

Ponašanje i primjena metalnih materijala na različitim temperaturama u mehatronici

Gmajnić, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:144:524315>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

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



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

**PONAŠANJE I PRIMJENA METALNIH MATERIJALA
NA RAZLIČITIM TEMPERATURAMA U
MEHATRONICI**

Završni rad br. 04/MEH/2018

Martin Gmajnić

Bjelovar, lipanj 2018.



Veleučilište u Bjelovaru

Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Gmajnić Martin**

Datum: 29.03.2018.

Matični broj: 001037

JMBAG: 0314010194

Kolegij: **TEHNIČKI MATERIJALI**

Naslov rada (tema): **Ponašanje i primjena metalnih materijala na različitim temperaturama u mehatronici**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Proizvodno strojarstvo**

Mentor: **mr.sc. Stjepan Golubić** zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., predsjednik
2. mr.sc. Stjepan Golubić, mentor
3. Božidar Hršak, mag.ing.mech., član

2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 04/MEH/2018

U radu je potrebno:

- opisati metalne materijale općenito,
- opisati materijale za rad na povišenim i visokim temperaturama,
- opisati materijale za rad na niskim temperaturama,
- opisati primjere primjene u mehatronici.

Zadatak uručen: 29.03.2018.

Mentor: **mr.sc. Stjepan Golubić**



Zahvala

Zahvaljujem mentoru mr.sc. Stjepanu Golubiću na pomoći u izradi završnog rada te ukazanom povjerenju. Zahvaljujem i cijelom radnom kolektivu Veleučilišta u Bjelovaru, nastavnicima i svim ostalim djelatnicima škole na pomoći i dobroj suradnji kroz godine studiranja.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. METALNI MATERIJALI	2
2.1 <i>Uvod u metalne materijale – podjela</i>	2
2.1.1 Podjela metalnih materijala.....	4
2.1.2 Pojam različitih radnih temperatura za metalne materijale	5
2.1.3 Primjeri korisnosti povišenja radne temperature	6
2.1.4 Promjene mehaničkih svojstava porastom temperature	7
2.1.5 Puzanje	9
2.2 <i>Metalni materijali za povišene i visoke temperature</i>	12
2.2.1 Vrste čelika mehanički otpornih pri povišenim i visokim temperaturama	12
2.2.2 Ugljični (nelegirani) čelici (za rad pri povišenim temperaturama, $\vartheta_r < 450^\circ$).....	13
2.2.3 Niskolegirani Mo- ili Mo-Cr-čelici (za rad pri visokim temperaturama, $\vartheta_r < 550^\circ$)	14
2.2.4 Visokolegirani martenzitni super 12%Cr ⁴ čelici (za rad pri visokim temperaturama, $\vartheta_r < 600^\circ$)	17
2.2.5 Visokolegirani austenitni Cr-Ni čelici (za rad pri visokim temperaturama, $\vartheta_r < 750^\circ$)	20
2.2.6 Vatrootporni čelici	23
2.2.7 Ventilski čelici	25
2.2.8 Ultračvrsti čelici ($R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$)	27
2.3 <i>Metalni materijali za niske i vrlo niske temperature</i>	29
2.3.1 Čelici za rad pri niskim i vrlo niskim temperaturama	29
2.3.2 Aluminij i aluminijske legure za rad pri niskim temperaturama	34
3. ZAKLJUČAK	36
4. LITERATURA	37
5. OZNAKE I KRATICE	38
6. SAŽETAK	39
7. ABSTRACT	40

1. Uvod

Pojam metalnih materijala obuhvaća one materijale koji u svome mikroskopskom sastavu sadržavaju metal ili primjese više metala da im se poboljšaju svojstva. Ovisno o uporabi metalnog materijala potrebno je odlučiti koji je materijal najpogodniji za korištenje.

Završni rad obuhvaća one metale koji se koriste pri visokim i niskim temperaturama, ponašanje pri različitoj temperaturi te njihova primjena. Rad je podijeljen u tri dijela. U prvom poglavlju osnovna je podjela metalnih materijala, definiranje niskih, povišenih i visokih temperatura te promjene mehaničkih svojstava prilikom različitih temperatura.

Drugo poglavlje obuhvaća metalne materijale za povišene i visoke radne temperature gdje su navedene vrste čelika koji se najčešće koriste u praksi. Povišene ili visoke temperature vladaju u termoenergetskim postrojenjima, kemijskim i procesnim postrojenjima, u metalurškim pogonima, u nuklearnim električnim centralama, gdje se od takvih materijala najčešće izrađuju turbine, toplinski čvrsti vijci i matice itd. Parni kotlovi, plinske turbine, odnosno uređaji koji u svojoj uporabi koriste visoke temperature imaju i veću korisnost, do one mjere koju dopušta materijal od koje je uređaj izrađen.

Treće poglavlje sadržava metalne materijale za primjenu pri niskim i vrlo niskim temperaturama od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa sve do apsolutne nule. Pri tako niskim temperaturama izbor metalnog materijala za primjenu se sužava, odnosno, najčešća je primjena metala na bazi željeza zbog njihove velike čvrstoće. Zatim ih slijede čelik i aluminij koji zahtijevaju promijenjena svojstva, najčešće postupkom legiranja sa drugim metalima.

2. METALNI MATERIJALI

2.1 *Uvod u metalne materijale – podjela*

Napredak civilizacije od samih njenih početaka usko je povezan s otkrivanjem, dobivanjem, preradom i oblikovanjem materijala u korisne tvorevine. Rana su razdoblja povijesti poistovječena s vrstom otkrivenog materijala ili s najčešće korištenim materijalima.

Od samih početaka život čovjeka bio je obilježen drvom, kamenom, kostima, krznom i drugim materijalima izravno dobivenim iz prirode.

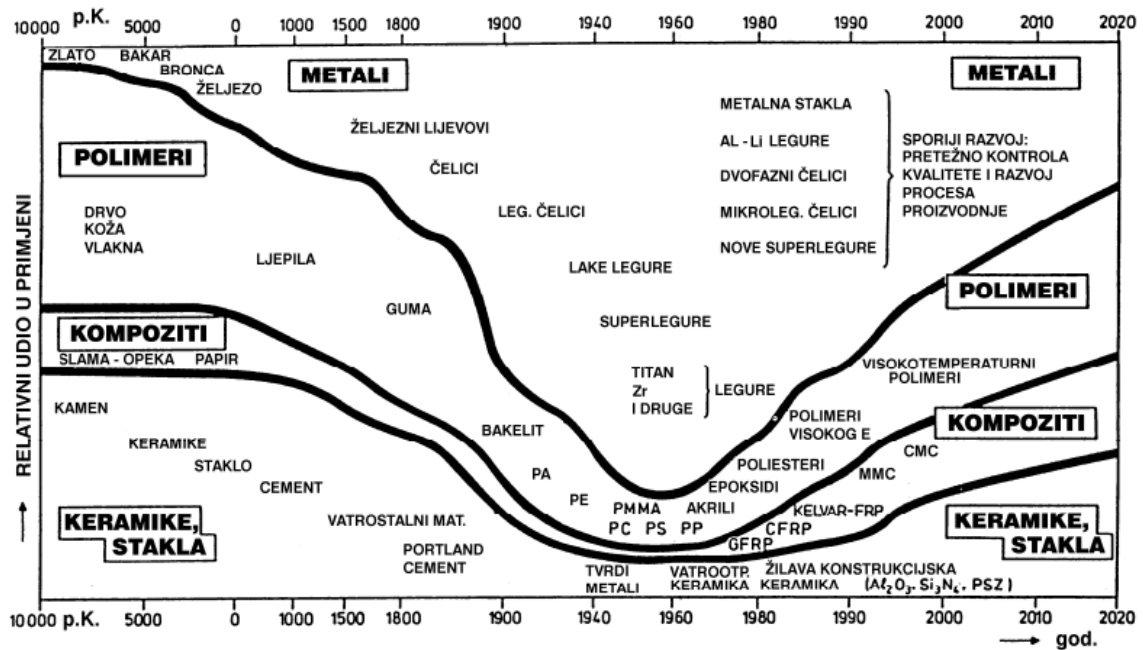
Želja za kvalitetnijim i lakšim životom poticala je i potiče ljude na izradu sve složenijih tvorevina, čije se nove funkcije i svojstva ne mogu ostvariti s klasičnim materijalima. Ovisnost kvalitete materijala i proizvoda danas sve manje ovisi o čovjeku, neposrednom proizvođaču, iako su iskustvo i vještine pojedinaca i dalje potrebne i nezamjenjive.

Broj, raznovrsnost i količine materijala u stalnom su porastu - od masovne količine manjeg broja vrsta do današnjih vrlo velikih količina mnogobrojnih kombinacija tipova. Današnje procjene govore da raspoložemo s više od 70000 vrsta tehničkih materijala. U posljednjih 50 – ak godina u uporabu je ušlo više novih materijala nego u svim prethodnim stoljećima. Materijali na bazi željeza postižu zasićenje u proizvodnji i potrošnji (oko 65% proizvodnje i primjene svih materijala), a istodobno raste udio primjene aluminijevih, titanovih, magnezijevih i drugih legura, polimernih, keramičkih i posebno kompozitnih materijala.

Promatranje i analiza vrsta ugrađenih materijala u automobil, zrakoplov, brod ili čamac, bicikl ili bilo koji kućanski aparat nekad i danas pokazuju da su oni sastavljeni od bitno drugačijih vrsta materijala. Današnje konstrukcije su lakše, trajnije, pouzdanije, jeftinije i ljepše od sličnih nekadašnjih. Zahvaljujući, između ostalog, razvoju i primjeni novih materijala i pripadajućih proizvodnih postupaka smanjena je masa, obujam i cijena, povećana snaga i učinak, olakšano rukovanje i poboljšan izgled.

Sve veća proizvodnja i prerada materijala utječu na procese u prirodi, ponajprije na iscrpljivanje neobnovljivih izvora sirovina i na zagađivanje. Porazna je činjenica da količine otpadnih materijala još uvijek rastu proporcionalno s količinama proizvedenih materijala [1].

Na slici 2.1 prikazane su vrste materijala kroz povijest.



Slika 2.1 Vrste i razvoj materijala kroz povijest[2]

U kamenom dobu od 100 000 do 10 000 g.p.K. alati i oružje su izrađivani od obrađenog kamena, a od 6000 do 4 000 g.p.K. od brušenog, piljenog i bušenog kamena.

Keramika i glina otkriveni su oko 6 000 g.p.K., a glazure 2 000 g.p.K.

Bakar je najstariji metal, pronađen u srednjem kamenom dobu (8 000 g.p.K.).

Taljenje je bilo poznato 6 000 g.p.K. a vađenje ruda 2 000 g.p.K.

U istom razdoblju pronađeno je i zlato.

Brončano doba je započelo na Bliskom Istoku oko 3 000 g.p.K, u srednjoj Europi 1 800. do 700 g.p.K, a u Grčkoj 500 g.p.K

Željezno doba je završno prapovijesno razdoblje koje se nastavlja na brončano doba. U Europi uglavnom traje tijekom 1. tisućljeća pr. Kr. postupci proizvodnje i prerade željeza su relativno noviji :

- taljenje i lijevanje je razvijeno u 14. st.,
- procesi u visokoj peći u 16. st.,
- proizvodnja nelegiranog čelika u 18. st., a legiranih tek u 20. st.

