaljenje, tj. gašenje s temperature pougljičenja. Iz takvih nelegiranih čelika izrađuju se proizvodi manjih dimenzija te proizvodi za sporedne namjene koji su izloženi manjim udarnim naprezanjima.

Čelici 15Cr3 (Č4120) i 20MoCr4 (Č7420) smiju se direktno kaliti budući nisu skloni rastu zrna pri visokoj austenitizaciji prvenstveno zbog prisutnosti kroma i molibdena. Sve ostale legirane čelike treba nakon pougljičenja sporo ohladiti i ponovno ih austenitizirati do temperature koja je nešto viša od one potrebne za rub, te konačno gasiti (zakaliti). Sporo hlađenje nakon pougljičavanja utječe na usitnjenje zrna koje je pougljičenjem ogrubjelo. Nakon pougljičavanja u kupki ne provodi se sporo hlađenje zbog opasnosti od pojave kemijskih reakcija između ostataka soli i čelika.

Dubina cementiranog sloja se regulira trajanjem pougljičavanja. Legirajući elementi utječu na dubinu cementiranog sloja preko koeficijenta difuzije i aktiviteta ugljika, tj. preko koncentracije ugljika u rubnom sloju. Nekarbidotvorci (npr. nikal, mangan) omogućavaju postizanje veće dubine cementacije nego karbidotvorci (npr. krom, molibden, vanadij).

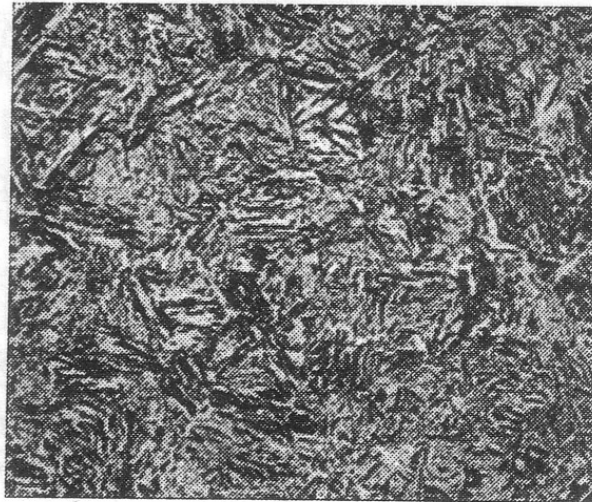
Iako ne postoji strogo pravilo, ipak se može približno procijeniti da će za proizvode do promjera oko 10 mm biti prikladni nelegirani čelici, za one do promjera 80 mm Mn-Cr čelici, a za one konačnih dimenzija promjera iznad 80 mm uglavnom Cr-Mo i Cr-Ni čelici.

Glavne karakteristike pojedinih vrsta čelika za cementaciju su slijedeće:

- a) Nelegirani kvalitetni i plemeniti čelici su kaljivi (neposredno) samo u vodi. Svojstva jezgre su loša, pa se ova skupina čelika primjenjuje samo za dijelove manjih dimenzija i malih udarnih opterećenja (npr. dijelovi šivaćih i pisaćih strojeva, poluge, svornjaci, dijelovi koji su opterećeni na trošenje, a ne na udar).
- b) Kromom legirani čelici su skloni stvaranju karbida u pougličanom rubnom sloju, pa ih je potrebno pougličavati u nekom blažem sredstvu. Iskazuju vrlo visoku otpornost na trošenje ukoliko zrno u rubnom sloju nije pogrubjelo. Direktno su kaljivi u vodi, ali se dijelovi manjih dimenzija mogu uspješno zakaliti i prokaliti u ulju. Ova skupina cementiranih čelika uglavnom se primjenjuje u automobilskoj industriji (npr. za poluosovine, bregaste osovine, manji zupčanci, osovine kotača itd.).
- c) Mn-Cr čelici unatoč visokom udjelu kroma nisu izrazito skloni pojavi karbida u rubnom sloju (zbog prisutnosti mangana). Prisutnost mangana i kroma povisuje prokaljivost pa je ova skupina čelika prikladna za izradu proizvoda srednjih dimenzija (npr. zupčanci alatnih strojeva, bregaste osovine motora s unutarnjim izgaranjem, radilice u kliznim ležajevima itd.). Mn-Cr čelici su osjetljivi na pregrijavanje pa ih je nakon pougličanja potrebno polagano hladiti, a tek zatim ponovno austenitizirati, gasiti i popustiti.
- d) Cr-Mo i Mo-Cr čelici nemaju neku posebnu namjenu već se uglavnom primjenjuju kao zamjena za skuplje Ni-Cr čelike. Glavnu prednost Mo-Cr čelika predstavlja sposobnost za direktno gašenje. Molibden kao jaki karbidotvorac stvara karbide koji su vrlo otporni na trošenje, ali ipak dovodi do toga da čelik postaje osjetljiviji pa je pougličavanje potrebno provesti u blažem sredstvu i u kraćem vremenu.
- e) Cr-Ni čelici imaju uravnoteženo djelovanje što se tiče izdvajanja karbida i utjecaja nikla. Uglavnom se ova skupina cementiranih čelika primjenjuje za izradu proizvoda najvećih dimenzija (npr. zupčanci lokomotiva) i za rad u otežanim uvjetima (npr. pri vrlo niskim temperaturama). Također se koriste za izradu koljenastih osovina, osovina zrakoplova, pužnih vijaka itd. Nedostak im je što su skloni pojavi zaostalog austenita u rubnim slojevima, pa ih treba gasiti s nižih temperatura (780-800 °C) ili "duboko hladiti" odmah po završenom gašenju.

3.3.2. Čelici za poboljšavanje

Čelici za poboljšavanje pripadaju skupini nelegiranih ili niskolegiranih konstrukcijskih čelika koji kaljenjem i visokim popuštanjem (>500 °C) postižu odgovarajuću granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i žilavost. Kaljenjem se nastoji postići što potpunija martenzitna mikrostruktura po presjeku, tj. što viša prokaljenost (slika 3.3.4). Ova skupina čelika sadrži 0,25-0,60% ugljika koji utječe na njihovu zakaljivost. U čelike za poboljšavanje ubrajaju se i čelici za cementaciju koji nisu pougljičeni, ali su kaljeni s temperature austenitizacije jezgre te popušteni pri temperaturi oko 200 °C ili iznad 500 °C.



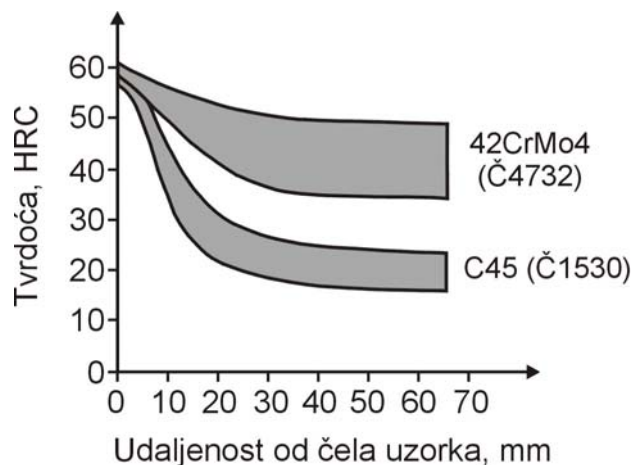
Slika 3.3.4. Visokopopušteni martenzit u mikrostrukturi poboljšanog čelika (povećanje 500x)

Odgovarajućim izborom čelika za poboljšavanje i prikladnom provedbom postupka poboljšavanja postiže se visoka “konstrukcijska čvrstoća” proizvoda. Pod pojmom “konstrukcijska čvrstoća” podrazumijeva se visoka granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, žilavost te dinamička izdržljivost. Kako se pri visokom popuštanju kaljenog čelika mikrostrukturno mijenjaju martenzit i donji bainit, a ostali mikrostrukturni konstituenti ostaju nepromijenjeni, može se zaključiti da se idealna jednoličnost svojstava preko cjelokupnog presjeka proizvoda može postići samo potpunim prokaljivanjem. Potpuno prokaljivanje podrazumijeva gašenje cijelog presjeka proizvoda nadkritičnim intenzitetom kako bi mikrostruktura bila potpuno martenzitna. Na taj način postiže se maksimalno moguća udarna radnja loma i jednoličnost ostalih mehaničkih svojstava.

Prokaljivost se određuje na osnovi stupnja zakaljenosti (S_k) koji se definira kao omjer tvrdoće kaljenja na nekom mjestu presjeka ($H_{kaljeno}$) i maksimalno postizive tvrdoće ($H_{max.}$) za određeni čelik:

$$S_k = \frac{H_{kaljeno}}{H_{max.}} = 0,72 - 1,00 \quad (3.12)$$

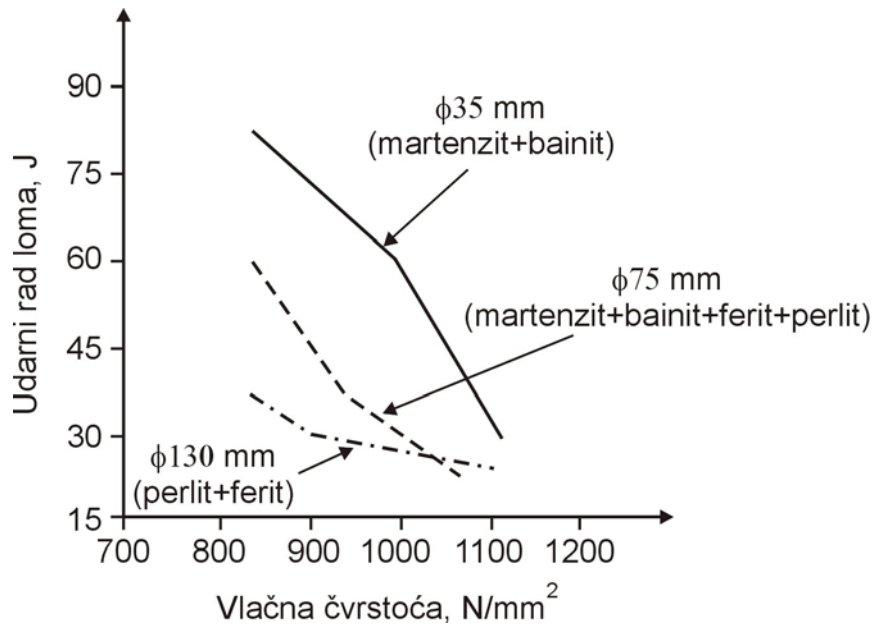
Vrijednost stupnja zakaljenosti $S_k \cong 0,72$ odgovara približno 50%-tnoj martenzitnoj mikrostrukturi, a vrijednost $S_k \cong 1,00$ odgovara 100%-tnoj martenzitnoj mikrostrukturi. Prokaljivost čelika se standardno određuje čeonim gašenjem Jominy metodom. Svaki čelik ima područje zajamčene prokaljivosti (slika 3.3.5.).



Slika 3.3.5. Područja zajamčene prokaljivosti (Jominy) čelika Ck45 i 42CrMo4 za poboljšavanje

Visoko popuštanje čelika za poboljšanje mora se provesti radi postizanja dovoljne žilavosti srednje- i visokougličnog martenzita. Niskim popuštanjem se mogu postići više vrijednosti granice razvlačenja, ali proizvod ostaje krhak. Granica razvlačenja čelika za poboljšanje najčešće iznosi do 1200 N/mm^2 , a temperatura popuštanja je iznad $500 \text{ }^\circ\text{C}$ (najčešće $550\text{-}680 \text{ }^\circ\text{C}$). Čelici s nižim sadržajem ugljika (čelici za cementaciju) mogu se nisko popuštati jer im niskouglični martenzit osigurava dovoljnu žilavost.

Pozitivan utjecaj prokaljenosti na žilavost poboljšanog proizvoda shematski je prikazan na slici 3.3.6. Analizom slike 3.3.6 može se zaključiti da čelik za poboljšanje treba odabrati prema što boljoj prokaljivosti, tj. da je viši stupanj legiranosti. Pritom su kao mikrostrukturni konstituenti povoljni martenzit i donji bainit, dok su gornji bainit, perlit i ferit nepovoljni jer snižavaju vrijednost udarne radnje loma. Razlog tome je što gornji bainit i perlit imaju nejednolični raspored razmjerno grubih karbida u usporedbi s donjim bainitom i popuštenim martenzitom.



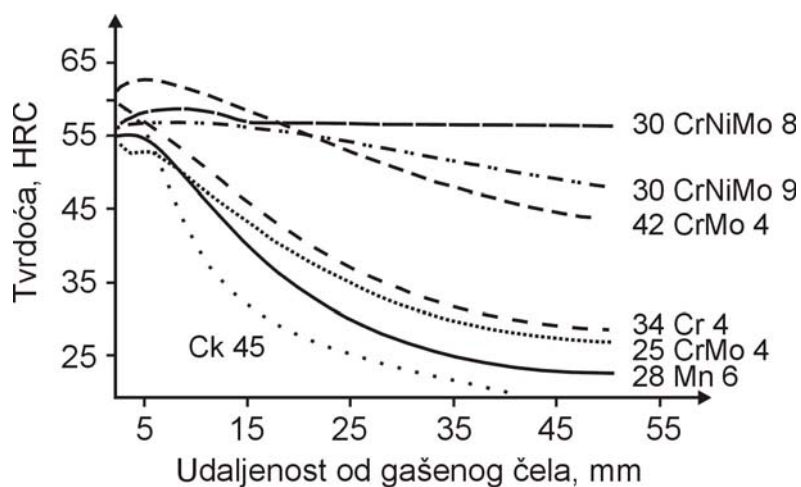
Slika 3.3.6. Utjecaj mikrostrukture nakon gašenja i promjera čelika 50CrV4 (Č4830) na vlačnu čvrstoću i udarnu radnju loma popuštene jezgre gotovog čeličnog proizvoda

Nekoliko uobičajenih čelika za poboljšavanje navedeno je u tablici 3.3.2. Čelici za poboljšavanje se uglavnom isporučuju i obrađuju odvajanjem čestica u mekožarenom stanju, pa im je uz mikrostrukturu glavni pokazatelj obradljivosti najviša dopuštena tvrdoća, slika 3.3.7. Posebnu grupu čelika za poboljšavanje čine nelegirani čelici koji mogu biti kvalitetni (npr. C35, C45, C60) ili plemeniti (npr. Ck35, Ck45, Ck60). Vlačna čvrstoća ove skupine čelika raste s porastom sadržaja ugljika, ali karakterizira ih slaba prokaljivost. Nelegirani čelici za poboljšavanje se primjenjuju samo za dobivanje gotovog proizvoda dimenzije do promjera 40 mm (iznimno promjera 100 mm) budući da kod promjera iznad 40 mm nema transformacije austenit → martenzit već austenit → perlit+ferit. Također, nelegirani čelici su skloni pregrijavanju, tj. pojavi grubog zrna u mikrostrukтури.

Tablica 3.3.2. Čelici za poboljšavanje

Oznaka čelika		Sastav "ostalo" %	Stanje meko žareno HB _{max}	Promjer proizvoda 16-40 mm*				Promjer proizvoda 160-250 mm*				Toplinska obradba, °C/hlađenje	
DIN 17006	HRN			R _m , N/mm ²	R _{p0.2} , N/mm ² , min.	A ₅ , %	KV, J, min.	R _m , N/mm ²	R _{p0.2} , N/mm ² , min.	A ₅ , %	KV, J, min.	Kaljenje	Popuštanje
C35 Ck35	Č1330 Č1331	-	172	580-730	365	19	41					840 -870 voda	550-660 zrak, peč
C45 Ck45	Č1530 Č1531	-	206	660-810	410	16	27					820 -850 voda	550-660 zrak, peč
C60 Ck60	Č1630 Č1631	-	243	780-930	490	13	-					800-830 voda	550-660 zrak, peč
28 Mn 6	Č3135		223	690-840	490	15	48					830-860 voda, ulje	550-660 ulje
34 Cr 4	Č4130		217	780-930	590	14	48					840-870 voda, ulje	540-680 ulje
25 CrMo 4	Č4730	0,2 Mo	217	780-930	590	14	55					850-880 ulje	540-680 zrak, peč
34 CrMo 4	Č4731	0,2 Mo	217	880-1080	665	12	50	690-840	460	15	48	840-870 ulje	540-680 zrak, peč
42 CrMo 4	Č4732	0,2 Mo	217	980-1180	765	11	41	740-890	510	14	41	830-860 ulje	540-680 zrak, peč
30 CrMoV 9	Č4734	0,2 Mo 0,15 V	248	1230-1430	1030	9	34	880-1080	685	12	48	850-880 ulje	540-680 zrak, peč
50 CrV 4	Č4830	0,15 V	235	980-1180	785	10	34	780-930	590	13	34	830-860 ulje	540-680 zrak
36 CrNiMo 4	Č5430	1 Ni 0,2 Mo	217	980-1180	785	11	41	740-890	540	14	48	830-860 ulje	540-680 zrak
30 CrNiMo 8	Č5432	2 Ni 0,4 Mo	248	1230-1430	1030	9	34	880-1080	685	12	48	830-860 ulje	540-680 zrak

* Nakon popuštanja pri 600 °C



Slika 3.3.7. Jominy krivulje prokaljivosti čelika za poboljšavanje

Manganski čelik za poboljšavanje (npr. 28Mn6) bolje je prokaljiv od nelegiranog čelika, a može se gasiti i u ulju. Međutim, mangan kao gamageni element potiče nastanak grubog zrna i pojavu krhkosti popuštanja. Krhkost popuštanja je pojava pada žilavosti nekih čelika ukoliko se popuštaju u temperaturnom području od 450 do 600 °C. Pojava krhkosti popuštanja može se spriječiti brzim hlađenjem. Iz tog razloga toplinska obradba manganskih čelika je znatno osjetljivija te se primjenjuje za proizvode do promjera 100 mm. Dodatkom 0,8-1,2% silicija može se djelomično povisiti granica razvlačenja i smanjiti sklonost pregrijavanju.

Čelici legirani kromom (npr. 34Cr2) primjenjuju se za proizvode promjera do 100 mm (iznimno promjera 160 mm). Krom povisuje granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću te djeluje na usitnjenje zrna. Kod čeličnih proizvoda promjera 60 mm u jezgri dolazi do transformacije austenit → martenzit+ferit što nepovoljno djeluje na žilavost.

Cr-Mo i Cr-Ni-Mo čelici su dobro prokaljivi i nisu skloni krhkosti popuštanja. Najotporniji su na popuštanje te mogu poslužiti za rad pri temperaturama do 550 °C. Djelovanje molibdena osigurava martenzitnu i bainitnu (donji bainit) mikrostrukturu kod većih dimenzija čeličnog proizvoda (promjera iznad 250 mm) i kod niskih temperatura (-70 °C), a posebno pozitivno utječe na povećanje otpornosti protiv krhkosti popuštanja. Dodatak vanadija pozitivno djeluje na usitnjavanje zrna, a time i na žilavost pri sobnoj i sniženoj temperaturi.

Nelegirani čelici za poboljšavanje najčešće se primjenjuju za izradu strojnih dijelova (npr. bandaže, manje opterećeni zupčanici), osovina generatora i vodenih turbina, svornjaka, sidrenih vijaka, strojnih vretena itd. Legirani čelici za poboljšavanje uglavnom služe za izradu dijelova koji su pod većim opterećenjem kao što su koljenaste osovine, bregaste osovine motora s unutarnjim sagorijevanjem, poluosovine automobila, kamiona i autobusa, valjci, visoko opterećeni zupčanici, lančanici dizala itd.

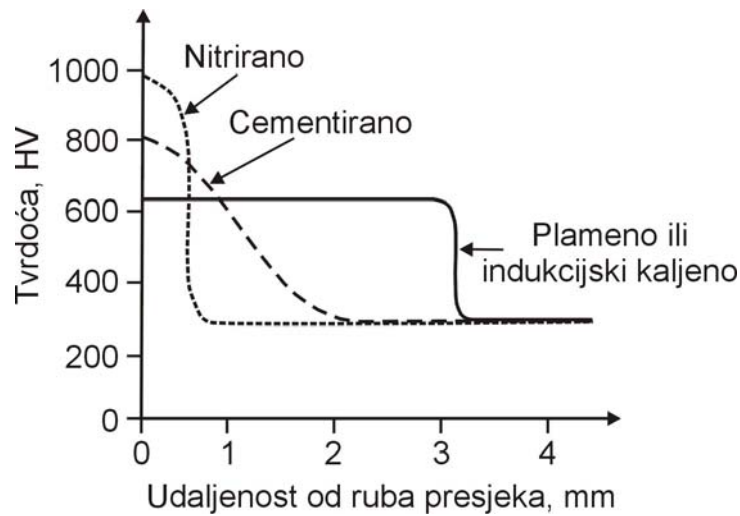
Čelici za poboljšavanje se mogu podijeliti u dvije skupine s obzirom na njihovu namjenu. Podskupine čelika za poboljšavanje su čelici za površinsko kaljenje i čelici za velike otkovke.

a) Čelici za površinsko kaljenje

Plamenim ili indukcijskim površinskim kaljenjem može se postići visoka otpornost na trošenje i dinamička izdržljivost površinskih slojeva nekih čelika za poboljšanje. Takvim postupkom postižu se svojstva površine koja su slična svojstvima cementiranog čelika, ali su svojstva sredine presjeka znatno bolja.

Površinski se mogu kaliti nelegirani ili niskolegirani čelici s oko 0,35-0,60% ugljika koji se zbog visoke toplinske vodljivosti mogu brzo zagrijavati i hladiti, a da ne dođe do velikih toplinskih naprezanja i površinskih napuknuća. Ova skupina čelika ima sniženi udio fosfora (<0,025% nelegirani, tj. <0,035% niskolegirani čelici), što osigurava visoku žilavost i jednoličnost tvrdoće zakaljenog sloja (slika 3.3.8). Prema normama (DIN i HRN) najčešće se za površinsko kaljenje koriste čelici: C35G

(Č1431), C45G (Č1531), C53G (Č1633), 46Cr2 (Č4133), 42CrMo4 (Č4732), tablica 3.3.3.



Slika 3.3.8. Usporedba tvrdoće kroz površinski sloj čelika Cf53 nakon nitiranja, cementiranja i površinskog kaljenja

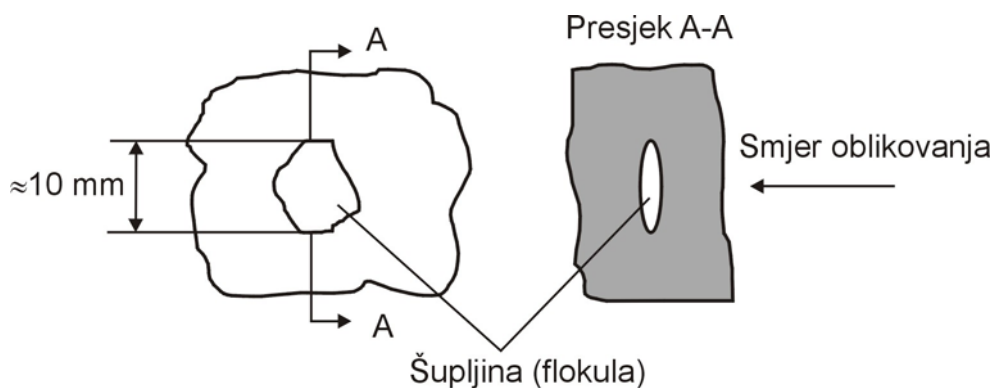
Tablica 3.3.3. Čelici za površinsko kaljenje

Oznaka čelika		Prosječni sastav, %				Tvrdoća kaljenog površinskog sloja, HRC _{min.}
DIN	HRN	C	Cr	Mo	P _{max.}	
Ck 35	Č1431	0,36	-	-	0,025	51
Ck 45	Č1531	0,46	-	-	0,025	55
Ck 55	Č1633	0,54	-	-	0,025	57
46 Cr 2	Č4133	0,45	0,50	-	0,035	55
41CrMo4	Č4732	0,41	1,05	0,24	0,035	54

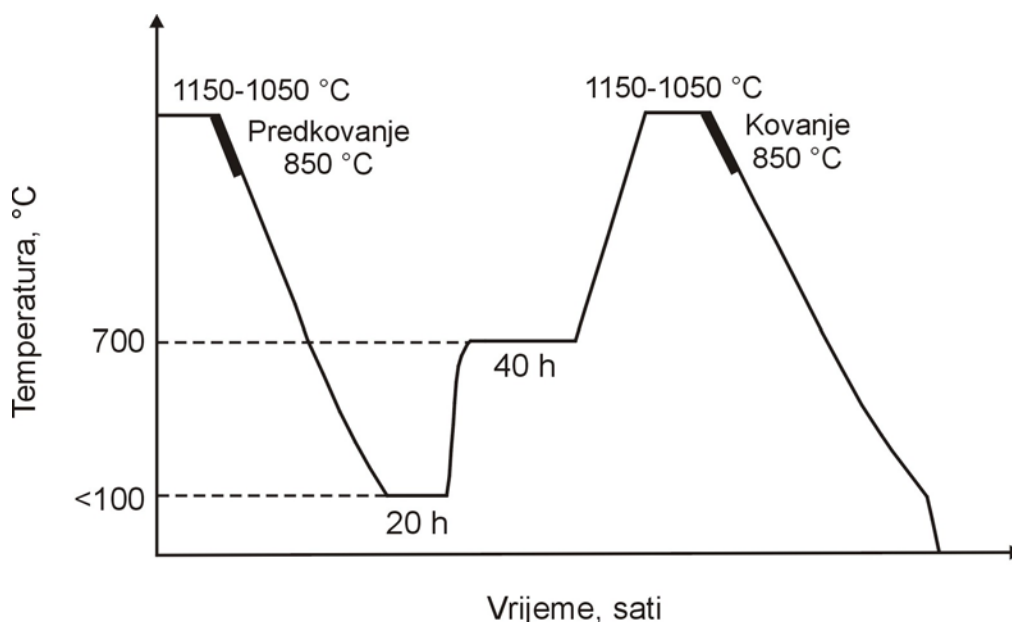
b) Čelici za velike otkovke

Čelici za velike otkovke su podvrsta čelika za poboljšavanje koji se primjenjuju kod otkovaka promjera iznad 100 mm. Prilikom hlađenja tako velikih presjeka dolazi do pojave temperaturnih razlika između površine i sredine presjeka što utječe na pojavu zaostalih napreznja. Budući da se takva napreznja ne mogu lako ukloniti postoji opasnost od pojave pukotina. Da bi se to izbjeglo zahtjeva se visoka čistoća čelika, izostanak segregacija i mikropukotina te jednolična svojstva i mikrostruktura preko cijelog presjeka proizvoda.

Posebnu opasnost kod velikih otkovaka predstavlja pojava prisutnost otopljenog vodika što može dovesti do stvaranja tzv. flokula (šupljina u obliku pahuljica), slika 3.3.9. Hlađenjem čeličnog proizvoda velikog presjeka otopljeni vodik ne može ispliniti te se nakuplja na defektima, najčešće na uključcima ili primarnim granicama zrna. Na tim mjestima zbog porasta tlaka dolazi do stvaranja šupljina i pukotina. Da bi se to spriječilo čelici moraju biti vrlo čisti i otplinjeni u vakuumu. Često se za uklanjanje vodika u čeličanama provodi žarenje velikih otkovaka. Jedan od postupaka žarenja radi sprječavanja pojave flokula prikazan je na slici 3.3.10.



Slika 3.3.9. Shematski prikaz flokule nastale zbog djelovanja vodika



Slika 3.3.10. Shematski prikaz dijagrama žarenja za sprječavanje pojave flokula

U tablici 3.3.4 navedeno je nekoliko čelika koji se primjenjuju za velike otkovke. Navedeni čelici najčešće se koriste za izradu dijelova visokotlačnih

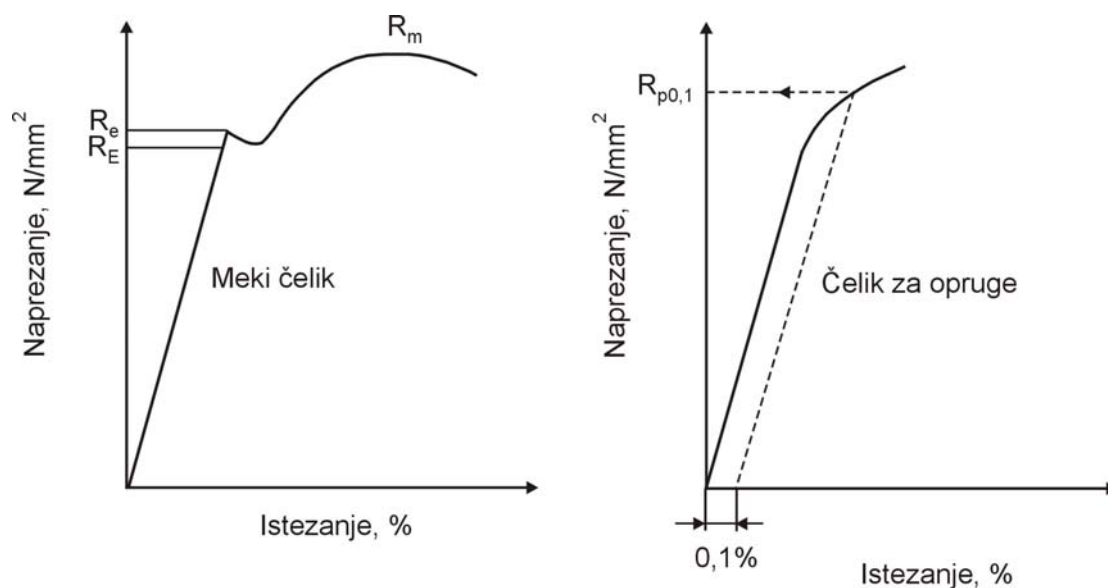
spremnika i cjevovoda, koljenastih osovina, osovina parnih turbina i generatora, pribornica itd.

Tablica 3.3.4. Primjeri čelika za velike otkovke

Oznaka čelika VDEh	Sastav, ostalo, %	Promjer, mm	Svojstva pri 20 °C						Stanje
			R _{p0,2} , N/mm ² , min.	R _m , N/mm ²	A ₅ , %		KV, J		
					uzd. min.	popr. min.	uzd. min.	popr. min.	
Ck22	-	do 250 250-500	225 215	410-540	26 25	19 17	51 41	34 27	normalizirano
Ck45	-	do 250 250-500	345 325	590-740	18 17	12 11	31 27	17 14	
Ck60	-	do 250 250-500	390 355	690-840	15 14	10 9			
22NiMoCr 3 7	0,4 Cr	do 500	400	560-710	19	15	41	24	poboljšano
24 CrMo 5	0,25 Mo	do 250	410	640-790	17	13	48	34	
		250-500	375	590-740	18	14			
42 CrMo 4	0,25 Mo	do 250	510	740-890	14	10	38	21	
		250-500	460	690-840	15	11			
34 CrNiMo 6	0,25 Mo 1,55 Ni	do 250	590	780-930	13	9			
		250-500	540	740-890	14	10	41	31	
		500-1000	490	690-840	15	11			
28NiCrMoV 8 5	0,45 Mo <0,15V	do 500	635	780-930	14	10	41	34	
		500-1000	590	740-890	15	11			
		1000-1500	540	690-840	16	12			
33NiCrMo 14 5	0,45 Mo	do 1000	785	930-1130	12	8	34	24	
		1000-1500	735	880-1080	13	9			
		1500-2000	685	830-980	14	10			

3.3.3. Čelici za opruge

Glavni zahtjev koji se postavlja pred čelike za opruge je da pod djelovanjem radnog opterećenja postignu traženu elastičnu deformaciju. U pogledu elastičnih deformacija svi čelici ostvaruju jednako opružno djelovanje koje je posljedica istog modula elastičnosti (E) i modula smičnosti (G) u slučaju torzijski opterećenih opruga. Iz toga slijedi da će svaki čelik imati isto opružno djelovanje dok mu je naprezanje niže od granice razvlačenja. Povećanje opterećenja koje opruga može izdržati postiže se proširenjem područja elastičnosti, tj. što višom granicom razvlačenja i granicom elastičnosti, slika 3.3.11. Povišenje granice razvlačenja može se postići povišenjem masenog udjela ugljika te legiranjem sa silicijem, manganom, kromom i vanadijem.



