

# Svojstva i primjena visokočvrstih čelika

---

**Merkač-Hudopisk, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:446577>

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

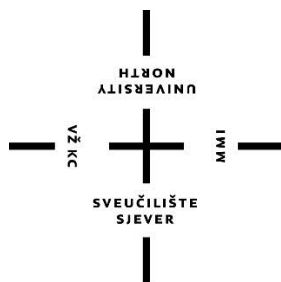
*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-18**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





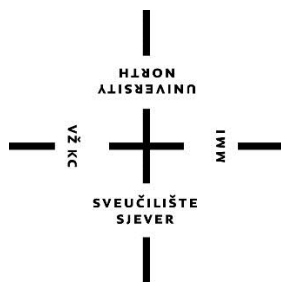
# Sveučilište Sjever

**Završni rad br. 269/PS/2018**

## **Svojstva i primjena visokočvrstih čelika**

**Ivan Merkač-Hudopisk, 0927/336**

Varaždin, rujan 2018. godine



# Sveučilište Sjever

Odjel za Strojtarstvo

Završni rad br. 269/PS/2018

## Svojstva i primjena visokočvrstih čelika

### Student

Ivan Merkač-Hudopisk, 0927/336

### Mentor

Marko Horvat, dipl.ing.

Varaždin, rujna 2018. Godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
PRISTUPNIK	Ivan Merkač-Hudopisk	MATIČNI BROJ	0927/336
DATUM	04.09.2018.	KOLEGIJ	Materijali II
NASLOV RADA	Svojstva i primjena visokočvrstih čelika		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Properties and application of high strength steels		
MENTOR	Marko Horvat, dipl. ing.	ZVANJE	predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA	1.	dr. sc. Zlatko Botak, viši predavač
	2.	Marko Horvat, dipl. ing., predavač
	3.	Veljko Kondić, mag. ing. mech., predavač
	4.	Katarina pisačić, dipl. ing., predavač
	5.	

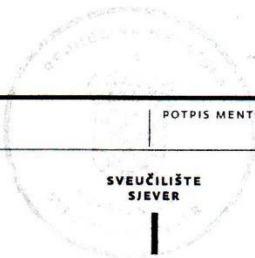
## Zadatak završnog rada

BROJ	269/PS/2018
OPIS	U Završnom radu je potrebno: <ul style="list-style-type: none"><li>• definirati čelik kao konstrukcijski materijal, kratko opisati postupak dobivanja i navesti osnovna svojstva čelika</li><li>• prikazati sistematizaciju čelika</li><li>• kratko opisati osnovne grupe čelika i njihovu primjenu</li><li>• definirati pojam visokočvrstih čelika te prikazati sistematizaciju istih</li><li>• navesti osnovna svojstva pojedine grupe visokočvrstih čelika</li><li>• prikazati primjenu i svojstva STRENX čelika tvrtke SSAB</li><li>• u zaključku Završnog rada dati osvrt na zadanu temu</li></ul>

ZADATAK URUČEN

7.9.2018

POTPIS MENTORA



## **Sažetak**

U ovom radu obrađuje se tema visokočvrstih čelika STRENGTH, proizvoda švedsko-američke tvrtke SSAB. Bit će spomenute i ukratko opisane pojedine vrste čelika, te nakon toga svaki visokočvrsti čelik sa njegovom primjenom i najvažnijim svojstvima. Bit će ukratko opisana i tvrtka SSAB te neke najvažnije obrade u tvrtci SSAB poput zavarivanja i rezanja.

Zahvaljujem se roditeljima i sestri na pruženoj podršci i razumijevanju!

**Ključne riječi: čelik, visokočvrsti čelici, SSAB, rezanje, zavarivanje**

## **Abstract**

This paper deals with the topic of STRENX high strength steels, products of the Swedish-American company SSAB. There will be a brief description of each type of steel, followed by each high-strength steel with its application and the most important properties. SSAB will be briefly described and some of the most important workings in SSAB such as welding and cutting.

I thank my parents and sister for their support and understanding!

**Key words: steel, high strength steels, SSAB, cutting, welding**

## Popis korištenih oznaka

Oznaka	Opis oznake	Mjerna jedinica
E	modul elastičnosti	$\text{N/mm}^2$
G	modul smičnosti	$\text{N/m}^2$
$R_e, R_p$	granica razvlačenja	$\text{N/mm}^2$
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja	$\text{N/mm}^2$
$R_m$	vlačna čvrstoća	$\text{N/mm}^2$
$R_d$	dinamička izdržljivost	$\text{N/mm}^2$
$R_E$	granica elastičnosti	$\text{N/mm}^2$
$K_{IC}$	pukotinska lomna žilavost	J
KV	udarna žilavost	J
$A_5$	produljenje	%
CEV	ekvivalent ugljika prema IIW	-
CET	ekvivalent ugljika	-

<u>Kratice</u>	<u>Opis kratice</u>
ULSAB-AVC	Ultra-Light Steel Automotive Body-Advanced Vehicle Concept
AHSS	Advanced High-Strength Steel – napredni čelik visoke čvrstoće
PH	Precipitation Hardenable - Korozijski postojani precipitacijski očvrsnuti čelici
Fe	željezo
C	ugljik
S	sumpor
P	fosfor
Ni	nikal
Mn	mangan
Cr	krom
Si	silicij
W	volfram
V	vanadij
Mo	molibden
B	bor
Ti	titan
Al	aluminij
Cu	bakar
Co	kobalt



## Sadržaj

Sažetak .....	4
Abstract .....	5
Popis korištenih oznaka.....	6
Popis slika .....	10
Popis tablica .....	11
Popis dijagrama.....	12
1. Uvod.....	13
2. Čelici .....	14
2.1 Sistematizacija čelika .....	15
2.2 Dobivanje čelika .....	16
2.3 Osnovna svojstva čelika .....	17
2.4 Podjela čelika.....	17
2.4.1 Konstrukcijski čelici .....	18
2.4.1.1 Opći konstrukcijski čelici.....	19
2.4.1.2 Čelici povišene čvrstoće.....	19
2.4.1.3 Ugljični čelici za tanke limove.....	20
2.4.1.4 Niskougljični čelici za trake.....	20
2.4.1.5 Čelici za vijke, matice i zakovice.....	20
2.4.1.6 Čelici za cementiranje .....	21
2.4.1.7 Čelici za poboljšavanje.....	22
2.4.1.8 Čelici za opruge.....	24
2.4.1.9 Čelici poboljšane rezljivosti .....	25
2.4.1.10 Korozijski postojani čelici (nehrđajući čelici).....	26
2.4.1.11 Čelici za rad pri povišenim temperaturama.....	27
2.4.2 Alatni čelici .....	28
2.4.2.1 Alatni čelici za hladni rad.....	29
2.4.2.2 Alatni čelici za topli rad .....	30
2.4.2.3 Brzorezni čelici .....	30
3. Konstrukcijski visokočvrsti čelici .....	31
3.1 Osobine visokočvrstih čelika.....	31
3.2 Niskolegirani niskopopušteni čelici.....	33
3.3 Visokolegirani Cr-Mo-V visokopopušteni čelici .....	34

3.4 Termomehantički obrađeni čelici .....	34
3.5 Korozijski postojani precipitacijski očvrnuti čelici .....	37
3.6 Čelici „Maraging“ .....	39
4. SSAB .....	41
4.1 Povijesni razvoj SSAB-a .....	44
4.2 Vrste konstrukcijskih visokočvrstih čelika .....	47
4.2.1 Strenx 1300 .....	47
4.2.2 Strenx 1100 .....	48
4.2.3 Strenx 1100 MC .....	49
4.2.4 Strenx 1100 CR .....	50
4.2.5 Strenx 960 .....	51
4.2.6 Strenx 900 .....	52
4.2.7 Strenx 700 .....	53
4.2.8 Strenx 650 MC .....	55
4.2.9 Strenx 110 XF .....	56
4.2.10 Strenx tube 700MH .....	57
4.2.11 Strenx tube 900MH .....	58
4.2.12 Strenx section 900 .....	59
4.3 Rezanje Strenx-a .....	60
4.3.1 Plinsko rezanje .....	60
4.3.2 Rezanje laserom .....	60
4.3.3 Plazma rezanje .....	61
4.4 Zavarivanje Strenx-a .....	61
4.5 Glodanje Strenx-a .....	62
4.6 Bušenje Strenx-a .....	62
4.7 Urezivanje navoja na Strenx-u .....	63
4.8 Tokarenje Strenx-a .....	63
5. Zaključak .....	64
6. Literatura .....	66

## Popis slika

Slika 1. Čelični lim [2] .....	14
Slika 2. Čelična traka [3].....	14
Slika 3. Čelična šipka [4], čelični zupčanik [5] i čelična opruga [6] .....	15
Slika 4. Shema dobivanja čelika i željeznih lijevova (1) .....	16
Slika 5. Podjela čelika prema namjeni [4].....	18
Slika 6. čelična matica (7).....	21
Slika 7. Mikrostruktura cementiranog zupčanika od čelika Č4320 [1].....	21
Slika 8. Mikrostruktura poboljšanog čelika- visokopopuštenog martenzita [1] .....	23
Slika 9. Karakteristična svojstva čelika za opruge u usporedbi sa mekim čelikom [8] .....	24
Slika 10. Vijčana opruga [9] .....	25
Slika 11. Osovinica izrađena ovom vrstom čelika [10].....	26
Slika 12. Svrdla od alatnih čelika [12] .....	29
Slika 13. Vrste čelike i odnos čvrstoće i istežljivosti [13] .....	32
Slika 14. Dijelovi zrakoplova od "maraging" čelika [17] .....	41
Slika 15. Vagon za rasute terete (nagrada Swedish steel prize 2017.godine) [15] .....	42
Slika 16. Primjeri uporabe Strenx čelika [15] .....	43
Slika 17. Proizvodnja visokočvrstih čelika u tvrtki SSAB [18].....	45
Slika 18. Primjena Strenx-a 1300 [18] .....	47
Slika 19. Primjena Strenx-a 1100 [18] .....	48
Slika 20. Primjena Strenx-a 1100 MC [18].....	49
Slika 21. Primjena Strenx-a 1100 CR [18].....	50
Slika 22. Primjena Strenx-a 960 [18] .....	51
Slika 23. Primjena Strenx-a 700 [19] .....	54
Slika 24. Primjena Strenx-a 70 MC [18].....	54
Slika 25. Primjena Strenx-a 70 [20] .....	54
Slika 26. Primjena Strenx-a 700 [18] .....	56
Slika 27. Primjena Strenx tube-a 700MH [18].....	57
Slika 28. Primjena Strenx tube-a 900MH [18].....	58
Slika 29. Primjena Strenx section 900 [18].....	59
Slika 30. Plinsko rezanje Strenx čelika [18].....	60
Slika 31. Rezanje laserom Strenx čelika [18].....	60
Slika 32. Plazma rezanje Strenx čelika [18].....	61
Slike 32 i 33. Zavarivanje Strenx-a[18] .....	61
Slika 34. Glodanje Strenx-a [18].....	62
Slika 35. Bušenje Strenx-a [18].....	62
Slike 36.i 37. Urezivanje navoja na Strenx-u [18] .....	63
Slika 38. Tokarenje Strenx-a [18] .....	63

## Popis tablica

Tablica 1. Niskolegirani niskopopušteni čelici - mehanička svojstva i kemijski sastav [16]...	34
Tablica 2. Visokolegirani visokopopušteni čelici - mehanička svojstva i kemijski sastav [16]..	34
Tablica 3. Mehanička svojstva poluaustenitnih PH-čelika [16].....	39
Tablica 4. Parametri toplinske obrade i mehanička svojstva austenitnih PH-čelika [16].....	39
Tablica 5. Mehanička svojstva "maraging" čelika [16].....	41
Tablica 6. Osnovni podaci o mehaničkim svojstvima Strenx čelika [15].....	42
Tablica 7. Osnovni podaci o kemijskom sastavu pojedinih legura Strenx Čelika [15].....	43
Tablica 8. Vrste visokočvrstih čelika iz SSAB-a [18].....	46
Tablica 9. Mehanička svojstva Strenx-a 1300 [18].....	47
Tablica 10. Kemijski sastav za Strenx 1300 [18].....	47
Tablica 11. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 1300 [18].....	47
Tablica 12. Mehanička svojstva Strenx-a 1100 [18].....	48
Tablica 13. Kemijski sastav za Strenx 1100 [18].....	48
Tablica 14. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 1100 [18].....	48
Tablica 15. Mehanička svojstva Strenx-a 1100 MC [18].....	49
Tablica 16. Kemijski sastav za Strenx 1100 MC [18].....	49
Tablica 17. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 1100 MC [18].....	49
Tablica 18. Mehanička svojstva Strenx-a 1100 CR [18].....	50
Tablica 19. Kemijski sastav za Strenx 1100 CR [18].....	50
Tablica 20. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 1100 CR [18].....	50
Tablica 21. Mehanička svojstva Strenx-a 960 [18].....	51
Tablica 22. Kemijski sastav za Strenx 960 [18].....	51
Tablica 23. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 960 [18].....	51
Tablica 24. Mehanička svojstva Strenx-a 900 [18].....	52
Tablica 25. Kemijski sastav za Strenx 900 [18].....	52
Tablica 26. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 900 [18].....	52
Tablica 27. Mehanička svojstva Strenx-a 700 [18].....	53
Tablica 28. Kemijski sastav za Strenx 700 [18].....	53
Tablica 29. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 700E [18].....	53
Tablica 30. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 700F [18].....	53
Tablica 31. Mehanička svojstva Strenx-a 650 MC [18].....	55
Tablica 32. Kemijski sastav za Strenx 650 MC [18].....	55
Tablica 33. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 650 MC [18].....	55
Tablica 34. Mehanička svojstva Strenx-a 110 XF [18].....	56
Tablica 35. Kemijski sastav za Strenx 110 XF [18].....	56
Tablica 36. Mehanička svojstva Strenx tube-a 700MH [18].....	57
Tablica 37. Kemijski sastav za Strenx tube 700MH [18].....	57
Tablica 38. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx tube 700MH [18].....	57
Tablica 39. Mehanička svojstva Strenx tube-a 900MH [18].....	58
Tablica 40. Kemijski sastav za Strenx tube 900MH [18].....	58
Tablica 41. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx tube 900MH [18].....	58
Tablica 42. Mehanička svojstva Strenx section 900 [18].....	59
Tablica 43. Kemijski sastav za Strenx section 900 [18].....	59
Tablica 44. Maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx section 900 [18].....	59

