

# Primjena superlegura u mehatronici

---

**Kilih, Edi**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:732987>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

## **PRIMJENA SUPERLEGURA U MEHATRONICI**

Završni rad br. 02/MEH/2022

Edi Kilih

Bjelovar, rujan 2022.



Veleučilište u Bjelovaru  
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

### 1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Student: **Kilih Edi**

JMBAG: **0314014840**

Naslov rada (tema): **Primjena superlegura u mehatronici**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Proizvodno strojarstvo**

Mentor: **dr.sc. Stjepan Golubić**

zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. **dr.sc. Tomislav Pavlic, predsjednik**
2. **dr.sc. Stjepan Golubić, mentor**
3. **Danijel Radočaj, mag.inž.meh., član**

### 2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 02/MEH/2022

U sklopu završnog rada potrebno je:

1. Prikazati materijale za povišene i visoke temperature.
2. Opisati razloge legiranja metalnih materijala.
3. Opisati superlegure.
4. Prikazati svojstva superlegura.
5. Opisati toplinsku obradu superlegura.
6. Analizirati razlike između vatrootpornih čelika i superlegura.
7. Prikazati primjere primjene superlegura u mehatronici.

Datum: 14.03.2022. godine

Mentor: **dr.sc. Stjepan Golubić**



## Sadržaj

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIJALI ZA POVIŠENE I VISOKE TEMPERATURE .....</b>	<b>2</b>
2.1 <i>Vatrootporni čelici .....</i>	5
<b>3. RAZLOZI LEGIRANJA METALNIH MATERIJALA.....</b>	<b>7</b>
<b>4. SUPERLEGURE .....</b>	<b>8</b>
4.1 <i>Vrste superlegura.....</i>	8
<b>5. SVOJSTVA SUPERLEGURA .....</b>	<b>11</b>
5.1 <i>Superlegure na bazi nikla.....</i>	12
5.2 <i>Superlegure na bazi kobalta .....</i>	14
5.3 <i>Superlegure na bazi željeza i nikla.....</i>	16
<b>6. TOPLINSKA OBRADA SUPERLEGURA .....</b>	<b>17</b>
6.1 <i>Toplinska obrada superlegura na bazi nikla .....</i>	17
6.2 <i>Toplinska obrada superlegura na bazi kobalta.....</i>	21
6.3 <i>Toplinska obrada precipitacijskih ojačanih Ni-Fe superlegura.....</i>	22
<b>7. RAZLIKA IZMEĐU VATROOTPORNIH ČELIKA I SUPERLEGURA .....</b>	<b>23</b>
<b>8. PRIMJENE SUPERLEGURA U MEHATRONICI.....</b>	<b>25</b>
<b>9. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>30</b>
<b>10. LITERATURA .....</b>	<b>32</b>
<b>11. OZNAKE I KRATICE .....</b>	<b>34</b>
<b>12. SAŽETAK.....</b>	<b>36</b>
<b>13. ABSTRACT.....</b>	<b>37</b>

## 1. UVOD

Sve većim napretkom znanosti, raznih industrija te sve većom željom čovječanstva da se dosegnu sve veća postignuća u svim dijelovima ljudskog života došlo je do prepreke da novi tehnološki izumi i unapređenje starih nije moguć zbog nedostatka materijala koji mogu podnijeti sve veću temperaturu i naprežanje. Postoje materijali za povišene i visoke temperature ali granice se dižu sve više i više te se nastoje pronaći materijali koji to mogu podnijeti. Poznato je da na Zemlji postoje razne vrste sirovih metala do kojih je lako doći danas. Ti materijali se i danas upotrebljavaju ali zasebno nemaju puno različitih otpornosti za upotreba u različitim okruženjima. I dalje je njihova upotreba nezamjenjiva u raznim industrijama kao što su automobilske industrije, kemijske industrije, avioindustrije i mnoge druge. Legiranjem dvaju ili više metala dobije se legura koja ima svojstva bolja od bilo kojeg elementa. Najizdržljiviji su materijali na bazi željeza, pa tako čelik možemo najčešće pronaći u dijelovima koji zahtijevaju veliku izdržljivost. Čelik na niskim temperaturama, točnije na temperaturama ispod 180°C, nema previše promjena u mehaničkim svojstvima stoga se smatraju niskim temperaturama. Povišene temperature smatraju se temperature sve do 450 °C. Nakon 450 °C smatraju se visoke temperature te se tu počinju javljati prvi problemi zato što kod njih započinje puzanje čelika, zbog kojeg može doći do pucanja materijala. Još jedan problem koji se pojavljuje na oko 600 °C je okolina koja izaziva koroziju. Stoga postoje vatrootporni čelici koji su puno oporniji na koroziju ali su zato slabije otpornosti na puzanje čelika. Stoga se je moralo naći rješenje da se naprave materijali koji mogu podnijeti veće temperature. Došlo je do rješenja s time da su napravljene superlegure koje imaju dobru otpornost na koroziju, puzanje materijala te lom pri visokim temperaturama i koje održavaju veliku čvrstoću. To su legure koje se mogu podijeliti na legure na bazi nikla, željeza, nikla i željeza te na bazi kobalta. Njihova primjena je raznolika te se izmjenom dijelova na bazi željeza koji su trpili ekstremne uvijete vijek trajanja određenih komponenata strojeva uveliko produžio.

U ovom radu najprije će biti riječi o običnim materijalima za visoke i povišene temperature, njihovu primjenu te osnovne podatke o njima. Bavit će se pitanjima razloga legiranja metalnih materijala te detaljnije pojasniti što su superlegure, kako se dobivaju i nastaju koja su njihova najvažnija obilježja, pri kojim temperaturama se mogu upotrebljavati, koliko dugo da ne dođe do nepovratnih istezanja, njihovu toplinsku obradu, koja je razlika između vatrootpornih čelika i superlegura, te njihovu primjenu u mehatronici.

## 2. MATERIJALI ZA POVIŠENE I VISOKE TEMPERATURE

Za upotrebu na visokim i povišenim temperaturama potrebni su materijali visokog tališta, dobre otpornosti na puzanje materijala, velike žilavosti te dobre otpornosti na koroziju da ne bi došlo do loma materijala.

Materijali kao što su čelici imaju relativno visoko talište u odnosu na velik broj ostalih tehničkih materijala kao što su primjerice bakar, aluminij, te zbog bolje mehaničke temperaturne otpornosti imaju prednost nad njima. Niskim temperaturama smatraju se temperature ispod 180 °C, kada kod čelika i materijala na bazi željeza nema bitnijih promjena mehaničkih svojstava. Temperature od 180 °C do 450 °C smatraju se povišene temperature, a sve temperature iznad 450 °C smatraju se visoke temperature zato što se tada počinje događati puzanje materijala [1, 2].

Visoke ili povišene temperature možemo pronaći u termoenergetskim postrojenjima, plinskim i parnim turbinama, motorima s unutarnjim izgaranjem, raketama, metalurškim postrojenjima. Navedena postrojenja rade i po 20 godina bez prekida [1, 2].

Kod proizvodnje dijelova za konstrukcije korištene pri visokim temperaturama upotrebljavaju se dijagrami ovisnosti mehaničkih svojstava o radnoj temperaturi. Takva temperatura uzrokuje puzanje, što se definira kao pojava do koje dolazi pri visokim temperaturama i konstantom djelovanju sile. Pri tome dolazi do trajnih i nepovratnih istezanja materijala. U to slučaju se granica puzanja preračunava prema vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih statičkim zateznim kratkotrajnim opterećenjima [1, 2].

Osim čelika na povišenim temperaturama upotrebljavaju se također i legure obojenih metala, tvrdi metali (Rh, Nb, Ta, Mo, W), posebne vatrootporne legure aluminija, legure nikal-kroma (superlegure), keramika, šamot. [1, 2].

Pošto je čelik jedan od jeftinijih materijala, on se najčešće i najviše upotrebljava za izradu dijelova koji trebaju izdržati visoke temperature, primjerice kod automobilskih dijelova, kotlovnica ili termoelektrana [1, 2].

Važan parametar za odabir i uporabu materijala su radne temperature ( $T_r$ ), koje dijelimo na niske temperature ( $T_r = 0,25 \cdot T_t$ ), povišene temperature ( $T_r = (0,25 \text{ do } 0,4) \cdot T_t$ ) i visoke temperature ( $T_r = 0,4 \cdot T_t$ ), pri čemu se  $T$  izračunava po Kelvinovoj skali [3].

Ostali važniji materijali koji se koriste za legiranje čelika i superlegura prikazani su u tablici 2.1

Tablica 2.1. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature najčešće legiranih metala [2]

Vrsta metala	Talište ( $T_t$ ), °C	Niske temp., °C	Povišene temp., °C	Visoke temp., °C	Potencijalna radna temp. ( $2/3 \cdot T_t$ ), °C
Al	660	< -40	od -40 do +100	> 100	350
Cu	1083	< 66	66-270	> 270	630
Ni	1453	< 160	160-420	> 420	880
Ti	1670	< 212	212-504	> 504	1020
Zr	1852	< 258	258-577	> 577	1150
Cr	1900	< 270	270-596	> 596	1180
Hf	2222	< 351	351-725	> 725	1390
Nb	2468	< 412	412-823	> 823	1550
Mo	2610	< 448	448-880	> 880	1650
Ta	2996	< 544	544-1035	> 1035	1910
W	3410	< 648	648-1200	> 1200	2180

Primjena materijala ovisi još o dva parametra, a to su veličina radnog naprezanja te vremensko trajanje opterećenja, koje može biti kratkotrajno ili dugotrajno.

Na dijelove koji su izloženi dugotrajnim naprezanjima pri povišenoj ili visokoj temperaturi može utjecati i okolina koja na iznad 600 °C izaziva kemijsku reakciju, odnosno koroziju, oksidaciju. Današnja znanost još nije uspjela napraviti istovremeno jaku otpornost čelika na koroziju i na puzanje materijala. Stoga se visokotemperaturni čelici dijele na toplinski otporne i vatrootporne. Toplinski otporni čelici imaju visoku otpornost na puzanje i općenito visoku otpornost na mehaničke nosivosti, ali slabu vatrootpornost. Vatrootporni čelici su različiti od toplinski obradivih čelika po tome što imaju visoku otpornost na oksidaciju ali slabiju otpornost na puzanje [1, 2].

Prema literaturnim podacima [1] pri povišenim i visokim temperaturama, upotrebljavaju se ljevovi na bazi željeza, čelici, visoko topivi metali, sintetski aluminij i nikal, legure na bazi nikla i kobalta, termički postojani tvrdi metali, visokotemperaturni emajl, staklo i staklo-keramika, oksidna i neoksidna keramika i CMC (keramički matrični



kompozit), ugljični materijali i C/C kompoziti (ugljik ojačan ugljičnim vlaknima), intermetalni spojevi te šamot.

Legure na bazi magnezija, točnije Mg-RZ (rijetka zemlja ili lantanidi) -Zn-Zr, Mg-Th-Zr i Mg-Al-Zn legure spadaju pod skupinu materijala koji se koriste za radne temperature između 150 °C i 400 °C, te se one primjenjuju kratkotrajno do 315 °C. U tu skupinu spadaju i legure aluminija i bronce, od legura aluminija se izrađuju klipovi u dizelskim motorima, od AlSi12, pri temperaturi od 200 °C do 250 °C. One imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva i izvrsnu otpornost na koroziju ali samo do radnih temperatura od 400 °C. Za temperature od 250 °C do 425 °C upotrebljavaju se niskougljični Mn čelici i nelegirani čelici. Za dugoročna trajanja iznad 20 godina upotrebljavaju se niskolegirani Mo ili Mo-Cr čelici. Za izradu rotorskih lopatica kompresora i diskova plinskih turbina koje rade sa temperaturama od 150 °C do 400 °C koriste se martenzitni čelici sa 12 % udjela kroma [1,3].