Austenitni nehrđajući čelici razvijeni su kvantitativnom primjenom znanstvenih spoznaja oko 1935., a mikrolegirani čelici povišene čvrstoće tek oko 1965. godine

Industrijska proizvodnja aluminija je stara tek nešto više od 115 g. (1889. u Švicarskoj).

Al-legure razvijene su oko 1920. god.

Prirodni kaučuk kao prvipolimerni materijal se počinje proizvoditi 1839. g., industrijska proizvodnja današnjih polimera počinje tek oko 1930. god. [1].

2.1.1 *Podjela metalnih materijala*

Prema sastavu, mikrostrukturi i načinu dobivanja metalne materijale dijelimo na [1]:

1) **Materijale na bazi željeza**

a) **Željezni ljevovi**

- čelični ljev,
- bijeli tvrdi ljev,
- sivi ljev,
- nodularni (žilavi) ljev,
- temper (kovkasti) ljev,

b) **Konstruktivski čelici**

- opći konstrukcijski,
- čelici povišene čvrstoće,
- ultračvrsti čelici,
- čelici za cementiranje,
- čelici za poboljšavanje,
- čelici za opruge,
- čelici poboljšane rezljivosti,
- korozivski postojani čelici,
- čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama,
- vatrootporni čelici,
- čelici za rad pri niskim temperaturama,
- čelici posebnih svojstava,

c) **Alatni čelici**

- čelici za hladni rad,
- čelici za topli rad,
- brzorezničelici,

2) **Laki i obojeni metali i legure (neželjezni metali i legure)**

- Al – legure,
- Cu – legure,

- Ni – legure,
- Ti – legure,
- Mg – legure...

2.1.2 *Pojam različitih radnih temperatura za metalne materijale*

Pojam različitih radnih temperatura je definiran kod više autora na različit način. U različitim literaturama se tako navode različiti kriteriji kada su to niske, a kada visoke radne temperature.

Prema prijedlogu ruskih autora dogovorno se radne temperature proizvoda od metala dijele na:

- niske temperature : $T_r < (< 0,25 \cdot T_t)$,
- povišene temperature : $(< 0,25 \cdot T_t) < (0,4 \cdot T_t)$,
- visoke temperature : $T_r > (0,4 \cdot T_t)$,

gdje su :

- T_r , u K...radna temperature
- T_t , u K...talište

U slijedećem primjeru za Fe – legure vidimo relativnost visine temperature:

- niske temperature su niže od $0,25 \cdot (1536 + 273)$ tj. niže su od oko 450 K, što znači da za Fe – legure niskim treba smatrati radne temperature niže od 180 °C
- povišenim temperaturama smatrat će se tako sve one između 180 i 450 °C
- visoke temperature za Fe – legure su sve one iznad 450 °C, a to su praktički temperature više od rekristalizacijske temperature čistog Fe, hladno oblikovanog deformiranjem sa stupnjem oblikovanja višim od 92%.

Za ostale važnije metale niske, povišene, visoke radne temperature prikazane su u tablici 2.1. Iskustva pokazuju da se zadovoljavajuća mehanička svojstva postižu do temperatura od približno $2/3 \cdot T_t$ premda su u praksi maksimalne radne temperature često znatno niže.

Tablica 2.1 Niske, povišene i visoke temperature važnijih metala[3]

Legirna osnova	Talište čistog metala $\delta_t, ^\circ\text{C}$	Niske temperature $<, ^\circ\text{C}$	Povišene temperature od $^\circ\text{C}$ do $^\circ\text{C}$	Visoke temperature $>, ^\circ\text{C}$
Al	660, 37	-40	-40 ... + 100	+100
Cu	1084, 5	66	66 ... 270	270
Ti	1672	215	215 ... 505	505
Ni	1455	160	160 ... 420	420

Po kriterijima američkih autora primjenjivost pojedinih legirnih sustava obuhvaća, uz radnu temperaturu još visinu radnog naprezanja i vremenskom trajanju opterećenja (kratkotrajno ili dugotrajno)[3, 4].

2.1.3 *Primjeri korisnosti povišenja radne temperature*

Pojam povišene temperature – u ovom kontekstu, odnosi se na sve radne temperature iznad sobne temperature, no kad se upotrebljava za ugljične i niskolegirane čelike, izraz povišene temperature odnosi se na područje temperatura od $370\text{ }^\circ\text{C}$ do $650\text{ }^\circ\text{C}$.

Za različite grupe materijala, može se približno reći, da njihovo specifično ponašanje počinje pri različitim temperaturama. Tako aluminijske legure prve znakove promjene statičke čvrstoće pokazuju pri $205\text{ }^\circ\text{C}$, niskolegirani čelici pri $370\text{ }^\circ\text{C}$, austenitni čelici pri $540\text{ }^\circ\text{C}$, legure na bazi nikla i kobalta pri $650\text{ }^\circ\text{C}$.

Najširu primjenu za povišene, odnosno visoke temperature imaju čelici (nisko i visokolegirani). Da bi se ispravno shvatila koncepcija izbora materijala za povišene i visoke temperature treba uzeti u obzir slijedeće činjenice: pojedini uređaji kao na primjer parni kotlovi ili plinske turbine, imaju veći koeficijent korisnog djelovanja pri višim radnim temperaturama. Maksimalna radna temperatura pri kojoj oprema može raditi, ograničena je svojstvima materijala iz kojih je ona izrađena. Otpornost metala prema sniženju svojstava na povišenim temperaturama obično je tim veća – što je veći udio legirnih elemenata. Cijena tih materijala također raste sa udjelom legirnih elemenata. Prema tome, izbor metalnih materijala za rad na povišenim temperaturama uvijek je kompromis između boljih svojstava pri višoj radnoj temperaturi i cijene opreme uključujući troškove materijala, izrade i održavanja [5].

Povišene ili visoke temperature vladaju u termoenergetskim postrojenjima, kemijskim procesnim postrojenjima, u metalurškim pogonima, u nuklearnim električnim centralama, raketama i svemirskim brodovima i sl., pa se od takvih materijala izrađuju:

- dijelovi parnih kotlova,
- dijelovi uređaja za preradbu nafte,
- kolektori pare kotlova i turbina,
- dijelovi parnih i plinskih turbina (osovine, rotori, lopatice),
- cijevi i oplata pregrijača pare,
- toplinski čvrsti vijci i matice,
- dijelovi motora s unutarnjim izgaranjem (posebno velikih brodskih).

Važnost daljnjeg unaprjeđenja materijala za rad pri visokim temperaturama vidi se iz činjenice da je danas materijal jedini ograničavajući faktor daljnjem povišenju temperature ito zbog naprezanja ili što preskupe primjene.

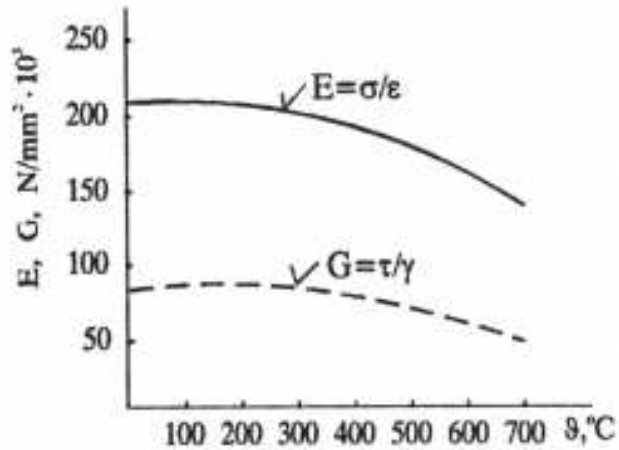
Na dijelove strojeva izložene dugotrajnom djelovanju naprezanja pri povišenoj ili visokoj temperaturi djeluje i okoliš koji na temperaturama iznad 600 °C izaziva kemijsku koroziju – oksidaciju. Poželjno je da se čelici opiru tom djelovanju no nažalost još uvijek nije moguće osigurati istovremenu otpornost na puzanje i visokotemperaturnu koroziju.

Konstruktor mora odlučiti kojem će zahtjevu dati prednost i temeljem toga izabrati odgovarajući čelik. Posebni problem pri izboru optimalnog materijala predstavlja činjenica da neki uređaji moraju biti sposobni raditi bez prekida godinama kao što su primjerice oni u suvremenoj procesnoj industriji, nuklearnim pogonima, svemirskim letjelicama pa materijal mora pridonijeti potpunoj sigurnosti rada. Problemi će biti tim izraženiji što je više radno naprezanje, viša radna temperatura i predviđena trajnost [4].

2.1.4 *Promjene mehaničkih svojstava porastom temperature*

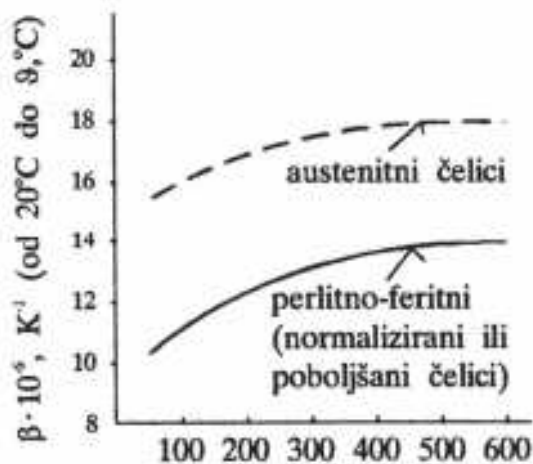
Povećanjem temperature snižava se modul elastičnosti (E) i modul smika (G), a raste koeficijent toplinskog istezanja β .

Povišenje temperature utječe na svojstva materijala uključujući i elastična svojstva. Na slici 2.2 prikazana je ovisnost modula elastičnosti i modula smika čelika o temperaturi.



Slika 2.2 Ovisnost modula elastičnosti i smika o temperaturi [4]

Na slici 2.3 prikazana je ovisnost koeficijenta toplinskog istezanja čelika o temperaturi.



Slika 2.3 Ovisnost koeficijenta toplinskog istezanja o temperaturi [4]

Dva su odlučujuća kriterija za procjenu ponašanja metalnih materijala pri povišenim odnosno visokim temperaturama: otpornost na puzanje i otpornost prema oksidaciji.

Za predviđanje trajnosti, na osnovi podataka o puzavosti pri kraćim vremenima i pri višim temperaturama ispitivanja od radne, služi Larson – Millerov parametar(2.1)[2]:

$$P = T \cdot (C + \log t) \quad (2.1)$$

gdje je :

- P – parametar
- T – temperatura, K
- C – konstanta ~ 20
- t – trajanje, h

U idućem primjeru prikazan je jednostavan izračun za dobivanje prosječnog vremena rada pri visokim temperaturama.

Primjer 1. Lopatica plinske turbine izrađena je iz Ni – superlegure Nimonic 115 sastava: 0,16 %C; 15 %Cr; 15 %Co; 3,5 %Mo; 4 %Ti; 5 %Al; 0,04 %Zr; 0,014 %B, ostatak Ni.

