

Primjena maraging čelika u mehatronici

Prović, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:144:714624>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

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



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

PRIMJENA MARAGING ČELIKA U MEHATRONICI

Završni rad br. 07/MEH/2020

David Prović

Bjelovar, listopad 2020.



Veleučilište u Bjelovaru
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Prović David**

Datum: 14.07.2020.

Matični broj: 001765

JMBAG: 0314017517

Kolegij: **TEHNIČKI MATERIJALI**

Naslov rada (tema): **Primjena maraging čelika 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. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., predsjednik
2. dr.sc. Stjepan Golubić, mentor
3. Danijel Radočaj, mag.inž.meh., član

2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 07/MEH/2020

U radu je potrebno:

- opisati tehničke metalne materijale općenito
- prikazati podjelu čelika po različitim kriterijima
- opisati konstrukcijske čelike za izradu dijelova
- opisati maraging čelike
- opisati toplinsku obradu maraging čelika
- opisati svojstva maraging čelika
- usporediti maraging čelike i niskouglične konstrukcijske čelike
- usporediti maraging čelike i legirane konstrukcijske čelike
- prikazati karakteristične primjere primjene maraging čelika.

Zadatak uručen: 14.07.2020.

Mentor: **dr.sc. Stjepan Golubić**

Zahvaljujem svome mentoru dr. sc. Stjepanu Golubiću na mentorstvu, ukazanom strpljenju te mnogim savjetima bez kojih izrada ovog rada nebi bila moguća. Posebno se zahvaljujem roditeljima, sestri i ostatku obitelji na razumijevanju, toleranciji i neizmjernoj podršci tijekom cijelog studiranja.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEHNIČKI MATERIJALI	2
2.1 <i>Metalni materijali</i>	4
2.1.1 <i>Struktura metala</i>	5
2.2 <i>Osnove toplinske obrade</i>	8
2.2.1 <i>Podjela toplinskih obrada</i>	8
2.3 <i>Odabir materijala</i>	9
3. ČELICI	11
3.1 <i>Podjela čelika</i>	12
3.2 <i>Utjecaji legirnih elemenata</i>	15
3.3 <i>Konstruktivski čelici</i>	19
3.3.1 <i>Podjela konstrukcijskih čelika</i>	20
3.4 <i>Visokočvrsti i ultračvrsti čelici</i>	24
4. MARAGING ČELICI	26
4.1 <i>Struktura maraging čelika</i>	27
4.2 <i>Toplinska obrada maraging čelika</i>	28
4.3 <i>Obrada maraging čelika</i>	31
4.4 <i>Prednosti maraging čelika</i>	35
5. PRIMJENA MARAGING ČELIKA	37
5.1 <i>Podjela maraging čelika</i>	37
5.2 <i>Konstruktivska primjena</i>	39
5.2.1 <i>Primjena kod zrakoplova i helikoptera</i>	39
5.2.2 <i>Primjena u strojarstvu</i>	41
5.2.3 <i>Primjena u vojsci</i>	43
5.3 <i>Alatna primjena</i>	45
5.3.1 <i>Kalupi</i>	45
5.3.2 <i>Ostala alatna primjena</i>	46
5.4 <i>Ostala primjena</i>	47
6. ZAKLJUČAK	48
7. LITERATURA	49
8. OZNAKE I KRATICE	52
9. SAŽETAK	54
10. ABSTRACT	55

Popis slika

- Slika 2.1: Razvoj oružja kroz povijest
- Slika 2.2: Periodni sustav elemenata
- Slika 2.3: Kristalografski sustavi-rešetke
- Slika 2.4: Prostorno centrirana kubna rešetka
- Slika 2.5: Plošno centrirana kubna rešetka
- Slika 2.6: Heksagonska kompaktna rešetka
- Slika 3.1: Feritna mikrostruktura
- Slika 3.2: Perlitna mikrostruktura
- Slika 3.3: Martenzitna mikrostruktura
- Slika 3.4: Banititna mikrostruktura
- Slika 3.5: Austenitna mikrostruktura
- Slika 4.1: Maraging čelici
- Slika 4.2: Dijagram tvrdoće maraging čelika
- Slika 4.3: Dijagram toplinske obrade maraging čelika
- Slika 4.4: Ovisnost mehaničkih svojstva čelika X2 NiCoMo 18 8 5 o temperaturi starenja
- Slika 4.5: Shematski prikaz očvrnuća maraging čelika
- Slika 5.1: Ovisnost granice razvlačenja o temperaturi
- Slika 5.2: Dimenzijske promjene pri povišenim temperaturama
- Slika 5.3: Pogonska osovina helikoptera
- Slika 5.4: Pilotsko sjedalo
- Slika 5.5: Hidraulički odbojnici
- Slika 5.6: Avionski spremnik goriva
- Slika 5.7: Dinamometar
- Slika 5.8: Zubna letva i zupčanik
- Slika 5.9: Koljenasto vratilo trkaćeg automobila
- Slika 5.10: Kardanski zglobni prijenos
- Slika 5.11: Zupčanik trkaćeg bolida
- Slika 5.12: Dijelovi kućišta raketnog motora
- Slika 5.13: Osnovni dijelovi puške
- Slika 5.14: Udarna igla puške
- Slika 5.15: Tanjurasta opruga
- Slika 5.16: Prijenosni most
- Slika 5.17: Kalup za preradu polimera
- Slika 5.18: Princip postupka hladnog istiskivanja

Slika 5.19: Glava palice za golf

Slika 5.20: Olimpijski mačevi

Popis tablica

Tablica 2.1: Skupine, svojstva i karakteristike materijala

Tablica 3.1: Potrošnja čelika po glavi stanovnika

Tablica 3.2: Podjela čelika s obzirom na kemijski sastav

Tablica 3.3: Podjela čelika s obzirom na primjenu

Tablica 3.4: Granični udjeli legirnih elemenata

Tablica 3.5: Svojstva konstrukcijskih čelika

Tablica 4.1: Legirni elementi maraging čelika

Tablica 4.2: Parametri obrade i svojstva maraging čelika

Tablica 4.3: Režimi obrade maraging čelika odvajanjem čestica

Tablica 4.4: Podjela postupaka modificiranja površine

Tablica 4.5: Podjela postupaka prevlačenja površine

Tablica 5.1: Podjela maraging čelika

Tablica 5.2: Troškovnik izrade kalupa

1. UVOD

U prethodnih 100 godina čovječanstvo je tehnološki više napredovalo nego u svim godinama prije toga zajedno. U tim godinama čovjek je izgradio nebudere koji se protežu preko oblaka, grade se otoci, masovno se proizvode sportski auti koji dostižu brzine preko 350 km/h, putovanje zrakoplovom je postala svakodnevica, a priča da je čovjek bio na mjesecu prije 100 godina bila bi bajka, dok nam je danas to sasvim normalna, pa čak i zastarjela priča. Napredak je iz dana u dan jasno vidljiv, no taj napredak ne bi bio moguć bez novo otkrivenih materijala.

Metalni materijali u današnje vrijeme dio su čovjekove svakodnevnice. Zbog svojih svojstva nije ih lako, a u nekom sektorima i nemoguće zamijeniti sa novije otkrivenim materijalima. Iz grupe metalnih materijala čelici pronalaze najširu primjenu. To su legure željeza i ugljika uz dodatke legirnih elemenata, čelici pronalaze svoju široku primjenu zbog mogućnosti prilagodbe nama potrebnih svojstva legiranjem.

Maraging čelici razvijeni su 60-tih godina prošloga stoljeća kao ultračvrsti čelici za konstrukcijske primjene u svemirskoj industriji, no kasnijih godina zbog svojih iznimno povoljnih mehaničkih svojstva pronalaze sve širu konstrukcijsku i alatnu primjenu.

U ovom završnom radu opisani su maraging čelici te opći primjeri njihove primjene u konstrukcijskom i alatnom smislu.

Prvo poglavlje opisuje ukratko tehničke materijale sa fokusom prvenstveno na metalne materijale. U poglavlju dva opisani su čelici, njihove podjele te osnovni pojmovi vezani uz čelike. Treće poglavlje opisuje strukturu, toplinsku obradu te mehaničke obrade maraging čelika. Četvrto poglavlje opisuje konstrukcijsku i alatnu primjenu maraging čelika sa konkretnim primjerima njihove primjene.

2. TEHNIČKI MATERIJALI

Materijali su čvrste tvari koje zauzimaju neki prostor i imaju određenu masu, te je od njih nešto izrađeno. Osnovno obilježje materijala je da se oni mogu određenim postupcima oblikovati u nama potrebne predmete s određenim fizičkim i kemijskim svojstvima [1].

Od najranijih početaka civilizacije, čovjek je koristio dostupne materijale da bi si stvorio predmete za lakši i ugodniji život.

- U kamenom dobu koje je trajalo od pojave čovjeka (2 000 000 god. pr. Kr.) pa sve do otkrića prvog metala ljudi su izrađivali oružja, posuđe, ukrase i ostale predmete od drva, kamena, kosti, kože i ostalih materijala koji su ih okruživali.
- Nakon kamenog doba počelo je metalno doba u kojem živimo i mi. Prvi otkriveni metal bio je bakar 8 000 god. pr. Kr. koji se u početku obrađivao kamenom sve do otkrića taljenja 6 000 god. pr. Kr.
- Najraniji tragovi proizvodnje i uporabe željeznih predmeta javljaju se oko 4 000 god. pr. Kr. na području Egipta, dok u Europi do opće upotrebe željeza dolazi tek 1 300 god. pr. Kr. Postupci lijevanja i taljenja razvijeni su u 14 stoljeću, dok se primjena visokih peći javlja dva stoljeća kasnije.
- Prva proizvodnja nelegiranih čelika javlja se u 18 stoljeću, austenitni nehrđajući čelici razvijeni su oko 1935 g a mikrolegirani čelici visoke čvrstoće tek oko 1965 g.

Napredak civilizacije i želja za kvalitetnijim i lakšim životom potiče ljude na proizvodnju sve složenijih predmeta sa boljim svojstvima od klasičnih predmeta što također zahtjeva otkrivanje i proizvodnju novih materijala koji mogu ispuniti tražene zahtjeve [2].



Slika 2.1. Razvoj oružja kroz povijest [3]

Na slici 2.1. prikazan je razvoj oružja kroz povijest. Vidimo kako se mijenja način izrade oružja, kompleksnost proizvoda raste te možemo uočiti kako civilizacija napreduje konstantno se javljaju drugačiji materijali.

Tehnički materijali su materijali od kojih se prave tehnički proizvodi. Procjenjuje se da u današnje vrijeme raspoložemo sa preko 100000 tehničkih materijala, a dijele se na 4 osnovne grupe materijala [1]:

1. Metalni materijali i njihove legure

Materijali koji su zbog svojih povoljnih svojstva pronašli primjenu u gotovo svim djelatnostima današnjice. Karakteriziraju ih dobra električna i toplinska vodljivost, visoka čvrstoća, daju se dobro oblikovati ...

2. Polimerni materijali

To su materijali male gustoće, koji su pronašli široku primjenu zbog jednostavnosti oblikovanja, dobrih fizičkih i kemijskih svojstva, daju se lagano oblikovati na niskoj temperaturi, rastezljivi ...

3. Keramički i stakleni materijali

Karakteristike ove skupine materijala su iznimna tvrdoća i velika krhkost, imaju dobra izolacijska svojstva, otporni su na visoke temperature, keramika se zbog visoke tvrdoće teško obrađuje postupkom odvajanjem čestica ...

4. Kompozitni materijali

Relativno novija skupina materijala kojoj potražnja u današnje vrijeme sve više raste. Kompozitni materijali su sastavljeni od najmanje dva materijala iz iznad navedenih skupina, na taj način možemo postići željena svojstva materijala koja kod pojedinih komponenata nije bila prisutna.

2.1 Metalni materijali

OZNAČAVANJE SKUPINE

ATOMSKI BROJ

SIMBOL

NAZIV ELEMENATA (I)

1																	18							
1	H VODIK																	He HELIJ						
2	Li LITIJ	Be BERILIJ																	B BOR	C UGLIJK	N DUŠIK	O KISIK	F FLUOR	Ne NEON
3	Na NATRIJ	Mg MAGNEZIJ																	Al ALUMINIJ	Si SILICIJ	P FOSFOR	S SUMPOR	Cl KLOR	Ar ARGON
4	K KALIJ	Ca KALCIJ	Sc SKANDIJ	Ti TITANIJ	V VANADIJ	Cr KROM	Mn MANGAN	Fe ŽELJEZO	Co KOBALT	Ni NIKAL	Cu BAKAR	Zn CINK	Ga GALIJ	Ge GERMANIJ	As ARSEN	Se SELENIJ	Br BROM	Kr KRIPTON						
5	Rb RUBIDIJ	Sr STRONCIJ	Y ITRIJ	Zr CIRKONIJ	Nb NIJABIJ	Mo MOLIBDEN	Tc TEHNECIJ	Ru RUTENIJ	Rh RODIJ	Pd PALADIJ	Ag SREBRO	Cd KADMIJ	In INDIJ	Sn KOSITAR	Sb ANTIMON	Te TELURIJ	I JOD	Xe KSENON						
6	Cs CEZIJ	Ba BARIJ	La-Lu Lantanoidi	Hf HAFNIJ	Ta TANTAL	W VOLFRAM	Re RENIJ	Os OSMIJ	Ir IRIDIJ	Pt PLATINA	Au ZLATO	Hg ŽIVA	Tl TALIJ	Pb OLOVO	Bi BIZMUT	Po POLONIJ	At ASTAT	Rn RADON						
7	Fr FRANCIJ	Ra RADIJ	Ac-Lr Aktinoidi	Rf RUTHERFORDIJ	Db DUBNIJ	Sg SEABORGIJ	Bh BOHRIJ	Hs HASSIJ	Mt MEITNERIJ	Ds DARMSTADTIJ	Rg RENDGENIJ	Cn KOPERNICIJ	Nh NHONIJ	Fl FLEROVIJ	Mc MOSKOVIJ	Lv LIVERMORIJ	Ts TENESIJ	Og OGANESON						

LANTANOIDI														
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La LANTAN	Ce CERIJ	Pr PRASEODIMIJ	Nd NEODIMIJ	Pm PROMETIJ	Sm SAMARIJ	Eu EUROPIJ	Gd GADOLINIJ	Tb TERBIJ	Dy DISPROZIJ	Ho HOLMIJ	Er ERBIJ	Tm TULIJ	Yb ITERBIJ	Lu LUTECIJ

AKTINOIDI														
89	90	91	92	93	94	95	96 (247)	97	98	99	100	101	102	103
Ac AKTINIJ	Th TORIJ	Pa PROTAKTINIJ	U URANIJ	Np NEPTUNIJ	Pu PLUTONIJ	Am AMERICIJ	Cm KURIJ	Bk BERKELIJ	Cf KALIFORNIJ	Es EINSTEINIJ	Fm FERMIJ	Md MENDELEVIJ	No NOBELIJ	Lr LAWRENCIJ

Slika 2.2 Periodni sustav elemenata [4]

U periodnom sustavu elemenata nalaze se 76 metalnih elemenata, 6 metaloida dok su ostali elementi u sustavu su nemetali. Metalni materijali bitno se razlikuju po fizičkim i kemijskim svojstvima od nemetala, dok su metaloidi elementi koji svojim svojstvima dijelom nalikuju na metale a dijelom na nemetale [5].