## Popis dijagrama

Dijagram 1. Schaefflerov strukturni dijagram [11].....	27
Dijagram 2. Ovisnost čvrstoće materijala i gustoće dislokacija [15].....	33
Dijagram 3. Ausforming postupak [17].....	35
Dijagram 4. TRIP postupak [16].....	36
Dijagram 5. Perliforming postupak [16].....	36
Dijagram 6. "Marforming" postupak [16].....	37
Dijagram 7. Toplinska obrada martenzitnih PH-čelika [16].....	38
Dijagram 8. Opći dijagram postupka toplinske obrade čelika maraging [1].....	40
Dijagram 9. Krivulja naprezanja-istezanja za obični i visokočvrsti čelik [15].....	44

# 1. Uvod

Visokočvrsti čelici su čelici koji spadaju u skupinu konstrukcijskih čelika. Visokočvrsti čelici imaju nekoliko puta veću konvencionalnu granicu razvlačenja  $R_{p0,2}$  zbog koje se mogu opteretiti znatno većim opterećenjima ili se može smanjiti presjek profila u usporedbi s običnim čelicima. Utrošak materijala je manji, manja je masa materijala, lakša manipulacija istim, a dijelom je olakšana i skraćena proizvodnja konstrukcija i proizvoda iz visokočvrstih čelika. Razlog tome je manje obrade (kraće vrijeme obrade), bilo strojne obrade ili zavarivanje kao najčešći oblik spajanja kod čelika. Uz smanjenje vremena za zavarivanje, npr. umjesto 30 mm običnog čelika zavaruje se visokočvrsti debljine 8-12 mm, smanjuje se i trošak radnog vremena, energije, dodatnih materijala, pribora.

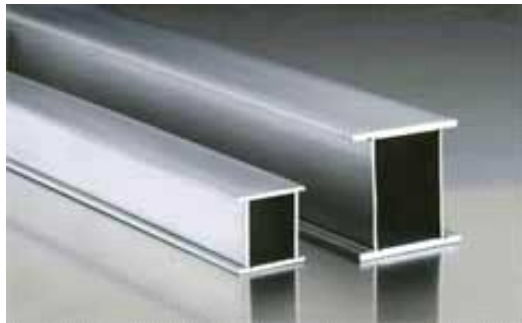
Najvažnije vrste visokočvrstih čelika su: čelici visoke čvrstoće, ultračvrsti čelici, čelici za poboljšavanje, termomehanički obrađeni čelici, korozijski postojani precipitacijski očvrnuti čelici, čelici „maraging“ i drugi.

Kao jedan od najbitnih uvjeta u današnjem društvu, cijena, drži čelik još uvijek boljim izborom od većine obojenih metala i njihovih legura, no istodobno je upotreba čelika upitna u mnogim sklopivima gdje ga mijenjaju jeftiniji polimeri. Dakako, ovisno od razine kvalitete i osobina koje se zahtijevaju pri uporabi, biti će i izbor materijala.

U ovom radu će se najprije opisivati osnovna svojstva čelika te isto tako će biti spomenute i dvije osnovne vrste čelika sa podvrstama. Ukratko će biti navedena najvažnija svojstva i primjena pojedinih vrsta čelika. Nakon toga će se spominjati tema završnog rada što su zapravo „Svojstva i primjena visokočvrstih čelika“. Bit će navedena osnovna svojstva i primjena visokočvrstih čelika te nakon toga i najvažnije vrste ovih vrsta čelika. Spomenut će se i SSAB- nordijsko-američki proizvođač visokočvrstih čelika.

## 2. Čelici

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza (Fe) i ugljika (C<sub>4</sub>), gdje je udio ugljika najviše 2%, a ostalo je željezo. U čeliku su prisutni i razni pratiooci, odnosno nečistoće. Najveće nečistoće su sumpor (S) i fosfor (P), dok su ostale nečistoće zapravo drugi kemijski elementi. U čeliku se također pojavljuju i razni legirni elementi. Čelici se nakon lijevanja taljevine nekog određenog sastava podešavaju u kokile, odnosno kalupe te se tada oblikuju raznim postupcima deformiranja. Neki od postupaka deformiranja su: valjanje, prešanje, kovanje i drugi postupci. Na poslijetku se dobije željeni oblik nekog poluproizvoda. Najčešći poluproizvodi čelika su limovi, trake, cijevi, razni profili, šipke i slično. [1]



*Slika 1. Čelični lim [2]*



*Slika 2. Čelična traka [3]*

Čelici su u današnje vrijeme jedni od najvažnijih tehničkih materijala u primjeni te isto tako i u proizvodnji. Svjetska proizvodnja čelika iznosi više od 900 milijuna tona, što je gotovo polovica od ukupne proizvodnje svih tehničkih materijala. U budućnosti se za čelik očekuje relativno značajan udio u proizvodnji. Čelik daje dobru kombinaciju svojstava i to- spojivosti, čvrstoće, rezljivosti, oblikovljivosti, deformiranjem, toplinskom obradom, žilavosti, mogućnošću svojstava legiranjem, relativno nisku cijenu i razna druga svojstva. [4]

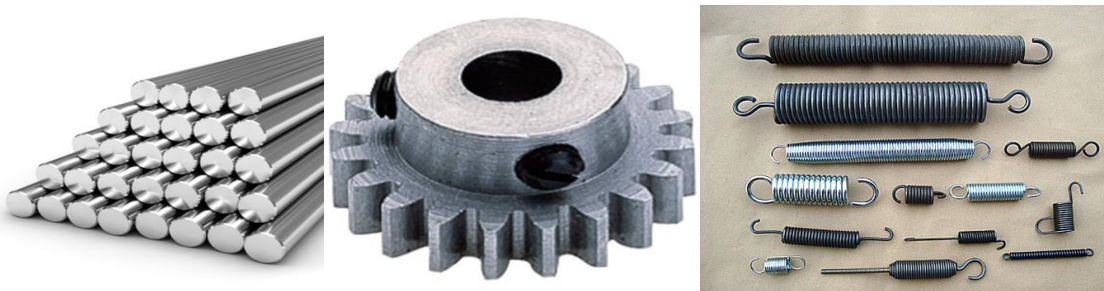
## 2.1 Sistematizacija čelika

Čelici se mogu okarakterizirati mnogim svojstvima, kao na primjer:

- mikrostrukturu
- kemijskim sastavom
- proizvodnjom
- oblikom i stanjem
- primjenom
- svojstvima i dr. [1]

Prema tipu mikrostrukture, čelici mogu biti: feritni, perlitni, feritno-perlitni, martenzitni, bainitni, austenitni, ledeburitni i drugi. Što se tiče kemijskog sastava, čelici mogu biti zajamčenog ili nezajamčenog sastava, ugljični ili legirani i to jednostruko ili višestruko niskolegirani ili visokolegirani. Prema vrsti legiranih elemenata razlikujemo: Ni, Cr, Mn, Si, W, Mo, V-čelike ili Cr-Mn, Cr-Ni, Si-Mn čelike i mnoge druge. S druge strane čelici mogu biti proizvedeni mnogim postupcima kao što su: elektropretaljivanjem, kisikovim konvertorima, sekundarnom metalurškom obradom, pretaljivanjem pod troskom i dr. Osnovni oblici čeličnih proizvoda su: šipke, trake, cijevi, limovi. Čelični oblici mogu biti u nekoliko osnovnih stanja- hladnovaljani, hladnovučeni, ljušteni, brušeni, kovani, polirani, toplinski obrađeni i dr. Postoje dvije osnovne skupine čelike, a to su konstrukcijski čelici i alatni čelici. Konstrukcijski čelici se upotrebljavaju za opću namjenu i to za zavarene konstrukcije i za strojne elemente (zupčanike, osovine, vijke, opruge i dr.) te isto tako posebnih svojstava (korozijski otporni, otporni na trošenje, toplinski čvrsti i dr.) Alatni čelici se upotrebljavaju za izradu alata za toplo i hladno oblikovanje metala i nemetala, mjernih i drugih alata. Čelici sa ili bez podskupine čelika posjeduju istaknuta svojstva: granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, žilavost pri niskim temperaturama, oblikovljivost, rezljivost, otpornost na trošenje i mnoga druga. [1]

Čelik je vrlo važan materijal u današnje vrijeme i zamjenjuje jako puno drugih obojenih i lakih materijala. Međutim bez obzira na njegova dobra svojstva i kvalitetu, društvo i dalje koristi puno lakih i obojenih materijala, prije svega zbog relativno niske cijene u odnosu na čelik.



Slika 3. Čelična šipka [4], čelični zupčanik [5] i čelična opruga [6]

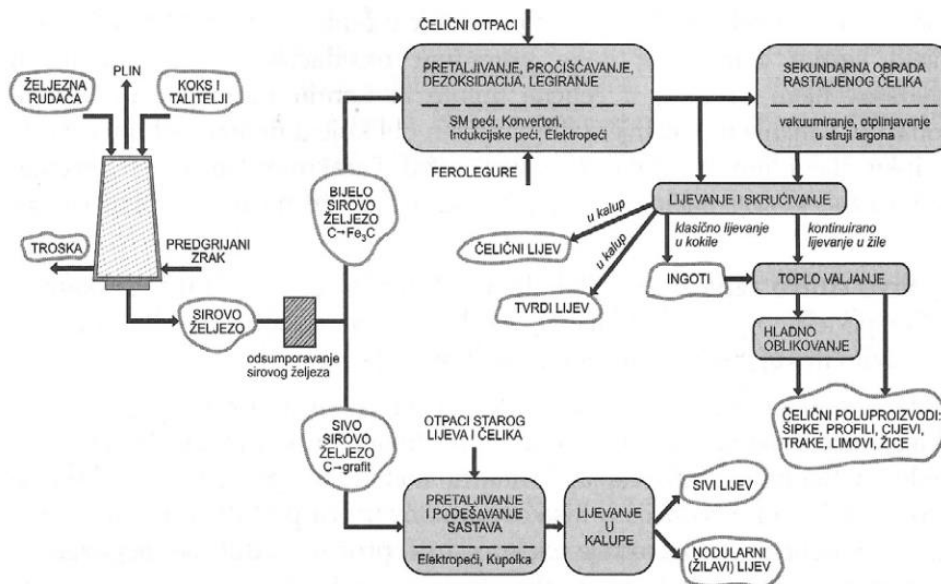


## 2.2 Dobivanje čelika

Čelik se proizvodi u visokim pećima i to procesima redukcije željezne rude gdje se izdvaja kisik. Međutim, kod procesa proizvodnje čelika dolazi do otapanja mnogih drugih elemenata iz okoline kao što su kremen, vapnenac, koks, zrak i drugi te dolazi do otapanja određene količine ugljika i nečistoća poput fosfora i sumpora. Na kraju se dobije bijelo ili sivo sirovo željezo. [1]

Bijelo sirovo željezo je osnovna sirovina za proizvodnju čelika, čeličnog ili bijelog lijeva. 90-tak posto sirovog željeza se prerađuje u čelik, dok se ostalih 10-tak posto prerađuje u ljevove. Dalje se prerađuju u čelične ingote ili kontinuirano lijevane žile i to oksidacijskim pročišćivanjem i na kraju se jednom od obrada- valjanjem, vučenjem, kovanjem oblikuju u konačne proizvode- cijevi, limove, šipke, trake i druge. [1]

Sivo sirovo željezo se pretaljuje u pećima ili u kupolama i nakon toga se izlijeva u kalupe gdje se na posljetku dobiju bijeli tvrdi ljevovi ili sivi ljevovi sa listićavim ili kuglastim grafitom. [1]



Slika 4. Shema dobivanja čelika i željeznih ljevova (1)

## 2.3 Osnovna svojstva čelika

Neka od temeljnih i osnovnih svojstava čelika su određena- kemijskim sastavom, mikrostrukturom i stanjem te oblikom i dimenzijama poluproizvoda. [1]

Što se tiče kemijskog sastava, najveći utjecaj na osnovna svojstva čelika ima maseni udio ugljika. Ugljik je ujedno i najutjecajniji element u čeliku. Tako porastom udjela ugljika kod nelegiranih čelika do eutektoidnog udjela (eutektoidni udio započinje kod 0,8 % ugljika u čeliku na ukupan udio) rastu, ali se istovremeno i smanjuju mnoga svojstva. Svojstva koja rastu su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća te tvrdoća čelika, dok se smanjuju istezljivost i udarni rad loma. Navedena svojstva se dobiju zato što se porastom masenog udjela ugljika povećava udio tvrdog i krhkom cementita. Za razliku od eutektoidnog udjela, kod nadeutektoidnog udjela (nadeutektoidni udio započinje kod 2,03 % ugljika u čeliku na ukupan udio) čvrstoća čelika sve više opada zato što se povećavanjem udjela ugljika u čeliku sve više povećava udio sekundarnog cementita. [1]