Statička izdržljivost iznosi : $R_{m/10000/810} = 150 \text{ N/mm}^2$. Koje je očekivano vrijeme rada pri $750 \text{ }^\circ\text{C}$? Koristeći parametar 2.1 dobivamo:

$$P = (810 + 273)(20 + \log 10000) = 25992$$

$$25992 = (750 + 273)(20 + \log t)$$

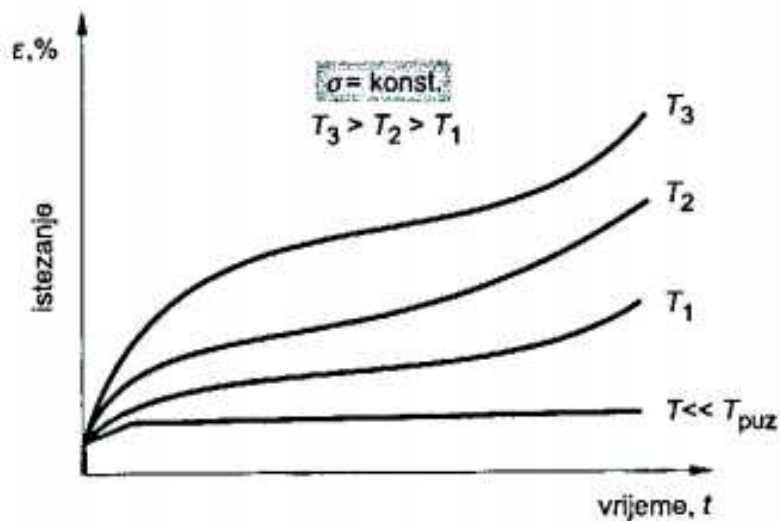
$$\log t = \left(\frac{25992}{1023} \right) - 20$$

$$t = 255638 \text{ sati} \sim 88 \text{ godina}$$

2.1.5 *Puzanje*

Dok pri sobnoj temperaturi i mirnom opterećenju ponašanje metalnih materijala ne ovisi o vremenu, iznad neke temperature granice mogu nastupiti vremenski ovisne i nepovratne deformacije i to pri naprezanjima koja su daleko ispod granice razvlačenja σ_T u toplom stanju ustanovljene pri statičkom vlačnom pokusu.

Puzanje je definirano kao nepovratna, vremenski ovisna deformacija (sa vrlo malom brzinom deformacije) koja nastaje pod konstantnim opterećenjem pri konstantnoj temperaturi [5]. Slika 2.4 prikazuje ovisnost ukupnog aksijalnog istežanja o vremenu koja najbolje ukazuje na problem puzanja



Slika 2.4 Pojava puzanja pri visokim temperaturama [4]

Brzina puzanja tim je veća i vrijeme do loma tim kraće što je viša temperatura i veće naprezanje. Puzanje metala obično nastupa u temperaturnom području iznad $0,3 \cdot T_t$ (T_t u K). U području od $1/3$ do $2/3 \cdot T_t$ brzina puzanja, pri umjerenom naprezanju, ostaje konstantna duže vrijeme.

Za dimenzioniranje dijelova koji rade pri visokim temperaturama gdje nastupa puzanje bitna su sljedeća mehanička svojstva:

- $R_{p\epsilon/t/\vartheta}$ - granica puzanja pri radnoj temperaturi za definirano vrijeme ispitivanja. To je ono vlačno naprezanje koje nakon određenog trajanja ispitivanja (t) pri zadanoj temperaturi (ϑ) dovodi do određene trajne deformacije epruvete (najčešće 0,5 ili 1 %).
- $R_{m/t/\vartheta}$ - statička izdržljivost pri radnoj temperaturi za određeno vrijeme djelovanja opterećenja. To je ono vlačno naprezanje koje nakon definiranog vremena djelovanja (t) pri zadanoj temperaturi (ϑ) uzrokuje lom epruvete.

Za dimenzioniranje se, u pravilu, rabe podaci o statičkoj izdržljivosti i granici puzanja za 100000 sati ili statičkoj izdržljivosti za čak 200000 sati, pri radnoj temperaturi. Osim ovih svojstava određenih dugotrajnim ispitivanjima, otpornost puzanju definira i granica puzanja prema DVM-u (R_{DVM}) za definiranu radnu temperaturu. To je ono vlačno naprezanje koje između 25. i 35. sata ispitivanja pri zadanoj temperaturi izaziva brzinu puzanja od $10 \cdot 10^{-4}(\%/h)$, a nakon 45.sata djelovanja i rasterećenja trajna deformacija mora biti manja od 0,2 % [2].

Povećanje bilo naprezanja ili temperature, ubrzava proces puzanja, tj. minimalna brzina puzanja je povećana. Temperatura ima utjecaj na procese puzanja zbog tzv. „penjanja dislokacija“. Došlo se do spoznaje da za svaki metal postoji jedna kritična temperatura – T_{krit} iznad koje je difuzija atoma u kristalnoj rešetci tolika, da se dislokacije zamjenom mjesta pojedinih atoma mogu popeti iz jedne u drugu ravninu atoma. Kod temperatura većih od T_{krit} penjanje dislokacija kontrolira brzinu puzanja [5].

Različite legure pokazuju veću ili manju otpornost puzanju pri nekoj temperaturi i radnom naprezanju što ovisi o:

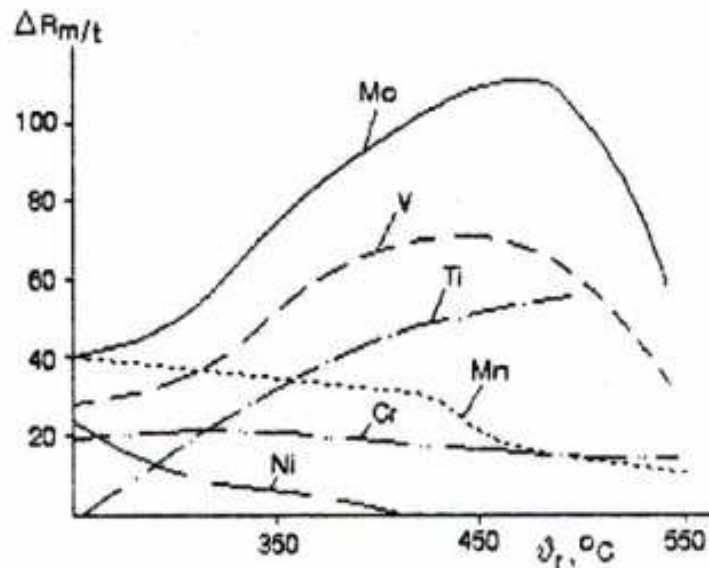
- temperaturi tališta materijala,
- tipu atomske veze i kristalne rešetke materijala,
- mikrostrukturnom stanju materijala.

Na otpornost prema puzanju može se utjecati izborom legirnog sustava i polaznog mikrostrukturnog stanja. Ključni načini za povećanje otpornosti prema puzanju kod metalnih materijala su prema [4]:

- izbor legura što viših temperatura rekristalizacije i tališta,
- očvrnuće kristalima mješancima - čelici trebaju po mogućnosti sadržavati u kristalu mješancu legirne elemente koji kočé pokretljivost atoma (npr. Mo i Co),
- legiranje elementima koji tvore toplinski stabilne spojeve u obliku karbida, nitrida, karbonitrida, oksida i intermetalnih faza – očvrnuće precipitacijom i disperzijom faza. Izlučivanjem precipitata tijekom popuštanja ili dozrijevanja ostvaruje se najveći učinak na povećanje otpornosti puzanju. Čelici se legiraju elementima poput Cr, Mo, W, V, Ti koji tvore teško topive stabilne spojeve izlučene u obliku sitno disperziranih čestica koji otežavaju gibanje dislokacija i na taj način otežavaju puzanje. Slika 2.5 prikazuje ovisnost naprezanja i temperature čelika koji su legirani određenim materijalom,
- izbor legura s kubičnom plošno centriranom (FCC) rešetkom za koju je pokretljivost atoma znatno manja nego kod prostorno centrirane (BCC)

kubične rešetke – stoga je austenitnamikrostruktura s gusto složenom FCC rešetkom otpornija puzanju nego feritna s BCC rešetkom,

- uporaba materijala grubozrnate ili čak monokristalnemikrostrukture.



Slika 2.5 Utjecaj legiranja na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim radnim temperaturama [4]

2.2 Metalni materijali za povišene i visoke temperature

2.2.1 Vrste čelika mehanički otpornih pripovišenim i visokim temperaturama

S obzirom na temperaturno područje primjene razlikuju se četiri osnovne podskupine čelika [1]:

- a) ugljični (nelegirani) čelici,
- b) niskolegirani čelici,
- c) visokolegiranimartenzitni čelici,
- d) visokolegiraniaustenitni čelici.

2.2.2 Ugljični (nelegirani) čelici (za rad pri povišenim temperaturama, $\vartheta_r < 450^\circ$)

Radi se o nelegiranim niskougljičnim ($\leq 0,22\% \text{C}$) čelicima garantiranog sastava i garantiranih mehaničkih svojstava što se može vidjeti u tablici 2.2

Tablica 2.2 Nelegirani čelici za kotlovske limove (izvod iz DIN-a 17175) [3]

Oznaka čelika EN stara HRN		Kemijski sastav, % ¹⁾		R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$ min, N/mm ² pri °C			R_{DVM} , N/mm ² pri °C		
		C maks	Mn min		20	200	400	400	450	475
P235GH	Č1202	0,16	0,40	350...450	210	160	100	90	50	(30)
P265GH	Č1204	0,20	0,50	410...500	240	180	120	100	60	(40)
	Č1206	0,22	0,55	440...530	260	210	140	120	80	(50)

S obzirom na radne temperature, pri kojima često nastupaju pojave umjetnog starenja, treba ovu grupu čelika načiniti posebno otpornom na starenje, što se može provjeriti mjerenjem žilavosti u umjetno ostarenoj epruveti, prethodno deformiranoj s $\varepsilon = 10\%$ i grijanoj pri 250°C , 1 sat.

Osim propisanih svojstava čvrstoće pri povišenim temperaturama [$R_{p0,2} = f(\vartheta_r)$ za $\vartheta_r \leq 400^\circ\text{C}$ i $R_{p1/10.000} = f(\vartheta_r)$ za $\vartheta_r = 400 \dots 500^\circ\text{C}$] od čelika se traži kemijska otpornost na lužine i kotlovsku vodu te dinamička izdržljivost i žilavost za slučaj udarnih ili titrajnih naprezanja. Sve se ovo postiže regulacijom sadržaja ugljika i mangana, visokom čistoćom čelika te dezoksidiranjem feromanganom ili aluminijem.

Otpornost na starenje tim je aktualnija, što su dijelovi toplinskih uređaja oblikovani bliže kritičnim $\varepsilon = 10\%$ (savijanje, uvaljivanje cijevi, obrublivanje itd.)

Tehnološko svojstvo zavarljivosti osigurava se niskim udjelom ugljika i ograničenjem udjela legirajućih elemenata.

Ovakvi čelici se proizvode u SM – pećima, a osim za oplata parnih kotlova, primjer prikazan na slici 2.6, služe i za cijevi većih promjera, obične i tlačne spremnike pri $\vartheta_r \sim 20^\circ\text{C}$.

Nelegirani su čelici prikladni za trajni rad pri povišenim temperaturama (do oko 500°C), jer su im pri visokim temperaturama (iznad 500°C) trajna svojstva čvrstoće i granica razvlačenja vrlo niska [3].



