

Svojstva, proizvodnja i primjena bijelih željeznih ljevova

Torman, Vedran

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:338041>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Vedran Torman

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Vedran Torman

**SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA
BIJELIH ŽELJEZNIH LJEVOVA**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: prof.dr.sc. Zoran Glavaš

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

izv.prof.dr.sc. Stjepan Kožuh - predsjednik
prof.dr.sc. Zoran Glavaš - član
doc.dr.sc. Martina Lovrenić-Jugović- član
doc.dr.sc. Ivan Jandrić- zamjenski član

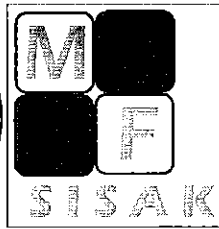
Sisak, rujan 2018.

ZAHVALA

Prvenstveno se zahvaljujem svojem voditelju .prof.dr.sc. Zoranu Glavašu koji mi je omogućio i pomogao svojim savjetima i primjerima u izradi ovog završnog rada, te mu se posebno zahvaljujem na strpljenju i pruženom vremenu za moje upite i nedoumice.

Zahvaljujem se naravno i svojim roditeljima i obitelji na pruženoj podršci tijekom mojeg studiranja.

Velika HVALA svima !



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: VEDRAN

PREZIME: TORMAN

MATIČNI BROJ: BM-2491

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

SVOISTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA BIJELIH ŽELJEZNIH LIEVOVA

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 17. rujna 2018.

Vedran Torman
(vlastoručni potpis)

Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.

SAŽETAK

SVOJSTVA, PROIZVODNJA I PRIMJENA BIJELIH ŽELJEZNIH LJEVOVA

Bijeli željezni ljevovi sadrže visok volumni udio karbida u mikrostrukturi zbog čega imaju visoku tvrdoću. Prvenstveno se upotrebljavaju za odljevke koji moraju biti otporni na abraziju. Osim toga, mogu se koristiti i za odljevke od kojih se zahtijeva otpornost na koroziju ili visoke temperature.

U ovom preglednom radu prikazane su vrste, svojstva, utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu, proizvodnja, toplinska obrada i primjena bijelih željeznih ljevova s perlitnom metalnom osnovom, bijelih željeznih ljevova legiranih niklom i kromom te bijelih željeznih ljevova visokolegiranih kromom.

Ključne riječi: ljevarske slitine, bijeli željezni ljevovi

ABSTRACT

PROPERTIES, PRODUCTION AND APPLICATION OF WHITE CAST IRONS

White cast irons have high hardness because they contain a high volume fraction of carbides in the microstructure. They are primarily used for castings that must be resistant to abrasion. In addition, they can also be used for castings that must be resistant to corrosion or high temperatures.

This review article shows the types, properties, the influence of the chemical composition on microstructure, production, heat treatment, and application of pearlitic white cast irons, nickel-chromium white cast irons and high-chromium white cast irons

Key words: casting alloys, white cast irons

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PERLITNI BIJELI ŽELJEZNI LJEVOVI	1
2.1. Vrste i svojstva perlitnih bijelih željeznih ljevova	1
2.2. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu perlitnih bijelih željeznih ljevova	3
2.3. Proizvodnja perlitnih bijelih željeznih ljevova	4
2.4. Toplinska obrada perlitnih bijelih željeznih ljevova	4
2.5. Primjena perlitnih bijelih željeznih ljevova	5
3. BIJELI ŽELJEZNI LJEVOVI LEGIRANI NIKLOM I KROMOM (Ni-HARD)	6
3.1. Vrste i svojstva Ni-Hard bijelih željeznih ljevova	6
3.2. Ni-Hard 1 i 2	7
3.2.1. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva Ni-Hard 1 i 2	8
3.2.2. Specijalne vrste Ni-Hard 1 i 2	10
3.3. Ni-Hard 4	11
3.3.1. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva Ni-Hard 4	12
3.4. Proizvodnja Ni-Hard bijelih željeznih ljevova	13
3.5. Toplinska obrada Ni-Hard bijelih željeznih ljevova	14
3.6. Primjena Ni-Hard bijelih željeznih ljevova	17
4. BIJELI ŽELJEZNI LJEVOVI VISOKOLEGIRANI KROMOM	19
4.1. Vrste i svojstva visokokromnih bijelih željeznih ljevova	20
4.2. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva visokokromnih bijelih željeznih ljevova	22
4.3. Proizvodnja visokokromnih bijelih željeznih ljevova	25
4.4. Toplinska obrada visokokromnih bijelih željeznih ljevova	25
4.5. Specijalni visokokromni bijeli željezni ljevovi	28
4.6. Primjena visokokromnih bijelih željeznih ljevova	29
5. ZAKLJUČAK	30
6. LITERATURA	31
ŽIVOTOPIS	32

1. UVOD

Željezni ljevovi koji u mikrostrukturi sadrže karbide umjesto grafita imaju bijelu boju na prijelomnoj površini, zbog čega se nazivaju bijelim željeznim ljevovima. Većina karbida nastaje eutektičnom reakcijom tijekom skrućivanja. Dodatkom karbidotvornih elemenata, prvenstveno kroma, promovira se stvaranje karbida i sprječava stvaranje grafita tijekom skrućivanja. U metalnoj osnovi bijelih željeznih ljevova može biti prisutan ferit, perlit, austenit, bainit i martenzit, što ovisi o dodatku legirnih elemenata i provedenoj toplinskoj obradi. U većini slučajeva cilj je dobiti martenzitnu metalnu osnovu.

Veliki volumni udio karbida u mikrostrukturi u kombinaciji s martenzitnom metalnom osnovom daje visoku tvrdoću bijelim željeznim ljevovima, ali i nisku žilavost. Tvrdoća niskolegiranih bijelih željeznih ljevova koji sadrže < 4 % legirnih elemenata obično se kreće od 350 do 550 HB, dok se tvrdoća visokolegiranih bijelih željeznih ljevova koji sadrže > 4 % legirnih elemenata kreće u granicama od 450 do 800 HB [1]. Vrlo teško se strojno obrađuju i zavaruju.

S obzirom da imaju visoku tvrdoću, bijeli željezni ljevovi prvenstveno se upotrebljavaju za odljevke koji moraju biti otporni na abraziju, kao što su npr. dijelovi drobilica i mlinova. Uzimajući u obzir njihovo glavno područje primjene, bijeli željezni ljevovi često se nazivaju željeznim ljevovima otpornim na abraziju.

Visok udio kroma poboljšava otpornost na koroziju, oksidaciju i visoke temperature. To omogućuje primjenu bijelih željeznih ljevova i za druge aplikacije, a ne samo kao materijala otpornih na abraziju. U tom slučaju metalna osnova je feritna, austenitna ili martenzitna.

U ovom preglednom radu obrađene su vrste, svojstva, utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu, proizvodnja, toplinska obrada i primjena bijelih željeznih ljevova s perlitnom metalnom osnovom, bijelih željeznih ljevova legiranih niklom i kromom te bijelih željeznih ljevova visokolegiranih kromom.

2. PERLITNI BIJELI ŽELJEZNI LJEVOVI

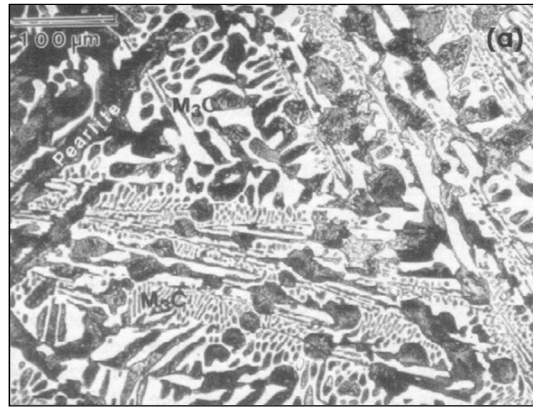
Perlitni bijeli željezni ljevovi sadrže < 4 % legirnih elemenata i imaju umjerenu otpornost na abraziju te nisku žilavost [1]. Tvrdoća ovih ljevova obično se kreće u granicama od 350 do 500 HB [1].

2.1. Vrste i svojstva perlitnih bijelih željeznih ljevova

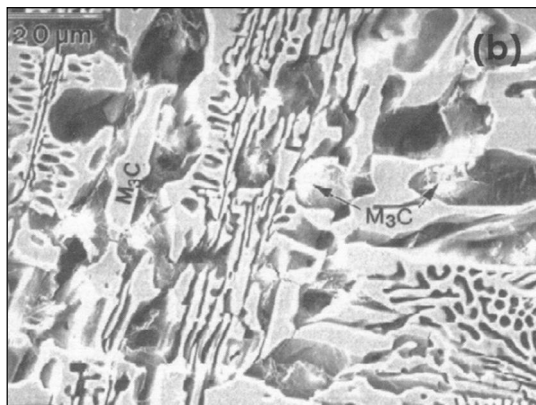
Perlitni bijeli željezni ljevovi mogu se podijeliti u dvije skupine [2]:

- perlitni željezni ljevovi s potpuno bijelom strukturom,
- perlitni željezni ljevovi s gradijentnom strukturom.

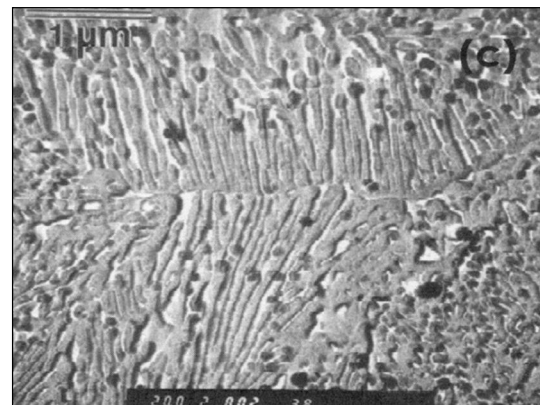
Mikrostruktura perlitnog bijelog željeznog lijeva s potpuno bijelom strukturom sastoji se od M_3C karbida pločaste morfologije i perlitne metalne osnove (slika 1) [2].



a)



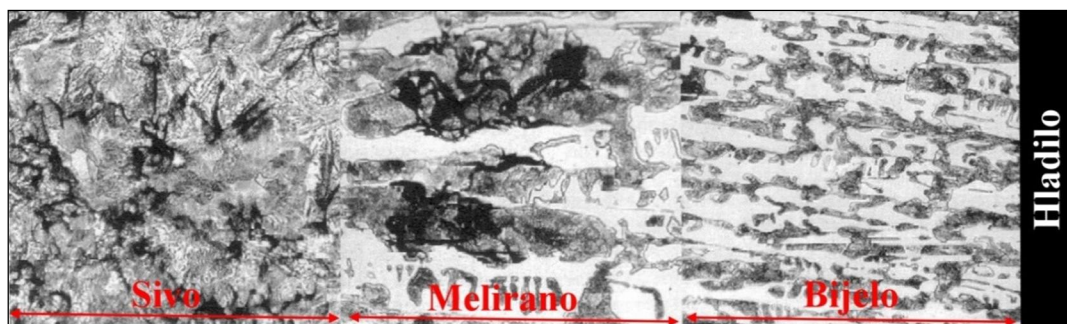
b)



c)

Slika 1. Perlitni željezni lijev s potpuno bijelom strukturom: a) metalografska snimka mikrostrukture, b) snimka mreže M_3C karbida napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), c) snimaka morfologije perlita napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) [2]

U debljim odljevcima, na određenoj udaljenosti od površine može doći do stvaranja grafitnih čestica najčešće listićavog oblika zbog niske brzine hlađenja i niskog udjela karbidotvornih elemenata. U tom slučaju radi se o perlitnom željeznom lijevu s gradijentnom strukturom, koja se postepeno mijenja od bijele na površini ka sivoj u unutrašnjosti (slika 2). Između ta dva sloja nalazi se sloj s miješanom, odnosno meliranom strukturom (sadrži karbide i grafitne čestice).



Slika 2. Mikrostruktura perlitnog željeznog lijeva s gradijentnom strukturom pri povećanju 100x [2]

Debljina površinskog sloja koji ima bijelu strukturu može se regulirati upotrebom hladila različitih dimenzija u kalupu i prilagodbom kemijskog sastava. Hladilo povećava brzinu skrućivanja čime se pospešuje odvijanje eutektične reakcije prema metastabilnom sustavu, odnosno stvaranje karbida.

Gradijentna struktura pokazala se pogodnom za mnoge aplikacije jer sloj sa sivom strukturom, zbog veće duktilnosti od bijelog površinskog sloja otpornog na abraziju, povećava otpornost na lom komponente. Međutim, površinski sloj otporan na abraziju ima ograničenu debljinu i može se istrošiti. U tom slučaju otpornost na abraziju značajno se smanjuje jer podpovršinski slojevi imaju značajno nižu tvrdoću.

Tvrdoća perlitnih bijelih željeznih ljevova može se povećati povećanjem udjela karbida u mikrostrukturi ili povećanjem tvrdoće perlita (smanjenjem razmaka između lamela ferita i cementita).

Mehanička svojstva perlitnih bijelih željeznih ljevova prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Mehanička svojstva perlitnih bijelih željeznih ljevova (uzorci Ø 30 mm; kemijski sastav: 2,5 – 3,5 %C, 0,4 – 0,67 %Si, 0,3 – 0,96 %Mn) [3]

Svojstvo	Lijevanje u pješčani kalup	Lijevanje u trajni kalup
Tvrdoća, HB	390 - 470	410 – 510
Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	230 - 460	280 – 460
Tlačna čvrstoća, R_{mt} , MPa	1500 - 1750	-
Svojna čvrstoća, R_{ms} ¹⁾ , MPa	370 - 620	510 – 725
Modul elastičnosti, E , GPa	210	210

¹⁾ ispitni uzorci Ø 30 mm, razmak oslonaca 305 mm

2.2. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu perlitnih bijelih željeznih ljevova

U tablici 2 prikazani su preporučeni udjeli pojedinih kemijskih elemenata u perlitnim bijelim željeznim ljevovima.

Tablica 2. Kemijski sastav perlitnih bijelih željeznih ljevova otpornih na abraziju prema normi EN 12513 [2]

Oznaka	Broj	Kemijski sastav, mas. %								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
EN-GJN-HV350	EN-JN 2019	2,4-3,9	0,4-1,5	0,2-1,0	-	-	2,0	-	-	-

Povećanjem udjela **ugljika** povećava se volumni udio karbida u mikrostrukturi, a time i tvrdoća i otpornost na abraziju perlitnih bijelih željeznih ljevova. Međutim, istovremeno dolazi do smanjenja žilavosti.

Povećanjem udjela **silicija** promovira se stvaranje grafita. Zbog toga udio silicija mora biti nizak u perlitnim željeznim ljevovima s potpuno bijelom strukturom. Smanjenjem udjela silicija povećava se debljina bijelog površinskog sloja otpornog na abraziju u perlitnim željeznim ljevovima s gradijentnom strukturom.

Dodatkom male količine karbidotvornih elemenata, npr. **kroma** i **mangana** promovira se stvaranje karbida. U perlitnim željeznim ljevovima s gradijentnom strukturom to rezultira porastom debljine bijelog površinskog sloja otpornog na abraziju.

2.3. Proizvodnja perlitnih bijelih željeznih ljevova

Izrada kalupa. Za proizvodnju odljevaka od perlitnih željeznih ljevova s potpuno bijelom strukturom mogu se koristiti jednokratni (pješčani) ili trajni kalupi [2]. U jednokratne kalupe korisno je ugraditi hladila da bi se povećala brzina skrućivanja i spriječilo stvaranje grafita. Na hladila treba nanijeti odgovarajući premaz da se izbjegnu oštećenja zbog kontakta s talinom. Stezanje u krutom stanju, odnosno modelarsko stezanje iznosi od 1,8 do 2 % i treba ga uzeti u obzir pri izradi modela [2].