Slika 3.3.11. Shematski prikaz dijagrama naprezanje-istezanje mekog čelika i čelika za opruge

Čelici za opruge moraju posjedovati:

- visoku granicu razvlačenja (R_e , $R_{p0,1}$) odnosno granice elastičnosti R_E (niža vrijednost od R_e) te visoku vlačnu čvrstoću (R_m),
- sigurnost protiv krhkog loma ($A > 6\%$) i povoljan omjer $R_{p0,2}/R_m$ (tzv. rezerva plastičnosti), kako bi tijekom opterećenja najprije nastupila plastična deformacija a tek zatim lom,
- visoku dinamičku izdržljivost (R_d), tj. otpornost na lom od umora (visoka kvaliteta površine i mikrostruktura bez uključaka),
- otpornost na udarno opterećenje, tj. dovoljna žilavost.

Čelici za opruge se toplo oblikuju u poluproizvode, a nakon završnog formiranja opruge slijedi klasično ili izotermičko poboljšavanje radi postizanja optimalnih svojstava. Zbog zahtjeva prema visokoj žilavosti i popuštanja pri nižim temperaturama (350-550 °C) gašenjem treba biti osigurano 80-90% martenzita u jezgri (visoka prokaljenost).

Da bi se izbjeglo meko žarenje (sferoidizacija) opruge obično oblikuje proizvođač te ih isporučuje ili nepoboljšane ili ih poboljšava u pogonu. Ukoliko kupac želi sam oblikovati opruge tada ih njihov proizvođač treba meko odžariti i isporučiti u obliku šipki ili žice.

Čelici za opruge također mogu biti očvrstnuti hladnom deformacijom u hladno valjanu traku ili hladno vučenu žicu. To su najčešće nelegirani čelici s višim sadržajem ugljika (0,5-1%) kao što su npr. C60 (Č1630), C60E (Č1631). Austenitiziranjem nelegiranog eutektoidnog čelika te izotermičkim gašenjem (olovna ili solna kupka) pri 400-550 °C postiže se povećanje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće. Hladnim valjanjem takvog čelika s mikrostrukturom finolističavog perlita postiže se vlačna čvrstoća do 3600 N/mm² (za proizvode debljine do 10 mm).

Ukoliko se zahtjeva da opruga posjeduje i korozivsku otpornost tada se izrađuje od austenitnih ili martenzitnih nehrđajućih čelika (>12% kroma). Austenitni nehrđajući čelici svoja opružna svojstva postižu hladnom deformacijom, a martenzitni kaljenjem i visokim popuštanjem. Za rad pri povišenim temperaturama u obzir dolaze martenzitni Cr-Mo čelici legirani vanadijem.

Klasični čelici za opruge su legirani silicijem (npr. 45Si7, 50Si7, 55Si7) te se uglavnom primjenjuju za manje opterećene lisnate opruge, opružne podloške i sl. Kod njih postoji opasnost od razugličenja tijekom kaljenja.

U slučaju izloženosti višim opterećenjima te izrade većih i složenijih oblika primjenjuju se čelici 60SiCr7, 55Cr3, 50CrV4 ili 51CrMoV4 (tablica 3.3.5).

Tablica 3.3.5. Sastav i primjena nekih čelika za opruge

Oznaka čelika EN (HRN)	Prosječni sastav, mas. %					Meko žareno HB _{max}	Poboljšano stanje (temp. popuštanja 350-550 °C)				Primjeri primjene
	C	Si	Mn	Cr	V		R _{p0,2} , N/mm ²	R _m , N/mm ²	A ₅ , %	KV, J	
51Si7 (Č2132)	0,50	1,7	0,65	-	-	235	1080	1320... 1570	6	14	Lisnate opruge za vagone, lokomotive i tramvaje, do debljine lista 7-16 mm.
60SiCr7 (Č2332)	0,60	1,7	0,85	0,3	-	240	1030	1320... 1570	6	14	Lisnate opruge debljine 7-16 mm, zavojne i tanjuraste opruge.
55Cr3 (Č4332)	0,55	0,3	0,85	0,75	-	240	1325	1370... 1620	6	14	Visoko napregnute lisnate opruge vozila, spiralne opruge, stabilizatori, do debljina 16 mm i promjera 25 mm.
50CrV4 (Č4830)	0,50	0,3	0,90	1	0,15	235	1175	1370... 1670	6	21	Najjače napregnute opruge cestovnih vozila, spiralne i tanjuraste, do promjera 40 mm.

KV – udarna radnja loma

3.3.4. Čelici poboljšane rezljivosti

Čelici poboljšane rezljivosti namijenjeni su za izradu dijelova na visokoproduktivnim automatskim strojevima pa se često nazivaju i čelicima za automate. Najvažnije svojstvo čelika za automate je bolja obradivost odvajanjem čestica (rezljivost) u odnosu na druge čelike. Bolja rezljivost je karakterizirana sporijim trošenjem oštrice alata te dobivanjem visoke kvalitete površine. Sposobnost obrade ovi čelici postižu pomoću modificiranog kemijskog sastava kojim se pospješuje stvaranje uključaka. Uključci omogućuju stvaranje lomljive i kratke strugotine. Međutim, zbog prisutnosti uključaka ovi čelici su skloniji pojavi krhkog loma, pukotina tijekom toplinske obradbe, lomu uslijed zamora i sl.

Osnovne karakteristike kemijskog sastava čelika poboljšane rezljivosti su povišen udio sumpora (0,15-0,45%), fosfora (0,07-0,11%) i mangana (0,5-1,5%). Sumpor stvaranjem sulfidnih uključaka smanjuje trenje i otpor rezanju, te povećava lomljivost strugotine. Fosfor doprinosi nastanku krhke i kratke strugotine te glatke obrađene površine. Radi nastanka sitnih uključaka koji smanjuju trenje pri obradi poželjan je i dodatak određene količine olova (0,15-0,30%). Bolja rezljivost se može postići dodatkom selena, cirkonija, telura ili bizmuta.

Čelici za automate se uglavnom koriste za slabije mehanički opterećene dijelove jer im je žilavost i dinamička izdržljivost slabija nego kod drugih konstrukcijskih čelika, tablica 3.3.6. Ovi čelici mogu biti prikladni za cementaciju (npr. čelici 10S20, 17S20, 10S22) ili za poboljšavanje (npr. čelici 35S20, 45S20).

Tablica 3.3.6. Mehanička svojstva čelika poboljšane rezljivosti

Oznaka čelika EN (HRN)	Isporučeno stanje i mehanička svojstva									
	Toplo-valjano ili kovano, toplinski neobr.	Ljušteno ili vučeno pa normalizirano, ili vučeno pa meko žareno			Hladno vučeno			Hladno vučeno pa poboljšano		
	R _m , N/mm ²	R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A ₅ , %	R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A ₅ , %	R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A ₅ , %
10S20 (Č1190)	370-540	370	220-200	25	500-770	250-400	7-11			
15S20 (Č1290)	380-570	380	240-220	23	420-780	280-420	6-9			
Č3190	420-550	400	300-250	20	500-700	300-330	8-10			
35S20 (Č1490)	500-670	500	300-280	17	600-900	300-500	6-9	550-800	330-420	14-18
45S20 (Č1590)	600-780	600	340-320	13	650-1000	320-580	5-8	600-900	360-480	11-13

3.3.5. Čelici za nitriranje

Nitriranje je jedan od najvažnijih postupaka površinske termokemijske obradbe koji je u komercijalnoj primjeni od 20-ih godina prošlog stoljeća. Postupak nitriranja se temelji na difuziji dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta. Nitriranje se provodi radi postizanja visoke površinske tvrdoće, poboljšanja otpornosti na trošenje i zamor, bolje korozijske otpornosti s neznatnim promjenama u dimenzijama i svojstvima obrađivanih predmeta.

Dobivena tvrdoća se temelji na promjeni kemijskog sastava površinskog sloja i prisutnosti nitrida, a ne na promjeni mikrostrukture naglim hlađenjem. Postupak se provodi tako da se pripremljeni predmeti (bez oksida, masti i drugih nečistoća) ulažu

u peć i izlažu djelovanju sredstva za nitriranje na temperaturi ispod A_1 točke, kako ne bi došlo do transformacije ferita u austenit.

U pravilu nitriraju se svi čelici, sivi lijev, čelični lijev (u temperaturnom području 500-590 °C) i Ti-legure (750-900 °C). Plinsko nitriranje se ne preporuča za ugljične čelike jer se dobiva krhka površina s malim porastom tvrdoće u difuzijskoj zoni. Legirani čelici, zbog izlučivanja nitrida u difuzijskom sloju, pružaju veću otpornost na trošenje i omogućuju primjenu većih površinskih tlakova.

Postoji posebna grupa niskolegiranih čelika za nitriranje koji sadrže 1,0-2,5 mas. % C, oko 1 mas. % Al, oko 0,2 mas. % Mo, a mogu sadržavati i druge legirajuće elemente (Ti, Nb, W, Mn) tzv. nitridotvorce radi dobivanja još viših tvrdoća. Pored toga za nitriranje se koriste i niskolegirani čelici koji sadrže aluminij, srednjeugljični niskolegirani čelici s kromom, alatni čelici za rad u toplom stanju, niskougljični niskolegirani kromovi čelici, alatni čelici koji otvrdnjavaju na zraku, brzorezni čelici, feritni i martenzitni nehrđajući čelici serije AISI 400, austenitni nehrđajući čelici serije AISI 200 i 300, precipitacijski očvrnuti čelici itd.

Poželjno toplinski obrađeno stanje proizvoda prije nitriranja može biti različito, ali se najčešće koristi poboljšavanje (kaljenje+popuštanje) kojim se postižu optimalna mehanička svojstva sa sitnozrnatom mikrostrukturom što olakšava apsorpciju dušika. Nakon poboljšanja, a prije nitriranja, provodi se završna strojna obrada (radi uklanjanja razugljičenja površine), uz eventualno žarenje na 500-600 °C radi uklanjanja naprezanja od obrade ili ravnjanja. Kod poboljšavanja prije nitriranja temperatura popuštanja treba biti viša od temperature nitriranja jer se na taj način zadržavaju mehanička svojstva jezgre obrađivanih predmeta. Ponekad se nitriranje provodi istodobno s popuštanjem.

Nitrirani površinski sloj u većini slučajeva poboljšava otpornost na koroziju, posebice u uvjetima kloridne, octene i fosfatne kiseline. Otpornost na koroziju nitriranih nehrđajućih čelika se smanjuje zbog vezanja kroma u kromov nitrid.

S obzirom na izvor dušika postupak nitriranja se može provoditi u plinovitom sredstvu (amonijak), u solnim kupkama i u ioniziranom plinu. Zajedničko za sve postupke je da se nitriranje čeličnih proizvoda odvija ispod A_1 temperature kako ne bi došlo do strukturnih promjena u jezgri obrađivanog predmeta.

Općenito, čelici za nitriranje u amonijaku predstavljaju legirane čelike za poboljšavanje koji sadrže jedan ili više elemenata koji stvaraju nitride (npr. aluminij, molibden, krom, vanadij). Nitiranjem u struji amonijaka postiže se visoka tvrdoća površine i otpornost na trošenje. Porast tvrdoće površine nitiranog čelika postiže se stvaranjem vrlo tvrdih nitrida (AlN, MoN, CrN, VN). Pored povišenja otpornosti na trošenje nitrirani čelici imaju povišenu dinamičku izdržljivost i postojanost na koroziju.

Nitriranje čelika u amonijaku provodi se pri temperaturi 480-580 °C uz popuštanje kod nešto više temperature. Vrijednost postignute tvrdoće nitiranog sloja ovisi o legiranju čelika. Čelici legirani s aluminijem imaju tvrdoću 900-1100 HV_{0,2} a čelici bez aluminija imaju tvrdoću 800-900 HV_{0,2}. Važno je napomenuti da se kod čelika nitriranih u struji amonijaka nastoji izbjeći pojava tzv. zone spojeva koja bi zbog

nastalih nitrida bila izrazito krhka. Ukoliko bi takva zona nastala uslijed nepravilnog vođenja procesa nitriranja potrebno ju je ukloniti brušenjem nitriranog proizvoda.

U tablici 3.3.7 navedeno je nekoliko čelika za nitriranje u amonijaku te se može zamijetiti da oni predstavljaju čelike za poboljšavanje (posljednje dvije znamenke u HRN oznaci su između 30 i 39). Navedeni čelici 31CrMo12, 41CrAlMo7 i 34CrAlNi7 predviđeni su za izradu proizvoda većih dimenzija, dok su ostali predviđeni za izradu proizvoda do promjera 40 mm.

Međutim, nitriranje u amonijaku sve više gubi na važnosti budući su razvijeni novi postupci (solna kupka, ionsko) koji su znatno ekonomičniji i brži te se mogu primijeniti i na ostale čelike.

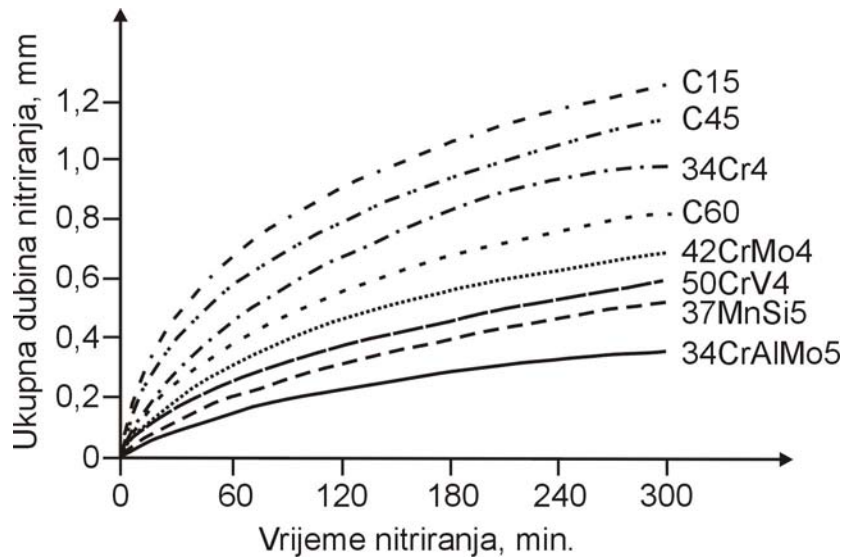
Postupak nitriranja u solnoj kupci se ponekad naziva i postupak cijanizacije jer se odvija u smjesi cijanidno-cijanatnih soli pri temperaturi 570-580 °C u trajanju od 2 do 4 sata (osim kod brzoreznih čelika čija obrada traje 10-20 minuta). Odvijanje postupka se sastoji od taljenja krutih suhih soli, starenja solne kupke (zadržavanje na 565-595 °C najmanje 12 sati) i uranjanja predmeta predgrijanih na 400-450 °C u zagrijanu kupku. Produkti starenja kupke smanjuju sadržaj cijanida, a povećavaju sadržaj cijanata, te nastaje i mala količina karbonata (Na_2CO_3). Kada se starenjem postigne 5% NaCNO, kupka se može nesmetano koristiti. Minimalni sadržaj NaCN za obradu brzoreznog čelika je 15%, a za obradu alatnih čelika za rad u toplom stanju je 20%. Nitriranje u solnoj kupci se koristi za obradu proizvoda iz ugljičnih i niskolegiranih čelika, brzoreznih čelika, alatnih čelika za rad u toplom stanju, nehrđajućih čelika i lijevanih željeza.

Nitriranjem u solnoj kupci ne postižu se visoke tvrdoće kao u slučaju nitriranja u amonijaku, pa se ovaj postupak još naziva „meko nitriranje“. Na slici 3.3.12 prikazan je utjecaj vremena nitriranja na dubinu nitriranja, ovisno o vrsti čelika.

Tablica 3.3.7. Čelici za nitriranje

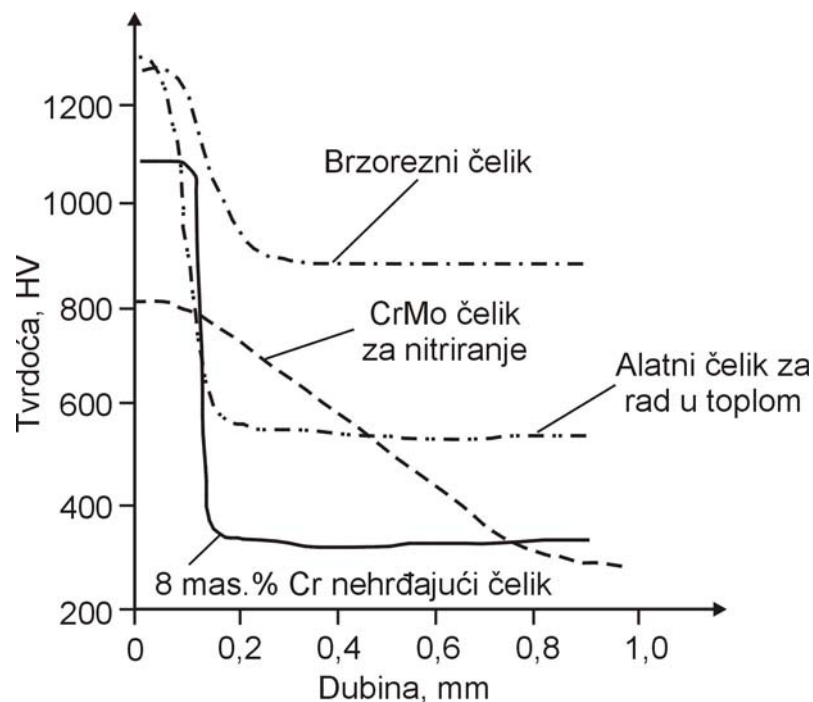
Oznaka čelika		Sastav, ostalo %	Stanje isporuke: meko žareno, HB _{max}	Promjer proizvoda 16-40 mm				Promjer proizvoda 160-250 mm				Toplinska obradba			
DIN 17006	HRN			R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ² min.	A ₅ , %	KV, J, min.	R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ² min.	A ₅ , %	KV, J, min.	Kaljenje, °C	Popuštanje, °C	Nitriranje, °C	HV _{0,2} min.
31 CrMo 12	Č4738	0,4 Mo	248	1030-1230	835	10	48	880-1080	685	12	48	870-910 ulje	570-700 zrak	490-510	800
39 CrMoV 13 9		0,2 V	262	1270-1470	1080	8	27					920-960 ulje	570-650 peć	490-510	800
34 CrAlMo 5	Č4739	1 Al 0,2 Mo	248	780-980	590	14	41					910-940 ulje	570-650 zrak	500-520	950
41 CrAlMo 7	Č4784	1 Al 0,3 Mo	262	930-1130	735	12	34	830-1030*	635*	14*	41*	880-920 ulje	570-650 zrak	500-520	950
34 CrAlS 5		1 Al 0,1 S	217	640-790	440	12						900-950 voda	580-660 zrak	500-520	900
34 CrAlNi 7	Č4531	1 Al 1 Ni	245					780-980	590	13	41	850-900 ulje	580-660 zrak	500-520	950

* za promjere 100-160 mm



Slika 3.3.12. Ovisnost ukupne dubine nitiranja u solnoj kupci kod 570 °C o trajanju nitiranja i vrsti čelika

Plazma nitiranje ili ionitiranje je postupak površinske obradbe materijala u plinu koji se pod utjecajem topline razlaže na ione i elektrone. Vrijeme nitiranja kod ionskog nitiranja je kraće nego kod uobičajenih postupaka, a postižu se i više površinske tvrdoće. Maksimalne se tvrdoće postižu kod nižih temperatura kao posljedica visoke koncentracije dušika u plazmi i veće brzine difuzije u površinskom sloju zbog djelovanja ionskog bombardiranja. Legirajući elementi povećavaju tvrdoću nitrirane zone, ali smanjuju dubinu i daju veoma oštri prijelaz profila tvrdoće od površine prema jezgri (slika 3.3.13).



Slika 3.3.13. Profil tvrdoće za različite vrste čelika nakon ionskog nitiranja

3.4. Posebni konstrukcijski čelici

3.4.1. Korozijski postojani (nehrđajući) čelici

Korozija predstavlja razaranje metala ili legura zbog njihovog djelovanja s vanjskim medijem. Uvjeti međudjelovanja i svojstva medija određuju vrstu korozije pa tako postoji plinska, atmosferska, podvodna, biološka korozija itd. Prema načinu razaranja metala postoje slijedeći oblici korozije: opća (jednolično odnošenje površine), jamičasta (točkasta, rupičasta, "pitting"), interkristalna, napetosna itd. Korozijska postojanost predstavlja sposobnost materijala da se suprotstavi negativnom djelovanju korozijskog medija pomoću usporavanja njegovog djelovanja.

Da bi čelik bio korozijski postojan (pasivan) moraju biti ispunjena dva glavna uvjeta:

- legiranje s barem 12% kroma (moderni nehrđajući čelici sadrže i do 30% kroma),
- postojanje homogene monofazne feritne, austenitne ili martenzitne mikrostrukture radi izbjegavanja opasnosti od nastanka područja s različitim elektropotencijalom od potencijala osnovne mase).

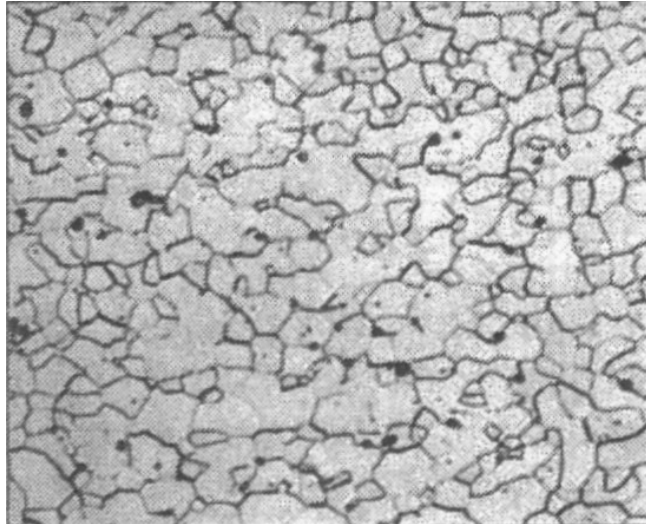
Pored kroma postojanost prema koroziji povećava se dodatkom nikla. Kombinacijom legiranja kromom i niklom razvijeni su čelici tipa 18/8 (18% Cr i 8% Ni) s austenitnom mikrostrukturom koji su otporni na djelovanje kiselina. Legiranje molibdenom omogućava lakše pasiviziranje te poboljšava korozijsku postojanost i otpornost na jamičastu koroziju Cr-Ni čelika. Legiranjem jakim karbidotvorcima (npr. titan, niobij) omogućava se izbjegavanje pojave interkristalne korozije. Općenito vrijedi da skupina korozijski postojanih čelika mora sadržavati:

- a) feritotvorce – Cr, Si, Al, Mo, Nb, Ti, V
- b) austenitotvorce – Ni, Mn, (Co), Cu, N.

Korozijski postojani čelici dijele se prema nastaloj mikrostrukтури na: feritne, austenitne, austenitno-feritne (dupleks), martenzitne te precipitacijski očvrsnute čelike koji pripadaju posebnoj skupini visokočvrstih čelika.

3.4.1.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže 13-17% Cr i <0,1% C te imaju feritnu mikrostruktuuru bez sposobnosti fazne transformacije i usitnjenja zrna, slika 3.4.1. Usitnjenje zrna moglo bi se postići u nekim slučajevima pomoću hladne deformacije (stupanj deformacije 30-50%) te rekristalizacijskim žarenjem (npr. 615 °C/15 min.; hlađenje na zraku ili vodi). Mehanička svojstva i primjena nekoliko feritnih nehrđajućih čelika navedeni su u tablici 3.4.1.



Slika 3.4.1. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika

Tablica 3.4.1. Mehanička svojstva i primjena feritnih čelika

Oznaka čelika VDEh (HRN)	Sastav, "ostalo", %	Mehanička svojstva			Posebna otpornost i primjeri primjene
		R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A ₅ , %	
X6 Cr 17 (Č4174)		450-600	270	20	Korozijski postojani pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna te u petrokemijskoj industriji.
X6 CrMo 17	1,1Mo	450-650	270	20	Posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline, za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora.
X8 CrTi 17 (Č4971)	0,7 Ti	450-600	270	20	Kao X6Cr17, otporniji na rast zrna, za zavarene dijelove kućanskih aparata, za sita i okvire.
X8 CrNb 17	0,9Nb	450-600	270	20	Dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove).
X8CrMoTi 17	1,75Mo 0,65Ti	500-600	300	20	Za jače napregnute zavarene dijelove aparata u proizvodnji jestivog octa, u mljekarama, prešaonicama voća. <i>Nije za udarni rad!</i>
X12CrMoTi25	2,5Mo 1,8Ti	650-750	550	12	Za otopine s visokim udjelom slobodnog klora.
X12CrMoS17	0,25Mo 0,20S	700-850	450	12	Za obradbu odvajanjem čestica na automatima: vijke, zakovice, matice, male zupčanike, male osovine.

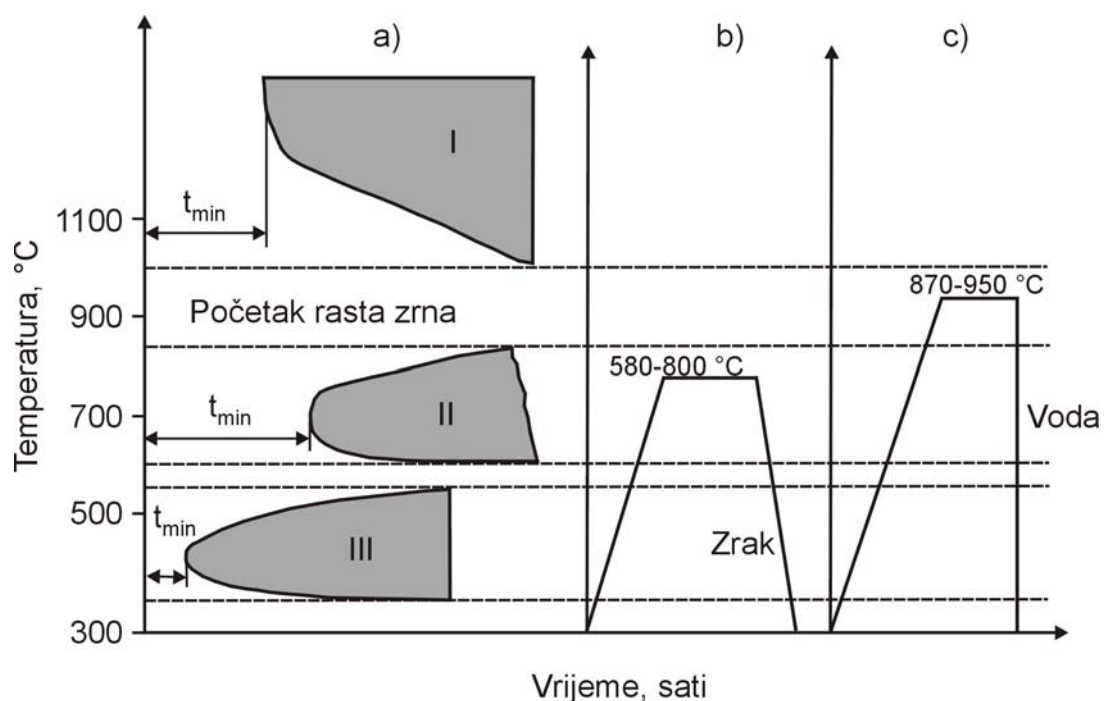
Feritni čelici su visoko korozijski otporni na djelovanje dušične kiseline i njenih vodenih otopina, amonijevoj salitri te smjesi dušične, fosforne i solne kiseline. Nasuprot tome, nisu otporni na djelovanje rastaljenih metala (Al, Sb, Pb), amonijevog biflourida, barijevog klorida, broma, octene kiseline itd.

Ostala svojstva feritnih nehrđajućih čelika su:

- relativno su mekani,
- magnetični,
- slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna (>900 °C),
- sklони pojavi “krhkosti 475” pri izloženosti temperaturi 350-520 °C,
- sklóni stvaranju krhke sigma faze (520-850 °C),
- slaba deformabilnost,
- dobra obradljivost odvajanjem čestica (bolja od austenitnih),
- loša postojanost u kloridnim otopinama (npr. morska voda),
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije,
- dodatkom molibdena povećava im se otpornost na jamičastu koroziju,
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika,
- sklóni lomu pri niskim temperaturama.

Uklanjanje ili smanjenje navedenih nedostataka može se postići povišenjem udjela kroma, sniženjem udjela ugljika, te legiranjem s molibdenom i niklom (eventualno titanom i niobijem). Znatna poboljšanja svojstava postižu se porastom čistoće feritnih čelika, tj. dobivanjem vrlo niskih udjela nečistoća i primjesa pomoću suvremenih metoda rafinacije (npr. indukcijska vakuumska peć, elektronski mlaz i sl.). Zbog niskih udjela “dodataka” takvi čelici se nazivaju ELA čelici (eng. Extra Low Additions).

Na slici 3.4.2a prikazana su temperaturna područja u kojima kod feritnih čelika dolazi do pojave interkristalne korozije, sigma faze i “krhkosti 475”. Slike 3.4.2b i 3.4.2c prikazuju način toplinske obradbe kojom se mogu ukloniti nepoželjne pojave kod feritnih čelika.



Slika 3.4.2. Shematski prikaz toplinske obradbe feritnih čelika

I – interkristalna korozija

II – pojava sigma faze

III – “krhkost 475”

Žarenje pri temperaturi 560-800 °C potrebno je provesti tako da se ne prekorači vrijeme t_{\min} . (slika 3.4.2) te da se hlađenje provede na zraku radi izbjegavanja "krhkosti 475". Također, uspješno je i gašenje s 870-950 °C ali tada treba uzeti u obzir pojavu porasta zrna. Zbog sklonosti feritnih čelika prema hladnom lomu mogu se koristiti za rad samo u nekim agresivnim medijima pri temperaturi 20-350 °C. Glavni nedostatak feritnih nehrđajućih čelika tijekom zavarivanja predstavlja izrazita sklonost porastu zrna u zoni utjecaja topline koja je zagrijana iznad 900 °C. Pogrubljenje zrna feritnih čelika ne može se ukloniti nijednim postupkom toplinske obradbe. Stoga se za zavarivanje preporučuju postupci kojima se unosi manja količina topline (npr. REL, TIG).

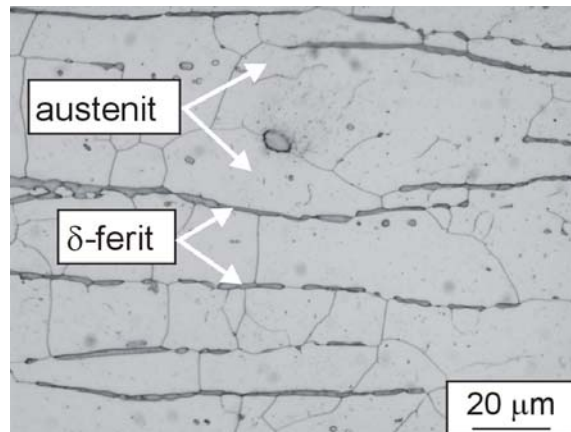
3.4.1.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže 0,02-0,15% C, 15-20% Cr, 7-20% Ni uz moguće dodavanje određene količine molibdena, titana, niobija, tantala, dušika. Svi dodaci, osim dušika, dovode do pojave ferita u mikrostrukтури.