Porast ugljika ima neke dobre strane, ali isto tako i neke loše. Dobra strana je povećanje zakaljivosti, odnosno mogućnosti postizanja što više tvrdoće nakon kaljenja, dok su loše strane zakaljivost i opadanje sposobnosti čelika za plastičnu deformaciju. [1]

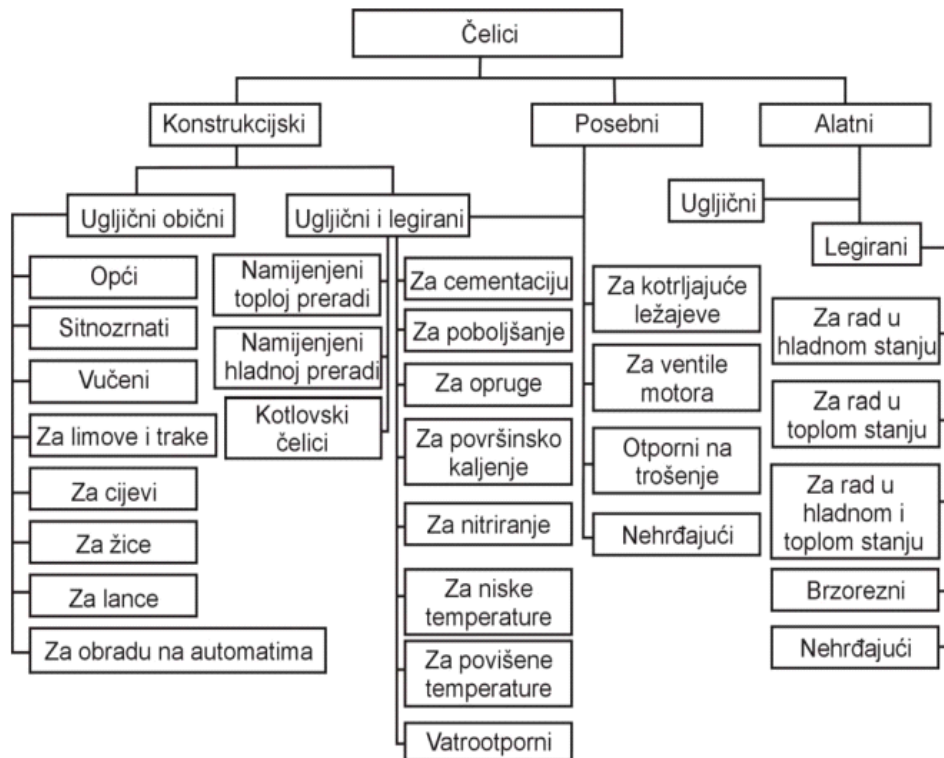
Mikrostruktura i stanje određeni su postupcima toplinske obrade i oblikovanja. Tako na primjer austenitna mikrostruktura ima puno drugačija svojstva od na primjer perlitne mikrostrukture. Isto tako za primjer se može uzeti hladnovučeno i toplovučeno stanje koje isto tako imaju različita svojstva. [1]

Što se tiče oblika i dimenzija, kod nekih većih čelika mehanička svojstva su manja nego kod manjih čelika.

## 2.4 Podjela čelika

Kao što je već prije spomenuto, čelici se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine i to u konstrukcijske i alatne čelike. Međutim postoji jako puno i pod podjela i iz konstrukcijskih i iz alatnih čelika. Tako su podskupine konstrukcijskih čelika: ugljični obični i ugljični i nelegirani. Pod ugljične obične spadaju- opći, sintetizirani, vučeni, za limove, trake, cijevi, žljebove, lance i mnoge druge podskupine. Ugljični i legirani su najčešće namijenjeni toploj i hladnoj preradi, te isto tako i za obrade poput cementacije, poboljšavanje, za nitriranje, visoke i niske temperature i drugo. [1]

Što se pak tiče alatnih čelika, također se dijele na ugljične i legirane, i to od ugljičnih najviše služe za ventile motora, kotrljajuće ležajeve i dr. Od legiranih su najpoznatiji za rad u hladnom stanju, toplom stanju i dr. [1]



Slika 5. Podjela čelika prema namjeni [4]

### 2.4.1 Konstrukcijski čelici

Konstrukcijski čelici se primjenjuju za konstrukcijske dijelove uređaja i strojeva koji imaju zadaću obavljanja neke funkcije. Najčešće su konstrukcijski čelici osovine, vratila i zupčanici, ali i mnogi drugi elementi poput opruga, vijaka ventila i mnogih drugih. Najvažnije njihove funkcije su: spremanje i transportiranje plinova ili tekućina, spajanje elemenata konstrukcija, preuzimanje sila itd. [1]

Od konstrukcijskih čelika se traže sljedeća svojstva:

- mehanička svojstva (visoka granica razvlačenja, visoka istežljivost, visoka granica puzanja, visoka čvrstoća itd.)
- otpornost na trošenje (što manji gubitak mase)
- otpornost na koroziju (otpornost na oksidaciju)
- tehnološka svojstva (režljivost, zavarljivost, hladna oblikovljivost) [1]

### 2.4.1.1 Opći konstrukcijski čelici

Opći konstrukcijski čelici su najzastupljeniji u proizvodnji, isto tako i u primjeni i to za niz nosivih i zavarenih konstrukcija velike mase (od 60 do 85% mase). Od nosivih i zavarenih konstrukcija su to najčešće mostovi, nosači, dijelovi vozila, strojni elementi, brodske konstrukcije, oprema u industriji plina i nafte itd. [1]

Opći konstrukcijski čelici se dijele u dvije podskupine:

- opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije  
Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije primjenjuju se kod dizalica, mostova, platforma, dalekovoda, spremnika tekućina i plinova, šasija, opreme na brodovima itd.
- čelici za strojogradnju  
Čelici za strojogradnju primjenjuju se kod osovina, vretena, zupčanika, vijaka, ručica, poluga, klinova itd. [1]

### 2.4.1.2 Čelici povišene čvrstoće

Čelici povišene čvrstoće se razvijaju najviše radi postizanja što više granice razvlačenja i što više vlačne čvrstoće. Ovi čelici smanjuju nosive presjeke kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuju masu i volumen konstrukcije te time dolazi do sniženja ukupnih troškova materijala. Ove čelike treba primjenjivati uzimajući sljedeće činjenice:

- povišenjem granice razvlačenja opada deformabilnost i tada raste povećanje osjetljivosti prema pojavi krhkog loma
- dimenzijska izdržljivost i otpornost na naglo širenje u usporedbi sa granicom razvlačenja nisu proporcionalno povećani
- korozija stvara veliki problem; smanjuje debljinu stjenke pa se smanjuje nosivost presjeka
- kod opterećenih konstrukcija sa tankim presjekom se može javiti izvijanje, a progib se može javiti kod savijanja, to se javlja najčešće kod većih i dužih konstrukcija kao na primjer kod brodova, dizalica i mostova [1]

Čelici povišene čvrstoće se dijele u dvije podskupine:

- normalizirani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće  
Primjenjuju se kod postolja vagona i vozila, dijelova građevinskih strojeva, mostova, hangara i vijadukta, rezervoara za transport tekućih plinova, kuglastih i valjkastih spremnika za gradski plin i to propan i propilen itd.
- poboljšani sitnozrnati čelici  
Primjenjuju se kod mostova, šasija vozila, dijelova dizalica i istovarivača, cjevovoda, kućišta i rotora vodnih turbina itd. [1]

### 2.4.1.3 Ugljični čelici za tanke limove

Ugljični čelici za tanke limove služe za izradu tankih limova i to debljine ispod 3mm, a mogu se svrstati u dvije podskupine:

- niskougljični čelici za tanke limove
- ugljični čelici za limove

Niskougljični čelici za tanke limove imaju vrlo malo ugljika i to oko 0,1%. Vrlo su pogodni za vučenje, utiskivanje i savijanje i to zbog vrlo važnog svojstva deformabilnosti odnosno duktilnosti. Kod ovih čelika se na površinu nanose metalne i nemetalne prevlake poput lakiranja, kromiranja, pocinčavanja itd. Ugljični čelici za limove sa zajamčenim mehaničkim svojstvima pripadaju skupini općih konstrukcijskih čelika. [1]

### 2.4.1.4 Niskougljični čelici za trake

Niskougljični čelici za trake rabe se kod traka i to hladnovaljanih sa različitim stupnjevima tvrdoće. Maseni udio ugljika im je relativno nizak, do 0,1%. Postoji 5 stupnjeva tvrdoće, pošto ih imaju različite tvrdoće. [1]

Stupljevi tvrdoće su: mekožareno, 1/4tvrdo, 1/2tvrdo, 3/4tvrdo, tvrdo te svjetlotvrdo.

- mekožareno stanje- trake su vrlo plastične, prikladne za duboko vučenje te za obradu deformiranjem, nisu elastično deformabilne, a najvažnije je to što su najmekše
- očvrstano stanje- trake su meke, plastične, također prikladne za duboko vučenje te za obradu deformiranjem, slabo su elastično deformabilne
- 1/8 tvrdo stanje- trake su plastične, ali nisu prikladne za duboko vučenje, mogu se utiskivati i savijati
- 1/4 tvrdo- trake su malo plastične i može se izvoditi plitko vučenje i savijanje
- 1/2 tvrdo- trake s ovim stupnjem se koriste za hladno deformiranje
- 3/4 tvrdo-trake su elastične
- tvrdo- trake su jako elastično deformabilne
- svjetlotvrdo- dobivaju se hladnim valjanjem sirovog čelike bez konačnog žarenja [1]

### 2.4.1.5 Čelici za vijke, matice i zakovice

Čelici za vijke, matice i zakovice su niskougljični čelici za udio ugljika od 0,1 do 0,2% koji se primjenjuju kao što i sam podnaslov govori za izradu vijaka, matica i zakovica i to toplim ili hladnim postupcima deformiranja. Za vijke i matice koji imaju višu traženu čvrstoću primjenjuju se čelici za poboljšavanje. [1]

Ovi čelici se mogu podijeliti u tri skupine:

- čelici za hladni i topli postupak izrade vijaka, matica i zakovica
- čelici namijenjeni za izradu matica na hladno
- čelici namijenjeni za izradu matica na toplo [1]

Čelici za hladni i topli postupak izrade vijaka, matica i zakovica imaju snižene masene udjele nečistoća, odnosno sumpora i fosfora čime se postižu dobra svojstva plastičnosti, odnosno ne javljaju se pukotine u toplom ili hladnom stanju. Isto tako je smanjena pojava krhkog loma kod ove skupine čelika. Čelici namijenjeni za izradu matica na hladno imaju povišeni udio sumpora najčešće u granicama 0,08 do 0,012% da bi se postigla što bolja rezljivost. Za razliku od čelika namijenjena za izradu matica na hladno, čelici namijenjeni za izradu matica na toplo nemaju povišeni maseni udio sumpora, nego imaju povišeni maseni udio fosfora u granicama 0,08 do 0,25% čime se postiže smanjenje opasnosti od pojave toplih pukotina. [1]



*Slika 6. čelična matica (7)*

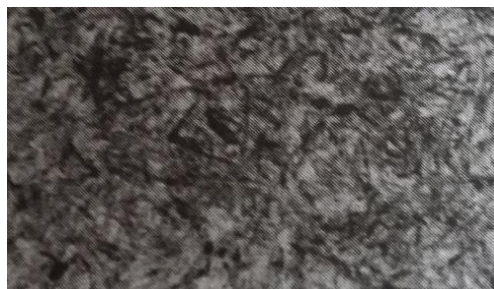
#### **2.4.1.6 Čelici za cementiranje**

Čelici za cementiranje su niskougljični, nelegirani ili niskolegirani čelici sa udjelom ugljika manjim od 0,25%. Sastav im je zajamčen, a što se tiče masenog udjela spadaju u kvalitetne i plemenite čelike. [1]

- plemeniti čelici sadrže manji maseni udio fosfora i sumpora, odnosno manje od 0,035% P i S, imaju manju kvalitetu površine i manji broj nemetalnih uključaka u mikrostrukturi
- kvalitetni čelici sadrže veći maseni udio fosfora i sumpora, odnosno manje od 0,045% P i S, imaju veću kvalitetu površine i veći broj nemetalnih uključaka u mikrostrukturi [1]

Kao što i sam podnaslov govori, čelici iz ove skupine su podvrgnuti postupcima toplinske obrade cementiranja koje se sastoji od nekoliko faza i to:

- pougljičavanje površinskih slojeva
- kaljenje
- niskotemperaturno popuštanje [1]