Slika 2.6 Parni kotao izrađen od nelegiranog čelika [6]

2.2.3 *Niskolegirani Mo- ili Mo-Cr-čelici (za rad pri visokim temperaturama, $\vartheta_r < 550^\circ$)*

Pri dugotrajnoj izloženosti temperaturama višim od 450°C u nelegiranim kotlovskim čelicima dolazi do rekristalizacije matrice i koagulacije cementita.

Kod niskolegiranih čelikaza povišene temperature te se pojave sprečavaju legiranjem karbidotvorcima Mo, Cr i V koji stvaraju kvalitetnije karbide (Cr_7C_3 , Mo_2C , V_4C_3) koji kočuju gibanje dislokacija i usporavaju puzanje, povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje, dok Mo dodatno povišuje temperaturu rekristalizacije i sprečava pojavu krhkosti popuštanja.

Temperaturno područje primjene je do 550°C jer pri višim temperaturama Mo_2C karbidi postepeno prelaze u Mo_6C tekoagiliraju, a metalna matrica osiromašuje na Mo što snižava rekristalizacijsku temperaturu.

Radi dobre zavarljivosti ovi čelici sadrže mali maseni udio ugljika ($< 0,25\% \text{C}$).

Dodatak V dalje poboljšava otpornost na puzanje, a uz to V će omogućiti postignuće visoke žilavosti, ako se režim popuštanja pravilno udesi [3]. U tablici 2.3 prikazani su svi važniji čelici za rad pri radnim temperaturama nižim od 550°C .

Tablica 2.3 Niskolegirani toplinski čvrsti čelici za rad pri radnim temperaturama nižim od 550°C (izvod iz DIN-a 17240) [4]

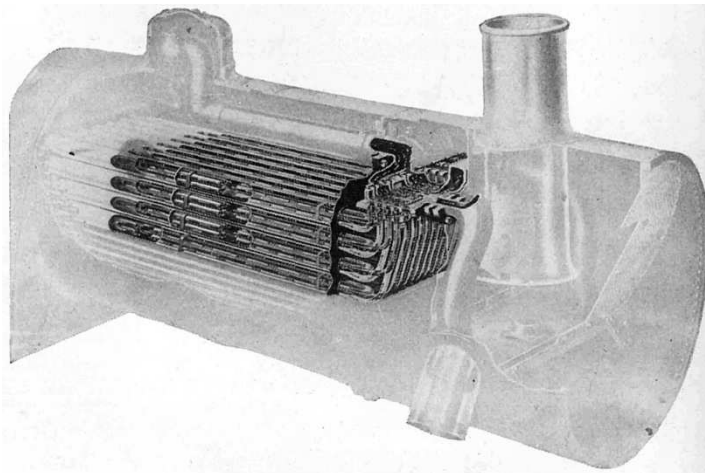
Oznaka čelika		Sastav "ostalo", maseni %	Mehanička svojstva										
EN	stara HRN		$R_{m,20}$, N/mm ² , pri 20°C	$R_{p0.2}$, N/mm ² , pri °C				R_{p11000} , N/mm ² , pri °C				A_5 , %, min.	KV, J, min.
				20	200	400	500	450	500	530	580		
C35E	Č1431	-	500...650	280	216	147	-	59	25	-	-	21	-
15Mo3	Č7100		440...570	260	255	177	147	216	147	85		23	48
13CrMo4-4	Č7400		440...590	290	275	208	177		186	78		22	48
22CrMo4-4	Č7431		640...790	490		343		255	172	74		18	41
10CrMoV8-10	Č7401		440...590	260	245	206	186		157	83	47	20	55
24CrMoV5-5	Č7432	0,1V	690...830	540	412	304	235	324	206	98		17	57

U tablici 2.4 prikazan je pregled primjeneniskolegiranih čelika za rad pri povišenim temperaturama, normiranih po DIN – u.

Tablica 2.4 Pregled primjene niskolegiranih čelika za rad pri povišenim temperaturama [3]

Dio uređaja ili stroja	Čelik (VDEh)	Optim. ϑ_r , °C	Tražena $R_m = f(\vartheta)$ faktor sigurnosti S, $\sigma_{dop} = f(\vartheta)$
Kotlovske oplatae	15 Mo 3 10 CrMo 9 10	Do 530 °C Do 580 °C	
Skupljači pare (kolektori)	13 CrMo 4 4 10 CrMoV 9 10	530 ... 580	$R_m = 60 \dots 200 \text{ N/mm}^2$ $S = 2,25$ $\sigma_{dop} = 27 \dots 90 \text{ N/mm}^2$
Kotlovski cjevovodi	15 Mo 3 13 CrMo 4 4 10 CrMo 9 10	460 ... 520 500 ... 540 520 ... 550	$R_m = 60 \dots 200 \text{ N/mm}^2$ $S = 1,5$ $\sigma_{dop} = 27 \dots 90 \text{ N/mm}^2$
Cijevi pregrijača	15 Mo 3 13 CrMo 4 4 10 CrMo 9 10	Do 530 500 ... 550 530 ... 580	$R_m = 40 \dots 120 \text{ N/mm}^2$ $S = 1,5$ $\sigma_{dop} = 27 \dots 80 \text{ N/mm}^2$
Vijci, matice, svornjaci, porubnice	24 CrMo V 55	450 ... 510	$R_m = 150 \dots 300 \text{ N/mm}^2$ $S = 2,25$ $\sigma_{dop} = 67 \dots 134 \text{ N/mm}^2$
Kućišta i ostali odljevc	S 17 CrMo 5 5 (ČL 4731)	460 ... 550	$R_m = 50 \dots 150 \text{ N/mm}^2$ $S = 2,25$ $\sigma_{dop} = 20 \dots 60 \text{ N/mm}^2$
Veliki otkovci (motori, osovine)	22CrMo 4 4 24 CrMoV 5 5	370 ... 480 480 ... 515	$R_m = 150 \dots 300 \text{ N/mm}^2$ $S = 2,5$ $\sigma_{dop} = 60 \dots 120 \text{ N/mm}^2$
Turbinske lopatice	24 CrMoV 5 5	450 ... 510	$R_m = 150 \dots 300 \text{ N/mm}^2$ $S = 2,25,$ $\sigma_{dop} = 67 \dots 134 \text{ N/mm}^2$

Na slikama 2.7 i 2.8 prikazan je primjer primjene niskolegiranog čelika na visokim temperaturama.



Slika 2.7 Cijevi pregrijača pare [10]



Slika 2.8 Kotlovski cjevovodi [10]

2.2.4 Visokolegiranimartenzitnisuper 12%Cr“ čelici (za rad pri visokim temperaturama, $\vartheta_r < 600^\circ$)

Ovo je skupina čelika nastala razvojem martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 koji je postojan za rad na temperaturama do 400°C . Duljim radom na višim temperaturama ovi čelici postaju krhki. Da bi se povećala mehanička otpornost pri visokim temperaturama te istovremeno zadržala visoka postojanost na opću koroziju čelici sadrže oko 1 %Mo i do 12 %Cr. U tablici 2.5 prikazani su čelici koji pripadaju ovoj grupi visokopostojanih čelika. Sadržaj Cr ispod 12 % u čvrstoj otopini ukazuje na nepotpunu korozijsku postojanost.

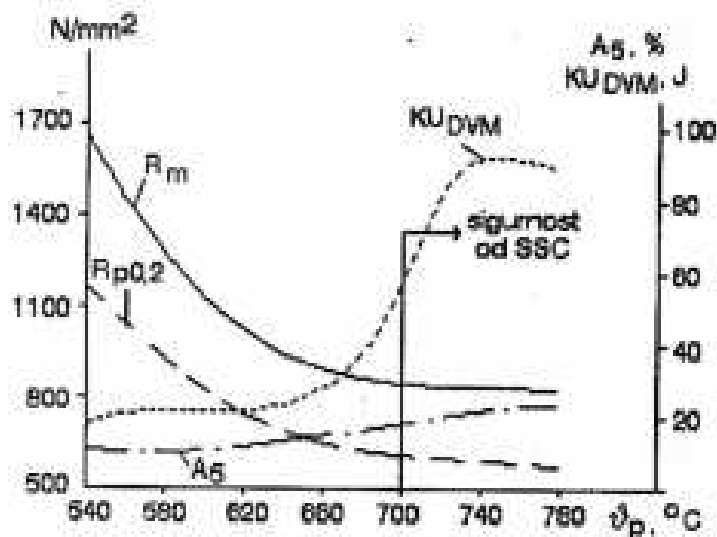
Tablica 2.5 Super 12 %Cr toplinski visokopostojani čelici (izvod iz DIN-a 17240) [4]

Oznaka čelika prema EN	Sastav "ostalo", maseni %	Popušteno σ_p , °C	Mehanička svojstva pri 20 °C				Kratkotrajno vlačno ispitivanje				Dugotrajni vlačno ispitivanje		
			R_m , N/mm ²	$R_{p0.2}$, N/mm ² , min.	A_5 , %, min.	KV (ISO-V) J, min.	$R_{p0.2}$, N/mm ² , pri θ °C				R_{pt10^4} , N/mm ² , pri θ °C		
							200	400	500	600	500	550	600
X19CrMo12-1	-	700...750	700...800	500	16	40	432	353	264	108	245	140	60
X11CrMoV12-1	2,5Ni; 0,3V; 0,035 N	560...620	830...1130	785	14	48	700	600	500	300	200	85	35
X20CrMoV12-1	0,3V	680...750	700...850	500	16	40	432	353	264	108	245	145	77
X22CrMoV12-1	0,3V	720...750 /680...720	800...950 /900...1050	600 700	14 11	27 20	530 603	423 485	344 392	206 250	295	168	80
X19CrMoVNb11-1	0,2V; 0,08N; 0,35Nb	550...700	900...1050	780	10	20	700	580	470	315	360	200	12
X20CrMoWV12-1	0,3V; 0,5W	700...750	800... 950 950...1100	600 750	14 10	27 20	530 650	423 530	377 430	206 270	260	160	60

Ovi čelici se primjenjuju za dugotrajni rad pri temperaturama do 600 °C uz blagokorozivno djelovanje okolnog medija. Pri tim temperaturama industrijski uređaji dolaze u dodir s različitim huminskim kiselinama, zatim s organskim kiselinama pri proizvodnji šećera i škroba, mineralnim kiselinama, s kisikom iz kotlovske vode, otopinama klorida te otopinama klorida te se od njih očekuje i otpornost na koroziju. Toplinska obrada ove skupine čelika sastoji se od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (poboljšavanje).

Gašenjem čelika s temperatura 1020 do 1080 °C dobiva se martenzitna mikrostruktura s manje od 5 % ferita koja se popušta pri 550 do 750 °C prikazana na slici 2.9 radi izlučivanja sljedećih faza:

- specijalnih karbida popuštanja (Mo₂C, V₄C₃, Cr₇C₃), ali i
- intermetalnih faza (Fe₂Mo, Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀ i eventualno FeCr).



Slika 2.9 Dijagram popuštanja čelika X20CrMoV12-1 [4]

Radi se o procesima istovremenog popuštanja kaljenog čelika i dozrijevanja precipitacijski očvrstljive legure.