Dodatkom nikla i dušika djeluje se na proširenje područja austenita te na snižavanje temperature početka stvaranja martenzita. Austenitni čelici mogu prijeći u martenzitno stanje "dubokim" hlađenjem ili hladnom deformacijom. Međutim, mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika prvenstveno može biti monofazno austenitna ili austenitno-feritna (s 5-10% delta ferita). Delta ferit negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj preradi (valjanje, kovanje), ali je ipak nužan radi otežavanja pojave toplih pukotina.

Osnovni zahtjevi prema kemijskom sastavu potrebnom da se postigne austenitna mikrostruktura (slika 3.4.3) nehrđajućih čelika su:

- maseni udjel ugljika treba biti što niži (<0,15%) jer je tada manja opasnost od nastanka karbida $Cr_{23}C_6$ (odgovoran za pojavu interkristalne korozije),
- maseni udjel kroma što viši (>18%) radi povećanja antikorozivnosti,
- maseni udjel nikla što viši (>8%) kako bi nikal, kao gamageni element, prevladao alfa-geno djelovanje kroma i doveo do nastanka austenitne mikrostrukture,
- dodatno legiranje s molibdenom, titanom, niobijem i/ili tantalom koji pospješuju nastanak 5-10% delta ferita te djeluju stabilizirajuće na otpornost prema interkristalnoj koroziji,
- povišeni udjel dušika (0,2-0,4%) radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetosnu i jamičastu koroziju.



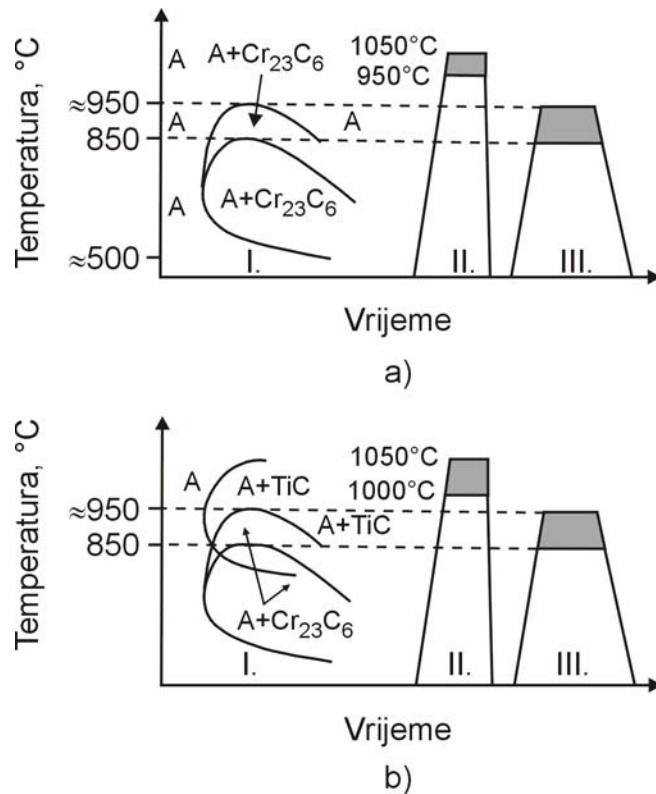
Slika 3.4.3. Mikrostruktura austenitnog čelika AISI 316L

Glavna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su:

- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- nemagnetični su,
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- odlična plastičnost,
- legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad 600 °C,
- visoka žilavost, oksidacijska i korozijska otpornost,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama,
- postojana austenitna struktura od "solidus" temperature do ispod sobne temperature,
- kubično plošno centrirana (FCC) rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja.

Poznato je da toplinska obradba utječe na svojstva upotrebe i prerade, a time i na mogućnost primjene čelika. Austenitni čelici nisu sposobni da se zakale ili poboljšaju transformacijom jer nema faznih transformacija.

Glavni problem u pogledu korozijske otpornosti predstavlja karbid Cr_3C_6 . Nastanak karbida Cr_{23}C_6 može se izbjeći ukoliko čelik sadrži jake karbidotvorce koji stvaranjem karbida tipa MC (npr. TiC , TaC , NbC) onemogućavaju spajanje ugljika s kromom te na taj način sprječavaju osiromašenje perifernih zona austenitnih zrna. Na osnovi tih spoznaja može se definirati postupak i cilj toplinske obradbe austenitnih nehrđajućih čelika (slika 3.4.4).



Slika 3.4.4. Shematski prikaz toplinske obradbe nestabiliziranog (a) i titanom stabiliziranog (b) austenitnog nehrđajućeg čelika
 I. – shematski prikaz TTT dijagrama (samo za hlađenje); II. – gašenje (kaljenje bez polimorfne pretvorbe); III. – žarenje (stabilizacija destabiliziranog austenita)

Na slici 3.4.4a shematski su prikazane moguće promjene u mikrostrukтури tijekom hlađenja nestabiliziranih austenitnih nehrđajućih čelika. Može se zaključiti da:

- pri hlađenju (npr. sa ≈ 1200 °C) nastaje monofazno austenitna mikrostruktura do temperature ≈ 950 °C,
- između 950 i 850 °C dolazi do izlučivanja karbida Cr₂₃C₆, ali nakon određenog vremena oni se ponovno raspadaju i difundiraju u austenit,
- pri sporom hlađenju između 850 i 550 °C iz austenita izlučuju karbidi Cr₂₃C₆. Navedeni karbidi nastaju od atoma ugljika i kroma iz perifernih područja zrna te uzrokuju senzibilizaciju čelika, a u nekim uvjetima i interkristalnu koroziju. Dugotrajno zadržavanje čelika u ovom temperaturnom području neće izazvati raspad karbida i difuziju kroma i ugljika u austenit.

Iz svega navedenog može se zaključiti da će se jednom nastali Cr₂₃C₆ moći ukloniti iz nestabiliziranog austenitnog nehrđajućeg čelika pomoću:

- zagrijavanja u monofazno austenitno područje (karbidi će se raspasti pa će atomi ugljika i kroma biti "uvučeni" u austenit) i gašenja (radi izbjegavanja ponovnog izlučivanja karbida),
- žarenja pri 850-950 °C kako bi se nastale karbide "natjeralo" na disocijaciju i ponovnu difuziju atoma kroma i ugljika u austenit. Hlađenje nakon žarenja smije biti i sporije, jer su se atomi kroma i ugljika čvršće "usidriili" u austenitu nego u slučaju zagrijavanja u području gdje nastaje monofazni austenit.

Za nestabilizirane austenitne nehrđajuće čelike je učinkovitiji postupak gašenja iz područja monofaznog austenita.

U slučaju stabiliziranih austenitnih čelika (slika 3.4.4b) može se uočiti da:

- hlađenjem austenita do ≈ 950 °C dolazi do izlučivanja karbida (TiC) iz austenita pri čemu dolazi do vezivanja najvećeg dijela ugljika. Na taj način je smanjeno ili potpuno spriječeno stvaranje kromovog karbida $Cr_{23}C_6$,
- ukoliko bi se i pojavilo izlučivanje $Cr_{23}C_6$ (npr. u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja) već bi žarenje između 850 i 950 °C izazvalo prijelaz $Cr_{23}C_6$ u TiC i difuziju atoma kroma u austenit.

Tablice 3.4.2 i 3.4.3 prikazuju osnovne podatke o sastavu, svojstvima i primjeni nekoliko vrsta austenitnih čelika s manje od 10% delta ferita i austenitnih čelika bez delta ferita. Minimalan sadržaj delta ferita u austenitnim nehrđajućim čelicima je nužan radi osiguravanja otpornosti prema pojavi toplih pukotina. Pritom, gornja dopuštena granica delta ferita iznosi $\sim 10\%$, jer bi kod višeg udjela delta ferita znatno porasla sklonost nastanku sekundarnih faza (npr. σ -faza) pri povišenim temperaturama.

Pojava interkristalne korozije može se spriječiti snižavanjem sadržaja ugljika ispod 0,03%. U anglosaksonskoj stručnoj literaturi se takvi čelici označavaju po normi AISI tako da se uz brojčanu oznaku dodaje slovni dodatak L, LC ili ELC (eng. Low Carbon ili Extra Low Carbon). Na slici 3.4.5a može se uočiti glavna prednost ove skupine čelika: otpornost na senzibilizaciju tj. interkristalnu koroziju. Međutim glavni nedostatak austenitnih čelika predstavlja sniženje granice razvlačenja zbog manjeg udjela ugljika (slika 3.4.5b).

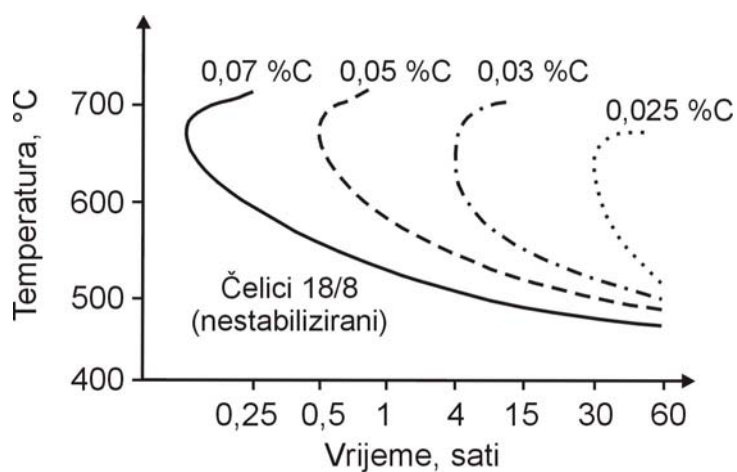
Tablica 3.4.2. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika s <10% delta ferita u mikrostrukturi

Oznaka čelika		Sastav "ostalo", %	Mehanička svojstva pri 20°C					Posebna otpornost i primjeri primjene
Oznaka čelika prema VDEh	HRN M _s M _d		R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	HB	A ₅ , %	KV, J	
X12 CrNi 18 8	Č4571 M _s = -58 °C M _d = + 25 °C	-	700	215	180	50	85	Standardni tip čelika -predmeti u kućanstvu, aparati i uređaji u prehrambenoj industriji, u mljekarama, u pivovarama, ortopediji. Primjenjiv je do 300°C.
X5 CrNi 18 9	Č4580 M _s = -32 °C M _d =+37 °C	-	700	185	180	50	85	Otporan na različite organske i anorganske kiseline - industrija masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, aparata za pranje. Primjenjiv do 300°C.
X10 CrNiTi 18 9	Č4572 M _s = -72 °C M _d = + 14 °C	0,5 Ti	750	205	190	40	85	Otporan na IKK i bez topl. obradbe nakon zavarivanja, -mljekarstvo, industrija namirnica, te masnih kiselina, sapuna, kože, šećera, industrija filmova. Primjenjiv za tlačne spremnike do 450°C.
X5 CrNiNb 18 9		0,7 Nb	740	205	190	40	103	Otporan na dušičnu kiselinu.
X5 CrNiMo 18 10	Č4571 M _s =-166 °C M _d =-25 °C	2,25 Mo	700	205	180	45	85	Otporan prema neoksidirajućim kiselinama i prema točkastoj koroziji uslijed halogenih medija, otporan na IKK i bez topl. obradbe. -industrija celuloze, boja, ulja, sapuna, tekstila, mljekarstva i pivovare
X10 CrNiMoTi 18 10	Č4571 M _s =-206 °C M _d =-48 °C	2,25 Mo 0,5 Ti	750	225	190	40	85	Posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima, topl. obradba nakon zavarivanja nepotrebna. -industrija tekstila, sulfita, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju i plast. mase

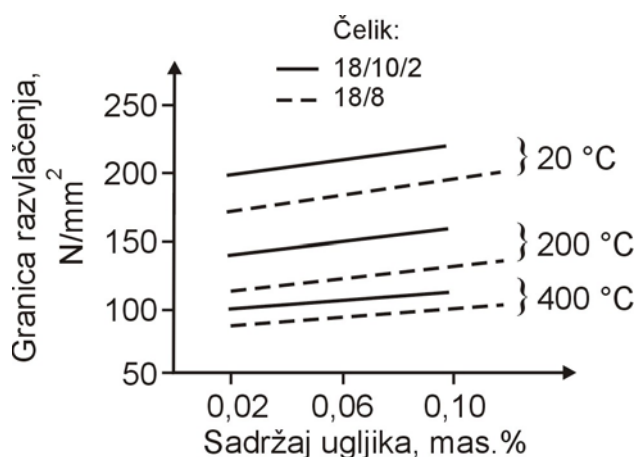
M_s – temperatura početka stvaranja martenzita pri "dubokom" hlađenju,
M_d – temperatura početka stvaranja martenzita pri hladnom deformiranju
IKK – interkristalna korozija

Tablica 3.4.3. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika bez δ -ferita u mikrostrukturi

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, "ostalo" %	Mehanička svojstva					Posebna postojanost i primjeri primjene
		R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	HB	A_5 , %	KV, J	
X5 NiCrMoCuNb 20 18	2,25 Mo 2 Cu 0,4 Nb	740	225	190	40	82	Posebno povišena postojanost prema sumpornoj i fosfornoj kiselini - industrija boja, umjetnih vlakana, zavarljiv bez naknadne toplinske obradbe
X5 CrNiMoTi 25 25	2,25 Mo 0,25 Ti	740	225	190	40	69	Industrija tekstila, celuloze, boja, fotopribora i kemikalija, plast. masa, gume, zavarljiv bez naknadne toplinske obradbe
X5 NiCrMoCuNb 22 18	3,25 Mo 0,4 Nb 1,25 Cu	740	275	190	30	105	Industrija boja, plastike i nafte



(a)



(b)

Slika 3.4.5. Utjecaj sadržaja ugljika na početak izlučivanja karbida (a) i utjecaj sadržaja ugljika na granicu razvlačenja Cr-Ni i Cr-Ni-Mo čelika (b)

Najčešće primjenjivani čelici s niskim sadržajem ugljika su: AISI 304L, AISI 316L, AISI 316LC (tablica 3.4.4). Austenitni nehrđajući čelici mogu biti legirani i dušikom koji kao gamageni element može zamijeniti skuplji nikel. Dušik stvara nitride te intersticijske mješance sa željezom. Na taj način dolazi do porasta granice razvlačenja i čvrstoće (tablica 3.4.5). Pored povišenja navedenih mehaničkih svojstava poboljšava se i otpornost na napetosnu koroziju. Dodatkom 0,2% dušika i 2% molibdena djelotvorno se povisuje postojanost prema jamičastoj koroziji.

Tablica 3.4.4. Primjeri niskougličnih austenitnih nehrđajućih čelika

Oznaka čelika			Sastav "ostalo", %	Mehanička svojstva				
Oznaka prema VDEh	HRN	AISI		R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A ₅ , %	Z, %	KV, J
X2CrNi 18 9	Č45701	304 L	-	450-700	175	50	60	85
X2CrNiMo 18 10	Č45703	316 L	2,2Mo	450-700	195	45	60	85
X2CrNiMo 18 12	-	316LC	2,8Mo	450-700	195	45	60	85
X2NiCr 18 16	-	-	-	440-690	175	50	60	85
X2CrNiMo 18 16	-	-	3,5Mo	500-700	195	45	-	85

Tablica 3.4.5. Primjeri austenitnih nehrđajućih čelika legiranih dušikom

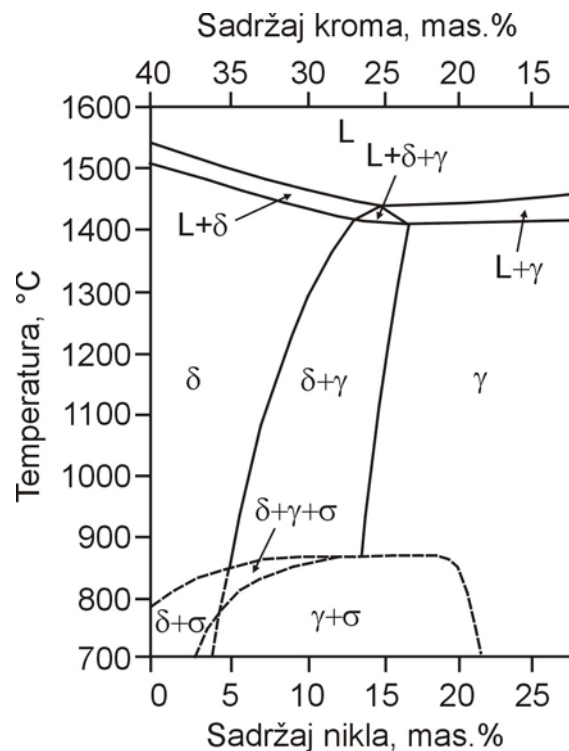
Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, "ostalo", %	Mehanička svojstva			
		R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A ₅ , %	KV, J
X2CrNiN 18 10	0,12-0,22 N	550-700	270	40	85
X2CrNiMoN 17 12 2	0,12-0,22 N	580-800	280	40	85
X2CrNiMoN 17 13 5	0,12-0,22 N	580-800	285	35	85
X2CrNiMoN 25 25 2	0,08-0,16 N	540-740	255	40	70
X3CrNiMnMoN 19 17	0,25 N 0,16 Nb 5,5 Mn 3,0 Mo	800	380	40	100
X3CrNiMnMoN 23 17	0,45 N 6,0 Mn 4,0 Mo	850-1050	540	30	70

Karakteristična područja primjene austenitnih čelika su:

- Cr-Ni-N čelik: uređaji u mljekarama i pivovarama,
- Cr-Ni-Mo-N čelici: uređaji u industriji celuloze, boja, tekstila, tlačne posude povišene postojanosti na koroziju, povišeno postojani uređaji na više koncentracije klora i do 400°C,
- Cr-Ni-Mo-N čelici s 25% Cr i 25% Ni: sumporno kiseli mediji i reducirajući uvjeti primjene,
- Cr-Ni-Mn-Mo-N čelici: uređaji u kontaktu s morskom vodom.

2.4.1.3. Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici

Dupleks čelici posjeduju dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu s 40-60% ferita. Čelik s 22-24% kroma i 6-8% nikla pri temperaturi 20 °C, tj. zagrijan do ≈1000 °C sastojati će se od ferita i austenita. Ukoliko su prisutni ostali legirajući elementi tada vrijedi da dodatak molibdena, silicija, titana i niobija djeluje slično kao porast sadržaja kroma, a mangana, bakra, dušika i ugljika kao povišenje sadržaja nikla. Povišenjem temperature iznad 1000°C poraste udio ferita a smanjuje se udio austenita tako da čelik s 22% kroma i 8% nikla pri 1350°C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostrukturu. Kvizibinarni presjek ternarnog dijagrama stanja Fe-Cr-Ni prikazan je slikom 3.4.6.

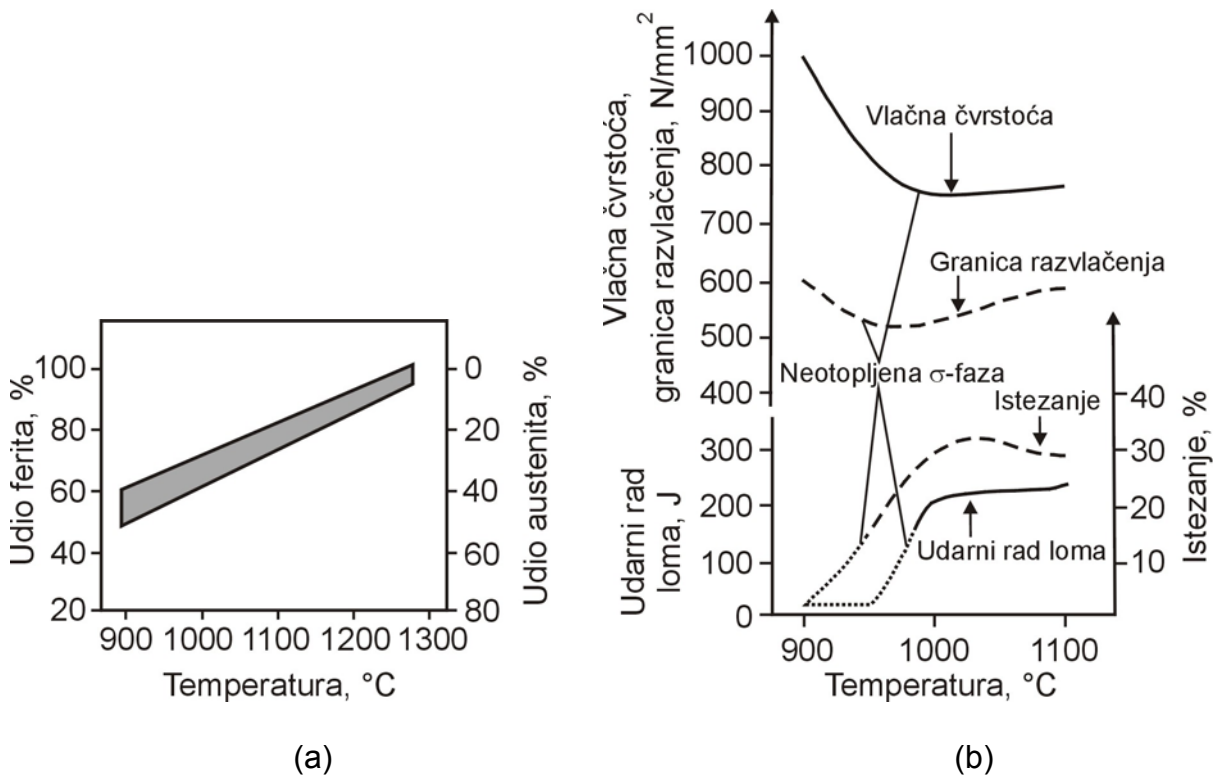


Slika 3.4.6. Kvizibinarni presjek ternarnog dijagrama stanja Fe-Cr-Ni za 60% Fe

Intermetalna sigma-faza može nastati u austenitu i feritu. Sigma faza se može ukloniti žarenjem iznad 1000 °C. Zbog dvofazne austenitno-feritne mikrostrukture dupleks čelici pokazuju manju otpornost prema općoj koroziji ali imaju znatno povišenu postojanost prema napetosnoj koroziji u kloridnim otopinama kao i u atmosferi H₂S-a.

Jedan od glavnih ciljeva legiranja dupleks čelika je održavanje dovoljno visokog udjela austenita što je posebice važno tijekom zavarivanja (u zoni taljenja zavarenog spoja). Previsoki udio ferita može uzrokovati sniženje korozijske postojanosti te pojavu krhkosti. Sniženi udio nikla u dupleks čelicima (u odnosu na

čelik 18/8) potrebno je kompenzirati dodatkom dušika ili mangana. Omjer austenita i ferita ovisi i o temperaturi toplinske obradbe, slika 3.4.7a. Pri temperaturi gašenja ispod 1050 °C zaostaje dio neotopljene sigma faze, slika 3.4.7b. Međutim, budući da iznad 1100 °C dolazi do znatnog porasta sadržaja ferita dupleks čelici se uglavnom ne zagrijavaju iznad 1100 °C. Porastom sadržaja ferita iznad 60% dolazi do pojave diskontinuiranih izlučivanja po granicama austenit-ferit, stvaranja nitrida Cr_2N , otapanja karbida Cr_3Nb_3C itd. Navedene pojave znatno utječu na pogoršanje mehaničkih svojstava, posebice duktilnosti.

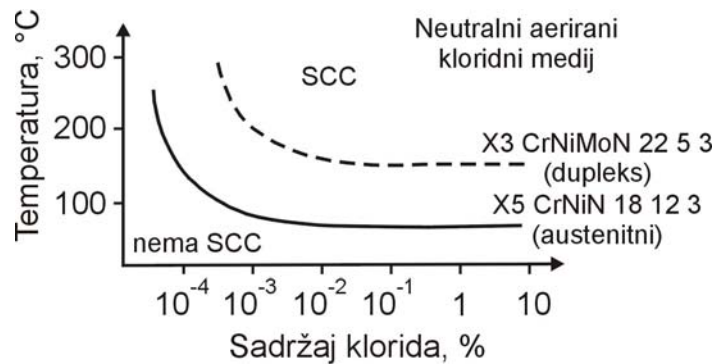


Slika 3.4.7. Promjena udjela austenita i ferita s temperaturom zagrijavanja dupleks čelika (a) i ovisnost mehaničkih svojstava dupleks čelika X2CrNiMoN 22 5 o temperaturi gašenja (b)

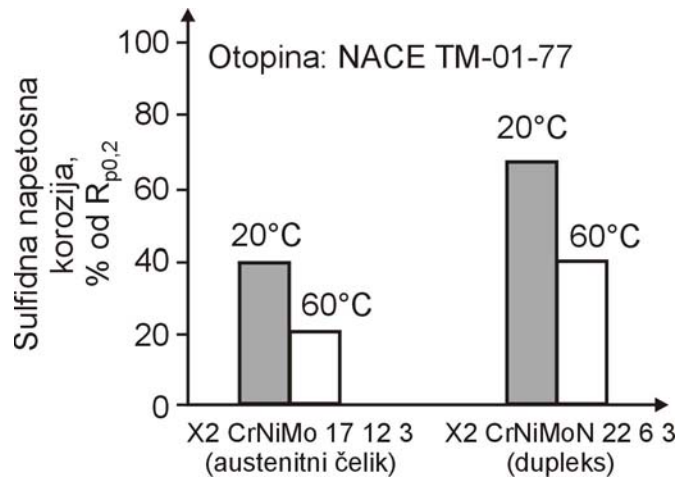
Primjena dupleks čelika pri povišenim temperaturama je moguća, ali zbog ograničenja primjene na maksimalno 250-350 °C primjena je znatno sužena. Razlog tog ograničenja primjene je pojava "krhkosti 475" koja se javlja u dupleks čelicima u feritnoj fazi po istom principu kao i kod feritnih čelika. Posljedice izlučivanja pri 475 ± 100 °C koje izazivaju "krhkost 475" mogu se ukloniti gašenjem s 900-950 °C.

Pritom, ferit ima višu granicu razvlačenja, nižu vlačnu čvrstoću i nižu plastičnost nego austenit. U dupleks čelicima ferit predstavlja anodu austenitu, tj. austenit je katodno zaštićen. Kod izrazito visokih napreznja ferit može biti trajno deformiran tako da napukne austenitno zrno, ali se napuklina ipak zaustavlja na graničnoj površini ferit/austenit te tek na kraju puca ferit. Dupleks čelici pokazuju izrazito povoljnije ponašanje od austenitnih ukoliko su izloženi djelovanju klorida i

sumporovodika, slika 3.4.8. Dupleks čelici su postojani prema napetosnoj koroziji, te su manje osjetljivi prema pojavi vodikove krhkosti.



(a)



(b)

Slika 3.4.8. Usporedba ponašanja dupleks i austenitnog čelika u ovisnosti o sadržaju klorida i temperaturi (a) te sulfidnoj napetosnoj koroziji (b)
 SCC- eng. Stress Corrosion Cracking
 NACE – National Association Corrosion Engineering

Postojanost dupleks čelika prema interkristalnoj koroziji je viša što je viši sadržaj ferita. Budući se krom otapa u feritu a ugljik u austenitu teže se stvaraju karbidi $Cr_{23}C_6$ nego kod austenitnih čelika. Karbid $Cr_{23}C_6$ nastati će na granicama ferit/austenit pa je mreža karbida isprekidana, a napredovanje korozije sporije nego kod austenitnih čelika.

Pojave koje uzrokuju krhkost dupleks čelika slične su pojavama koje se javljaju kod feritnih čelika: sigma faza (600-900 °C) i "krhkost 475" (400-500 °C). Uklanjanje navedenih oblika krhkosti može se provesti zagrijavanjem čelika na 1050-1100 °C te hlađenjem u vodi. Žarenjem na 870-950 °C mogu se učinkovito ukloniti izlučeni karbidi kroma koji nastaju po granicama ferit/austenit. Nakon takvog žarenja potrebno je provesti hlađenje na zraku ili u ulju radi izbjegavanja nastanka sigma faze i "krhkosti 475°C".

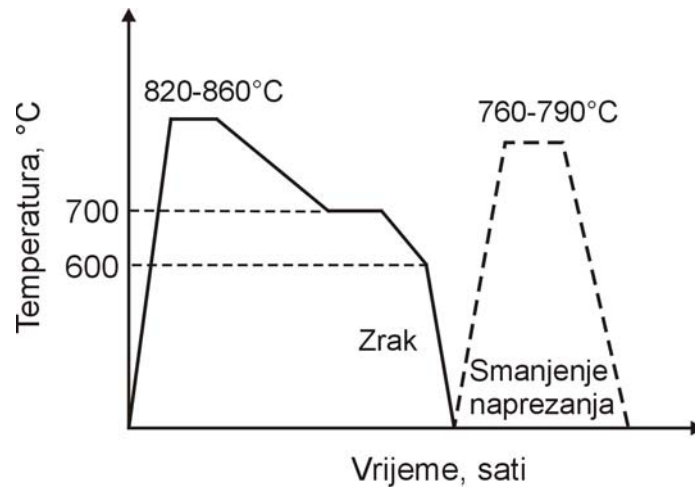
U praksi se najčešće koriste slijedeće vrste dupleks čelika (prema VDEh): X4 CrNiMoNb 25 7 2, X6 CrNiMoTi 20 6 2, X2 CrNiMoSi 18 5 3, X2 CrNiMoN 22 5 3, X8 CrNiMoN 27 5 2, X2 CrN 26 5 4, X3 CrNiMoCuN 24 5 2 itd.

Dupleks čelici se najčešće primjenjuju u industriji nafte i plina (crpke, desulfurizatori, destilatori, desalinizatori, ventili, cjevovodi, pumpe), petrokemijskoj industriji (alati za ekstruziju PVC filma, apsorberi, separatori, izmjenjivači topline), kemijsko-procesnoj industriji (u proizvodnji kiselina, rad s otopinama HF u HNO₃, uređaji za H₂SO₄, sapnice), brodogradnji (osovine propelera, kormila, crpke, grijači, ležajevi), industriji papira (ventili, cijevi regeneracijskih peći, osovine mješača, pročišćavanje vode), transportu (cisterne).

3.4.1.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici imaju povišeni udio ugljika (0,20-1,0%), iznad 13% kroma (do 18%) te mogu sadržavati i do 1,3% molibdena i 2,5% nikla. Optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost ove skupine čelika postiže se kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Martenzitni nehrđajući čelici mogu se podijeliti u dvije podskupine: konstrukcijski (sadrže do ≈0,25% C, poboljšavaju se) i alatni čelici (>0,3% C, nakon kaljenja se nisko popuštaju). Kod konstrukcijskih čelika posebna pažnja se usmjerava prema korozijskoj postojanosti, a kod alatnih postoji dodatni zahtjev prema otpornosti na abrazijsko trošenje. Radi toga alatni čelici imaju dvofaznu mikrostrukturu (martenzit + karbidi) čija je korozijska postojanost niža od jednofazne martenzitne mikrostrukture.