Sustav ulijevanja i napajanja treba tako konstruirati da se ostvari usmjereno skrućivanje. Pojila treba postaviti dalje od površina od kojih se zahtijeva visoka otpornost na abraziju zbog sporijeg skrućivanja i mogućeg stvaranja grafita. Korisno je primijeniti egzotermne ili izolirajuće košuljice oko pojila da bi se povećala njihova efikasnost i poboljšao izvadak. Odlomnu jezgru korisno je postaviti na spoju pojila i odljevka da bi se olakšalo uklanjanje pojila. Volumno stezanje tijekom skrućivanja kreće se od 4 do 5 vol.% [2]. Kod proračuna sustava napajanja mogu se primijeniti pravila kao kod napajanja čeličnih ljevova.

Perlitni željezni ljevovi s gradijentnom strukturom lijevaju se u jednokratne (pješčane) kalupe u koje su ugrađena hladila [2]. Za izradu jednokratnih kalupa mogu se upotrijebiti svi uobičajeni materijali i postupci. Hladila se uvijek premazuju odgovarajućim premazom da bi se izbjegla oštećenja zbog kontakta s talinom te dobila glatka, čista i sitnozrnata površina odljevka. Primjenom različitih premaza može se kontrolirati prijenos topline od taline na hladilo. Ako se koriste odvojena hladila, povećava se mogućnost nastanka pukotina na odljevku na mjestima dodira hladila. Zbog toga se preferira upotreba hladila u jednom komadu.

Izrada taline. Kupolna peć predstavlja najekonomičnije rješenje za izradu taline perlitnih bijelih željeznih ljevova s potpuno bijelom strukturom. Metalni uložak sastoji se od sljedećih komponenti: čelični otpad, otpadni željezni lijev, sirovo željezo, ljevaonički povrat te po potrebi ferolegure. Koks i vapnenac su nemetalne komponente uložka. Osim u kupolnoj peći, taljenje se može provesti u indukcijskoj, elektrolučnoj ili rotacijskoj peći, posebno ako se proizvodni proces odvija diskontinuirano. Kod primjene tih agregata za taljenje u većini slučajeva u uložak treba dodati sredstvo za naugljičenje.

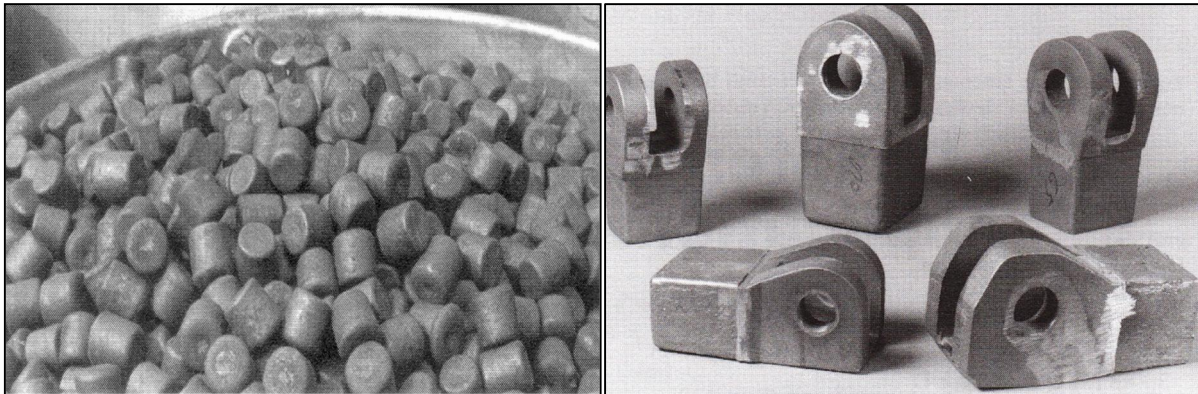
Talina perlitnih željeznih ljevova s gradijentnom strukturom najčešće se izrađuje u indukcijskim pećima. Uložni materijal sastoji se od sirovog željeza, povrata unutar ljevaonice, otpadnog željeznog lijeva, čeličnog otpada i po potrebi ferolegura.

2.4. Toplinska obrada perlitnih bijelih željeznih ljevova

Uklanjanje zaostalih naprezanja na temperaturama do ~ 600 °C je jedina toplinska obrada koja se primjenjuje kod perlitnih željeznih ljevova s potpuno bijelom strukturom i perlitnih željeznih ljevova s gradijentnom strukturom [2]. Pri tome može doći do određenog pada tvrdoće.

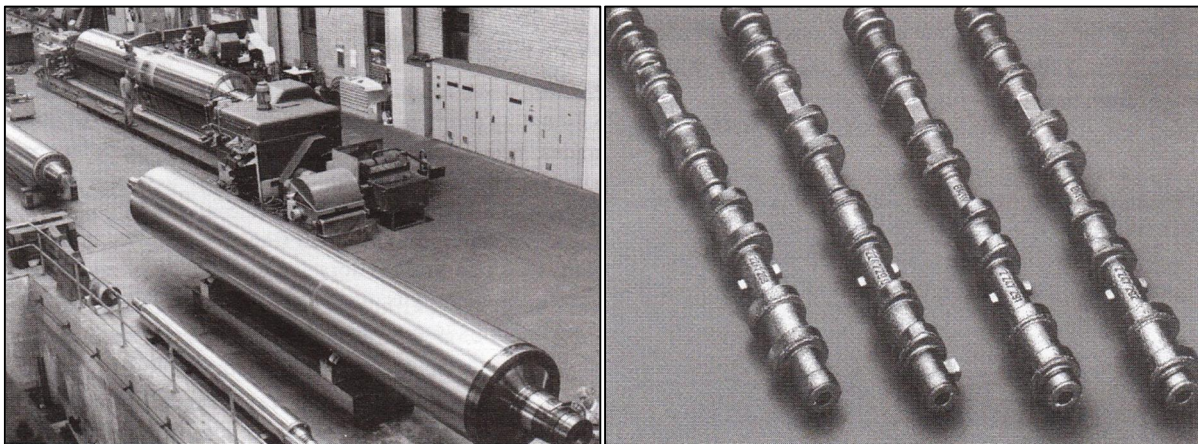
2.5. Primjena perlitnih bijelih željeznih ljevova

Perlitni bijeli željezni ljevovi pogodni su za odljevke koji moraju imati umjerenu otpornost na abraziju i nisu izloženi udarnom opterećenju. Značajna količina perlitnih bijelih željeznih ljevova s potpuno bijelom strukturom primjenjuje se za izradu malih odljevaka koji služe kao medij za usitnjavanje, npr. u procesu proizvodnje kvarcne prašine (slika 3a). Zbog specifične strukture, odljevci od perlitnog željeznog lijeva s gradijentnom strukturom imaju široku primjenu. Upotrebljavaju se za izradu čekića u drobilicama za smeđi ugljen (lignit), valjaka za izradu papira, bregastih osovina i podizača ventila u motorima s unutarnjim izgaranjem itd. (slike 3b – 3 d).



a)

b)



c)

d)

Slika 3. Odljevci od perlitnih bijelih željeznih ljevova: a) odljevci od perlitnog željeznog lijeva s potpuno bijelom strukturom koji služe kao medij za usitnjavanje, b) čekići za drobilicu smeđeg ugljena izrađeni od perlitnog željeznog lijeva s gradijentnom strukturom, c) valjci za izradu papira odliveni od perlitnog željeznog lijeva s gradijentnom strukturom, d) bregaste osovine za motore s unutarnjim izgaranjem izrađene od perlitnog željeznog lijeva s gradijentnom strukturom [2]

3. BIJELI ŽELJEZNI LJEVOVI LEGIRANI NIKLOM I KROMOM (Ni-HARD)

Bijeli željezni ljevovi legirani niklom i kromom poznati su pod nazivom Ni-Hard [1, 2, 4]. Radi se o skupini ljevova koji sadrže > 4 % legiranih elemenata. Imaju visoku tvrdoću i otpornost na abraziju, ali nisku žilavost. Visoka tvrdoća potječe od njihove mikrostrukture koja se sastoji od karbida i martenzitno-austenitno-bainitne metalne osnove, s tim da je udio martenzita vrlo visok [1, 2, 4]. Kako bi se postigla takva mikrostruktura potrebno je odabrati adekvatan kemijski sastav i po potrebi provesti odgovarajuću toplinsku obradu.

3.1. Vrste i svojstva Ni-Hard bijelih željeznih ljevova

S obzirom na udio nikla i kroma te mikrostrukturu, razlikuju se dvije vrste Ni-Hard bijelih željeznih ljevova [1, 2, 4]:

- Ni-Hard 1, 2 i 3 – koji sadrže 3 do 5,5 % nikla i 1 do 4 % kroma te karbide M_3C tipa,
- Ni-Hard 4 – koji sadrži 4,5 do 7 % nikla i 7 do 11 % kroma te karbide M_7C_3 tipa.

U tablicama 3 i 4 prikazane su vrste Ni-Hard bijelih željeznih ljevova i njihovi kemijski sastavi prema normama ASTM A 532/A 532M i EN 12513, a u tablici 5 prikazana su njihova mehanička svojstva.

Tablica 3. Vrste i kemijski sastavi Ni-Hard bijelih željeznih ljevova otpornih na abraziju prema ASTM A 532/A 532M [2]

Klasa	Tip	Oznaka	Kemijski sastav, %								
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
I	A	Ni-Cr-HC ¹⁾ (Ni-Hard 1)	2,8- 3,6	maks 2,0	maks 0,8	3,3- 5,0	1,4- 4,0	maks 1,0	-	maks 0,3	maks 0,15
I	B	Ni-Cr-LC ²⁾ (Ni-Hard 2)	2,4- 3,0	maks 2,0	maks 0,8	3,3- 5,0	1,4- 4,0	maks 1,0	-	maks 0,3	maks 0,15
I	C	Ni-Cr-GB ³⁾ (Ni-Hard 3)	2,5- 3,7	maks 2,0	maks 0,8	maks 4,0	1,0- 2,5	maks 1,0	-	maks 0,3	maks 0,15
I	D	Ni-HiCr (Ni-Hard 4)	2,5- 3,6	maks 2,0	maks 2,0	4,5- 7,0	7,0- 11,0	maks 1,5	-	maks 0,1	maks 0,15

¹⁾ HC – (engl. *High Carbon*) – visok udio C; ²⁾ LC – (engl. *Low Carbon*) – nizak udio C; ³⁾ GB – (Great Britain)

Tablica 4. Vrste i kemijski sastavi Ni-Hard bijelih željeznih ljevova otpornih na abraziju prema EN 12513 [2]

Oznaka	Broj	Kemijski sastav, mas.%									Ekv. na ASTM A 532/A 532 M
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	
EN-GJN- HV520	EN-JN 2020	2,5- 3,0	0,8	0,8	0,1	0,10	1,5- 3,0	3,0- 5,5	-	-	Ni-Hard 2
EN-GJN- HV550	EN-JN 2030	3,0- 3,6	0,8	0,8	0,1	0,10	1,5- 3,0	3,0- 5,5	-	-	Ni-Hard 1
EN-GJN- HV600	EN-JN 2040	2,5- 3,5	1,5- 2,5	0,3- 0,8	0,08	0,08	8,0- 11,0	4,5- 6,5	-	-	Ni-Hard 4

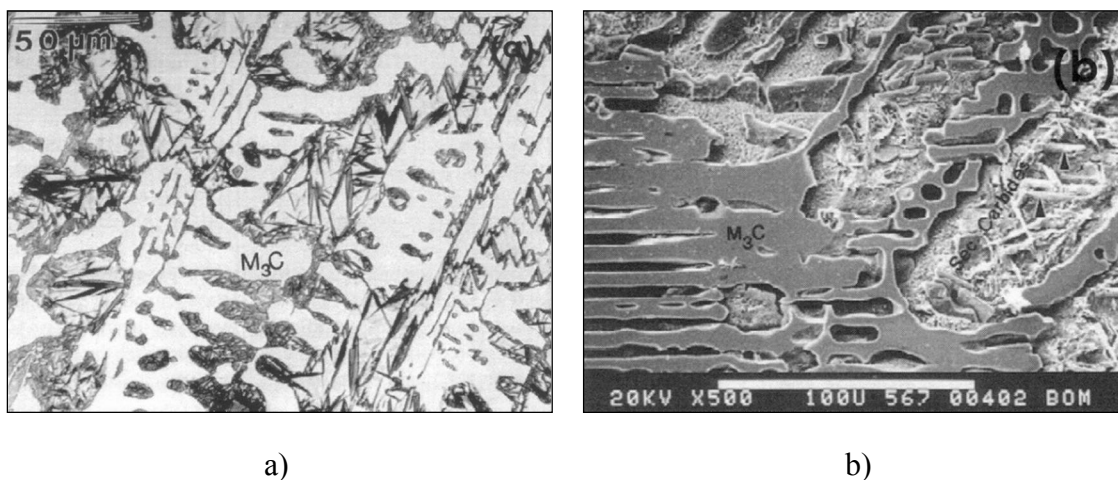
Tablica 5. Mehanička svojstva Ni-Hard 1, 2 i 4 bijelih željeznih ljevova [2]

Vrsta	Kalup	Tvrdoća, HB	Tvrdoća, HV	Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	Savojna čvrstoća ⁽²⁾ , R_{ms} , MPa	Modul elastičnosti, E , GPa
Ni-Hard 1 ⁽¹⁾ (3-3,6%C)	Jednokratni pješčani	550-690	640-750	280-350	500-620	169-183
	Trajni	600-730	700-860	350-420	560-850	169-183
Ni-Hard 2 ⁽¹⁾ (maks. 2,9 %C)	Jednokratni pješčani	530-630	630-740	320-390	560-680	169-183
	Trajni	580-680	680-800	420-530	680-870	169-183
Ni-Hard 4 ⁽¹⁾ (2,6-3,2%C)	Jednokratni pješčani	550-700	650-820	500-600	600-800	190-200

⁽¹⁾ ispitni uzorci \varnothing 30 mm; ⁽²⁾ ispitni uzorci \varnothing 30 mm, razmak oslonaca 300 mm

3.2. Ni-Hard 1 i 2

Mikrostruktura Ni-Hard 1 i 2 sastoji se od M_3C karbida pločaste morfologije i martenzitne metalne osnove (slika 4) [1, 2, 4]. Određeni udio bainita i zaostalog austenita može biti prisutan u metalnoj osnovi, što ovisi o kemijskom sastavu, brzini hlađenja odljevka u kalupu i eventualno provedenoj toplinskoj obradi [1, 2, 4].

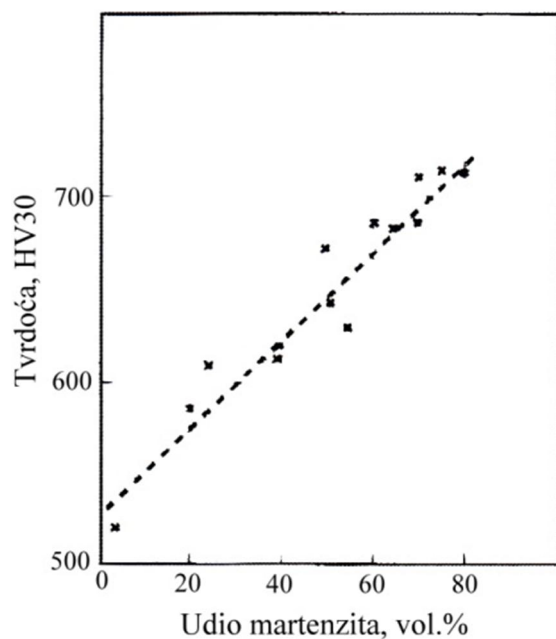


Slika 4. a) metalografska snimka mikrostrukture Ni-Hard 1 u lijevanom stanju, b) snimka M_3C karbida napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) [2]

Slovo „M“ u formuli karbida ukazuje da se radi o mješovitom karbidu, odnosno da sadrži više karbidotvornih elemenata. M_3C karbid sadrži najviše željeza te određeni udio kroma, mangana i molibdena, što ovisi o kemijskom sastavu ljevova [2]. Većina karbida nastaje eutektičnom reakcijom tijekom skrućivanja. M_3C karbidi međusobno su povezani, što negativno utječe na žilavost Ni-Hard 1 i 2. Tvrdoća M_3C karbida iznosi 800 do 1000 HV [2].