Od svih dostupnih materijali koje imamo na izboru u tehničke svrhe najviše primjenjuju: željezo (Fe), aluminij (Al), bakar (Cu), nikal (Ni), magnezij (Mg), cink (Zn), olovo (Pb), kositar (Sn), titanij (Ti) [1].

Pored njih u manjoj količini nailazimo i na: krom (Cr), kobalt (Co), mangan (Mn), molibden (Mo), volfram (W), vanadij (V), živu (Hg)... [1].

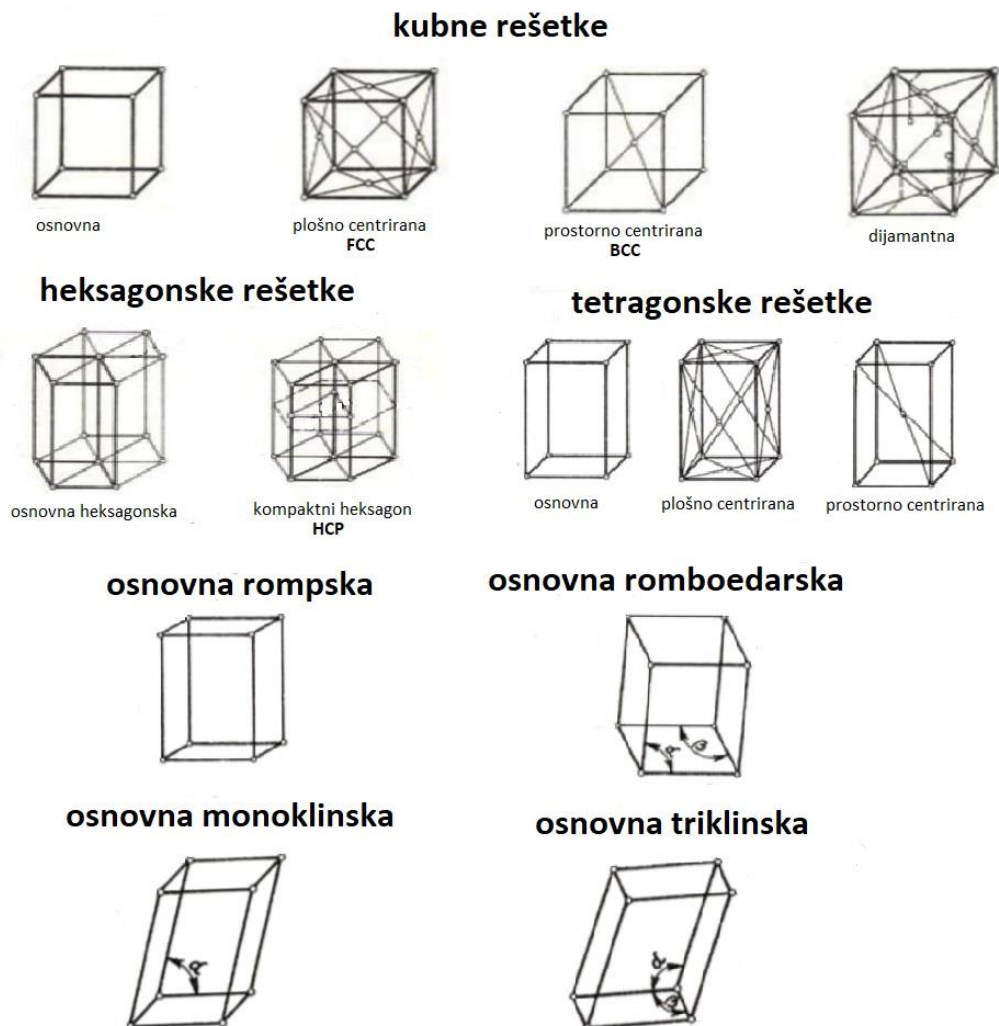
Prilikom određivanja mehaničkih svojstva metala moramo se posvetiti strukturi metala jer su struktura i svojstva toliko povezana da možemo reći da struktura određuje svojstva [2].

2.1.1 Struktura metala

Svi metalni materijali građeni su od kristalnih rešetka spojenih u sustav, glavno obilježje im je stalan i pravilan raspored atoma. Prilikom skrućivanja metala dolazi do pravilnog raspoređivanja atoma prilikom kojeg nastaju kristali, taj proces se naziva kristalizacija [1].

Znanstvena disciplina koja se bavi proučavanjem rasporeda atoma u kristalima, tj. proučavanjem nanostrukture metala naziva se kristalografija [1].

Kristali su dio krute materije čiji su atomi u unutrašnjosti pravilno raspoređeni, a prema van su omeđeni pravilnim plohami. Svaka tvar ima kristale određenog oblika i kutova između ploha koji su konstantni [1].



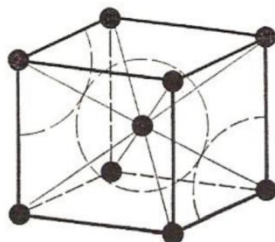
Slika 2.3 Kristalografski sustavi-rešetke [1]

Kristalni sustavi s kojima se susrećemo: kubni sustav, heksagonski sustav, tetragonski sustav, rompski sustav, romboedarski sustav, triklinski sustav i monoklinski sustav [1].

Većina metala kristalizira se u kubnom, heksagonskom ili u romboedarskom sustavu, pa se obično susrećemo s tri vrste kristalnih rešetki [1]:

- Prostorna centrirana kubna rešetka (BCC)
- Plošna centrirana kubna rešetka (FCC)
- Heksagonska kompaktna rešetka (HCP).

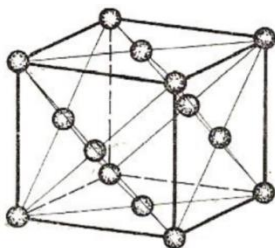
Prostorno centrirana kubna rešetka sastavljena je od ukupno 9 atoma. 8 od tih atoma nalaze se u vrhovima i jedan od njih u sjecištu vrhova dijagonala. Od svih tih atoma rešetki u cijelosti pripada samo onaj atom u sjecištu dijagonala, dok onih 8 atoma koji se nalaze u vrhovima, međusobno se dijele sa susjednim rešetkama. Kada bi se izračunalo kolika je suma udjela atoma u vrhovima gledanoj rešetki dobivamo da jednoj kristalnoj rešetki pripadaju ukupno dva atoma [1].



Slika 2.4 Prostorno centrirana kubna rešetka [1]

Atom koji se nalazi na sjecištu dijagonala dodiruje se sa svih 8 atoma u vrhovima, dok se atomi u vrhovima ne dodiruju. U prostorno centriranu kubnu rešetku mogu stati 24 dodatna atoma sa polumjerom $0,3r$ bez da se rešetka izvitoperi. Prema ovom tipu rešetke kristaliziraju željezo (Fe), krom (Cr), Molibden (Mo), volfram (W), vanadij (V)... [1].

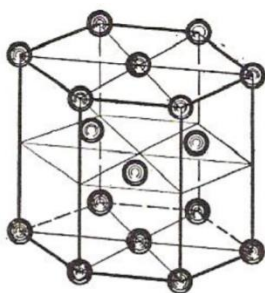
Plošno centrirana kubna rešetka sastavljena je od ukupno 14 atoma. Atomi su raspoređeni tako da je 8 od tih atoma smješteno na vrhovima dok ostalih 6 atoma nalazi se na sjecištu dijagonala ploha. Jednoj promatranoj plošno centriranoj kubnoj rešetki pripada ukupno 4 atoma [1].



Slika 2.5 Plošno centrirana kubna rešetka [1]

Atomi se dotiču po dijagonalama bočnih ploha. Svaki atom koji je smješten u središtu dijagonala ploha dodiruje 4 atoma koja se nalaze na vrhovima te plohe, dok se atomi koji su smješteni u vrhovima međusobno ne dodiruju. Udaljenosti između atoma u plošno centriranoj kubnoj rešetki većega su iznosa nego kod prostorno centrirane kubne rešetke. U plošno centriranu kubnu rešetku mogu stati 13 dodatnih atoma polumjera $0,4r$ bez da se rešetka izvitoperi. Prema ovom tipu rešetke kristaliziraju željezo (Fe), aluminij (Al), bakar (Cu), nikal (Ni), srebro (Ag), zlato (Au), platina (Pt)... [1].

Heksagonska kompaktna rešetka sastavljena je od ukupno 17 atoma. Ti atomi su raspoređeni tako da se 12 atoma nalazi u vrhovima, u sredini gornje i donje plohe smještena su 2 atoma, a ostala 3 atoma nalaze se u sredini heksagona. Osnovnoj heksagonskoj kompaktnoj rešetki pripada ukupno 6 atoma [1].



Slika 2.6 Heksagonska kompaktna rešetka [1]

Atomi koji su smješteni u sredinama gornje i donje plohe se međusobno dodiruju. Tri atoma smještena u sredini također se međusobno dodiruju, a također se dodiruju s atomima gornje i donje plohe. U heksagonsko kompaktnoj rešetki ima jako malo prostora za smještanje dodatnih atoma unutar rešetke. Prema ovom tipu rešetke kristaliziraju cink (Zn), kadmij (Cd), magnezij (Mg), titanij (Ti)... [1].

2.2 Osnove toplinske obrade

Prema EURO-NORMI definicija toplinske obrade metalnih materijala glasi:

“ Toplinska je obrada niz postupaka u tijeku kojih se metalni proizvod u čvrstome stanju izvrgava djelovanju niza temperaturno-vremenskih promjena sa svrhom promjene strukture, a time i promjene svojstva u željenom smislu“ [5].

Dakle toplinska obrada općenito je postupak u kojem djelujemo na materijal temperaturom da bismo promijenili mikrostrukturu obrađivanog materijala a samim time mijenjamo i njegova fizička, mehanička i kemijska svojstva. Toplinski se uglavnom obrađuju čelici, a često i drugi metali te keramika i staklo. Toplinske obrade se uglavnom vrše s ciljem poboljšavanja mehaničkih svojstva metala, posebno povećanja vlačne čvrstoće, žilavosti, za smanjenje unutarnjih naprezanja... [5].

2.2.1 Podjela toplinskih obrada

Toplinske obrade se mogu podijeliti na dvije osnovne skupine [5]:

1. Prava ili “čista“ toplinska obrada-karakterizira ju da u tom postupku ne mijenjamo namjerno kemijski sastav na ni jednome mjestu proizvoda.
2. Toplinska obrada površinskih slojeva-u ovoj obradi se namjerno mijenja kemijski sastav, ali samo površinskih slojeva s ciljem promjene njihove strukture.

U skupinu prave ili “čiste“ kemijske obrade spadaju postupci [5]:

1. Žarenje 1. reda: Postižemo promjene svojstva koje ne ovise bitno o postignutome strukturnom stanju nakon žarenja.
2. Žarenje 2. reda: Ovim postupkom nastojimo postići neko definirano strukturno stanje.
3. Gašenje legura s polimorfnim pretvorbama (kaljenje): Svrha ovog postupka je postizanje što veće tvrdoće nakon gašenja.
4. Popuštanje: U ovom postupku ugrijavamo kaljeni čelik da bi povišili žilavost martenzita nastalog kaljenjem i smanjili unutarnja naprezanja.
5. Gašenje legura bez polimornih pretvorbi: Rezultat ove obrade je “fiksiranje“ stanja postignutih toplinskim obradama.
6. Starenje (dozrijevanje): Uzrokuje precipitaciju sastojaka iz prezasićene otopine te njihovo spajanje u čestice međumetalnih spojeva. Te čestice očvršćuju otopinu budući da otežavaju gibanje dislokacija.

Skupina toplinskih obrada površinskih slojeva dijeli se na [5]:

Tablica 2.1 Skupine, svojstva i karakteristike materijala [2]

<p>POSTUPCI U KOJIMA NE MIJENJAMO KEMIJSKI SASTAV</p> <ul style="list-style-type: none">• Plameno ugrijavanje• Indukcijsko ugrijavanje• Ugrijavanje visokim unosom energije
<p>TERMOKEMIJSKI POSTUOCI</p> <ul style="list-style-type: none">• Cementiranje• Nitiranje• Nitrokarburiranje• Boriranje• Termodifuzija metala
<p>PREVLAČENJE IZLUČIVANJEM IZ PLINSKE FAZE</p> <ul style="list-style-type: none">• PVD (Physical Vapour Deposition)- Fizičko taloženje para• CVD (Chemical Vapour Deposition)- Kemijsko taloženje para• PA CVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition)-Plazmom potpomognuto kemijsko taloženje para

2.3 Odabir materijala

Prilikom proizvodnje nekog proizvoda jedan od bitnih zadataka je upravo odabir odgovarajućeg materijala. Odabirom materijala djelujemo na tehničke karakteristike proizvoda, te manipuliramo troškovima proizvodnje i održavanja, dugovječnosti proizvoda te o kvaliteti proizvoda. Gledajući nekoliko desetaka godina unazad mnogi proizvodi su doživjeli znatno poboljšanje u pogledu kvalitete samo zbog promjene materijala konstrukcije [2].