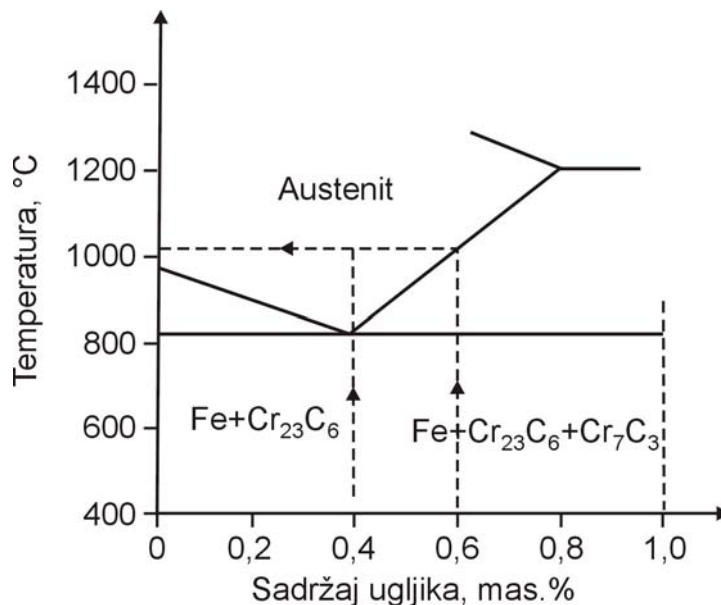
Čelici s 13% kroma i iznad 0,3% ugljika pri 1000 °C u austenitu imaju otopljeno oko 12,5% kroma i 0,3% ugljika što je dovoljno za korozijsku postojanost budućeg martenzita, ali nedovoljno za maksimalnu zakaljenost čelika (trebalo bi biti otopljeno 0,6% C ili više). Stoga je austenitizaciju potrebno provesti na višim temperaturama. Ukoliko bi sadržaj kroma bio na donjoj granici (≈12%) pojavila bi se opasnost izostanka korozijske postojanosti popuštenog martenzita. Dijagram postupka žarenja martenzitnih čelika prikazan je na slici 3.4.9. Nakon žarenja na 820-860 °C preporuča se provođenje dodatnog žarenja na 760-790 °C radi smanjenja naprezanja. Dodatno žarenje se može provesti nakon grube obrade odvajanjem čestica tj. prije završne obradbe.



Slika 3.4.9. Shematski prikaz dijagrama žarenja martenzitnih čelika

Konstruktivski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika (<0,30%) od alatnih pa se popuštaju pri višim temperaturama. Gašenjem se postiže monofazna martenzitna ili martenzitno-karbidna struktura (osim čelika X22 CrNi 17 koji je nakon kaljenja martenzitno-austenitno-feritne mikrostrukture).

Čelike s 13% kroma treba austenitizirati pri ≈ 1000 °C da bi se otopilo oko 0,6% ugljika u austenitu (slika 3.4.10). Tako npr. čelik X42 Cr 13 sa samo 0,4% ugljika pri 1000 °C ima monofaznu austenitnu mikrostrukturu, koja gašenjem prelazi u martenzitnu. Pritom vrijedi da ako čelik sadrži manje ugljika više će se kroma otopiti u austenitu i čelik će nakon kaljenja biti jače korozijski postojan.



Slika 3.4.10. Pseudobinarni dijagram Fe-Fe₃C kod sadržaja kroma 13%

Da bi martenzitni čelik imao povišenu postojanost prema koroziji i zadovoljavajuća mehanička svojstva (kao npr. čelik X20Cr13) potrebno je povisiti sadržaj kroma na 17-18%. Međutim, porast sadržaja kroma neizbježno dovodi do proširenja područja delta ferita. To se može izbjeći:

- povišenjem sadržaja ugljika (nepovoljno se utječe na korozijsku postojanost),
- dodatkom određene količine nikla (1,5-2%) koji sužava područje delta ferita.

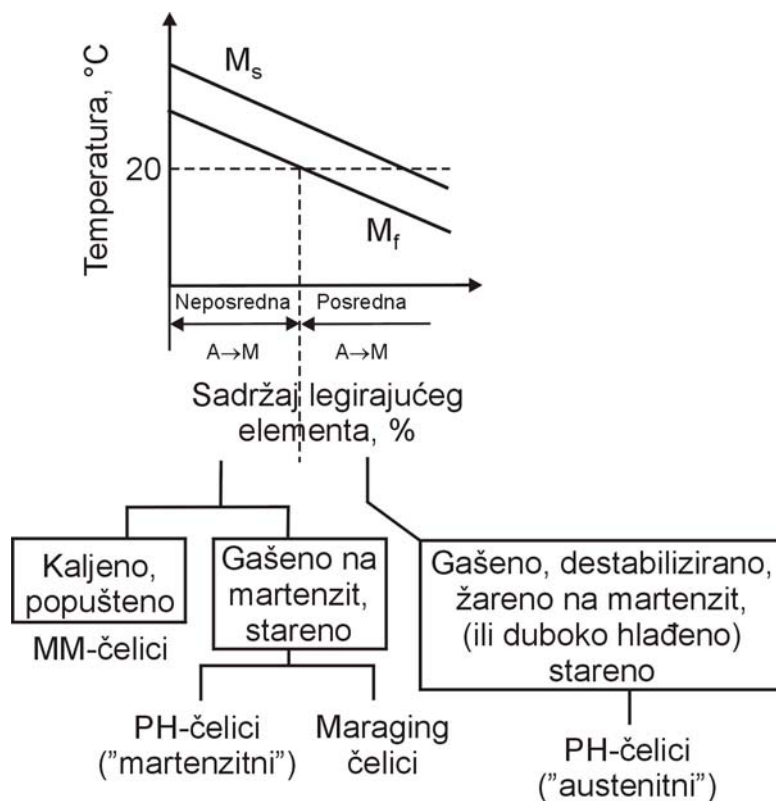
Na taj način razvijen je čelik X22 CrNi17 koji je otporan na jamičastu koroziju u morskoj vodi. Svojstva i primjena nekoliko najznačajnijih martenzitnih čelika navedeni su u tablici 3.4.6.

Tablica 3.4.6. Svojstva i primjena martenzitnih nehrđajućih čelika

Čelik	Posebno postojan	Primjeri primjene
X20 Cr 13 (Č4172)	- na vodu i vodenu paru, na organske kiseline: octenu, mliječnu, voćnu	- kirurški instrumenti (kliješta, pincete) - pribor za jelo: vilice, žlice - strojni dijelovi: osovine, stapajice, ventilni stošci, sapničke igle, turbinske lopatice, "holandski" noževi (za papir)
X20 CrMo 13	- povišena postojanost u odnosu na X20 Cr 13 (posebno toplinska)	- kao X20 Cr 13 ali za radne temperature i do 500 °C, za toplinski napregnute opruge
X22 CrNi 17 (Č4570)	- na organske kiseline koje se javljaju u industriji namirnica, octene kiseline i sapuna, na oksidirajuću razrijeđenu HNO ₃ , postojan na morsku vodu	- osovine, ventili, dijelovi pumpa, dijelovi uređaja u mljekarama, u industriji papira, u proizvodnji kvasca i škroba, za dijelove kompresora
X30 Cr 13 (Č4173)	- na vodu i paru (samo u kaljenom stanju)	- opruge, vijci (za rad u agresivnoj atmosferi), škare, mjerni alat
X36 CrMo 17 (alatni)	- u atmosferi aminokiselina, octene kiseline, pa i solne kiseline (PVC)	- dijelovi kalupa za preradbu polimera, kirurški rezni alat, zubarski alat
X42 Cr 13 (alatni)	- kao X36 CrMo 17	- kao X36 CrMo 17, posebno za aminoplaste
X45 CrMoV 15	- otporan do 500 °C	- različiti rezni alati, kirurški skalpeli
X90 CrMoV 18	- istovremeno vrlo otporan na trošenje i koroziju	- noževi za meso, skalpeli, korozijski postojani kotrljajući ležajevi, sapnice, pribor za jelo otporan na abrazijske praške za čišćenje, britve, žileti

Ukoliko se sadržaj ugljika smanji ($<0,10\%$) tada nastaju tzv. mekomartenzitni nehrđajući čelici koji spadaju u visokočvrste čelike (granica razvlačenja do 1000 N/mm^2). Sniženje mehaničkih svojstava (čvrstoća, granica razvlačenja) u tom slučaju nadomješta se legiranjem s kromom (13-18%), niklom (1-6%) i molibdenom ($<3\%$).

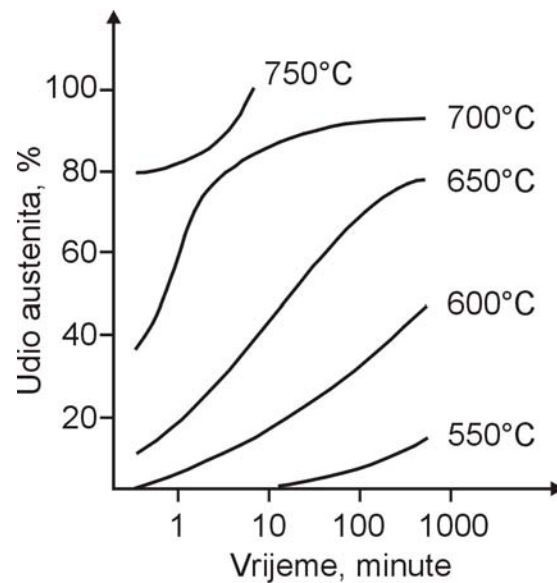
Mekomartenzitni čelici s $0,03-0,05\%$ ugljika postižu zadovoljavajuća mehanička, fizikalna i kemijska svojstva austenitizacijom, gašenjem i popuštanjem pri $450-700 \text{ }^\circ\text{C}$ (slika 3.4.11). Preostale tri skupine čelika označene na slici 3.4.11 (PH-martenzitni, maraging i PH-austenitni) pored visokog udjela kroma, nikla i molibdena mogu sadržavati i bakar, niobij, aluminij, titan, cirkonij koji međusobno ili s drugim elementima stvaraju intermetalne spojeve. Intermetalni spojevi nastaju u prethodno stvorenom martenzitu pa se očvrstnuće takvih čelika pripisuje precipitacijskom djelovanju. Stoga se takvi čelici označavaju kao PH-čelici (Precipitation Hardened) i pripadaju skupini ultračvrstih čelika.



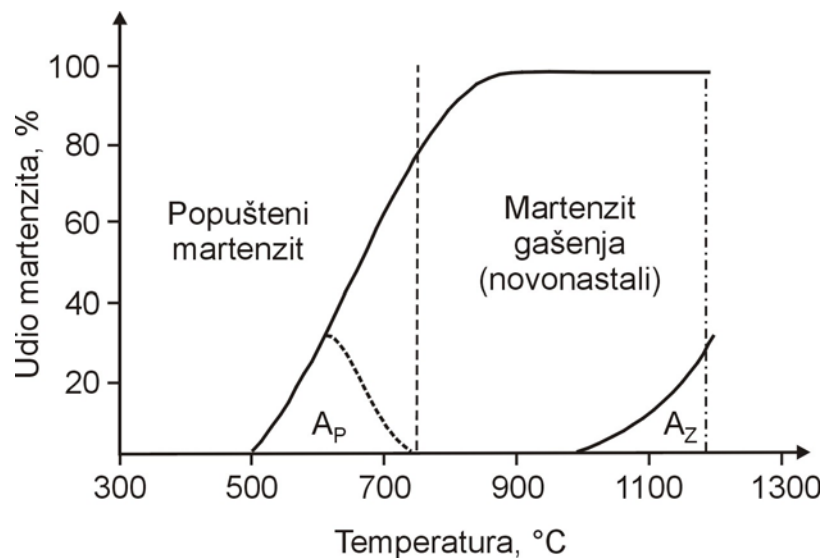
Slika 3.4.11. Shematski prikaz podjele niskougličnih martenzitnih čelika
 MM – mekomartenzitni, PH – precipitacijski očvrstnuti (eng. Precipitation Hardened),
 M_s – temperatura početka stvaranja martenzita,
 M_f – temperatura početka stvaranja martenzita

Nastanak mikrostrukture mekomartenzitnog čelika najjednostavnije se može objasniti pomoću TTA dijagrama (Time-Temperature-Austenitizing), slika 3.4.12. Pritom se može primijetiti da je maksimalna dopuštena radna temperatura ove skupine čelika oko $500 \text{ }^\circ\text{C}$ jer već pri $550 \text{ }^\circ\text{C}$ nakon 800 sati može nastati do 15% austenita. Potpuno martenzitna mikrostruktura može se postići gašenjem s

temperature 900-1000 °C. Ukoliko bi temperatura gašenja bila veća od 1000 °C došlo bi do pojave zaostalog austenita (A_Z). Soga se u praksi ne austenitizira iznad 1050 °C zbog opasnosti od rasta austenitnih zrna (slika 3.4.12). Zagrijavanjem martenzita nastalog gašenjem do ~500 °C dolazi do popuštanja martenzita ali njegov udio ostaje 100%. Zagrijavanjem na 500-700 °C dolazi do pojave austenita popuštanja (A_P) koji je fino dispergiriran u martenzitu i može osigurati visoku žilavost i dobru zavarljivost. Iz tog razloga preporuča se da se popuštanje mekomartenzitnih čelika provodi na temperaturi 680 °C, tablica 3.4.7.



(a)



(b)

Slika 3.4.12. Shematski prikaz TTA dijagrama (a) te područja mikrostruktura popuštanja i gašenja (b) mekomartenzitnog čelika s 14% Cr, 5% Ni i 1,5% Mo

Tablica 3.4.7. Primjeri temperature gašenja i popuštanja mekomartenzitnih čelika

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, ostalo %	Gašenje		Popuštanje		R _{p0,2} , N/mm ²
		ϑ _a , °C	Sredstvo	ϑ _p , °C	t _p , h	
X5 CrNi 13 14	≤0,7 Mo	900-1000	zrak	450	2	900
				530	8	850
				600	8	600
X3 CrNi 13 4	≤1,0 Mo	950-1050	zrak	680	2	750
X5 CrNi 13 6	-	950-1050	zrak	530	8	850
				600	8	600
X5 CrNi 17 4	-	do 1000	zrak	580		540
X4 CrNiMo 13 4	0,5 Mo	950-1050	zrak	550		850
				620		600
X3 CrNiMo 14 5	2,3 Mo	950-1050	zrak	450	2	990
				500	2	1000
				600	2	800
(G)-X5CrNiMo 16 5	1,5 Mo	1000	zrak	520		800
				600		530
X4 CrNiMo 16 5	1,0 Mo	1000	zrak	450	2	980
				500	2	1020
				620	2	580
				680	2	670

ϑ_a – temperatura austenitizacije, ϑ_p – temperatura popuštanja, t_p – vrijeme popuštanja

Mekomartenzitni čelici uglavnom se primjenjuju za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka (iznimno djelovanju morske vode), izradu lopatica Peltonovih i Kaplanovih turbina, za valjke u proizvodnji papira, izradu dijelova pumpi (rotori, osovine, lopatice, klizne plohe) itd.

Precipitacijski očvrtnuti korozijski postojani čelici biti će detaljno objašnjeni u poglavlju 3.4.5.3 (Visokočvrsti čelici).

3.4.2. Čelici otporni na trošenje

Prvi austenitni manganski čelik otporan na trošenje koji sadrži oko 1,2% C i 12% Mn (C:Mn=1:10) izumio je Sir Robert Hadfield 1882. godine. Hadfieldov čelik je jedinstven po tome što posjeduje kombinaciju visoke žilavosti i istezanja s visokim kapacitetom očvršćivanja te dobrom otpornosti na trošenje. Zbog toga je takav čelik vrlo brzo prihvaćen kao vrlo koristan inženjerski metalni materijal prvenstveno u području građevinarstva (mehanizacija), rudarstva, industrije nafte i plina, u proizvodnji cementa, za izradu dijelova drobilica, mlinova, bagera, pumpi za transport šljunka i kamena, vojnoj industriji itd.

U međuvremenu, predložene su brojne varijacije originalnog manganskog austenitnog čelika, ali samo nekoliko njih je usvojeno kao značajno poboljšanje. Poboljšanje sastava manganskih čelika obično uključuje promjenu sadržaja ugljika i mangana, sa ili bez dodatnih legirajućih elemenata (kao što su npr. krom, nikal, molibden, vanadij, titan i bizmut).

Mehanička svojstva austenitnog manganskog čelika razlikuju se s obzirom na sadržaj ugljika i mangana. Zbog abrazijske otpornosti koja se povećava porastom sadržaja ugljika, poželjno je da sadržaj ugljika bude viši od 1,2% (kada se zahtjeva niža duktilnost). Čelik sa sadržajem ugljika iznad 1,4% se rijetko koristi zbog teškoća dobivanja austenitne mikrostrukture te nastanka karbida po granicama zrna, koji su štetni u pogledu čvrstoće i istezanja. Niski sadržaj ugljika (0,7% C najmanje) koristi se kako bi se smanjila precipitacija karbida u teškim odljevcima ili u zavaru.

Titan može smanjiti sadržaj ugljika u austenitu stvaranjem vrlo stabilnih karbida. Također, titan može donekle neutralizirati učinak prekomjernog sadržaja fosfora. Prema nekim istraživačima mikrolegirajući dodaci (<0,1%) titana, vanadija, bora, cirkonija i dušika omogućavaju usitnjenje zrna u manganskim čelicima. Međutim, postoje neke nekonzistentnosti u svezi toga. Veća količina mikrolegirajućih elemenata može dovesti do značajnog gubitka duktilnosti. Dušik u količinama većim od 0,20% može uzrokovati plinsku poroznost u odljevcima.

Sumpor u Mn-čeliku uglavnom ne utječe na njegova svojstva jer djelovanjem mangana sumpor prelazi u relativno neškodljiv oblik (MnS). Međutim, najbolje je održavati sadržaj sumpora kod nižih vrijednosti kako bi se smanjio broj uključaka u mikrostrukтури koji mogu biti inicijalna mjesta pojave pukotina.

Austenitni čelici s višim sadržajem mangana (> 15%) razvijeni su za primjenu koja zahtjeva nisku magnetsku permeabilnost, te čvrstoću i žilavost pri niskim temperaturama. Navedena primjena proizlazi iz razvoja supravodljivih tehnologija koje se koriste u transportnim sustavima i istraživanju nuklearne fuzije te potrebi za razvojem konstrukcijskog materijala koji će služiti za spremanje i transport ukapljenih plinova.

Zahtjev za niskom magnetskom permeabilnosti ostvaruje se legurama koje imaju niži sadržaj ugljika nego standardni Hadfieldov čelik. Odgovarajući gubitak čvrstoće (zbog nižeg sadržaja ugljika) nadoknađuje se legiranjem s vanadijem,

dušikom, kromom, molibdenom i titanom. Krom također daje otpornost na koroziju što je nužni zahtjev kod primjene u kriogenim uvjetima.

Toplinskom obradbom dolazi do porasta čvrstoće manganskog austenitnog čelika. Žarenje i gašenje u vodi, kao i austenitizacija predstavljaju standardnu toplinsku obradbu kojom se dobivaju proizvodi uobičajene vlačne čvrstoće i željene žilavosti. Varijacije navedene toplinske obradbe mogu se koristiti za poboljšanje točno specificiranih svojstava kao što su npr. granica razvlačenja i otpornost na trošenje.

Obično se u gašenom stanju želi postići potpuno austenitna mikrostruktura, bez karbida te homogena s obzirom na ugljik i mangan. Međutim, to nije uvijek ostvarivo u velikim i teškim otkovcima ili kod čelika koji sadrže elemente koji stvaraju karbide. Ukoliko postoje karbidi u gašenoj mikrostrukturi poželjnije je da budu prisutni u obliku relativno neškodljivih čestica ili nodula unutar zrna austenita nego kao kontinuirani sloj na granicama zrna.

Visokolegirani čelici otporni na trošenje (npr. 1,2% C i 12,5% Mn) najčešće se primjenjuju kada je proizvod izložen visokom pritisku i udaru (npr. članci gusjenica, dijelovi drobilica i mlinova, zubi bagera, noževi buldožera, skretnice vlakova i tramvaja itd.). Niskolegirani čelik (npr. 0,5% C i 1,8% Mn) upotrebljava se kada je primjena visokolegiranih manganskih čelika nemoguća zbog ekonomskih razloga ili zbog teške obrade.

3.4.3. Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama

Prema temperaturnom području primjene čelici namijenjeni za rad pri povišenim temperaturama dijele se na:

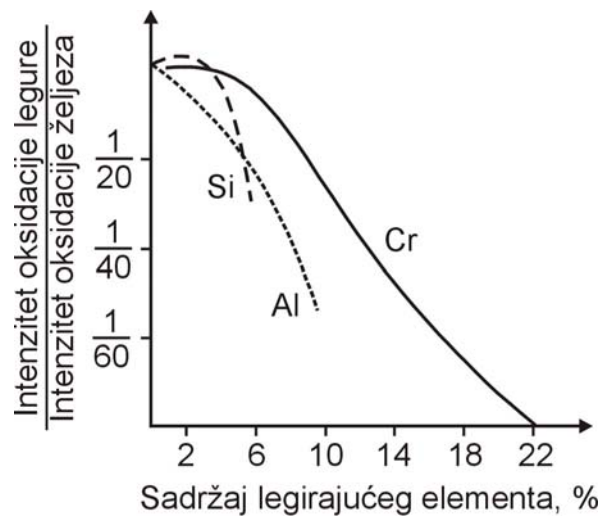
- a) ugljične (nelegirane),
 - b) niskolegirane,
 - c) visokolegirane martenzitne i
 - d) visokolegirane austenitne čelike.
- a) Glavni predstavnici ugljičnih (nelegiranih) čelika za rad pri povišenim temperaturama su čelici za kotlovski lim. Karakterizira ih dovoljna čvrstoća pri povišenim temperaturama, zadovoljavajuća duktilnost, otpornost na starenje, umjerena postojanost prema vodi, vodenoj pari i lužinama, otpornost prema interkristalnoj koroziji, dobra zavarljivost i sl. Čelici za kotlovski lim sadrže niski udjel ugljika (<0,2%) te mangan (>0,4%), aluminij (>0,02%) i krom (<0,3%). Kotlovski čelici se isporučuju u obliku toplovaljanih limova ili ploča, a primjenjuju se za izradu oplata parnih kotlova, cijevi i spremnika većih promjera. Najčešće korišteni čelici za kotlovski lim su čelici P235GH (Č1202) i P265GH (Č1204).

- b) Niskolegiranim čelicima se najčešće dodaju samo molibden ili kombinacija molibdena i kroma, te kod nekih vrsta i manje količine vanadija. Radi postizanja dobre zavarljivosti sadržaj ugljika se ograničava na manje od 0,25%. Molibden i krom stvaraju karbide Mo_2C i Cr_7C_3 koji usporavaju puzanje te povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje. Temperaturno područje primjene ove grupe čelika je od 450 do 580 °C. Pri temperaturama iznad 580 °C može doći do koagulacije karbida, osiromašenja osnove s molibdenom te smanjenja temperature rekristalizacije. Niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama uglavnom se izrađuju u obliku cijevi i limova. Mikrostruktura im je feritno-perlitna u normaliziranom stanju a bainitna u poboljšanom stanju. Uglavnom se primjenjuju u termoenergetskim postrojenjima, za oplata kotlova, kotlovske cijevi, kolektore pare, turbinske lopatice i sl. Najčešće korišteni niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama su: 15Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10, 22CrMo4-4, 24CrMoV5-5.
- c) Visokolegirani martenzitni čelici moraju sadržavati oko 1% molibdena i do 12% kroma tako da se nakon kaljenja postigne potpuno martenzitna mikrostruktura uz što manji udio δ -ferita. Popuštanjem na temperaturama 550-750 °C dolazi do izlučivanja karbida molibdena, vanadija i kroma te precipitiranja intermetalnih faza što povoljno utječe na povećanje otpornosti na puzanje. Primjena ovih čelika je najčešće kod izrade dijelova za dugotrajni rad pri temperaturama 550-600 °C (npr. lopatice, rotori, kućišta parnih turbina, cijevi pregrijača pare, dijelovi otporni na djelovanje morske vode i sl.). Najčešće korišteni tzv. super 12% Cr martenzitni toplinski visokopostojani čelici su: X19CrMo12-1, X11CrMoV12-1, X20CrMoV12-1, X19CrMoVNb11-1, X20CrMoWV12-1.
- d) Visokolegirani austenitni čelici zbog dodatnog legiranja s molibdenom, volframom, vanadijem, titanom i niobijem izlučuju karbide i intermetalne faze koje povećavaju mehaničku otpornost pri visokim temperaturama. Unatoč činjenici da im je čvrstoća pri 20 °C relativno niska ona porastom temperature vrlo sporo opada. Austenitni Cr-Ni čelici imaju vrlo visoku temperaturu rekristalizacije (900-1000 °C) pa se mogu dugotrajno primjenjivati pri temperaturama 600-750 °C. Pored otpornosti na puzanje austenitne čelike karakterizira vrlo dobra kemijska postojanost i vatrootpornost. Najčešće korišteni austenitni čelici za rad pri 600-800 °C su: X6CrNi18-11, X8CrNiMoNb16-16, X40CrNiCoNb13-13, X40CoCrNi20-20-20, X12CrNiWTi16-13, X50CoCrNi20-20-20, X6NiCrMoTi28-15 itd.

3.4.3.1 Vatrootporni čelici

Kod zagrijavanja nelegiranih čelika može doći do stvaranja površinskih slojeva oksida željeza (FeO , Fe_3O_4 i Fe_2O_3). Oksidi željeza nisu dovoljno kompaktni da spriječe daljnju difuziju kisika i porast debljine nastalog sloja oksida (ogorine). Legiranjem elementima koji imaju viši afinitet prema kisiku od željeza (npr. krom,

silicij, aluminij) nastati će oksidi (Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , MoO_2) koji su kompaktniji od oksida željeza pa štite čelik od nastanka ogorine, slika 3.4.13.



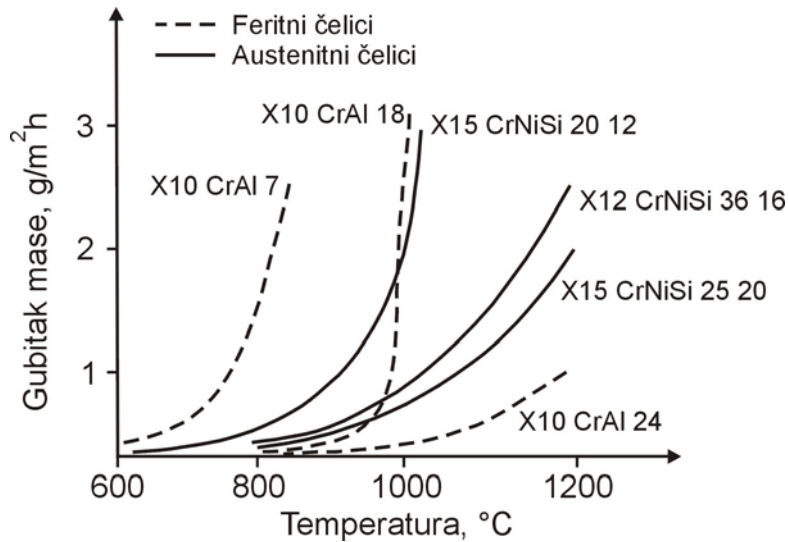
Slika 3.4.13. Utjecaj legiranja sa silicijem, aluminijem i kromom na intenzitet oksidacije čelika pri temperaturi 900-1100 °C

Vatrootporni čelici predstavljaju skupinu čelika koje karakterizira vrlo mala reakcija nastanka ogorine u struji plinova pri temperaturi iznad 600 °C. Čelik spada u skupinu vatrootpornih čelika ukoliko pri zadanoj temperaturi gubi prosječno 1 g/m²h svoje mase, a pri temperaturi višoj za 50K prosječno najviše 2 g/m²h.

Vatrootpornost se ispituje na epruvetama dimenzija 50x25x5 mm koje se izlažu ispitnoj temperaturi u struji zraka u trajanju od 120 sati. Svaka 24 sata proba se hladi te se s nje skida nastala ogorina (slika 3.4.14). Vatrootporni čelici se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe:

- a) feritni čelici s kromom, silicijem i aluminijem kao legirajućim elementima,
- b) austenitni čelici s glavnim legirajućim elementima poput kroma, nikla, silicija aluminija i titana.

Sadržaj ugljika nije posebno važan kod vatrootpornih čelika te obično iznosi 0,1-0,2%.



Slika 3.4.14. Gubici mase (ogorina) vatrootpornih čelika

Austenitni vatrootporni čelici su znatno skuplji nego feritni (zbog visokog sadržaja nikla) ali im je primjena neizbježna kada se zahtjeva otpornost prema visokim naprezanjima i djelovanju plinova s puno dušika, a malo kisika. Feritni čelici dolaze u primjeni samo u iznimnim slučajevima (npr. u slučaju djelovanja oksidirajućih plinova koji sadrže sumpor). Hladna obrada deformiranjem feritnih čelika je vrlo teška, pa se tanji limovi hladno valjaju predgrijani na 100-300 °C. Deblji limovi (>6 mm) predgrijavaju se do 600 °C. Nakon valjanja potrebno je provesti žarenje na 700-800 °C i hlađenje na zraku.

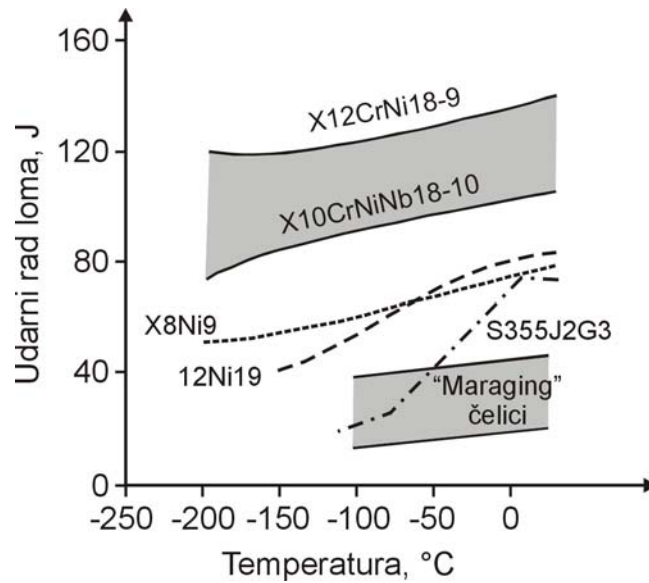
Austenitni vatrootporni čelici debljine lima do 6 mm valjaju se pri 20 °C, a deblji od 6 mm se predgrijavaju na 900 °C. Nakon valjanja slijedi žarenje na 1000-1100 °C i hlađenje na zraku. U tablici 3.4.8 navedeni su neki karakteristični slučajevi primjene najčešće korištenih vatrootpornih čelika.

Tablica 3.4.8. Primjeri primjene vatrootpornih čelika

Oznaka čelika	Primjeri primjene
X10 CrAl 7	Limovi i cijevi u pećima: predgrijači zraka, poklopci, zaštitne pirometarske cijevi, sanduci za cementaciju i boriranje u granulatu.
X10 CrSi 13	Dijelovi za gradnju peći i parnih kotlova: tračnice, noseća i transportna užad, rešetke ložišta.
X10 CrAl 18	Armature peći, žarne cijevi, lonci za žarenje.
X10 CrAl 24	Limovi za pregrijače kotlovske pare, ovjesi pregrijača.
X15 CrNiSi 25 20	Dijelovi peći i toplinskih uređaja: žarne komore, lonci za žarenje, rešetke za emajliranje, grijači, predgrijači zraka, stalci u pećima. Ne podnosi reducirajuće plinove koji sadrže sumpor.
X15 CrNiSi 20 12	Kao X15 CrNiSi 25 20, ali za niža mehanička naprezanja.
X12 CrNiSi 36 16	Kao X15 CrNiSi 25 20, ali za niža mehanička naprezanja.
X10 NiCrAlTi 32 20	Za limove do 6 mm: dijelovi peći, parnih kotlova, uređaja u rafineriji nafte.

3.4.4. Čelici za rad pri niskim temperaturama

Poznato je da sniženjem temperature kojoj je čelik izložen može doći do smanjenja duktilnosti, udarne radnje loma, toplinske istežljivosti i vodljivosti te specifičnog toplinskog kapaciteta. Pri niskim temperaturama primjene čelika može doći do porasta tvrdoće, vlačne čvrstoće i granice razvlačenja. Najopasniju pojava koja se javlja tijekom izloženosti čelika niskim temperaturama predstavlja sniženje žilavosti, slika 3.4.15. Primjena čelika za rad pri niskim temperaturama, uz zahtjev prema izbjegavanju pojave krhkog loma, navedena je u tablici 3.4.9.