*Slika 7. Mikrostruktura cementiranog zupčanika od čelika Č4320 [1]*

Pougljičavanjem površinskih slojeva se obogaćuju rubni slojevi ugljikom na otprilike 0,8 do 0,9% ugljika. To se događa u granulatu, solnoj kupki ili plinu kod temperature austenitiziranja. Na kraju se dobije maksimalna moguća tvrdoća i čelici postaju zakaljivi. Nakon cementiranja su površinski slojevi tvrdi, dobije se visokouglični martenzit i dobije se dobro svojstvo i to velika otpornost na trošenje. Sredina presjeka ostaje feritno-perlitna ili niskouglična-martenzitna ovisno o prokaljivanju. Ako ima nepotpunog prokaljivanja presjek je feritno-perlitni, međutim, ako dolazi do potpunog prokaljivanja presjek će biti niskouglični-martenzitni. Kod potpunog prokaljivanja niskouglična-martenzitna struktura je otporna na udarna i dinamička opterećenja, drugim riječima, struktura postaje žilava. Nakon toga je potrebno što bolje prokaljivanje za postizanje što bolje visoke čvrstoće, dinamičke izdržljivosti i žilavosti jezgre proizvoda. To je ujedno i cilj legiranja. Ovi čelici se primjenjuju za one dijelove koji moraju istovremeno biti i otporni na trošenje i podnositi dinamička opterećenja u radu. Za sve čelike je otpornost na trošenje cementiranog sloja približno jednaka pa su za izbor čelika odlučujuća mehanička svojstva jezgre. Tvrdoća, odnosno svojstva jezgre cementiranog dijela ovise o % ugljika osnovnog materijala u potpunosti prokaljivanja presjeka. Za veće dimenzije radi potrebe za što potpunijim prokaljivanjem dolaze u obzir jače legirani čelici. Potpunim prokaljivanjem se postižu najbolja mehanička svojstva. Postiziva mehanička svojstva jezgre nakon cementiranja mogu se predvidjeti slijepim kaljenjem nepougljičenih ispitnih tijela. Ispitna tijela su u obliku šipki i to promjera od 11,30 i 63 mm i ona se gase s temperature pougljičavanja i utvrđuju mehanička svojstva statičkim vlačnim ispitivanjem. Na poslijetku, za izbor čelika bit će odlučujuće dimenzije i visina naprežanja strojnog dijela. Potrebno je primjenjivati legirane čelike za cementiranje, a ne nelegirane, i to za visoka dinamička opterećenja i veće dimenzije. [1]

Glavne vrste čelika za cementiranje i karakteristike:

- nelegirani čelici, npr. Č1120, Č1121, Č1220- kaljivi u vodi, slabe prokaljivosti; male osovinice i zupčanici, poluge, svornjaci...
- Cr-čelici, npr. Č4120- skloni pogrubljenju zrna i stvaranju karbida, dobro zakaljivi, prokaljivi u vodi i u ulju; poluosovine, manji zupčanici...
- Mn-Cr čelici, npr. Č4321- dobre prokaljivosti; zupčanici, vretena, osovine...
- Cr-Mn i Mo-Cr čelici- npr. Č4721- Cr, Mo povisuju prokaljivost, a Mo stvara posebne karbide otporne na trošenje; koljenaste osovine, zupčanike...
- Ni-Cr čelici, npr. Č5421- vrlo dobro prokaljivi čelici; visokoopterećeni zupčanici i vratila, koljenaste osovine, osovine u zrakoplovima... [1]

#### **2.4.1.7 Čelici za poboljšavanje**

Čelici za poboljšavanje sadrže od 0,2 do 0,6% ugljika. Spadaju u skupinu plemenitih i kvalitetnih čelika i to zbog svog kemijskog sastava. Ova skupina čelika se podvrgava postupku poboljšavanja. Pod poboljšavanje spadaju kaljenje i visokotemperaturno popuštanje da bi se postigla što veća granica razvlačenja i što veća vlačna čvrstoća, također visoka žilavost i dinamička izdržljivost. Zbog toga se najčešće upotrebljavaju za visoko opterećene dijelove strojeva i uređaja kao na primjer osovine, zupčanike, vratila, poluge, vijaka itd. [1]

Kaljenjem se teži postizanju što potpunije martenzitne strukture, odnosno što većoj prokaljenosti da bi se na poslijetku naknadnim popuštanjem ostvarila što veća žilavost. Najveću žilavost iskazuje visokopopušteni martenzit. [1]



*Slika 8. Mikrostruktura poboljšanog čelika- visokopopuštenog martenzita [1]*

Na prokaljenost utječu tri skupine faktora:

- prokaljivost vrste čelika
- dimenzije dijela
- uvjeti gašenja kod kaljenja

Na prokaljivost čelika u prvom redu utječu maseni udjeli legiranih elemenata te maseni udio ugljika. Ako je viši postotak ugljika, isto tako i veći stupanj legiranosti, veća je naposljetku i prokaljivost. Međutim, kod nekih vrsta čelika, može se pojaviti nagli pad žilavosti nakon popuštanja i to u temperaturnom intervalu od 450 do 600 °C. Ta se pojava naziva krhkost popuštanja. Najčešće su ovoj pojavi podvrgnuti mangan, krom, mangan-krom, krom-nikal-čelici. Postoji mogućnost smanjenja krhkosti popuštanja i to bržim hlađenjem sa temperature popuštanja. [1]

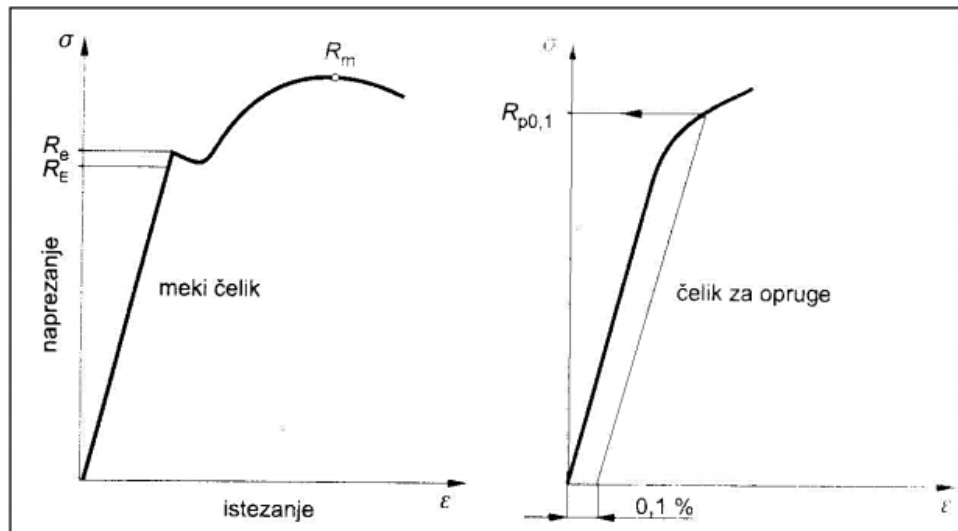
Najčešći primjeri čelika ove vrste su:

- Č1330, Č1530- primjenjuju se do promjera 40 mm, iznimno do 100 mm zbog male prokaljivosti za slabije opterećene dijelove kao na primjer osovine, vijke, vretena...
- Č3130- primjenjuje se do dimenzija od 40 mm zbog nešto veće prokaljivosti za slabo i srednje slabo opterećene dijelove strojeva i vozila kao na primjer pogonske osovine, vijke, osovine upravljača...
- Č4130- primjenjuje se do promjera 100 mm zbog veće prokaljivosti i to kod dinamički opterećenih dijelova kao na primjer poluosovina automobila, osovina u mjenjaču...
- Č4732- primjenjuje se kod većih dimenzija i kod viših radnih opterećenja do promjera 100 mm kod dijelova automobila, zrakoplova kao na primjer klipnjača, koljenastih osovina...
- Č4830- primjenjuje se za veliki raspon dimenzija i to dinamički jače opterećenih strojnih dijelova koji su jače izloženi trošenju kao na primjer osovine, torzijske opruge, alat-ključevi...
- Č5430- ovaj je čelik najbolje prokaljivosti pa je vrlo pogodan za dijelove velikih dimenzija veće od 150 mm promjera. Najveća mu je mana ta što je skupi zato što je legiran sa niklom. Koristi se kod velikih zupčanika, osovina turbogeneratora, osovina za preše...



### 2.4.1.8 Čelici za opruge

Cilj opruge je da pod nekim djelovanjem radnog opterećenja ostvari traženu deformaciju i to elastičnu. Svi čelici će u području elastičnih deformacija ostvarivati jednako opružno djelovanje zbog posljedice jednakog modula elastičnosti i modula smičnosti. Kao što je već poznato oznaka za modul elastičnosti je  $E$ , dok je za modul smičnosti  $G$ . [1]



Slika 9. Karakteristična svojstva čelika za opruge u usporedbi sa mekim čelikom [8]

Veća opteretivost opruge se ostvaruje što višim područjem elastičnosti, što višom granicom elastičnosti, odnosno što višom granicom razvlačenja. To se jasno vidi na slici 9.

Da bismo dobili što višu granicu razvlačenja kod čelika za opruge potrebno je imati što veće masene udjele legirnih elemenata poput silicija, vanadija, mangana i kroma, te isto tako povećanje čelika sa masenim udjelom ugljika. [1]

Najvažnija svojstva čelika za opruge:

- visoka granica razvlačenja  $R_e$  isto tako i visoka granica elastičnosti  $R_E$ , te visoka vlačna čvrstoća  $R_m$
- otpornost na udarna opterećenja- udarna žilavost
- visoka dinamička izdržljivost  $R_d$
- sigurnost protiv krhkog loma i dovoljnu rezervu protiv plastičnosti [1]

Vrste čelika za opruge:

- čelici legirani sa silicijem- postojanje opasnosti od razugljičenja prilikom kaljenja, primjenjuju se za manje opterećene lisnate opruge kao na primjer Č2131, Č2132
- čelici za viša opterećenja, veće presjeke i složenije oblike- kao na primjer Č2332- primjenjuje se za normalno opterećene lisnate opruge vozila; Č4232- primjenjuju se za visoko napregnute opruge vozila; Č4830- primjenjuju se za najviša opterećenja i najviše dimenzije



*Slika 10. Vijčana opruga [9]*

#### **2.4.1.9 Čelici poboljšane rezljivosti**

Čelici poboljšane rezljivosti su čelici koji se nazivaju i "čelici za automate" zbog toga što služe za izradu sitnijih dijelova na automatskim strojevima i to visokoproduktivnim. Imaju nekoliko dobrih svojstava, međutim, najbolje svojstvo im je jako visoka i dobra obradljivost odvajanjem čestica u odnosu na mnoge druge vrste čelika. Ovim svojstvom postižu se puno veće brzine rezanja uz sporije trošenje oštrice alata, i tim bržim rezanjem se dobije površina visoke kvalitete. Najčešće se ti čelici koriste za velike serije i prije svega kod manjih količina. Primjenjuju se na vijcima, maticama, osovinicama itd. [1]

Kod ove skupine čelika su mnogi kemijski elementi ti koji zapravo pospješuju obrade, međutim, isto tako i omogućuju stvaranje lomljive, kratke strugotine. Zbog toga ova skupina čelika ima neka loša svojstva kao što su :

- nastajanje pukotina kod toplinske obrade
- lom od umora
- sklonost pojave krhkog loma [1]

Što se tiče kemijskog sastava kod ovih čelika, najviše prevladavaju kemijski elementi poput sumpora, fosfora i mangana, međutim u zadnje vrijeme se dodaje i olovo. Maseni udio sumpora je dosta visoki, u granicama od 0,15 do 0,45%, dok je maseni udio fosfora nešto manji i to od 0,07 do 0,11%, a toliko je otprilike i maseni udio mangana. Uloga sumpora je da pomaže kod nastajanja lomljive strugotine, smanjuje otpor rezanju i smanjuje trenje. Fosfor pomaže stvaranju glatke površine i stvaranju krhke kratke strugotine. Olovo se dodaje u granicama od 0,15 do 0,30% te ima ulogu smanjivanja trenja kod obrade isto kao i sumpor. [1]

Obrade koje se primjenjuju na ovoj vrsti čelika su toplo valjana obrada, hladno vučenje, brušenje itd. Najbolja je obrada hladnog vučenja jer daje bolja mehanička svojstva, dimenzije i uže tolerancije. [1]

Najveća primjena ovih čelika je na slabije mehanički opterećenim dijelovima jer imaju slabiju žilavost i slabiju dinamičku izdržljivost.

Vrste čelika poboljšane rezljivosti:

- prikladnih za cementiranje kao na primjer Č1190, Č1290...
- prikladnih za poboljšavanje kao na primjer Č1490, Č1590... [1]



Slika 11. Osovinica izrađena ovom vrstom čelika [10]

#### 2.4.1.10 Korozijski postojani čelici (nehrđajući čelici)

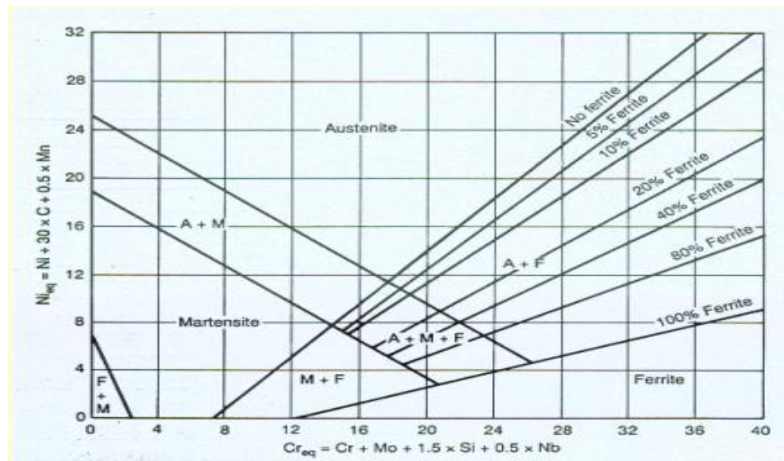
Što se tiče korozijski postojanih čelika na površini se stvara tanka gusta zaštitna prevlaka, odnosno taj proces se naziva pasiviranje. Na intenzitet pasivacije čelika najviše utječe udio legirnih elemenata poput nikla, molibdena, wolframa, titana i aluminija, a prije svega maseni udio kroma. Svi ti legirni elementi trebaju biti otopljeni u kristalu mješancu željeza. Na korozijsku postojanost djeluje i maseni udio ugljika. Što je viši postotak ugljika, paralelno je veća opasnost od stvaranja karbida, i time se smanjuje čvrsta otopina na legirnim elementima. Maseni udio ugljika mora biti što više smanjen i može doseći smanjenje udjela i do 0,02%. Osim masenog udjela legirnih elemenata na stupanj pasivacije utječu i vrsta medija sa njegovim karakteristikama. [1]

Moraju biti ispunjena dva uvjeta da bi čelik bio korozijski postojan.