Izbor materijala ima izravne veze sa projektiranjem i konstruiranjem predmeta, izborom i razradom postupaka proizvodnje i montaže. U pravilu konstruktor je osoba odgovorna za odabir materijala, na njemu je da uskladi konstrukcijsko-tehničke zahtjeve sa zahtjevima svojstva materijala [2].

Konstruiranje nastaje iz vizualnog primjera gotovog proizvoda, gdje se u obzir uzimaju iduća svojstva proizvoda [2]:

- Tehnička- funkcijska, proizvodna, eksploatacijska svojstva
- Ekonomska- troškovi i prodajna svojstva
- Društvena- ekološka i kulturna svojstva
- Pravna svojstva.

Iako odabiremo nove materijale uglavnom u svrhu razvoja novog proizvoda, postoje i drugi razlozi za razmatranjem primjene nove vrste materijala, a to su sljedeći razlozi [2]:

1. Razmatranje prednosti uvođenja novog materijala
2. Poboljšanje uporabnih karakteristika proizvoda
3. Promjena uvjeta rada u uporabi i zahtjeva proizvoda
4. Kvarovi u radu koji su uzrokovani materijalom
5. Pojava novih uputa, propisa, normi i zakona
6. Sniženje troškova i postizanje bolje konkurentnosti.

Zbog svih tih zahtjeva inženjeri moraju imati potrebna znanja i informacije o dostupnim materijalima kako bi mogli odabrati optimalne materijale i ostvarili prednost proizvoda u usporedbi sa konkurencijom [2].

3. ČELICI

Željezo samo za sebe, u svom prirodnom obliku zapravo nije pogodno za tehničku upotrebu, već se kao takvo koristi za specijalne namjene. U usporedbi sa čistim željezom, čelik ima više puta bolja mehanička svojstva ne samo za tehničku uporabu već i za šire područje industrije te i u svakodnevnome životu [6].

Europske norme govore da je čelik željezni materijal koji je pogodan za toplinsku obradu. Čelik možemo definirati i kao leguru željeza i ugljika u kojoj maseni udio ugljika ne prelazi više od 2 % sa prisutnim nečistoćama fosfora (P) i sumpora (S), te sa ili bez dodataka drugih legirajućih elemenata [6].

Koliko je u današnje vrijeme čelik važan i potreban pri razvoju i održavanju civilizacije govori i podatak da je trenutna količina proizvedenog čelika u cijelome svijetu gotovo deset puta veća od količine proizvedenih svih ostalih metala. Od svih dostupnih materijala u tehničkoj primjeni čelici su svakako najvažniji materijal. Svjetska proizvodnja čelika danas iznosi preko 900 milijuna tona, što je preko 50 % od svih proizvedenih tehničkih materijala [2, 6].

Kao materijal, čelik svoju primjenu pronalazi u svim djelatnostima kao što su: industrija, promet, građevinarstvo, poljoprivreda i u mnogo drugih djelatnosti. Tako široku primjenu čelici nalaze zbog vrlo pogodnih zasebnih mehaničkih svojstva, ali i zbog mogućnosti kombinacije svojstva kao što su čvrstoća, žilavost, elastičnost, rastezljivost, oblikovanje deformiranjem, promjenom sastava legiranjem [2, 6]...

Nakon lijevanja čelici se oblikuju postupcima deformacije u nama potrebne poluproizvode kao što su: limovi, cijevi, profili, šipke i slično [2].

Zanimljivo je činjenica da se mjeri potrošnja čelika po glavi stanovnika, tako dolazimo do zanimljivih podataka prosječne potrošnje čelika u raznim dijelovima svijeta prikazanim u tablici [2].

Tablica 3.1 Potrošnja čelika po glavi stanovnika [2]

Japan	660 kg
Njemačka	500 kg
SAD	450 kg
Afrika	20 kg
Svijet	150 kg

3.1 Podjela čelika

Čelici se mogu podijeliti prema raznim osobinama, ovisno s koje perspektive se promatraju, mogu se podijeliti s obzirom na iduće karakteristike [2]:

- a) Kemijski sastav
- b) Mikrostruktura
- c) Način proizvodnje
- d) Oblik i stanje
- e) Primjena
- f) Svojstva.

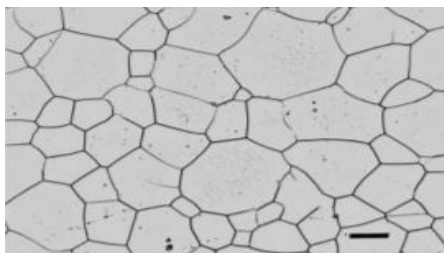
a) Obzirom na kemijski sastav, čelici se mogu podijeliti na sljedeće skupine:

Tablica 3.2 Podjela čelika s obzirom na kemijski sastav [2]

ČELICI SA ZAJAMČENIM ILI ČELICI SA NEZAJAMČENIM SASTAVOM
NELEGIRANI ILI LEGIRANI ČELICI <ul style="list-style-type: none">• Jednostruko ili višestruko legirani• Niskolegirani ili visokolegirani
PREMA SASTAVU LEGIRNIH ELEMENATA <ul style="list-style-type: none">• Krom,nikal, mangan, silicij, volfram, molibden, vanadij čelici• Krom-nikal, krom-mangan, krom-molibden, silicij-mangan čelici• Krom-nikal-molibden, volfram-krom-vanadij čelici
PREMA KVALITETI (udjelu nečistoća fosfora(P) i sumpora (S)) <ul style="list-style-type: none">• Obični-udio nečistoća do 0,100 %• Kvalitetni-udio nečistoća do 0,045 %• Plemeniti-udio nečistoća do 0,030 %

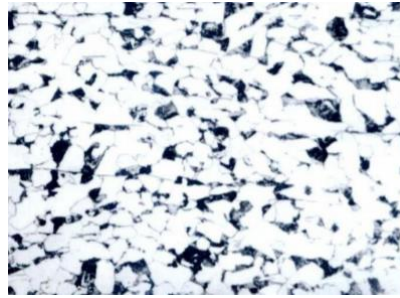
b) S obzirom na mikrostrukturu čelici se mogu podijeliti na:

Feritni-To je intersticijska otopina ugljika u željezu koja mu daje magnetična svojstva. Feritni čelici imaju znatno bolju vlačnu čvrstoću i mehanička svojstva [7].



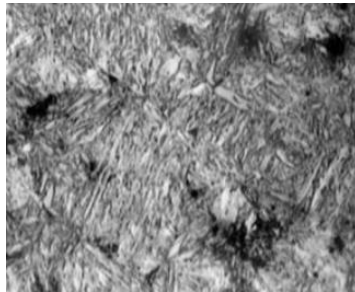
Slika 3.1 Feritna mikrostruktura [7]

Perlitni-Perlit se sastoji od mješavine ferita i cementita. Vlačna čvrstoća ovih čelika iznosi oko 800 N/mm^2 [7].



Slika 3.2 Perlitna mikrostruktura [7]

Martenzitni-Martenzit nastaje iz austenita prilikom hlađenja sa temperature austenitizacije. Ti čelici imaju visoku čvrstoću i vrlo su krhki [7].



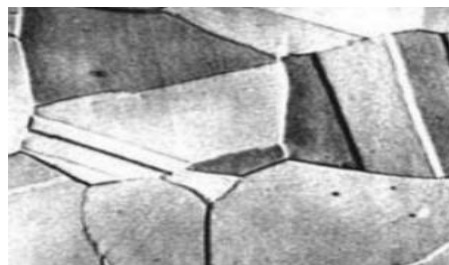
Slika 3.3 Martenzitna mikrostruktura [7]

Bainitni-Struktura koja je sastavljena od ferita i cementita, ali je različita od perlita. Izgledom mikrostrukture podsjeća na martenzit [7].



Slika 3.4 Banitna mikrostruktura [7]

Austenitni-Intersticijska otopina ugljika u željezu. Nije stabilan kod nelegiranih čelika [7].



Slika 3.5 Austenitna mikrostruktura [7]

c) S obzirom na način proizvodnje čelici mogu biti proizvedeni idućim postupcima [2]:

- Konverterski
- Elektropretaljivanjem
- Kisikovim konverterima
- Sekundarnom metalurškom obradom
- Vakumskim pročišćavanjem
- Otplinjavanjem pod argonom
- Pretaljivanjem pod troskom.

S obzirom na dezoksidaciju i način lijevanja čelici se mogu podijeliti na [2]:

- Nesmirene
- Polusmirene
- Smirene
- Posebno smirene.

d) Osnovni oblici čelika mogu biti [2]:

- Šipke
- Limovi
- Trake
- Cijevi
- Profili i slično.

Dok se mogu pojaviti u sljedećim stanjima [2]:

- Lijevani
- Toplovaljani
- Hladnovaljani
- Hladnovučeni
- Ljušteni
- Brušeni
- Polirani
- Kovani
- Toplinski obrađeni i slično.

e) S obzirom na primjenu čelici mogu biti [1]:

Tablica 3.3 Podjela čelika s obzirom na primjenu

1-Konstruktivski čelici
<ul style="list-style-type: none">• Opći konstrukcijski, čelici povišene čvrstoće i ultračvrsti čelici• Čelici za: cementiranje, poboljšavanje, opruge i rad na niskim i visokim temperaturama• Čelici poboljšane rastezljivosti i korozijski postojani čelici
2-Alatni čelici
<ul style="list-style-type: none">• Čelici za hladan i topli rad• Brzorezni čelici

f) Pojedini čelici ili neka podskupina čelika može imati posebna svojstva po kojima se ističu, a to mogu biti [2]:

- Povišena granica razvlačenja
- Vlačna čvrstoća
- Žilavost pri niskim temperaturama
- Oblikovljivost
- Rezljivost
- Otpornost na trošenje....

U današnje vrijeme imamo stvarno vrlo široki izbor za odabir nama potrebnog čelika, konstruktor mora biti u stanju prepoznati koja su to potrebna svojstva i ključne stavke za odabir čelika.

3.2 Utjecaji legirnih elemenata

Legirani čelici osim željeza i ugljika sadrže barem još jedan dodatni element. Čelike legiramo s ciljem postizanja željenih svojstva ili neke kombinacije svojstva materijala [2].

Podjela čelika sa obzirom na masene udjele legirnih elemenata:

- Niskolegirani-čelici koji imaju maseni udio legirnih elemenata do 5 %
- Visokolegirani- čelici koji imaju maseni udio legirnih elemenata iznad 5 %.

Prema europskoj normi da bi čelik bio legiran mora sadržavati barem jedan legirni element sa masenim udjelom većim od onih navedenih u tablici 3.4.

Tablica 3.4 Granični udjeli legirnih elemenata [2]

Legirni elementi	Granični udio mase
Aluminij	0.10 %
Bor	0.0008 %
Krom	0.30 %
Kobalt	0.10 %
Bakar	0.40 %
Rijetke zemlje-lantanidi	0.05 %
Mangan	1.60 %
Molibden	0.08 %
Nikal	0.30 %
Niobij	0.05 %
Olovo	0.40 %
Selen, telur	0.10 %
Silicij	0.50 %
Titan	0.05 %
Volfram, vanadij	0.10 %
Cirkonij	0.05 %
Ostali (osim ugljika, fosfora, sumpora, dušika i kisika)	0.05 %

UTJECAJ POJEDINIH LEGIRNIH ELEMENATA JE SLJEDEĆI:

MANGAN (Mn)

Mangan kao legirni element kod konstrukcijskih čelika povećava granicu razvlačenja i to 100 N/mm^2 za svakih 1 % dodanog mangana, a također djeluje povoljno i na žilavost materijala. Mangan kod čelika istovremeno znatno povećava i prokaljivost. Krhkost nakon popuštanja i sklonost pregrijavanju je također osobina čelika legiranih sa manganom. Mangan proširuje područje austenita pa su tako čelici sa masenim udjelom mangana iznad 12 % austenitne mikrostrukture [2].

SILICIJ (Si)

Silicij kao legirni element kod čelika povoljno djeluje na povisivanje čvrstoće i otpornosti na trošenje, no najviše djeluje na povećanju granice elastičnosti. Također povećava i dinamičku izdržljivost. Zbog navedenih razloga, silicij kao legirni element

ponajviše se koristi kod čelika za opruge. Silicij kao legirni element također blago povećava i prokaljivost čelika [2].

KROM (Cr)

Krom kao legirni element kod čelika stvara karbide vrlo visoke tvrdoće, s tim karbima čelici postaju otporni na pritisak i abrazijsko trošenje. Krom također znatno povišuje i prokaljivost materijala. Čelici koji u svome sastavu sadrže više od 12 % kroma, postaju potpuno otporni na koroziju [2].

NIKAL (Ni)

Nikal kao legirni element ne stvara karbide, nego se zapravo otopi u kristalnoj rešetki željeza. Nikal prvenstveno povećava žilavost materijala na niskim temperaturama, smanjuje se toplinska vodljivost i povoljno djeluje na toplinsku rastezljivost čelika.

Nikal se najviše koristi kod izrade specijalnih čelika jer s njime možemo postići svojstva kao što su: postojanost na koroziju, postojanost na kemijske elemente, otpornost materijala za rad na niskim i visokim temperaturama, nemagnetičnost, vatrootpornost materijala [2]...

VOLFRAM (W)

Volfram kao legirni element stvara mnogo karbida, ti karbidi su vrlo tvrdi i postojani na visokim temperaturama. Volfram kod čelika povišuje granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću, a djeluje u manjoj mjeri povoljno i na žilavost materijala. Čelici legirani volframom imaju bolju čvrstoću i otpornost na trošenje u toplom stanju, volfram također i spriječava rast zrna na povišenim temperaturama [2].

MOLIBDEN (Mo)

Molibden kao legirni element povoljno djeluje na povećanje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, a povišuje i granicu puzanja materijala. Pomoću molibdena kod materijala se formira sitnozrnata mikrostruktura, a povećava se i prokaljivost. Zbog stvaranja jakih karbida, molibden poboljšava rezne karakteristike brzoreznih čelika [2].