Slika 3.4.15. Utjecaj temperature na promjenu udarnog rada loma čelika za rad pri niskim temperaturama

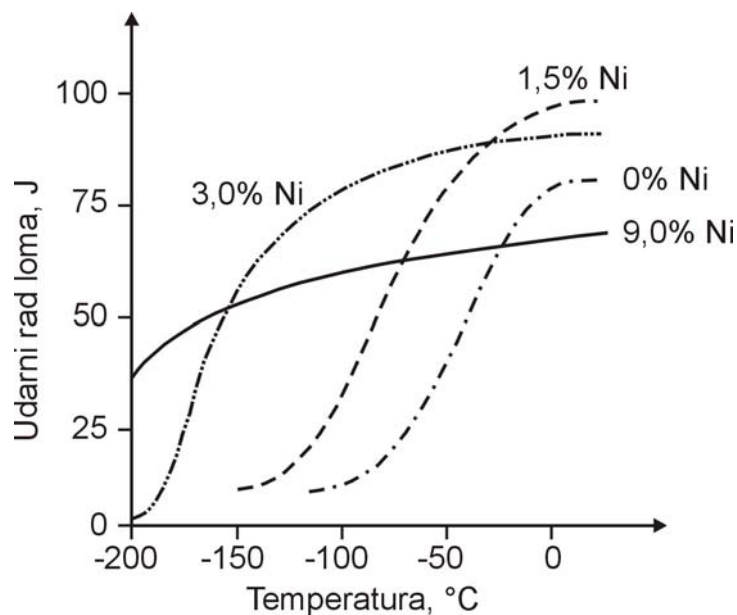
Tablica 3.4.9. Osnovna primjena nekih čelika za rad pri niskim temperaturama

Radno područje	Raspon temperatura, °C	Preporučljiva vrsta čelika	Orijentacija po temperaturi ukapljivanja, plin/°C
Tehnika hlađenja	do -50 °C	St 52 - 3 čelici TStE... i EStE...	SO ₂ /-10 °C NH ₃ /-33 °C
	do -80 °C	- niskolegirani poboljšani sitnozmatni čelici	C ₃ H ₈ /-47 °C H ₂ S/-60 °C CO ₂ /-80 °C
Tehnika "dubokog" hlađenja	-85 do -196 °C	- čelici legirani s 5 do 9% Ni, - austenitni čelici (Cr-Ni, Cr-Mn)	C ₂ H ₆ /-89 °C CH ₄ /-162 °C O ₂ /-183 °C N ₂ /-196 °C
Tehnika posebno "dubokog" hlađenja	-196 do -270 °C	- austenitni Cr-Ni čelici Cr-Ni-N-čelici	Ne/-246 °C H ₂ /-253 °C He/-269 °C

U primjeni se razlikuju tri osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama:

- a) niskolegirani (mikrolegirani) sitnozrnati čelici čija je niža prijelazna temperatura žilavosti posljedica sitnog zrna, dezoksidacije aluminijem i silicijem, te više čistoće od klasičnih konstrukcijskih čelika,
- b) čelici za poboljšanje legirani s 1,5-9% nikla koji pospješuje stvaranje sitnijeg zrna i vrlo žilavog Fe-Ni martenzita nakon kaljenja,
- c) austenitni čelici Cr-Ni, Cr-Ni-N (Nb, Ti), Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N koji i blizu apsolutne nule imaju zadovoljavajuću žilavost.

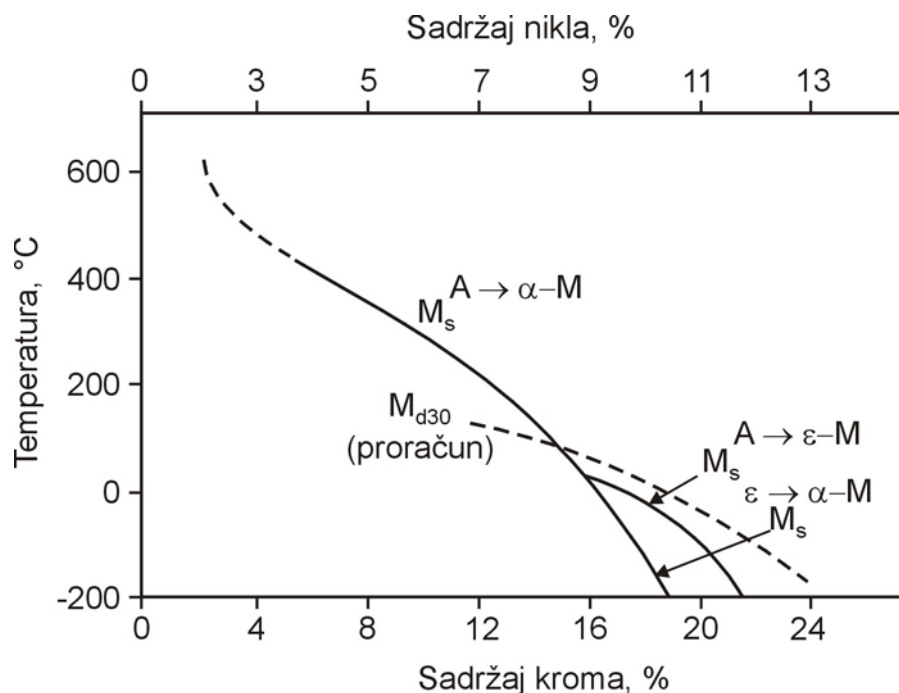
Slikom 3.4.16 prikazan je pozitivan utjecaj porasta sadržaja nikla na udarnu radnju loma. Osnovni razlog povoljnog ponašanja austenitnih čelika pri izrazito niskim temperaturama predstavlja oblik njihove kristalne rešetke (FCC). Nasuprot njima čelici s BCC kristalnom rešetkom pokazuju izrazitu ovisnost granice razvlačenja o temperaturi ispitivanja i slabije očvrstnuće hladnom deformacijom. Budući da FCC rešetka ima gušći i jednoličniji raspored atoma ne javlja se toliki otpor klizanju ravnina atoma kao kod nejednoličnijeg rasporeda atoma u BCC rešetci. To predstavlja glavni razlog zadržavanja plastičnosti austenitnih čelika i pri izrazito niskim temperaturama.



Slika 3.4.16. Utjecaj sadržaja nikla i temperature na udarni rad loma čelika s 0,08-0,14% C

Osnovni problem austenitnih čelika koji se može pojaviti pri nižim temperaturama predstavlja transformacija austenita u martenzit. Transformacija austenit→martenzit može biti:

- klasična transformacija austenita u tetragonski α -martenzit pri sniženju temperature ispod M_s (do M_f),
- transformacija metastabilnog austenita u heksagonski ϵ -martenzit (tzv. deformacijski martenzit) ispod M_d (slika 3.4.17).



Slika 3.4.17. Temperature početka stvaranja martenzita gašenja (α -M) i deformacijskog martenzita (ϵ -M) za Cr-Ni legure gašene s 1050 °C u vodi

Potpuno stabilni austenit koji ne može transformirati u α -martenzit ili ϵ -martenzit morao bi sadržavati najmanje 28% kroma i 15% nikla. Budući da pojava martenzita u austenitnoj mikrostrukturi uzrokuje znatno smanjenje žilavosti za tehniku “dubokog hlađenja” (npr. temperatura tekućeg helija i vodika) potrebno je primijeniti visokolegirane Cr-Ni čelike. Čelici za rad pri niskim temperaturama najčešće se primjenjuju za izradu tlačnih spremnika u rashladnim uređajima, uređaja za demetanizaciju, spremnika metana i etilena na brodovima, uređaja za hlađenje nuklearne jezgre itd.

3.4.5. Visokočvrsti čelici

Pored postizanja visoke vlačne čvrstoće i granice razvlačenja visokočvrsti čelici moraju posjedovati i visoku žilavost, visoku dinamičku izdržljivost, otpornost na koroziju, čvrstoću pri povišenim i visokim temperaturama, potpunu prokaljivost (95% martenzita u jezgri), laku obradljivost odvajanjem čestica, sposobnost zavarljivosti i toplinske obradbe.

U pogledu mikrostrukturnih zahtjeva nastoji se dobiti sitnozrnatu homogenu mikrostrukturu uz izbjegavanje lokalnih heterogenosti (makrosegregacije, kristalne segregacije, uključci). Heterogenost u atomarnom i submikroskopskom području je poželjna radi jednoličnog usporavanja gibanja dislokacija.

Postizanje visoke vlačne čvrstoće obično dovodi do snižavanja plastičnosti i otpornosti na krhki lom. Pouzdanost čelika u konstrukcijama karakterizira se konstrukcijskom čvrstoćom, tj. skupom mehaničkih svojstava koja ovise o radnim uvjetima. Glavni parametri konstrukcijske čvrstoće su vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, žilavost i prijelazna temperatura žilavosti, te pukotinska lomna žilavost (K_{IC}).

Postizanje visokočvrstog stanja povezano je s postignućem metastabilnog strukturnog oblika s visokom razinom mikronepravilnosti, s visokom gustoćom grešaka kristalne rešetke (dislokacije, praznine) te visokom sklonošću difuzijskim procesima. Kod dobivanja visokočvrstih čelika uglavnom se primjenjuju slijedeći načini očvršćivanja:

- transformacijsko očvršćivanje (kaljenje),
- precipitacijsko očvršćivanje u osnovnoj masi martenzita ili austenita (starenje),
- očvršćivanje hladnom deformacijom.

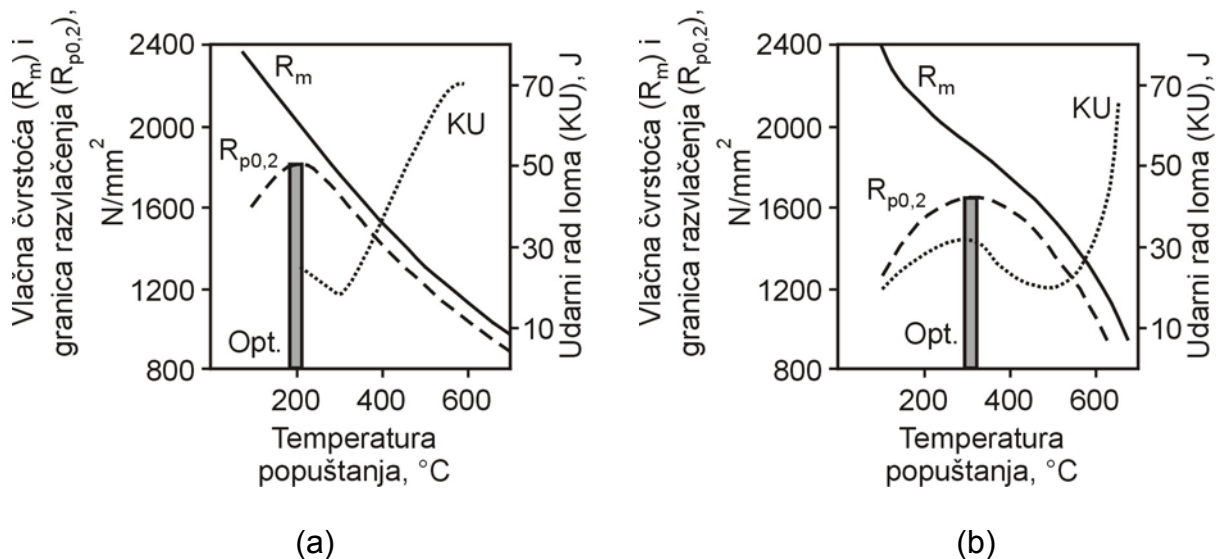
Visokočvrsti čelici se mogu podijeliti u slijedeće skupine:

- a) niskolegirani niskopopušteni čelici,
- b) visokolegirani (Cr-Mo-V) visokopopušteni čelici,
- c) korozijski postojani precipitacijski očvršnuti čelici,
- d) termomehanički obrađeni čelici,
- e) hladno oblikovani nelegirani ili niskolegirani čelici,
- f) "maraging" čelici.

3.4.5.1. Niskolegirani niskopopušteni čelici

Kemijski sastav ove skupine čelika karakterizira legiranje silicijem ili niklom te kombinacijom Cr-Mo-V. Značajka toplinske obradbe je "srednje popuštanje" koje se kod drugih čelika uglavnom ne preporuča zbog pojave niskotemperaturne krhkosti popuštanja ("krhkost 260"). Silicij pomiče područje niskotemperaturne krhkosti prema višim temperaturama ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$) te omogućava porast granice razvlačenja srednjim popuštanjem pri oko $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čelici bez silicija ali legirani niklom i kromom ili molibdenom i vanadijem također imaju dovoljnu žilavost nakon srednje temperaturnog popuštanja.

Na slici 3.4.18 shematski su prikazani dijagrami popuštanja visokočvrstih čelika, te se može zamijetiti da se optimalno popuštanje postiže pri temperaturi $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Međutim, osim temperature popuštanja značajan je i utjecaj veličine austenitnog zrna i čistoće čelika (udio sumpora). Tako radi povišenja lomne žilavosti treba osigurati izrazito sitno austenitno zrno (ASTM 14-18). U pogledu čistoće važno je da sadržaj sumpora bude što niži ($\sim 0,008\%$) kako bi se izbjeglo pogoršanje dinamičke izdržljivosti i plastičnosti čelika.



Slika 3.4.18. Shematski prikaz dijagrama popuštanja visokočvrstih niskolegiranih čelika
 a) čelik 38NiCrMoV 7 3
 b) čelik 41SiNiCrMoV 7 5

U tablici 3.4.10 navedeno je nekoliko visokočvrstih čelika koji sadrže nisko- ili srednjepopušteni martenzit. Povoljna svojstva takvih čelika mogu biti postignuta i izotermičkim poboljšavanjem pri 250-350 °C čime se dobije bainitna mikrostruktura.

Tablica 3.4.10. Primjeri toplinske obradbe niskolegiranih niskopopuštenih visokočvrstih čelika

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, ostalo %	Toplinska obradba		
		ϑ_a , °C	Gašenje	ϑ_p , °C
41 SiNiCrMoV 7 6	0,8Cr; 0,4Mo 0,10V	890-910	ulje	300±15
36 NiCrMoV 7 3	0,35 Mo 0,10 V	850-870	ulje	200±20
38 SiCrV 6	0,10 V	800-930	voda	350
45 SiCrV 4 4	0,20			370
35 NiCrMo 16 6	0,4 Mo	855-885	ulje	350
30 CrMoV 9	0,25 Mo 0,15 V	850-870	ulje, voda	230
40 SiCrMnMo 9 6	1,3 Mn 0,35 Mo 0,20 V			290
30 NiCrMnSi 6 4	1,15 Mn 1,05 Si	900	ulje	250
40 NiCrSi 11 4	0,65 Si 0,70 Mn			250
35 NiMnSiMo 7 7	1,55 Si; 0,10 Cr; 0,35Mo; 0,20 V			350

ϑ_a – temperatura austenitizacije, ϑ_p – temperatura popuštanja

Nedostaci niskolegiranih niskopopuštenih čelika su:

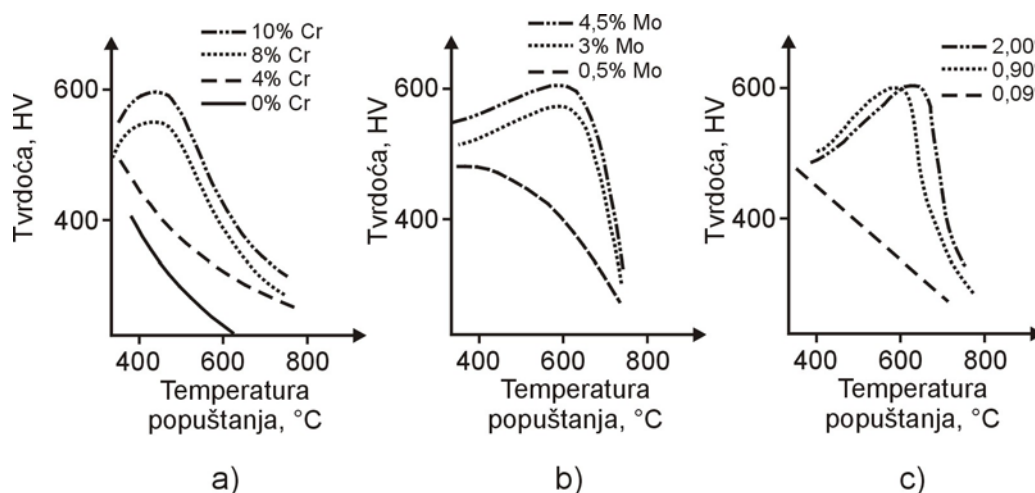
- korozijska nepostojanost,
- vodikova krhkost pri galvanskom prevlačenju i zavarivanju,
- sklonost anizotropiji.

Visokočvrsti niskolegirani niskopopušteni čelici uglavnom se primjenjuju kada je potrebna ušteda na masi, tj. za lake konstrukcije kao što su:

- visokotlačni spremnici u transportnim zrakoplovima i brodovima,
- visokonapregnute karoserije zrakoplova,
- dijelovi tijela svemirskih raketa,
- dijelovi rampi za lansiranje raketa itd.

3.4.5.2. Visokolegirani visokopopušteni Cr-Mo-V visokočvrsti čelici

Prema kemijskom sastavu ova skupina čelika sadrži oko 0,4% C, 1% Si, 5,0% Cr, 1,3-2% Mo i 0,4-1,0% V. Zbog načina provedbe toplinske obradbe (kaljenje + visokotemperaturno popuštanje na 450-700 °C) poznati su i kao alatni čelici za topli rad. Nakon kaljenja čelici ove skupine sadrže visoki udio zaostalog austenita koji se tijekom popuštanja pri 500-550 °C raspada te izlučivanjem karbida popuštanja (npr. Cr_7C_3 , Mo_2C , VC i V_4C_3) i pretvorbom u sekundarni martenzit dolazi do dodatnog očvršćivanja. Pojedinačni utjecaj kroma, molibdena i vanadija na oblik krivulje popuštanja prikazan je slikom 3.4.19. Istodobni utjecaj dva ili tri prisutna elementa mijenja krivulju popuštanja na način koji ne mora odgovarati zbroju pojedinačnih utjecaja.



Slika 3.4.19. Utjecaj kroma (a), molibdena (b) i vanadija (c) na promjenu tvrdoće pri popuštanju čelika s 0,3% C

Nedostatak ove skupine čelika je pojava urezne osjetljivosti radi čega treba voditi računa o čistoći čelika (proizvodnja) i neoštećenosti površine (npr. uslijed zavarivanja). U tablici 3.4.11 navedeno je nekoliko najčešće korištenih visokolegiranih visokopopuštenih čelika s 3-5% kroma.

Tablica 3.4.11. Primjeri toplinske obradbe visokolegiranih visokočvrstih čelika (3-5% Cr, 1-2% Mo, 0,3-1% V)

Oznaka čelika prema VDEh (HRN)	Sastav ostalo, %	Toplinska obradba		
		ϑ_a , °C	Gašenje	ϑ_p , °C
X41 CrMoV 5 1 (Č4751)	0,4 V (0,12 Nb)	1020-1050	ulje, zrak, topla kupka	550-650
X40 CrMoV 5 1 (Č4753)	1,0 V	1020-1060	ulje, zrak, topla kupka	550-650
X37 CrMoWV 5 1 (Č4752)	0,4 V 1,3 W	1020-1050	ulje, zrak, topla kupka	550-650
X32 CrMoV 3 3 (Č4750)	0,55 V	1020-1050	ulje, zrak, topla kupka	500-670

ϑ_a – temperatura austenitizacije, ϑ_p – temperatura popuštanja

3.4.5.3. Visokočvrsti korozijski postojani precipitacijski očvrnuti čelici

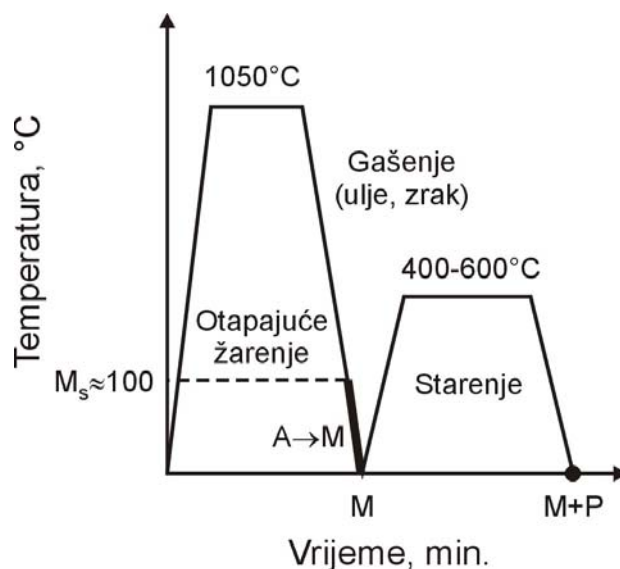
Razvojem korozijski postojanih precipitacijski očvrnutih čelika (PH-čelici eng. Precipitation Hardenable ili Precipitation Hardened) nastojalo se postići visoku granicu razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozijske postojanosti. Pored niskog masenog udjela ugljika i visokog stupnja legiranosti visoko očvrnuće postiže se precipitacijom intermetalnih spojeva. S obzirom na mikrostrukturu čelika prije precipitacije razlikujemo:

- a) martenzitne PH čelike,
- b) poluaustenitne PH-čelike,
- c) austenitne PH-čelike.

a) Martenzitni PH-čelici

Martenzitni PH-čelici pored niskog udjela ugljika (~0,05%) sadrže visoke udjele kroma (14-17%) i nikla (4-6%) uz eventualni dodatak bakra (~3%) i niobija (<0,4%). Radi postizanja visoke granice razvlačenja i vlačne čvrstoće martenzitni PH-čelici se žare pri 1050 °C, gase u ulju ili na zraku te umjetno stare pri 400-600 °C, slika 3.4.20. Žarenjem homogenizirani austenit pretvara se pri gašenju u martenzit. Iako je

$M_s \approx 100$ °C do sobne temperature transformira 90-95% austenita u martenzit, a zaostali austenit (5-10%) transformira tijekom starenja. Martenzitna mikrostruktura postiže se neposredno te je gašena mikrostruktura odmah spremna za umjetno starenje. To je vrlo važna činjenica budući da spojevi bakra precipitiraju samo u martenzitnoj osnovi. U tablici 3.4.12 navedeno je nekoliko martenzitnih PH-čelika.



Slika 3.4.20. Shematski prikaz dijagrama očvršćavanja martenzitnih PH-čelika

A – austenit
M – martenzit
P – precipitati

Tablica 3.4.12. Martenzitni korozijski postojani PH-čelici

Oznaka čelika VDEh (uobičajena oznaka čelika)	Sastav, ostalo, %	Žarenje ϑ_z , °C	Starenje		$R_{p0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²
			ϑ_s , °C	t_s , h		
X5 CrNiCu(Nb) 17 4 (17-4 PH)	4 Cu (0,3Nb)	950-1050	Gašeno stanje		750	1050
			480	6	1350	1450
			530	6	1150	1200
			600	4	1050	
X5 CrNiMoCu(Nb) 14 5 (14-5 PH) (14-5 Mo-Cu)	1,75 Mo 1,5 Cu (0,2 Nb)	950-1050	400	8	1000	
			475	8	1200	
			550	8	900	
			600	8	760	
			650 (opt.)	8	630	
X3 CrNiMoAl 13 8 2 (13-8 Mo-Al)	1,1 Al	925	510	4	1350	

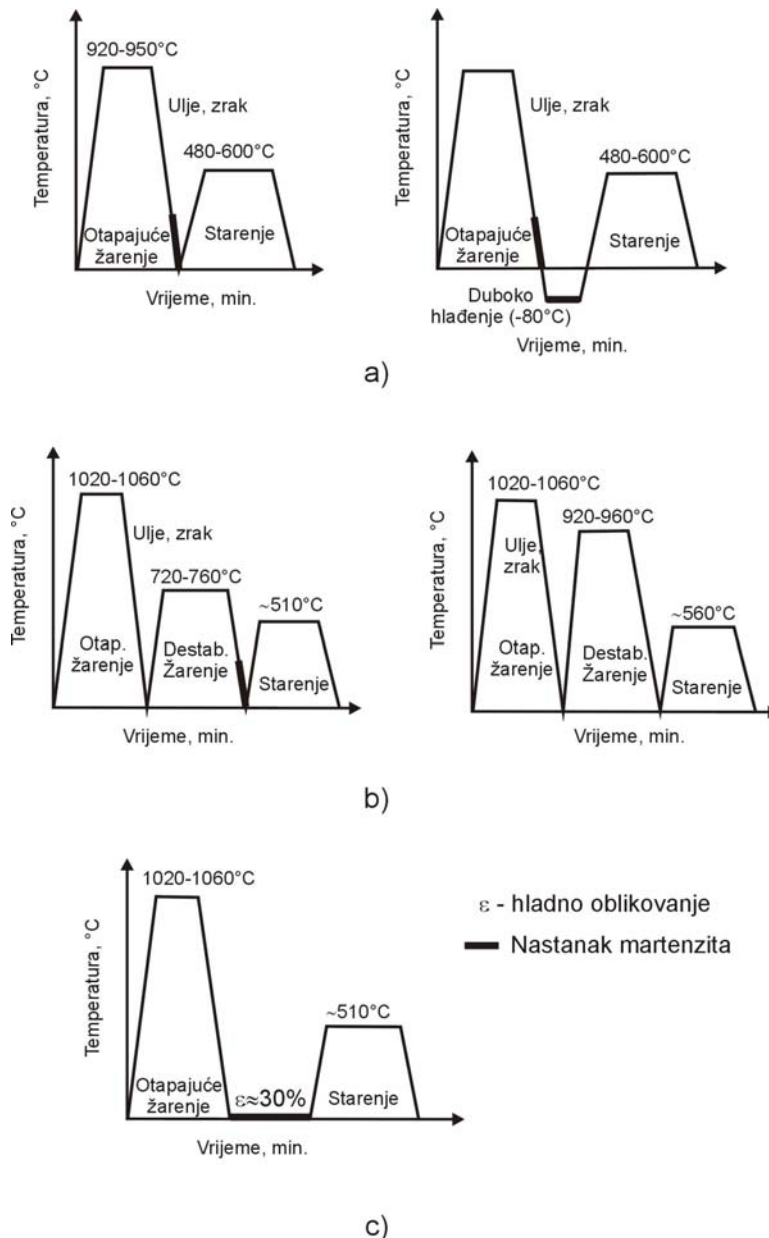
ϑ_z – temperatura žarenja, ϑ_s – temperatura starenja, t_s – vrijeme starenja

b) Poluaustenitni PH-čelici

Poluaustenitni PH-čelici imaju sličan kemijski sastav kao martenzitni (0,05-0,1% C, 13-17% Cr, 7-9% Ni) uz dodatak molibdena, titana, aluminija, vanadija i dušika. U gašenom stanju posjeduju austenitno-feritnu mikrostrukturu koju karakterizira dobra obradljivost odvajanjem čestica. Nakon gašenja austenit se destabilizira i pretvara u martenzit na tri načina:

- hlađenjem s temperature žarenja (920-960 °C ili 720-760 °C) nastaje sekundarni martenzit,
- hladnim oblikovanjem nastaje deformacijski martenzit,
- "dubokim hlađenjem".

Tako dobivena martenzitno-feritna mikrostruktura s malim udjelom zaostalog austenita podvrgava se starenju pri temperaturi 480-600 °C, slika 3.4.21. Tijekom starenja najprije u feritu, a zatim u martenzitu precipitiraju slijedeće faze: Ni_3Al , Ni_3Ti , Fe_2Mo i VN. Uobičajeni postupci toplinske obradbe poluaustenitnih PH-čelika shematski su prikazani dijagramima na slici 3.4.21.



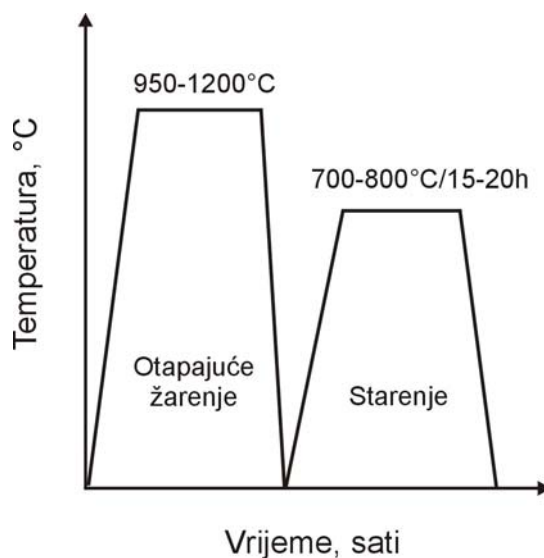
Slika 3.4.21. Shematski prikaz dijagrama postupaka toplinske obradbe poluaustenitnih korozijski postojanih PH-čelika

c) Austenitni PH-čelici

Austenitni korozijski postojani PH-čelici su niskouglični ($\leq 0,10\%$ C) i visokolegirani s kromom (14-18%) i niklom ($\geq 25\%$) uz dodatak još nekih legirajućih elemenata kao npr. molibdena (1-2,5%), titana (do 2%), aluminija ($< 0,35\%$), bakra ($< 3\%$), niobija ($< 0,45\%$), fosfora ($< 0,25\%$). Kod ove skupine čelika izostaje svaka pretvorba austenit \rightarrow martenzit jer su M_s temperature toliko niske (blizu apsolutne nule) da ih se nikad ne postigne. Budući da nema transformacije austenit \rightarrow martenzit izostaje važan doprinos martenzita očvršćivanju. Stoga ova skupina PH-čelika ima najniže vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja. S obzirom na kemijski sastav austenitni PH-čelici su uobičajeni austenitni nehrđajući čelici kojima je

utrostručen udio nikla te su mu dodani elementi za stvaranje precipitata (npr. Ti, Al, Cu, P). Visok udio nikla je nužan zbog toga što precipitiranjem nastali spojevi Ni_3Al i Ni_3Ti troše nikal, pa treba osigurati da metalna osnova ne osiromaši niklom.

Karakteristični ciklus toplinske obradbe austenitnih PH-čelika prikazan je slikom 3.4.22. Očvršćujuće faze kod ove skupine čelika su koherentna γ' -faza (Ni_3Al) koja se za vrijeme starenja vrlo brzo izlučuje i inkoherentna η -faza (Ni_3Ti) koja se izlučuje sporo, a djelomično i po granicama zrna. Sadržaj titana je ograničen na 2% jer Ni_3Ti jako očvršćuje ali dovodi do porasta krhkosti čelika. Pored γ' i η -faze može također doći do izlučivanja σ , χ te Lavesovih faza. U čelicima u kojima se nastoji uštedjeti skupi nikal dodatkom mangana mogu precipitirati i spojevi fosfora, tablica 3.4.13.