- 1. uvjet- čelik treba sadržavati barem 12% kroma i to u čvrstoj otopini
- 2. uvjet- homogena monofazna mikrostruktura [1]

U visokolegiranom Cr-čeliku djeluje prisutnost specijalnih karbida  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , pa na temelju izračuna masenog udjela ugljika u karbidu, ugljika ima 5,68%, dok kroma ima 94,32%. Time se dolazi do zaključka da za svakih 0,1% ugljika vezano je 1,66% kroma. Prema tome će u slučaju stvaranja karbida doći do sniženja % kroma što nije dovoljno za potpunu antikorozivnost i pojave druge faze karbida. Zbog toga korozijski postojai čelici trebaju sadržavati što manji %C, i što viši %Cr. Monofazna feritna mikrostruktura postiže se legiranjem s alfagenim elementima. Najjači alfageni element je Cr, a uz njega su i ostali kemijski elementi poput silicija, aluminija, molibdena, wolframa, titana i drugih. Za razliku od feritne, monofazna austenitna mikrostruktura postiže se legiranjem s gamagenim elementima. Najjači gamageni element je Ni, a uz njega su i ostali kemijski elementi poput kobalta, bakra, mangana i dušika. [1]

Strukturan Schaefflerov dijagram za gašeno stanje je dobar uvid za postizanje mikrostrukture. On pomaže u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja Cr-ekvivalenta i Ni-ekvivalenta. [1]



Dijagram 1. Schaefflerov strukturalni dijagram [11]

Iz dijagrama se jasno vidi da martenzitne i feritne čelike karakterizira visok maseni udio kroma, koji je veći od 12%, dok austenitne čelike karakterizira visok maseni udio nikla, koji je veći od 8%. Što se tiče ugljika, feritni i austenitni čelici ga imaju manje, otprilike manje od 0,1%.[1]

Korozivski postojani čelici se mogu podijeliti u nekoliko grupa:

- Cr-čelici- feritni martenzitni i martenzitno-karbidni, feritno-martenzitni
- Cr-Ni, Cr-Ni-Mo i Cr-Mn- austenitni, feritni, martenzitni, austenitno-feritni, martenzitno-feritni, austenitno-martenzitno-feritni [1]

Danas postoje i novije vrste čelika koje su dobivene modificiranjem mikrostrukture i sastava: superferitni čelici s vrlo malim udjelom ugljika i malim udjelom nečistoća, austenitno s vrlo niskim udjelom ugljika, austenitni legirani s dušikom, niskougljični martenzitni te duplex čelici sa više od 40% ferita. [1]

#### 2.4.1.11 Čelici za rad pri povišenim temperaturama

Čelici imaju prednost u odnosu na ostale materijale, prvenstveno zbog toga što imaju temperaturu tališta relativno visoku u odnosu na kemijske elemente kao na primjer aluminija, bakra i njihovih legura ili na polimerne materijale. [1]

Pojave pri povišenim i visokim temperaturama vezanim uz mehanička svojstva:

- pojava puzanja
- sniženje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, modula elastičnosti
- povećanje istežljivosti
- suženje poprečnog presjeka i žilavosti
- sniženje dinamičke izdržljivosti [1]

Razlikujemo 4 osnovne podskupine čelika s obzirom na temperaturno područje:

- ugljični (nelegirani) čelici
- niskolegirani čelici
- visokolegirani martenzitni čelici
- visokolegirani austenitni čelici [1]

Visokočvrsti čelici također spadaju u konstrukcijske čelike, njihova oznaka je S od engleske riječi *strenght* što znači čvrsto. O visokočvrstim čelicima će biti riječ u nastavku, pošto je tema završnog rada- „Svojstva i primjena visokočvrstih čelika“.

#### 2.4.2 Alatni čelici

Alatni čelici služe za izradu alata kojima se obrađuju i oblikuju metalni ili nemetalni materijali.

Najčešći primjeri alata su:

- alati za OOČ (obradu odvajanjem čestica)- tokarski i blanjački noževi, svrdla, glodala, pile, turpije...
- alati za rezanje i hladno oblikovanje metala- škare, štance, sjekači, čekići, kalupi za duboko vučenje, naprave za savijanje...
- alati za toplo oblikovanje metala- ukovnji, kokile, kalupi za prešanje, kalupi za toplo vučenje...
- alati za oblikovanje nemetala- kalupi za prešanje keramike, polimera, kalupi za injekcijsko prešanje
- mjerni alati- kalibri, pomična mjerila, kutnici, mikrometri... [1]

Kod alatnih čelika se zahtijevaju i posebna svojstva kao na primjer visoka tvrdoća, visoka otpornost na trošenje, visoka tvrdoća, dobro ponašanje kod toplinske obrade i dr. Zbog svih tih svojstava, ova skupina čelika ima visoki maseni udio ugljika, i to viši od konstrukcijskih čelika. [1]

Najčešće su alatni čelici zakaljeni i popušteni u toplinski obrađenom stanju. Isporučuju se u hladno vučenom, toplo valjanom, kovanom, lijevanom stanju u obliku traka, ploča i šipki. [1]

S obzirom na kemijski sastav, ovi čelici mogu biti:

- nelegirani
- niskolegirani
- visokolegirani [1]

Alatni čelici se dijele prema radnoj temperaturi na podskupine:

- alatnih čelika za hladni rad (radna temp. je  $< 200^{\circ}\text{C}$ )
- alatnih čelika za topli rad (radna temp. je  $> 200^{\circ}\text{C}$ )
- brzoreznih čelika [1]



*Slika 12. Svrkla od alatnih čelika [12]*

#### **2.4.2.1 Alatni čelici za hladni rad**

Alatni čelici za hladni rad su najčešće niskolegirani ili nelegirani i primjenjuju se do radnih temperatura 200°C.

Nelegirani alatni čelici za hladni rad sadrže od 0,5 do 1,3% ugljika. Što imaju viši sadržaj ugljika, to su svojstva bolja, odnosno tvrdoća je viša, dok je žilavost niža. Ova skupina čelika ima malu prokaljivost i time bolju žilavost jer se kaljenjem postiže martenzitna mikrostruktura. Kale se s relativno niskih temperatura austenitiziranja u vodi i nisko se popuštaju, do 200°C. Međutim, osjetljivi su na pregrijavanje prilikom austenitiziranja pa se može javiti pukotina prilikom gašenja u vodi. [1]

Prednost im je ta što se lakše obrađuju odvajanjem čestica od bilo kojih drugih alatnih čelika. Još jedna prednost je ta što su dosta jeftini, a proizvode su i u velikom asortimanu dimenzija.

Vrste ovih čelika su: Č1540, Č1840, Č1940... [1]

Niskolegirani alatni čelici za hladni rad su čelici kojima je osnovni cilj povećanje prokaljivosti i dobivanje kvalitetnih karbida.

Njihova svojstva su:

- osrednja otpornost na trošenje i žilavost
- mala otpornost na popuštanje [1]

Podskupine niskolegiranih alatnih čelika za hladni rad su:

- visokouglični W-V čelici
- nisko i osrednjeuglični W-Cr-V čelici
- niskolegirani Cr-čelici
- niskolegirani Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelici [1]

Visokolegirani alatni čelici za hladni rad imaju legirni element koji se koristi više od 5%, a to je krom. Osim kroma, sadrže i druge kemijske elemente poput volframa, molibdena i vanadija. Krom je vrlo važan kemijski element zato što dovodi do stvaranja karbida  $(FeCr)_3C$ . Vrste ovih čelika su: Č4756, Č4150, Č4173. [1]

### 2.4.2.2 Alatni čelici za topli rad

Alatni čelici za topli rad trebaju imati zahtjev na jedno vrlo važno svojstvo, a to je dobra otpornost na popuštanje, zbog toga što su podvrgnuti vrlo visokim radnim temperaturama, višim od 200°C. [1]

Međutim, otpornošću na popuštanje se javljaju loša mehanička svojstva poput sniženja tvrdoće, promjene mikrostrukture te toplinski umor.

Kod nekih alatnih čelika za topli rad se moraju postaviti i sljedeći dodatni zahtjevi:

- otpornost na udarno opterećenje- žilavost
- otpornost na pojavu plastičnih deformacija- dovoljna granica tečenja
- otpornost na visokotemperaturnu koroziju
- otpornost na trošenje [1]

Otpornost na popuštanje i ostala svojstva čelika za topli rad postižu se prikladnim legiranjem. Što ima niži udio ugljika, to će biti i bolja žilavost i dobra otpornost na toplinski umor. Kemijski elementi poput volframa, molibdena, kroma i vanadija omogućuju stvaranja karbida pa se povisuju svojstva poput otpornosti na trošenje i otpornosti na popuštanje. Volfram povisuje tvrdoću i čvrstoću, dok ostala tri navedena kemijska elementa povisuju prokaljivost. Nikal i silicij također imaju svoje uloge kod ovih vrsta čelika. Nikal povećava žilavost i prokaljivost, a silicij služi za poboljšanje dinamičke izdržljivosti. [1]

Alatni čelici za topli rad svrstavaju se prema sastavu i području primjene u tri skupine:

- Niskolegirani čelici za ukovnje
- Visokolegirani čelici s oko 5% kroma i 1 do 3% molibdena za kalupe za tlačni lijev
- Visokolegirani W-Cr-V čelici za kalupe za tlačni lijev [1]

### 2.4.2.3 Brzorezni čelici

Brzorezni čelici su čelici legirani s jakim karbidotvorcima poput kroma, volframa, vanadija, molibdena koji s povišenim udjelom ugljika 0,7 do 1,3% stvaraju slobodne karbide postojane i pri višim temperaturama. Zbog takvog sastava i mikrostrukture odlikuje se otpornošću na trošenje i otpornošću na popuštanje pri temperaturama 500 do 600°C, ali imaju isto tako i malu žilavost. Sa tim svojstvima mogu primjenjivati rezne alate koji rade velikim brzinama rezanja. Ovi čelici su vrlo skupi zbog velikog broja legiranih elemenata. [1]

Vrste brzoreznih čelika su:

- čelici s 18% W
- čelici s 12% W
- čelici s 10% W
- W-Mo-čelici
- Mo-čelici [1]

## 3. Konstrukcijski visokočvrsti čelici

### 3.1 Osobine visokočvrstih čelika

Visokočvrsti čelici su čelici koji spadaju u skupinu konstrukcijskih čelika. Napredni visokočvrsti čelici su prvenstveno čelici sa granicom razvlačenja većom od 500 MPa i složene mikrostrukture sa različitim fazama poput ferita, martenzita, bainita i zaostalog austenita. Neki tipovi naprednih visokočvrstih čelika imaju veću sposobnost strdnjavanja koje rezultira ravnotežu čvrstoće i duktilnosti ravnomyjnije od konvencionalnih čelika. Mnogi su napredni visokočvrsti čelici razvijeni za smanjenje tjelesne težine, pri čemu veća čvrstoća omogućuju smanjenje pritiska, uz održavanje dovoljne formabilnosti za postizanje uspješnog utiskivanja. Tipične primjene AHSS uključuju ploče s rotirajućim pločama, B-stupove, A-stupove i krovne tračnice. Većina od njih su strukturne komponente koje apsorbiraju energiju, a koriste se za povećanje razine zaštite od udara vozila i smanjenje upada u odjeljak za stanare. [13]

Napredni visokočvrsti čelici su relativno novi materijali, a dosljedna nomenklatura nije bila dostupna sve dok *Ultra-Light Steel Automotive Body-Advanced Vehicle Concept* (ULSAB-AVC) nije primjenjivao novi napredni standard za prepoznavanje čelika visoke čvrstoće. Standard specificira čvrstoću popuštanja i krajnju čvrstoću rastezljivosti. U skladu s tim napredni visokočvrsti čelici su definirani sustavom: XX aaa/bbb, gdje je XX- tip čelika, aaa-minimalna čvrstoća popuštanja i bbb-minimalna krajnja čvrstoća rastezljivosti. [13]

Kao primjer klasifikacija DP 500/800 odnosi se na dvostruku fazu čelika s 500 MPa minimalne čvrstoće popuštanja te 800 MPa minimalne krajnje čvrstoće rastezljivosti. Oznaka razreda čelika je prikazana u tablici. [13]

Da bi se mogla postići najviša vrijednost granice razvlačenja ( $R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$ ) potrebno je postići kombinaciju različitih načina očvršnuća:

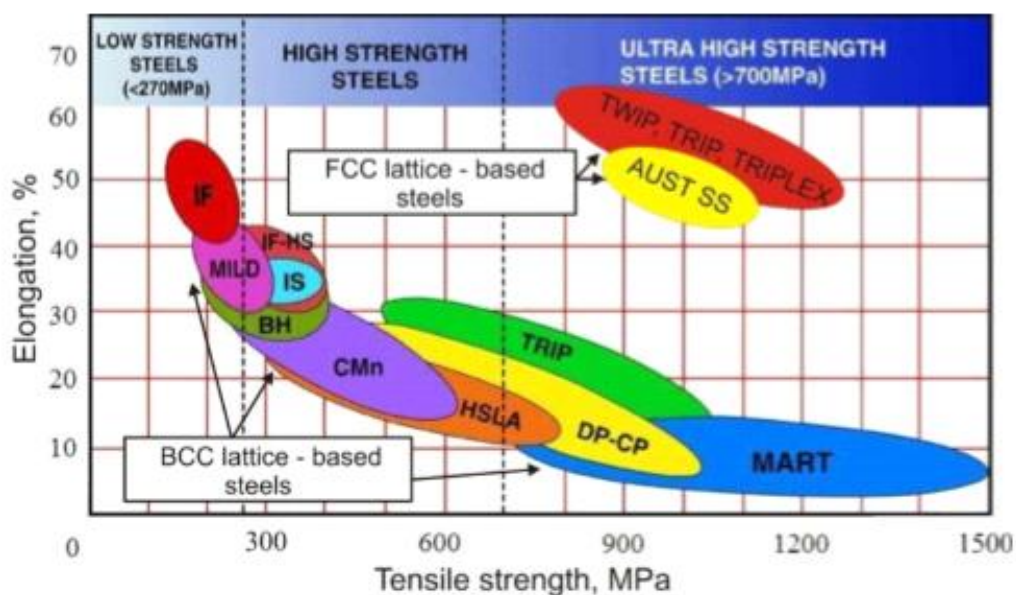
- usitnjenjem zrna
- martenzitnom transformacijom
- precipitacijom (dozrijevanjem ili starenjem)

povezano s deformacijom austenita. [1]

Pored postizanja visoke vlačne čvrstoće i granice razvlačenja visokočvrsti čelici moraju posjedovati i visoku žilavost, visoku dinamičku izdržljivost, otpornost na koroziju, čvrstoću pri povišenim i visokim temperaturama, potpunu prokaljivost (95% martenzita u jezgri), laku obradljivost odvajanjem čestica, sposobnost zavarljivosti i toplinske obradbe. [14]

Kada se postiže visoka vlačna čvrstoća, ona obično nosi sa sobom neka svojstva koja nisu poželjna kao na primjer sniženje plastičnosti te otpornost na krhki lom. Omjer granice razvlačenja i vlačne čvrstoće je veći, („plastična rezervna“ - svojstvo pri kojem u slučaju preopterećenja prvo dolazi do plastične deformacije, a ne do iznenadnog loma). Pri razvoju novih materijala obično se jedno svojstvo žrtvuje na račun drugog. Tako rast čvrstoće u većini slučajeva uzrokuje pad istežljivosti- vidi sliku 13. [14]





Slika 13. Vrste čelike i odnos čvrstoće i istezljivosti [13]

Glavni parametri konstrukcijske čvrstoće su:

- vlačna čvrstoća  $R_m$
- granica razvlačenja  $R_p$
- žilavost KV
- prijelazna temperatura žilavosti
- pukotinska žilavost  $K_{IC}$  [15]

U pogledu mikrostrukturnih zahtjeva nastoji se dobiti sitnozrnatu homogenu mikrostrukturu uz izbjegavanje lokalnih heterogenosti (makrosegregacije, kristalne segregacije, uključci). Heterogenost u atomarnom i submikroskopskom području je poželjna radi jednoličnog usporavanja gibanja dislokacija. [14]

Ovime se želi reći da broj, odnosno gustoća dislokacija ima značajan utjecaj na čvrstoću materijala te se maksimalne vrijednosti čvrstoće postižu za izrazito mali broj dislokacija (što je iznimno teško postići) ili za vrlo veliki broj (otprilike  $10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$ ). Vidi dijagram 2. [15]



*Dijagram 2. Ovisnost čvrstoće materijala i gustoće dislokacija [15]*

Čelici iz ove skupine se na osnovu vrijednosti  $R_{p0,2}$  mogu podijeliti na:

- čelike visoke čvrstoće:  $R_{p0,2} = 750 - 1500 \text{ N/mm}^2$
- ultračvrste čelike:  $R_{p0,2} > 1500 \text{ N/mm}^2$

Ultračvrsti čelici kojima je  $R_{p0,2} > 1500 \text{ N/mm}^2$  se mogu podijeliti u nekoliko skupina:

- čelici za poboljšavanje koji se dijele u dvije podskupine: niskolegirani niskopopušteni čelici i visokolegirani Cr-Mo-V visokopopušteni čelici
- termomehanički obrađeni čelici
- korozijski postojani precipitacijski očvrtnuti čelici
- čelici "maraging"
- hladnom deformacijom očvrtnuti nelegirani i niskolegirani čelici

### **3.2 Niskolegirani niskopopušteni čelici**

Niskolegirani niskopopušteni čelici su čelici koji kao što i sam podnaslov govori legirani sa elementima kojih imaju vrlo mali maseni udio, a od kojih su najznačajniji silicij i nikal te kombinacija kroma, molibdena i vanadija. Glavna zadaća silicija je da pomiče područje niskotemperaturne krhkosti k nešto višim temperaturama, preko  $400^\circ\text{C}$ . Silicij također omogućuje povišenje  $R_{p0,2}$  popuštanjem pri temperaturi oko  $300^\circ\text{C}$ . Čelici koji ne sadržavaju silicij, ali pritom imaju kemijske elemente poput nikla, kroma, molibdena i vanadija imaju povišenu žilavost. Da bi se postigla dovoljna žilavost na lom i dovoljna dinamička izdržljivost, potrebna je dobra čistoća čelika. [1,16]

Tablica 1. Niskolegirani niskopopušteni čelici - mehanička svojstva i kemijski sastav [16]

Oznaka čelika	Kem. Sastav, %	Toplinska obrada			Mehanička svojstva			
		$\vartheta_A$ , °C	gašenje	$\vartheta_F$ , °C	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup> sred.	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> min.	$A_5$ , % min.	$KU_{DVM}$ , J min.
41SiNiCrMoV7-5	0,41 C, 0,8 Cr, 0,4 Mo, 0,1 V,...	890-910	ulje	300	1800	1600	6	27
36NiCrMoV7-3	0,36 C, 0,35 Mo, 0,1 V,...	850-870	ulje	200	1800	1500	6	30
30CrMoV9	0,3 C, 0,25 Mo, 0,15 V,...	850-870	ulje, voda	230	1980	1640	10	35
30NiCrMnSi6-4	0,3 C, 1,15 Mn, 1,05 Si,...	900	ulje	250	1850	1600	13	60

### 3.3 Visokolegirani Cr-Mo-V viskopopušteni čelici

Visokolegirani viskopopušteni čelici su čelici koji su poznati kao i alatni čelici za topli rad. Maseni udio legiranih elemenata je nešto veći u odnosu na niskolegirane niskopopuštene čelike. Sadrže nekoliko legiranih elemenata poput silicija, kroma, molibdena i vanadija. Njihov udio iznosi: oko 5% kroma, od 1,3 do 2% molibdena, oko 1% silicija te od 0,4 do 1% vanadija. Kod ovih čelika dolazi do raspada zaostalog austenita i izlučivanje karbida kod temperatura između 500 i 550°C. Za posljedicu raspad zaostalog austenita te izlučivanje karbida ima povišenje tvrdoće. Ova vrsta čelika je dobra zbog toga što dolazi do potpune prokaljenosti i kod nešto većih dimenzija poput 300 mm. [1,16]

Tablica 2. Visokolegirani viskopopušteni čelici - mehanička svojstva i kemijski sastav [16]

Oznaka čelika	Kem. Sastav, %	Toplinska obrada			Mehanička svojstva			
		$\vartheta_A$ , °C	gašenje	$\vartheta_F$ , °C	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup> max.	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> max.	$A_5$ , % min.	$KU_{DVM}$ , J min
X41CrMoV5-1	0,41 C, 0,4 V, 0,12 Nb,...	1020-1050	ulje, zrak, topla kupka	550-650	1900	1600	6-8	24-34
X40CrMoV5-1	0,40 C, 0,1 V,...	1020-1060	ulje, zrak, topla kupka	550-650	1960	1650	6-8	24-34

### 3.4 Termomehanički obrađeni čelici

Kombinacijom postupaka oblikovanja deformiranjem i toplinskih obradi kaljenja i izotermničkog poboljšavanja postojećih sastava čelika, moguće je dobiti istovremenu visoku granicu razvlačenja i čvrstoću uz relativno dobru plastičnost (duktilnost), odnosno visoku sigurnost od krhkog loma. [1,16]

Deformiranje se može odvijati na tri načina:

- prije transformacije mikrostrukture (termomehanička obrada)
- za vrijeme transformacije mikrostrukture (termomehanička obrada)
- nakon faznih pretvorbi (mehanotermska obrada) [1,16]

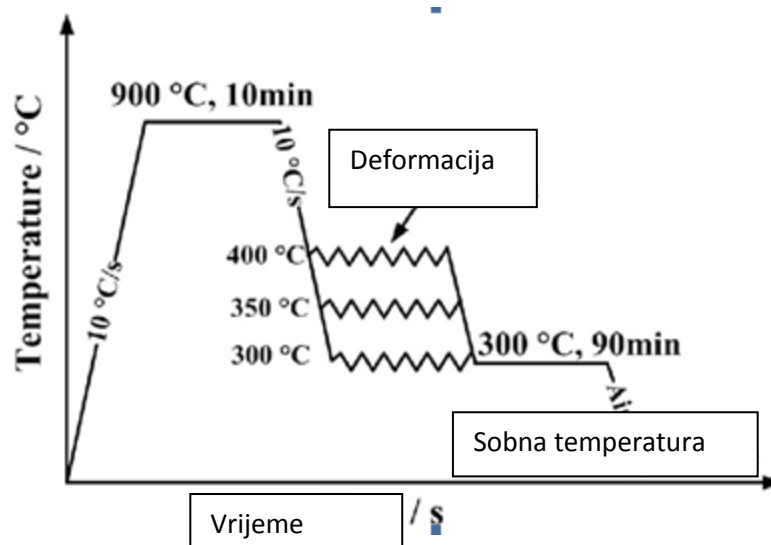
Postoji nekoliko vrsta termomehaničkih ili mehanotermičkih obrada:

- "Ausforming" postupak
- "TRIP" postupak
- "Perliforming"
- "Isoforming"
- "Marforming" [1,16]

Termomehaničkom obradom kaljivih čelika dolazi do očvrnuća i to zbog:

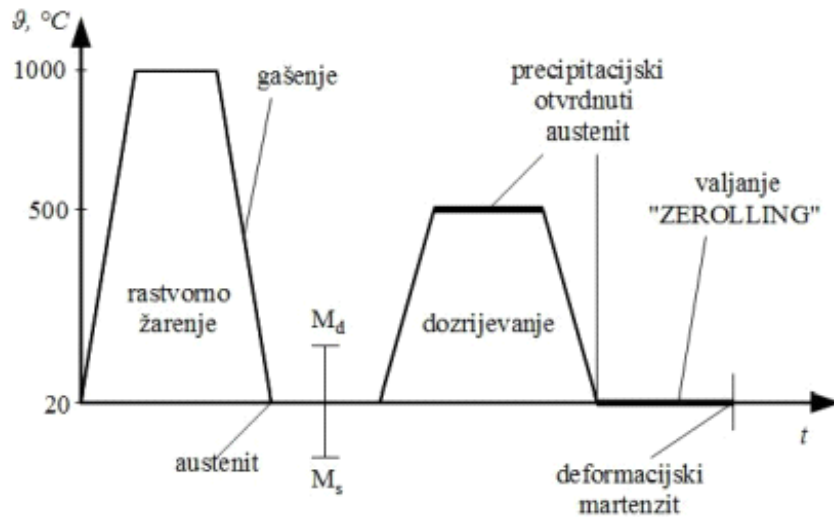
- povišenja gustoće dislokacija pri oblikovanju austenita i pri njegovoj pretvorbi u martenzit
- promjene sastava i morfologije martenzita
- stvaranja razgranate mreže granica podzrna u toplo deformiranom austenitu
- izlučivanja sitnih jednolično raspoređenih karbida tijekom popuštanja [1,16]

"Ausforming" postupak je postupak termomehaničke obrade koji se sastoji od oblikovanja metastabilnog austenita plastičnim deformiranjem pri konstantnoj temperaturi. Za ovaj postupak su prikladni čelici koji imaju dulje vrijeme inkubacije, odnosno područja tromosti metastabilnog austenita na pretvorbu (područja perlita i bainita). Također se za ovaj postupak koriste 1 ili više karbidotvoraca i to npr. krom, molibden, vanadij, wolfram. Čelik se hladi do temperature između 350 i 600°C, odnosno do temperature gdje je vrijeme inkubacije najdulje. Nakon toga se deformira valjanjem i to plastično, i na kraju se se pretvara u martenzit, odnosno gasi. Deformacija se vrši ispod temperature rekristalizacije. Postupkom ausforming dobiju se visoka lomna žilavost te povišena dinamička izdržljivost. Jedini nedostatak postupka je povišena anizotropnost strukture i svojstava. Ovi čelici se primjenjuju za kamionske opruge, torzijske opruge, tijela ventila, otkovke za automobilske dijelove itd. [1,16]



Dijagram 3. Ausforming postupak [17]