VANADIJ (V)

Vanadij kao legirni element također stvara jake karbide i na taj način povećava tvrdoću čelika i povišuje otpornost na trošenje pri normalnim i povišenim temperaturama. Vanadij pri povišenim temperaturama usporava rast zrna, a zbog povoljnog povećanja granice razvlačenja vanadij je prisutan kod čelika za opruge [2].

KOBALT (Co)

Kobalt kao legirni element se rastvara u kristalnoj rešetki željeza i time se proširuje austenitno područje čelika. Kobalt usporava rast zrna kod povišenih temperatura i omogućuje postojanost mikrostrukture materijala, povoljno djeluje na povišavanju čvrstoće kod povišenih temperatura. Zbog navedenih svojstva kobaltom se legiraju čelici za topli rad i naročito brzorezni čelici [2].

TITANIJ (Ti)

Titanij kao materijal je vrlo lagan, snažan i otporan materijal. Najjači je karbidotvorac, a njegovi karbidi se teško raspadaju pri povišenim temperaturama. Usitnjuje zrno i smanjuje opasnost od pregrijavanja. Titanove legure imaju čvrstoću do 1200 N/mm^2 , otporne su na koroziju, no glavni nedostatak je vrlo visoka cijena titana. Titan također djeluje na sužavanje austenitnog područja [2].

ALUMINIJ (Al)

Aluminij kao legirni element se uglavnom primjenjuje kao element za dezoksidaciju. Aluminij na sebe veže dušik i tom radnjom smanjuje pojavu starenja materijala. Aluminij također jako sužava austenitno područje. Aluminij zapravo ne pridonosi poboljšavanju mehaničkih svojstva čelika [2].

3.3 Konstrukcijski čelici

Čelici iz ove skupine primjenjuju za konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja kojim obavljamo neku funkciju- prenose gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremaju i transportiraju tekućine ili plinove, zatvaraju, spajaju elemente konstrukcije itd. To su osovine, vratila zupčanici, nosači opruge, vijci, zatici, poklopci, kućišta, ventili... [2].

Na temelju mnogostrukih zahtjeva koji se postavljaju na ove dijelove, od konstrukcijskih čelika traže se svojstva navedena u tablici 3.5.

Pojedine skupine konstrukcijskih čelika upravo posjeduju neka od navedenih istaknutih svojstva (tablica 3.5) ili njihovu kombinaciju. Dublje poznavanje svojstva karakterističnih skupina čelika preduvjet je za njihovu pravilnu primjenu [2].

Tablica 3.5 Svojstva konstrukcijskih čelika [2]

MEHANIČKA SVOJSTVA <ul style="list-style-type: none">• Visoka granica razvlačenja s dovoljnom plastičnom deformabilnošću• Dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama• Dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama• Otpornost na umor u uvjetima promjenjivog opterećenja-dovoljna dinamička izdržljivost
OTPORNOST NA TROŠENJE <ul style="list-style-type: none">• Što manji gubitak mase,odnosno promjena stanja površine zbog međusobnog djelovanja dijelova u dodiru
TEHNOLOŠKA SVOJSTVA <ul style="list-style-type: none">• Rezljivost-Obrada odvajanjem čestica• Zavarljivost• Hladna oblikovljivost (Postupci savijanja, štancanja, dubokog vučenja...)
OTPORNOST NA KOROZIJU <ul style="list-style-type: none">• Korozivna postojanost u atmosferi ili agresivnim tekućinama• Otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama uz prisutnost različitih plinova

3.3.1 Podjela konstrukcijskih čelika

Konstrukcijski čelici mogu se podijeliti prema svojstvima na sljedeće skupine [2]:

- Opći konstrukcijski čelici
- Čelici povišene čvrstoće
- Ugljični čelici za tanke limove
- Niskougljični čelici za trake
- Čelici za žicu
- Čelici za vijke, matice i zakovice
- Čelici za cementiranje
- Čelici za poboljšanje
- Čelici za opruge
- Čelici poboljšane rezljivosti
- Korozijski postojani čelici
- Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama
- Čelici za rad pri niskim temperaturama
- Visokočvrsti čelici.

Opći konstrukcijski čelici su najzastupljeniji u proizvodnji od svih čelika, čak 65 do 80 %. Primjenjuju se za izradu nosećih konstrukcija, najčešće za zavarene konstrukcije velikih masa kao npr. dizalice, potrebe za industriju nafte i plina, mostove, dizalice, nosače, dijelovi brodskih konstrukcija i vozila, ali i neke tipične strojne elemente. Kemijski sastav općih konstrukcijskih čelika nije zajamčen, ali zato su njegova mehanička svojstva zajamčena. Ovi čelici zbog nepropisanog kemijskog sastava i većeg masenog udjela nečistoća nego što je u slučaju kod drugih čelika, nisu predviđeni za toplinske obrade [2].

Čelici povišene čvrstoće razvijeni su s ciljem postizanja što veće granice razvlačenja i što veće vlačne čvrstoće, a samim time dobivamo mogućnost većeg dopuštenog naprezanja u radu. Zbog više čvrstoće čelika primjena ovih čelika smanjuje presjek nosive konstrukcije za jednaka opterećenja, tj. smanjuju se volumen i masa konstrukcije, što nam omogućuje u konačnici ostvarivanje željene konstrukcije sa manjim utroškom materijala i samim time dobivamo smanjenje troškova materijala. Primjenom ovih čelika kod vozila ili strojeva zbog manje mase imamo i manji utrošak pogonske energije [2].

Ugljični čelici za izradu tankih limova ispod 3 mm debljine mogu se podijeliti u sljedeće dvije skupine [2]:

1. Niskougljični čelici za izradu limova namijenjenih oblikovanju deformiranjem
2. Ugljični čelici namijenjeni za limove sa zajamčenim mehaničkim svojstvima.

Niskougljični čelici za izradu limova namijenjenih oblikovanju deformiranjem sadrže oko 0,1 % C. Kod njih je najvažnije svojstvo deformabilnost, pa su iz tog razloga prikladni za postupke kao što su: vučenje, savijanje ili utiskivanje. Kod ovih limova površina nam omogućuje nanošenje zaštitnih prevlaka (emajliranje, lakiranje, prevlačenje polimerima, pocinčavanje, kromiranje) [2].

Niskougljični čelici za trake koriste se za izradu hladnovaljanih traka sa različitim stupnjevima tvrdoće. Čelici za trake sadrže manje od 1 % C, a od takve vrste čelika izrađuju se tanki limovi i žice. U praksi za ove čelike moraju biti spomenuti opisi stupnjeva tvrdoće, a oni su: mekožareno, $\frac{1}{4}$ tvrdo, $\frac{1}{2}$ tvrdo, $\frac{3}{4}$ tvrdo, tvrdo, svjetlotvrdo [2].

Čelici za žicu mogu se podijeliti prema svojstvima i primjeni u sljedeće skupine [2]:

1. Čelici za obične žice
2. Čelici za specijalne žice
3. Čelici za vučene žice.

Čelici za vijke, matice i zakovice spadaju u niskougljične čelike iz kojih se izrađuju vijci, matice i zakovice. Izrada tih dijelova vrši se hladnim ili toplim postupcima deformacije. Vijci i matice koji zahtijevaju veće čvrstoće izrađuju se od čelika za poboljšavanje [2].

Čelici za cementiranje su niskougljični sa manje od 0,25 % C, mogu biti nelegirani ili niskolegirani čelici ali sa zajamčenim sastavom, prema udjelu sumpora i fosfora spadaju u kvalitetne i plemenite čelike [2].

Toplinska obrada cementiranja sastoji se od pougljičavanja površnih slojeva, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Ovi čelici primjenjuju se kod dijelova koji trebaju biti otporni na trošenje i istovremeno podnose dinamičko opterećenje [2].

Čelici za poboljšanje sadrže od 0,2 do 0,6 % ugljika. Prema sadržaju nečistoća mogu se svrstati u kvalitetne i plemenite čelike. Toplinska obrada poboljšavanja sastoji se od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja, čime postizemo visoke granice razvlačenja i visoke vlačne čvrstoće čelika, a istovremeno postizemo visoku žilavost i dinamičku izdržljivost materijala. Čelici za poboljšanje imaju primjenu u uvjetima visokih mehaničkih i dinamičkih opterećenja. Prvenstveno služe za izradu osovina, vratila, zupčanika, poluga [2]...

Čelici za opruge su uglavnom ugljični čelici koji sadrže 0,5 do 1 % ugljika. Visoku granicu razvlačenja dobivamo povišenim udjelom mase ugljika i legiranjem silicijem, manganom, kromom i vanadijem. Ovi čelici imaju osnovni zadatak da prilikom djelovanja nekog opterećenja ostvare željenu elastičnu deformaciju [2].

Mehaničke sposobnosti čelika za opruge su visoka granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, visoka dinamička izdržljivost i dovoljna žilavost [2].

Čelici poboljšane rezljivosti prvenstveno se koriste za izradu malih dijelova. Zbog izrade na visokoproduktivnim automatskim strojevima ovi čelici nazivaju se i "Čelici za automate". U usporedbi s drugim vrstama čelika, ovi čelici imaju znatno bolju obradljivost odvajanjem čestica, zbog rastezljivosti postižu se veće brzine rezanja i sporije trošenje alata, uz ostvarivanje površine visoke kvalitete. Čelici iz ove skupine primjenjuju se za proizvodnju velikih serija ili kada je slučaj izrade malih količina financijski isplativiji nego u slučaju sa drugim čelicima [2].

Korozijski postojani čelici otporni su na djelovanje korozijskog medija.

Korozijski postojani ili nehrđajući čelici dobivaju tu sposobnost legiranjem sa najmanje 12 % kroma. Na potpunu korozijsku postojanost utječe maseni udio ugljika, čelici sa više ugljika imaju veću opasnost od korozije. Današnji korozijski postojani čelici sadrže i do 30 % kroma [2].

Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama u usporedbi sa aluminijem, drvom ili polimernim materijalima imaju vrlo visoko talište, te zbog mogućnosti zadržavanja mehaničkih svojstva pri radu na visokim ili povišenim temperaturama, ti čelici imaju znatnu prednost u primjena nad tim materijalima. Čelični i željezni materijali nemaju važnijih promjena mehaničkih svojstva sve do 180 °C, pa se te radne temperature smatraju

niskim. Na temperaturama od 180 do 450 °C se smatraju povišenim, dok na temperaturama iznad 450 °C dolazi do puzanja čelika pa se one smatraju visokim [2].

Čelici za rad pri niskim temperaturama u usporedbi s drugim čelicima kod rada na sniženim temperaturama imaju dobre vrijednosti istezljivosti, kontrakcije presjeka, žilavosti, toplinske rastezljivosti i vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta, dok se povećavaju vrijednosti tvrdoće, vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i osjetljivosti na zarezno djelovanje. Prvenstvena potreba kod čelika za rad na niskim temperaturama je visoka žilavost materijala, odnosno otpornost na krhki lom [2].

Kod ovih čelika za rad na niskim temperaturama kriteriji za izbor su zapravo jedino vrijednost žilavosti kod radnih temperatura [2].

- Za temperature do -50 °C primjenjuju se niskolegirani sitnozrnati čelici.
- Za temperature od -85 °C do -200 °C koriste se čelici za poboljšanje legirani s niklom u granicama 1,5 do 9 % Ni.
- Za temperature niže od -200 °C primjenjuju se Cr-Ni i Cr-Ni-N, Cr-Ni-Mo-N i Cr-Mn-Ni-N austenitni čelici.

Visokočvrsti čelici mogu imati vrijednosti granice razvlačenja veće od 1000 N/mm² zahvaljujući raznim načinima očvršćivanja kao što su: usitnjavanje zrna, martenzitna transformacija, dozrijevanje ili starenje [2].

Razvojem visokočvrstih i ultračvrstih čelika nastoji se poboljšati mnogobrojna svojstva kao što su [2]:

- Visoka žilavost
- Otpor na umor i zareznu osjetljivost
- Otpornost na koroziju
- Čvrstoća kod rada na visokim temperaturama
- Laka obrada odvajanjem čestica
- Dobra zavarljivost.

3.4 Visokočvrsti i ultračvrsti čelici

Zbog zahtjeva na što većoj čvrstoći čelika, niskim udjelima nečistoća i ostalih neželjenih primjesa te homogenoj sitnozrnatoj mikrostrukturi, kod proizvodnje čelika koriste se specijalne metode pretaljivanja, pročišćavanja, toplinske i termomehaničke obrade materijala [2].

Svi ti navedeni postupci i zahtjevi dodatno poskupljuju proizvodnju visokočvrstih i ultračvrstih čelika, zbog toga se primjenjuju isključivo za visokopterećene konstrukcijske dijelove kao što su: dijelovi vozila i zrakoplova, raketna i svemirska tehnologija, oružje... [2].

Osnovna razlika između visokočvrstih i ultračvrstih čelika je njihova granica razvlačenja [7]:

- Visokočvrsti čelici imaju granicu razvlačenja u granicama 750 do 1500 N/mm²
- Ultračvrsti čelici imaju granicu razvlačenja veću od 1500 N/mm².

Ultračvrsti čelici se mogu podijeliti u šest podskupina [2]:

1. Niskolegirani niskopopušteni čelici
2. Visokolegirani Cr-Mo-V viskopopušteni čelici
3. Termomehanički obrađeni čelici
4. Korozijski postojani precipitacijski očvrtnuti čelici
5. Čelici maraging
6. Hladnom deformacijom očvrtnuti nelegirani i niskolegirani čelici.

NISKOLEGIRANI NISKOPOPUŠTENI ČELICI.

Niskolegirani niskopopušteni čelici u svome sastavu sadrže 0,3 do 0,45 % ugljika, legirani su sa silicijem ili niklom i mogućim kombinacijama krom-molibden-vanadij. Legiranjem silicijem pomiče se područje niskotemperaturne krhkosti prema temperaturama do 400 °C i povećava se granica razvlačenja. Važno je da ovi čelici imaju nizak udio nečistoća radi postizanja visoke lomne žilavosti i visoke dinamičke izdržljivosti. Granica razvlačenja kod čelika iz ove skupine iznosi 1500 do 1800 N/mm² [7].

VISOKOLEGIRANI CR-MO-V VISKOPOPUŠTENI ČELICI.