Manji udio karbida može nastati i nakon skrućivanja i tijekom toplinske obrade. Ti karbidi nazivaju se sekundarnim karbidima.

Tvrdoća Ni-Hard 1 i 2 ovisi o udjelu karbida i strukturi metalne osnove [4]. S porastom udjela karbida povećava se tvrdoća, a time i otpornost na abraziju. Na slici 5 može se vidjeti kako tvrdoća raste s porastom udjela martenzita u metalnoj osnovi.

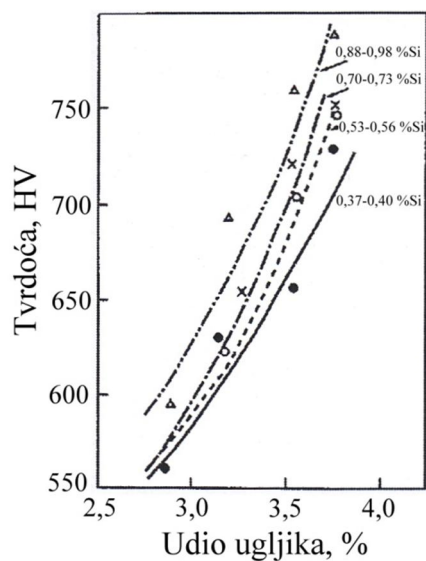


Slika 5. Udjela udjela martenzita u metalnoj osnovi na tvrdoću Ni-Hard 2 popuštenog na 270 °C [5]

3.2.1. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva Ni-Hard 1 i 2

Kemijski sastav je ključan faktor koji utječe na udio karbida i strukturu metalne osnove Ni-Hard 1 i 2.

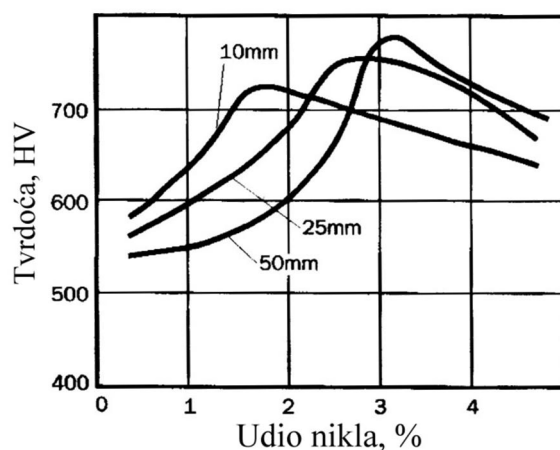
Udio **ugljika** određuje volumni udio karbida u mikrostrukturi i tvrdoću metalne osnove [4]. S porastom udjela ugljika povećava se udio karbida, a time i tvrdoća (slika 6).



Slika 6. Utjecaj udjela ugljika na tvrdoću Ni-Hard 1 u lijevanom stanju pri različitim udjelima silicija [6]

Ni-Hard 1 sadrži oko 40 do 44 vol.% eutektičnih karbida M_3C tipa, dok taj udio u Ni-Hard 2 iznosi oko 35 do 40 vol.% [4]. To je glavna razlika između Ni-Hard 1 i 2. Zbog manjeg udjela karbida i većeg udjela metalne osnove, Ni-Hard 2 ima nižu tvrdoću i otpornost na abraziju od Ni-Hard 1, ali veću žilavost. Ako se želi postići velika otpornost na abraziju, udio ugljika obično se održava u granicama od 3,2 do 3,6 % [7]. Za postizanje što veće žilavosti, odnosno otpornosti na udarno opterećenje udio ugljika treba se kretati u granicama od 2,7 do 3,2 % [7].

Udio **nikla** je ključan za dobivanje odgovarajuće prokaljivosti, odnosno martenzitno-bainitne metalne osnove bez perlita [1, 2, 4, 7]. Perlit nije poželjan jer ima znatno nižu tvrdoću od martenzita. Potreban dodatak nikla ovisi o debljini odljevka i brzini hlađenja (slika 7).



Slika 7. Utjecaj udjela nikla na tvrdoću Ni-Hard 1 u različitim debljinama stijenke odljevka (lijevano stanje) [4]

Nedovoljan udio nikla rezultirati će nedovoljnom prokaljivošću, što znači da se neće izbjeći stvaranje perlita. S druge strane, prekomjeran dodatak nikla povećava količinu zaostalog austenita jer nikal snižava temperaturu početka stvaranja martenzita (M_s), što je opet povezano s padom tvrdoće [8]:

$$M_s (\text{°C}) = 539 - 423 \cdot \%C - 30,4 \cdot \%Mn - 12,1 \cdot \%Cr - 17,7 \cdot \%Ni - 7,5 \cdot \%Mo \quad (1)$$

U tablici 6 prikazani su potrebni dodaci nikla i kroma u Ni-Hard 1 i 2 ovisno o debljini stijenke odljevka. Za svaku debljinu stijenke odljevka Ni-Hard 2 zahtjeva nešto veći dodatak od Ni-Hard 1 zbog većeg udjela metalne osnove.

Tablica 6. Potrebni udjeli nikla i kroma u Ni-Hard 1 i 2 ovisno o debljini stijenke odljevka [4]

Debljina stijenke, mm	Ni-Hard 1				Ni-Hard 2			
	Lijevanje u pijesak		Lijevanje u trajni kalup		Lijevanje u pijesak		Lijevanje u trajni kalup	
	% Ni	% Cr	% Ni	% Cr	% Ni	% Cr	% Ni	% Cr
< 12	3,8	1,6	3,3	1,5	4,0	1,5	3,5	1,4
12 - 25	4,0	1,8	3,6	1,7	4,2	1,7	3,8	1,5
25 - 50	4,2	2,0	3,9	1,9	4,4	1,8	4,1	1,6
50 - 75	4,4	2,2	4,2	2,1	4,6	2,0	4,4	1,8
75 - 100	4,6	2,4	4,5	2,3	4,8	2,2	4,7	2,0
> 100	4,8	2,6	4,8	2,5	5,0	2,4	5,0	2,2

Krom kompenzira grafitizirajući učinak nikla i silicija te promovira stvaranje karbida [1, 2, 4, 7]. Omjer udjela kroma i nikla obično se kreće od 1:2 do 1:2,5 (tablica 6). Cr se uglavnom nalazi u karbidima i povećava njihovu tvrdoću. Zbog malog udjela u metalnoj osnovi, vrlo malo utječe na prokaljivost. Iz tog razloga potreban je dodatak drugih elemenata radi povećanja prokaljivosti. Udjeli kroma iznad navedenih u tablici 6 ne preporučuju se jer previsoki udjeli kroma povećavaju količinu zaostalog austenita (jednadžba 1).

Silicij je grafitizator zbog čega se njegov udio mora držati niskim kako bi se izbjeglo stvaranje grafita koji rezultira značajnim padom otpornosti na abraziju. Pored toga, negativno utječe na prokaljivost [1]. Međutim, određena količina silicija je potrebna za poboljšanje fluidnosti taline te radi dobivanja fluidne troske (obično između 0,3 i 0,5 %) [4]. Posebne kvalitete Ni-Hard 1 i 2 proizvode se s povišenim udjelom silicija.

Udio **mangana** u Ni-Hard 1 i 2 trebao bi se održavati niskim, oko 0,5 %, premda povećava prokaljivost i sprječava stvaranje perlita [4]. Razlog tome je znatno jači učinak na stabilizaciju austenita nego na sprječavanje stvaranja perlita. Prema tome, prekomjerni udjeli mangana rezultiraju povišenim udjelom zaostalog austenita (jednadžba 1).

Molibden ima jak učinak na prokaljivost. Zbog toga se male količine **molibdena** ponekad dodaju u proizvodnji debelostijenih odljevaka kako bi se postigla odgovarajuća prokaljivost i spriječilo stvaranje perlita [4]. Iz razloga što se molibdena nalazi u karbidima, ne može se koristiti kao zamjena za nikal.

Bakar povećava prokaljivost i ponekad se koristi kao djelomična zamjena za nikal. Međutim, učinak bakra na prokaljivost je duplo slabiji od učinka nikla [4]. Pored toga, prekomjerni udjeli bakra povećavaju količinu zaostalog austenita [7, 9]. Udjeli bakra od 0,25 do 0,5 % mogu povećati krhkost odljevaka od Ni-Hard 1 i 2 zbog stvaranja igličastih faza koji potječu od moguće interakcije s kisikom [4].

Sumpor i **fosfor** smanjuju žilavost Ni-Hard 1 i 2 zbog čega se udjeli tih elemenata trebaju održavati što nižima [4]. Pored toga, sumpor smanjuje otpornost na abraziju bijelih željeznih ljevova.

Magnezij u udjelima od 0,02 do 0,05 % povećava tvrdoću Ni-Hard 1 i 2 u lijevanom stanju zbog stvaranja većeg udjela martenzita [4]. Pored toga, smanjuje međusobnu povezanost karbida što rezultira povećanjem žilavosti.

3.2.2. Specijalne vrste Ni-Hard 1 i 2

Uobičajeni kemijski sastav Ni-Hard 1 i 2 može se u određenim slučajevima modificirati radi poboljšanja svojstva za posebna područja primjene.

Viši udjeli silicija potpomažu pretvorbu austenita u martenzit jer silicij smanjuje topljivost ugljika u austenitu što rezultira povećanjem M_s temperature [4]. Povećanje udjela silicija na ~ 1,5 % rezultira tvrdom metalnom osnovom s više martenzita i manje zaostalog austenita. Može se doseći tvrdoća > 700 HB. Grafitizirajući učinak silicija može se kompenzirati povećanjem udjela kroma i dodatkom oko 0,015 % bizmuta. Preporučeni omjer udjela kroma i silicija iznosi 2,5:1 za tanje odljevke, odnosno 2,9:1 za debelostijene odljevke.

Budući da silicij smanjuje prokaljivost, udio nikla mora se povećati za faktor 1,3 x %Si [4]. Ovaj tip Ni-Hard 1 poznat je pod nazivom Premium Ni-Hardz.

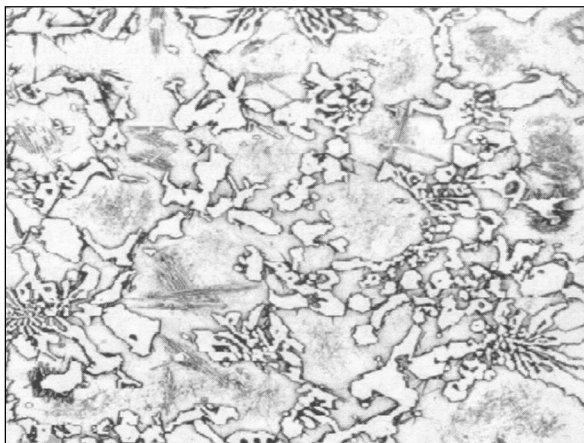
Bor u udjelima od 0,25 do 1 % značajno povećava tvrdoću Ni-Hard 1 i otpornost na abraziju, ali i krhkost [4]. Tvrdoća odljevaka lijevanih u trajne kalupe može doseći 1000 HV. Udio kroma u toj specijalnoj vrsti Ni-Hard 1 također je povišen i kreće se u granicama od 2,4 do 2,7 %. Zbog velike krhkosti može se koristiti samo za odljevke koji nisu izloženi udarnom opterećenju.

Titan u željeznim ljevovima formira TiC karbide izuzetno visoke tvrdoće, koja iznosi oko 3200 HV. Izlučuju se iz taline na temperaturama oko 1700 °C, odnosno iznad likvidus temperature i nasumično su raspoređeni u karbidima i metalnoj osnovi. To rezultira značajnim povećanjem tvrdoće i otpornosti na abraziju Ni-Hard ljevova. Dodatak titana obično iznosi 3,5 do 4 %, a udio C povećava se za ~ 1% [4]. Takva vrsta Ni-Hard lijeva poznata je pod nazivom Tinox.

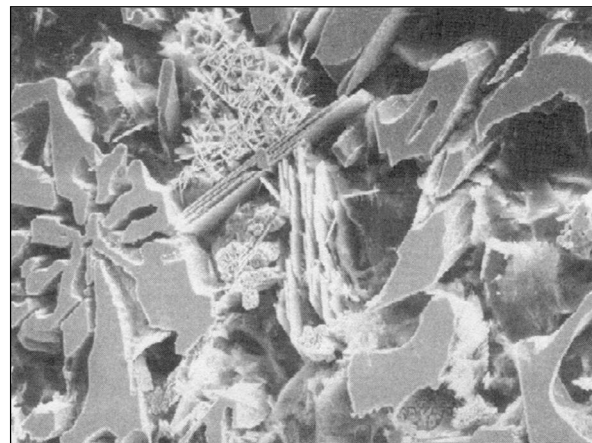
Dodatak ~ 1 % **vanadija** ili **niobija** u Ni-Hard 1 dovodi do stvaranja finih karbida VC ili NbC u metalnoj osnovi [4]. To u konačnici rezultira povećanjem otpornosti na abraziju.

3.3. Ni-Hard 4

Mikrostruktura Ni-Hard 4 u lijevanom stanju sastoji se od M_7C_3 karbida štapičaste morfologije i metalne osnove koja se sastoji od približno jednakih udjela zaostalog austenita i martenzita (slika 8) [2, 4]. Udio zaostalog austenita je veći, a udio martenzita manji nego u metalnoj osnovi Ni-Hard 1 i 2 zbog većeg udjela legiranih elemenata. U mikrostrukturi može biti prisutan i određeni udio sekundarnih M_3C karbida pločaste morfologije, koji nastaju nakon skrućivanja ili tijekom toplinske obrade (slika 9) [2, 4]. Sporije hlađenje rezultira većim brojem sekundarnih M_3C karbida.

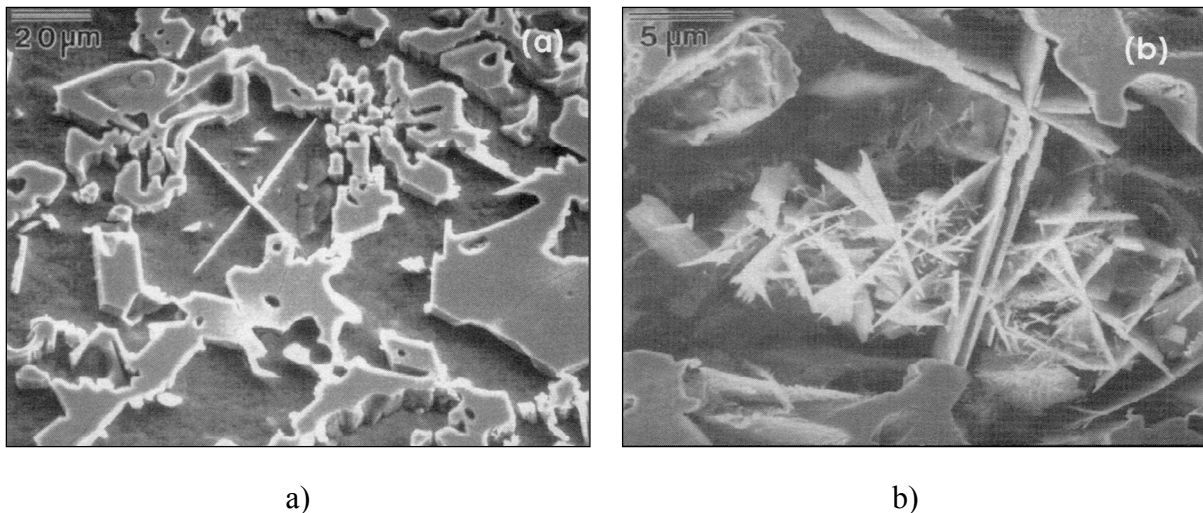


a)



b)

Slika 8. a) metalografska snimka mikrostrukture Ni-Hard 4 u lijevanom stanju, povećanje 500x, b) snimka M_7C_3 karbida napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM), povećanje 1200x [2]



Slika 9. Snimke sekundarnih M_3C karbida u Ni-Hard 4 napravljene pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM): a) brzo hlađenje do sobne temperature, b) sporo hlađenje do sobne temperature [2]

Tijekom toplinske obrade većina austenita transformira se u martenzit i bainit, a ujedno dolazi i do povećanja udjela sekundarnih karbida u mikrostrukturi. Udio zaostalog austenita nakon toplinske obrade obično iznosi 10 do 20 % [4].