Disperzija karbida i precipitata intermetalnih spojeva otežava gibanje (penjanje) dislokacija što uz otapanje Cr i Mo u martenzitu, koji povisuju temperaturu rekristalizacije, doprinosi povišenju otpornosti puzanju. Dugotrajno izlaganje temperaturama iznad 620 °C uzrokuje umnožavanje i koagulaciju karbida i intermetalnih spojeva čime se dodatno snižava udio Cr u martenzitnoj matrici i time smanjuje krozijska postojanost, ali i manje učinkovito koči gibanje dislokacija što pogoduje puzanju.

Zahvaljujući prisustvu specijalnih karbida Mo, V i Cr ovi su čelici otporni na djelovanje vodika i na sulfidnu napetosnu koroziju (SSC), ako su popušteni na tvrdoću ≤ 24 HRC što se postiže popuštanjem pri 700 °C [4].

Primjeri primjene ovih čelika su:

- turbinske lopatice parnih turbina, primjer prikazan na slici 2.10,
- rotori parnih turbina,
- brodski propeleri,
- kućišta turbina,
- dijelovi izloženi visokim temperaturama u okolišu morske vode, pare, slabih organskih kiselina,
- cijevi pregrijača pare,
- djelovi uređaja u industriji papira, umjetnih vlakana, celuloze, nafte i plina itd.



Slika 2.10 Lopatice plinske turbine [10]

2.2.5 Visokolegirani austenitni Cr-Ni čelici (za rad pri visokim temperaturama, $T < 750^\circ$)

Iako je čvrstoća austenitnih čelika pri 20°C relativno niska, naspram martenzitnih čelika, onaporastom temperature sporo pada tako da su ovi čelici primjereni za rad na visokim temperaturama. Visokolegirani austenitni Cr-Ni čelici mogu se dugotrajno primjenjivati pri temperaturama do 750°C zahvaljujući visokoj temperaturi rekristalizacije (iznad 900°C , pa čak i 1000°C) i zadovoljavajućoj mehaničkoj otpornosti kao rezultat:

- kubične plošno centrirane (FCC) kristalne strukture; budući da je koeficijent difuzije kod FCC rešetke oko 100 puta manji u odnosu na BCC rešetku austenitni čelici su vrlo pogodni za eksploataciju na visokim temperaturama,
- dodatnog legiranja s Mo, W, V, Ti i Nb koji omogućuju izlučivanje karbida i precipitiranje toplinski postojanih intermetalnih faza koje dodatno povišuju mehaničku otpornost.

Većina se austenitnih čelika primjenjuje rastopno žarenom i gašenom (ne kaljenom!) stanju (tablica 2.6, skupina I), neki se nakon homogenizacije podvrgavaju dozrijevanju na

temperaturama 50 °C višim od radnih (tablica 2.6, skupina II) i na taj način precipitacijski očvršćuju, te imaju višugranicu razvlačenja u odnosu na one rastopno žarene i gašene.

Precipitiraju uglavnom intermetalni spojevi:

- FeCr, FeMo, Fe₂Mo, Co₂Ti, Fe₂(Ni,Nb), Ni₃Ti, Ni₃Al, (Fe,Co)₃₄Cr₁₂Mo₄ itd.
- te u manjoj mjeri i karbidi ovisno o sadržaju C u čeliku.

Višestruko visokolegirani čelici (X50CoCrNi20-20-20, X5NiCrTi26-15, X6NiCrMoTi28-15) dozrijevanjem vrlo jako očvršćuju.

Uz to neki austenitni čelici prikladni su za očvršćujuće kombinacijom postupaka toplo/hladnog valjanja i dozrijevanja (tablica 2.6, skupina III).

Tablica 2.6 Austenitni toplinski visokopostojani čelici za rad pri temperaturama nižim od 750 °C[4]

Skupina čelika	Oznaka čelika prema EN	Sastav "ostalo", maseni %	Toplinska obrada				Mehanička svojstva pri 20 °C				R _{p0.2} , N/mm ² pri °C			R _{p1/1000} , N/mm ² pri °C				
			rastvorno žarenje i gašenje °C/sred.*	žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja °C	toplo-hladno valjanje do °C	dozrijevanje «starenje» °C/t, h	R _m , N/mm ²	R _{p0.2} , N/mm ² min.	A ₅ , %, min	KU _{DM} , J min	400	600	700	550	650	700	750	800
I	X6CrNi18-11	-	1020...1060/z,v	850...930	-	-	490...690	185	45	85	98	78	69	180	80	49	(34)	-
	X8CrNiMoNb16-16	1,3Mo; 1 Nb	1035...1065/z,v	850...930	-	-	530...690	215	35	85	147	132	-	324	226	137	83	54
	(G)X8CrNiMoVNb16-13	1,3Mo; 0,7V; 1Nb; 0,1N	1120...1150/zv	850...930	-	-	540...740	255	30	69	167	147	-	353	157	88	-	-
II	X40CrNiCoNb13-13	10Co; 2Mo; 2,6W; 3Nb	1150...1200/z,u	-	-	750...850/24	640...830	345	16	34	245	196	-	-	186	127	78	49
	X40CoCrNi20-20-20	4Mo; 4W; 4Nb	1150...1220/z,u	-	-	750...800/25...10	780...980	390	20	27	314	245	206	294	216	147	98	64
III	X12CrNiWTi16-13	2,8W; 4Nb	1110...1130/z,v	-	850...930	750...800/5...1	640...750	450	30	80	420	400	300	335	216	157	103	64
	X8CrNiMoBNb16-16	1,8Mo; 0,08B; 1Nb	1120...1150/z,v	-	850...930	750...800/5...1	650...850	500	16	48	353	255	-	445	245	145	-	-
IV	X50CoCrNi20-20-20	4Mo; 4W; 4Nb	1180...1220/v	850...930	-	745...775/16	min. 980	540	10	27	539	500	412	290	175	118	93	74
	X5NiCrTi26-15	1,3Mo; 0,3V; 2,1Ti	885...915/z,v	850...930	-	700...735/16	930...1180	635	12	27	520	451	314	451	304	206	118	54
	X6NiCrMoTi28-15	1,75Mo; 2,1Ti	885...915/z,v	710...730	-	710...730	900...1150	600	15	27	520	450	310	450	300	205	120	50

Uz visoku otpornost na puzanje, austenitni čelici imaju i vrlo dobru kemijsku postojanost odnosno vatrootpornost [4].

U tablici 2.7 navedeni su primjeri primjene austenitnih toplinski visokopostojanih čelika.

Tablica 2.7 Primjeri primjene austenitnih toplinski visokopostojanih čelika [4]

Oznaka čelika	Primjeri primjene
X6 CrNi 18 11	cjevovodi, tlačne posude, armatura, natrijem hlađeni dijelovi uređaja za obogaćivanje nuklearnog goriva
X8 CrNiMoNb 16 16	dijelovi parnih i plinskih turbina: lopaticice, prirubnice, ventili, sapnice, kućišta, svornjaci dijelovi uređaja reaktorske tehnike, lopaticice turbopuhala
(G) – X8 CrNiMoVNb 16 13	dijelovi u strojarstvu, kemijskoj i petrokemijskoj industriji, dijelovi parnih i plinskih turbina, cijevi energana, rotori turbopuhala
X40 Cr NiCoNb 13 13	rotori turbopuhala i turbina, osovine
X40 CoCrNi 20 20 20	plamene cijevi, komore izgaranja, dijelovi plinskih turbina, pogonski sustavi mlaznih motora i raketa
X12 CrNiWTi 16 13	lopaticice, prirubnice, ventili, sapnice, kućišta, svornjaci parnih i plinskih turbina
X8 CrNiMoBNb 16 16	dijelovi parnih i plinskih turbina, dijelovi peći, dijelovi u kemijskoj i petrokemijskoj industriji, dijelovi u reaktorskoj tehnici
X50 CoCrNi 20 20 20	dijelovi plinskih turbina i mlaznih motora : komora izgaranja, plamene cijevi, plamenici
X5 NiCrTi 26 15	kao i prethodni, a služi i kao ultračvrsti čelik

Na slikama 2.11 i 2.12 prikazani su primjeri primjene ove skupine čelika.



Slika 2.11 Kućište raketnog motora izrađeno od visokolegiranog Cr-Ni čelika [6]



Slika 2.12 Dio parne turbine, prirubnice [10]

2.2.6 *Vatrootporni čelici*

Pri temperaturama višim od 550 °C u okolišu vrućeg zraka, vodene pare, agresivnih plinova, plamena i sl. dolazi kod čelika do kemijske (plinske) korozije izazvane intenzivnom oksidacijom.

Kod nelegiranih čelika stvaraju se na površini slojevi željeznih oksida FeO, Fe₃O₄ i Fe₂O₃. Ovi oksidi nisu dovoljno kompaktni da bi spriječili daljnju difuziju kisika i porast

debljine sloja te s vremenom dolazi do pucanja površinskog sloja uslijed tlačnih naprezanja. Na sloju ispod iznova se stvaraju kemijski produkti i nakon nekog vremena i ovaj sloj otpada. Ovo višestruko raslojavanje očituje se kao ljuštenje materijala.

Da bi se to spriječilo, čelik se legira s elementima koji imaju veći afinitet prema kisiku nego Fe kao što su Cr, Si i Al. Njihovi oksidi: Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 ili pak MoO_2 su dovoljno kompaktni i štite čelik od stvaranja tzv. ogorine u obliku ljuski. Vatrootpornim se smatraju oni čelici koji se pokazuju malu (ili nikakvu) reakciju stvaranja ogorine u struji plinova pri temperaturama iznad $600\text{ }^\circ\text{C}$. Na vatrootpornost najpovoljnije djeluje legiranje kromom.

Za potpunu vatrootpornost gubitak mase ne smije biti veći od od $1\text{ g/m}^2\text{h}$ (pridefiniranoj temperaturi) ili najviše $2\text{ g/m}^2\text{h}$ (pri $50\text{ }^\circ\text{C}$ višoj temperaturi) tijekom 120 sati izloženosti struji plinova koji sadrže kisik.

Od vatrootpornih čelika često se traži, osim visoke otpornosti na oksidaciju, dovoljnu mehaničku otpornost pri visokim temperaturama – dovoljna granica razvlačenja i dovoljna otpornost na puzanje. Kako kod nekih čelika ova dva svojstva nisu jednako povoljna, izbor materijala ovisi o uvjetima rada i svojstvima koja moraju biti dominantna.

Vatrootporni čelici ne smiju imati mikrostrukturne pretvorbe koje bi dovele do promjene volumena, pa su oni zato feritne ili austenitne mikrostrukture. Feritni čelici su legirani s Cr, Si i Al, a austenitni još s Ni i Ti.

Austenitni čelici su otporniji prema puzanju, ali i znatno skuplji od feritnih, te su namijenjeni primjenama pri višim napreznjima i u slučaju djelovanja plinova s mnogo dušika, ali malo kisika. Feritni čelici imaju nižu otpornost na puzanje, skloni su pogrubljenju zrna nakon zavarivanja ili dugotrajne izloženosti visokim temperaturama što uzrokuje krhkost, ali su otporniji na plinove koji sadrže sumpor pa je to glavni razlog zašto se oni još uopće primjenjuju [3,4].

U tablici 2.8 navedena su mehanička svojstva nekih vrsta vatrootpornih čelika.