Slika 3.4.22. Shematski prikaz dijagrama toplinske obradbe austenitnih PH-čelika

Tablica 3.4.13. Primjeri austenitnih PH-čelika

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, ostalo, %	Toplinska obradba		Mehanička svojstva nakon starenja				
		ϑ_z , °C	ϑ_s , °C/ t_s , h	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A_5 , %	Z, %	KV, J
X5 NiCrTi 26 15	1,75 Mo 2 Ti 0,3 Al 0,25 V	900/v	725/16 h	1000	700	25	37	110
		ili 980/v	ili 725/16 h	900	600			
X30 CrNiMn 19 9 4	0,25 P	1120/v	730/16 h	1180	880	19,5	31,5	
X42 CrNiMn 15 7 7	1,7 V 0,8 Mo 1,2 Si 0,2 N	1180/v	800/9 h	950	620	15	15	30

ϑ_z – temperatura žarenja, ϑ_s – temperatura starenja, t_s – vrijeme starenja

3.4.5.4. Termomehanički obrađeni čelici

Kombinacijom deformiranja i toplinske obradbe (kaljenje i izotermičko poboljšavanje) može se istovremeno postići visoka granica razvlačenja i čvrstoća uz relativno dobru duktilnost. Pritom se oblikovanje deformiranjem provodi ili prije ili za vrijeme transformacije mikrostrukture. Uslijed termomehaničke obradbe (TMO) dolazi do porasta čvrstoće zbog:

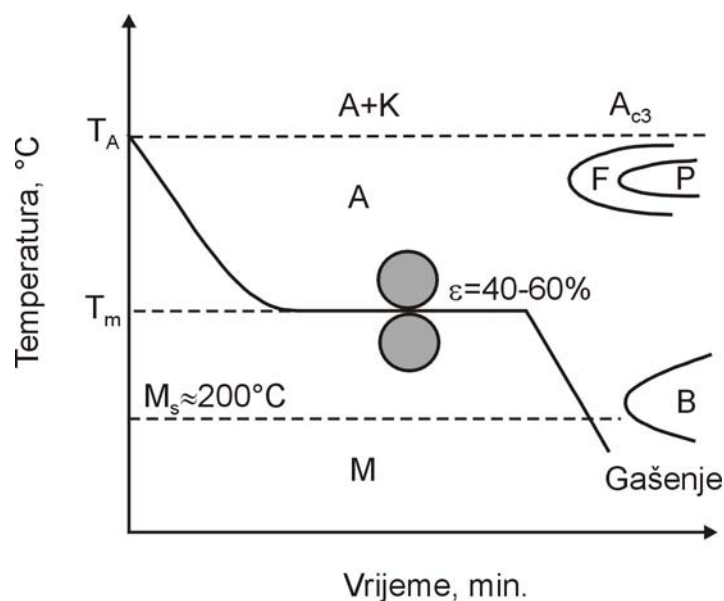
- povećanja gustoće dislokacija pri oblikovanju austenita i pri njegovoj pretvorbi u martenzit,
- promjene sastava i morfologije martenzita,
- izlučivanja karbida tijekom popuštanja.

Uglavnom se koriste slijedeći postupci termomehaničke obradbe:

- "ausforming",
- "TRIP postupak" (eng. Transformation Induced Plasticity),
- "perliforming",
- "isoforming",
- "marforming".

"Ausforming postupak"

"Ausforming postupak" karakterizira hlađenje austenitiziranog čelika do temperature 350-600 °C, a zatim se takav čelik plastično deformira valjanjem (tzv. regulirano valjanje). Nakon toga slijedi gašenje (pretvorba u martenzit), slika 3.4.23. Uzrok povišenja čvrstoće je velika gustoća dislokacija nastalih deformacijom koje ostaju i nakon pretvorbe u martenzit.

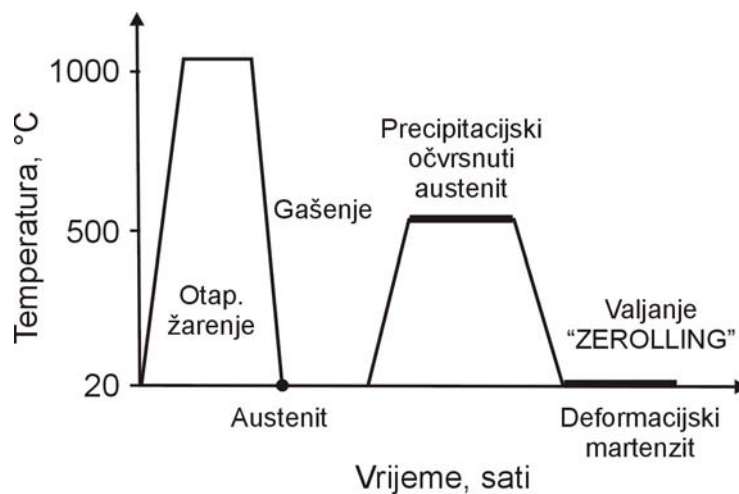


Slika 3.4.23. Shematski prikaz TTT dijagrama "ausforming" postupka

“TRIP postupak“

“TRIP postupak“ je sličan postupku “ausforming“, a primjenjuje se za austenitne čelike precizno reguliranog sastava (tzv. TRIP čelici). TRIP čelici imaju takav sastav koji onemogućava da oblikovanjem očvrsnuti austenit transformira u martenzit pri hlađenju.

Nakon homogenizacijskog žarenja i hlađenja TRIP čelici imaju austenitnu (visoko legirani TRIP: 0,3%C; 1%Si; 9 %Cr ; 8%Ni ; 0,4%Mo) ili feritno-bainitno-austenitnu (niskolegirani TRIP: 0,1-0,4%C; 0,3-2,0 %Si; 1,0-3,0 %Mn; 0,05-2,0%Al) mikrostrukturu. Nisko legirani TRIP čelici imaju mikrostrukturu koju čini oko 50% ferita, 35-40% bainita s oko 15% metastabilnog zaostalog austenita. TRIP postupak se primjenjuje na austenitne legure koje su sposobne za pretvorbu u deformacijski martenzit tijekom oblikovanja blizu sobne temperature (tzv. “zerolling“). Prilikom deformacije takvih čelika austenit pri sobnoj temperaturi prelazi u tzv. martenzit induciran deformacijom (eng. strain induced martensite) što ovim čelicima daje odličnu kombinaciju čvrstoće i žilavosti. TRIP čelici moraju imati vrlo precizno reguliran sastav kako bi temperatura nastanka deformacijskog martenzita (M_d) bila takva da omogući oblikovanje pri ~ 500 °C bez pretvorbe u deformacijski martenzit. Nasuprot tome, temperatura M_s mora biti niža od 0 °C kako pri gašenju ne bi nastao martenzit gašenja. Shematski je dijagram TRIP postupka prikazan na slici 3.4.24.



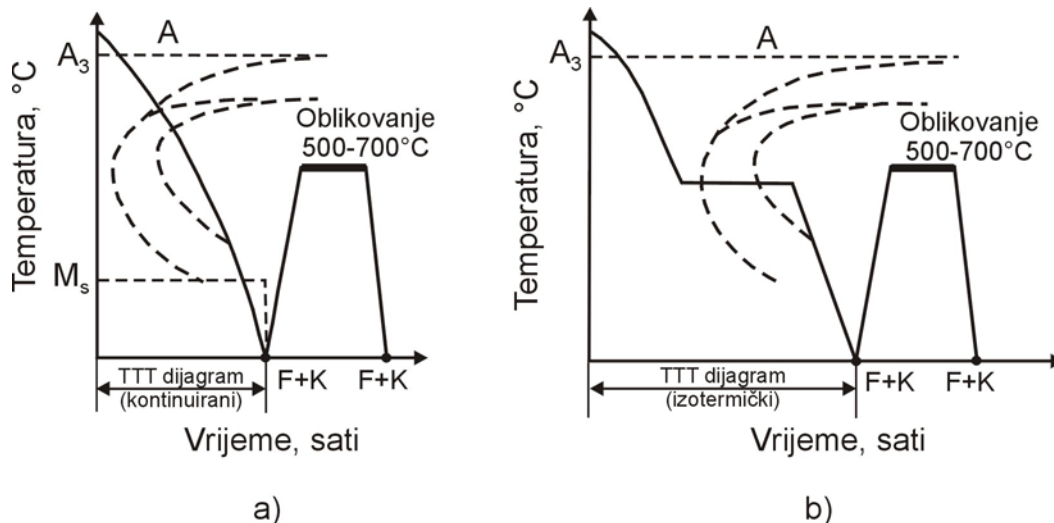
Slika 3.4.24. Shematski prikaz dijagrama “TRIP postupka“

Primjena TRIP čelika je dosta ograničena zbog visokih troškova (ekonomičnosti) postupka i ograničenih mogućnosti očvrstuća. TRIP postupak uglavnom se provodi na proizvodima u obliku limova, šipke i žice. Visokolegirani TRIP čelici su u većini slučajeva preskupi za masovnu uporabu. Niskolegirani TRIP čelici imaju vrlo veliku primjenu u automobilske industriji zbog:

- odlične plastične oblikovljivosti što omogućuje izradu dijelova složenog oblika,
- daju više slobode konstruktorima u optimiziranju dimenzija dijelova vozila,
- posjeduju odličnu dinamičku izdržljivost čime im se povisuje trajnost,
- osiguravaju iznimnu sposobnost apsorpcije energije pri sudaru.

“Perlifforming postupak”

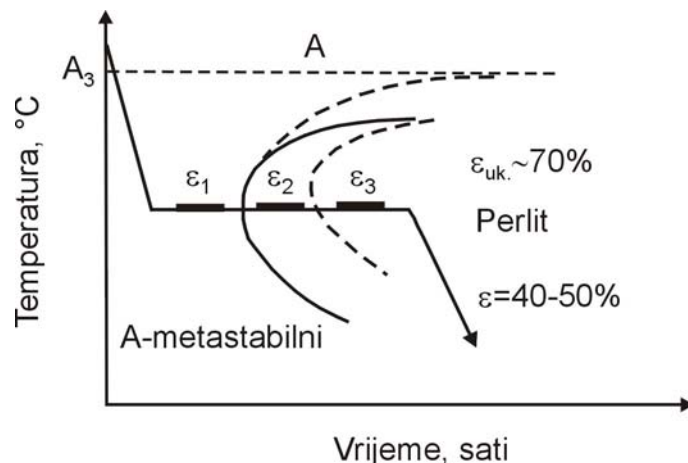
“Perlifforming“ postupci se provode u temperaturnom području perlita, a primjenjuju se za konstrukcijske nelegirane ili legirane čelike. Pritom se deformiranje perlita odvija ili nakon kontinuirane ili nakon izotermičke pretvorbe iz austenita. Očvršnuće perlita provodi se u temperaturnom području 500-700 °C i to nakon hlađenja, slika 3.4.25. Mikrostrukturu perlita oblikovanog na 500-700 °C karakterizira nastanak cementitnih lamela, koje postupno prelaze u globule, te nastanak sitnog zrna ferita promjera reda veličine ~1 μm.



Slika 3.4.25. Shematski prikaz dijagrama perlifforming postupka
a) nakon kontinuiranog gašenja nelegiranog čelika
b) nakon izotermičke pretvorbe u perlit niskolegiranog čelika
A – austenit, F – ferit, K – karbidi

“Isoforming“ postupak

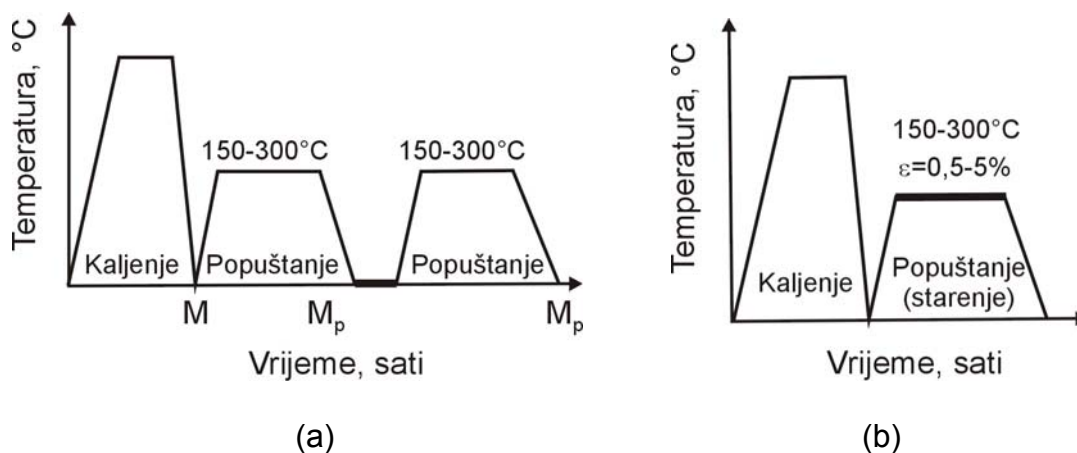
“Isoforming“ postupak se odvija pri izotermi (između 500 i 700 °C) prije i tijekom pretvorbe austenita u perlit. Shematski dijagram “isoforming“ postupka prikazan je slikom 3.4.26. Mikrostruktura čelika obrađenog “isoforming“ postupkom slična je mikrostrukturi dobivenoj “perlifforming“ postupkom. Prevladava vrlo sitnozrnata perlitna mikrostruktura nastala rekristalizacijom. Čestice cementita su djelomično globularizirane te učvršćuju poligoniziranu substrukturu ferita. Svojstva čelika dobivena “isoforming“ postupkom temelje se na očvršnuću austenita i neposredno stvorenoga novog perlita.



Slika 3.4.26. Shematski prikaz dijagrama "isoforming" postupka
A – austenit, ε - stupanj deformacije

"Marforming" postupak

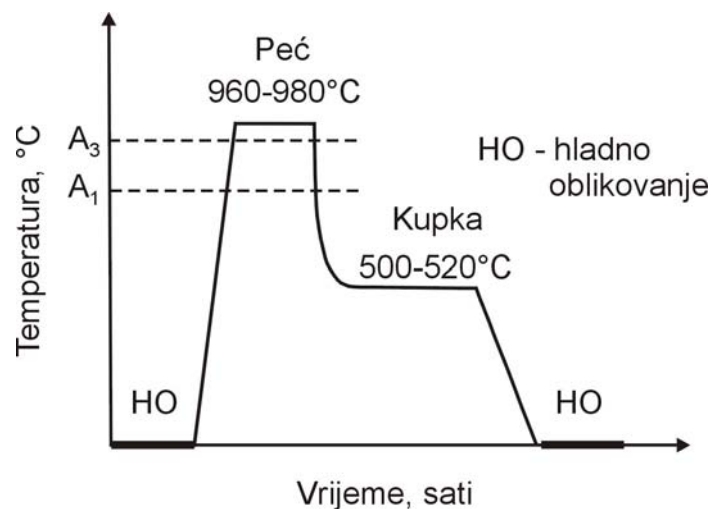
"Marforming" postupak se temelji na oblikovanju deformiranjem martenzita. Uglavnom se za "marforming" postupak koriste čelici s 0,3-0,4% ugljika tj. čelici u čijoj mikrostrukturi prevladava masivni martenzit u odnosu na igličasti. Deformacija martenzitne mikrostrukture može se provesti ili između dva popuštanja zakaljenog čelika ili tijekom popuštanja zakaljenog čelika, slika 3.4.27.



Slika 3.4.27. Shematski prikaz dijagrama "marforming" postupka
a) deformacija između dva popuštanja (deformacijsko popuštanje)
b) deformacija tijekom popuštanja (dinamičko deformacijsko starenje)

3.4.5.5. Hladno oblikovani nelegirani ili niskolegirani čelici

Ovaj postupak porasta čvrstoće čelika najčešće se primjenjuje za očvršćivanje tanke žice za transportnu užad i užad žičara, žice za opruge, tanki limovi i trake, betonski čelik i sl. Izrazito visoka čvrstoća ($R_m = 1600-3000 \text{ N/mm}^2$) dobije se postupkom patentiranja hladno vučene žice eutektoidnog čelika. Postupak patentiranja obuhvaća žarenje žice u austenitnom području te izotermičko držanje na $500-520 \text{ °C}$ u solnoj ili olovnoj kupci, slika 3.4.28. Na taj način dolazi do postizanja tankolističave feritno-karbidne mikrostrukture (sorbit) koja se vrlo dobro hladno oblikuje. Hladnim oblikovanjem uz stupanj deformacije 98-99% postižu se visoke vrijednosti čvrstoće. Čelici koji se obrađuju ovim postupkom moraju imati visoku čistoću, bez nemetalnih uključaka i plinova.

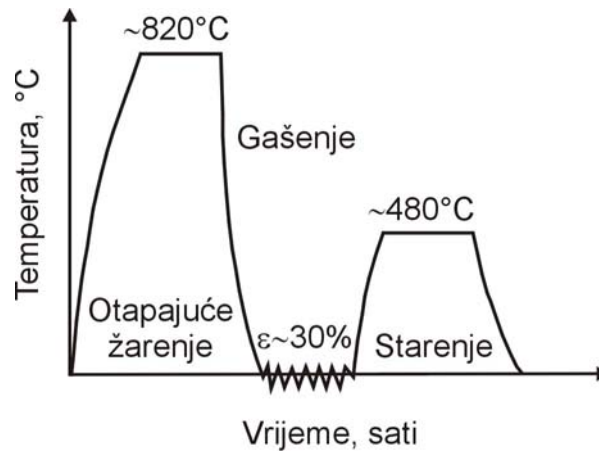


Slika 3.4.28. Shematski prikaz dijagrama postupka patentiranja žice s 0,6-0,8% C

3.4.5.6. "Maraging" čelici

"Maraging" čelici su nazvani prema postupku toplinske obradbe "martenzit aging" (martenzitno starenje). Po sastavu su niskougljični ($<0,03\% \text{ C}$). Osim klasičnih "maraging" čelika na osnovi Ni-Co-Mo u novije vrijeme započinje razvoj i korozijski postojanih Cr-Ni-Co-Mo ($>12\% \text{ Cr}$) "maraging" čelika. Uobičajeni "maraging" čelici sadrže $\sim 18\% \text{ Ni}$, $7-14\% \text{ Cr}$, $3-6\% \text{ Mo}$, $0,15-2\% \text{ Ti}$, $0,05-0,2\% \text{ Al}$. Budući da je ugljik u tim legurama ekstremno nizak martenzit nije ugljični već Ni-martenzit. Nakon žarenja čelik se intenzivno gasi u vodi ili na zraku čime se dobije prezasićeni Ni-martenzit, slika 3.4.29. Nakon toga slijedi oblikovanje na konačni oblik i dimenziju. Starenjem u Ni-martenzitu dolazi do precipitacije fino dispergiranih intermetalnih spojeva (npr. Ni_3Al , Ni_3Ti , $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$, Ni_3Mo , Fe_2Mo , FeCr , Fe_7Mo_6 itd.). Navedeni intermetalni spojevi sprječavaju gibanje dislokacija i tako povisuju granicu razvlačenja ($>2200 \text{ N/mm}^2$) i vlačnu čvrstoću ($1900-2900 \text{ N/mm}^2$). Za razliku od ugljičnog martenzita prezasićenog ugljikovim atomima Ni-martenzit nije tako tvrd niti krhak. Njegova

tvrdća nakon gašenja iznosi svega 280 – 320 HV za čelike koji sadrže 18 % Ni. Nekoliko primjera “maraging” čelika navedeno je u tablici 3.4.14. Maraging čelici se mogu koristiti kao konstrukcijski i alatni čelici.



Slika 3.4.29. Shematski prikaz dijagrama toplinske obradbe “maraging” čelika

Tablica 3.4.14. Primjeri toplinske obradbe i mehaničkih svojstava “maraging” čelika

Oznaka čelika	Sastav, ostalo, %	Toplinska obradba		Mehanička svojstva			
		Žarenje, °C/gašenje	Starenje, °C/h	R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A ₅ , %	KV, J
X2 NiCoMo 18 8 3	0,2 Ti	820-860/ zrak	470-490/ 3-5 h	1150- 1300	1050- 1200	8-15	40
X2 NiCoMo 18 9 5	0,1 Al+B 0,65 Ti+Zr	820-860/ zrak	480/3h	1960	1910	7	30
X2 NiCoMo 18 12 4	0,2 Al 1,75 Ti	820/zrak	500/6h	2350	2260	6	10

“Maraging” čelici se najčešće primjenjuju za izradu:

- zrakoplova i helikoptera (pogonska osovina, okvir pilotskog sjedala, hidraulični odbojnici i sl.),
- automobila (koljenaste osovine trkaćih automobila, kardanske zglobove glave itd.),
- kalupa, ukovnja i kokila (alatna primjena).

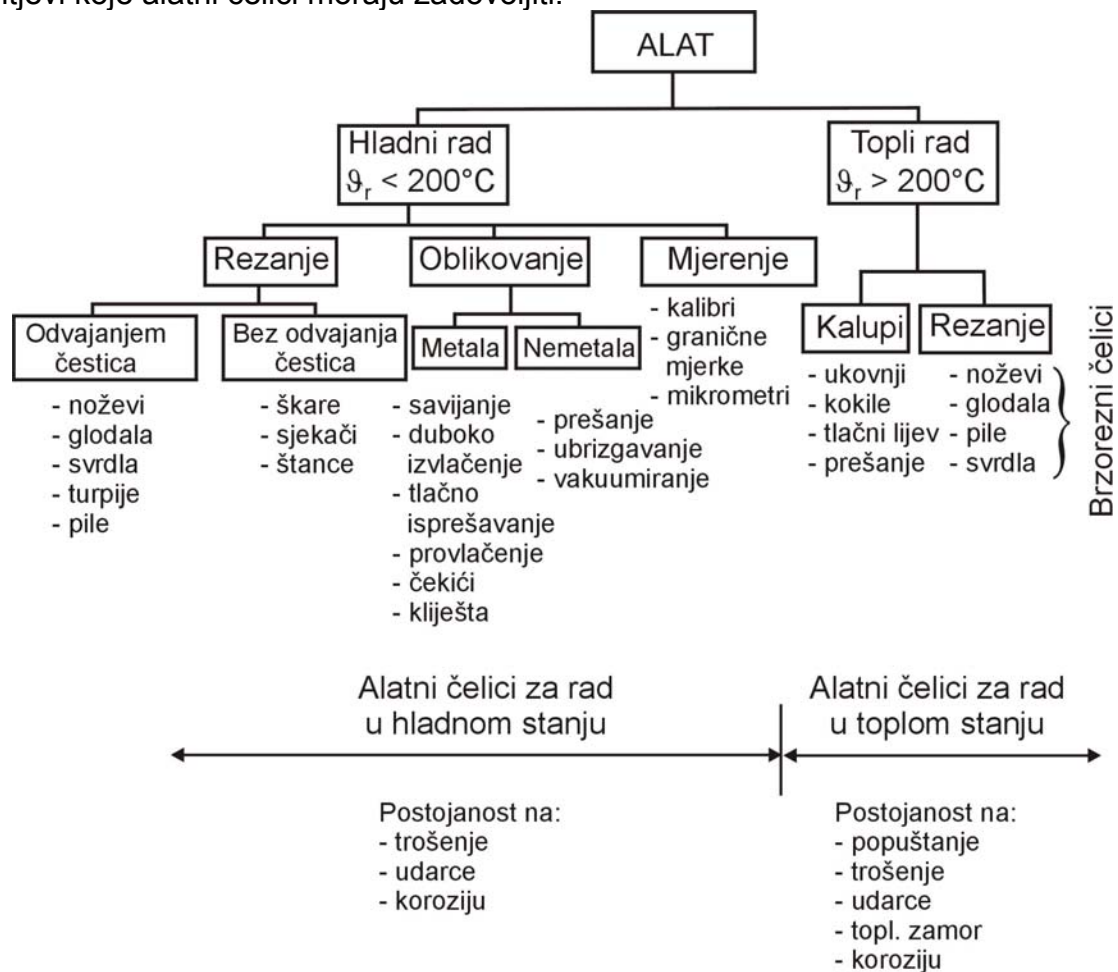
4. ALATNI ČELICI

Upotreba raznih alata potječe od samih početaka ljudske civilizacije. Prvi korišteni alati bili su kamena sjekira, kameni nož te svi ostali predmeti koje je čovjek koristio u svakodnevnom životu. Prije 5000 godina započinje upotreba alata izrađenog od meteoritskog željeza. Kasnijim kontaktom u vatri takvog željeza s sredstvom za pougličavanje nastaju prvi alati od čelika. Alat predstavlja svako sredstvo kojim čovjek olakšava ili omogućava izvršenje željene radnje bilo neposredno, snagom ruke, bilo posredno snagom nekog stroja.

Razvoj modernih industrijskih alata doživljava tehnološku revoluciju u drugoj polovici 19. stoljeća. U tom razvoju najvažnije je istaknuti slijedeće godine:

- 1868 g. MUSHET-ov čelik (2% C, 7% W, 2,5% Mo),
- 1898 g. TAYLOR-WHITE-ov brzorezni čelik (1,85% C, 3,8% Cr, 8% W),
- 1904 g. J. A. MATHEWS - brzorezni čelik s vanadijem,
- 1910 g. razvoj wolframovih čelika za topli rad,
- 1912 g. dodatak kobalta u alatne čelike,
- 1930 g. započinje razvoj brzorezanih čelika legiranih molibdenom.

Na slici 4.1 shematski je prikazana podjela alata i alatnih čelika kao i najvažniji zahtjevi koje alatni čelici moraju zadovoljiti.



Slika 4.1. Shematski prikaz podjele alatnih čelika

Osnovna svojstva koja alatni čelici moraju posjedovati su:

- otpornost na trošenje (martenzitna mikrostruktura s visokim udjelom karbida),
- udarna izdržljivost (žilavost, visoka udarna radnja loma).

Stručna literatura često navodi i otpornost na popuštanje kao osnovno svojstvo, ali prema nekim autorima to ipak pripada posebnim zahtjevima prema alatnim čelicima za rad pri povišenim temperaturama ($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Proizvodni (ekonomski) zahtjevi i svojstva prema alatnim čelicima su:

- mogućnost obrade alata odvajanjem čestica,
- visoka zakaljivost,
- visoka prokaljivost,
- zanemariva sklonost pogrubljenju zrna prilikom austenitizacije,
- neznatna promjena dimenzija tijekom rada,
- sigurnost s obzirom na pojavu pukotina i lomova tijekom toplinske obradbe,
- neznatna sklonost razugljičenju tijekom toplinske obradbe,
- otpornost na koroziju,
- mogućnost poliranja,
- ekonomičnost itd.

Alatni čelici se primjenjuju u toplinski obrađenom stanju (kaljenje i popuštanje). Dodatno se mogu provesti neki od postupaka oplemenjivanja površine. Poboljšavanje svojstava alata površinskim toplinskim obradbama uglavnom se provodi slijedećim postupcima:

- površinsko kaljenje (plameno, indukcijsko, lasersko, elektronskim snopom, impulsno),
- termokemijski postupci (cementacija, nitriranje, karbonitriranje, boriranje, oksidacija, difuzija metalnih elemenata – V, Cr, Al, Si),
- tvrdo elektrokemijsko kromiranje,
- nanošenje karbida, nitrida, karbonitrida i oksida iz parne faze (CVD i PVD postupci),
- nanošenje dijamantnih slojeva (DLC – Diamond Like Carbon).

Zbog traženih svojstava i potrebe zakaljivanja i prokaljivanja alatni čelici u pravilu imaju viši udio ugljika ($>0,6\%$) nego konstrukcijski čelici. Uglavnom se isporučuju u toplovaljanom, hladnovučenom, kovanom ili lijevanom stanju u obliku šipki, traka ili ploča.

S obzirom na kemijski sastav alatni čelici mogu biti:

- nelegirani,
- niskolegirani,
- visokolegirani.

Prema radnoj temperaturi i uvjetima primjene alatni čelici se dijele na:

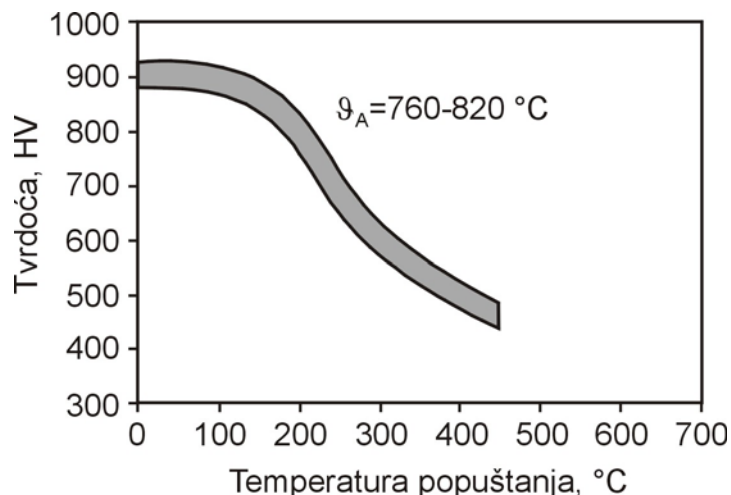
- a) alatne čelike za hladni rad ($<200\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- b) alatne čelike za topli rad ($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- c) brzorezne čelike.

3.1. Nelegirani (ugljični) alatni čelici

Do kraja 19. st. svi alati su izrađivani iz ugljičnih alatnih čelika. Trenutno nelegirani (ugljični) alatni čelici zauzimaju oko 10% udjela u ukupnoj masi proizvedenih alatnih čelika. Unatoč znatno nepovoljnijim svojstvima tako visoki udio ugljičnih alatnih čelika održao se zbog toga što su:

- najjeftinija vrsta alatnih čelika,
- najšireg asortimana dimenzija,
- jednostavni za toplinsku obradbu,
- razmjerno niske temperature austenitizacije,
- manje osjetljivi prema razugljičenju površine tijekom toplinske obradbe,
- lakše obradivi odvajanjem čestica,
- bolje zavarljivi.

Nelegirani alatni čelici pripadaju skupini plemenitih čelika, a sadrže 0,5-1,5% ugljika te manje udjele silicija i mangana. Što je viši udio ugljika u čeliku to je viša tvrdoća (viši udio sekundarnog cementita), a niža žilavost. Budući da nisu legirani ova skupina čelika ima nisku prokaljivost (~ 10 mm). Zbog niske prokaljivosti imaju bolju žilavost u odnosu na druge alatne čelike jer se kaljenjem u rubnim slojevima postiže martenzitna mikrostruktura, dok u jezgri ostaje eutektoidna mikrostruktura. Ova skupina alatnih čelika se kali s relativno niskih temperatura austenitizacije u vodi i nisko popušta (<200 °C) zbog pada tvrdoće, slika 4.1.1. Prije kaljenja obično se provodi sferoidizacijsko (meko) žarenje kojim se olakšava obrada odvajanjem čestica i priprema kasnija austenitizacija. Ugljični alatni čelici mogu se podijeliti na četiri kvalitetne skupine, tablica 4.1.1



Slika 4.1.1. Tvrdoća nelegiranog alatnog čelika 100V2 u ovisnosti o temperaturi popuštanja
 T_A – temperatura austenitizacije

Tablica 4.1.1. Podjela nelegiranih (ugličnih) alatnih čelika

Oznaka kvalitetne skupine	Si, %	Mn, %	P _{max.} , %	S _{max.} , %	Primjer
W 1	0,10-0,25	0,10-0,30	0,025	0,025	C 100 W 1
W 2	0,10-0,30	0,10-0,35	0,030	0,030	C 125 W 2
W 3	0,15-0,40	0,60-0,80	0,035	0,035	C 60 W 3
W S (za specijalne namjene)	0,25-0,40	0,50-0,70	0,025	0,025	C 85 WS: pile za gatere, kružne pile, tračne pile za drvo, ručne pile za rad u šumi C 55 WS: sjekire, nakovnji, čekići, škare, kliješta.

Ovisno o udjelu ugljika i mikrostrukturi nelegirani alatni čelici mogu biti:

- podeutektoidni (do 0,8% C): feritno-perlitni,
- eutektoidni (0,8% C): perlitni,
- nadeutektoidni (>0,8% C): perlitno-cementitni.

Glavni nedostatak ugličnih alatnih čelika je vrlo kratko inkubacijsko trajanje do pretvorbe pothlađenog austenita u eutektoidne ili bainitne konstituente. Zbog toga što taj period traje svega nekoliko sekundi nužno je intenzivno hlađenje u vodi. To može dovesti do pojave velikih naprezanja koja uzrokuju napuknuća i lomove.

Najvažnije pozitivno svojstvo ove skupine alatnih čelika predstavlja njihova žilavost, pa stoga mjesto primjene uglavnom pronalaze u izradi udarnih alata, tablica 4.1.2.