Za temperature od 400 °C do 550 °C koriste se niskolegirani Mo, Mo-Cr ili Mo-Cr-V čelici. Njihova upotreba najčešća je kod dugotrajnog rada do 500 °C i za kraće izloženosti sve do 550 °C. Najčešće se koriste u termoenergetskim postrojenjima, za njihove dijelove. To su primjerice cijevi ložišta, cijevi pregrijača pare, kućišta i rotori turbina, kotlovske obloge, skupljači pare, lopatice parnih turbina, vijci, matice i prirubnice. U dijelovima kemijskih postrojenja u kojima se uz tlak i temperaturu iznad 500 °C razvija i vodik upotrebljavaju se legirani čelici s višim postotkom kroma. Prilikom temperatura iznad 425 °C, a do 500 °C, ovisno o tipu legure, vrlo je važno da osnovni materijal sadrži zaštitni sloj kako ne bi došlo do oksidacije. U temperaturnom području od 500 °C do 850 °C koriste se austenitni i feritni Cr-Ni čelici uz dodatak W, V, Mo, Ti, Nb i N. Njihova dobra strana je što su jeftiniji od austenitnih čelika. Međutim, mana im je što nakon duljeg držanja na temperaturi od 520 °C do 850 °C postaju osjetljiviji te im je niža otpornost na puzanje. Također, prednosti feritnih čelika su bolja zavarljivost, postojanost na plinove koji sadrže sumpor i veća otpornost na oksidaciju. [1, 3, 4].

Za rad na radnim temperaturama od 650 °C kao primjer se mogu navesti monofazni austenitni čelici čija je gornja granica uporabe oko 750 °C. Najviše se upotrebljavaju kao dijelovi u kemijskim i procesnim postrojenjima. Do 1000 °C upotrebljavaju se superlegure na bazi nikla, kobalta te željezo-nikla. Koriste za izradu dijelova turbina u avioindustriji i brodogradnji, automobilskoj industriji za turbopunjače, medicini za umjetne kukove i koljena. Kada je potrebna vatrootpornost tada se do 800 °C mogu koristiti i feritni vatrootporni čelici [1, 3].

Za metalne materijale radne temperature iznad 1000 °C upotrebljavaju se metali koji imaju visoko talište kao što su Nb, Ta, W, Mo i njihove legure koje se primjenjuju do 1500 °C [1, 3].

Razlika između materijala za povišene, visoke temperature i superlegura je upravo u temperaturi koji oni mogu podnijeti. Čelici već iznad 750 °C postaju krhki, pojavljuje se puzanje i može doći do loma materijala dok za razliku od njih superlegure mogu izdržati temperature do 1100 °C i ne imati nikakve posljedice. Superlegure mogu izdržati i temperature do 1500 °C ali ne dugotrajno [1, 5].

## ***2.1 Vatrootporni čelici***

Kod čelika pri temperaturama iznad 550 °C javljaju se kemijske reakcije korozije koje su izazvane intenzivnom oksidacijom pri visokim temperaturama. Vatrootporni čelici upotrebljavaju se prilikom potrebe za većom otpornošću na koroziju i manjom potrebom za mehaničkom čvrstoćom [1].

Na površini materijala nelegiranih čelika stvaraju se slojevi željeznih oksida tipa FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Zbog nedovoljne kompaktnosti ne zaustavljaju daljnju difuziju kisika i količinu korozije koja se stvara na površini, što dovodi do pucanja površinskog sloja zbog tlačnih naprezanja nakon nekog vremena. Kada površinski sloj pukne ispod njega se ponovo stvaraju kemijski produkti te s vremenom i oni pucaju. Ovo višestruko raslojavanje naziva se ljuštenje materijala [2].

Kako bi se spriječilo neželjeno ljuštenje materijala, čelik se legira s kromom, molibdenom, silicijem i aluminijem – elementima koji imaju veći afinitet prema kisiku nego željezo. Oksidi kroma (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), aluminija (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), silicija (SiO<sub>2</sub>) i molibdena (MoO<sub>2</sub>) dovoljno su kompaktni i štite čelik od stvaranja ogorina u obliku ljuski. Za sada se na vatrootpornost najbolje pokazalo legiranje kromom koji jako dobro sprječava koroziju. Kromovi čelici i krom-silicij-aluminijevi čelici pokazali su malu žilavost i veliku krhost u području temperatura od 600 °C do 700 °C i iznad 950 °C. Vatrootpornim čelicima dodaje se nikal u potrebnoj količini da se dobije čista austenitna ili feritnoaustenitna mikrostruktura koja zaustavlja stvaranje mikrostrukturnih pretvorbi koje poboljšavaju mehanička svojstva i izazivaju promjenu volumena. Austenitni čelici se legiraju sa Ti, Ni, Si, Cr i Al dok se feritni legiraju samo sa Si, Al i Cr [1, 2].

Feritni čelici su, za razliku od austenitnih, manje otporni na puzanje. Također su otporniji su na plinove koji sadrže sumpor stoga se i dalje upotrebljavaju. Nakon zavarivanja,

tijekom dugotrajne izloženosti visokoj temperaturi postaju krhki. Više se upotrebljavaju austenitni čelici koji su skuplji od feritnih ali su otporniji prema puzanju te namijenjeni primjenama sa više naprezanja i djelovanja plinova s puno dušika [1, 2].

Za ostvarivanje potpune vatrootpornosti za čelik gubitak mase ne smije biti veći od  $1 \text{ g/m}^2 \text{ h}$  pri definiranoj temperaturi ili najviše  $2 \text{ g/m}^2 \text{ h}$  ako se definirana temperatura povisi za  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tijekom tog procesa uzorak mora biti u atmosferskoj okolini sklonoj oksidaciji, zagrijan na određenu temperaturu u električnoj peći. Trajanje procesa traje 120 h, te se tijekom njega mora i 4 puta ohladiti na sobnu temperaturu [1, 2].

### 3. RAZLOZI LEGIRANJA METALNIH MATERIJALA

Legure su smjese dvaju ili više materijala kako bi se stvorio proizvod sa najboljim svojstvima od oba ili više materijala, ili da se dobije kombinacija svojstva koja se zahtijeva. Iako su legure proizvod miješanja metala postoje i druge legure koje koriste i nemetale kao što je ugljik, nemetalana komponenta čelika. Legure su toliko bitne za ljude da se i dijelovi ljudske povijesti nazivaju po njima, brončano doba [6].

Razlozi legiranja metalnih materijala su vrlo jednostavni, čisti materijali koje nađemo u prirodi nemaju takva svojstva kakva imaju materijali koji se legiraju. Fizikalna i kemijska svojstva legura čine ih poželjnijima za industrijske primjene u raznim područjima. Legure imaju drugačija fizikalna svojstva što uključuje promjenu u masi, njihovu vodljivost, obradivost i toplinsku istezljivost. Legirani metali mogu imati manju gustoću od čistih materijala, a istovremeno zadržati čvrstoću. Najbolji primjer toga se može vidjeti u automobilskoj i avioindustriji koje upotrebljavaju legure titanija i aluminiya zbog male težine. Vodljivost određuje koliko dobro legure mogu prenositi elektrone za prijenos topline ili električne energije. Legiranje različitih metala može ili smanjiti ili povećati vodljivost. Legure bakra nude visoku vodljivost. Obradivost pokazuje koliko dobro materijali mogu izdržati promjenu svog oblika hladnim ili grijanim metodama obrade. Neki čisti materijali su toliko mekani da imaju dobru obradivost ali malu čvrstoću. Legiranjem takvih elemenata postiže se istodobno i čvrstoća i obradivost. Toplinska istezljivost ili talište čistih metala mijenja se legiranjem. Čisti metali pretežno imaju manje talište nego legirani stoga legure nude veću otpornost na toplinsko naprezanje. Kemijske promjene događaju se na atomskoj razini. Čisti materijali imaju samo jednu vrstu atoma kao što je željezo ili zlato, oni obično prolaze proces uklanjanja nečistoća da bi se dobila legure koja je otpornija na koroziju, koja ima veću čvrstoću [7].

Legiranje čistih metala čini ih puno korisnijim za različite primjene. Odabirom mješavine metala može se odabrati materijal koji zadovoljava zahtjeve njegove konačne upotrebe. Legure pružaju otpornost na koroziju koju čisti metali ne mogu stoga su legure korisnije pri zahtjevnijim uvjetima koji izazivaju koroziju. Kombinacijom metala se poboljšava struktura legura, kombinacijom metala različitih veličina atoma ograničava se njihovo gibanje te pojačava čvrstoća. Još jedna prednost legura u odnosu na čiste metale je njihova gustoća koja može imati veliku ulogu u odabiru materijala za proizvodnju [6, 7].

## 4. SUPERLEGURE

Materijali, odnosno materijali na bazi željeza iznad 750 °C više ne mogu izdržati dugotrajnu eksploataciju zbog intenzivnog puzanja, pa je daljnji napredak ostvaren razvojem višekomponentnih sustava materijala na osnovi nikla, kobalta te željeza-nikla sa visokim udjelima kroma (Cr), te sa manjim udjelima molibdena (Mo), volframa (W), titanij (Ti) i aluminija (Al) i drugih [2].

Superlegure su materijali koji su proizvedeni za korištenje na temperaturama do 1100°C, ali i višim temperaturama u situacijama u kojima dolazi do visokog mehaničkog naprezanja i koje zahtijevaju visoku stabilnost površine. Karakterizira ih dobra otpornost na puzanje, oksidaciju i lom pri velikim temperaturama. Pojedine superlegure mogu izdržati radne temperature koje prelaze 85 % njihove temperature tališta. Superlegure često se označavaju kao HRSA materijali (eng. Heat Resistant Super Alloys) [1].

### 4.1 Vrste superlegura

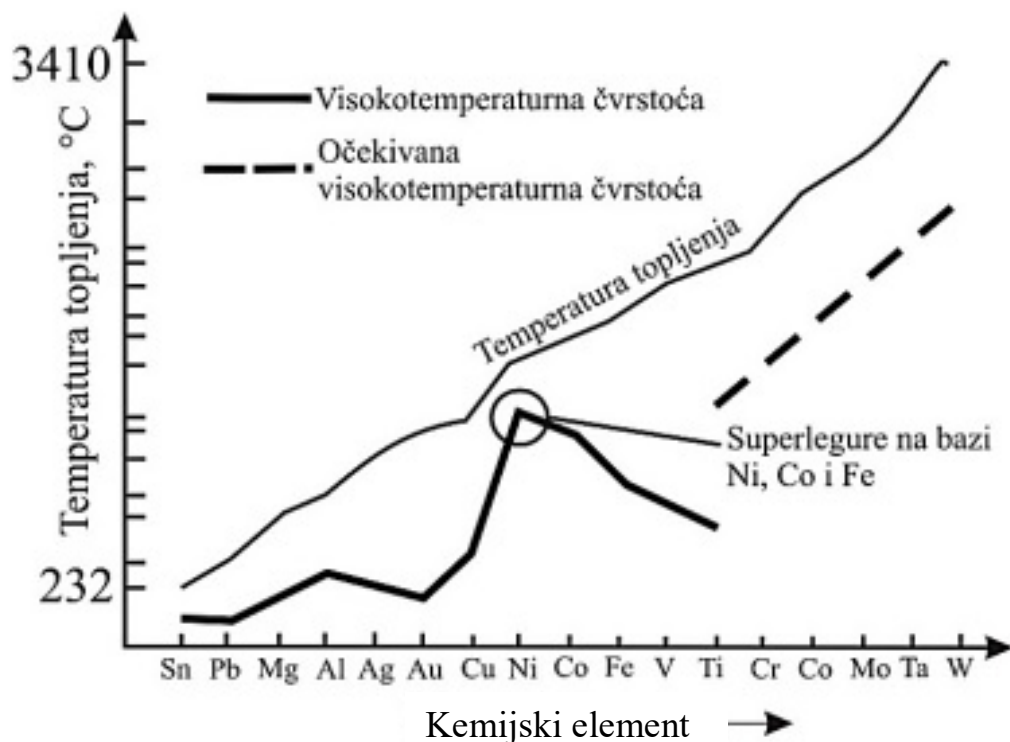
Prema osnovnom elementu s kojim se legira, superlegure se dijele na superlegure na bazi nikla, kobalta, željezo-nikal te na bazi željeza. Superlegure na bazi željeza te željeza-nikla, sadrže nikal u sebi samo je razlika u postotku materijala koje sadrže. Kada željezo prelazi 50 % osnovnog materijala tada se to naziva superlegura na bazi željeza [1, 2, 8].