Čelici iz ove skupine legirani su sa oko 0,4 % ugljika, oko 1 % silicija i oko 5 % kroma, te sa 1,3 do 2 % molibdena i 0,4 do 1,0 % vanadija. Podvrgnuti su toplinskim

obradama kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Drugi naziv za čelike iz ove skupine je “alatni čelici za topli rad“. Ovi čelici postižu vrijednosti vlačne čvrstoće do 2000 N/mm² [7].

TERMOMEHANIČKI OBRAĐENI ČELICI.

Termomehanički obrađene čelike karakterizira istovremena visoka granica razvlačenja i čvrstoća uz pogodnu duktilnost. Takva svojstva kod ovih čelika postižu se kombiniranjem postupka oblikovanje deformacijom te toplinskim obradama kaljenja i izotermičkog poboljšavanja. Čelici iz ove skupine postižu vrijednosti granice razvlačenja do 2600 N/mm² i vlačnu čvrstoću do 3000 N/mm² [7].

KOROZIJSKI POSTOJANI PRECIPITACIJSKI OČVRSNUTI ČELICI.

Razvojem ovih čelika željela se ostvariti visoka granica razvlačenja uz istovremeno zadržavanje potpune korozivne postojanosti [2].

S obzirom na mikrostrukture prije precipitacije razlikuju se [2]:

- Martenzitni PH-čelici postižu vrijednost granice razvlačenja do 1350 N/mm²
- Poluaustenitni PH-čelici postižu vrijednost granice razvlačenja do 1800 N/mm²
- Austenitni PH-čelici postižu vrijednost granice razvlačenja do 900 N/mm².

HLADNOM DEFORMACIJOM OČVRSNUTI NELEGIRANI I NISKOLEGIRANI ČELICI.

Čelici iz ove skupine podvrgnuti su hladnoj deformaciji koja zbog povećanja gustoće dislokacija znatno povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali istovremeno se smanjuje duktilnost. Postupak hladne deformacije primjenjuje se za očvršćivanje tankih žica od kojih se izrađuje užad za transport i žičare, žice za opruge, betonski čelici i slično. Čelici iz ove skupine imaju ultravisoku čvrstoću u granicama od 1600 do 3000 N/mm² [7].

MARAGING ČELICI.

Maraging čelici u svome sastavu sadrže do 0,03 % ugljika te spadaju u skupinu niskougljičnih čelika. Visokolegirani su sa niklom, kobaltom, molibdenom, titanijem i aluminijem. Ovi čelici nalaze konstrukcijsku i alatnu primjenu. Čelici iz ove skupine postižu vrijednost granice razvlačenja do 2200 N/mm², vrijednost vlačne čvrstoće u granicama od 1900 do 2900 N/mm² i imaju vrlo dobre vrijednosti žilavosti [7].

4. MARAGING ČELICI

Maraging čelici su razvijeni početkom 60-tih godina prošlog stoljeća kao niskouglični visokolegirani visokočvrsti konstrukcijski čelici za uporabu u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Kasnije se primjenjuju i u mnogim tehničkim granama, te se zbog toga teži njihovom daljnjem razvoju [7, 8].

Neka od povoljnih svojstva maraging čelika su [8]:

- Vrlo visoke vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja
- Povoljna plastična svojstva
- Zadržavanje mehaničkih svojstva pri niskim i povišenim temperaturama
- Dovoljne vrijednosti žilavosti
- Stabilnost pri toplinskoj obradi
- Dobra zavarljivost.



Slika 4.1 Maraging čelici [9]

Čelici iz ove skupine zbog svojih posebnih svojstva koriste i kao čelici za izradu alata. Maraging čelici posjeduju relativno nisku tvrdoću zbog koje su nepovoljni za izradu alata za rezanje, već se koriste za izradu kalupa [7, 10].

Naziv “maraging“ su dobili prema postupku toplinske obrade kojem se podvrgavaju “martenzit aging“ što u prijevodu znači martenzitno starenje [6].

4.1 Struktura maraging čelika

Maraging čelici namijenjeni za alatne primjene sadrže manje od 0,03 % ugljika, a kad se rade o čelicima za konstrukcijske primjene sadržaj ugljika je manji od 0,02 % [8].

Osnovni sustavi maraging čelika su [10] :

- Fe – Ni – Co
- Fe – Ni – Cr
- Fe – Co – Cr
- Cr – Ni – Co – Mo.

Visokolegirani su sa masenim udjelima legirajućih elemenata prikazanim u tablici 4.1 [10].

Tablica 4.1 Legirni elementi maraging čelika [10]

Legirni elementi	Granični udjeli mase
Nikal	18 %
Kobalt	7 do 14 %
Molibden	3 do 6 %
Titanij	0,15 do 2 %
Aluminij	0,05 do 0,2 %
Silicij	≤0,01 %
Fosfor	≤0,01 %
Sumpor + Bor + Kalcij + Cirkonij	≤0,01 %
Krom (eventualno)	12 %

Mehanička svojstva maraging čelika proizlaze direktno iz njegovog kemijskog sastava [10]:

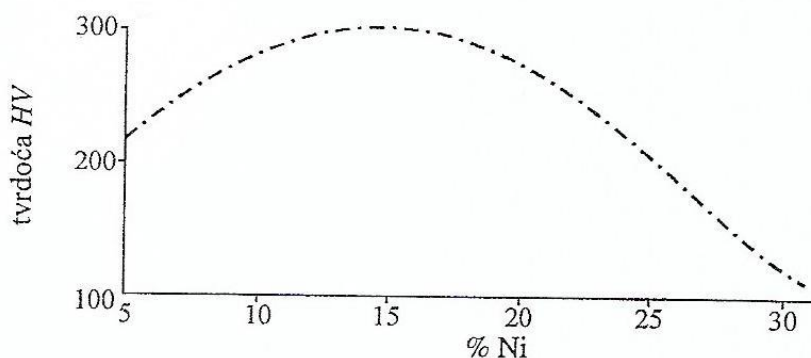
- $R_m = 775 + (\% \text{ Co}) + 158,5 * (\% \text{ Mo}) + 322,5 * (\% \text{ Ti})$
- $R_{p0,2} = 262 + 61 * (\% \text{ Co}) + 155 * (\% \text{ Mo}) + 600 * (\% \text{ Ti})$
- $A_5 = 36 - 2,4 * (\% \text{ Co}) - 0,6 * (\% \text{ Mo}) - 5,2 * (\% \text{ Ti})$.

S obzirom da je udio ugljika u maraging čelicima iznimno niski, martenzit koji se ostvari nije ugljični već Ni-martenzit. U usporedbi sa ugljičnim martenzitom prezasićenim ugljikovim atomima, Ni-martenzit nije tako tvrd niti krhak [10].

Ohlađivanjem maraging čelika iz austenitnog područja stvara se bezugljični Ni-martenzit prezasićen kobaltom, molibdenom, titanijem i aluminijem. Taj martenzit je

dobro obradiv postupcima hladnog deformiranja i odvajanja čestica, dobro je zavarljiv [10].

Kod čelika sa visokim udjelom ugljika, čvrstoća se postiže mikrostrukturom kaljenja, dok kod maraging čelika visoka čvrstoća postiže se legiranjem sa oko 18 % nikla, time dobivamo martenzitnu strukturu već kod sporog hlađenja sa temperature austenitizacije [10].



Slika 4.2 Dijagram tvrdće maraging čelika [10]

Iz dijagrama postizivih tvrdća u kaljenom stanju (slika 4.2) vidljivo je da se sa udjelom nikla od 18 % postiže najviša tvrdća koja iznosi oko 300 HV. To je ujedno i jedan od glavnih razloga zašto su maraging čelici legirani sa 18 % nikla.

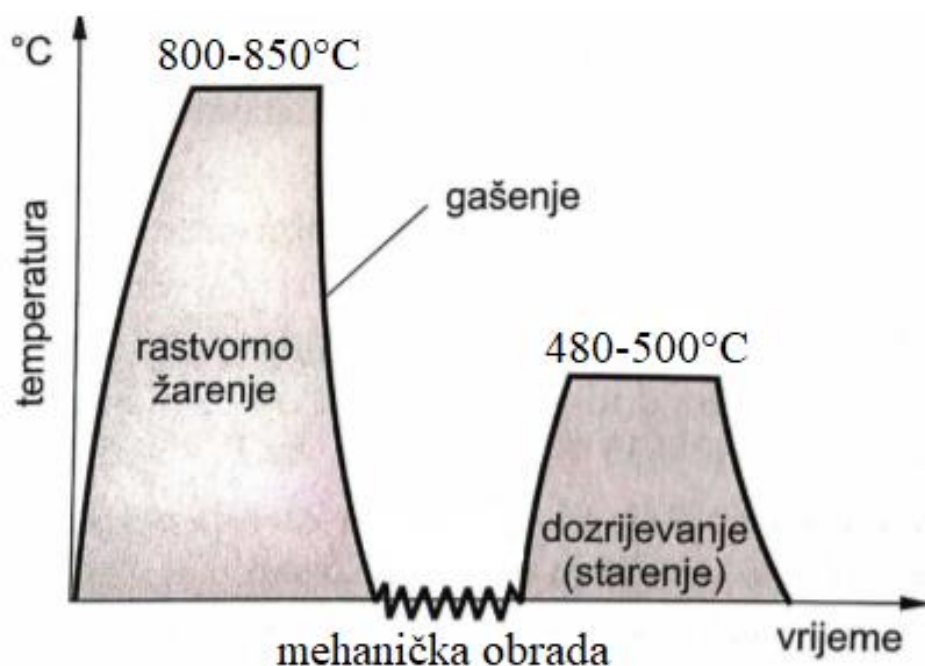
4.2 Toplinska obrada maraging čelika

Maraging čelici podvrgavaju se toplinskoj obradi koja se naziva martenzitno starenje (eng. *martenzit aging*), ta obrada sastoji se od rastvornog žarenja pri temperaturi od oko 820 °C i dozrijevanja pri temperaturi od oko 480 °C (slika 4.3) [7].

Drugi naziv za toplinsku obradu maraging čelika je i austenitizacija jer se zapravo radi o pretvorbi austenita u martenzit [10].

Čelik se prvo žari na temperaturi oko 800 do 850 °C, što traje oko 15 do 30 minuta za materijale tankih presjeka, a za veće presjeke žari se 1 sat po 25 mm debljine. Žarimo s ciljem postizanja potpune austenitne strukture. Nakon žarenja čelik se intenzivno gasi u

vodi, ulju ili na zraku zbog postizanja prezasićenog Ni-martenzita. Taj dio postupka obavlja se uglavnom u čeličanama [10].



Slika 4.3 Dijagram toplinske obrade maraging čelika [7]

Nakon gašenja materijal se oblikuje u željeni oblik, jer u gašenom stanju maraging čelici se dobro obrađuju postupcima odvajanja čestica i plastično je deformabilan [7].

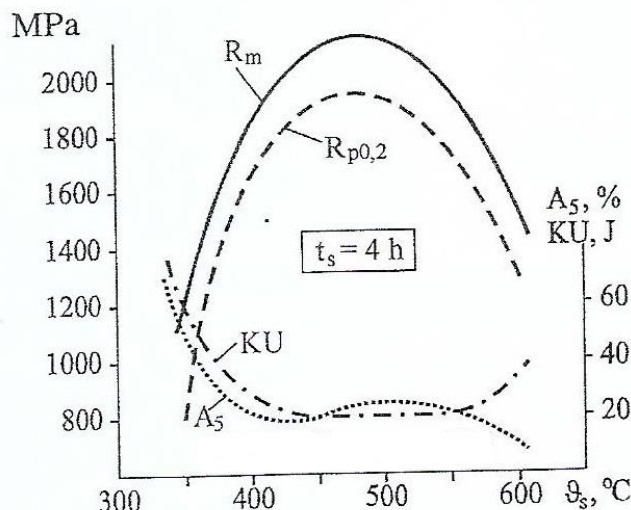
Nakon mehaničke obrade materijal mora starjeti oko 3 sata na temperaturi oko 480 do 500 °C što rezultira finom disperzijom intermetalnih spojeva. Taj dio postupka obavlja se u lokalnoj radioni [10].

U tablici 4.2 navedeno je nekoliko primjera maraging čelika i vrijednosti mehaničkih vezanih uz parametre obrade.

Tablica 4.2 Parametri obrade i svojstva maraging čelika [7]

Oznaka čelika	Toplinska obrada		Mehanička svojstva		
	Žarenje °C/gašenje	Starenje °C/t	R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	A ₅ , %
X2 NiCoMo 18 8 3	820-860/zrak	470-490/3-5h	1150-1300	1050-1200	8-15
X2 NiCoMo 18 8 5	820-860/zrak	480/3h	1960	1910	7
X2 NiCoMo 18 12 4	820/zrak	500/6h	2350	2260	6

Slika 4.4 prikazuje ovisnost mehaničkih svojstva maraging čelika X2 NiCoMo 18 8 5 o parametrima toplinske obrade [10].



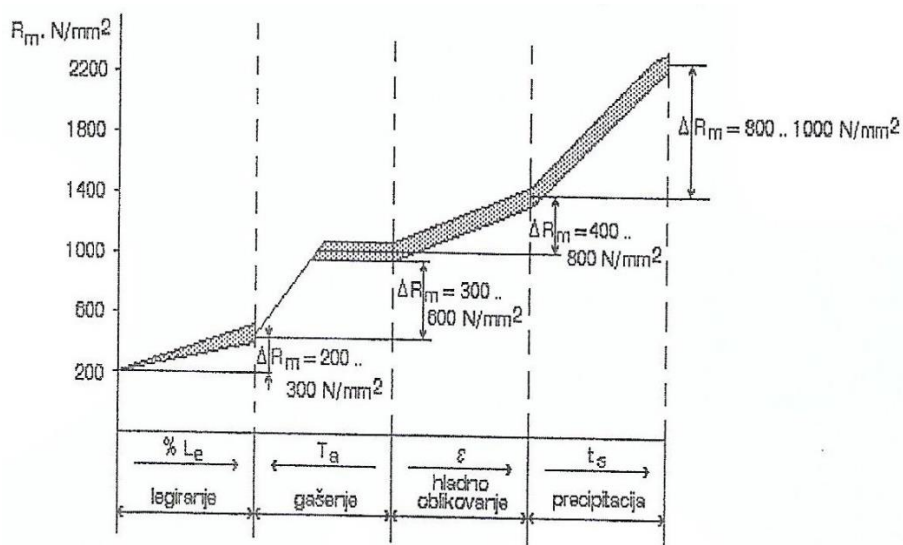
Slika 4.4 Ovisnost mehaničkih svojstva čelika X2 NiCoMo 18 8 5 o temperaturi starenja [10]

Nakon gašenja mehanička svojstva maraging čelika nisu posebno izražena. Tek kod završnog gašenja taj čelik ima željena svojstva. Tako nakon gašenja vlačna čvrstoća maraging čelika iznosi 900 do 1000 N/mm². [8, 10].