Tablica 2.8 Vatrootporni čelici [4]

Oznaka čelika EN (stara HRN)	Sastav, "ostalo", maseni %	Struktura	Žarenje, °C/sred.*	Mehanička svojstva pri 20°C			$R_{p1/10000}$, N/mm ² pri θ °C						Vatrootpornost na zraku do °C
				$R_{m,2}$ N/mm ²	$R_{p0,2}$ N/mm ² min.	A_5 , %, min.	500	600	700	800	900	1000	
X10NiCrAlTi32-20 (Č4974)	0,75 Al	F	750...800/z,v	420...620	220	20	50	17,5	4,7	2,1	1,0	-	800
X10CrSi13	2,2 Si		750...800/z	540...690	345	15	60	21	5,5	2,2	0,8	-	950
X10CrAl18 (Č4973)	1 Al		800...850/z	490...640	295	12	60	21	5,5	2,2	0,8	0,4	1050
X10CrAl24 (Č4970)	1,5 Al		800...850/z,v	520...720	280	10	50	17,5	4,7	2,1	1,0	0,4	1150
X15CrNiSi25-20 (Č4578)	2 Si	A	1050...1100/v,z	550...800	230	30		105	37	12	5,7	1,8	1150
X15CrNiSi20-12 (Č4577)	1,7 Si		1050...1100/z,v	550...750	230	30		80	25	10	4	1,8	1100
X12NiCrSi36-16 (Č4579)	1,5 Si		1050...1100/z,v	550...800	230	30		80	35	15	5	1,8	1100
X10NiCrAlTi32-20	0,35 Al/0,4 Ti		1050...1100/v	540...740	245	40		85	35	15	5	2	1150

* z – zrak, v – voda; F – ferit, A – austenit

Karakteristični primjeri primjene vatrootpornih čelika su:

- dijelovi ložišta generatora pare koji su u dodiru s vatrom i vrućim plinovima (cijevi, rešetke ložišta),
- dijelovi metalurških peći (armature peći, žarne komore, lonci za žarenje),
- rešetke i košare za šaržiranje dijelova u pećima za toplinsku obradu itd[4].

2.2.7 Ventilski čelici

U motorima s unutrašnjim izgaranjem ventili su (posebno ispušni) najopterećeniji dijelovi. Prije svega od njih se traži visoka toplinska čvrstoća, visoka dinamička izdržljivost i pri visokim temperaturama, visoka otpornost na trošenje kliznih ploha, korozijska postojanost i otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama, otpornost na kemijsko djelovanje olovnih aditiva gorivu. Pri svemu tome treba računati da temperature usisnih ventila dosežu oko 500 °C, a ispušnih (kratkotrajno) i do 900 °C.

S preradbene strane od ventilskih se čelika zahtijeva dobra topla oblikovanost deformiranjem, dobra obradljivost odvajanjem čestica, eventualno dobra zavarljivost. Bilo bi poželjno zahtijevati od ove grupe čelika što višu toplinsku vodljivost, no nažalost ostali zahtjevi, koji većinom nužno vode do visokolegiranih čelika zasjenjuju takav zahtjev, pa se treba pomiriti potrebom razmjerno niskog koeficijenta toplinske vodljivosti (za martenzitne čelike pri 20 °C $\lambda \approx 17 \dots 20$ W/m K, a za austenitne samo $\lambda \approx 13 \dots 14,5$

W/m K.) te toplinskog rastezanja. Koeficijent toplinskog rastezanja ne da se regulirati za zadani čelik i on će za ovu predgrupu biti za martenzitne čelike $\beta_{20} \dots 700 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, a za austenitne čelike $\beta_{20} \dots 700 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Martenzitniveisokopropušteni čelici su pretežno tipa Cr – Si s 2 – 3 % Si. Oni su otporni na djelovanje ispušnih plinova, vrlo su otporni i na trošenje, ali su im svojstva čvrstoće pri temperaturama iznad 600 °C osjetno niža nego svojstva čvrstoće austenitnih čelika. Čelici su nadeutektoidnog pa čak i podeutektičkog karaktera i u slučaju nedovoljno preciznog održavanja propisanih parametara kaljenja i popuštanja jako naginju krhkosti. Primjenjuju se obično za usisne ventile.

Ovi nedostaci umanjuju im se tako da se na sjedalo ventila i na rub njegova tanjura navari tvrda legura, te da se stablo ventila eventualno obradi termokemijski ili galvanski.

Austenitni su čelici znatno viših svojstava čvrstoće, posebno pri temperaturama iznad 700 °C, pa će oni, u pravilu, poslužiti za izradbu ispušnih ventila. Njihove mane kao npr. nedovoljnu otpornost na trošenje, trebat će umanjiti bilo termokemijskom obradom, bilo lokalnim navarivanjem, bilo hladnim očvršćućem deformiranjem. U tablici 2.9 navedeni su primjeri primjene pojedinih vrsta ventilskih čelika [3].

Tablica 2.9 Primjeri primjene ventilskih čelika[3]

Oznaka čelika	Primjeri primjene
X45 CrSi 9 3	Ispušni ventili neotporni na ogaranje, usisni ventil svih vrsta motora
X40 CrSiMo 8 2	Ispušni ventil slabe otpornosti na ogaranje
X80 CrSiMoW 15 2	Viskokopterećeni ispušni ventil
X85 CrMoV 18 2	Kao prethodni
X45 CrNiW 18 9	Visokonapregnuti ispušni ventili u visokoturažnim zrakoplovnim i trkaćim motorima do temperature 850 °C
X53 CrMnNiN 21 9	Ispušni ventili visoke ogorinske otpornosti, otporni na olovne spojeve i umotorima velike snage
X70 CrMnNiN 21 6	Najjače napregnuti ispušni ventil svih vrsta motora

Na slikama 2.13 i 2.14 prikazani su osnovni oblici ventila u praksi.



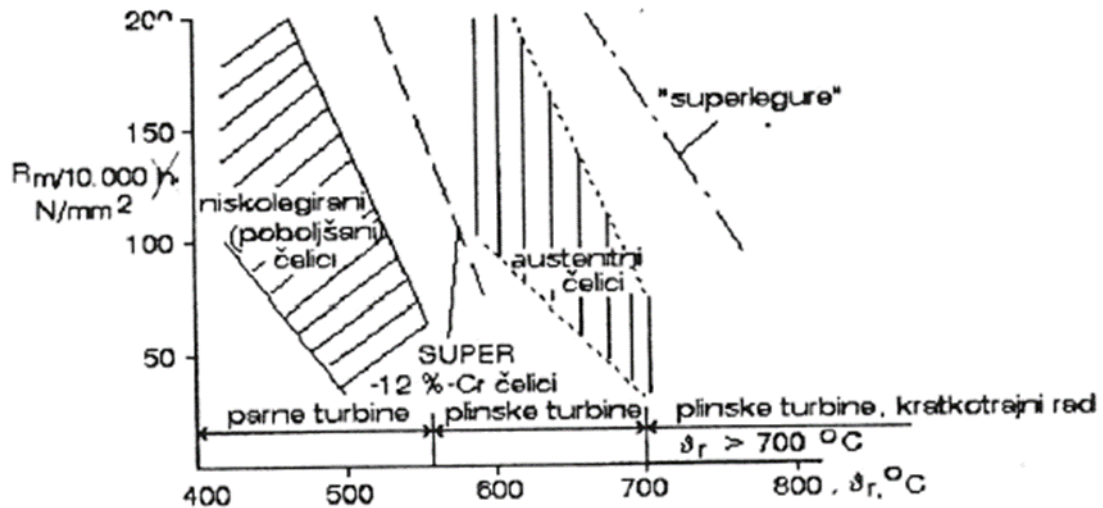
Slika 2.13 Ventil izrađen od čelika [11]



Slika 2.14 Ispušni ventil u automobilskom motoru [11]

2.2.8 Ultračvrsti čelici ($R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$)

Glavna područja primjene ultračvrstih čelika su gradnja vozila, gradnja strojeva, gradnja zrakoplova, raketna i svemirska tehnologija i to zbog omogućavanja izvedbe što lakših konstrukcija i boljeg iskorištenja materijala. Tako npr. nosači uređaja za slijetanje zrakoplova, poprečne spojnice nosača kotača zrakoplova, tlačni spremnici goriva, trebaju imati vlačnu čvrstoću od 1400 do 2400 N/mm^2 i više, kako bi im dimenzije bile zadovoljavajuće malene, a time i njihova masa. Na slici 2.15 prikazana je uporaba čelika pri gradnji turbine.



Slika 2.15 Smjernice primjene metala u gradnji turbine [4]

Na glavna zadaća razvoja ultračvrstih čelika nije toliko samo postignuće visokih R_m i $R_{p0.2}$, nego, ovisno o primjeni istovremeno postignuće sljedećih svojstava :

- visoke R_m ,
- visoke žilavosti i niske prelazne temperature,
- visoke dinamičke izdržljivosti,
- otpornosti na koroziju,
- čvrstoće pri povišenim i niskim T_r ,
- potpune prokaljivosti,
- lake obradljivosti, zavarljivosti i toplinske obrade.

U cilju što niže prelazne temperature treba težiti sitnozrnatoj i homogenoj strukturi, izbjegavanju lokalnih heterogenosti, makrosegregaciji uključaka i slično [3].

Ultračvrste čelike dijelimo na :

- nisko – i visokolegirane čelike za poboljšanje,
- korozijski postojani precipitacijski (starenje) očvrstivi čelici,
- MARAGING eng. „martensitaging“ (dozrijevanje martenzita),
- AUSFORMING čelici,
- TRIP čelici,
- Hladno očvrstivi čelici.

Primjer ultračvrstog čelika u praksi prikazuje slika 2.16.

Konstruktivsku čvrstoću čelika za rad pri 20 °C u stvari bi trebalo shvatiti kao kompromis između $R_{p0,2}$ i K_{IC} (pukotinska žilavost), uzevši još u obzir da dinamička izdržljivost ne raste proporcionalno s R_m , nego se rast R_d povišenjem R_m usporava. Nužno je, približno, računati s relacijom 2.2 [3]:

$$\frac{R_d}{R_m} \approx 0,3 \dots 0,4 \quad (2.2)$$



Slika 2.16 Kućište raketnog motora izrađenog od MARAGING čelika [6]

2.3 Metalni materijali za niske i vrlo niske temperature

2.3.1 Čelici za rad pri niskim i vrlo niskim temperaturama

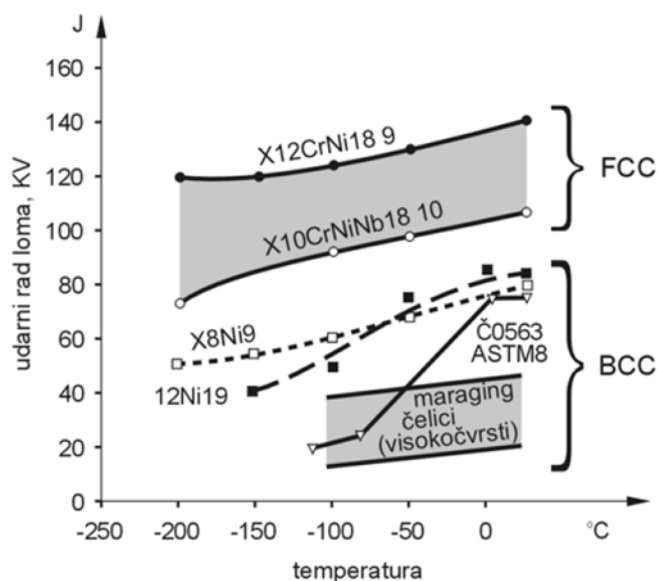
Tehnika hlađenja ili tehnika rada pri niskim temperaturama obuhvaća konvencionalno temperaturno područje od oko -40 °C sve do apsolutne nule. Prema tome u ovo specifično tehničko područje ulazili bi primjeri primjene: čelične konstrukcije, željeznice, brodovi, ledolomci itd., uređaji za proizvodnju ukapljenih plinova (zraka, dušika, kisika, helija, amonijaka, zemnog plina, ugljikovodika u proizvodnji nafte).