Pored osnovne podjele superlegure možemo podijeliti na još dvije skupine. Podjela prema tehnologiji proizvodnje, pa se tako razlikuju lijevane superlegure, deformabilne superlegure i superlegure dobivene postupcima praškaste metalurgije (metalurgija praha). Podjela prema osnovnom mehanizmu ojačavanja koja se dijeli na precipitacijsko očvršćene superlegure (Mehanizam kojim se stvaraju zapreke karbidnog ili nitridnog karaktera i/ili karaktera intermetalnog spoja kojima je rezultat prostorne zapreke), superlegure ojačane formiranjem čvrstog rastvora i disperzno ojačane superlegure (legure ojačane disperzijom oksida) [1].

Superlegure na bazi nikla se najviše koriste. Najčešće se primjenjuju u avioindustriji za izradu turbinskih lopatica mlaznih motora, ali i za izradu drugih toplinski opterećenih dijelova. Zahvaljujući prisustvu odgovarajućih legiranih elemenata one posjeduju potrebna svojstva za rad pri visokim temperaturama gore navedenih komponenti [1, 2, 8].

Superlegure na bazi kobalta uglavnom se upotrebljavaju za izradu statički opterećenih dijelova koji rade s manjim opterećenjima na visokim temperaturama. U odnosu na superlegure na bazi nikla pogodnije su za izradu dijelova većih dimenzija zbog bolje otpornosti prema termičkom zamoru. U odnosu na primjenu u avioindustriji koriste se za najtoplije dijelove pošto imaju bolju otpornost za koroziju pri visokim temperaturama ali su skuplji i teži [1, 2, 8].

Superlegure na bazi željeza, željeza-nikla značajno su jeftinije od niklovi superlegura, ali i dalje njihova primjena nije toliko široka. Superlegure na bazi željeza se primjenjuju na nižim temperaturama jer nemaju mogućnost značajnog ojačavanja i jer imaju slabiju otpornost prema oksidaciji na visokim temperaturama [1, 2, 8].



Slika 4.1 Visokotemperaturna čvrstoća [1]

Neki od primjera superlegura pod trgovačkim nazivima dati su u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Najčešće HRSA legure označene prema nazivima proizvođača [1]

	Naziv	Tvrdoća, HV		Približan sadržaj, mas. %											
		Žaren	Staren	Ni	Cr	Co	Fe	Mo	W	Nb	C	Mn	Si	Al	Ti
Nikl CMC 20.2	Inconel 718		425	52,5	19,0	1,0	19,0	3,0			0,04	0,4	0,9	0,9	0,9
	Inconel 706		285	42,0	16,0		40,0				0,03	0,2	0,3	0,4	1,8
	Inconel 625	200		62,0	21,5		5,0	9,0			0,04	0,5	0,5	0,4	0,4
	Hastelloy S			67,0	16,0		3,0	15,0			0,02	0,5	0,4		
	Hastelloy X	160		47,0	22,0	1,5	18,0	9,0	0,6		0,10	1,0	0,5		
	Nimonic PK33		350	55,9	18,0	14,0	0,5	7,0			0,05	0,3	0,3	2,1	2,2
	Udimet 720			56,0	16,0	14,7		3,0	1,3					2,5	5,0
	Waspaloy			58,0	19,0	13,5	0,8	4,5			0,07	0,1	0,1	1,4	3,0
Željezo CMC 20.1	Greek Ascology		300	2,0	13,0		80,0	0,2			0,15	0,4	0,3		
	A-286		300	25,5	15,0		56,5	1,3						0,2	2,0
	Incoloy 909			38,0		13,0	42,0			4,7			0,4		1,5
Kobalt CMC 20.2	Haynes 25			10,0	20,0	51,0	3,0		15,0		0,10	1,5	0,4		
	Stellite 31	280	340	10,5	25,5	56,0			7,5		0,50				

## 5. SVOJSTVA SUPERLEGURA

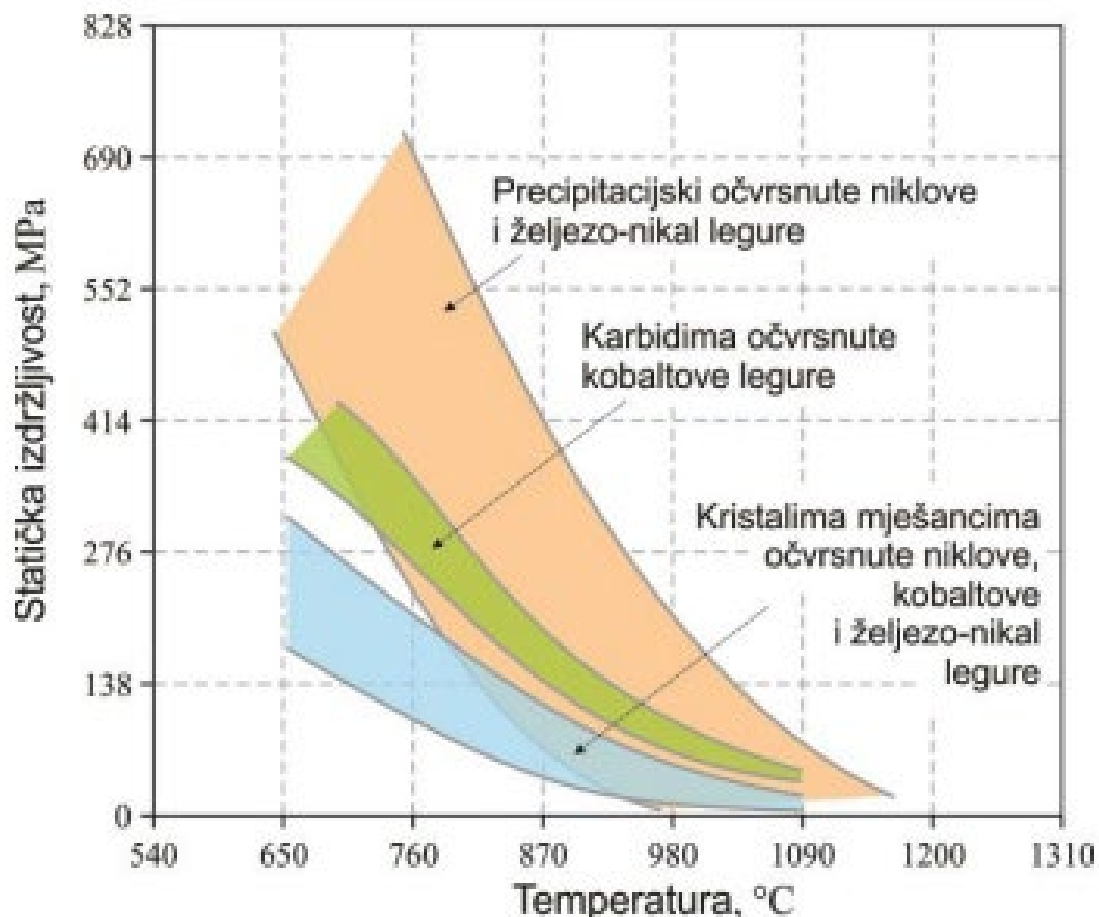
Superlegure trebaju imati kombinaciju svojstva visoke čvrstoće, dobre otpornosti prema puzanju, dobre otpornosti na koroziju te toplinsku stabilnost pri visokim temperaturama.

Glavno obilježje superlegura je kubično plošna centrirana (FCC) kristalna struktura u području visokih temperatura. Željezo i kobalt su polimorfni materijali koji imaju kubično plošnu centriranu rešetku samo na visokim temperaturama dok za razliku od njih nikal ima FCC rešetku na temperaturama od apsolutne nule do temperature tališta. FCC kristalnu rešetku karakterizira 100 puta manji koeficijent difuzije nego kubičnu prostornu centriranu rešetku odnosno BCC rešetku, što omogućava manju pokretljivost atoma te osigurava visoku čvrstoću i otpornost na puzanje [1, 2, 8].

Talište osnovnih materijal superlegura je vrlo visoko, talište nikla iznosi 1453 °C, kobalta 1495 °C te željeza 1536 °C. Još jedan faktor koji utječe na čvrstoću i puzanje je dodatno ojačana mikrostruktura materijala. Ojačavanje superlegura odvija se precipitacijskim mehanizmom, dok se neke superlegure ojačavaju otapanjem legiranih elemenata u kristalima mješancima matrice ili jednostavnije očvršćuće legiranjem. Većina superlegura se očvršćuje precipitacijskim mehanizmom odnosno izlučivanjem precipitata intermetalnih spojeva i/ili karbida koji povišuju čvrstoću i otpornost na puzanje [1, 2, 8].

Za različito očvršnute superlegure, na slici 5.1 prikazana je usporedba statičke izdržljivosti ( $R_m/100$ ).





Slika 5.1 Statička izdržljivost  $R_m/100$  superlegura [2]

Legure nikla i kobalta imaju visoku gustoću, oko  $8900 \text{ kg/m}^3$  te visoku krutost određene vrijednosti Youngovog modula elastičnosti koji za nikel iznosi  $210000 \text{ N/mm}^2$ , dok je za kobaltove legura Youngov modul neznatno niži,  $209000 \text{ N/mm}^2$  [8].

Superlegure imaju otpornost na zamor materijala zbog prisustva određene količine nikla i ugljika koji dok djeluju zajedno smanjuju temperaturnu transformaciju na radnim temperaturama od  $760 \text{ °C}$  do  $915 \text{ °C}$ , i na sobnim temperaturama [1].