Mehanizam očvrnuća maraging čelika [10]:

- Legiranjem postizemo 200 do 300 N/mm² vlačne čvrstoće
- Kod gašenja povisujemo vrijednost vlačne čvrstoće za 300 do 600 N/mm²
- Hladnim oblikovanjem martenzit može očvrnuti za 400 do 800 N/mm²
- Starenjem vlačna čvrstoća raste za 800 do 1000 N/mm².

Ukupno očvrnuće maraging čelika shematski je prikazano na slika 4.5, shematski prikaz ima smisla samo ako su provedena sva četiri faktora nabrojena iznad [10].



Slika 4.5 Shematski prikaz očvrnuća maraging čelika [8]

4.3 Obrada maraging čelika

Obrada maraging čelika vrši se odmah nakon gašenja, jer u tom stanju materijal je pogodan za postupke:

- Zavarivanje
- Obrada odvajanja čestica
- Hladno oblikovanje
- Postupci obrade površine maraging čelika.

ZAVARIVANJE

Zavarljivost maraging čelika je vrlo povoljna s obzirom na niske udjele ugljika, fosfora i sumpora. Zavarivanje se uglavnom obavlja nakon gašenja čelika i to bez grijanja. Prilikom zavarivanja potrebno je unijeti što je manje moguće topline, jer želimo spriječiti sporo ohlađivanje vara i zone zavara [8].

Za zavarivanje maraging čelika koriste se REL metodom (s obloženom elektrodom) i metode MIG i TIG zavarivanja [8].

U slučajevima strogih kriterija, zavarivanje se obavlja snopom elektrona. Nakon zavarivanja materijal je potrebno zagrijati na 950 °C, čime postizemo eliminiranje ljevačke strukture u zavaru. Nakon grijanja, materijal se hladi na zraku do sobne temperature te nakon toga proizvod treba ponovo stariti na 500 °C u trajanju od 6 sati. Nakon toga smo postigli jednoličnu tvrdoću osnovnog materijala, zavara i zone zavara [10].

Kod elektrolučnog zavarivanja koriste se postupci zavarivanja u zaštitnoj atmosferi argona. Problem elektrolučnog zavarivanja je viši udio ugljika na mjestu zavara te time i nejednaka tvrdoća osnovnog materijala i mjesta zavara. Tvrdo lemljenje se također može koristiti za njihovo spajanje [10].

Kod maraging čelika ustanovljena je vrlo dobra zavarljivost, prilikom usporedbe sa drugim vrstama ultračvrstih čelika, prednost je na strani maraging čelika, jer prilikom hlađenja s temperature zavarivanja oni ostaju meki tako da nema opasnosti od pukotina [6].

Kod maraging čelika za alatne primjene zavarivanje postaje važno tek u slučajevima reparaturnog zavarivanja [10].

Postoji mogućnost zavarivanja u već starenom stanju materijala, no u svakom slučaju predlaže se u austenitnom neostarenom stanju. Kao što je već spomenuto zavarivanjem povećavamo tvrdoću na zoni zavara pa bi i ta sama zona trebala stariti te je jednostavnije stariti cijeli materijal [10].

OBRADA ODVAJANJEM ČESTICA

Obrada odvajanjem čestica odvija se u gašenom stanju, jer je vlačna čvrstoća maraging čelika u tom stanju oko 1000 N/mm^2 , pa se mogu obrađivati alatima od brzoreznih čelika. Obraduju se režimima kao i čelici srednje čvrstoće (1250 do 1350 N/mm^2) prikazanih u tablici 4.3 [8, 10].

Prilikom obrade odvajanjem čestica emulzija za nauljivanje i rashlađivanje mora biti masno mineralno ulje sa dodatkom klora i sumpora [8].

Tablica 4.3 Režimi obrade maraging čelika odvajanjem čestica [8]

Obrada	Stanje čelika	Alat	Brzina m/min	Posmak mm/okretaju				
Tokarenje	Gašeno	Brzorezni čelik	14-20	0,30				
		Tvrđi metal	70-105					
	Stareno	Brzorezni čelik	5-7	0,15				
		Tvrđi metal	15-25					
Blanjanje	Gašeno	Brzorezni čelik	13-15	0,4				
				Φ svrdla, mm				
				3	6	12	20	25
Bušenje	Gašeno	Brzorezni čelik	20-28	0,04	0,04	0,15	0,28	0,30
	Stareno	Brzorezni čelik	6-8	0,025	0,05	0,12	0,12	0,25
Narezivanje	Gašeno	Brzorezni čelik	4-5					
Glodanje	Gašeno	Brzorezni čelik	18-25	0,07-0,10				
		Tvrđi metal	84-100	0,12-0,20				
Piljenje	Gašeno	Brzorezni čelik	5-6	Φ 1000 mm				

Iz tablice 4.3 ako usporedimo obradu tokarenjem istim alatom, jasno je vidljivo da u gašenom stanju imamo duplo brži posmak alata, što znači i duplo kraće vrijeme obrade. To i manje trošenje alata je jedno od glavnih razloga zašto se obrada odvajanjem čestica vrši uglavnom u gašenom stanju.

HLADNO OBLIKOVANJE DEFORMIRANJEM

Maraging čelici najbolje se daju hladno deformirati u austenitnom stanju, moguće je hladno deformirati i nakon pretvorbe u martenzit, ali prvi slučaj je znatno pogodniji zbog toga što je sposobnost promjene oblika kod maraging čelika znatno bolja u austenitnom stanju [8, 10].

Hladno oblikovanje deformiranjem za alatne svrhe koristi se eventualno za hladno utiskivanje matrica za preradu polimera ili kalupa za tlačno lijevanje. Nakon utiskivanja treba se voditi račun o primjenama dimenzija tijekom pretvorbe u martenzit [10].

S obzirom da je očvršnuće maraging čelika maleno, nakon obrade hladnim deformiranjem, predmet se treba podvrgnuti starenju. Ako je stupanj obrade hladnim deformiranjem iznosio više od 50 %, tada se može računati da će nakon starenja vlačna čvrstoća narasti i do 70 % [8, 10].

POSTUPCI OBRADE POVRŠINE

Kod maraging čelika namijenjenih za alatnu primjenu osnovni nedostatak je u niskoj tvrdoći što rezultira i niskoj otpornosti na trošenje. Taj nedostatak uklanja se postupcima obrade površine [10].

S obzirom na fizikalne i kemijske radnje, postupke obrade površine kod maraging čelika mogu se svrstati u dvije skupine, a to su postupci modificiranja i prevlačenja površine. Osnovna razlika između te dvije skupine je ta da kod modificiranja mijenjamo površinu osnovnog materijala, a kod prevlačenja stvaramo novi sloj na osnovnome materijalu [10].

Tablica 4.4 Podjela postupaka modificiranja površine [10]

<p>Mehaničko modificiranje</p> <p>Mehaničko unošenje tlačnih napetosti u površinu materijala s ciljem promjena kristalnih rešetki, što donosi povećanju otpornosti površine na trošenje.</p>
<p>Toplinsko modificiranje</p> <p>Prilikom unošenja topline u površinski sloj materijala, omogućava se površinsko prokaljivanje. U praksi primjenjuju se sljedeći postupci zagrijavanja:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plameno zagrijavanje • Indukcijsko zagrijavanje • Primjenom elektronskog snopa • Primjenom lasera.
<p>Toplinsko-kemijsko modificiranje</p> <p>To postupci kod kojih se nemetali difuzijom unose u površinu materijala i samim time se mijenja kemijski sastav i mikrostruktura površine. To su postupci:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pougličavanje • Nitriranja • Karbonitriranja • Boriranja • Postupci površinskog legiranja primjenom laserom.

Tablica 4.5 Podjela postupaka prevlačenja površine [10]

<p>Toplinska prevlačenja</p> <p>Nanošenje metalnih slojeva na površini materijala pomoću navarivanja ili uranjanja.</p>
<p>Mehanička prevlačenja</p> <p>U ovom postupku spajaju se metali s vrlo različitim svojstvima primjenom postupaka toplog valjanja i u novije vrijeme pomoću eksplozivnog spajanja.</p>
<p>Toplinsko-mehaničko spajanje</p> <p>Toplinskom energijom rastali se materijal, a rastaljene čestice se pomoću mehaničkog udara usmjeravaju na površinu obrađivanog materijala.</p>
<p>Kemijsko prevlačenja</p> <p>U ovu podskupinu spadaju postupci:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fosfatiranje • Bezstrujno niklanje • Kromatiranje • Sol-gel postupci.
<p>Elektrokemijsko prevlačenje</p> <p>Lokalno nanošenje slojeva kroma postupkom galvanizacije</p>
<p>Prevlačenje u parnoj fazi</p> <ul style="list-style-type: none"> • CVD (Chemical Vapour Deposition) • PVD (Physical Vapour Deposition) • PA CVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) • Duplex postupci.

Osim navedenih postupaka u tablicama 4.4 i 4.5 u praksi se koriste i postupci koji se ne mogu svrstati u skupinu modificiranja ni u skupinu prevlačenja jer ti postupci sadrže elemente procesa koji pripadaju objema skupinama. To su postupci [10]:

- Implementacija iona: Ubrizgavanje iona u parnoj fazi
- Anodnom oksidacijom: Elektrokemijsko oksidiranje površine
- Postupci difuzijskog presvlačenja: Trošenje osnovnog materijala radi stvaranja prevlake.

4.4 Prednosti maraging čelika

Maraging čelici razvijeni su početkom 60-tih godina prvenstveno kao ultračvrsti čelici namijenjeni za avionsku i svemirsku industriju. No kasnije zbog svojih izvrsnih i povoljnih svojstva našli su daleko širu primjenu od zamišljene početne. Glavna svojstva maraging čelika su [10]:

- Vrlo visoka vrijednost vlačne čvrstoće
- Visoka granica razvlačenja
- Povoljna plastična svojstva
- Postojanost pri povišenim temperaturama
- Visoka žilavost na 0 °C
- Jednostavna toplinska obrada
- Male deformacije pri toplinskoj obradi
- Povoljna zavarljivost.

Maraging čelici su mnogo skuplji u usporedbi sa standardnim čelicima ako promatramo cijenu same izrade čelika. Međutim kod mnogih primjena, dijelovi izrađeni od maraging čelika su često jeftiniji od ostalih vrsta i to zbog vrlo niže cijene mehaničke obrade a isto tako i toplinske obrade, tako da je također velika prednost maraging čelika da opravdavaju visoke troškove proizvodnje samog čelika nižim troškovima i jednostavnošću prerade [10].

Proizvodna brzina ohlađivanja čelika s temperature rastvorenog žarenja omogućuje postizanje stanja bez zaostalih naprezanja i deformacija unutar materijala zbog temperaturnih razlika po samom presjeku materijal [8, 10].

Obradljivost samog proizvoda postupkom odvajanja čestica nam omogućuje toplinsku obradu u cjelini bez deformacija, jer kod starenja ne dolazi do promjene martenzita pa samim time nema napetosti i deformacija [10].

Maraging čelici također zadovoljavaju i zahtjeve vezane uz kvalitetu kaljenja kao što su [10]:

- Umjerena količina zaostalog austenita
- Stupanj zasićenja je takav da se kod naknadne toplinske obrade može lako izazvati raspad prezasićene otopine
- Stupanj dispergiranoosti legirajućih elemenata je takav da će buduće stvorene čestice intermetalnih spojeva biti u velikom broju i malih međusobnih razmaka
- Odsutnost faze koje bi smanjivale udarnu radnju loma.

Maraging čelici za alatnu primjenu imaju znatnu prednost u usporedbi sa ostalim alatnim materijalima zbog svog niskog udjela ugljika, te ne postoji prijetnja od razugljičavanja, pa ih se može žariti, meko žariti i stariti bez prisutnosti zaštitnih plinova [10].

Maraging čelici nisu prikladni za izradu alata namijenjenih za obradu odvajanjem čestica zbog svoje niske tvrdoće te samim time i niske otpornosti na trošenje. Za izradu kalupa ta mana se može smanjiti nitriranjem na 500 °C, čime dobivamo površinsku tvrdoću iznosa oko 800 HV [8, 10].

Neka od važnih svojstva maraging čelika, u usporedbi sa drugim vrstama čelika, uz iste iznose vlačne čvrstoće, maraging čelici će posjedovati [8, 10]:

- Bolju plastičnost
- Manju sklonost pukotinama
- Moguća obrada odvajanjem čestica i hladnim deformiranjem između rastvorenog žarenja i starenja, dok se kod drugih vrsta čelika te obrade odvijaju prije kaljenja i popuštanja
- U usporedbi sa legiranim čelicima imat će bolju zavarljivost
- Moguće postizanje jednakih svojstva na mjestu zavara i osnovnog materijala bez ponavljanja cijelog postupka toplinske obrade.

U usporedbi sa čelicima visoke čvrstoće za istu primjenu maraging čelici imaju znatne prednosti nad njima kao što su [10]:

- Vrlo jednostavna toplinska obrada
- Dobra obradljivost odvajanjem čestica
- Zbog niskog udjela ugljika ne postoji opasnost od razugljičavanja
- Promjene dimenzija nakon toplinske obrade su vrlo male
- Dobra zavarljivost materijala
- Velika otpornost na toplinski udar.