Tablica 4.1.2. Primjeri primjene nelegiranih (ugličnih) alatnih čelika

Oznaka čelika prema VDEh	Primjeri primjene
C 45 W	Čekići, sjekire, odvijači, sjekači, matični ključevi (manji), srpovi, kose.
C 70 W 2 C 105 W 1	Pneumatski čekići za rudarstvo i građevinarstvo, alat za obradu kamena i drva, probijači, noževi škara, trnovi, čekići, valjci za poliranje, manji ukovnji za hladno kovanje mekših metala.
C 125 W C 135 W	Turpije, alat za nasijecanje turpija, strugači, noževi za kožu i papir, manja glodala, alat za duboko vučenje, posebno tvrdi noževi.

4.2. Legirani alatni čelici

4.2.1. Niskolegirani alatni čelici za hladan rad

Zajednička karakteristika ove skupine čelika je niska otpornost na popuštanje, osrednja žilavost (u odnosu na ugljične alatne čelike) te visoka otpornost na trošenje. Osnovni cilj zbog kojeg se provodi legiranje ovih čelika predstavlja povišenje prokaljivosti te dobivanje kvalitetnijih i postojanijih karbida u odnosu na karbid Fe_3C . Niskolegirani alatni čelici popuštaju se nisko (≤ 250 °C) pri čemu je primarni cilj izbjegavanje pojave velikih naprezanja i pukotina.

Podskupine niskolegiranih alatnih čelika za hladan rad su:

- a) visokouglični W-V čelici,
- b) nisko- i sredneuglični W-Cr-(Si)-V čelici,
- c) niskolegirani Cr-čelici,
- d) niskolegirani Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelici.

a) Visokouglični W-V čelici

Visokouglični W-V čelici pripadaju skupini nadeutektoidnih čelika jer sadrže 1-1,45% ugljika i 1-4% volframa, tablica 4.2.1. Uglavnom sadrže tvrde neotopljene karbide tipa $M_{23}C_6$ u martenzitu pa su prije svega namijenjeni za rad u uvjetima posebno jakog abrazijskog trošenja u hladnom stanju. Karbidi koji nastaju su uglavnom $(Fe,W)_{23}C_6$ prijelaznog karaktera koji dužim žarenjem prelaze u netopljivi karbid WC.

Tablica 4.2.1. Kemijski sastav visokougličnih W-V čelika

Oznaka čelika		Sastav, %			
VDEh	HRN	C	Cr	W	V
100 WV 4	Č6842	1,0	0,15	1,15	0,15
120 WV 4	Č6840	1,2	0,2	1,0	0,1
110 WCrV 5	Č6441	1,1	1,2	1,3	0,2
142 WV 13	Č6850	1,45	0,35	3,0	0,25

Glavni razlog dodatka kroma ovoj skupini čelika prvenstveno je utjecaj na usporenje nastanka karbida tipa MC te povećanje prokaljivosti i smanjenje težnje grafitizaciji. U tablici 4.2.2 navedeno je nekoliko primjera primjene visokougličnih W-V alatnih čelika.

Tablica 4.2.2. Primjeri primjene visokougličnih W-V alatnih čelika

Oznaka čelika prema VDEh	Primjeri primjene
120 W 4	Obično dolazi u srebrnastoj izvedbi: spiralna svrdla, razvrtala manjih promjera, manja glodala, alat za navoje, dlijeta za rasijecanje turpija, zubarska svrdla. Čelik je jeftin, slabo prokaljiv, otpornost na trošenje unutar podgrupe je mala, ali bolja nego kod jednostruko legiranih Cr-čelika.
110WCrV5	Samo malo se deformira pri kaljenju, dobro je prokaljiv i s malim rizikom od loma pri kaljenju. Prikladan za alate koji se zbog oblika ne daju brusiti: noževi za drvo, papir i furnir, duhan.
142WV13	Bivši "Riffelstahl" (čelik za obradbu mlinskog kamena), čelik za alat za obradu mlinskih valjaka izrađenih od bijeloga tvrdog lijeva, matrice za provlačenje žice, strugači, graverska dlijeta.
100 WV 4	Sve vrste noževa za obradbu odvajanjem čestica drva, furnira, duhana, papira, polimera.

b) Nisko- i srednjeuglični W-Cr-(Si)-V čelici

Ova podskupina niskolegiranih alatnih čelika može se koristiti za rad u hladnom stanju ali i za kratkotrajni rad pri povišenim temperaturama (350-380 °C). Osnovno svojstvo ove podskupine čelika je otpornost na udarna opterećenja i to zahvaljujući sniženom masenom udjelu ugljika (0,45-0,80%). Volfram (~2%) i krom (~1,1%) povećavaju otpornost na trošenje i prokaljivost. Vanadij (do 0,3%) sprječava rast austenitnog zrna. Dodatak silicija pozitivno djeluje na opružna svojstva čelika te na pomicanje kritične temperature "krhkosti 300 °C" u više temperaturno područje popuštanja. Stoga se ovi čelici još u literaturi nazivaju i niskolegirani alatni čelici za topli i hladni rad.

Zahvaljujući, za alatne čelike, niskom udjelu ugljika ova podskupina alatnih čelika ima visoku žilavost te im se mikrostruktura sastoji od martenzita i zaostalog austenita. Primjeri primjene niskolegiranih alatnih čelika za udarni rad te za rad u toplom i hladnom stanju navedeni su u tablici 4.2.3.

Tablica 4.2.3. Primjeri primjene niskolegiranih alatnih čelika za udarni rad i rad u toplom i hladnom stanju

Oznaka čelika prema VDEh	Primjeri primjene
45 WCrV 7	Pneumatski alat (dlijeta), ručna dlijeta, škare za udarni hladni i topli rad, matrice za kovanje vijaka i zakovica.
60 WCrV 7	Žigovi za hladno i toplo probijanje, alat za ljuštenje i blanjanje drva, cirkularna glodala za odrezivanje cijevi.
80 WCrV 8	Visokonapregnuti žigovi za hladno utiskivanje, alati za istiskivanje mekih metala (npr. alati za izradu aluminijskih ili kositrenih tuba, cinkovih čašica itd.), valjci za hladno valjanje, prikladan i za rad pri povišenim temperaturama.

c) Niskolegirani Cr-čelici

Glavna karakteristika kemijskog sastava ove skupine alatnih čelika je da sadrže 1-1,5% ugljika i 0,5-1,5% kroma te se najčešće koriste za izradu alata i kotrljajućih ležajeva (prstena, kuglica, valjaka i sl.).

Relativno niski udio kroma u ovim čelicima omogućava stvaranje cementita sastava $(Fe,Cr)_3C$, ali ne i nastanak posebnih karbida. Niskolegirani Cr-čelici se nisko popuštaju ($150-250\text{ }^{\circ}C$) pa se ne stvaraju karbidi posebnog Cr-tipa nego se otpornost na trošenje postiže karbidima $Fe_{2,4}C$. Niskolegirani Cr-čelici su nadeutektoidni pa nakon kaljenja postižu mikrostrukturu koja se sastoji od martenzita, karbida $(Fe,Cr)_3C$ i zaostalog austenita. Otopljeni krom ne povećava krhkost ferita i martenzita ali utječe na pojavu nepoželjnog zaostalog austenita. Zaostali austenit može se izbjeći nižom temperaturom austenitizacije te gašenjem "dubokim" hlađenjem ($-196\text{ }^{\circ}C$).

U tablici 4.2.4 navedeno je nekoliko primjera primjene niskolegiranih Cr-čelika. Navedeni čelici su otporni na trošenje i visoke specifične pritiske (do 5000 MPa) što neposredno ukazuje i na područje njihove primjene.

Tablica 4.2.4. Primjeri primjene alatnih niskolegiranih Cr-čelika

Oznaka čelika prema VDEh	Primjeri primjene
115 CrV 3	Obično u srebrnastoj izvedbi: svrdla, razvrtala, alat za navoje, zubarska svrdla, pile za metal, strugači, alati za graviranje, probijači.
140 Cr 3	Rezni alati za obradu sivoga lijeva, mjedi, bakra, tvrdoga drveta, mramora, za kiparska dlijeta, britve, tvrde turpije, finorezni alat.
100 Cr 6	Manji valjci za hladno valjanje, šiljci tokarilica, alat za navoje, manja glodala, razvrtala, mjerni alati (kalibri).

d) Niskolegirani Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelici

Glavni predstavnici ove skupine niskolegiranih alatnih čelika su čelici 90 MnCrV 8 i 105 WCr 8, tablica 4.2.5. Može se primijetiti da navedeni čelici u svom sastavu sadrže znatnije udjele mangana (gamageni element). Mangan znatno povisuje prokaljivost i snižava eutektoidnu temperaturu.

Tablica 4.2.5. Kemijski sastav niskolegiranih Mn-Cr-V i Mn-Cr-W alatnih čelika

Oznaka čelika		Sastav, %				
VDEh	HRN	C	Mn	Cr	W	V
90 MnCrV 8	Č3840	0,9	2,0	0,40	-	0,10
105 WCr 6	Č6440	1,05	1,0	1,0	1,15	-

Budući da Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelici pripadaju skupini nadeutektoidnih čelika mangan snižava eutektoidnu temperaturu, temperaturu austenitizacije i M_s temperaturu te uzrokuje pojavu zaostalog austenita nakon kaljenja. Mangan ne stvara vlastite karbide nego legira cementit tako da nastaju karbidi $(Fe,Mn)_3C$. Niskolegirani Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelici skloni su razugljičenju pa ih treba austenitizirati u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumu. Popuštaju se nisko (150-250 °C), a "duboko" hlađenje se koristi samo ako se zahtjeva bezdeformacijsko ponašanje pri toplinskoj obradi. U tablici 4.2.6 navedeni su primjeri primjene Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelika.

Tablica 4.2.6. Primjeri primjene niskolegiranih Mn-Cr-V i Mn-Cr-W alatnih čelika

Oznaka čelika prema VDEh	Primjeri primjene
90 MnCrV 8	Kalupi za kovanje novca, alat za navoje, spiralna svrdla manjih dimenzija, kalibri i granične mjerke, razvrtala, vretena mikrometara, štanice (rezne ploče i noževi), noževi za papir i duhan, glodala za drvo.
100 WCr 6	Isto kao čelik 90 MnCrV 8, samo za alate većih dimenzija.

4.2.2. Visokolegirani alatni čelici za hladan rad

Glavni legirajući element ove skupine čelike je krom (>5%) uz moguće dodatno legiranje vanadijem, molibdenom i/ili volframom. Krom pritom može djelovati na:

- nastanak karbida $(Fe,Cr)_3C$, Cr_7C_3 s približno 91% kroma ili $Cr_{23}C_6$ s približno 94% kroma, tj. porast otpornosti na trošenje,
- povišenje temperature austenitizacije,
- porast otpornosti na koroziju (što je manji udio ugljika više će se kroma otopiti u austenitu).

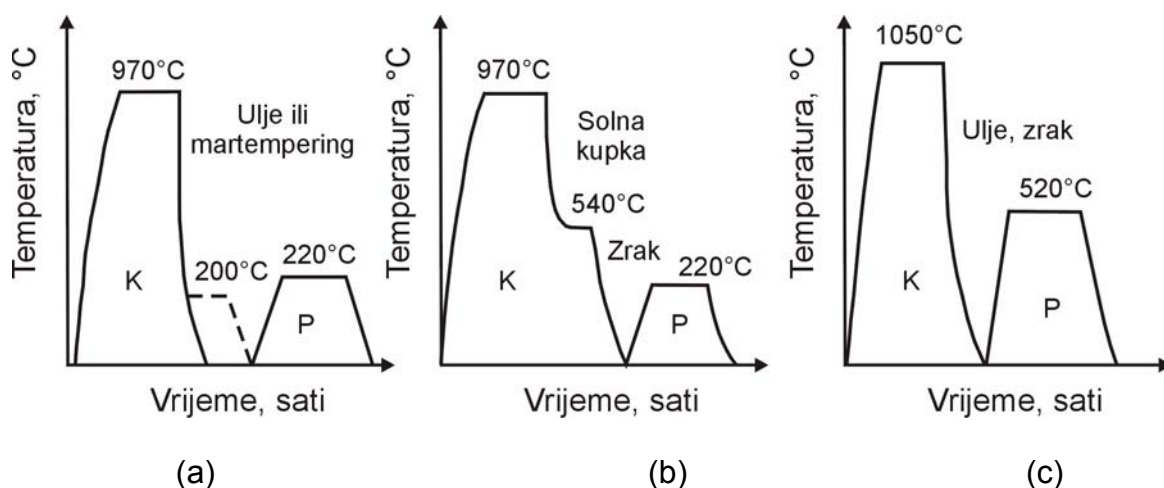
Povišenjem stupnja legiranosti i temperature austenitizacije raste udio zaostalog austenita u zakaljenoj mikrostrukturi što može smanjiti pojavu deformacija nakon kaljenja. S obzirom na kemijski sastav, mikrostrukturu i svojstva visokolegirani alatni čelici za hladni rad mogu se podijeliti u 3 podgrupe:

- a) čelici s ~5% kroma (npr. X100CrMoV5-1),
- b) visokouglični ledeburitni čelici s 12% kroma (npr. X210Cr12, X210CrW12, X65CrMoV12, X55CrVMo12-1),
- c) martenzitni nehrđajući čelici (npr. X42Cr13, X45CrMoV15, X5CrMo14, X1CrMoV18).

a) Čelici s ~5% kroma

Čelik X100 CrMoV5-1 pripada skupini nadeutektoidnih čelika čiji je kemijski sastav 1% ugljika, 5% kroma, 1% molibdena i 0,25% vanadija. Odlikuje se vrlo dobrom otpornošću na trošenje, žilavosti, visokom prokaljivosti te postojanošću dimenzija tijekom kaljenja. Glavna primjena mu je za izradu škara i alata za oblikovanje lima, mjernog alata, razvrtala, narezni svrdala, nareznica, matrica složenih oblika, alata za preradu polimera itd.

Toplinska obradba čelika X100 CrMoV5-1 obuhvaća austenitizaciju najčešće pri 920-970 °C, popuštanje pri 175-230 °C (za visoke zahtjeve na otpornost prema trošenju) ili 370-400 °C (za visoke zahtjeve prema žilavosti), slika 4.2.1.



Slika 4.2.1. Shematski prikaz dijagrama postupaka toplinske obradbe čelika X100CrMoV5-1
 a) postizanje najviše tvrdoće; b) postizanje najmanje deformacije pri gašenju
 c) postizanje dovoljno zaostalog austenita za sekundarnu tvrdoću
 K – kaljenje, P – popuštanje

b) Visokolegirani ledeburitni čelici s 12% kroma

Glavni predstavnik ove skupine alatnih čelika je čelik X210Cr12 koji pripada podeutektičkim (ledeburitnim) čelicima, a sadrži 2% ugljika, 12% kroma i 0,1% vanadija, tablica 4.2.7. Pokušaj korekcije nekih lošijih svojstava (npr. žilavosti) čelika X210Cr12 doveli su do modifikacije sastava u pogledu snižavanja sadržaja ugljika i dodatka molibdena i vanadija. Dodatak volframa čeliku X210CrW12 samo je povišio otpornost na trošenje u usporedbi s čelikom X210Cr12, ali nije povišio otpornost na popuštanje.

Tablica 4.2.7. Kemijski sastav visokolegiranih ledeburitnih čelika s 12% Cr

Oznaka čelika		Prosječni sastav, %				
VDEh	HRN	C	Cr	W	Mo	V
X210 Cr 12	Č4150	2,0	12,0	-	-	-
X210 CrW 12	Č4650	2,0	12,0	0,7	-	-
X165 CrMoV 12	Č4750	1,65	12,0	0,5	0,6	0,3
X155 CrVMo 12 1	Č4850	1,55	12,0	-	0,7	1,0

Toplinska obradba visokolegiranih ledeburitnih čelika s 12% kroma sastoji se od austenitizacije (~1000 °C), gašenja u ulju i popuštanja pri 480-560 °C. Najčešća primjena ove skupine čelika je za izradu alata za hladno oblikovanje, utiskivanje, duboko izvlačenje, tlačno istiskivanje itd. Svi ledeburitni čelici su skloni razugljičenju

pa ih je potrebno sporo zagrijavati u zaštitnoj atmosferi (npr. inertni plin, vakuum, inertna solna kupka).

c) Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici sadrže 0,2-0,9% ugljika, 13-18% kroma, 0,5-1,2% molibdena i do 0,1% V (npr. čelici X20Cr13, X42Cr13, X55CrMo14, X91CrMoV18 itd.). Da bi se kaljenjem postigla martenzitna mikrostruktura nužno je otopiti ugljik i krom u austenitu na dovoljno visokoj temperaturi austenitizacije (950-1080 °C). Kaljenjem u ulju može se izbjeći izlučivanje karbida koji bi snizili otpornost na koroziju. Pored martenzita u mikrostrukturi preostane i dio zaostalog austenita. Razlika potencijala martenzita i zaostalog austenita je vrlo mala pa se u pogledu korozijske otpornosti takva mikrostruktura smatra monofaznom. Nakon kaljenja slijedi popuštanje pri nižim temperaturama (150-250 °C) radi izbjegavanja izlučivanja karbida popuštanja koji smanjuju korozijsku postojanost.

U isporučenom sferoidiziranom stanju (1160-1180 °C) martenzitni čelici su vrlo dobro obradljivi odvajanjem čestica, pa je postupak sferoidizacije kod konačnog korisnika čelika rijetko potreban. Homogenizacija eutektičkih karbida se uglavnom primjenjuje za čelik X91CrMoV18 koji je jedini ledeburitnog karaktera u ovoj skupini alatnih čelika. Uobičajeno sferoidizacijsko žarenje provodi se oko temperature A_1 koja za čelike s 12-18% Cr iznosi 820-860 °C.

Budući da martenzitni čelici sadrže relativno mali udio karbida već se i u sferoidiziranom stanju mogu kvalitetno polirati što je važno za njihovu konačnu primjenu. Viskolegirani martenzitni nehrđajući alatni čelici za hladan rad najčešće se primjenjuju (tablica 4.2.8) za:

- medicinske instrumente (npr. skalpeli, škare, zubarska kliješta, pincete i sl.),
- pribor za jelo (npr. noževi),
- žilete, britve,
- krojačke škare,
- matrice itd.

Tablica 4.2.8. Primjeri primjene visokolegiranih alatnih čelika za hladni rad

Oznaka čelika prema VDEh	Primjeri primjene
X100CrMoV5 1	Rezne ploče, kalupi za oblikovanje lima savijanjem i utiskivanjem, ukovnji za hladno kovanje novca, valjci za izradu navoja, kalupi za polimere, mjerni alat, igle za provlačenje, škare za lim.
X210Cr12 X210CrW12 X165 CrMoV 12 X155 CrVMo 12 1	Rezne ploče i noževi za izradu abrazivnih limova (npr. trafo-limovi legirani silicijem), kalupi za utiskivanje i duboko vučenje limova, alati za provlačenje žice, valjci za izradu navoja, glodala za prorezivanje, kalibri za provrte i navoje, igle za provlačenje, šiljci alatnih strojeva, kalupi za preradu posebno abrazivnih polimera.
X20 Cr12 X30 Cr 13 X45 CrMoV 15	Korozijski postojani noževi pribora za jelo, matrice za preradu kemijski agresivnih polimera, medicinski instrumenti, žileti, pribor za crtanje (šestari).
X91 CrMoV 13	Matrice kalupa za preradu posebno abrazivski agresivnih polimera, kada su radne plohe izložene kemijskom djelovanju pri preradi

4.2.3. Alatni čelici za topli rad

Alatni čelici za rad u toplom stanju primjenjuju se za izradu alata koji su tijekom rada zagrijani na temperaturu višu od 200 °C. Najvažnije svojstvo alatnih čelika za topli rad predstavlja otpornost na popuštanje. Otpornost na popuštanje obuhvaća pojave koje se mogu javiti tijekom izloženosti povišenim temperaturama (npr. smanjenje tvrdoće, mikrostrukturne promjene, toplinski zamor). Pored otpornosti na popuštanje pred alatne čelike za topli rad postavljaju se još i dodatni zahtjevi poput otpornosti na:

- trošenje,
- visokotemperaturnu koroziju,
- pojavu plastičnih deformacija,
- udarno opterećenje (žilavost).

Postizanje povoljnih svojstava postiže se legiranjem (npr. karbidotvorcima – W, Mo, Cr, V) i niskim udjelom ugljika. Legiranje karbidotvorcima omogućuje stvaranje karbida popuštanja čime se povisuje otpornost na trošenje i otpornost na popuštanje. Nikal se dodaje radi povećanja žilavosti i prokaljivosti, a silicij radi poboljšanja dinamičke izdržljivosti.

Toplinska obradba ove skupine alatnih čelika sastoji se od austenitizacije i popuštanja (dva ili tri puta). Parametri austenitizacije (temperatura i vrijeme) odabiru se tako da dođe do otapanja karbida te da legirajući elementi poput kroma,

molibdena i volframa uđu u austenit. Također, treba paziti da ne dođe do porasta zrna i smanjenja žilavosti. Višekratno popuštanje se koristi radi omogućavanja transformacije zaostalog austenita. Alate koji su toplinski visokopterećeni treba najprije predgrijavati kako bi se smanjila toplinska naprezanja koja mogu uzrokovati pojavu pukotina uslijed toplinskog zamora.

Alatni čelici za topli rad mogu se podijeliti u tri glavne grupe:

- a) niskolegirani alatni čelici za ukovnje (npr. čelici 56NiCrMoV7, 55NiCrMoV6),
- b) visokolegirani čelici s ~5% kroma i 1-3% molibdena namijenjeni za kalupe za tlačni lijev (npr. čelici X32CrMoV3-3, X38CrMoV5-1),
- c) visokolegirani W-Cr-V čelici za kalupe za tlačni lijev (npr. čelici X30WCrV4-1, X30WCrV9-3).

Budući da nijedna od navedenih grupa alatnih čelika za topli rad ne zadovoljava svim zahtjevima (visoka tvrdoća, visoka žilavost, izostanak transformacija, otpornost na toplinski zamor) izbor čelika se optimira stupnjem legiranja, tablica 4.2.9. Uglavnom se legira kombinacijom karbidotvoraca (W, Mo, V), nikla i kobalta te izborom niskouglijčnog čelika.

Tablica 4.2.9. Usporedba svojstava alatnih čelika za topli rad

Vrsta alatnih čelika za topli rad	Svojstva		
	Duktilnost	Otpornost na popuštanje	Otpornost na trošenje u radu
Ni-Cr-Mo-V (niskolegirani)	visoka	osrednja	niska
Cr-Mo-V (visokolegirani, 5%Cr)	osrednja	povišena	povišena
W-Cr-V (visokolegirani, 4-10%W)	niska	visoka	srednja

Niskolegirani Ni-Cr-Mo čelici imaju visoku žilavost zbog djelovanja nikla i zbog nepotpune prokaljenosti. Čelici Ni-Cr-Mo uglavnom služe za izradu kalupa za kovanje (ukovanja). Po kemijskom sastavu ova grupa čelika je slična čelicima za poboljšavanje, tablica 4.2.10. Budući da u radu nisu izrazito toplinski opterećeni (npr. kratkotrajni dodir užarenog otkovka s radnom površinom kalupa) ne zahtjeva se posebno visoka otpornost na popuštanje. Najznačajniji legirajući element ove podgrupe alatnih čelika za topli rad je nikal koji utječe na transformacijske procese. Nikal pomiče perlitnu pretvorbu prema nižim temperaturama, a bainitnu pretvorbu prema višim temperaturama. Kasniji početak perlitne pretvorbe omogućuje visoku prokaljivost. Glavni razlozi dodatka molibdena su povišenje prokaljivosti, otpornosti na popuštanje i sprječavanje krhkosti popuštanja.

Tablica 4.2.10. Kemijski sastav niskolegiranih alatnih čelika za topli rad, mas. %

Oznaka čelika		C	Cr	Ni	Mo	V
VDEh	HRN					
56 NiCrMoV 7	Č5742	0,55	1	1,7	0,5	0,1
55 NiCrMoV 6	Č5741	0,55	0,7	1,7	0,3	0,1

Visokolegirani čelici s ~5% kroma i 1-3% molibdena ubrajaju se u čelike srednje duktilnosti i povišene otpornosti na popuštanje. Uglavnom mogu biti namijenjeni za izradu kokila za tlačno lijevanje legura obojenih i lakih metala, tj. alata koji su duže vrijeme izloženi povišenim temperaturama. Kemijski sastav visokolegiranih Cr-Mo-V čelika namijenjenih za kalupe za tlačno lijevanje je naveden u tablici 4.2.11.

Tablica 4.2.11. Kemijski sastav visokolegiranih Cr-Mo-V čelika za kalupe za tlačno lijevanje

Oznaka čelika		Sastav, %				
VDEh	HRN	C	Si	Cr	Mo	V
X32 CrMoV 3 3	Č7450	0,32	-	3	3	0,5
X38 CrMoV 5 1	Č4751	0,4	1	5	1,3	0,4
X40 CrMoV 5 1	Č4753	0,4	1	5	1,5	1
X50 CrMoV 5 1	C4757	0,5	1	5	1,5	1

Visokolegirani W-Cr-V čelici (tablica 4.2.12) ubrajaju se u alatne čelike najviše otpornosti na popuštanje, ali im je značajno smanjena žilavost. Ova podgrupa alatnih čelika za topli rad koristi se za izradu alata koji su izloženi najvišim temperaturama (npr. kokile za lijevanje obojenih metala), tablica 4.2.13.

Tablica 4.2.12. Kemijski sastav visokolegiranih W-Cr-V čelika za kalupe za tlačno lijevanje

Oznaka čelika		Sastav, %				
VDEh	HRN	C	Si	Cr	W	V
X30 WCrV 4 1	Č6450	0,3	1	1	4	0,4
X30 WCrV 9 3	Č6451	0,3	-	2,5	9	0,4

Tablica 4.2.13. Primjeri primjene alatnih čelika za rad u toplom stanju

Oznaka čelika prema VDEh	Primjeri primjene
55 NiCrMoV 6	Ukovnji svih vrsta (čvrstoća 850-1350 N/mm ²), čeljusti, umetci, žigovi za proizvodnju vijaka, zakovica i zatika.
56 NiCrMoV 7	Najkvalitetniji kovački alati i ukovnji svih vrsta, oblika i veličina za kovanje i prešanje čelika, prikladan za ukovnje svih dubina gravura. Primjenjuje se poboljšani, čvrstoće 1350 do 1700 N/mm ² .
X38 CrMoV 5 1 X40 CrMoV 5 1 X50 CrV Mo 5 1 X32 CrMoV 3 3	Kalupi za tlačno lijevanje legura lakih metala, matrice i trnovi za toplo prešanje čelika, obojenih i lakih metala, probijači i noževi za topli rad, kalupi za istiskivanje bakrenih legura, kalupi za preradu polimera (i za niže temperature prerade).
X30 WCrV 4 1 X30 WCrV 9 3	Kalupi za toplo prešanje teških i lakih metala, kalupi za centrifugalno lijevanje bakrenih legura, najjače toplinski opterećeni kalupi za tlačno lijevanje legura obojenih i lakih metala.

4.2.4. Brzorezni čelici

Brzorezni čelici su alatni čelici predviđeni za rad u uvjetima povišene i visoke temperature oštrice tj. za rezanje velikim brzinama. Najčešće su brzorezni čelici u radu izloženi lokalnom zagrijavanju do ≈ 600 °C (ponekad i 1000 °C), trošenju te udarnom djelovanju obratka na alat. Kemijski sastav ove skupine čelika karakterizira povišeni udio ugljika (0,7-1,3%) i legiranje jakim karbidotvorcima poput kroma, volframa, vanadija i molibdena. Povišeni udio ugljika utječe na stvaranje karbida koji su postojani i pri povišenim temperaturama. Poput svih alatnih čelika brzorezne čelike karakterizira višefazna mikrostruktura sastavljena od metalne osnove i karbida. Kompleksna legiranost brzoreznih čelika uzrokom je pojave različitih vrsta karbida.

Najčešće se javljaju karbidi tipa M_6C (npr. Fe_3W_3C , Fe_4W_2C), $M_{23}C_6$ (npr. $Cr_{23}C_6$), MC (npr. VC , V_4C_3), M_2C (npr. W_2C , Mo_2C) itd. Od navedenih karbida najlakše je topiv karbid $Cr_{23}C_6$ koji nestaje već pri zagrijavanju do 1050 °C. Najteže se otapaju karbidi tipa MC koji, iako ih ima najmanje, počinju s otapanjem tek oko 1200 °C te se nikada ne otope u potpunosti. Navedeni sastav i postignuta mikrostruktura brzoreznih čelika dovodi do postizanja izvrsne otpornosti na trošenje i popuštanje pri radnim temperaturama 500-600 °C. Međutim, to sve uzrokuje izrazito nisku žilavost. Budući da brzorezni čelici podrazumijevaju izrazito visok stupanj legiranosti predstavljaju najskuplju skupinu alatnih čelika. Visok udio legirajućih elemenata osigurava brzoreznim čelicima ledeburitnu mikrostrukturu koju karakterizira povećana krhkost.

Prema kemijskom sastavu brzorezni čelici se mogu podijeliti u sljedeće skupine:

- čelici s 18% volframa (npr. S 18-0-1, S 18-1-2-10),
- čelici s 12% volframa (npr. S 12-1-4, S 12-1-2-5),
- čelici s 10% volframa (npr. S 10-4-3-10),
- W-Mo čelici (npr. S 6-5-2, S 6-5-2-5),
- Mo-čelici (npr. S 2-9-1), tablica 4.2.14.

Tablica 4.2.14. Kemijski sastav brzoreznih čelika

Brzorezni čelik	Oznaka		Sastav, %					
	VDEh	HRN	C	Cr	W	Mo	V	Co
Čelici s 18 %W	S 18-0-1	Č6880	0,75	4	18	-	1,1	-
	S 18-1-2-5	Č6980	0,8	4	18	0,7	1,5	5
	S 18-1-2-10	Č9682	0,75	4	18	0,7	1,5	10
Čelici s 12 %W	S 12-1-2	Č6882	0,9	4	12	0,8	2,5	-
	S 12-1-4	Č6881	1,25	4	12	0,8	3,7	-
	S 12-1-2-5	Č6981	0,8	4	12	1,2	2	5
	S 12-1-4-5	Č9681	1,35	4	12	0,9	3,7	5
Čelik s 10 %W	S 10-4-3-10	Č9683	1,25	4	10	3,7	3,2	10
W-Mo-čelici	S 6-5-2	Č7680	0,9	4	6,5	5	1,9	-
	S 6-5-2-5	Č9780	0,9	4	6,5	5	1,9	5
Mo-čelik	S 2-9-1	Č7880	0,8	4	1,7	8,5	1,2	-

Navedena podjela brzoreznih čelika ne pokazuje jednoznačno i najvažnije razlike u svojstvima, tj. primjenjivost pojedine skupine. Stoga je bolja podjela brzoreznih čelika prema svojstvima i primjenjivosti, tablica 4.2.15. Primjeri primjene brzoreznih čelika navedeni su u tablici 4.2.16.