## 5.1 Superlegure na bazi nikla

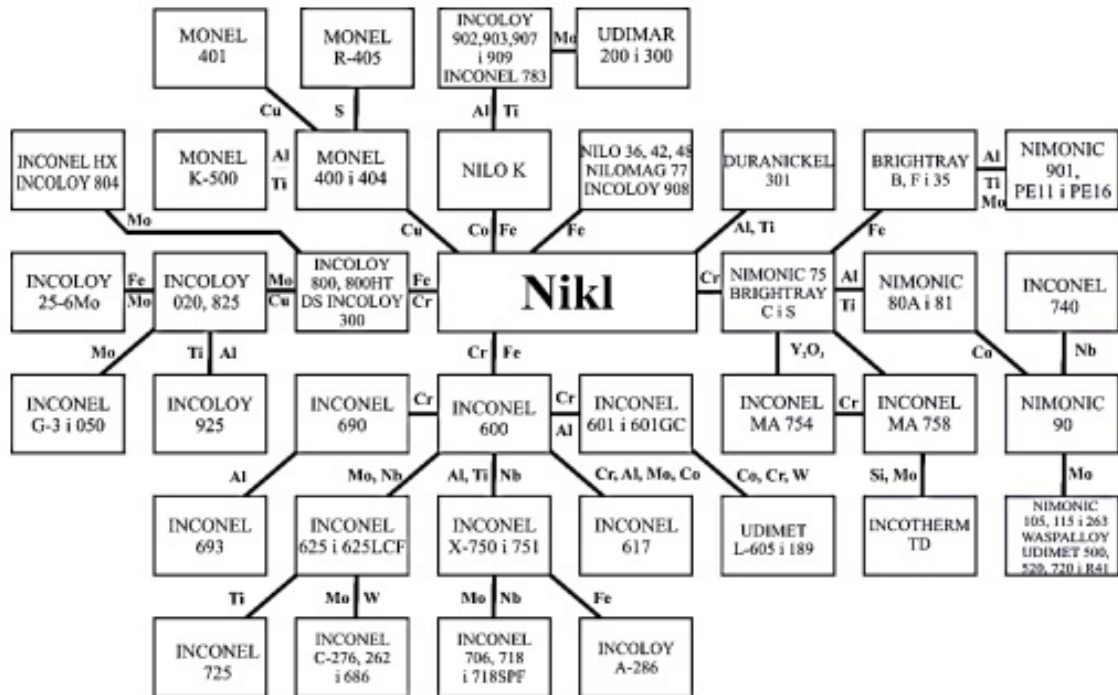
Potražnja za materijalom dobre otpornosti na koroziju i dobre mehaničke otpornosti na visokim temperaturama dovela je do razvoja niklovihi legura. S vremenom se sve više pojavila potražnja za materijalima koji podnose sve veće temperature s toga su razvijeni materijali poznati kao superlegure. Zbog kubično plošno centrirane strukture, niklove superlegure zadržavaju visoku čvrstoću i dobru žilavost, što im omogućuje primjenu i na niskim temperaturama. Superlegure se očvršćuju kristalima mješancima kada se primjenjuju

na nižim temperaturama, a kada se primjenjuju na visokim temperaturama onda se očvršćuju precipitacijom intermetalnih faza [1, 2, 8].

Niklove superlegure sadrže minimalno 50 % nikla (Ni). One u sebi sadrže još 10 do 20 % kroma (Cr), manje od 8 % aluminija (Al) i titanija (Ti), od 5 do 15 % kobalta (Co) i male količine bora (B), cirkonija (Zr), ugljika (C) i hafnija (Hf). Još se primjenjuju i neki drugi legirni dodaci kao što su molibden (Mo) do 12 %, niobij (Nb) manje od 5 %, tantal (Ta) manje od 12 %, volfram (W) manje od 12 % te renij (Re) manje od 6 %. Osiguravatelji oksidacijske otpornosti kod legiranja superlegura na bazi nikla su krom i aluminij. Oni formiraju površinske okside sastava  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Krom se dodaje zbog očvršćuća kristalima mješancima i jer je bitan za stvaranje kromovih karbida  $\text{Cr}_23\text{C}_6$ . Titanij i aluminij su precipitatori koji omogućuju izlučivanje  $\gamma'$  precipitata. Za razliku od njih niobij pospješuje formiranje  $\gamma'$  precipitata. Dodavanjem cirkonija i bora očvršćuju se granice zrna i otežava se klizanje uzduž granica te se samim time povećava otpornost na puzanje. Ulogu karbidotvoraca imaju tantal i molibden [2].

Toplinski se obrađuju homogenizacijskim žarenjem, gašenjem te naknadnim dozrijevanjem sa svrhom precipitacijskog očvršćuća. Legure koje su žarene pri temperaturi od  $1080^\circ\text{C}$  moraju se hladiti na zraku sve do temperature okoliša i potom dozrijevaju pri temperaturi od  $710^\circ\text{C}$ . Tada započinje precipitacija intermetalnih faza  $\text{Ni}_3\text{Al}$  i  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  koje povisuju granicu razvlačenja na  $750\text{ N/mm}^2$  [8].

Superlegure na bazi nikla smiju se trajno opteretiti najviše do temperature od  $1100^\circ\text{C}$ , te se smiju opteretiti i do  $1400^\circ\text{C}$  ali samo kratkotrajno da ne dođe do trajnog oštećenja [5].



Slika 5.1 Shematski prikaz podjele niklovih superlegura prema legirajućim elementima i nazivima proizvođača [1]

## 5.2 Superlegure na bazi kobalta

Superlegure na bazi kobalta se javljaju u dvije alotropske modifikacije. Pri temperaturi ispod 417 °C javlja se kao  $\alpha$  modifikacija, odnosno ima gusto slagano heksagonsku rešetku (HCP). Na temperaturama iznad 417 °C heksagonska rešetka transformira se u FCC rešetku, kubično plošnu centriranu rešetku, odnosno  $\beta$  modifikacija koja je postojana sve do 1495 °C [2, 8].

Za razliku od niklovih, kobaltove superlegure su po sastavu jednostavnije. Sadrže od 30 do 60 % Co, od 15 do 30 % Cr, manje od 35 % Ni, manje od 20 % Fe i od 0,1 do 1,0 % C. Ostali elementi koji se mogu naći kod niklovih superlegura dodaju se samo isključivo s namjerom stvaranja karbida, a to su Mo, Nb, Ta, Ti, B, Zr i W [2, 8].

Kemijski sastav nekih kovanih superlegura na bazi kobalta dat je u tablici 5.1

Tablica 5.1 Kemijski sastav kovanih kobaltnih superlegura [1]

Legura	Kemijski sastav, mas. %													
	Ni	Cr	Co,	Mo	W	Ta	Nb	Al	Fe	Mn	Si	C	Zr	Ostali,
AirResist 213	-	19	66	...	4,7	...	6,5	3,5	...	...	...	0,18	0,15	0,1 Y
Elgiloy	15	20	40	7	-	...	...	...	...	2	...	0,1	...	0,04 Be
Haynes 188	22	22	39,2	...	14	...	...	...	3	...	...	0,10	...	...
L-605	10	22	52,9	...	15	...	...	...	...	...	...	0,05	...	...
MAR-M 918	20	22	52,5	...	...	...	7,5	...	...	...	...	0,05	0,10	...

Krom osigurava visoku antikoroziivnost i očvršćuje legure otapanjem u kristalima mješancima i stvaranjem kromovih karbida. Može se smanjiti udjel kroma ako se ne zahtjeva visoka antikoroziivnost pri visokim temperaturama. Nikal u ovim superlegurama ima dvostruko djelovanje. On učvršćuje kristale mješance i drugo djelovanje mu je da stabilizira kubičnu plošno centriranu strukturu pri niskim temperaturama. Kobaltove superlegure očvršćuju se samo kombiniranim djelovanjem kristala mješanca i karbida što ograničava njihovu primjenu. Karbidi koji se izlučuju su TiC, NbC, TaC, WC, ZrC, BC, a ponekad su to i karbidi poput  $Cr_{23}C_6$  te rjeđe  $W_{23}C_6$  i  $Mo_{23}C_6$ . Mehanička svojstva većine kobaltnih superlegura se postiže rastvornim žarenjem, gašenjem te dozrijevanjem.  $CoCr_{20}Ni_{20}W$  je primjer legure koja se žari pri temperaturi od 1175 °C, tada se otapaju intermetalni spojevi i karbidi prelaze u čvrstu otopinu. Nakon gašenja u vodi dodatno se zagrijava na 760 °C čime se omogućuje izlučivanje sitnih karbida te se time usporava gibanje dislokacija i otežava klizanje po granicama zrna [1, 2, 8].

Tablica 5.2 navodi važna mehanička svojstva legure Haynes 25, koja je namijenjena izradi mlaznih motora i svojstva legure Stellite 6B često korištene za navarivanje dijelova otpornih na abrazijsko trošenje.

Tablica 5.2 Sastav i mehanička svojstva superlegura Haynes 25 i Stellite 6B [2]

Naziv legure	Sastav maseni %	$R_{p0,2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_1$ %
Haynes 25	54 Co, 20 Cr, 15 W, 10 Ni, 1 Fe, 0,1 C	450	930	60
Stellite 6B	61,5 Co, 30 Cr, 4,5 W, 1 Ni, 1 Fe, 1 C	710	1220	4

Ne preporuča se upotrebljavanje iznad 1000 °C zato što dolazi do ponovnog otapanja precipitata i karbida u čvrstoj otopini ili koagulacije čime padaju vrijednosti čvrstoće. Upotrebljavaju se pretežno za dugotrajno izložene statičke dijelove koji rade sa manjim naprezanjima. Takvi dijelovi imaju manju čvrstoću pri visokim temperaturama nego niklove superlegure. Prednosti im je bolja sposobnost zavarivanja, te još jedna dodatna prednost im je mogućnost topljenja u atmosferi [2].

### 5.3 Superlegure na bazi željeza i nikla

Razvijene su izvorno iz austenitnih nehrđajućih čelika sa plošno centriranom kristalnom rešetkom. Ona može biti ojačana čvrstim rastvorom i precipitatima. Austenitna matrica bazira se na niklu i željezu sa najmanje 25 % nikla zbog toga što je toliko potrebno da se stabilizira površinski centrirana kristalna rešetka. U većini slučajeva udio nikla je između 25 i 45 % uz udio željeza od 15 do 60 % s time kada je udio željeza iznad 50 % superlegure se nazivaju samo superlegure na bazi željeza. Drugi legirajući element je krom, udio kroma je od 15 do 28 % i on služi za osiguranje oksidacije na visokim temperaturama. Udio molibdena je od 1 do 6 % te je on zaslužan za učvršćivanje čvrste otopine otapanjem u kristalima mješancima. Legirani elementi koji osiguravaju precipitacijsko otvrdnjavanje izlučivanjem  $\gamma'$ ,  $Ni_3Al$  i  $Ni_3Ti$  i  $\gamma''$  precipitata  $Ni_3Nb$  su aluminij, titanij i niobij. Bor i cirkonij koji se nalaze po granicama zrna povećavaju čvrstoću na visokim temperaturama i duktilnost pri lomu [1, 2].

Tablica 5.3 Neke superlegure na bazi nikla i željeza [1]

Legura	Fe	Ni	Cr	Mo	W	Co	Nb	Al	C	Ostali
<b>S rastvarajućim ojačavanjem</b>										
Haynes 556	29,0	21,0	22,0	3,0	2,5	20,0	0,1	0,3	0,1	0,5 Ta
Incoloy	44,8	32,5	21,0	...	...	...	...	0,6	0,36	...
<b>S precipitacionim ojačavanjem</b>										
A-286*	55,2	26,0	15,0	1,25	...	...	...	0,2	0,04	0,3 V
Incoloy 903	41,0	38,0	<0,1	0,1	...	15,0	3,0	0,7	0,04	...