Ni-Hard 4 sadrži veći udio kroma, nikla i silicija od Ni-Hard 1 i 2 (tablice 3 i 4). Udio kroma obično iznosi oko 9 %, udio nikla oko 6 %, a udio silicija kreće se oko 2 % [4]. Navedeni udjeli kroma, nikla i silicija u kombinaciji s udjelom ugljika u granicama od 2,5 do 3,5 % rezultiraju stvaranjem M_7C_3 karbida eutektičnom reakcijom tijekom skrućivanja, a ne M_3C karbida. Po pitanju žilavosti, M_7C_3 karbidi su povoljniji od M_3C karbida jer imaju drugačiju morfologiju i manju međusobnu povezanost.

Karbid M_7C_3 također je mješoviti karbid, tj. sadrži više karbidotvornih elemenata. M_7C_3 karbid sadrži najviše kroma, te određeni udio željeza, molibdena, vanadija i mangana, što ovisi o kemijskom sastavu taline [2]. Tvrdoća M_7C_3 karbida varira od 1000 do 1800 HV [2].

3.3.1. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva Ni-Hard 4

Udio karbida i struktura metalne osnove Ni-Hard 4 prvenstveno ovise o njegovom kemijskom sastavu.

Udio **ugljika** u Ni-Hard 4 nalazi se u granicama između 2,5 i 3,5 % (tablice 3 i 4) i određuje volumni udio eutektičnih karbida u mikrostrukturi. Volumni udio karbida iznosi oko 20 % pri udjelu C od 2,5 %, odnosno 28 % pri udjelu ugljika od 3,5 %, što je manje nego u Ni-Hard 1 i 2 [4]. Zbog nižeg udjela i štapičaste morfologije karbida, Ni-Hard 4 ima veću žilavost od Ni-Hard 1 i 2.

Krom ima tri uloge u Ni-Hard 4: formira eutektične M_7C_3 karbide (potrebni udio iznosi od 8 do 10 %), sprječava grafizitizirajući učinak silicija i u određenoj mjeri povećava prokaljivost (samo onaj krom koji se nalazi u metalnoj osnovi) [4]. Povećanjem udjela kroma > 10 % otežava se pretvorba zaostalog austenita u martenzit tijekom toplinske obrade.

Nikal je neophodan za dobivanje odgovarajuće prokaljivosti. Dodatak ovisi o debljini stijenke odljevka. Minimalno 5 % nikla je potrebno za izbjegavanje perlita tijekom hlađenja odljevka u kalupu ili tijekom toplinske obrade [4]. Udjeli nikla > 6,5 % rezultiraju značajnim povećanjem stabilnosti austenita, što nije povoljno za daljnju toplinsku obradu. Zbog toga se ne preporučuje povećanje udjela nikla iznad navedenog udjela, već dodatak molibdena uz nikal u cilju dobivanja odgovarajuće prokaljivosti.

Silicij je neophodan za nastanak štapićastih M_7C_3 karbida. Zbog toga se njegov udio u Ni-Hard 4 kreće u granicama od 1,8 do 2 %, što je znatno više nego u Ni-Hard 1 i 2 [2, 4]. Pri 9 % kroma i 3 % ugljika, potreban udio silicija iznosi 1,7 %. Ako je udio silicija niži, pored M_7C_3 karbida doći će do stvaranja i M_3C karbida, što negativno utječe na žilavost i otpornost na abraziju. Minimalno potrebni dodatak silicija smanjuje se s povećanjem udjela kroma i nikla te smanjenjem udjela ugljika. Povećanjem udjela silicija > 2 % može dovesti do stvaranja grafita u debelim stijenkama, posebno ako je nizak udio kroma i visok udio ugljika. Osim što utječe na tip karbida, silicij potpomaže pretvorbu austenita u martenzit.

Mangan povećava prokaljivost. Međutim, istovremeno povećava stabilnost austenita, što nije povoljno. Zbog toga udio mangana treba održavati u intervalu od 0,4 do 0,6 % [4].

Molibden povećava prokaljivost bez da značajnije stabilizira austenit. Za povećanje prokaljivosti debelostijenih odljevaka može se dodati 0,5 do 1,5 % molibdena, što je povoljnije od povećanja udjela nikla > 6,5 % [4].

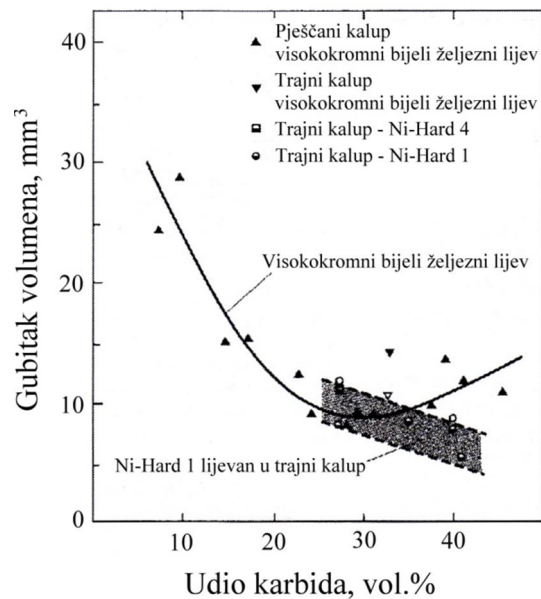
Sumpor i **fosfor** štetno utječu na žilavost Ni-Hard 4 zbog čega se njihov udio mora održavati što nižim [4]. Otpornost na abraziju smanjuje se s porastom udjela sumpora.

3.4. Proizvodnja Ni-Hard bijelih željeznih ljevova

Izrada kalupa. Kalupi i jezgre koje se upotrebljavaju za lijevanje odljevaka od sivog, nodularnog i čeličnog lijeva mogu se upotrijebiti i za lijevanje odljevaka od Ni-Hard bijelih željeznih ljevova [4]. Napajanje odljevaka i iskorištenje taline mogu se poboljšati postavljanjem hladila u kalup te primjenom izolacijskih ili egzotermnih košuljica oko pojila. Da bi se pojilo lakše uklonilo s odljevka preporučuje se upotreba odlomnih jezgri na spoju pojila i odljevka. Odljevci od Ni-Hard 1 i 2 jednostavnog oblika bez jezgri mogu se proizvesti lijevanjem u trajne kalupe [4].

Lijevanjem Ni-Hard 1 i 2 u pješčani kalup u koji je ugrađeno hladilo ili u trajni kalup postižu se velike brzine hlađenja i sitnozrnata struktura odljevaka. Udio ugljika i silicija u talini može biti viši ako se lijevanje provodi u trajni kalup bez opasnosti od stvaranja grafita, što u konačnici značajno povećava otpornost na abraziju (slika 10). Za razliku od Ni-Hard 1 i 2, lijevanje Ni-Hard 4 u trajne kalupe ili pješčane kalupe uz primjenu hladila ne donosi nikakvu korist, čak štoviše smanjuje otpornost na abraziju [4].

Volumno stezanje tijekom skrućivanja Ni-Hard bijelih željeznih ljevova iznosi 4,5 do 6 % [2]. Napajanje je slično napajanju čeličnih ljevova. Razvodnike, ušća i pojila treba pravilno dimenzionirati i postaviti tako da se ostvari usmjereno skrućivanje. Stezanje u krutom stanju koje treba uzeti u obzir pri izradi modela kreće se od 1 do 2 % za Ni-Hard 1 i 2, odnosno 1,5 do 2,5 % za Ni-Hard 4 [2]. Brzina hlađenja odljevaka u kalupu treba biti što je moguće niža, posebno kada započne pretvorba austenita u martenzit (~ 250 °C u Ni-Hard 1, odnosno ~ 100 °C u Ni-Hard 4) [4].



Slika 10. Utjecaj volumnog udjela karbida na otpornost na abraziju Ni-Hard 1, Ni-Hard 4 i visokokromnog bijelog željeznog ljeva lijevanih u pješčane i trajne kalupe [4]

Izrada taline i lijevanje. Indukcijska peć je najčešće upotrebljavani agregat za izradu talina Ni-Hard bijelih željeznih ljevova. Kao uložni materijal upotrebljava se čelični otpad, bijelo sirovo željezo s niskim udjelom silicija, sumpora i fosfora, povratni ili otpadni Ni-Hard te potrebne ferolegure. Taljenje treba što brže provesti. Temperatura taline treba biti što je moguće niža da bi se izbjegla prekomjerna oksidacija taline (kisik negativno utječe na žilavost odljevaka). Talina se obično ispušta iz peći s temperaturom od 1450 do 1480 °C [4]. Temperatura lijevanja obično se kreće u granicama od 1350 do 1400 °C [4]. Izrada taline može se provesti i u elektrolučnim pećima. Za razliku od indukcijske peći, u elektrolučnoj peći može se provesti rafinacija.

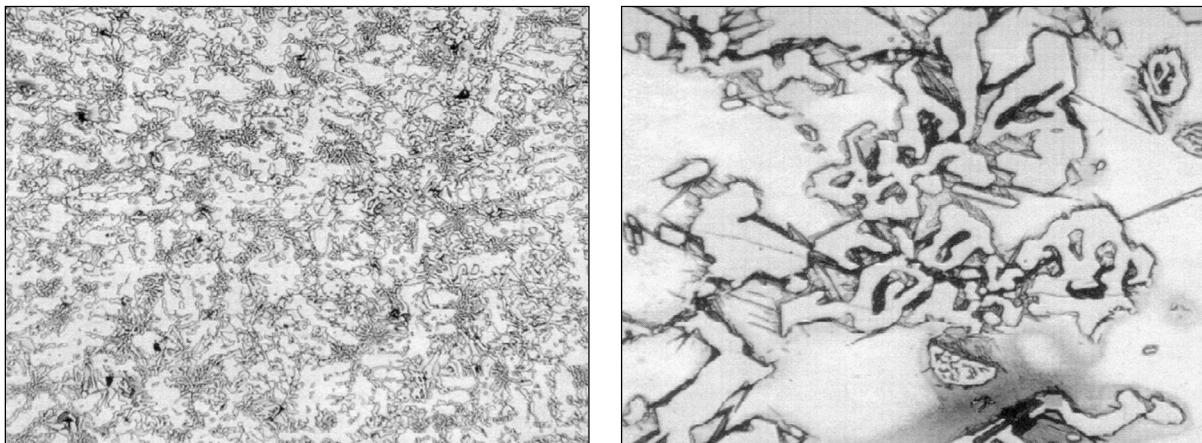
3.5. Toplinska obrada Ni-Hard bijelih željeznih ljevova

Gotovo svi odljevci od Ni-Hard bijelih željeznih ljevova toplinski se obrađuju. Koriste se sljedeće toplinske obrade [2, 4, 7]:

- **Popuštanje u jednom koraku.** Provodi se na temperaturama od 225 do 275 °C u trajanju od najmanje 4 h (obično 4 -12 h), nakon čega slijedi hlađenje u peći. Postižu se sljedeći učinci: smanjuje se krhkost martenzita, uklanjaju se zaostala naprezanja, povećava se čvrstoća i udarna žilavost za 50 do 80 %. Tijekom hlađenja s temperature popuštanja može doći do stvaranja dodatne manje količine martenzita u metalnoj osnovi. Ova toplinska obrada ne smanjuje tvrdoću i otpornost na abraziju.
- **Toplinska obrada u dva koraka.** U prvom koraku odljevak se zagrijava na 450 °C i zadržava na toj temperaturi 10 do 20 h. Time se postiže izlučivanje sekundarnih M_3C karbida, što rezultira smanjenjem udjela pojedinih elemenata u austenitu, prvenstveno ugljika. Zbog toga dolazi do porasta M_s temperature, što omogućuje pretvorbu zaostalog austenita u martenzit tijekom hlađenja odljevka do sobne temperature na zraku ili u peći. U drugom koraku odljevak se zagrijava na 275 °C radi popuštanja

martenzita i uklanjanja zaostalih naprezanja. Martenzitu koji je već prisutan u mikrostrukturi odljevka u lijevanom stanju opast će tvrdoća. Ovakvom toplinskom obradom u određenoj mjeri snižava se tvrdoća, ali se značajno povećava otpornost na ponavljajuće udarno opterećenje.

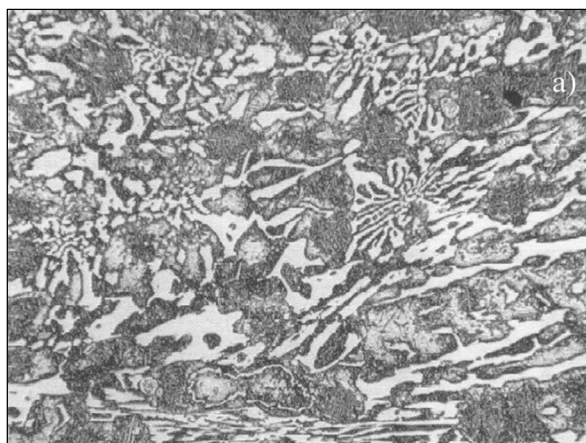
- **Visokotemperaturna toplinska obrada** bazira se na destabilizaciji austenita, odnosno smanjenju udjela pojedinih elemenata u njemu. Odljevak se zagrijava u austenitno područje, tj. na temperaturu od 700 do 750 °C i zadržava na toj temperaturi 2 h u slučaju Ni-Hard 1 i 2, odnosno zagrijava se na 750 do 850 °C i zadržava na toj temperaturi 8 h ako se radi o Ni-Hard 4. Tijekom tog perioda dolazi do izlučivanja sekundarnih M_3C karbida u austenitu. Zbog toga se u austenitu smanjuje udio elemenata koji su formirali sekundarne karbide, od kojih posebno treba istaknuti ugljik jer ima najveći utjecaj na M_s temperaturu. Prema tome, izlučivanje sekundarnih karbida rezultira povećanjem M_s temperature, što potpomaže pretvorbu austenita u martenzit tijekom sporog hlađenja do sobne temperature. Pored toga, tijekom sporog hlađenja dolazi do dodatnog izlučivanja sekundarnih karbida što dodatno povećava M_s temperaturu. Zbog velike prokaljivosti, brzina hlađenja odljevaka od Ni-Hard 4 može biti < 20 K/h kroz temperaturno područje od 600 do 300 °C u bez da dođe do stvaranja perlita. Ovo je potpuno drugačiji način hlađenja od onog u procesu toplinske obrade za povećanje tvrdoće visokokromnih bijelih željeznih ljevova i čelika, jer se kod njih zahtijeva brzo hlađenje kako bi se izbjegla pretvorba u perlit. Nakon visokotemperaturne toplinske obrade provodi se popuštanje na temperaturama od 200 do 270 °C radi uklanjanja zaostalih naprezanja. Visokotemperaturnom toplinskom obradom povećava se udio martenzita i sekundarnih karbida te smanjuje udio zaostalog austenita, što u konačnici rezultira značajnim povećanjem tvrdoće i otpornosti na abraziju. Na slikama 11 do 13 jasno se mogu vidjeti učinci koji se postižu visokotemperaturnom toplinskom obradom Ni-Hard 4.