Tablica 4.2.15. Podjela brzoreznih čelika prema svojstvima i primjenjivosti

Čelici posebno otporni			Čelici najmanje osjetljivi pri toplinskoj obradbi	Čelici najlakše obradljivi odvajanjem čestica
na popuštanje (gruba obrada)	na trošenje (fina obrada)	na udarce (žilavi)		
S10-4-3-10	S10-4-3-10	S6-5-2	S18-0-1	S12-1-2
S18-1-2-10	S12-1-4-5	S6-5-2-5	S18-1-2-5	S2-9-1
S12-1-4-5	S12-1-4	S2-9-1	S18-1-2-10	S18-0-1
S18-1-2-5		S18-0-1	S12-1-4	S6-5-1
S6-5-2-5				

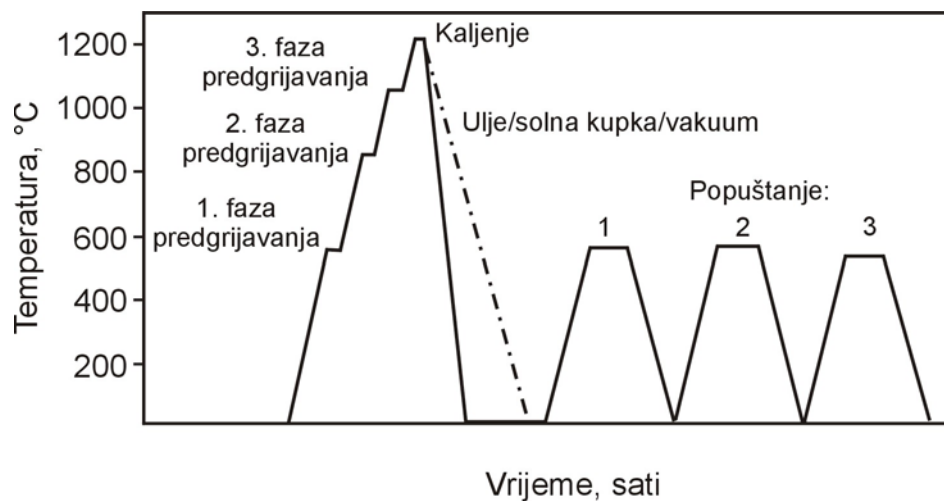
Tablica 4.2.16. Primjeri primjene brzoreznih čelika

Oznaka čelika		Primjeri primjene
VDEh	HRN	
S18-0-1 (0,75% C)	Č6880	Zbog svoje opće neosjetljivosti pri toplinskoj obradbi često se primjenjuje za: spiralna svrdla, narezna svrdla, glodala, igle za provlačenje, alate s finom oštricom, tokarske i blanjačke noževe, razvrtala.
S18-1-2-5 (0,80% C)	Č6980	Tokarski i blanjački noževi za grubu obradu, alati za obradu austenitnih čelika i vatrootpornih čelika.
S18-1-2-10 (0,75% C)	Č9682	Sve vrste alata za grubu obradu odvajanjem čestica, alati koje je teško intenzivno hladiti ili podmazivati, rezni alati za austenitne i vatrootporne čelike, tvrdi ili žilavi lijev, čelični lijev i neželjezne metale.
S12-1-2-5 (0,80% C)	Č6981	Alat za grubu obradu, za ljevove i vatrootporne čelike.
S12-1-4 (1,25% C)	Č6881	Alati za finu obradu, glodala, profilirani rezni alati, razvrtala, alati za rad na automatima, odrezni noževi.
S12-1-2 (0,95% C)	Č6882	Rezni alati za obradu materijala srednje čvrstoće, tokarski noževi, glodala, profilna glodala, razvrtala, kružne i tračne pile za metal i drvo, spiralna svrdla.
S12-1-4-5 (1,35% C)	Č9681	Tokarski noževi za finu obradu i za obradu na automatima, alat za narezivanje, alat za rad uz nedovoljno hlađenje.
S10-4-3-10 (1,30% C)	Č9683	Tokarski noževi i glodala za fini i za grubi rad, alat za drvo, profilirani alat, alat za rad na automatima.
S6-5-2 (0,90% C)	Č7680	Spiralna svrdla, glodala, razvrtala, alat za navoje, igle za provlačenje, segmenti kružnih pila, udarno opterećen alat, tračne pile za metal, kalupi za hladno oblikovanje lima, štanice za toplo opsijecanje (otkovaka).
S6-5-2-5 (0,80% C)	Č9780	Rezni alati za najteže uvjete grube obrade, udarno opterećeni alati, alati za obradu drva, spiralna svrdla za teški rad.
S2-9-1 (0,80% C)	Č7880	Narezna i spiralna svrdla, glodala, razvrtala, igle za provlačenje (vrlo osjetljiv na toplinsku obradbu).

Brzorezni čelici se uobičajeno isporučuju u meko žarenom stanju (tvrdoća 240-300 HB). Budući da pripadaju grupi ledeburitnih (podeutektičkih) čelika temperatura austenitizacije ove skupine čelika je izrazito visoka (1200-1300 °C), tj. svega 20 °C ispod solidus temperature. Pri tim temperaturama austenit otapa dovoljno ugljika (0,5-0,6%) što je glavni preduvjet za postizanje visoke tvrdoće martenzita nakon kaljenja. Radi postizanja dovoljnog sadržaja ugljika u austenitu na temperaturi austenitizacije treba se raspasti i oko 2/3 volumena svih karbida (nalaze se u obliku karbidne mreže) te njihove sastavne dijelove otopiti u austenitu. Otapanje karbida je difuzijski proces ovisan o temperaturi i vremenu zadržavanja (austenitizacije). Kod nedovoljnog vremena austenitizacije ne postiže se dovoljna koncentracija ugljika u austenitu. Nasuprot tome, predugo držanje na visokim temperaturama uzrokovat će porast austenitnog zrna. Stoga je nužno za svaki

brzorezni čelik utvrditi optimalne parametre austenitizacije. Radi visokog sadržaja legirajućih elemenata brzorezni čelici imaju slabu toplinsku vodljivost te su vrlo osjetljivi na način zagrijavanja. Toplinska obradba brzoreznih čelika je izrazito kompleksna tako da se često provodi predgrijavanje u tri stupnja (550, 850 i 1050 °C) radi osjetljivosti čelika na nagle promjene temperature, slika 4.2.2.

Visoki udio legirajućih elemenata u brzoreznim čelicima utječe na njihovu visoku prokaljivost pa se za gašenje smiju koristiti blaža sredstva poput ulja, termalne kupke (tzv. "martempering" postupak) ili struje plinova (npr. u vakuumskoj peći). Gašenjem do sobne temperature ne postiže se temperatura završetka martenzitne pretvorbe (M_f) pa se mikrostruktura zakaljenog brzoreznog čelika sastoji od martenzita, zaostalog austenita i neotopljenih karbida (K'' - sekundarni karbidi, K^e – eutektički karbidi). Nakon popuštanja (540-590 °C) iz zaostalog austenita se izdvaja ugljik te nastaju karbidi popuštanja (K^p). Nastankom karbida popuštanja smanjuje se koncentracija ugljika u zaostalom austenitu pa dolazi do porasta temperatura M_s i M_f . Naknadnim hlađenjem do sobne temperature iz zaostalog austenita izdvaja se sekundarni martenzit. Sekundarni martenzit dovodi do pojave sekundarnog otvrdnuća (sekundarna tvrdoća) tako da nakon popuštanja tvrdoća može narasti na ~66 HRC. Uglavnom se provodi višekратно popuštanje (2-3 puta) zbog pojačavanja učinka sekundarnog otvrdnjavanja, slika 4.2.2.



Slika 4.2.2. Shematski prikaz dijagrama toplinske obradbe brzoreznih čelika

4.2.5. Sinterirani alatni čelici

Istraživanje i razvoj različitih procesa te laboratorijskih metoda sinteriranja započeli su početkom 20. stoljeća znanstvenici poput Moissona, Troosta, Wedekinda i dr. Spomenuti istraživači predstavljaju začetnike nove industrijske discipline – metalurgije praha (eng. Powder Metallurgy – PM).

Današnji suvremeni materijali dobivaju se optimiranjem sastava i mikrostrukture materijala prema željenim svojstvima. Metalurgija praha pruža velike mogućnosti za ostvarenje takvog pristupa proizvodnji materijala i različitih dijelova strojeva. Metalurgija praha obuhvaća ne samo proizvodnju metala u obliku praha nego i nemetalnih prahova, te oblikovanje dijelova iz takvih prahova postupkom sinteriranja, odnosno srašćivanja.

Fucks i Kopietz uspjeli su legiranjem volframovog karbida WC s elementima željezne grupe (npr. Fe, Ni, Co, Mn), kromom i titanom dobiti vrlo žilave, ali mekše materijale te prvi puta uvode postupak sinteriranja pod tlakom tzv. legure TIZIT. Kasnije, 1922. god., dolazi do poboljšanja legure TIZIT smanjenjem udjela metala željezne grupe, a povišenjem udjela titanovih karbida. Tako dobivena legura prethodnik je kasnije razvijenim i poznatijim legurama FERRO-TITANIT.

Nakon 1945. god. uglavnom je prevladavalo istraživanje metoda sinteriranja metalnih karbida, ali započinje i rad na ispitivanju mogućnosti sinteriranja keramičkih i željeznih materijala. U razvoju procesa sinteriranja posljednji su usavršavani alati od sinteriranog čelika. Prvi prihvatljivi postupci sinteriranja čelika opisani su tek 1953. god. (W. Hotop i E. Ritzau).

R. Kieffer je definirao sinteriranje kao postupak koji predstavlja prevođenje praha metala, metaloida, metalnih ili nemetalnih spojeva u čvrstu kompaktnu materiju pod utjecajem topline, a da pri tom bar jedna komponenta ostane nerastaljena. Općenito, sinteriranje predstavlja proces srašćivanja čestica istog ili različitog materijala koji se intenzivnije odvija pri višim temperaturama te ukoliko su čestice koje srašćuju manjih dimenzija.

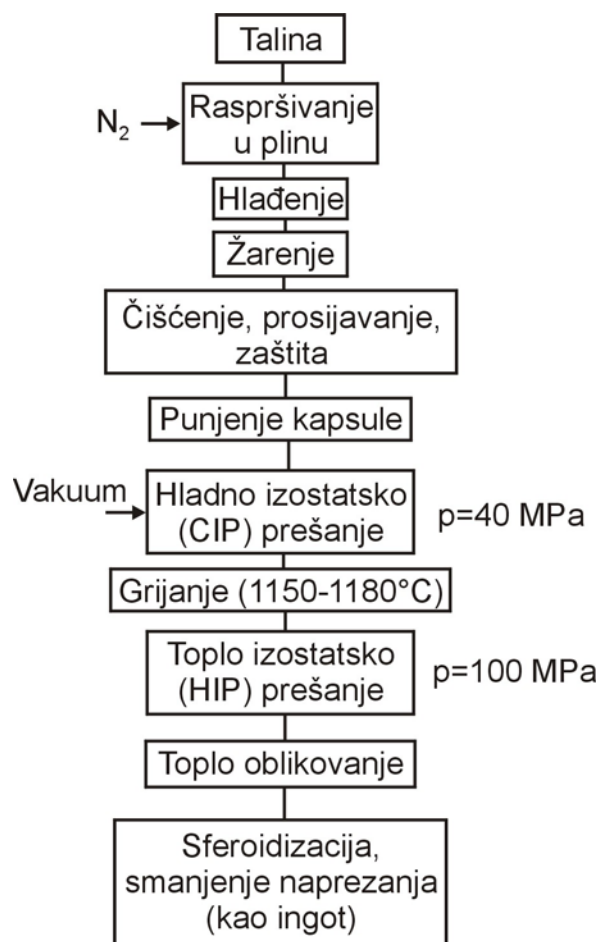
Intenzivniji razvoj metalurgije praha počeo je proizvodnjom i uporabom "tvrdih metala", a posljednjih godina prolazi kroz razdoblje značajnijeg napretka. Danas se postupcima metalurgije praha mogu postići jednaka ili bolja svojstva od tradicionalnih postupaka oblikovanja metala. Postupci oblikovanja praha danas se također primjenjuju u proizvodnji keramike i metalnih kompozita.

Postupci sinteriranja čelika razvijeni su nakon usavršavanja postupaka sinteriranja tvrdih metala (npr. karbidi + Co, karbidi + Ni) i keramičkih materijala. Glavni razlog kasnijeg razvoja sinteriranja čelika predstavljao je problem proizvodnje osnovne sirovine tj. željeznog ili čeličnog praha.

Mehaničko usitnjavanje (mljevenje) nije omogućavalo postizanje jednolike veličine čestica praha potrebnog za sinteriranje čelika. Razvojem postupka raspršivanja taline željeza ili legure čelika u struji vode ili inertnog plina riješen je problem dobivanja sirovine za proizvodnju sinteriranog čelika. Nakon raspršivanja

taline nastali oksidni sloj (kožica) oko zrna mora se reducirati žarenjem bez pristupa zraka. Nove vrste praha dobivene redukcijom valjačke ogorine, elektrolizom otopine metalnih soli i karbonilnim postupkom (raspad kapljevitog željeznog karbonila) dovele su do razvoja modernih postupaka sinteriranja čelika.

Najpoznatiji postupci raspršivanja taline su ASEA-Stora (Švedska) i CRUCIBLE (SAD). Oba postupka se temelje na principu finog raspršenja taline u inertnom plinu te brzog hlađenja nastalih čestica. Brzo hlađenje mora se provesti radi izbjegavanja nastanka segregacija i izotropne strukture svake raspršene čestice praha. Nastale čestice praha se zatim pune u odgovarajući limeni sanduk (kalup). Vibriranjem sanduka postiže se bolja nasipna gustoća nasutog praha. Nakon punjenja sanduk se zatvori poklopcem koji se obodno zavari. Slijedi hladno izostatsko prešanje (CIP) tlakom 40 MPa radi porasta gustoće nasutog praha. Nakon zagrijavanja na 1150 °C sanduk se toplo izostatski tlači (HIP) tlakom 100 MPa što dovodi do nastanka gotovo apsolutno kompaktnog čeličnog bloka, slika 4.2.3. Primjenom CIP (Cold Isostatic Prešanje) i HIP (Hot Isostatic Prešanje) postupaka znatno je smanjen problem poroznosti proizvoda. Navedeni postupci zasnivaju se djelovanju hidrostatičnog tlaka na prah za sinteriranje čime se postiže 99-100% popunjenost gotovog proizvoda. Dobiveni čelični blok se zatim toplo oblikuje i žari postupcima uobičajenim za lijevane čelične ingote. U tablici 4.2.17 navedeno je nekoliko grupa sinteriranih čelika izrađenih postupkom prikazanim slikom 4.2.3.



Slika 4.2.3. Shematski prikaz proizvodnje sinteriranog brzoreznog čelika postupkom ASP

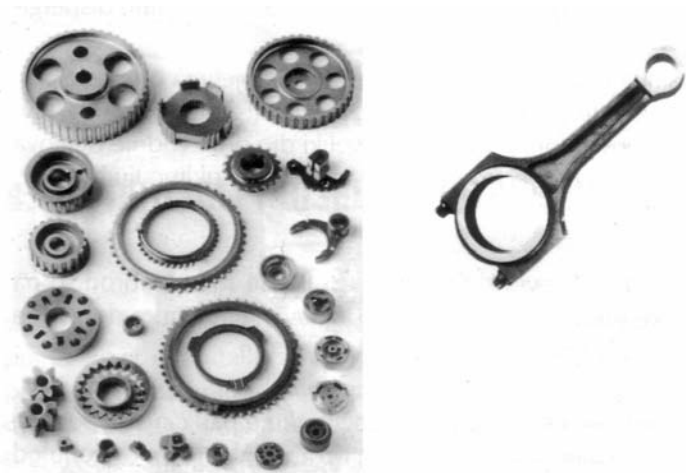
Sinterirani čelici postižu potpunu izotropiju strukture, svojstva i vlastitih naprežanja prvenstveno zbog primjene praha vrlo malih dimenzija te vrlo brzog hlađenja čime se isključuje mogućnost pojave dendritne strukture praha. Srašćene čestice također pokazuju bezdendritnu strukturu. Sinterirani čelici su prikladni za termokemijsku obradbu i za obradbu prevlačenjem (PVD, CVD) jer je izotropna struktura znatno povoljnija za difuziju od anizotropne. Glavna negativna karakteristika svih metala nastalih postupkom sinteriranja je njihova visoka krhkost.

Tablica 4.2.17. Primjeri kemijskog sastava i toplinske obradbe sinteriranih čelika izrađenih postupkom ASP

Trgovački naziv sinteriranog čelika	Sastav, %						Žarenje, °C		Kaljenje*, °C	Popuštanje, °C
	C	Cr	W	Mo	V	Co	Meko	Reduk. napr.		
ISOMATRIX PM (Austrija)										
- K 190	2,3	12,5	-	1,1	4,0	-	800-850	650-700	1100	530(2x3h)
- M 390	1,9	20,0	0,6	1,0	4,0	-	1020-1040	650-700	1070-1150	150-400
- S 690	1,3	4,3	5,9	4,9	4,1	-	770-840	600-650	1130-1200	540-560
- S 390	1,6	4,75	0,8	2,0	5,0	8,0	770-840	600-650	1150-1250	520-560
SPEEDSTEEL ASP (Švedska)										
ASP 23	1,3	4,2	6,4	5,0	3,1	-	870-900	600-700	1050-1180	3x 560-580
ASP 30	1,3	4,2	6,4	5,0	3,1	8,5	870-900	600-700	1100-1190	560-580
ASP 60	2,3	4,0	6,5	7,0	6,5	10	870-900	600-700	1100-1190	560-580
CPM (Njemačka)										
CPM Rex M4	1,3	4,25	5,7	4,5	4,0	-	840-880	650-700	1080-1200	3x 540-560
CPM 10 V	2,4	5,25	-	1,3	9,7	-	780-850	650-700	1070-1180	540-560
CPM 9 V	1,7	5,25	-	1,3	9,0	-	770-840	600-700	1070-1150	540-560
CPM T440 VM	1,9	17,5	-	1,2	6,0	-	1000-1040	600-700	1080-1120	200-450
CPM Superacor	3,7	25,0	-	3,0	9,0	-	900-960	600-700	1080-1180	540-560

* Gašenje nakon kaljenja može biti u ulju, toploj kupci ili na zraku ovisno o vrsti čelika

Glavni razlog više otpornosti na trošenje sinteriranih čelika u odnosu na kovane čelike predstavlja pojava dvostrukih molibdenovih i/ili volframovih te vanadijevih karbida u mikrostrukturi sinteriranih čelika. Karbidi nastali kod sinteriranih čelika su znatno kvalitetniji od karbida M_7C_3 , tablica 4.2.18. Slikom 4.2.4. prikazano je nekoliko čeličnih automobilskih dijelova dobivenih praškastom metalurgijom, a u tablici 4.2.19. alatna primjena sinteriranih čelika.



Slika 4.2.4. Primjeri čeličnih automobilskih dijelova izrađenih postupkom praškaste metalurgije

Tablica 4.2.18. Usporedba karbida nastalih u visokougličnim čelicima s 12% kroma i čelika CPM (Crucible Powder Metall)

	Tip karbida	HV _{karbida}	HV _{osnove}	max. HRC _{osnove}	Udio karbida, %
12%-tni Cr čelici	M ₇ C ₃	≈ 1300	≈ 700	62	≈ 15
CPM čelici	M ₆ C MC	1500-1800 2700-2900	800-900	65	≈ 30

Sinterirani čelici su prikladni za postupke termokemijske obrade poput plinskog i ionskog nitriranja te obradu prevlačenjem, tablica 4.2.20. Postupci nitriranja i postupci prevlačenja (PVD, CVD) provode se nakon završetka osnovne obrade i brušenja. Cilj termokemijske obrade i prevlačenja je povišenje otpornosti na trošenje (npr. sniženjem koeficijenta trenja, postizanjem inkompatibilnosti rešetaka površinskih slojeva oštrice alata i obratka).

Tablica 4.2.19. Primjena sinteriranih čelika

Naziv čelika	Primjeri primjene
ISOMATRIX PM K 190	Kalupi za preradu duroplasta, cilindri ekstrudera za polimere, mlaznice, zasuni povratne struje, štanice (posebno za vrlo tanki lim), kalupi za tlačno isprešavanje metala, alati za duboko vučenje, alati za valjanje navoja, Pilger-trnovi za hladni rad, matrice za hladno kovanje, alati za obradu drveta, kalupi za prešanje keramike i praška za sinteriranje.
ISOMATRIX PM M 390	Kalupi za preradu abrazivnih i korozivnih polimera, zasuni povratne struje na ubrizgavalicama za polimere, kalupi za prešanje čipova, pužni vijci ubrizgavalica, cilindri ubrizgavalica.
ISOMATRIX PM S 690	Alati za obradu odvajanjem strugotine Ni- i Ti-legura, valjci, razvrtala, strojna narezna svrdla, bimetalni listovi pila za metal, štanice, alati za hladno oblikovanje lima.
ISOMATRIX PM S 390	Alati za izradu unutrašnjih utora (npr. zupčaničkih), strojna svrdla, spiralna svrdla, štanice, matrice za oblikovanje lima.
ASP 23	Štanice za tvrde čelike i korozijski postojane čelike, matrice za hladnu ekstruziju aluminijske i čelika, štanice za obrubljivanje, ukovnji za hladno kovanje, "univerzalni" brzorezni čelik, narezna svrdla, za obradu malim brzinama rezanja.
ASP 30	Tokarski noževi, glodala, alat za narezivanje, razvrtala, štanice, prešanje prašaka.
ASP 60	Tokarski noževi, glodala, razvrtala, štanice, kalupi za prešanje praška.
CPM Rex M 4	Brzorezni čelik za opću primjenu, štanice, kalupi za preradu korozijski neaktivnih polimera.
CPM 10 V	Cilindri ubrizgavalica polimera, posebno za žigove i matrice kalupa za preradu abrazivski aktivnih polimera.
CPM 9 V	Zasuni povratne struje na ubrizgavalicama za polimere, žigovi i matrice za preradu duromera.
CPM T 440 VM	Žigovi i matrice za preradu korozivski aktivnih i abrazivnih polimera.
CPM Supracor	Zasuni struje na ubrizgavalicama za polimere, žigovi i matrice za preradu korozivski i abrazivski aktivnih polimera (do radnih temperatura 450 °C).

Tablica 4.2.20. Primjeri površinske toplinske obradbe kaljenog i popuštenog sinteriranog čelika ISOMATRIX PM K 190

	Plinsko nitiranje	Nitriranje TENIFER	Ionsko nitiranje	Prevlačenje TiN (PVD)
Kaljenje	1100 °C / topla kupka 500 °C ili / struja N ₂			
Popuštanje	540 °C / 2h (2x)	540 °C / 2h + 570 °C / 2h	500 °C / 3h (2x)	535 °C / 2h (2x)
Površinska toplinska obradba	500 °C / 48h	570 °C / 30 min.	470 °C / 24h	450-500 °C / 2h
Dubina otvrdnuća	150 nm	180 nm	170 μm	3 μm
HV _{0,2} jezgre	820	710	800	820
HV _{0,2} površine	1350	1030	1300	2500

Posebnu skupinu sinteriranih čelika predstavljaju čelici skupine FERRO-TITANIT. Skupina FERRO-TITANIT čelika se dijeli na čelike s martenzitnom mikrostrukturom (tablica 4.2.21) i čelike namijenjene precipitacijskom očvršćivanju (tablica 4.2.22). Iz navedenih tablica može se primjetiti da čelici s martenzitnom mikrostrukturom sadrže ugljik (>0,5%), dok čelici namijenjeni precipitacijskom očvršćivanju ne sadrže ugljik. Na osnovi toga, može se zaključiti da martenzitnu mikrostrukturu nakon gašenja posjeduju FERRO-TITANIT legure koje sadrže do 33% titanovih karbida TiC. Ukupni sadržaj ugljika na raspolaganju je za otapanje u željeznoj osnovi (austenitu) te nakon gašenja metalnu osnovu prevodi u martenzitnu mikrostrukturu.

FERRO-TITANIT legure namijenjene precipitacijskom otvrdnuću ne sadrže slobodan ugljik, ali sadrže elemente koji stvaraju intermetalne spojeve (npr. Ni, Ti, Al, Nb, B). FERRO-TITANIT čelici se najčešće primjenjuju kod izrade kalupa za oblikovanje lima, dijelova alata izloženih trošenju i koroziji, mjernog alata, različitih matrica za izvlačenja, tablica 4.2.23.

Tablica 4.2.21. Sinterirani martenzitni (kaljeni) čelici

		Trgovačka oznaka čelika FERRO-TITANIT			
		C-Spezial	WFN	S	GU 30
Sastav, %	C	0,6	0,65	0,5	3,55
	Cr	3,0	14,0	20,5	-
	Mb	3,0	3,0	2,0	-
	Cu	1,5	0,8	-	1,0
	V	-	0,5	-	-
	Ni	-	0,4	0,25	1,0
	Si	-	-	-	2,2
	TiC	33	33	32	30-33
	ost.	Fe	Fe	Fe	Fe
Žarenje	Normalizacija, °C/h	720/6h	720/6h	720/6h	900/3h
	Meko žarenje, °C/h	840/1h	1000/1h	840/1h	900/1h
	HRC	38-42	48-50	40-42	36-40
Kaljenje	Austenitizacija, °C	960-980	1090	1080	820
	Gašenje*	TK, Z	TK, Z	U, TK	U
	HRC	69-72	69-71	66-68	60-65
Popuštanje	Temperatura, °C	100-300	490-520	200-400	150
	HRC	70-68	67-70	69-67	60-65

*TK – topla kupka, Z – zrak, U - ulje

Tablica 4.2.22. Sinterirani precipitacijski očvrsnuti čelici

		Trgovačka oznaka čelika FERRO-TITANIT-		
		-NIKRO 292 ("maraging")	-UNI	-CROMONI
Sastav, %	Cr	-	18,0	20,0
	Ni	15,0	ost.	ost.
	Mo	15,0	2,0	15,5
	Co	15,0	-	-
	Cu	0,5	0,8	-
	Al	-	1,0	-
	Ti	0,2	2,0	-
	Nb	-	0,5	0,5
	B	0,02	-	-
	TiC	28	28	22
	ost.	Fe	Ni	Ni
Žarenje	Temp., °C	850	1200	1200
	Gašenje	zrak	ulje, zrak	zrak
	HRC	48-51	46-50	46-50
Starenje	Temp., °C	480	540 ili 710	800
	Vrijeme, h	6-8	24 ili 16	2
	HRC	64-66	54-56	52-54
Mikrostruktura		Ni-martenzit i precipitati	austenit i precipitati	austenit i precipitati

Tablica 4.2.23. Primjeri primjene sinteriranih FERRO-TITANIT čelika

Naziv čelika	Primjeri primjene
FERRO-TITANIT C - Spezial	Štance, matrice za profilna izvlačenja, kalupi za oblikovanje lima (za rad do 200 °C).
WFN	Štance, dijelovi alata izloženi trošenju, kalupi za hladno i toplo oblikovanje (do 690 °C).
S	Dijelovi alata izloženi i koroziji i trošenju, mjerni alat.
NIKRO 292	Kalupi za hladno i toplo oblikovanje (do 600 °C), žigovi i matrice kalupa za polimere, noževi za granuliranje polimera, mlaznice, nije za rezne alate.
UNI	Posebno korozijski postojan, za matrice i žigove za preradu duromera i plastomera, mjerni alat (kalibri, mjerne pločice), tlačne rollice (nemagnetične).
CROMONI	Kao UNI, ali korozijski postojan još i u morskoj atmosferi i morskoj vodi.
GU 30	Kalupi za oblikovanje i izvlačenje transformatorskih limova (samopodmazujući materijal), bušaće šipke za radove na tokarilici (prigušenje titraja).

5. LITERATURA

1. M. Gojić, Metalurgija čelika, Metalurški fakultet, Sisak, 2005.
2. M. Novosel, D. Krumes, Posebni čelici, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
3. D. Krumes, Površinske toplinske obrade i inženjerstvo površina, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2004.
4. T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
5. P. Pavlović, Materijal čelik, SKTH/Kemija u industriji, Zagreb, 1990.
6. T. Matković, P. Matković, Fizikalna metalurgija I – skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.
7. M. Novosel, F. Cajner, D. Krumes, Alatni materijali, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
8. Inženjerski priručnik, Proizvodno strojarstvo, MATERIJALI, Školska knjiga, Zagreb, 1998.
9. B. S. Kasatkin, V.F. Musijačenko; Freiberg Forschungsheft B 199, 1978.
10. J. Michel, M. Buršák, I. Mamuzić: The Microstructure Notch Toughness Relationship of Microalloyed Steels, Metalurgija, **36** (1997) 4, 205-209.
11. B. Jäger, M. Richle, W. Schall: Mikrolegierte Stähle, Neue Hütte, **25** (1980) 9, 321-325.
12. H. R. Lin, A. A. Hendrickson: The Prediction of Precipitation Strengthening in Microalloyed Steels, Metallurgical Transactions A, **19A** (1988), 1471-1480.
13. R. W. Honeycombe: Transformation from Austenite in Alloy Steels, Metallurgical Transactions A, **7A** (1976), 915-936.
14. L. A. Erasmus, L.N. Pussegoda: The Strain Aging Characteristics of Reinforcing Steel with a Range of Vanadium Contents, Metallurgical Transactions A, **11A** (1980), 231-237.
15. M. J. White, W.S. Owen: Effects of Vanadium and Nitrogen on Recovery and Recrystallization During and After Hot-Working Some HSLA Steels, Metallurgical Transactions A, **11A** (1980), 597-604.
16. V. K. Lakshmanan, J. S. Kirkaldy: Solubility Product for Niobium Carbide in Austenite, Metallurgical Transactions A, **15A** (1984), 541-544.
17. E. Čizmarova, J. Michel, I. Mamuzić, M. Buršák: Influence of Strain Rate on Properties of Microalloyed S-MC Steel Grades, Metalurgija, **41** (2002) 4, 285-290.
18. L. Ragnarsson, D. Sichen, Generated during ingot casting of tool steels, Steel Research Int. **81** (2010) 1, 40-47.
19. B. Sonderegger, E. Kozeschnik, H. Leitner, H. Clemens, J. Svoboda, F. D. Fischer, P. Staron, Kinetics of precipitation in a complex hot-work tool steels, Steel Research Int. **81** (2010) 1, 64-73.
20. F. Felli, A. Sciutelli, L. Ippati, L. Fedrizzi, A. Molinari, Corrosion fatigue characterisation of sintered multiphase stainless steels, Materials Science and Technology **21** (2005) 6, 641-647.
21. S. Karagoz, H. F. Fischmeister, Niobium-alloyed high speed steel by powder metallurgy, Metallurgical Transactions A **19A** (1988), 1395.
22. N. Mišina, M. Oršulić, I. Polajnar, Zavarljivost mikrolegiranih poboljšanih čelika rabljenih u brodogradnji, Naše more **50** (2003) 5-6, 174-180.
23. J. Šundrica, N. Jurjević, M. Prčan, Znanost i tehnologija materijala s osvrtom na primjenu, Naše more **51** (2004) 3-4, 105-120.

24. ASM Handbook 10th Edition, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, ASM Int. Handbook Committee, 1990.
25. M. Gojić, Površinska obradba materijala, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
26. M. Gojić, Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
27. S. Kožuh, Utjecaj toplinske obradbe na svojstva i mikrostrukturu zavarenog austenitnog nehrđajućeg čelika, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
28. V. Đukić, R. Đukić, Priručnik za čelik, Naučna knjiga, Beograd, 1987.
29. Grupa autora, Materijali u strojarstvu-Tendencije razvoja i primjene, HDMT, Zagreb, 1993.
30. T. Filetin, Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala, HDMT, Zagreb, 2000.
31. S. Kožuh, M. Gojić, Mikrostruktura austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika nakon zavarivanja, Zavarivanje **49** (2006) 5, 177-185.
32. M. Gojić, S. Kožuh, Development of Direct Reduction Processes and Smelting Reduction Processes for the Steel Production, Kemija u industriji **55** (2006) 1, 1-10.
33. I. Juraga, V. Šimunović, V. Alar, I. Kehler, I. Stojanović, Cr-Ni čelici i problemi korozijskih oštećenja izazvanih u vodi, Zavarivanje **50** (2007) 3/4, 113-123.