## 6. TOPLINSKA OBRADA SUPERLEGURA

Postupcima odgovarajuće toplinske obrade superlegura postiže se optimalna mikrostruktura i mehanička svojstva. Pod postupke ubrajamo žarenje i precipitacijsko očvršćivanje. Postupak žarenja se odabire zbog rekristalizacije, mekšanja materijala kod hladnog ili toplog oblikovanja, homogenizaciju ljevanih ingota te za smanjenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja. Također se žariti mogu i gotovi dijelovi zbog postizanja sitnozrnate mikrostrukture kada je potrebna dinamička izdržljivost i čvrstoća. Žarenje je zagrijavanje materijala do kontrolirane temperature, nakon toga se određeno vrijeme materijal drži na toj temperaturi te se nakon toga hladi kontroliranom brzinom. Obrade precipitacijskim očvršćivanjem provode se rastvornim žarenjem i dozrijevanjem, odnosno precipitacijom. Precipitacija može biti i stepenasta radi povećanja optimizacije svojstva. Rastvarajuće žarenje odnosno rastvorno žarenje je zagrijavanje koje je praćeno brzim hlađenjem materijala. Za razliku od rastvornog žarenja, precipitacijsko ojačanje odnosno starenje je sporo hlađenje nakon rastvornog tretmana [1, 2, 3].

### 6.1 Toplinska obrada superlegura na bazi nikla

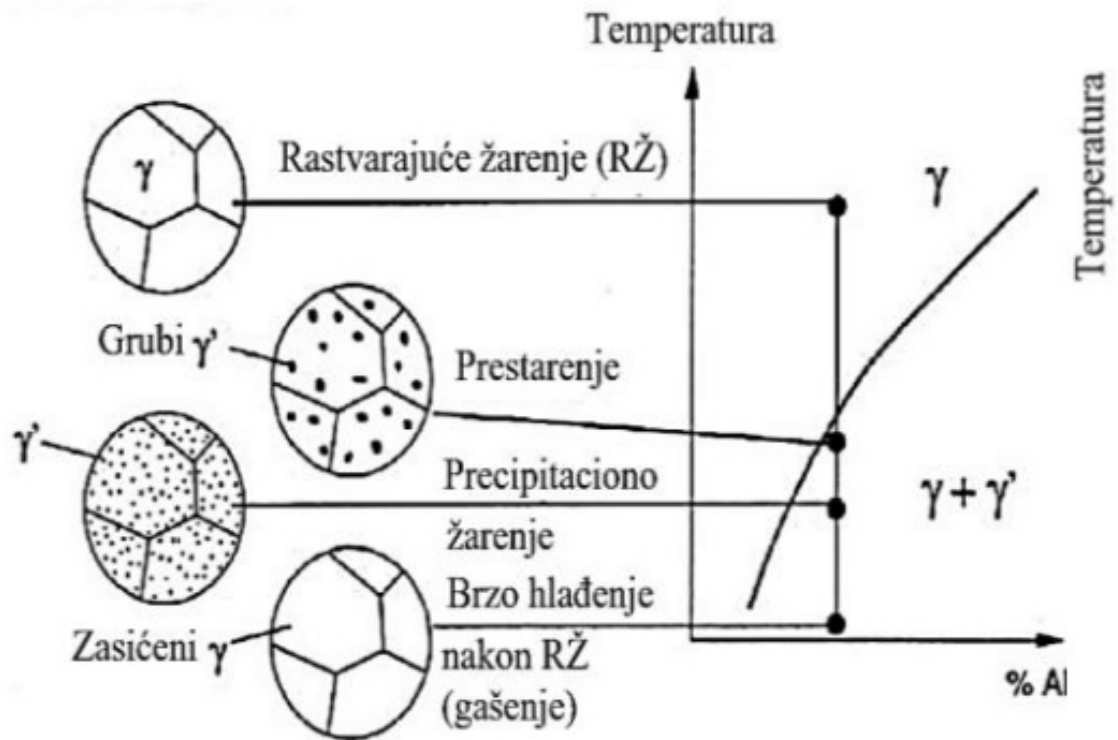
Cilj koji se želi postići toplinskom obradom superlegura na bazi nikla je da se volumni udio  $\gamma'$  faze što više poveća [1]. Tipičnu obradu možemo vidjeti iz tablice 6.1.

Tablica 6.1 Tipičan toplinski postupak superlegura na bazi nikla [1]

Termički tretman	Valjane Ni superlegure	Livene Ni superlegure
Rastvarajuće žarenje	1090°C / 4 h, hlađenje na zraku	1190°C / 2 h, hlađenje na zraku
Stabilizaciono žarenje	840°C / 2 h, hlađenje na zraku	1090°C / 4 h, hlađenje na zraku
Precipitaciono žarenje	760°C / 16 h, hlađenje na zraku	870°C / 20 h, hlađenje na zraku

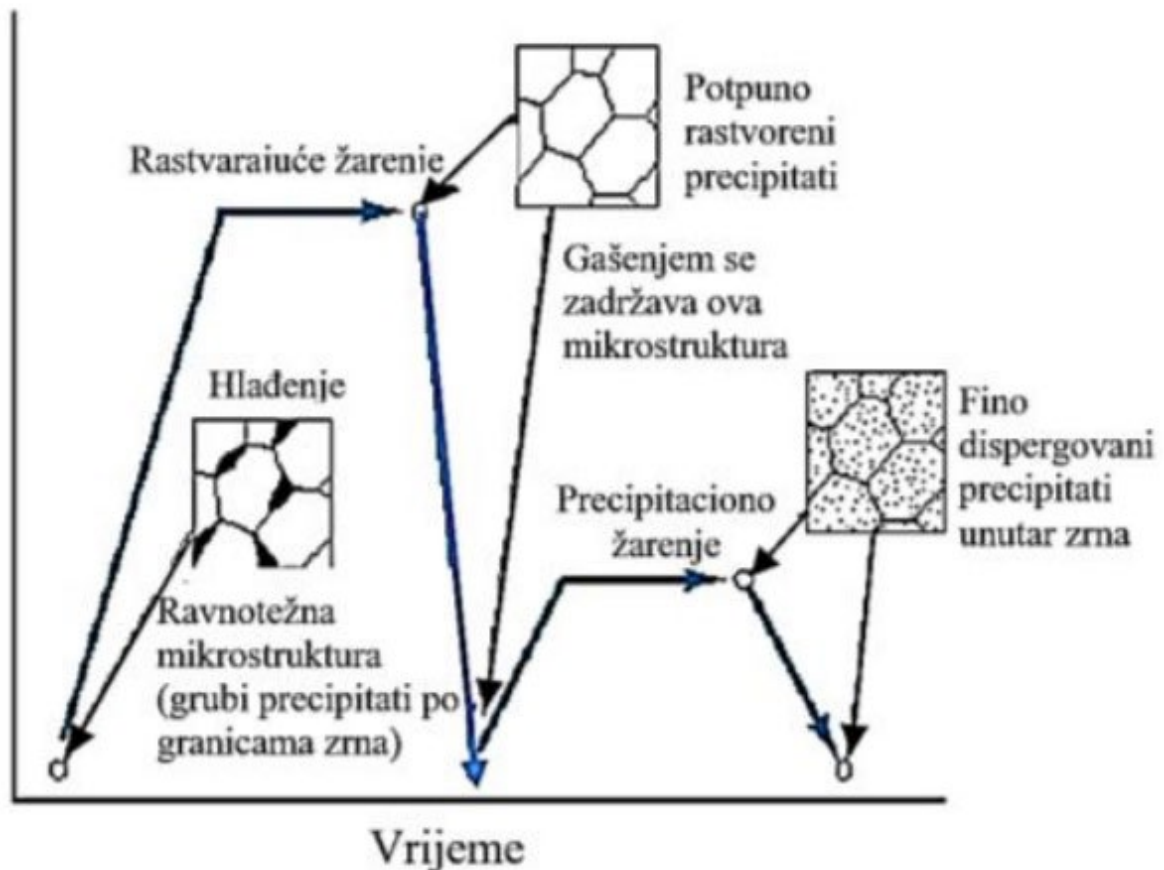
Temperatura do koje se zagrijava kada se provodi rastopno žarenje ovisi o Al+Ti udjelu u superleguri, odnosno o  $\gamma'$  fazi. Što više aluminija i titanija to treba biti veća temperatura. Udio Al+Ti je oko 4,5 %, a temperatura od 1090 °C i vrijeme žarenja od 4 sata potrebni su da se sva  $\gamma'$  faza rastvori u osnovnoj mikrostrukturi (slika 6.1). Rastopnim

žarenjem se želi postići rastop  $\gamma'$  faze i u određenoj mjeri karbidi tipa  $M_7C_3$  i  $M_{23}C_6$  da bi se njihova naknadna precipitacija mogla kontrolirati (slika 6.2). Optimalni parametri rastopnog žarenja je vrijeme žarenja od 8 sati i temperatura od 1080 °C. Viša temperatura prouzrokuje raniji lom a niža temperatura uzrokuje povećanje brzine puzanja [1].



Slika 6.1 Dijagram termičke obrade za precipitacijsko ojačane superlegure na bazi nikla [1]





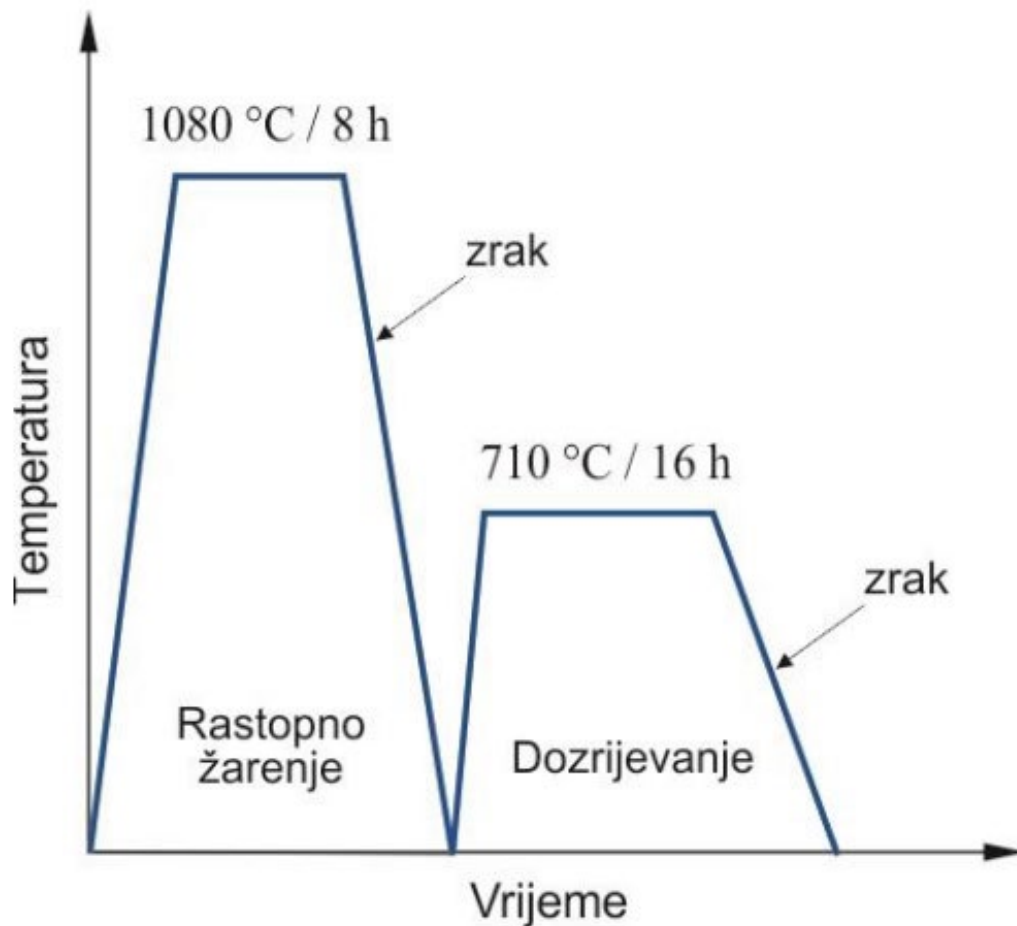
Slika 6.2 Termička obrada niklovih superlegura [1]

Tijekom precipitacijskog žarenja (700 °C/16 h, iz tablice 6.1) dolazi do precipitacije ojačavajuće  $\gamma'$  faze kao i do izdvajanja karbida tipa  $M_{23}C_6$  uglavnom po granicama zrna. Karbidi tipa  $M_7C_3$  transformiraju se u karbide tipa  $M_{23}C_6$  zbog njihove nestabilnosti na temperaturama na kojima se provodi precipitacijsko žarenje [1].