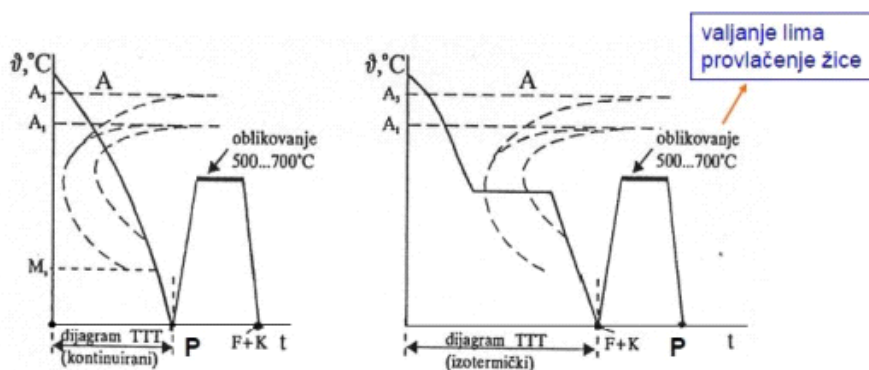
"TRIP postupak" je sličan ausformingu, a primjenjuje se za austenitne čelike precizno reguliranog sastava (tzv. TRIP čelici) kod kojih je moguća pretvorba prethodno precipitacijski otvrdnutog austenita u deformacijski inducirani martenzit valjanjem pri okolišnoj temperaturi (tzv "zerolling" valjanje). [1,16]



Dijagram 4. TRIP postupak [16]

"Perlifforming" postupak

Riječ je o mehanotermičkoj obradi jer se deformacija perlita odvija nakon kontinuirane ili izotermičke pretvorbe iz austenita. Postupak se provodi u području perlita, a do očvrnuća dolazi deformiranjem u temperaturnom rasponu 500 – 700 °C (slika 16). Strukturu perlita oblikovanog na tim temperaturama karakterizira nestanak lamela cementita (prelaze u globule) te nastanak sitne poligonalne podstrukture ferita u zrnima reda veličine 1 μm. Postupak je primjenjiv za nelegirane i niskolegirane podeutektoidne i eutektoidne čelike. Perlifforming utječe na prelaznu temperaturu čelika i osigurava višu  $R_{p0,2}$  od obične toplinske obrade, uz zadovoljavajuću istezljivost A. [1,16]

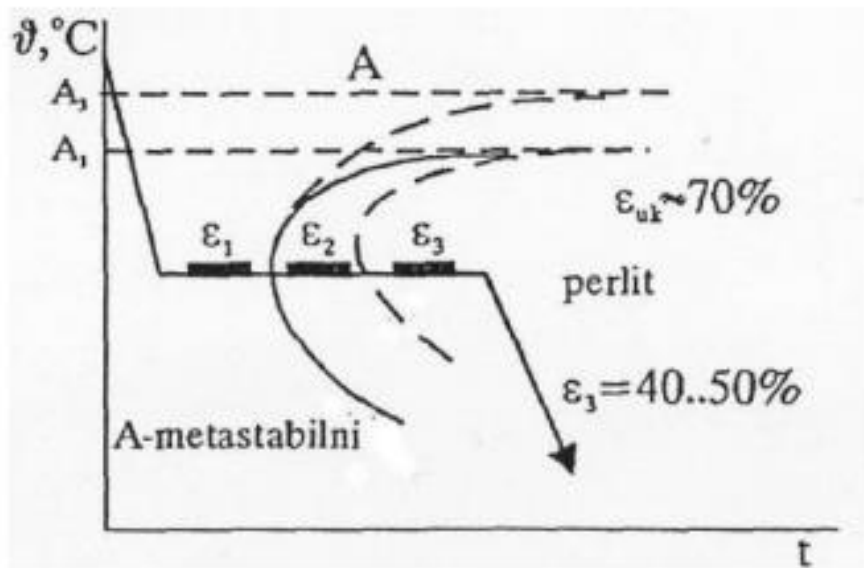


Dijagram 5. Perlifforming postupak [16]

"Isoforming" postupak je postupak koji se odvija pri izotermi i to između 500 i 700°C, prije i za vrijeme fazne pretvorbe austenita u perlit. Dobije se vrlo sitnozrnata perlitna mikrostruktura koja je nastala rekristalizacijom austenita. [1,16]

"Marforming" postupak

Ovim postupkom deformira se martenzitna mikrostruktura i to na dva načina: ili između dva popuštanja zakaljenog čelika – tzv. deformacijsko popuštanje, ili tijekom popuštanja (dozrijevanja ili starenja) zakaljenog čelika – tzv. dinamičko deformacijsko starenje (slika 18). U ovom slučaju martenzit je otvrdnut deformacijom, nije njome i nastao kao kod TRIP postupka. Postiže se znatno povišenje granice razvlačenja, uz samo malo sniženje istezljivosti. Za provođenje ovog postupka prikladni su čelici sa 0,3 – 0,4 %C kod kojih u kaljenoj strukturi prevladava masivni martenzit nad igličastim. [1,16]



Dijagram 6. "Marforming" postupak [16]

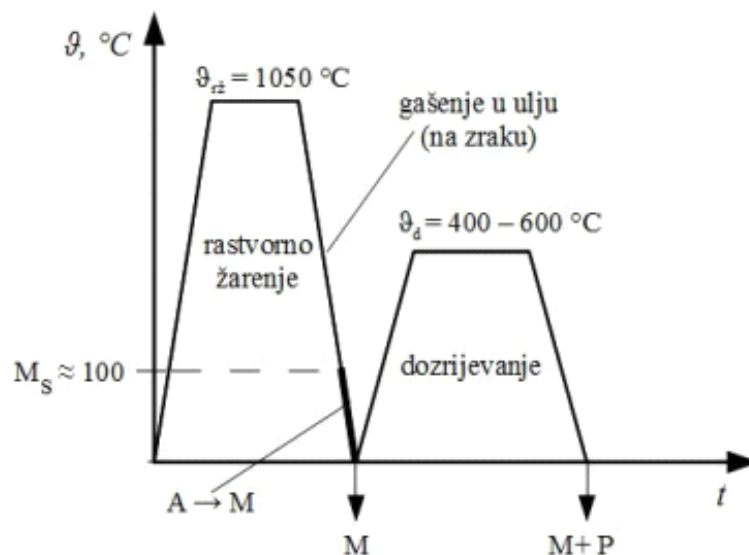
### 3.5 Korozijski postojani precipitacijski očvrtnuti čelici

Korozijski postojani precipitacijski očvrtnuti čelici (eng. Precipitation Hardenable ili Precipitation Hardened) su čelici kojima se željela postići što viša granica razvlačenja, ali istovremeno uz zadržavanje visoke korozijske postojanosti. Da bi se dobilo što veće očvrtnuće, potrebna su dva nužna uvjeta- što niži maseni udio ugljika te što viši stupanj legirnosti, a veliko očvrtnuće se postiže preko precipitacije intermetalnih spojeva. [1,16]

Prije nego što se vrši precipitacija, razlikuju se nekoliko vrsta očvrnutih čelika i to zbog njihove mikrostrukture. Ti čelici su:

- martenzitni PH-čelici
- poluaustenitni PH-čelici
- austenitni PH-čelici [1,16]

Martenzitni PH-čelici imaju jako mali maseni udio ugljika, i to oko 0,05%, ali usprkos tome sadrže visoke udjele legirnih elemenata- maseni udio kroma je u granicama 14 i 17%, nikla od 4 do 6%, te su dodaci bakar (oko 3%), molibden i niobij. Kao što je već napomenuto, očvrnuti čelici služe da bi se postigla što veća granica razvlačenja uz što veću korozivsku postojanost, a da bi se to postiglo, martenzitni čelici se najprije trebaju žariti kod temperature od 1050°C, nakon toga se gasiti u ulju ili na zraku te se umjetno dozrijevaju kod nešto nižih temperatura, od 400 do 600°C. Dozrijevanjem kod nižih temperatura se izlučuju precipitati bakra i to unutar martenzita stvorenog gašenjem, a mala količina zaostalog austenita transformira se u martenzit. Postizive vrijednosti  $R_p$ -a, odnosno granice razvlačenja sežu do 1350 N/mm<sup>2</sup>.



Dijagram 7. Toplinska obrada martenzitnih PH-čelika [16]

Poluaustenitni PH-čelici su čelici koji imaju vrlo sličan sastav kao i martenzitni PH-čelici. Sadrže maseni udio ugljika u granicama od 0,05 do 0,1%, od 13 do 17% kroma, te maseni udio nikla u granicama od 7 do 9%. Od dodataka najviše se upotrebljavaju molibden, titan, aluminij, vanadij te dušik. Ova vrsta čelika ima austenitno-feritnu mikrostrukturu u gašenom stanju koja je dobro obradljiva odvajanjem čestica. Kad se gašenje završi austenit se pretvara u martenzit na nekoliko načina:

- Hlađenjem s temperature žarenja (pri temperaturi od 920 do 960°C ili 720...760°C)- nastanak sekundarnog martenzita
- Hladnim oblikovanjem- nastanak deformacijskog martenzita
- Dubokim hlađenjem [1,16]

Dobivena martenzitno-feritna mikrostruktura sa niskim udjelima zaostalog austenita, podvrgava se dozrijevanju pri temperaturama od 480 do 600°C. Postizive vrijednosti  $R_p$ -a sežu do 1080 N/mm<sup>2</sup>. [1,16]

Tablica 3. Mehanička svojstva poluaustenitnih PH-čelika [16]

Oznaka čelika	Dozrijevanje $\vartheta_d, ^\circ\text{C} / \text{t, h}$	$R_m, \text{N/mm}^2$	$R_{p0,2}, \text{N/mm}^2$	$A_5, \%$
X7CrNiAl17-7	510/1	1650	1550	6
X6CrNiTi17-7	455/1	1850	1800	2
X8CrNiMo17-5	500/3	1300	1060	12
X10CrCoMoV14-14-5	2 x 370/2	2050	1510	10

Austenitni PH-čelici su niskougljični čelici sa manje od 0,1% C, visokolegirani s 14-18% Cr i sa više od 25% Ni, uz dodatak jednog ili više legiranih elemenata: Mo (1-2,5%), Ti (<2%), Cu (<3%), Al (<0,35%), Nb(<0,45%), P (<0,25%), V, Mn, Si i N. Toplinska obrada sastoji se od rastvornog žarenja pri 950 – 1200 °C i dozrijevanja pri 700 – 800 °C u trajanju od 15 do 20 sati. Kako ovdje nema pretvorbe u martenzit postiže se skromno očvrnuće ( $R_{p0,2}$  do 900 N/mm<sup>2</sup>) i to samo precipitacijom faza tijekom dozrijevanja. To su pretežno faze Ni<sub>3</sub>Al i Ni<sub>3</sub>Ti, a u manjoj mjeri  $\sigma$ -faze (FeCr, FeMo), Fe<sub>2</sub>Mo, Fe<sub>36</sub>Cr<sub>12</sub>Mo<sub>10</sub>, Cr<sub>2</sub>N, VC i VN ovisno o sastavu čelika. Unatoč postojanju precipitata, austenitni čelici su otporni na opću koroziju nakon dozrijevanja, ali nisu otporni na napetosnu koroziju. Tablica 4. sadrži parametre toplinske obrade i svojstva nekih austenitnih PH-čelika. [1,16]

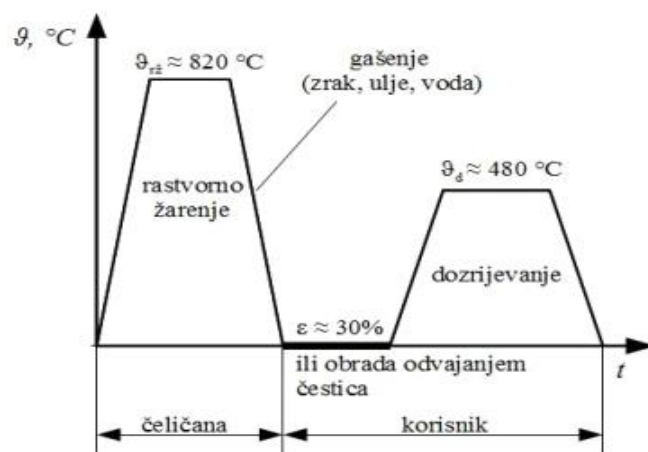
Tablica 4. Parametri toplinske obrade i mehnička svojstva austenitnih PH-čelika [16]

Oznaka čelika	Toplinska obrada		Mehanička svojstva			
	$\vartheta_{iz}, ^\circ\text{C}$	$\vartheta_d, ^\circ\text{C} / \text{t, h}$	$R_m, \text{N/mm}^2$	$R_{p0,2}, \text{N/mm}^2$	$A_5, \%$	$KU_{DVM}, \text{J}$
X5NiCrTi26-15	900	725/16	1000	700	25	110
X30CrNiMn19-9-4	1120	730/16	1180	880	19,5	-
X42CrNiMn	1180	800/9	950	620	15	30

### 3.6 Čelici „Maraging“

Čelici "maraging" su dobili ime od engleskih riječi-"*martensit aging*" što u prijevodu znači dozrijevanje martenzita. Po sastavu, ova skupina visokočvrstih čelika je niskougljična sa masenim udjelom ugljika manjim od 0,3%. Isto tako su visokolegirani u ternarnom sustavu i to: Fe-Ni-Co ili podsustavima Fe-Ni-Cr i Fe-Co-Cr sa dodacima molibdena, titana, aluminija i kobalta i u krajnjim slučajevima bora i cirkonija. Čelici "maraging" sadrže otprilike 18% nikla, od 7 do 14% kobalta, od 3 do 6% molibdena, do 2% titana i do 0,2% aluminija. [1,16]





Dijagram 8. Opći dijagram postupka toplinske obrade čelika maraging [1]