5. PRIMJENA MARAGING ČELIKA

5.1 Podjela maraging čelika

Klasifikacija maraging čelika može se izvršiti prema njihovim svojstvima rada. Time ih se može podijeliti u tri osnovne skupine [11]:

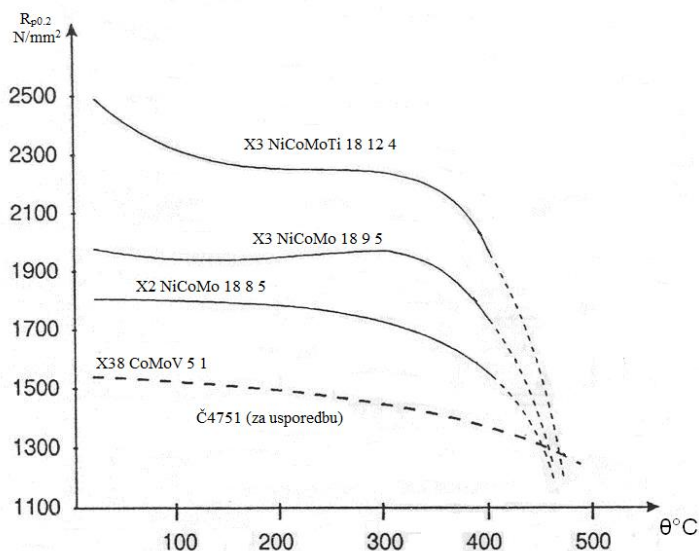
- Maraging čelici za hladni rad (do 425 °C)
- Maraging čelici za topli rad (do 600 °C)
- Maraging čelici postojani na koroziju.

Tablica 5.1 Primjena i svojstva maraging čelika [10, 12]

Primjena	Oznaka čelika	Toplinska obrada		Mehanička svojstva			
		Žarenje °C	Starenje °C/h	R_m N/mm ²	$R_{p0.2}$ N/mm ²	A_5 %	HV
a	X2 NiCoMo 18 8 3	835	490/6	1320	1270	10	430
	X2 NiCoMo 18 8 5	820	480/3	1720	1620	8	500
	X3 NiCoMo 18 8 5	820	480/3	1920	1720	8	500
	X2 NiCoMo 18 9 5	820	480/3	1960	1910	7	570
	X2 NiCoMoTi 18 12 4	820	500/6	2350	2250	6	620
b	X2 NiCoMoTi 12 8 8	900	550/2	1980	1800		560
	X3 NiCoMoTi 18 9 5	820	490/2	1990	1940	3	620
c	X1 CrNiCoMo 9 10 3	835	480/6	1500	1400	12	
	X1 CrNiCoMo 13 8 5	820	480/6	1700	1500	11	
	X2 CrNiCoMo 12 8 5	880	480/6	1870	1650	10	

MARAGING ČELICI ZA RAD DO 425 °C

Ova vrsta čelika koristi se za rad do 425 °C, razlog tome je što se nakon te temperature granica razvlačenja počinje naglo smanjivati što je prikazano na slici 5.1 [11].



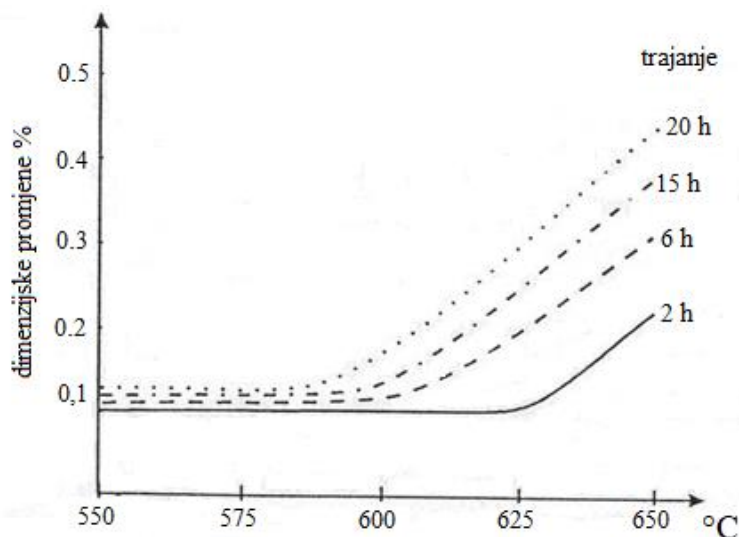
Slika 5.1 Ovisnost granice razvlačenja o temperaturi [11]

MARAGING ČELICI ZA RAD DO 600 °C

Čelici iz ove skupine koriste se za radne temperature do 600 °C, tu mogućnost imaju zbog smanjenog udjela nikla [11].

Niži udio nikla u ovim čelicima ima sljedeća svojstva [11]:

- Veća otpornost toplinskom umoru
- Otpornost na trošenje
- Austenit se pojavljuje tek kod viših temperatura.



Slika 5.2 Dimenzijske promjene pri povišenim temperaturama [11]

Slika 5.2 prikazuje dimenzijske promjene prilikom povišenih temperatura kroz određeni vremenski period za maraging čelik X2 NiCoMoTi 12 8 8.

Iz sigurnosnih razloga trebalo bi se ograničiti temperature rada za alate izrađene od ovog čelika do 600 °C, ako se uzme u obzir dugoročno izlaganje visokim temperaturama [11].

MARAGING ČELICI POSTOJANI NA KOROZIJU

Legiranjem maraging čelika sa kromom daje mu sposobnost korozijske postojanosti, no samim time vidimo u tablici 5.1 da maraging čelici legirani kromom imaju manju vrijednost iznosa vlačne čvrstoće i granice razvlačenja. Maraging čelici iz ove skupine također posjeduju i veliku otpornost na koroziju u morskoj vodi [11].

Maraging čelici postojani na koroziju prvenstveno su razvijeni za konstrukcijsku primjenu, no koriste se također i u alatnoj primjeni kada imamo potrebu za nepromjenjivim dimenzijama alata, te povišenoj otpornosti na agresivne kemijske medije [11].

5.2 Konstruktivna primjena

5.2.1 Primjena kod zrakoplova i helikoptera

Maraging čelici imaju široku primjenu u zrakoplovnoj industriji, koriste se za izradu visokooterećenih dijelova zrakoplova i helikoptera. Od njih su izrađeni [8]:

- Pogonska osovina
- Okvir pilotskog sjedala
- Hidraulični odbojnici
- Opruge
- Oklopi
- Spremnici za tekuće gorivo.

U helikopterima pronalazimo dvije pogonske osovine, obje izrađene od maraging čelika, to su glavna i repna osovina, njihova svrha je prijenos snage s motora na propeler. Slika 5.3 prikazuje glavnu pogonsku osovinu helikoptera.



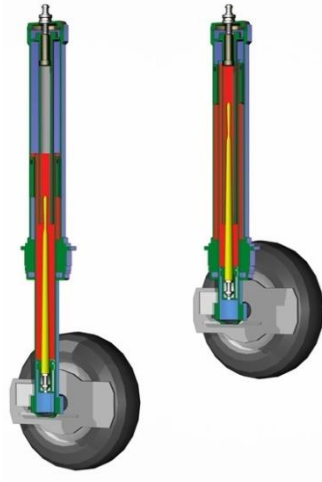
Slika 5.3 Pogonska osovina helikoptera [13]

Na slici 5.4 prikazano je sjedalo avionskog pilota, okvir tog sjedala izrađen je od maraging čelika.



Slika 5.4 Pilotsko sjedalo [14]

U zrakoplovima nailazimo na hidraulične odbojnice koji se koriste u kotačima za apsorpciju udarca prilikom slijetanja, prikazani su na slici 5.5.



Slika 5.5 Hidraulički odbojnici [15]

Maraging čelici postojani na koroziju također imaju vrlo dobru otpornost na agresivne medije, što ih čini povoljnim za izradu spremnika za tekuće gorivo prikazanog na slici 5.6.



Slika 5.6 Avionski spremnik goriva [16]

5.2.2 Primjena u strojarstvu

Maraging čelici u kategoriji općeg strojarstva mogu se pronaći kod sljedećih primjena [8]:

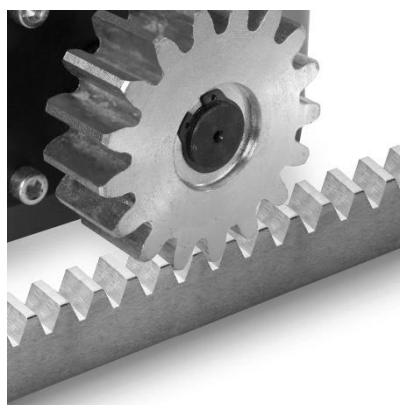
- Mjerne doze (dinamometri)
- Zubne letve i vijčana vretena za pisaaće i računске automats
- Koljenasta vratila trkaćih automobila
- Kardanske zglobove glave
- Zupčanici
- Osovine, klizači, matrice za kovanje...

Dinamometar (slika 5.7) je uređaj koji služi za izravno mjerenje sile, ovisno o izvedbi može se mjeriti vlačna ili tlačna sila. Prvenstveno su se koristili analogni dinamometri, dok se u novije vrijeme koriste i digitalni [17].



Slika 5.7 Dinamometar [17]

Slike 5.8-5.11 prikazuju primjene uporabe maraging čelika u općem strojarstvu.



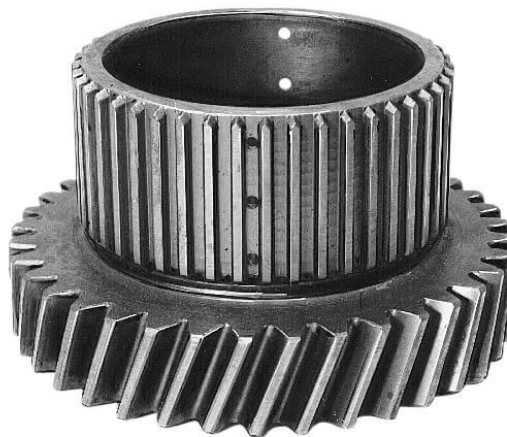
Slika 5.8 Zubna letva i zupčanik [18]



Slika 5.9 Koljenasto vratilo trkačeg automobila [19]



Slika 5.10 Kardanski zglobni prijenos [20]



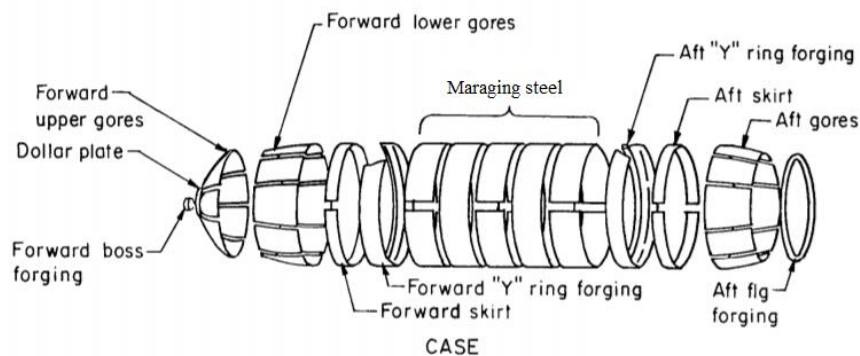
Slika 5.11 Zupčanik trkačeg bolida [21]

5.2.3 Primjena u vojsci

Vojska koristi maraging čelik u dosta širokome spektru. Koristi se za izradu [8, 11, 22]:

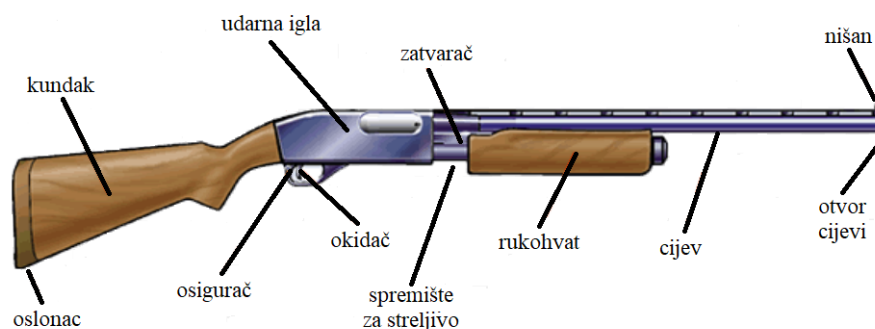
- Kućišta raketnih motora
- Udarne igle, zatvarači i cijevi pušaka
- Opruge tenkova
- Prijenosni vojni mostovi
- Dijelovi projektila
- Dijelovi podmornica
- Kućišta za nuklearne projekte.

Autori [22] prilikom izrade kućišta raketnog motora našli su se u problemu pri izradi prstena promjera 260 inča od jednog komada materijala. Taj problem uspjeli su riješiti izradom istog od maraging čelika, zbog njegove dobre zavarljivosti te vrlo visokih mehaničkih svojstva [22].



. Slika 5.12 Dijelovi kućišta raketnog motora [22]

Kod pušaka, kada ispalimo metak u unutrašnjosti javljaju se velika opterećenja i u vrlo kratkom vremena temperatura raste. Dakle udarna igla, zatvarač i cijev moraju podnositi te promjene temperature i opterećenja. Ti dijelovi (slika 5.13) mogu se proizvesti od maragingnih čelika [22].



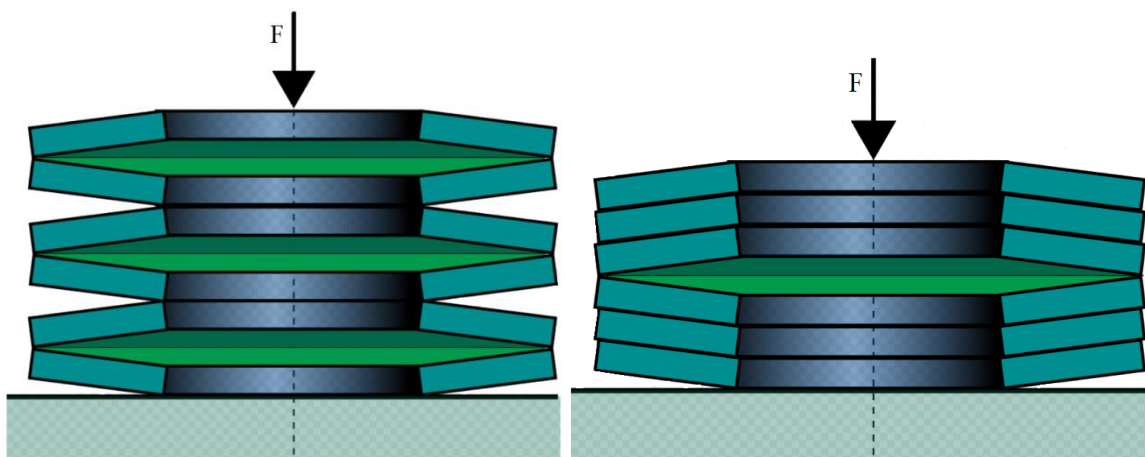
. Slika 5.13 Osnovni dijelovi puške [23]



Slika 5.14 Udarana igla puške [23]

Tanjuraste opruge prikazane izrađene su od maraging čelika, koriste se kod tenkova za apsorpciju udarca koju proizvede cijev topa prilikom ispaljivanja projektila.