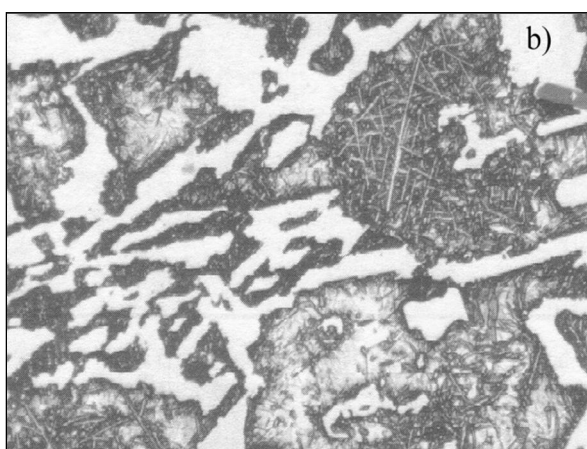
a)

b)

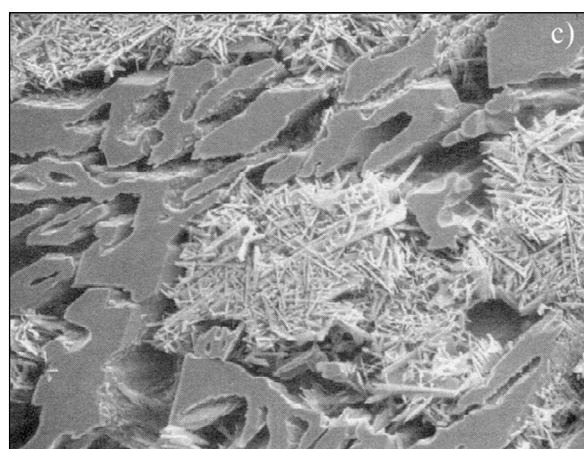
Slika 11. Metalografske snimke mikrostrukture Ni-Hard 4 u lijevanom stanju pri povećanju 100x (a) i 1000x (b) (kemijski sastav: 2,9 %C, 1,8 %Si, 5,8 %Ni, 1 %Mn, 8,4 %Cr) [2]



a)



b)

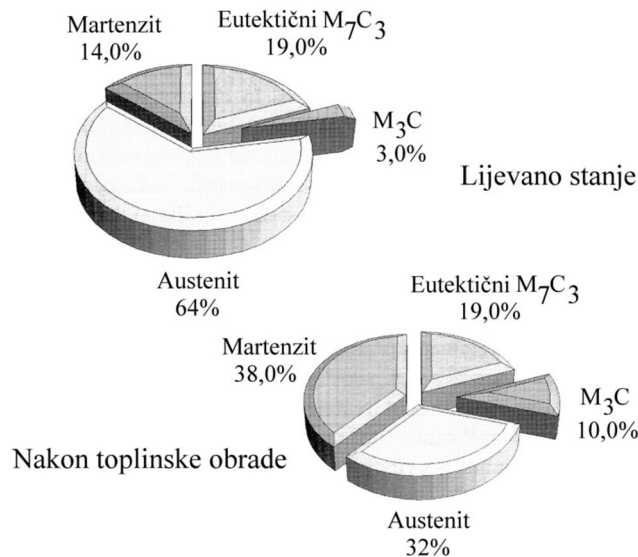


c)

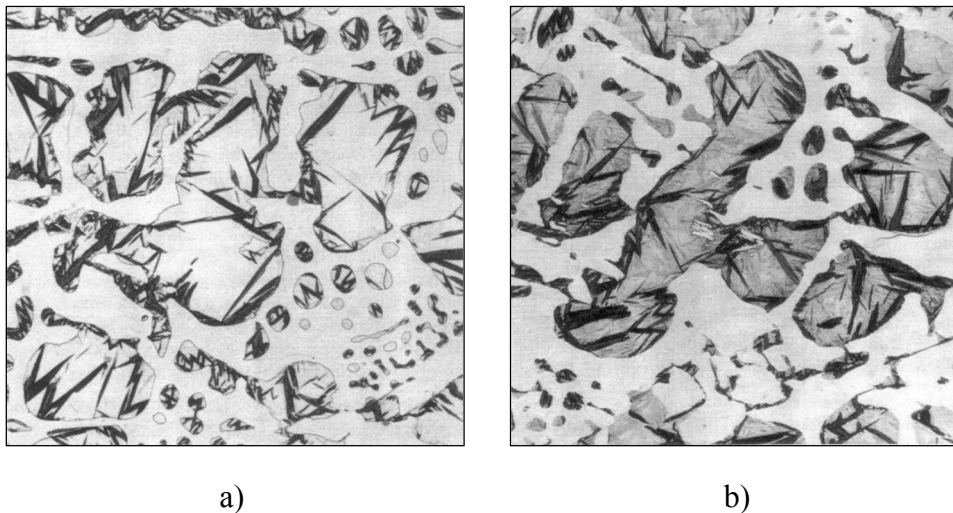
Slika 12. Mikrostruktura Ni-Hard 4 sa slike 11 nakon visokotemperaturne toplinske obrade (destabilizacija austenita na 750 °C): a) metalografska snimka mikrostrukture pri povećanju 500x, b) metalografska snimka mikrostrukture pri povećanju 1000x, c) snimka eutektičnih M_7C_3 karbida i sekundarnih M_3C karbida napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom (povećanje 1200x) [2]

Na odljevke od Ni-Hard 1 i 2 obično se primjenjuje samo popuštanje u jednom koraku. Ostale navedene toplinske obrade koriste se samo za specijalne namjene. Odljevci od Ni-Hard 4 uvijek se podvrgavaju visokotemperaturnoj toplinskoj obradi zbog velike količine zaostalog austenita u lijevanoj mikrostrukтури.

Povećanje tvrdoće kompleksnih odljevaka od Ni-Hard 1, 2 i 4 u koje se toplinskom obradom može unijeti dodatna količina naprezanja može se provesti **dubokim hlađenjem**, jer se na taj način doseže temperatura završetka pretvorbe austenita u martenzit (M_f), što dovodi do povećanja udjela martenzita u metalnoj osnovi [2, 4, 7]. Hlađenjem odljevka na temperaturi od -70 do -185 °C u trajanju od ½ do 1 h obično se povećava tvrdoća za 100 HB. Tako niske temperature mogu se postići primjenom tekućeg dušika. Odljevak se ne uranja u tekući dušik već se izlaže njegovim parama u izoliranoj komori. Nakon dubokog hlađenja odljevak se zagrijava na temperaturu od 220 °C radi uklanjanja zaostalih naprezanja. Na slici 14 prikazana je mikrostruktura Ni-Hard 1 prije i nakon dubokog hlađenja.



Slika 13. Udjeli eutektičnih M_7C_3 karbida, sekundarnih M_3C karbida, martenzita i zaostalog austenita u mikrostrukturi Ni-Hard 4 u lijevanom stanju (slika 11) i nakon toplinske obrade (slika 12). Zbog promjena u mikrostrukturi tvrdoća se povećala sa 450 HB koliko je iznosila u lijevanom stanju na 700 HB nakon provedene visokotemperaturne toplinske obrade [2]

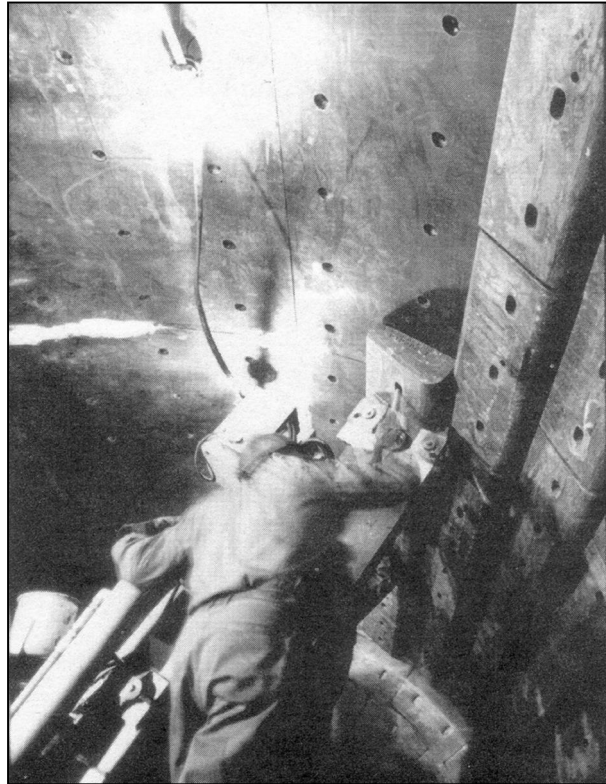


Slika 14. Mikrostruktura Ni-Hard 1 željeznog lijeva prije (a) i nakon (b) dubokog hlađenja [2]

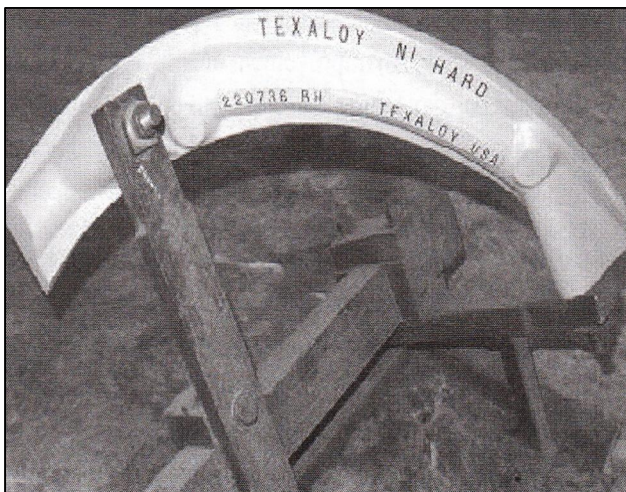
3.6. Primjena Ni-Hard bijelih željeznih ljevova

Ni-Hard 1 bijeli željezni ljevovi pogodni su za aplikacije gdje se zahtijeva visoka otpornost na abraziju, a otpornost na udarno opterećenje od sekundarnog je značaja. Ni-Hard 2 ima nižu otpornost na abraziju od Ni-Hard 1, ali višu žilavost zbog čega je pogodan za komponente koje su izložene ponavljajućem udarnom opterećenju [2, 7]. Ni-Hard 4 ima višu čvrstoću i žilavost zbog čega je pogodan za komponente koje su izložene ostrim radnim uvjetima. Zbog višeg udjela kroma imaju veću otpornost na koroziju, što je također značajno za pojedine aplikacije. Tipična područja primjene Ni-Hard 1, 2 i 4 su: dijelovi drobilica,

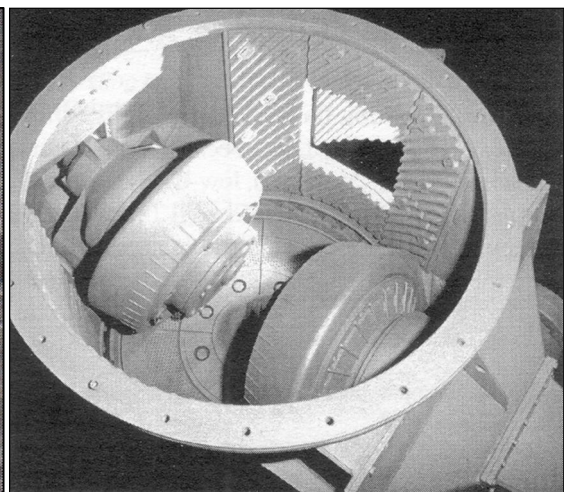
mlinova i mješača, svrdla, lopatice u miješalicama za beton, sapnice, dijelovi pumpi koji su izloženi jakom abrazivnom djelovanju itd. (slika 15) [2, 7]



a)



b)



c)

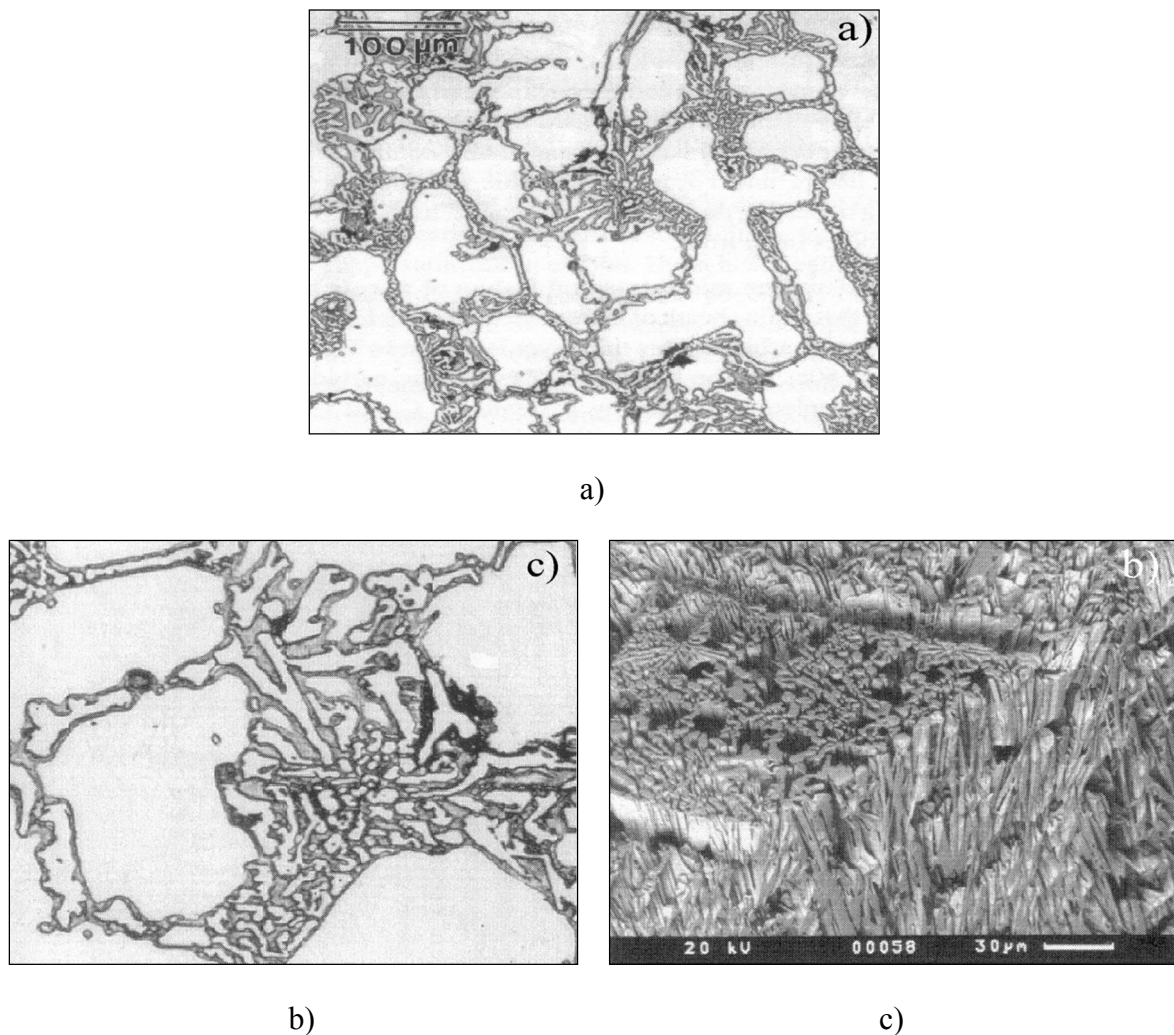
Slika 15. Odljevci od Ni-Hard bijelih željeznih ljevova: a) oplata u kugličnom mlinu (Ni-Hard 1), b) lopatica u miješalici za beton (Ni-Hard 1), c) valjci i oplata u drobilici za usitnjavanje ugljena (Ni-Hard 4) [2]

Ni-Hard 3 je specijalno razvijena kvaliteta za lijevanje u trajne kalupe. Uglavnom se upotrebljavaju za proizvodnju kugli u mlinovima za usitnjavanje ili drobljenje [2, 7].