U slučaju trofazne toplinske obrade, uključuje se stabilizacijsko žarenje u trajanju od 24 h pri temperaturi od 850 °C između precipitacijskog žarenja i rastopnog žarenja. Cilj provođenja stabilizacijskog žarenja je izdvajanje većih karbida, kao diskretnih čestica po granicama zrna, kako bi se minimizirala mogućnost naknadnog formiranja nepoželjne karbidne mreže po granicama zrna tokom eksploatacije. Trofazna toplinska obrada smanjuje početna svojstva čvrstoće ali povećava duktilnost tijekom dugotrajne eksploatacije. Hlađenje između toplinskih obrada može biti u vodi ili na zraku, ovisno o veličini komada koji se obrađuje ili efekta koji se želi postići [1].

Slika 6.3 prikazuje postupak precipitacijskog očvršćivanja niklove superlegure  $NiCr_{20}TiAl$  sa 20 % udjela kroma, 2,4 % udjela titanija, 1,4 % udjela aluminija te ostatak je nikal.





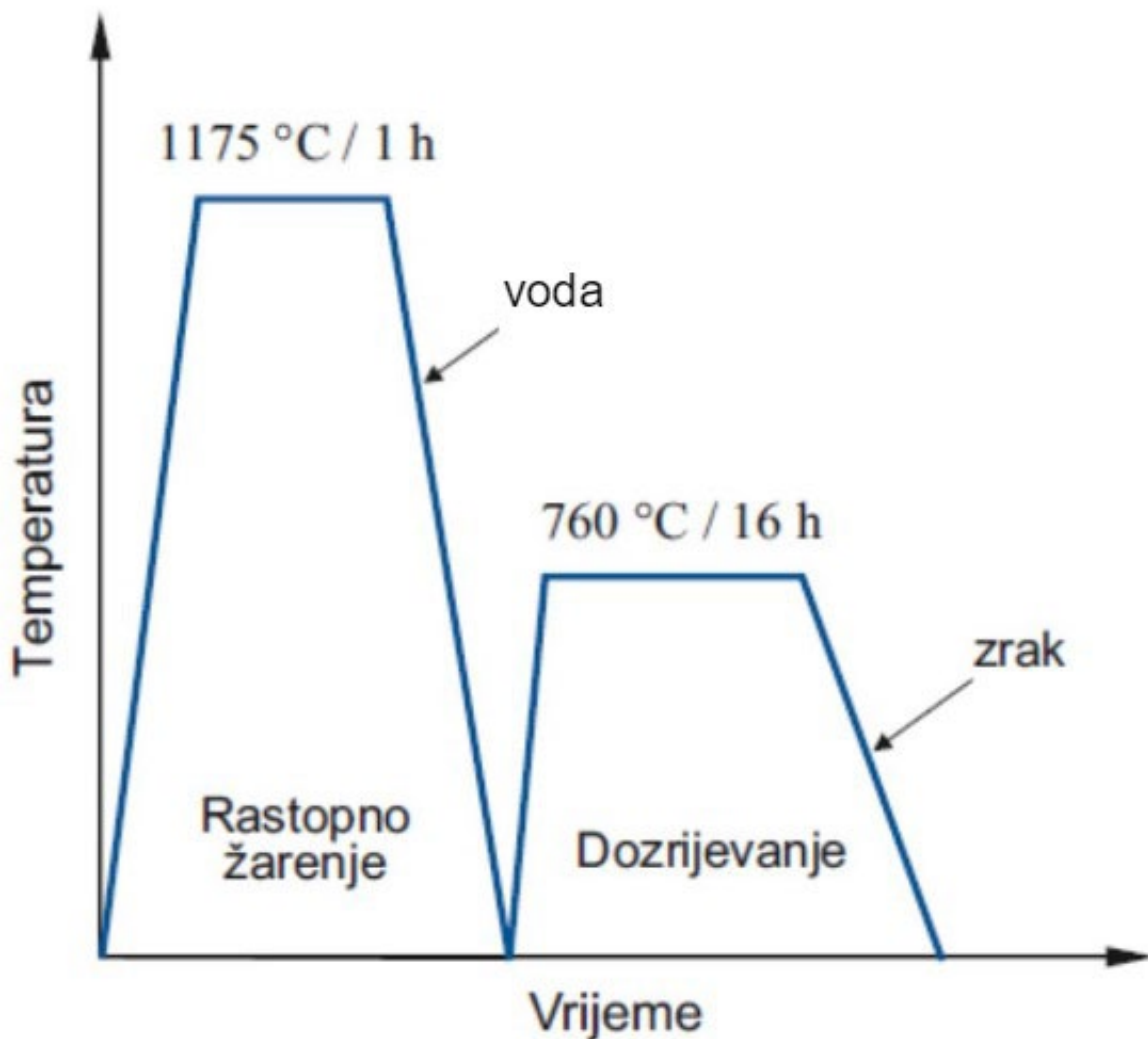
Slika 6.3 Postupak precipitacijskog očvrnuća NiCr<sub>20</sub>TiAl superlegure [2]

Temperature kod rastopnog žarenja su uglavnom između u 980 °C i 1230 °C. Unekim slučajevima monokristalnih legura temperatura može doseći i do 1315 °C. Kod viših temperatura se tijekom procesa rastopnog žarenja proizvodi grubozrnata mikrostruktura otpornija na puzanje, dok niže temperature kao rezultat tog procesa daju sitnozrnatu mikrostrukturu koja ima veću dinamičku izdržljivost i vlačnu čvrstoću. Brzo hlađenje rastopnog žarenja na zraku ili u vodi rezultira otopinom sačuvanom sve do sobne temperature [1, 2, 3].

Legura se, u postupku dozrijevanja, očvršćuje kroz izlučivanje precipitata jedne ili više faza ( $\gamma'$  ili  $\gamma''$ ). Do dozrijevanja dolazi u području temperatura između 620 °C i 1040 °C u vremenu od 4 h do 32 h. Više temperature tijekom postupka dozrijevanja osiguravaju velike  $\gamma'$  precipitate koji su poželjni u primjenama koje zahtijevaju otpornost na puzanje. Na nižim temperaturama stvaraju se sitniji  $\gamma'$  precipitati, koji se koriste kada je potrebna čvrstoća i otpornost umoru [2, 3].

## 6.2 Toplinska obrada superlegura na bazi kobalta

Superlegure na bazi kobalta koje se očvršćuju kombinacijom karbida i kristala mješanca toplinski se mogu obraditi dozrijevanjem i rastopnim žarenjem, kao na primjer legura  $\text{CoCr}_{20}\text{Ni}_{20}\text{W}$ . Na slici 6.4 prikazano je da se pri temperaturi od  $1175\text{ }^{\circ}\text{C}$  otapaju intermetalni spojevi i karbidi koji prelaze u čvrstu otopinu tijekom obrade rastopnim žarenjem. Nakon što se kobaltova superlegura ugasi u vodi te se ponovo dodatno zagrije na  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ , izlučuju se sitni karbidi koji potom usporavaju gibanje dislokacija i otežavaju klizanje granice zrna. [2].



Slika 6.4 Postupak precipitacijskog očvršnuća  $\text{CoCr}_{20}\text{Ni}_{20}\text{W}$  superlegure [3]

Vrijednosti mehaničkih svojstava rastopno žarenih i dozrijevanih legura  $\text{CoCr}_{20}\text{Ni}_{20}\text{W}$  i  $\text{CoCr}_{20}\text{W}_{15}\text{Ni}$  prikazane su u tablici 6.2

Tablica 6.2 Parametri toplinske obrade i mehanička svojstva superlegura Haynes 25 i Vaccutherm 8–13 H [2]

Oznaka legure	Sastav ostalo %	Precipitacija		R <sub>m</sub> min. MPa	A min. %	KU DVM min. J	Maksimalna temperatura primjene
		Rastopno žarenje	Dozrijevanje				
CoCr20W15Ni Zapp Haynes 25 Böhler Turbotherm 20Co50 Hastelloy	10 Ni maks. 3 Fe	1230 °C / voda	-	930	60	35	950 °C
CoCr20Ni20W Zapp Vaccutherm 8–13 H	4 Mo 4 W maks. 5 Fe 4 Nb	1175 °C / voda	760 °C / 16 h	1000	25	20	900 °C

U tablici 6.2 vidljivo je se da legura CoCr20W15Ni može pronaći pod različitim nazivima. To su primjerice Zapp Haynes 25, Böhler Turbotherm 20Co50, Hastelloy. Legura CoCr20Ni20W može se naći pod nazivom Zapp Vaccutherm 8-13 H. Iz tablice vidimo da superleguri Haynes 25 nije potrebno dozrijevanje zato što se legiranjem dovoljno ojačava. U tom slučaju je legure dovoljno samo rastvorno žariti pri temperaturi od 1230 °C kako bi se postiglo rastvaranje karbida i intermetalnih spojeva. Nakon toga se takve legure hlade kako bi se prezasićena otopina sačuvala sve do sobne temperature [1, 2].

### 6.3 Toplinska obrada precipitacijskih ojačanih Ni-Fe superlegura

Inconel 718 je najzastupljenija Fe-Ni superlegura za gnječenje, ona se očvršćuje  $\gamma''$  precipitatima ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ), mada se neke Fe-Ni superlegure mogu očvrstnuti i  $\gamma'$  precipitatima. Inconel 718 koristi se za primjenu koja zahtjeva dobru kombinaciju vlačne čvrstoće, statičku i dinamičku izdržljivost. Obraduje se rastopnim žarenjem pri temperaturi od 925 °C do 1010 °C u trajanju od 1 do 2 sata uz postepeno ohlađivanje na zraku. Precipitacijskim žarenjem, odnosno dozrijevanje na temperaturi od 720 °C u trajanju od 8 h, nakon čega slijedi hlađenje u peći do 620 °C. Te precipitacijskim žarenjem na 620 °C u trajanju od 18 sati postepenim ohlađivanjem na zraku. Niže temperature tijekom obrade rastopnim žarenjem rezultiraju boljom čvrstoćom dok više temperature tijekom obrade rezultiraju povećanjem statičke izdržljivosti i povećavaju otpornost na puzanje [1, 2, 3].

## 7. RAZLIKA IZMEĐU VATROOTPORNIH ČELIKA I SUPERLEGURA

Vatrootporni čelici su oni čelici koji pri izloženosti temperaturama iznad 550 °C pokazuju malu ili nepostojeću reakciju stvaranja ogorina, a otpornost na koroziju im je visoka. Kada su vatrootporni čelici izloženi temperaturama iznad 550 °C njihova čvrstoća se smanjuje. Mogu se upotrebljavati i na temperaturama do 1100 °C ali u neagresivnoj okolini u kojoj je prioritet samo vatrootpornost, a ne čvrstoća. Dok se za razliku od njih superlegure upotrebljavaju za temperature do 1100 °C u uvjetima koji zahtijevaju dobru otpornost na koroziju ali i dobra mehanička svojstva, čvrstoću, otpornost na puzanje, otpornost na lom materijala pri visokim temperaturama. Ponekad se upotrebljavaju i za temperature do 1300 °C ali samo kratkotrajno, da ne dođe do loma materijala [1].