Za primjenu u takvim uvjetima općenito dolaze u obzir materijali kao što su beton, keramika, staklo, polimeri, budući da im je ponašanje slično kao i u primjeni pri sobnim

temperaturama. No, unatoč tome, za primjenu u ovoj grani tehnike bit će nezaobilazni i željezni materijali (prvenstveno radi njihove velike čvrstoće).

Najopasnija neželjena pojava pri sniženim temperaturama jest nagli pad žilavosti, pri čemu se pod pojmom žilavosti podrazumijeva svojstvo materijala da se apsorpcijom energije odupre širenju pukotine, a time i krhkom lomu. Uz takvo shvaćanje pojma žilavosti ne bi trebalo pomišljati na neku od brojnih uobičajenih metoda ispitivanja, budući da iskustvo pokazuje, da svaka pojedina metoda ima svoje slabe točke, među koje treba svakako ubrojiti i još nepoznati odnos ponašanja konstrukcijskog elementa i cijele konstrukcije prema ponašanju ispitnog uzorka zadanog oblika i dimenzija [3].

Sniženjem temperature padaju vrijednosti: duktilnosti – istezljivosti, kontrakcije presjeka, udarnog rada loma (žilavosti), toplinske rastezljivosti i toplinske vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta, a rastu: tvrdoća, vlačna čvrstoća i granica razvlačenja te osjetljivost na zareznodjelovanje.



Slika 2.17 Žilavost tipičnih vrsta čelika za rad pri niskim temperaturama [1]

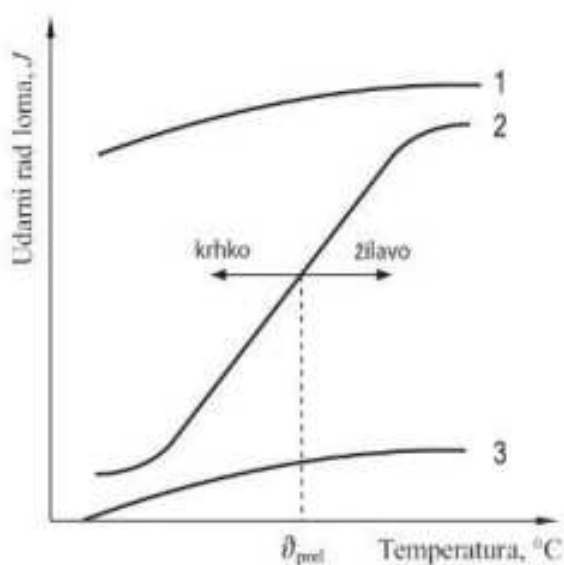
Osnovni zahtjev u primjeni čelika pri niskim temperaturama je dovoljna žilavost, odnosno traži se neosjetljivost na krhki lom. Poznato je da kod većine konstrukcijskih čelika s BCC rešetkom pada žilavost to više što je niža temperatura, što nije slučaj kod metala s FCC rešetkom kao što je prikazano na slici 2.17. Linija 1 označava metalne legure sa FCC rešetkom. Linija 2 metalne legure sa BCC rešetkom, a linija 3 visokočvrste materijale.

Vrijednost udarnog rada loma pri radnoj temperaturi i visina prijelazne temperature gotovo su jedini kriterij za izbor čelika.

Kao hladno žilav čelik, može se definirati onaj koji pri temperaturi od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ postiže vrijednost udarnog rada loma od 27 J ili ima prijelaznu temperaturu žilavosti nižu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Za postizanje dovoljno velike žilavosti pri niskim ili vrlo niskim temperaturama čelici moraju imati posebno podešen kemijski sastav i mikrostrukturu u odnosu na obične konstrukcijske čelike[1].

Na slici 2.18 prikazan je utjecaj sniženih temperatura na vrijednost udarnog rada loma nekih od predstavnika čelika za niske temperature.



Slika 2.18 Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi za razne materijale [6]

Legiranje niklom je osnovni mehanizam postizanja zahtijevane žilavosti u čelicima za rad na niskim temperaturama. Nakon termičke obrade normalizacije, odnosno kaljenja i popuštanja, ovi čelici imaju najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti.

Legirajući element nikal dodaje se čeliku iz više razloga, ali prije svega zbog utjecaja na martenzitnu transformaciju. Povećana prokaljivost čelika legiranih niklom ima za posljedicu smanjenje puknuća kaljenjem, zato što je manje drastična kritična brzina hlađenja. Veći sadržaj nikla u čeliku dovodi do martenzitne strukture. Zbog nižeg sadržaja ugljika popuštena martenzitna matrica osigurava visoku udarnu žilavost i čvrstoću pri vrlo niskim temperaturama. Ovakve čelike također karakterizira niski sadržaj nečistoća, kao što

su sumpor i fosfor, pažljivo kontroliran udio intersticijskilegirajućih elemenata (ugljik i dušik) radi postizanja željenog balansa čvrstoće, žilavosti i troškova proizvodnje [7].

Kod metala s plošno centriranom rešetkom (npr. Al, Cu i Ni tj. austenitni nehrđajući čelici) čvrstoća je više temperaturno ovisna od granice razvlačenja dok duktilnost ne pokazuje bitan pad.

Metali s heksagonskom gusto pakiranom rešetkom, kao Ti, Mg i Zn, pokazuju izraženu promjenu čvrstoće i granice razvlačenja s temperaturom. Snižanjem temperature bitno im opada duktilnost. Ipak, neke Ti-legure pokazuju u području niskih temperatura još dovoljnu duktilnost.

Na ponašanje metalnih materijala pri niskim temperaturama utječu i moguće pretvorbe spojeva u strukturi kao i transformacija struktura. Tako se npr. struktura potpuno stabiliziranog austenitnog nehrđajućeg čelika ne može transformirati niti pri vrlo niskim temperaturama.

Nadalje, male promjene u kemijskom sastavu mogu bitno djelovati na duktilnost metala. tako npr. povišenje sadržaja kisika u duktilnom titanu od 0,1 na 0,2 % pri $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ smanjuje istezljivost od 15 na 0 % [8]. U tablici 2.10 prikazani su čelici za rad pri niskim temperaturama.

Tablica 2.10 Osnovna orijentacija primjenjivosti pojedinih vrsta čelika pri niskim temperaturama[8]

Radno područje	Raspon temperatura	Preporučljiva vrsta čelika	Orijentacija putem temp. ukapljivanja (plin/ $^{\circ}\text{C}$ (\approx))
Tehnika hlađenja	do $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$	- Č0563 - čelici niza ČRN - niskolegirani poboljšani sitnozrnati čelici	$\text{SO}_2 / -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{NH}_3 / -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{C}_2\text{H}_3 / -47\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{H}_2\text{S} / -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{CO}_2 / -80\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tehnika dubokog hlađenja	-85 do $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$	- čelici legirani s 5 do 9% Ni; - austenitni čelici	$\text{C}_2\text{H}_6 / -89\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{CH}_4 / -162\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{O}_2 / -183\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{N}_2 / -196\text{ }^{\circ}\text{C}$
Tehnika posebno dubokog hlađenja	-196 do $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$	- austenitni Cr – Ni čelici	$\text{Ne} / -246\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{H}_2 / -253\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{He} / -269\text{ }^{\circ}\text{C}$

Do temperatura od oko $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ koriste se opći konstrukcijski čelici garantirane udarne radnje loma. Sitnozrnati čelici dezoksidirani aluminijem i silicijem imaju pomaknut prijelaz od žilavog ka krhkom području za oko $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tako da je primjena moguća od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, a kod statičkog opterećenja i do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sitnozrnati mikrolegirani čelici u normaliziranom stanju s niskim sadržajem ugljika i sumpora te dodacima nikla imaju izvrsnu žilavost i zavarljivost.

Poboljšani niskolegirani sitnozrnati čelici (uključivši i one s manje od 3 % Ni) imaju zbog poboljšane sitnozrnate strukture i čistoće nisku prelaznu temperaturu.

Naime, struktura visokopopuštenog niskougljičnog martenzita posjeduje i nižu temperaturu nastanka pukotine i nižu temperaturu zaustavljanja širenja pukotine od visokougljičnog martenzita.

Termomehanički obrađeni mikrolegirani čelici dodatno imaju i višu granicu razvlačenja (do 500 N/mm^2), a zahvaljujući niskom sadržaju legirajućih elemenata i vrlo dobru zavarljivost i oblikovljivost. Primjena je moguća za *Off-Shore* konstrukcije i cjevovode.

Najčešće primjenjivani čelici za najniže temperature su one vrste koje sadrže od 3 do 9 % Ni. Ovi čelici u poboljšanom stanju imaju sitno zrno zbog djelovanja nikla, a pri kaljenju nastaje vrlo žilavi Fe – Ni martenzit. Kod ove skupine čelika se stvara vrlo žilavi bainit. U području radnih temperatura od $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ uobičajeno se koriste čelici 12Ni19 i 10Ni36. Ovi čelici u poboljšanom stanju posjeduju visoku sigurnost u pogledu krhkog loma uz dobru čvrstoću i hladnu oblikovljivost. Zbog dobre zavarljivosti primjenjuju se za zavarene posude pod tlakom, spremnike za ukapljene plinove, dijelove postrojenja za preradu zemnog plina i sl. [8]. Na slici 2.19 prikazan je jednostavan raspored čelika primjenjiv za određenu temperaturu.



Slika 2.19 Temperaturno područje primjene
klasa i vrsta čelika [7]

2.3.2 Aluminij i aluminijske legure za rad pri niskim temperaturama

Kod aluminijskih legura padom temperature raste čvrstoća a istovremeno istezljivost i suženje presjeka ostaju jednaki kao pri sobnoj temperaturi. Žilavost do temperatura od – 200 °C može pasti i do 30 % - ovisno o sastavu legure.

Nelegirani aluminij i legure s magnezijem i manganom koriste se u tehnici dubokog hlađenja ponajprije zbog izvrsne oblikovljivosti, usprkos niske čvrstoće. Toplinski čvrste Al – Cu legure dolaze u obzir za primjenu kod dijelova letjelica, jer od svih zavarljivih legura posjeduju najvišu čvrstoću.

Skupina srednje čvrstih Al – legura imaju dobru kombinaciju svojstava koja im osigurava mnogostruku primjenu. Njihova optimalna čvrstoća, dobra zavarljivost i žilavost upućuju na primjenu u gradnji tankera, stacionarnih spremnika i rezervoara za goriva. Visokočvrste vrste aluminijskih legura gube žilavost pri niskim temperaturama (npr. oko –195 °C). One k tome nisu dobro zavarljive.