4. BIJELI ŽELJEZNI LJEVOMI VISOKOLEGIRANI KROMOM

Bijeli željezni ljevovi visokolegirani kromom, odnosno visokokromni bijeli željezni ljevovi sadrže > 4 % legirnih elemenata te imaju bolju kombinaciju otpornosti na abraziju i žilavosti od svih drugih bijelih željeznih ljevova [1, 2, 7]. Varijacijama u kemijskom sastavu i toplinskoj obradi mogu se dobiti različite mikrostrukture, a time i širok spektar svojstava visokokromnih bijelih željeznih ljevova, što im omogućuje široku primjenu.

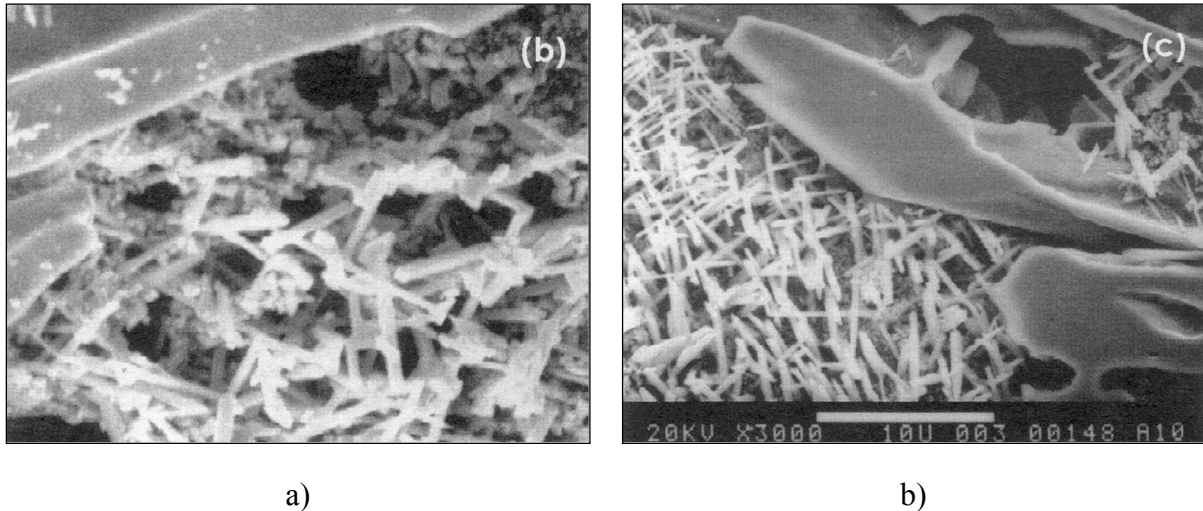
Mikrostruktura visokokromnih bijelih željeznih ljevova u lijevanom stanju sastoji se od M_7C_3 karbida štapičaste morfologije i metalne osnove koja se najčešće sastoji od zaostalog austenita ili zaostalog austenita i martenzita (slika 16) [1, 2, 7].



Slika 16. a) i b) metalografske snimke mikrostrukture visokokromnog bijelog željeznog lijeva koji sadrži 2,2 %C i 18,4 %Cr u lijevanom stanju (može se vidjeti tanak sloj martenzita oko eutektičnih M_7C_3 karbida), c) snimka mreže M_7C_3 karbida napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) [2]

Udio zaostalog austenita je visok zbog visokog udjela legirnih elemenata. Glavina karbida nastaje eutektičnom reakcijom tijekom skrućivanja. Osim navedenih konstituenata, u mikrostrukturi visokokromnih bijelih željeznih ljevova može biti prisutan i određeni udio

sekundarnih M_7C_3 ili $M_{23}C_6$ karbida štapičaste morfologije, što ovisi o kemijskom sastavu lijeva (slika 17). Ti karbidi nastaju nakon skrućivanja ili tijekom toplinske obrade. $M_{23}C_6$ karbidi sadrži najviše kroma, te određeni udio željeza, molibdena, mangana, vanadija i volframa, što ovisi o kemijskom sastavu taline [2, 9]. Nastaju pri visokim udjelima kroma (> 25 %), a njihova tvrdoća iznosi oko 1000 HV [2]. Budući da je udio kroma > 10 %, tijekom skrućivanja ne dolazi do stvaranja M_3C karbida [1].



Slika. 17. a) snimka sekundarnih $M_{23}C_6$ karbida napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM, povećanje 10000x), b) snimka sekundarnih M_7C_3 karbida napravljena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM, povećanje 3000x) [2]

Za postizanje visoke tvrdoće i otpornost na abraziju, potrebno je provesti toplinsku obradu radi povećanja udjela martenzita u metalnoj osnovi.

4.1. Vrste i svojstva visokokromnih bijelih željeznih ljevova

Visokokromni bijeli željezni ljevovi mogu se svrstati u tri skupine ovisno o kemijskom sastavu, mikrostrukturi i primjeni [1, 2, 7, 9]:

- visokokromni bijeli željezni ljevovi koji sadrže 11 do 23 % kroma i do 3 % molibdena, dodatno legirani s niklom i bakrom (Klasa II prema normi ASTM A 532/A 532M),
- visokokromni bijeli željezni ljevovi koji sadrže 23 do 28 % kroma i do 3 % molibdena, dodatno legirani s niklom i bakrom (Klasa III prema normi ASTM A 532/A 532M),
- specijalni visokokromni bijeli željezni ljevovi koji imaju poboljšanu otpornost na koroziju ili visoke temperature.

U tablicama 7 i 8 prikazane su vrste visokokromnih bijelih željeznih ljevova i njihovi kemijski sastavi prema normama ASTM A 532/A 532M i EN 12513. U tablici 9 prikazana su mehanička svojstva nekoliko visokokromnih bijelih željeznih ljevova.

Tablica 7. Vrste i kemijski sastavi visokokromnih bijelih željeznih ljevova otpornih na abraziju prema ASTM A 532/A 532M [2]

Klasa	Tip	Oznaka	Kemijski sastav, mas.%								
			C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	S
II	A	12 %Cr	2,0-3,3	maks 2,0	maks 1,5	maks 2,5	11,0-14,0	maks 3,0	maks 1,2	maks 0,1	maks 0,06
II	B	15 %Cr-Mo	2,0-3,3	maks 2,0	maks 1,5	maks 2,5	14,0-18,0	maks 3,0	maks 1,2	maks 0,1	maks 0,06
II	D	20 %Cr-Mo	2,0-3,3	maks 2,0	1,0-2,2	maks 2,5	18,0-23,0	maks 3,0	maks 1,2	maks 0,1	maks 0,06
III	A	25 %Cr	2,0-3,3	maks 2,0	maks 1,5	maks 2,5	23,0-30,0	maks 3,0	maks 1,2	maks 0,1	maks 0,06

Tablica 8. Vrste i kemijski sastavi visokokromnih bijelih željeznih ljevova otpornih na abraziju prema EN 12513 [2]

Oznaka	Broj	Kemijski sastav, mas.%									Ekv. na ASTM A 532/A 532 M
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	
EN-GJN-HV600(XCr11)	EN-JN 3019	1,8-3,6	1,0	0,5-1,5	0,08	0,08	11,0-14,0	2,0	3,0	1,2	Klasa II, Tip A
EN-GJN-HV600(XCr14)	EN-JN 3029	1,8-3,6	1,0	0,5-1,5	0,08	0,08	14,0-18,0	2,0	3,0	1,2	Klasa II, Tip B
EN-GJN-HV600(XCr18)	EN-JN 3039	1,8-3,6	1,0	0,5-1,5	0,08	0,08	18,0-23,0	2,0	3,0	1,2	Klasa II, Tip D
EN-GJN-HV600(XCr23)	EN-JN 3049	1,8-3,6	1,0	0,5-1,5	0,08	0,08	23,0-26,0	2,0	3,0	1,2	Klasa III, Tip A

Tablica 9. Mehanička svojstva visokokromnih bijelih željeznih ljevova [2]

Kemijski sastav	Tvrdoća, HB	Svojna čvrstoća, R_{ms} , MPa	Modul elastičnosti, E , GPa
15Cr-3Mo (3,6 %C)	720	490	215-230
20Cr-2Mo-1Cu (2,9 %C)	740	689	215-230
27Cr (2,4 %C)	650	945	215-230
27Cr (3,1 %C)	700	938	215-230

Odljevci od visokokromnih bijelih željeznih ljevova koji sadrže 11 do 23 % kroma i do 3 % molibdena isporučuju se u lijevanom stanju s austenitnom ili austenitno-martenzitnom metalnom osnovom ili u toplinski obrađenom stanju s martenzitnom metalnom osnovom radi postizanja maksimalne otpornosti na abraziju i žilavosti. Smatraju se najtvrdim bijelim željeznim ljevovima.

Visokokromni bijeli željezni ljevovi koji sadrže 23 do 28 % kroma i do 3 % molibdena imaju nižu tvrdoću od visokokromnih bijelih željeznih ljevova koji sadrže 11 do 23 % kroma i do 3 % molibdena. Koriste se za odljevke od kojih se pored otpornosti na abraziju zahtijeva i otpornost na koroziju.

4.2. Utjecaj kemijskog sastava na mikrostrukturu i svojstva visokokromnih bijelih željeznih ljevova

Kemijski sastav ima ključnu ulogu u formiranju mikrostrukture visokokromnih bijelih željeznih ljevova.

U visokokromnim bijelim željeznim ljevovima volumni udio karbida u mikrostrukтури iznosi 20 do 40 % [9]. S povećanjem udjela **ugljika** povećava se volumni udio karbida i tvrdoća, ali se smanjuje žilavost. Utjecaj ugljika na povećanje volumnog udjela karbida znatno je veći od utjecaja kroma [10]:

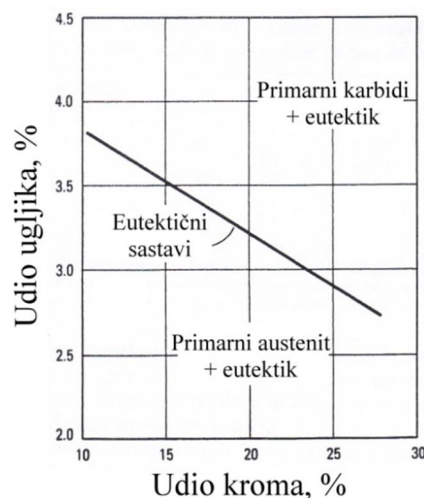
$$\text{Volumni udio eutektičnih karbida} = 12,33 \cdot \%C + 0,55 \cdot \%Cr - 15,2, \text{ vol.}\% \quad (2)$$

(točnost = $\pm 2,1$ vol.%)

Udio ugljika treba prilagoditi udjelu kroma kako bi se izbjeglo izlučivanje primarnih M_7C_3 karbida tijekom skrućivanja jer negativno utječu na žilavost (radi se o karbidima koji nastaju prije eutektične reakcije) [1, 7]. Radi izbjegavanja izlučivanja primarnih M_7C_3 karbida udio ugljika i kroma potrebno je prilagoditi prema sljedećoj formuli [2, 7]:

$$\%C + \%Cr/15 \leq 4,5 \quad (3)$$

Dijagram na slici 18 također omogućuje određivanje optimalnog udjela ugljika ovisno o udjelu kroma.



Slika 18. Odnos između udjela kroma, udjela ugljika i eutektičnog sastava u visokokromnim bijelim željeznim ljevovima [7]

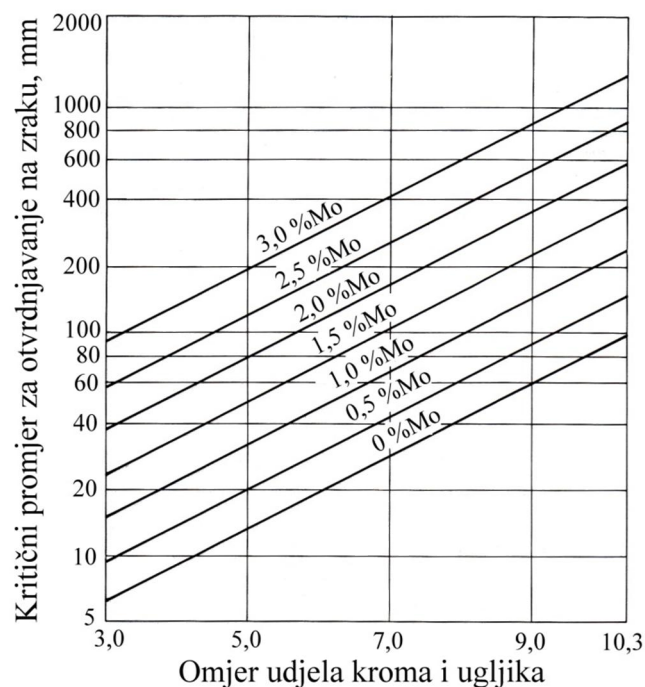
Krom formira M_7C_3 karbide, povećava otpornost na koroziju i stabilizira strukturu visokokromnih bijelih željeznih ljevova na visokim temperaturama [1]. Veći dio kroma nalazi se u karbidima, a ostatak u metalnoj osnovi. Udio kroma otopljenog u metalnoj osnovi može se procijeniti pomoću sljedeće formule [9]:

$$\text{Maseni udio kroma u metalnoj osnovi} = 1,95 \cdot (\%Cr/\%C) - 2,47 \%, \text{ mas.}\% \quad (4)$$

S obzirom da je ukupni udio kroma u visokokromnim bijelim željeznim ljevovima visok, udio kroma u metalnoj osnovi je veći nego kod Ni-Hard željeznih ljevova, što znači da

u određenoj mjeri povećava prokaljivost. Međutim, taj učinak je nedovoljan zbog čega je potrebno dodatno legiranje elementima koji povećavaju prokaljivost. Treba uzeti u obzir da krom snižava M_s temperaturu (jednadžba 1), što znači da se udio zaostalog austenita povećava s porastom udjela kroma u metalnoj osnovi.

Visokokromni bijeli željezni ljevovi moraju imati dovoljno veliku prokaljivost da se hlađenjem na zraku tijekom toplinske obrade izbjegne stvaranje perlita. Veće brzine hlađenja nisu pogodne jer mogu dovesti do stvaranja pukotina u odljevcima zbog nastalih velikih naprezanja. **Nikal, bakar i mangan** povećavaju prokaljivost visokokromnih bijelih željeznih ljevova. Međutim, prevelike količine tih elemenata rezultiraju povećanom količinom zaostalog austenita u metalnoj osnovi jer snižavaju M_s temperaturu (jednadžba 1). S druge strane, **molibden** ima vrlo mali učinak na M_s temperaturu, a samim tim i na količinu zaostalog austenita (jednadžba 1). Zbog toga se molibden koristi kao primarni element za povećanje prokaljivosti i sprječavanje stvaranja perlita u visokokromnim bijelim željeznim ljevovima [1, 2, 9]. Sposobnost molibdena da poboljša prokaljivost visokokromnih bijelih željeznih ljevova ovisi o omjeru udjela kroma i ugljika (slika 19). Pri dodatku molibdena treba uzeti u obzir da on stvara vlastite karbide Mo_2C čija tvrdoća iznosi 1500 do 1800 HV te da se može nalaziti u ostalim karbidima, poput M_7C_3 ili $M_{23}C_6$ [2, 9]. To znači da se samo dio dodane količine otapa u metalnoj osnovi i poboljšava prokaljivost.