*Tablica 7.1 Područja primjene vatrootpornih čelika [1]*

Oznaka čelika DIN	Oznaka čelika EN	Primjeri primjene
X10CrAl 7	X10CrAlSi 7	Limovi i cijevi u pećima, predgrijači zraka, poklopci, zaštitne pirometerske cijevi, sanduci za cementiranje u granulatu
X10CrAl 13	X10CrAlSi 13	Dijelovi za gradnju peći i parnih kotlova, (šine, nosiva i transportna užad, rešetke ložišta).
X10CrAl 18	X10CrAlSi 18	Armaturne peći, žarne cijevi, lonci za žarenje, termoelementi
X15CrNiSi 25-20	X15CrNiSi 25-21	Dijelovi peći i termičkih uređaja (žarne komore, lonci za žarenje, rešetke, grijači, stalci u pećima), ne podnosi reducirajuće plinove sa sumporom
X12CrNiSi 36-16	X12CrNiSi 35-15	Za niža mehanička naprezanja, temperature do 1100 °C, a za dijelove kao X15CrNiSi 25-20
X15CrNiSi 20-12	X15CrNiSi 20-12	Za niža mehanička naprezanja, temperature do 1150°C, a za dijelove kao X15CrNiSi 25-20
X10NiCrAlTi 32-20	X10NiCrAlTi 32-21	Dijelovi peći parnih kotlova, uređaja u rafineriji nafte (limovi do 6 mm, koji se mogu oblikovati na hladno)

Kao što možemo vidjeti iz tablice 7.1 vatrootporni čelici imaju rasprostranjenu primjenu, čak i na temperaturama do 1150 °C ali samo tamo gdje se zahtijeva niža mehanička naprezanja da ne bi došlo do loma materijala.

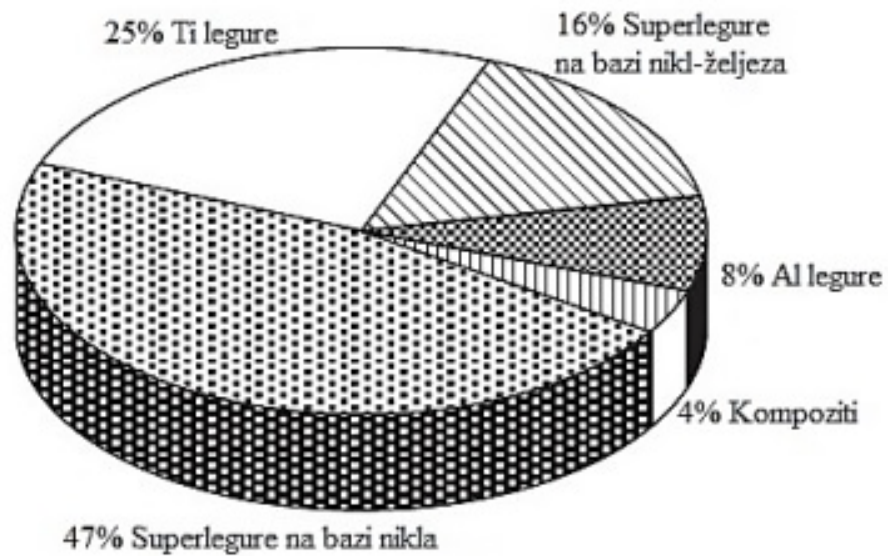
Vatrootporni čelici se legiraju sa kromom, silicijem, aluminijem, nikom i titanijem. Superlegure na bazi nikla koje su najrasprostranjenije od superlegura legiraju se sa istim elementima kao vatrootporni čelici ali oni još imaju dodatne elemente kao što su kobalt, bor, cirkonij, ugljik, hafnija, molibden, niobij, tantal, volfram te renij [2].

Kao što možemo vidjeti iz gore navedenog teksta, superlegure i vatrootporni čelici, imaju široku primjenu. Obadvoje se primjenjuje za visoke temperature do 1100 °C ali bitna razlika je čvrstoći koju materijal ima na visokim temperaturama da nebi došlo do loma materijala stoga se u agresivnim okolinama upotrebljavaju superlegure umjesto vatootpornih čelika.

## 8. PRIMJENE SUPERLEGURA U MEHATRONICI

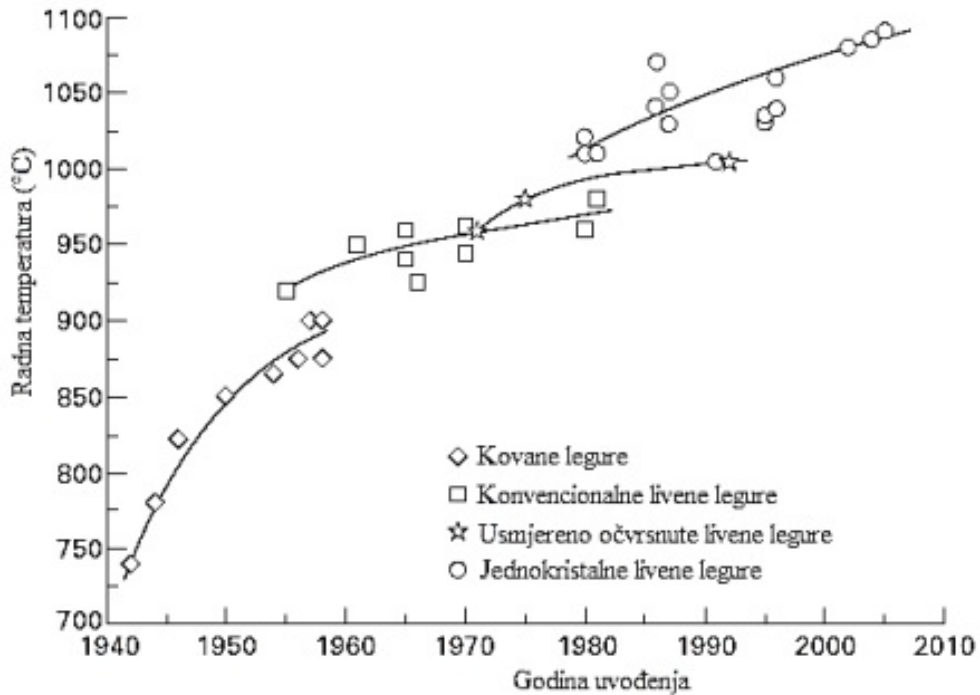
Superlegure se ponajprije zbog svojih svojstava upotrebljavaju za konstrukcijske dijelove koji rade u agresivnoj sredini i pri jako visokim temperaturama. Najviše se upotrebljavaju u avioindustriji, gdje se najčešće upotrebljavaju za izradu dijelova turbina. Tri četvrtine primjena superlegura je vezano za avioindustriju. Osim u avioindustriji također se upotrebljavaju i u kemijskim i petrokemijskim industrijama, metalurškoj industriji, u nuklearnim reaktorima, industrijskim pećima, u raketnim motorima, medicini te sve više i u automobilskoj industriji [1].

U avioindustriji superlegure na bazi nikla se primjenjuju za dijelove koji rade sa izuzetno visokim temperaturama, kao što su lopatice turbina. Lopatice su stalno pod velikim naprezanjima stoga moraju imati visoku čvrstoću, dobru otpornost na puzanje, koroziju, zamor i toplinsku ekspanziju. Niklove superlegure u turbinama još se upotrebljavaju za diskove, vijke, osovine, kućišta te dijelove turbina gdje se događa izgaranje. Cijela turbina nije izrađena od superlegura zbog toga što masa motora mora biti minimalna zato se i dalje u nekim dijelovima motora upotrebljavaju legure titanija i aluminija. Pošto kobaltove superlegure imaju visoku otpornost na koroziju, u turbinama se primjenjuju za komponente avionskih motora u kojima dolazi do sagorijevanja vrućih plinova koji i uzrokuju koroziju, te se više upotrebljavaju za statičke komponente. Također se upotrebljavaju i superlegure na bazi nikla i željeza zbog svoje niske toplinske ekspanzije ali u manjim udjelima nego samo niklove superlegure [1, 9].



Slika 8.1 Raspodjela materijala u glavnim komponentama modernih mlaznih motora [2]

Na slici 8.1 možemo vidjeti da superlegure zauzimaju više od 50 % dijelova mlaznih motora. Primjenjene su na dijelovima koji rade sa temperaturama od 900 °C do 1300 °C. 25 % zauzimaju legure titanija koje su ograničene za rad na temperaturama do 550 °C kao što su komponente kompresora i ventilatora. Da bi se smanjila masa motora primjenu uz titanij su također našli kompoziti i legure aluminija koji zauzimaju 12 %, te se oni primjenjuju na temperaturama do 150 °C kao što su lopatice ventilatora.

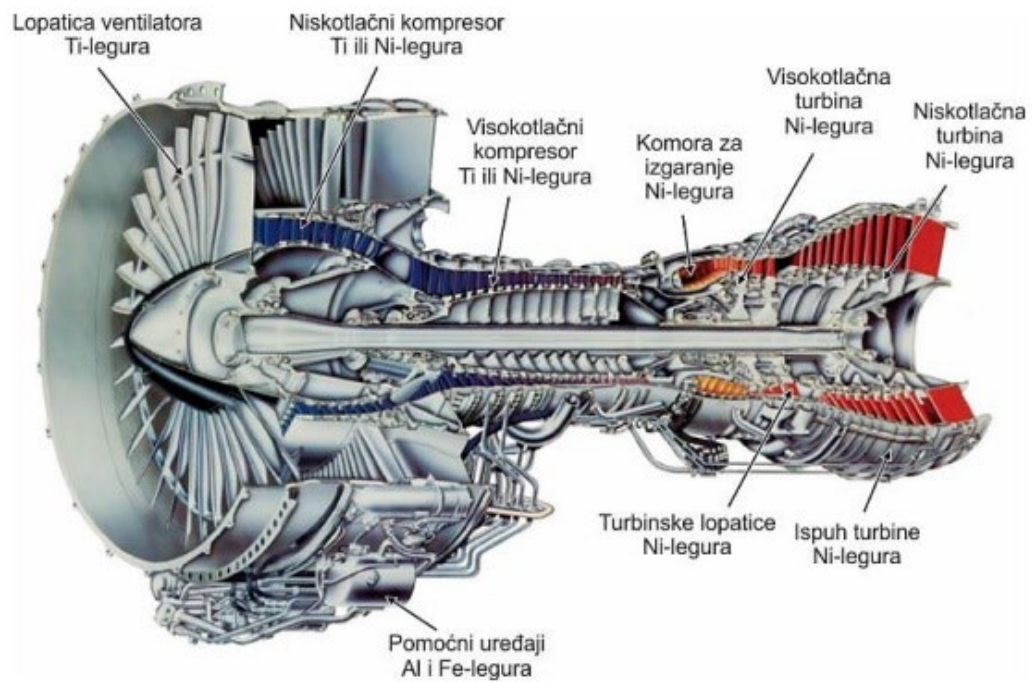


Slika 8.2 Povećanje radne temperature superlegura za mlazne motore [1]

Sa slike 8.2 možemo vidjeti po godinama kako se kretala radna temperatura mlaznih motora te kako se otkrićem novih materijala ona povećavala. 1940 godine radna maksimalna radna temperatura bila je oko 730 °C a u današnje vrijeme ona iznosi oko 1300°C.