Slika 5.15 prikazuju princip rada tanjuraste opruge.



Slika 5.15 Tanjurasta opruga [24]

Prijenosni vojni mostovi (slika 5.16) također sadržavaju neke viskoopterećene konstrukcijske dijelove izrađene od maraging čelika.



Slika 5.16 Prijenosni most [25]

5.3 Alatna primjena

5.3.1 Kalupi

Čelici X2 NiCoMo 18 8 3, X2 NiCoMo 18 8 5, X3 NiCoMo 18 8 5, X2 NiCoMo 18 9 5 i X2 NiCoMoTi 18 12 4 su čelici za uporabu na temperaturama do 425 °C. U slučaju rada pri višim temperaturama došlo bi do ponovnog stvaranja austenita i time bi došlo do snižavanja tvrdoće i granice razvlačenja. Zbog tog razloga uporaba ovih čelika ograničena je na alate za hladan rad i alate za rad na povišenim temperaturama, ali sa niskim toplinskim opterećenjem [10].

Čelici namijenjeni za rad na temperaturama do 425 °C primjenjuju se za [10]:

- Kalupi za preradu polimera
- Kalupi za tlačno lijevanje silumina
- Kalupi za lijevanje legura na bazi cinka.

Čelici X2 NiCoMoTi 12 8 8 i X3 NiCoMoTi 18 9 5 su čelici za rad na temperaturama do 600 °C. Čelici iz ove podskupine koriste se kod izrade alata gdje ima potrebu za otpornošću na toplinski umor. Od čelika iz ove skupine proizvode se kalupi za tlačno lijevanje aluminijske [10].

Čelici X1 CrNiCoMo 9 10 3, X1 CrNiCoMo 13 8 5 i X2 CrNiCoMo 12 8 5 su čelici koji spadaju u podskupinu korozijski postojanih maraging čelika. U alatnoj primjeni, maraging čelici postojani na koroziju su rijetki. Koriste se kod kalupa gdje se zahtjeva nepromjenjivost dimenzija. Primjer tome su kalupi za preradu kemijski agresivnih polimera [10].



Slika 5.17 Kalup za preradu polimera [26]

U tablici 5.2 napravljena je usporedba troškova izrade kokila od čelika X38 CrMoV 5 1 i maraging čelika X2 NiCoMo 18 9 5. Autori [8] navode kako je kalup izrađen od čelika X38 CrMoV 5 1 pokazao prve pukotine nakon 10 000 ciklusa lijevanja, dok je kalup izrađen od maraging čelika X2 NiCoMo 18 9 5 prve pukotine pokazao tek nakon 87 000 ciklusa [8].

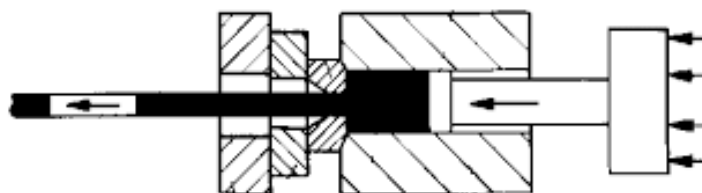
Tablica 5.2 Troškovnik izrade kalupa (DEM) [8]

Trošak	X38 CrMoV 5 1	X2 NiCoMo 18 9 5
Materijal	1 610	7 705
Obrada	4 909	5 060
Ukupno	6 519	12 705
Izrađeno	35 000 komada	100 000 komada
Trošak pojedinačnog kalupa	0,186 DEM / kom	0,127 DEM / kom

5.3.2 Ostala alatna primjena

Osim izrada kalupa, maraging čelici u alatnoj primjeni mogu se pronaći kod izrade [8, 10, 11]:

- Žigova za ekstrudiranje olovnih kabela
- Alati za hladno istiskivanje aluminijskih legura
- Matrica i žigova za hladno kovanje tijela i glave vijka
- Stezni plaševi oko matrica za hladno istiskivanje aluminij- kositar- cink i olovnih legura.



Slika 5.18 Princip postupka hladnog istiskivanja [27]

5.4 Ostala primjena

Maraging čelici osim konstrukcijske i alatne primjene, mogu se naći i kod izrade sportskih rekvizita kao što su palice za golf i olimpijski natjecateljski mačevi.



Slika 5.19 Glava palice za golf [28]



Slika 5.20 Olimpijski mačevi [29]

6. ZAKLJUČAK

U današnjem svijetu tehnološki napredak čovječanstva je vidljiv iz dana u dan. Uvijek u potrazi za savršenstvom dolazimo do jedne grane strojarstva koja se zove materijali. Ta grana je veoma bitna jer bez odgovarajućeg i pravilnog odabira materijala možemo imati nepotrebne troškove ili nesigurnost mehatroničke konstrukcije. Od svih materijala čelici su u svakom pogledu jedan od najvažnijih, njihova primjena je veoma široka i nezamjenjiva. Prilikom usavršavanja čelika 60-tih godina nastali su maraging čelici, prvenstvene namjene za svemirske konstrukcije, no kasnije zbog povoljnih svojstva pronalaze široku tehničku primjenu, prvenstveno kao dijelovi za visokopterećene konstrukcije. U ovom završnom radu opisana su svojstva, struktura, toplinska obrada i nabrojene su prednosti maraging čelika sa detaljnijim fokusom na njihovu primjenu u tehničkom smislu. Vidljiva je raznovrsna primjena ovih čelika u raznovrsnim granama tehničkog područja. Zbog same važnosti napretka i težnje ka savršenstvu bitno je odati važnost postojećim materijalima i posvetiti se njihovom unaprjeđivanju.

7. LITERATURA

- [1] S. Golubić, Tehnički materijali. Predavanja za studij mehatronike. Bjelovar: Veleučilište u Bjelovaru; 2017/2018.
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [3] Development of weapons [Online]. Dostupno na: <https://image.shutterstock.com/z/stock-vector-development-of-weapons-115484086.jpg>
- [4] Periodni sustav elemenata. Dostupno na: <https://shop.skolskaknjiga.hr/periodni-sustav-elemenata.html>
- [5] Kovačiček F., Novosel M., Indof J., Čatić I., Franz M., Jakobović Z., Inženjerski priručnik. 1 izd. Zagreb: Školska knjiga; 1998.
- [6] H. Kožah, Specijalni čelici. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak 2010.
- [7] M. Pongrac, Materijali za tlačne posude. Diplomski rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [8] M. Novosel, D. Krumes, Željezni materijali II. dio: Konstrukcijski čelici. Slavonski Brod: Strojarski fakultet, 1995.
- [9] Maraging Steels [Online]. Dostupno na: <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-alloy-steels-irons/maraging-steels.php>
- [10] I. Kladarić, Doprinos proučavanju kinetike strukturnih pretvorbi čelika maraging. Doktorska disertacija. Slavonski Brod: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Strojarski fakultet; 2002.
- [11] F. Cajner, D. Landek, Seminar: Maraging čelici. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Dostupno na: <https://pdfslide.net/documents/maraging-celici.html>
- [12] A. Strakosova, J. Kubásek, A. Michalcová, F. Průša, D. Vojtěch, D. Dvorský. High Strength X3NiCoMoTi 18-9-5 Maraging Steel Prepared by Selective Laser Melting from Atomized Powder. Prag, Češka Republika: 2019. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/338015926_High_Strength_X3NiCoMoTi_18-9-5_Maraging_Steel_Prepared_by_Selective_Laser_Melting_from_Atomized_Powder
- [13] Flexible Drive Systems [Online]. Dostupno na: <https://www.kaman.com/specialty-bearings-engineered-products/technologies/flexible-drive-systems>

- [14] A300 Original Pilot Seat [Online]. Dostupno na: <http://www.skyart.com/aircraft-seats/a300-original-pilot-seat/>
- [15] How it works: Oleo Strut [Online]. Dostupno na: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2013/august/flight-training-magazine/how-it-works>
- [16] Wikipedia. Aircraft fuel tanks [Online]. 2020. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_fuel_tanks
- [17] Wikipedija. Dinamometar [Online]. 2020. Dostupno na: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dinamometar>
- [18] Toothed Rack and Screw [Online]. Dostupno na: <https://www.amazon.co.uk/Timbertech%C2%AE-STAN01-ZBH-002-Gear-Rack-Screw/dp/B00G29BBT2>
- [19] Crankshaft: design, materials, manufacturing [Online]. Dostupno na: http://www.epi-eng.com/piston_engine_technology/crankshaft_design_issues.htm
- [20] Przeguby Cardana [Online]. Dostupno na: <http://www.maciejgralek.pl/moto/przeguby-cardana/>
- [21] Smiths High Performance: C300 Maraging Steel [Online]. Dostupno na: <https://www.smithshp.com/c300-maraging-steel.htm>
- [22] A. M. Hall, C. J. Slunder, The metallurgy, behavior and application of the 18-percent nickel maraging steels. Washington: National aeronautics and space administration (NASA), 1968. Dostupno na: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA382105.pdf>
- [23] Dijelovi vatrenog oružja [Online]. Dostupno na: http://www.ld-kamenjarka-kukuljanovo.hr/ch2_parts_firearm.html
- [24] Wikipedija. Tanjurasta opruga [Online]. 2019. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/wiki/Tanjurasta_opruga
- [25] Wikipedija. M60 AVLB [Online]. 2019. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/M60_AVLB
- [26] Čelici za obradu polimera [Online]. 2019. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/M60_AVLB
- [27] Tehnologija plastičnog deformiranja [Online]. 2019. Dostupno na: <http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/predmeti/Osnovi%20masinskih%20tehnologija%20/Istiskivanje.pdf>
- [28] Maraging face iron [Online]. Dostupno na: <https://amlinge01.wixsite.com/astonmartin/maraging-face-iron>

[29] Wikipedija. Fencing [Online]. 2019. Dostupno na:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Fencing>

8. OZNAKE I KRATICE

Ag (eng. *Silver*) – Srebro

Al (eng. *Aluminium*) - Aluminij

Au (eng. *Gold*) - Zlato

BCC (eng. *Body Centered Cubic Structure*) – Prostorno centrirana kubna rešetka

C (eng. *Carbon*) - Ugljik

Cd (eng. *Cadamium*) - Kadmij

Co (eng. *Cobalt*) - Kobalt

Cr (eng. *Chromium*) - Krom

Cu (eng. *Copper*) - Bakar

CVD (eng. *Chemical Vapour Deposition*) – Kemijsko taloženje para

FCC (eng. *Face Centered Cubic Structure*) – Plošno centrirana kubna rešetka

Fe (eng. *Iron*) - Željezo

HCP (eng. *Hexagonal Close Packed Structure*) – Heksagonska kompaktna rešetka

Hg (eng. *Mercury*) - Živa

HV (eng. *Vickers Hardness*) – Tvrdća po Vickersu

Mg (eng. *Magnesium*) - Magnezij

MIG (eng. *Metal Inert Gas*) – Metal-inertan plin

Mn (eng. *Manganese*) - Mangan

Mo (eng. *Molybdenum*) - Molibden

Ni (eng. *Nickel*) - Nikal

P (eng. *Phosphorus*) - Fosfor

Pb (eng. *Lead*) - Olovo

Pt (eng. *Platinum*) - Platina

PVD (eng. *Physical Vapour Deposition*) – Fizičko taloženje para

REL – Ručno elektrolučno zavarivanje

S (eng. *Sulfur*) - Sumpor

Si (eng. *Silicon*) - Silicij

Sn (eng. *Tin*) - Kositar

Ti (eng. *Titanium*) - Titaniј

TIG (eng. *Tungsten Inert Gas*) – Zavarivanje volframovom elektrodom u zaštitnom plinu

V (eng. *Vanadium*) – Vanadiј

W (eng. *Tungsten*) – Volfram

Zn (eng. *Zinc*) - Cink

9. SAŽETAK

Naslov: Primjena maraging čelika u mehatronici

U ovom završnom radu prvenstveno su opisani tehnički materijali, nakon njih opisani su čelici, opći pojmovi vezani uz njih te njihova podjela s obzirom na razne kriterije. Čelici su najzastupljeniji od svih materijala u tehničkoj primjeni i samoj mehatroničkoj praksi. Prema primjeni, u skupini konstrukcijskih čelika javlja se podskupina ultračvrstih čelika, u tu podskupinu spadaju maraging čelici. Maraging čelici nazvani prema toplinskoj obradi martenzitno starenje, to su čelici iznimno visokih vrijednosti mehaničkih svojstva. Svoju primjenu pronalaze prvenstveno u konstruktivne svrhe, dok se može pronaći i alatna primjena. Zbog svoje više cijene primjenjuju su kod visokopterećenih strojarskih sklopova.

Ključne riječi: tehnički materijali, metal, čelik, maraging čelik

10. ABSTRACT

Title: Application of Maraging Steels in Mechatronics

In this final work, firstly technical materials are described, after them there are described steels, general terms about them and their classification based on different criteria. Steels are the most used material in technical practice and in mechatronics practice. Based on the use, in the group of construction steels, here are placed maraging steels. Maraging steels got their name by a sort of heat treatment called martensitic aging, those steels have very high values of mechanical properties. Their application primarily is for construction use, but sometimes it can be found for tool purposes. Because of their bigger price they are mostly used for high load mechanical assemblies.

Keywords: technical materials, metal, steel, maraging steel

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>26.10.2020</u>	David Prović	<i>David Prović</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

David Prović

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, 26.10.2020

David Prović

potpis studenta/ice