Slika 19. Utjecaj molibdena na prokaljivost visokokromnih bijelih željeznih ljevova s različitim omjerima udjela kroma i ugljika [1]

Efikasnost molibdena povećava se ako se koristi u kombinaciji s niklom, bakrom i kromom [1]. Potrebni dodaci elemenata u cilju dobivanja odgovarajuće prokaljivosti prikazani su u tablicama 10 i 11.

Tablica 10. Minimalni udjeli legirnih elemenata u visokokromnim bijelim željeznim ljevovima ovisno o debljini stjenke odljevka da bi se izbjeglo stvaranje perlita tijekom hlađenja u kalupu [1]

Kvaliteta prema ASTM A 532	%Cr ¹⁾	%C ¹⁾	Debljina ploče ili radijus valjkastog uzorka		
			25 mm	50 mm	100 mm
IIB	14,0-18,0	2,0	1,0 %Mo	1,5 %Mo	1,5 %Mo+1,0 %(Ni+Cu)
		3,5	2,0 %Mo	2,5 %Mo	2,5 %Mo+1,0 %(Ni+Cu)
IID	18,0-23,0	2,0	0,5 %Mo	1,0 %Mo	1,0 %Mo+1,0 %(Ni+Cu)
		3,2	1,5 %Mo	2,0 %Mo	2,0 %Mo+1,0 %(Ni+Cu)
IIIA	23,0-28,0	2,0	-	0,5 %Mo	1,0 %Mo
		3,0	1,0 %Mo	1,5 %Mo	1,5 %Mo+1,0 %(Ni+Cu)

¹⁾ taline sadrže 0,6 % silicija i 0,8 % mangana

Tablica 11. Minimalni udjeli legirnih elemenata u visokokromnim bijelim željeznim ljevovima ovisno o debljini stjenke odljevka da bi se izbjeglo stvaranje perlita tijekom toplinske obrade [1]

Kvaliteta prema ASTM A 532	%Cr ¹⁾	%C ¹⁾	Debljina ploče ili radijus valjkastog uzorka		
			25 mm	50 mm	100 mm
IIB	14,0-18,0	2,0	1,5 %Mo	1,5 %Mo + 0,5 %(Ni+Cu)	2,0 %Mo+1,0 %(Ni+Cu)
		3,5	3,0 %Mo	2,0 %Mo+ 1,0 %(Ni+Cu)	2,5 %Mo+1,0 %(Ni+Cu) ²⁾
IID	18,0-23,0	2,0	1,0 %Mo	2,0 %Mo	2,0 %Mo + 0,5 %(Ni+Cu)
		3,2	1,5 %Mo	2,0 %Mo + 0,7 %(Ni+Cu)	2,0 %Mo+1,2 %(Ni+Cu) ²⁾
IIIA	23,0-28,0	2,0	0,5 %Mo	1,5 %Mo	1,5 %Mo+ 0,5 %(Ni+Cu)
		3,0	1,5 %Mo	1,5 %Mo+ 0,6 %(Ni+Cu)	1,5 %Mo+1,2 %(Ni+Cu) ²⁾

¹⁾ taline sadrže 0,6 % silicija i 0,8 % mangana

²⁾ nikal i bakar promoviraju zaostali austenit zbog čega se njihov sumarni udio ograničava na maks. 1,2 %. Mangan se ponaša slično zbog čega se ograničava na maks. 1,0 %.

Dodatkom **volframa** u količini oko 1 % povećava se tvrdoća i otpornost na abraziju visokokromnih bijelih željeznih ljevova bez štetnog utjecaja na žilavost [11]. Slični učinci postižu se dodatkom 2 do 3 % **niobija** [2, 12].

Silicij se u visokokromnim bijelim željeznim ljevovima obično ograničava na maks. 1 % jer veći udjeli mogu povećati stvaranje perlita i smanjiti prokaljivost [13, 14]. Međutim, s obzirom da smanjuje topljivost ugljika u austenitu, a samim tim i udio ugljika u metalnoj osnovi, silicij povećava M_s temperaturu te temperaturu završetka stvaranja martenzita (M_f). Taj učinak može se iskoristiti za povećanje tvrdoće tijekom dubokog hlađenja. U tom slučaju udio silicija održava se u granicama od 1,5 do 2 %, s tim da se udio nikla mora dodatno povećati da se spriječi stvaranje perlita.

Sumpor i **fosfor** negativno utječu na žilavost visokokromnih bijelih željeznih ljevova zbog čega se njihov udio mora održavati što nižim.

4.3. Proizvodnja visokokromnih bijelih željeznih ljevova

Izrada kalupa. Kalupi za lijevanje odljevaka od visokokromnih bijelih željeznih ljevova izrađuju se od istih materijala i istim postupcima kao i kalupi za lijevanje odljevaka od željeznih ljevova s grafitom ili od čeličnih ljevova [2, 15]. Isto vrijedi i za jezgre. Lijevanje u trajne kalupe ne donosi nikakve koristi kod proizvodnje odljevaka od visokokromnih bijelih željeznih ljevova. Premda se na taj način smanjuje veličina zrna u strukturi, otpornost na abraziju neće se poboljšati, čak se može i smanjiti [2].

Visokokromni bijeli željezni ljevovi osjetljivi su na stvaranje pukotina. Zbog toga treba izbjegavati male radijuse na modelima i nagle promjene presjeka jer se na taj način smanjuje mogućnost stvaranja pukotina. Stezanje u krutom stanju, odnosno modelarsko stezanje, kreće se od 1,3 do 2,5 % (obično se uzima 2 %) [2]. Točan iznos stezanja u znatnoj mjeri ovisi o konačnoj strukturi metalne osnove.

Uljevni sustav i sustav napajanja mogu se konstruirati po istim pravilima kao kod Ni-Hard bijelih željeznih ljevova. Hladila se mogu postaviti u kalupe radi postizanja usmjerenog skrućivanja prema pojilima.

Izrada taline i lijevanje. Visokokromni bijeli željezni ljevovi najčešće se proizvode u indukcijskim i elektrolučnim pećima [2]. Kao uložni materijali upotrebljava se niskougljični čelični otpad, povratni visokokromni bijeli željezni ljev, bijelo sirovo željezo s niskim udjelom silicija te potrebne ferolegure (FeCr, FeMo, FeNi, FeMn, FeSi itd.). Dugo zadržavanje u rastaljenom stanju nije pogodno jer dovodi do značajnog povećanja udjela kisika i vodika u talini.

Temperature lijevanja rijetko su više za 100 °C iznad likvidus temperature [2]. Temperatura lijevanja visokokromnog bijelog željeznog lijeva koji sadrži 3 % ugljika i 15 % kroma obično iznosi 1300 do 1400 °C. Visokokromni bijeli željezni ljev sa 23 do 28 % kroma treba lijevati s temperaturom od 1400 do 1500 °C, dok bi se kod visokokromnih bijelih željeznih ljevova sa 30 % do 35 % kroma temperatura lijevanja trebala kretati od 1450 do 1550 °C.

Istresanje odljevaka iz kalupa, odnosno kontrola brzine hlađenja ima vrlo velik utjecaj u procesu proizvodnje odljevaka od visokokromnih bijelih željeznih ljevova [1, 2]. Prerano istresanje odljevaka iz kalupa, tj. s previsokom temperaturom često dovodi do visokih zaostalih naprezanja i pukotina. Odljevci se trebaju hladiti u kalupu do sobne temperature, pogotovo ako martenzit nastaje u završnim fazama hlađenja. Mogućnost nastanka pukotina značajno se smanjuje ako se hlađenje u kalupu odvija sporo.

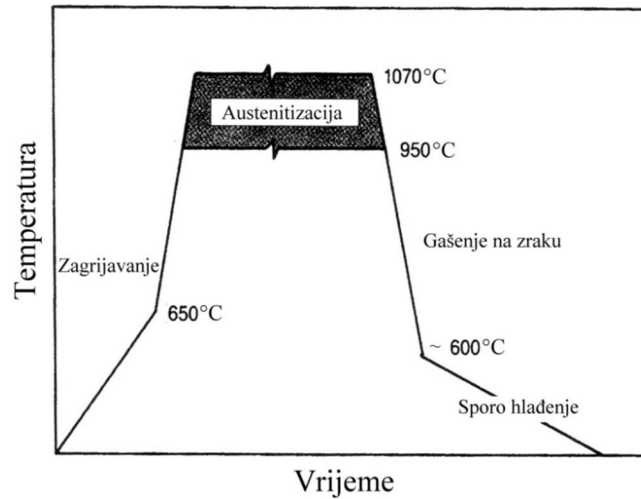
4.4. Toplinska obrada visokokromnih bijelih željeznih ljevova

Visokotemperaturnom toplinskom obradom koja se zasniva na destabilizaciji austenita povećava se otpornost na abraziju i žilavost visokokromnih bijelih željeznih ljevova [1, 2, 7]. Tijek procesa shematski je prikazan na slici 20.

Metalna osnova visokokromnih bijelih željeznih ljevova u lijevanom stanju sadrži visok udio austenita koji je stabiliziran visokim udjelom ugljika i kroma. Toplinskom obradom nastoji se destabilizirati austenit putem izlučivanja sekundarnih karbida. Na taj se način u austenitu smanjuje udio ugljika te ostalih elemenata sadržanih u sekundarnim karbidima. Zbog toga dolazi do porasta M_s i M_f temperature, što rezultira pretvorbom austenita u martenzit tijekom hlađenja s temperature austenitizacije do sobne temperature.

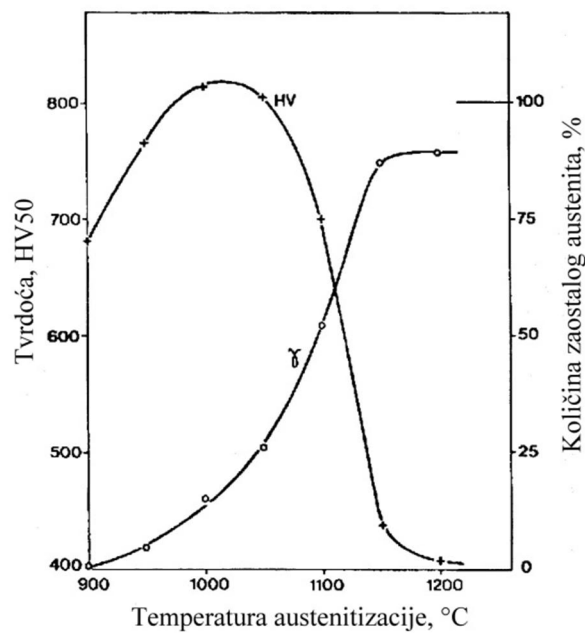
Na slici 20 može se vidjeti da se odljevci moraju zagrijati u austenitno područje i zadržati određeno vrijeme na toj temperaturi kako bi došlo do izlučivanja sekundarnih M_7C_3

ili $M_{23}C_6$ karbida u austenitu (sekundarni $M_{23}C_6$ karbidi nastaju kad je udio kroma $> 25\%$). Nakon toga slijedi hlađenje, odnosno gašenje na zraku tijekom kojeg dolazi do pretvorbe destabiliziranog austenita u martenzit. Vrlo je važno da se odljevci sporo zagrijavaju do $650\text{ }^\circ\text{C}$ kako bi se izbjeglo stvaranje pukotina. Ako se radi o odljercima koji imaju kompleksan oblik, maksimalna brzina zagrijavanja ne bi trebala biti veća od $30\text{ }^\circ\text{C/h}$. Odljevci jednostavnih oblika mogu se zagrijavati nešto većom brzinom. Nakon $650\text{ }^\circ\text{C}$ može se povećati brzina zagrijavanja.



Slika 20. Shematski prikaz visokotemperaturne toplinske obrade visokokromnih bijelih željeznih ljevova [2]

Kako bi se dobila što veća tvrdoća i što manje zaostalog austenita, vrlo je važno odabrati optimalnu temperaturu austenitizacije (slika 21), koja ovisi o kemijskom sastavu lijeva.



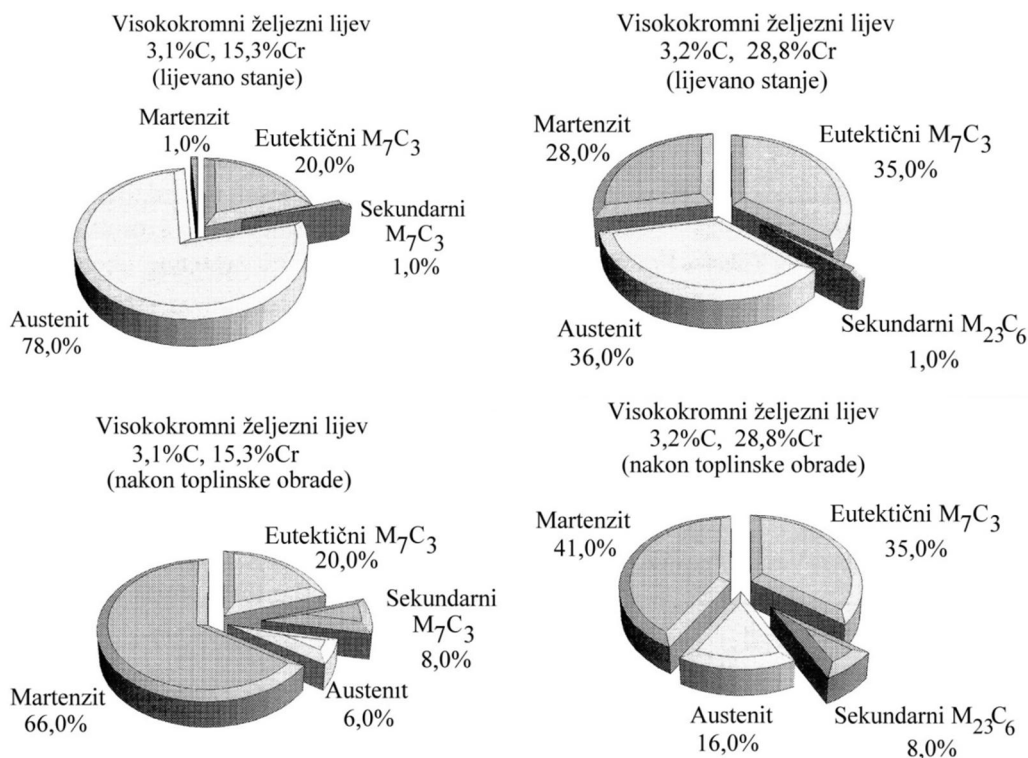
Slika 21. Utjecaj temperature austenitizacije na količinu zaostalog austenita i tvrdoću visokokromnog bijelog željeznog lijeva [14]

Temperatura austenitizacije određuje količinu ugljika u austenitu [10]. Previsoka temperatura povećava količinu ugljika u austenitu i time njegovu stabilnost. M_s temperatura opada, što rezultira većom količinom zaostalog austenita i nižom tvrdoćom. Na nižim temperaturama austenitizacije odvija se intenzivno izlučivanje sekundarnih karbida čime se značajno smanjuje udio ugljika u metalnoj osnovi, tj. austenitu. U tom slučaju, tijekom naknadnog hlađenja s temperature austenitizacije do sobne temperature, nastaje martenzit s nižim udjelom ugljika, čime se smanjuje tvrdoća i otpornost na abraziju. Temperatura austenitizacije visokokromnih bijelih željeznih ljevova koji sadrže 12 do 20 % kroma kreće se od 950 do 1010 °C, dok kod visokokromnih bijelih željeznih ljevova koji sadrže 23 do 28 % kroma temperatura austenitizacije treba iznositi 1010 do 1090 °C [2].

Vrijeme zadržavanja na temperaturi austenitizacije treba iznositi min. 4 h kako bi došlo do dovoljnog izlučivanja sekundarnih karbida u austenitu. Za deblostijene odljevke primjenjuje se pravilo 1 h za svakih 25 mm debljine stijenke.