U nuklearnim postrojenjima superlegure se upotrebljavaju za opruge, cjevovode, ventile, kontrolne šipke. U kemijskim postrojenjima superlegure imaju sličnu primjenu, od njih su rađeni vijci, ventili, opruge, cjevovodi te reakcijske posude. Automobilaska industrija koristi superlegure za ispušne ventile, turbopunjače i svjećice četverotaknih motora. Zrakoplovstvo za dijelove mlaznog motora. U medicini se koriste za proteze u stomatologiji, umjetne kukove i koljena. U metalurškoj industriji za rezne alate visokotemperaturne obrade i kalupe [9].





*Slika 8.3 Superlegure u turbini mlaznog motora [2]*



*Slika 8.4 Umjetni kuk na bazi kobalta [1]*



*Slika 8.5 vijci od superlegura na bazi nikla [10]*



*Slika 8.6 Cijevi od niklovih superlegura [11]*

## 9. ZAKLJUČAK

Za visoke temperature upotrebljavaju se razni materijali koji imaju odgovarajuća svojstva potrebna za upotrebu. Legiranjem čistih metala stvara se materijal koja ima više kombiniranih svojstava. Postoje materijali za niske, povišene i visoke temperature. Materijali za visoke temperature upotrebljavaju se u okruženjima iznad 450 °C. Djelovanjem pri visokim temperaturama javljaju se prvi problemi kao što su puzanje materijala i korozija. Iz tog su razloga napravljeni vatrootporni čelici sa velikom otpornošću na koroziju pri visokim temperaturama. Kako god, nedostatak im je što nemaju veliku čvrstoću. Vatrootporni čelici upotrebljavaju se do 900 °C. U nekim situacijama ta temperatura doseže i 1150 °C, ali isključivo u neagresivnoj okolini koja ne zahtijeva veliku čvrstoću materijala. Da bi se zadovoljilo svojstvo materijala otpornosti na koroziju i postojanje dobrih mehaničkih svojstava napravljene su superlegure. Superlegure imaju kombinaciju svojstava visoke čvrstoće, dobre otpornosti prema puzanju, dobre otpornosti na koroziju te toplinsku stabilnost na visokim temperaturama.

Superlegure se dijele na superlegure na bazi nikla, kobalta te željeza-nikla. Upotrebljavaju se do temperature od 1100 °C. Razlika od vatrootpornih legura je u tome što se one upotrebljavaju u agresivnim sredinama gdje uvijek ima mehaničkih naprezanja. Mogu se upotrebljavati i do 1300 °C ali samo na kratko vrijeme kako ne bi došlo do trajne deformacije materijala. Superlegure se toplinski obrađuju precipitacijskim, rastopnim i stabilizacijskim žarenjem. Glavno obilježje je kubično plošna centrirana (FCC) kristalna struktura u području visokih temperatura kod kobalta i željeza dok kod nikla ona je postojana od apsolutne nule do temperature tališta. Najviše se upotrebljavaju superlegure na bazi nikla, a do  $\frac{3}{4}$  njihove primjene odnosi se na avioindustriju za izradu dijelova turbina. Kobaltove superlegure imaju veću otpornost na koroziju nego niklove superlegure, ali manju otpornost na puzanje stoga se one upotrebljavaju više za statičke dijelove turbina. Dijelovi turbina koji se koriste u avionima dizajniraju se i upravljaju računalima. Potrebno je jako precizno dizajniranje da ne bi došlo do kvara u radu ili oštećenja drugih dijelova predimenzioniranjem rotirajućih elemenata. Svi ti dijelovi su u biti strojarski, te za njihovu izradu potrebno je dobro poznavanje materijala i strojeva s kojima se proizvode. Superlegure se koriste u numerički upravljanim postrojenjima i uređajima u kojima se koriste različite kodirane naredbe programskog jezika. To omogućuje znatnu prilagodljivost u radu i uštedu vremena. Zbog toga je upotreba CNC, odnosno numeričkog upravljanja u porastu, a primjer toga su CNC glodalice čija su svdrla izrađena od superlegura. Uz to, superlegure se upotrebljavaju

i u kemijskim i petrokemijskim industrijama, metalurškoj industriji, u nuklearnim reaktorima, industrijskim pećima, u raketnim motorima, medicini te sve više i u automobilskoj industriji. Počele su se razvijati supelegure koje mogu izdržati i veću temperaturu nego niklove ali još se nije uspjelo napraviti da pri tim temperaturama imaju i dobra mehanička svojstva.

## 10. LITERATURA

- [1] Sunulahpašić R., Oruč M. Superlegure. Stručni rad. Zenica: Metalurško-tehnološki fakultet, Univerzitet u Zenici: 2020. Dostupno na: [https://www.researchgate.net/profile/Mirsada-Oruc/publication/348405009\\_SUPERLEGURE/links/5ffd47e292851c13fe06b9eb/SUPERLEGURE.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mirsada-Oruc/publication/348405009_SUPERLEGURE/links/5ffd47e292851c13fe06b9eb/SUPERLEGURE.pdf).
- [2] Ćorić D. Posebni metalni materijali - III dio. Nastavna literatura. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu: 2019. Dostupno na : [http://repozitorij.fsb.hr/8089/1/Posebni%20metalni%20materijali%20-%20III%20Dio\\_srpanj\\_2019.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/8089/1/Posebni%20metalni%20materijali%20-%20III%20Dio_srpanj_2019.pdf).
- [3] Ćorić D. Posebni metalni materijali. Predavanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu: 2016./2017. Dostupno na: <https://docplayer.net/41786699-Posebni-metalni-materijali.html>
- [4] Pongrac M. Materijali za tlačne posude. Završni rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu: 2016. Dostupno na: <https://core.ac.uk/download/pdf/79433555.pdf>
- [5] Nowotnik A. Nickel-Based Superalloys. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2016. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.02574-1 <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/superalloys> (Datum pristupa: 28.07.2022.).
- [6] Wieland diversified. Advantages of using alloys. Članak na web stranici. Dostupno na: <https://www.wieland-diversified.com/blog/the-advantages-of-using-metal-alloys-over-pure-metals/> (Datum pristupa 01.08.2022.).
- [7] Warner brothers foundry company. Advantages of alloys over pure metals. Članak na web stranici. Dostupno na: <https://www.wbcastings.com/blog/advantages-of-alloys/> (Datum pristupa 01.08.2022.).
- [8] Tomac N., Žekar D. Tehnologija materijala i obrade. Seminarski rad. Rijeka: Pomorski fakultet u Rijeci: 2013. Dostupno na: <https://pdfcoffee.com/superlegure-pdf-free.html>.
- [9] Superalloys: Properties, Processing, and Applications. Članak na web stranici. Dostupno na : <https://matmatch.com/learn/material/superalloys> (Datum pristupa 16.08.2022.).
- [10] INCONEL 718 BOLTS. Članak na web stranici. Dostupno na: <https://www.asiadsteels.com/inconel-718-bolt-manufacturer-exporter.html> (Datum pristupa 24.08.2022.).

[11] Inconel 718 Cijevi ASTM B983, B704 / ASME SB983, SB704. Članak na web stranici.  
Dostupno na: <https://bs.emilymetal.com/1036.html> (Datum pristupa 24.08.2022.).

## 11. OZNAKE I KRATICE

°C – stupanj Celzijus

Al – Aluminij

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – aluminijev oksid

B - Bor

BC – borov karbid

BCC – Body Centered Cubic (prostorno centrirana kubična struktura)

C – Ugljik

C/C kompoziti – ugljik ojačan ugljičnim vlaknima

CMC – keramički matični kompozit

CNC – Computer numerical control (računalno numeričko upravljanje)

Co – Kobalt

Cr – Krom

Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> – kromov karbid

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – kromov oksid

FCC – Face Centered Cubic (plošno centrirana kubična struktura)

Fe – Željezo

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – željezov oksid

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – željezov oksid

FeO – železov oksid

h – sat

HCP – Hexagonal Close Packed (heksagonska gusto slagana struktura)

Hf – Hafnij

HRSA materijali – Heat Resistant Super Alloys (vatrootporne superlegure)

M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> – karbid koji se sastoji od željeza, ugljika, kroma i molibdena

M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> – karbid koji se sastoji od kroma, ugljika, željeza i vanadijuma

Mg – Magnezij

Mn – Mangan

Mo – Molibden

Mo<sub>23</sub>C<sub>6</sub> – molibdenov karbid

MoO<sub>2</sub> – molibdenov karbid

N – njutn

N/mm<sup>2</sup> – njutn po milimetru kvadratnom

Nb – Niobij  
NbC – niobijev karbid  
Ni – Nikal  
Re – Renij  
Rh – Rodij  
R<sub>m</sub> – vlačna čvrstoća  
RZ – rijetka zemlja ili lantanidi  
Si – Silicij  
SiO<sub>2</sub> – silicijev oksid  
Ta – Tantal  
TaC – tantalov karbid  
Ti – Titanij  
TiC – titanijev karbid  
Tr – radna temperatura  
V – Vanadij  
W – Volfram  
W<sub>23</sub>C<sub>6</sub> – volframov karbid  
WC – volframov karbid  
Zn – Cink  
Zr – Cirkonij  
ZrC – cirkonijev karbid  
 $\alpha$  modifikacija – alotropska modifikacija željeza  
 $\beta$  modifikacija – alotropska modifikacija željeza  
 $\gamma'$  – intermetalni spoj (Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>Ti)  
 $\gamma''$  – intermetalni spoj (Ni<sub>3</sub>Nb)



## 12. SAŽETAK

**Naslov:** Primjena superlegura u mehatronici

Superlegure su materijali koji se upotrebljavaju za visoke temperature u agresivnim okolinama koje zahtijevaju dobra mehanička svojstva i dobru otpornost na koroziju. Dije se na superlegure na bazi nikla, kobalta i željeza-nikla. Najviše se obrađuju precipitacijskim očvršćivanjem. Upotrebljavaju se za temperature do 1100 °C, ponekad i do 1300 °C ali samo kratkotrajno da ne dođe do pucanja materijala. Glavno obilježje im je kubično plošna centrirana (FCC) kristalna rešetka koja je kod željeza i kobalta postojana samo na visokim temperaturama a kod nikla je postojana od apsolutne nule do temperature tališta. Najviše se upotrebljavaju u avioindustriji za izradu dijelova turbina motora. Primjena superlegura još se može pronaći i u medicini, kemijskim i petrokemijskim industrijama, metalurškoj industriji, nuklearnim reaktorima te industrijskim pećima.

**Ključne riječi:** Superlegura, nikal, kubično plošna centrirana rešetka, precipitacijsko očvršćivanje.

### 13. ABSTRACT

**Title:** Application of superalloys in mechatronics

Superalloys are materials used for high temperatures in aggressive environments that require good mechanical properties and good corrosion resistance. They are divided into superalloys based on nickel, cobalt and iron-nickel. They are mostly processed by precipitation hardening. They are used for temperatures up to 1100 °C, sometimes up to 1300 °C, but only for a short time, so that the material does not crack. Their main characteristic is a face-centered cubic lattice (FCC), which is stable only at high temperatures in the case of iron and cobalt, and stable from absolute zero to the melting temperature in the case of nickel. They are mostly used in the aviation industry for the production of engine turbine parts. Application of superalloys can also be found in medicine, chemical and petrochemical industries, metallurgical industry, nuclear reactors and industrial furnaces.

**Keywords:** Superalloy, nickel, face-centered cubic lattice, precipitation hardening.

## IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>15. rujna 2022</u>	Edi Kilić	E. Kilić

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

Edi Kilić

*ime i prezime studenta/ice*

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 15. rujna 2022.

E. Uvinski

*potpis studenta/ice*