Danas ipak već postoje visokočvrstozavarljive vrste koje pri niskim temperaturama zadržavaju dovoljnu duktilnost.

Legure tipa AlMg5 i AlCuSiMn često se primjenjuju u gradnji rezervoara za tekući metan, spremnike na transportnim sredstvima za tekući prirodni plin, izmjenjivače topline za

helij– argon – vodik – metan u postrojenjima za ukapljivanje, te manje dijelove u postrojenjima za pročišćavanje plinova.

Aluminij se vrlo često legira bakrom, magnezijem, silicijem, manganom, kromom, cinkom i drugim metalima, i to uglavnom zbog povećanja čvrstoće i tvrdoće. Legiranje uglavnom nepovoljno djeluje na korozivnu postojanost, a najštetnije je u tom pogledu dodavanje bakra koji inače bitno poboljšava mehanička svojstva aluminija.

Tlačni spremnik prikazan na slici 2.20, za rad na vrlo niskim temperaturama, od aluminija, moraju imati deblje stjenke od onih čeličnih, no nižagustoća aluminija to dobro kompenzira. Ukupno gledano aluminijske legure su korozivniji od čelika, ali kod aluminija postoji veća opasnost od oštećenja (savijanje, uleknuća) nego kod čelika [6].



Slika 2.20 Aluminijski tlačni spremnik [6]

3. ZAKLJUČAK

Na odabir materijala za razvoj proizvoda utječu mnogi uvjeti. Tako postoji više faza samog odabira pravilnog materijala kao što su koncipiranje, projektiranje, te u konačnici konstruiranje dijelova i tehnološka izrada. U pogledu izbora materijala sve varijante bi trebale biti prikladne. Time se misli da pri samom koncipiranju proizvoda možemo odrediti neka osnovna svojstva prikladna zadanom zahtjevu (npr. vodič/izolator, lagan/težak, proziran/neproiziran i sl.). U ovom djelu izrade, odnosno pri planiranju, nemoguće je odrediti neka detaljnija svojstva samog materijala. Pri projektiranju je potrebno dublje analizirati materijal te uvidjeti kada nastupaju faktori kao što su: puzanje, elastičnost, otpornost na deformacije, korozija i ostale kemijske reakcije. Tako na različitim temperaturama primjene metalni materijali imaju različita fizikalna, mehanička, kemijska i druga svojstva koja se očituju odmah ili tek nakon nekoliko godina primjene. Na metalnim materijalima ne uočavamo neke velike promjene ako se koriste pri sobnoj temperaturi od 20 °C, već promjene nastupaju pri povećanim ili smanjenim radnim temperaturama. Ako se na vrijeme ne uoče promjene na materijalu može doći do velikih oštećenja kako na materijalu, tako i na proizvodu. Što se smatra niskom, povišenom ili visokom temperaturom za pojedini metal ili leguru određuje visina temperature tališta. Najbitnije svojstvo metalnog materijala je otpornost na krhki lom – žilavost. Žilavost metalnog materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti apsorpiranja mehaničke energije od vanjskog opterećenja, uglavnom udarnog, s tim da se prije loma metal plastično deformira. Količina energije koja se utroši za plastičnu deformaciju i lom jest mjera za žilavost. U pravilu žilavost je manja pri nižim temperaturama. Porastom temperature dolazi do sniženja čvrstoće te povećanja žilavosti. Kod nekih su skupina i vrsta materijala te promjene izraženije nego kod drugih. Stoga se svakoj skupini materijala može pridružiti karakteristično područje temperature.

Današnji razvoj materijala za različite temperature je usmjeren na izdržavanje različitih uvjeta, često dugotrajne eksploatacije.

4. LITERATURA

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb : Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2007.
- [2] Filetin T., IZBOR MATERIJALA, 3+3, 2011.[Online] Dostupno na :
https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1333523564-0-im2_materijaliiproizvodi_12.pdf
- [3] Novosel M., Krumes D., Željezni materijali 2.dio: Konstrukcijski čelici. Slavonski Brod : Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavskom Brodu; 1995.
- [4] Čorić D., POSEBNI METALNI MATERIJALI, - Predavanja- (2.DIO),ak. god. 2016./17 [Online] Dostupno na : https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1474979085-0-predavanjapmmak_god_2016_17.pdf
- [5] prof. Liščić, Kolegij : KONSTRUKCIJSKI MATERIJALI (4+0), šk.god. 1981/82
Dio predavanja : Čelici i legure za povišene temperature. Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za materijale
- [6] Pongrac M., Materijali za tlačne posude. Završni rad. Zagreb. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [7] N. Radović, V. Grabulov, M. Smiljanić, M. Antić; ČELICI LEGIRANI NIKLOM ZA RAD NA NISKIM TEMPERATURAMA, Tehnološko-metalurški fakultet, 11120 Beograd, 22.04.2003.
- [8] Filetin T., MATERIJALI ZA NISKE TEMPERATURE [Online] Dostupno na :
http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/niske_ege96.pdf
- [9] Slika dostupna na :
<https://hr.wikipedia.org/wiki/Pregrija%C4%8D#/media/File:Superheater.jpg>
- [10] Slika dostupna na :
https://hr.wikipedia.org/wiki/Lopatica_turbine#/media/File:Gas_Turbine_Blade.jpg
- [11] Slika dostupna na : <https://sh.wikipedia.org/wiki/Ventil>

5. OZNAKE I KRATICE

Kratice :

BCC – prostorno centrirana kubična rešetka

FCC – plošno centrirana kubična rešetka

g.p.K. – godina prije Krista

HRC – Rockwellova tvrdoća

SSC – *Sulphide Stress Cracking*, sulfidni napetosni lom

st. – stoljeće

Oznake :

E – modul elastičnosti, N/mm^2 , MPa

G – modul smika, N/mm^2 , MPa

K – kelvin

K_{IC} – lomna/pukotinska žilavost (intenzivnost naprezanja), $\text{Nmm}^{-3/2}$

R_d – dinamička izdržljivost (općenito, vlak – tlak), N/mm^2 , MPa

R_{DVM} – granica puzanja, N/mm^2 , MPa

R_m – vlačna čvrstoća, N/mm^2 , MPa

$R_{m/t/\delta}$ – statička izdržljivost pri radnoj temperaturi za određeno vrijeme djelovanja

$R_{p0,2}$ – konvencionalna granica razvlačenja (elastičnost) do 0,2 % trajne deformacije, N/mm^2 , MPa

$R_{p\varepsilon/t/\delta}$ – granica puzanja pri radnoj temperaturi za definirano vrijeme ispitivanja, N/mm^2

T_r – radna temperatura, K

T_t – talište, K

β – koeficijent toplinskog istezanja, K^{-1}

δ – temperatura, °C

ε – koeficijent deformacije, istezanje (pri statičkom vlačnom pokusu), %, mm/mm

λ – koeficijenta toplinske vodljivosti, W/m K

σ_{dop} – dopušteno naprezanje, N/mm^2 , MPa

σ_T – granica tečenja, MPa

6. SAŽETAK

Naslov: PONAŠANJE I PRIMJENA METALNIH MATERIJALA NA RAZLIČITIM TEMPERATURAMA U MEHATRONICI

Od samih početaka život čovjeka bio je obilježen drvom, kamenom, kostima, krznom i drugim materijalima izravno dobivenim iz prirode.

Želja za kvalitetnijim i lakšim životom poticala je i potiče ljude na izradu sve složenijih tvorevina, čije se nove funkcije i svojstva ne mogu ostvariti s klasičnim materijalima.

Prema sastavu, mikrostrukturi i načinu dobivanja metalne materijale dijelimo na materijale na bazi željeza te lake, obojene metale i legure (neželjezni metali i legure).

Najširu primjenu za povišene, odnosno visoke temperature imaju čelici (nisko i visokolegirani). Maksimalna radna temperatura pri kojoj oprema može raditi, ograničena je svojstvima materijala iz kojih je ona izrađena. Temperature koje obuhvaćaju ovo područje su od 20 °C pa sve do radnih temperatura od 1000 °C. Otpornost metala prema sniženju svojstava na povišenim temperaturama obično je tim veća – što je veći udio legiranih elemenata. Dva su odlučujuća kriterija za procjenu ponašanja metalnih materijala pri povišenim odnosno visokim temperaturama: otpornost na puzanje i otpornost prema oksidaciji. S obzirom na temperaturno područje primjene razlikuju se četiri osnovne podskupine čelika: ugljični (nelegirani) čelici, niskolegirani čelici, visokolegirani martenzitni čelici, visokolegirani austenitni čelici.

Tehnika rada pri niskim temperaturama obuhvaća konvencionalno temperaturno područje od oko -40 °C sve do apsolutne nule. Prema tome u ovo specifično tehničko područje ulazili bi primjeri primjene: čelične konstrukcije, željeznice, brodovi, ledolomci, uređaji za proizvodnju ukapljenih plinova itd. Najopasnija neželjena pojava pri sniženim temperaturama jest nagli pad žilavosti, pri čemu se pod pojmom žilavosti podrazumijeva svojstvo materijala da se apsorpcijom energije odupre širenju pukotine, a time i krhkom lomu. Za primjenu u ovoj grani tehnike bit će nezaobilazni željezni materijali, čelični te aluminij i aluminijske legure.

Ključne riječi: metalni materijali, visoke i niske radne temperature, nisko i visokolegirani čelici, legiranje, žilavost, puzanje, oksidacija.

7. ABSTRACT

Title:BEHAVIOR AND APPLICATION OF METAL MATERIALS AT DIFFERENT TEMPERATURES IN MEHATRONICS

From the very beginning, man's life was marked with wood, stone, costumes, fur and other materials directly derived from nature.

The desire for a better and easier life encourages people to make more complex creatures whose new functions and properties can not be achieved with classical materials.

By composition, the microstructure and the way of obtaining metal materials are divided into iron-based materials and lightweight, colored metals and alloys (non-ferrous metals and alloys).

Wider application for high or higher temperatures has steel (low and high alloy). The maximum operating temperature at which the equipment can work is limited by the properties of the material from which it was made. Temperatures that range from 20 °C up to operating temperatures of 1000 °C. Metal resistance to lowered properties at elevated temperatures is usually higher - the greater the proportion of legion elements. There are two decisive criteria for assessing the behavior of metallic materials at elevated or high temperatures: cracking resistance and oxidation resistance. Regarding the temperature range of application, four basic sub-groups of steel are distinguished: carbon (non-alloyed) steels, low alloy steels, high alloy steels, high alloy steels.

Low temperature operation technology embraces a conventional temperature range of about -40 ° C up to an absolute zero. Accordingly, this particular technical area would introduce examples of applications: steel structures, railways, ships, icebreakers, liquefied gas production devices, etc. The most dangerous undesirable phenomenon at lowered temperatures is a sudden drop in toughness, with the term "toughness" energy absorption avoids spreading cracks, and thus fragile fractures. For the application in this field of technology will be unavoidable iron materials, steel, aluminium and aluminium alloys.

Keywords: metal materials, high and low operating temperatures, low and high alloy steels, ligating, toughness, creep, oxidation.

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, 12.06.2018.	Martin Gmajnić	<i>Martin Gmajnić</i>

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


MARTIN GMAJNIĆ

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, 12.06.2018.



potpis studenta/ice