Nakon dovoljno dugog zadržavanja na temperaturi austenitizacije odljevci se intenzivno hlade zrakom (gašenje na zraku) do temperature od 550 do 600 °C, tj. do temperature koja leži ispod temperaturnog područja u kojem se stvara perlit. Na taj način se izbjegava stvaranje perlita. Vrlo je važno da je legiranjem ostvarena adekvatna prokaljivost na zraku. Velike brzine hlađenja moraju se izbjegavati jer mogu dovesti do nastanka pukotina u odljercima zbog visokih naprezanja. Brzina hlađenja može se nakon toga značajno smanjiti radi smanjenja zaostalih naprezanja (hlađenje na mirnom zraku ili u peći do sobne temperature). U mikrostrukturi visokokromnih bijelih željeznih ljevova i nakon visokotemperaturne toplinske obrade uvijek je prisutna određena količina zaostalog austenita, obično 10 do 30 % [2].

Na slici 22 mogu se vidjeti učinci visokotemperaturne toplinske obrade na mikrostrukturu visokokromnog bijelog željeznog lijeva s 15,3 % odnosno 28,8 % kroma.



Slika 22. Udjeli eutektičnih M_7C_3 karbida, sekundarnih M_7C_3 i $M_{23}C_6$ karbida, martenzita i zaostalog austenita u mikrostrukturi visokokromnog bijelog željeznog lijeva sa 15,3 %, odnosno 28,8 % kroma u lijevanom stanju i nakon toplinske obrade [2]

Odljevci se nakon visokotemperaturne toplinske obrade mogu staviti u upotrebu bez provođenja naknadnog niskotemperaturnog ili visokotemperaturnog popuštanje. Međutim, popuštanjem se može poboljšati žilavost te smanjiti zaostala naprezanja i udio zaostalog austenita u mikrostrukturi.

Niskotemperaturnim popuštanjem na temperaturama od 205 do 235 °C u trajanju od 2 do 4 h povećava se žilavost martenzitne metalne osnove za ~ 20 %, te se smanjuju zaostala naprezanja [1, 2, 7]. Manji udio zaostalog austenita transformira se u martenzit.

Visokotemperaturnim popuštanjem na 480 do 540 °C u trajanju od 8 do 12 h može se dodatno smanjiti količina zaostalog austenita, što rezultira porastom tvrdoće [7]. Ova toplinska obrada zasniva se na destabilizaciji austenita putem izlučivanja sekundarnih karbida. Temperatura i vrijeme popuštanja ovise o kemijskom sastavu odljevka i prethodno provedenoj toplinskoj obradi te u značajnoj mjeri utječe na konačna svojstva. Previsoka temperatura ili predugo vrijeme popuštanja rezultira smanjenjem tvrdoće i velikim padom otpornosti na abraziju. Neadekvatno provedeno popuštanje rezultira nepotpunom eliminacijom zaostalog austenita.

Tvrdoća visokokromnih bijelih željeznih ljevova može se povećati **dubokim hlađenjem** na temperature < -100 °C jer dolazi do pretvorbe zaostalog austenita u martenzit [2]. Za duboko hlađenje obično se primjenjuje tekući dušik. Odljevak se ne uranja u tekući dušik već se izlaže njegovim parama u izoliranoj komori. Vrijeme zadržavanja obično iznosi 1/2h. Nakon dubokog hlađenja poželjno je provesti popuštanje kako bi se smanjila krhkost martenzita i povećala žilavost.

4.5. Specijalni visokokromni bijeli željezni ljevovi

Specijalni visokokromni bijeli željezni ljevovi dijele se u dvije skupine [7]:

- visokokromni bijeli željezni ljevovi otporni na koroziju,
- visokokromni bijeli željezni ljevovi otporni na visoke temperature.

Visokokromni bijeli željezni ljevovi otporni na koroziju sadrže 26 do 28 % kroma [7]. Udio ugljika je nizak i kreće se 1,6 do 2 % da bi se dobio što veći udio kroma u metalnoj osnovi, a samim tim i visoka otpornost na koroziju. Dodatkom 2 % molibdena poboljšava se otpornost na okoliš koji sadrži kloride. Potpuno austenitna metalna osnova daje visoku otpornost na koroziju, ali i nešto nižu otpornost na abraziju. Primjenjuju se u lijevanom stanju.

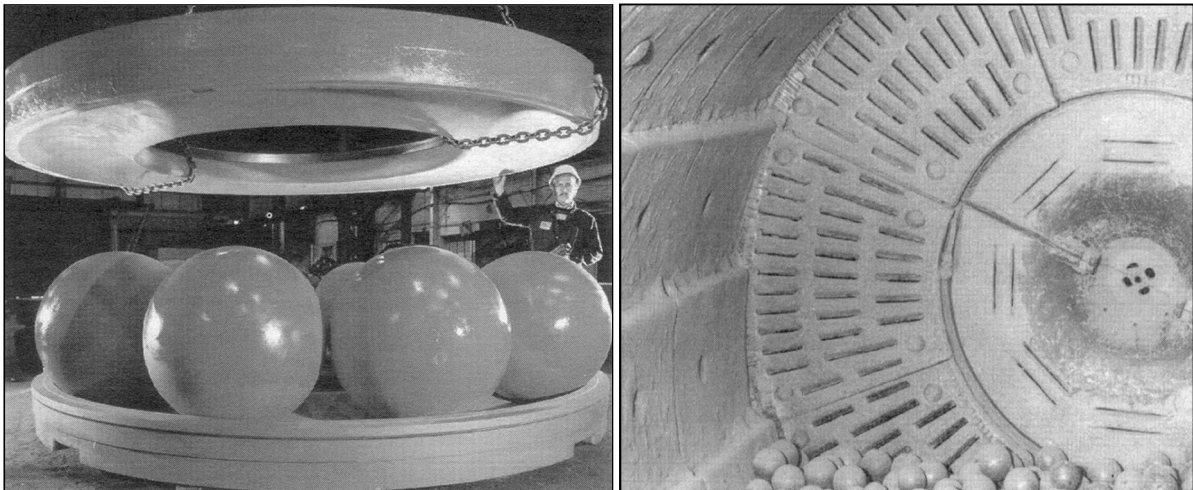
Visokokromni bijeli željezni ljevovi otporni na visoke temperature primjenjuju se na temperaturama do 1040 °C i mogu se svrstati u tri skupine ovisno o metalnoj osnovi [7].

- martenzitni visokokromni bijeli željezni ljevovi koji sadrže 12 do 28 % kroma,
- austenitni visokokromni bijeli željezni ljevovi koji pored 15 do 30 % kroma sadrže i 10 do 15 % nikla radi stabilizacije austenita,
- feritni visokokromni bijeli željezni ljevovi koji sadrže 30 do 34 % kroma.

Na visokim temperaturama zbog visokog udjela kroma na površini odljevaka stvara se kompleksni oksidi sloj obogaćen s kromom koji štiti od daljnje oksidacije. Udio ugljika kreće se u granicama od 1 do 2 %.

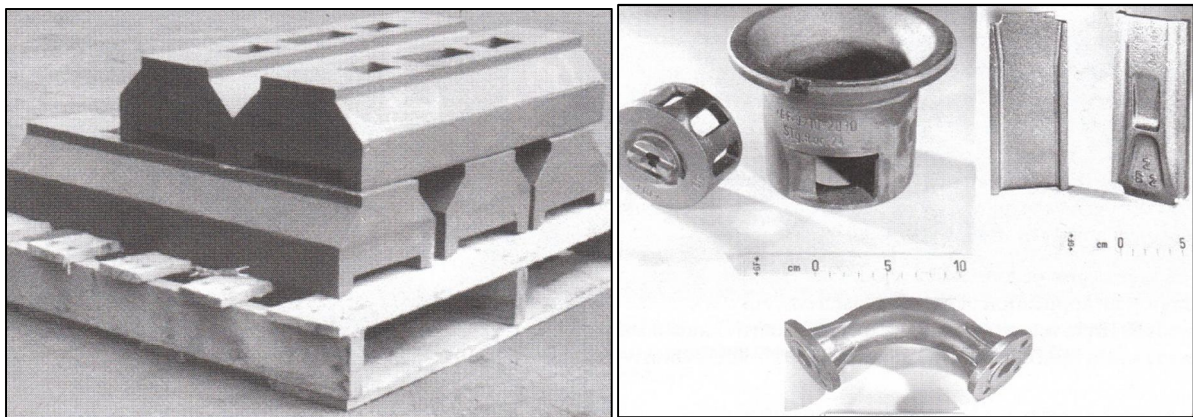
4.6. Primjena visokokromnih bijelih željeznih ljevova

Viskokromni bijeli željezni ljevovi primjenjuju se za odljevke koji pored visoke otpornosti na abraziju moraju imati i odgovarajuću žilavost, tj. otpornost na udarno opterećenje. Tipična područja primjene su: razne komponente mlinova i drobilica za ugljen, cement, vapnenac i stijene (oplate, valjci, čekići itd.), lopatice u miješalicama za beton, dijelovi pumpi koji su izloženi jakom abrazivnom djelovanju, komponente uređaja za sačmarenje i pjeskarenje, kalupi za opeke itd. (slika 23) [2, 7].



a)

b)



c)

d)

Slika 23. Odljevci od visokokromnih bijelih željeznih ljevova: a) komponente drobilice za ugljen (ASTM A 532/A 532M Klasa II, Tip D), b) kugle i oplate u kugličnom mlinu za usitnjavanje cementnog klinkera (ASTM A 532/A 532M Klasa II, Tip A), c) čekići za udarnu drobilicu (ASTM A 532/A 532M Klasa II, Tip B), d) komponente uređaja za sačmarenje (ASTM A 532/A 532M Klasa III, Tip A) [2]

Specijalni viskokromni bijeli željezni ljevovi otporni na visoke temperature koriste se za izradu cijevi za rekuperatore, raznih komponenti za peći, dijelove gorionika, kalupe za izradu staklene ambalaže, sjedišta ventila u motorima s unutarnjim izgaranjem itd. [7].

5. ZAKLJUČAK

Bijeli željezni ljevovi sadrže visok volumni udio karbida u mikrostrukturi što im daje visoku tvrdoću. Zbog toga se u najvećoj mjeri upotrebljavaju za aplikacije u kojima je potrebna umjerena do velika otpornost na abraziju, npr. dijelovi drobilica, mlinova, mješača i pumpi koji su izloženi jakom abrazivnom djelovanju, komponente uređaja za sačmarenje i pjeskarenje itd. Pri tome treba uzeti u obzir da je žilavost ovih materijala niska.

Svojstva bijelih željeznih ljevova prvenstveno ovise o njihovoj mikrostrukturi. Kemijski sastav, brzina hlađenja u kalupu i provedena toplinska obrada određuju volumni udio karbida i strukturu metalne osnove, a time i svojstva bijelih željeznih ljevova.

Perlitni bijeli željezni ljevovi sadrže M_3C karbide u perlitnoj metalnoj osnovi. Njihova tvrdoća obično iznosi 350 do 500 HB. Zbog toga imaju osrednju otpornost na abraziju. Žilavost ovih materijala je vrlo niska.

Bijeli željezni ljevovi legirani s 3 do 5,5 % nikla i 1 do 4 % kroma sadrže M_3C karbide u martenzitnoj metalnoj osnovi zbog čega imaju visoku tvrdoću, koja se u većini slučajeva iznosi od 550 do 700 HB. Imaju visoku otpornost na abraziju. Međutim, zbog niske žilavosti pokazuju slabu otpornost na ponavljajuće udarno opterećenje.

Bijeli željezni ljevovi legirani sa 5 do 7 % nikla i 7 do 11 % kroma sadrže karbide M_7C_3 tipa koji imaju veću tvrdoću i povoljnije utječu na žilavost od M_3C karbida. Metalna osnova sastoji se od martenzita i austenita. Tvrdoća ovih ljevova obično se kreće od 550 do 700 HB, što im daje visoku otpornost na abraziju.

Visokokromni bijeli željezni ljevovi imaju bolju kombinaciju otpornosti na abraziju i žilavosti od perlitnih bijelih željeznih ljevova te željeznih ljevova legiranih niklom i kromom. Sadrže 11 do 28 % kroma i do 3 % molibdena. Njihova mikrostruktura sastoji se od karbida M_7C_3 tipa i martenzitno-austenitne metalne osnove. Tvrdoća ovih ljevova može biti veća od 700 HB. Visok udio kroma omogućuje primjenu visokokromnih bijelih željeznih ljevova za proizvodnju odljevaka od kojih se zahtijeva otpornost na koroziju ili visoke temperature.

6. LITERATURA

- [1] Cast Irons, ASM Specialty Handbook, ur. J.R. Davis, ASM International, USA, 1996.
- [2] G. Laird, R. Gundlach, K. Röhrig, Abrasion Resistant Cast Iron Handbook, American Foundry Society, USA, 2000.
- [3] H. T. Angus, Cast Iron: Physical and Engineering Properties, Butterworths, London, 1976.
- [4] Ni-Hard, Material Data and Applications,
https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/Ni_HardMaterialDataandApplications_11017_.ashx (15. ožujak 2018.)
- [5] G. J. Cox, Development of Abrasion-resistant, Nickel-containing Alloy White Irons of High Hardness, AFS Transactions 97(1989), 361-372.
- [6] M. J. Fallon, BCIRA Report 1606, BCIRA Journal (1984), 463-469.
- [7] R. B. Gundlach, White Iron and High-Alloyed Iron Castings, poglavlje u knjizi ASM Handbook, Volume 15, Casting, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008., 896-903.
- [8] W. C. Leslie, E. Hornbogen, Physical metallurgy of steels, poglavlje u knjizi Physical Metallurgy, Volume II, ur. R. W. Chan, P. Haasen, Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1996., 1555–1620.
- [9] Z. Jiyang, Colour Metallography of Cast Iron, Chapter 5, White Cast Iron⁽¹⁾, China Foundry 8(2011) 3, 337-349.
- [10] F. Maratray, Choice of Appropriate Compositions for Chromium-Molybdenum White Irons, AFS Transactions 79(1971), 121-124.
- [11] L. Yezhe, S. Yufu, Z. Jingyu, Y. Guangwen, S. Jingjie, H. Sumeng, Effect of tungsten on microstructure and properties of high chromium cast iron, Materials & Design, 39(2012), 303-308.
- [12] M. Filipović, Ž. Kamberović, M. Korać, M. Gavrilovski, Microstructure and mechanical properties of Fe–Cr–C–Nb white cast irons, Materials & Design, 47(2013), 41-48.
- [13] G. Laird, G. L. F. Powell, Solidification and Solid-State Transformation Mechanisms in Si Alloyed High-Chromium White Cast Irons, Metallurgical Transactions A 24(1993) 4, 981-988.
- [14] F. Maratray, A. Poulalion, Austenite Retention in High-Chromium White Irons, AFS Transactions 90(1982), 795-804.
- [15] Z. Glavaš, F. Unkić, Lijevanje željeznih metala, nastavni tekst predavanja postavljen na Internet stranicu Metalurškog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODATCI:

Ime i prezime: Vedran Torman
Datum i mjesto rođenja: 06.04.1995. Sisak
Adresa: Vjekoslava Kocha 5. 44318 Voloder
Telefon: (+385)994134740
E-mal: vedran.torman@hotmail.com

OBRAZOVANJE: 2010. – 2014.

Tehničar za električne strojeve s primijenjenim računalstvo
Tehnička škola Kutina

VJEŠTINE:

Kreativan, komunikativan, organiziran, dobro poznavanje engleskog jezika, dobro poznavanje rada na računalu (MS Office paketi, c++ jezik).

NAGRADE I PRIZNANJA:

2009. – 2010.

Sudjelovanje te osvajanje drugog mjesta na županijskom natjecanje u tehničkoj kulturi

AKTIVNOSTI: rad preko studentskog servisa, razni hobiji poput obrade metala i drveta.