Nakon rastvornog žarenja do temperature od  $820^\circ\text{C}$ , čelik se intenzivno gasi u vodi, u ulju ili na zraku gdje se dobije prezasićeni masivni nikel-martenzit. Prva obrada, obrada gašenja se provodi najčešće u čeličani. Kada postoji takvo stanje, izratku se oblikuje željeni konačni oblik i konačne dimenzije zbog dobre obradljivosti odvajanjem čestica i zbog plastične deformabilnosti. Nakon toga se vrši dozrijevanje u nikel-martenzitnu do otprilike  $480^\circ\text{C}$  gdje se precipitira niz fino dispergiranih intermetalnih spojeva. [1,16]

Faze visoke tvrdoće sprečavaju gibanje dislokacija i povisuju granicu razvlačenja i preko  $2200 \text{ N/mm}^2$  i vlačnu čvrstoću od  $1900$  do  $2900 \text{ N/mm}^2$ . Kod tako visokih vrijednosti granice razvlačenja (preko  $2200 \text{ N/mm}^2$ ) dolazi do povoljnih vrijednosti lomne žilavosti prema drugim čelicima što ima za negativno veliku otpornost na širenje pukotina u materijalu. [1,16]

Čelici "maraging" imaju bolja tehnološka svojstva u odnosu na ostale skupine ultračvrstih čelika. To su naročito:

- male deformacije pri toplinskoj obradi, a nema niti opasnosti od razugličenja i oksidacije
- laka obradljivost odvajanjem čestica i hladna deformabilnost nakon rastvornog žarenja
- dobra zavarljivost zahvaljujući niskim udjelima ugljika, fosfora i sumpora [1]

Čelici "maraging" se primjenjuju i kod konstrukcija i kod alata. Primjeri konstrukcijske primjene su: mehanički visokopterećeni dijelovi zrakoplova i helikoptera, dijelovi trkačkih automobila, dinamometri itd., a u alatnoj primjeni za kokile i ukovnje itd. [1,16]

Tablica 5. Mehanička svojstva "maraging" čelika [16]

Oznaka čelika	Toplinska obrada		Mehanička svojstva nakon dozrijevanja			
	Rastvorno žarenje $\vartheta_{\text{r}}$ , °C / t, h	Dozrijevanje $\vartheta_{\text{d}}$ , °C / t, h	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ , %	$KU_{DVM}$ , J
X2NiCoMo18-8-5	820/1	480/3	1920	1720	8	20
X2NiCoMo18-9-5	820/1	480/3	1960	1910	7	30
X2NiCoMoTi18-12-4	820/1	500/6	2350	2260	6	10



Slika 14. Dijelovi zrakoplova od "maraging" čelika [17]

#### 4. SSAB

SSAB je nordijsko-američki proizvođač čelika. SSAB nudi proizvode s dodanom vrijednošću i usluge razvijene u bliskoj suradnji sa svojim kupcima u cilju stvaranja jačeg, lakšeg i održivog svijeta. SSAB zapošljava radnike u više od 50 zemalja, te ima proizvodne pogone u Švedskoj, Finskoj i u SAD-u. Kao proizvođač specijalnih čelika visoke čvrstoće za industriju transporta i automobila, zajedničkim radom s dizajnerima i proizvođačima automobila pomaže u ispoštivanju novih i sve striktnijih zahtjeva poput smanjena težine vozila i CO2 emisija, povećanja troškovne učinkovitosti i poboljšanja odgovarajućih karakteristika materijala prilikom sudara. [15]

SSAB ima troškovno učinkovit i fleksibilan proizvodni sustav. Proizvodni pogoni SSAB-a u Švedskoj, Finskoj i SAD-u imaju godišnji kapacitet proizvodnje čelika od oko 8,8 milijuna tona. Tvrtka također ima kapacitet za obradu i završetak raznih proizvoda od čelika u Kini, Brazilu i mnogim drugim zemljama. U Švedskoj i Finskoj, proizvodnja je integrirana u proces visokih peći. U SAD-u elektroforezne peći koriste se za proizvodni proces na bazi otpadaka.[15]

Za najbolju primjenu i učinkovitost proizvoda, a temeljenim na prednostima što ih nudi Strenx ili ostale kompanije SSAB-a, svake godine dodjeljuje se nagrada pod imenom SWEDISH STEEL PRIZE. Tako je 2016. godine bio nagrađen šumski traktor kod kojeg su

izgrađeni svi visokopterećeni dijelovi uz primjenu visokočvrstih čelika. 2017. godine nagrađen je bio vagon za rasute terete kod kojeg su šasija i tovarni prostor izgrađeni od Strenx čelika. Specifično kod tog vagona je da je omogućen sustav pražnjenja vagona bez utroška energije i to isto tako zbog primjene visokočvrstih čelika. [18]



Slika 15. Vagon za rasute terete (nagrada Swedish steel prize 2017.godine) [15]

Seriya visokočvrstih čelika Strenx, u kojoj se nalaze čelici granice razvlačenja od 700-1300 N/mm<sup>2</sup>, prisutna je kod konstruiranja i proizvodnje visokopterećenih dijelova vozila, kranova, dizalica, viličara, strojeva itd. [15]

Čelici visoke čvrstoće načinjeni su termo – mehanički kontroliranim procesom valjanja, kojim se postižu ciljana mikrostrukturna svojstva, a također visoka čvrstoća, dobra žilavost i zavarljivost ovih čelika.[15]

U tablici 6. Navedeni su osnovni podaci o mehaničkim svojstvima Strenx čelika. [15]

NAZIV PROIZVODA	DEBLJINA PLOČE	GRANICA RAZVLAČENJA R <sub>p0,2</sub> , min [MPa]	VLAČNA ČVRSTOĆA R <sub>m</sub> , min [MPa]	PRODULJENJE A <sub>5</sub> , [%]	CET (za t=10mm)	UDARNI RAD LOMA K <sub>V</sub> , [J] Pri -40°C
Strenx 700	4-53	700	780-930	14	0,29	69
	53-100	650	780-930	14		
	100-160	650	710-900	14		
Strenx 900	4-53	900	940-1100	12	0,36	27
	53-100	830	880-1100	12		
Strenx 960	4-53	960	980-1150	12	0,38	40
	53-100	850	900-1100	10		
Strenx 1100	4-5	1100	1250-1550	8	0,36	27
	5-40	1100	1250-1550	10		
Strenx 1300	4-10	1300	1400-1700	8	0,42	27

Iz tablice je vidljivo da granica razvlačenja nije mnogo manja od vlačne čvrstoće, međutim treba uzeti u obzir da su ovo minimalne vrijednosti, a izmjerene mogu biti puno veće.

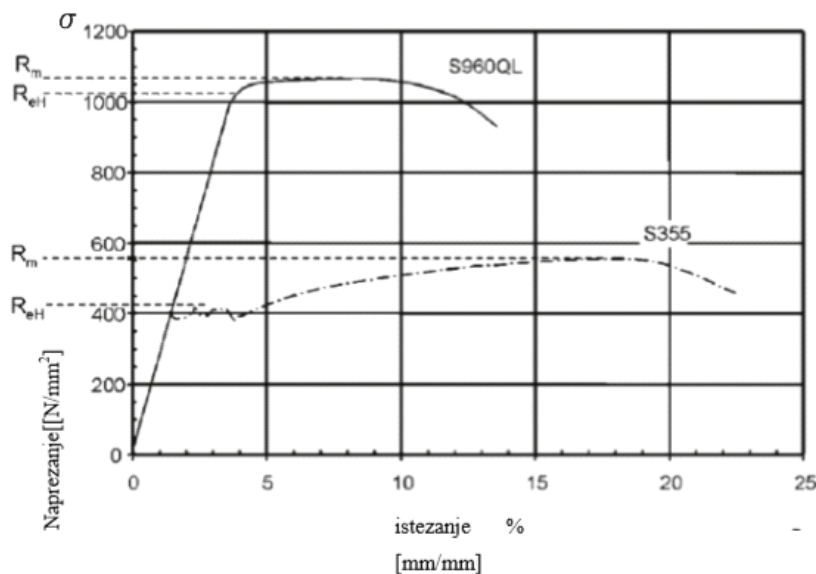
U tablici 7. navedeni su osnovni podaci o kemijskom sastavu pojedinih legura Strenx Čelika. [15]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr (max)	Cu (max)	Ni (max)	Mo (max)	B (max)
0,20	0,50	1,60	0,020	0,010	0,80	0,3	2,0	0,70	0,005

Iz tablice je vidljivo da najviše ima prisutnog nikla, mangana, molibdena, kroma i silicija, dok ostalih legiranih elemenata poput fosfora i sumpora, odnosno nečistoća, te broma i bakra ima mnogo manje. Maseni udio ugljika je 0,20%, što je ujedno i dobro jer ako ima masenog udjela manje od 0,25%, dobra je zavarljivost, pa se visokočvrsti čelici relativno dobro zavaruju.



Slika 16. Primjeri uporabe Strenx čelika [15]



Dijagram 9. Krivulja naprezanja-istezanja za obični i visokočvrsti čelik [15]

#### 4.1 Povijesni razvoj SSAB-a

SSAB je započeo razvoj 1878. godine. Kroz nekoliko godina biti će spomenute njegove najvažnije prekretnice u razvoju.

1878. - Željezara Domnarvet je postala operativna

1899. - U željezari Domnarvet započeta je proizvodnja trake

1913. - Željezara Domnarvet je odgovorna za 1/8 proizvodnje sirovog željeza

1914.-1919. - Prva tvornica je izgrađena s plamenicima, postrojenjima koksa, elektranama, mehaničkim radionicama, marinama, uredima i rezidencijama

1921. - Godišnja proizvodnja u željezari Domnarvet pala je za 21 000 tona zbog posljedica prvog svjetskog rata i recesije

1939. - Proizvodnja se godišnje temeljila na više od 200 000 tona

1941. - Odluka vlade o izgradnji Tackjärnverka u Luleåu, dvije peći su počele sa radom

1942. - Zaposlene su prve žene u željezari Domnarvet

1963. - Instalirana je prva linija za pocinčavanje, koja će otvoriti put za više rafiniranih proizvoda

1970. - Novo postrojenje za hladno valjanje kapaciteta od 700 000 tona je bilo spremno za korištenje

1972. - Proizvodilo se više od 500 000 tona u željezari Domnarvet

1999. - Dodijeljena je prva nagrada- SWEDISH STEEL PRIZE

2006. - Olof Faxander je došao kao novi predsjednik uprave SSAB-a i započeo sa radom i stvaranjem jedne tvrtke

2008. - Izgrađen je uređaj za pjeskarenje s velikim skladištem, kao i pokrenuta linija 4 u valjaonici

2010. - SSAB je preuzeo restrukturiranje i podijeljen je na tri zemljopisna područja poslovanja, EMEA, Americas i APAC.

2012. - Marka proizvoda DOMEX je proslavila 50 godina

2015. - STRENX- pokrenuta je nova marka za visokočvrste čelike [18]



*Slika 17. Proizvodnja visokočvrstih čelika u tvrtki SSAB [18]*

U tablici 8. Prikazane su pojedine vrste visokočvrstih čelika sa točnim nazivom koji se upotrebljavaju u SSAB-u sa njihovim minimalnim granicama razvlačenja

Točan naziv	Vrsta	Minimalna granica razvlačenja
Strenx 1300	Konstruktivski čelik iznimno visoke čvrstoće	1300 MPa
Strenx 1100	Konstruktivski čelik visoke čvrstoće	1100 MPa
Strenx 1100 MC	Toplo valjani konstruktivski čelik visoke čvrstoće	1100 MPa
Strenx 1100 CR	Hladno valjani konstruktivski čelik visoke čvrstoće	1100 MPa
Strenx 960	Konstruktivski čelik visoke čvrstoće	900 MPa
Strenx 900	Konstruktivski čelik visoke čvrstoće	900 MPa
Strenx 700	Konstruktivski čelik visoke čvrstoće	700 MPa
Strenx 650 MC	Toplo valjani konstruktivski čelik za hladno oblikovanje	650 MPa
Strenx 110 XF	Termomehanički valjani čelik za hladno oblikovanje	110 MPa
Strenx tube 700 MH	Napredni konstruktivski šuplji profil visoke čvrstoće	700 MPa
Strenx tube 900 MH	Napredni konstruktivski šuplji profil visoke čvrstoće	900 MPa
Strenx section 900	Napredni čelični dio visoke čvrstoće, hladno oblikovan	900 MPa

## 4.2 Vrste konstrukcijskih visokočvrstih čelika

### 4.2.1 Strenx 1300

Strenx 1300 je ultračvrsti konstrukcijski čelik sa minimalnom granicom razvlačenja od 1300 MPa. Posebnu primjenu ima kod konstrukcija za nošenje tereta gdje se postavljaju vrlo veliki zahtjevi na malu težinu.

Prednosti Strenx 1300 su:

- Dobra zavarljivost sa izvrsnom snagom i čvrstoćom
- Izuzetna konzistencija unutar ploče zajamčena bliskim tolerancijama
- Visoka otpornost na udarce koja osigurava dobru otpornost na prijelome
- Vrhunska savitljivost i kvaliteta površine

Strenx 1300 je dostupan u debljini ploče od 4 do 10 mm. Širine ovog čelika sežu do 2900 mm, dok duljine sežu do 14630 mm. [18]

U tablici 9. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 1300. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
4,0-10,0	1300	1400-1700	8

U tablici 10. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 1300. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr (max)	Cu (max)	Ni (max)	Mo (max)	B (max)
0,25	0,50	1,40	0,010	0,003	0,80	0,30	3,0	0,70	0,005

U tablici 11. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 1300. [18]

Debljina ploče (mm)	4.0-10.0
1300 E CET	0,43 (0,67)
1300 F CET	0,43 (0,67)



Slika 18. Primjena Strenx-a 1300 [18]



#### 4.2.2 Strenx 1100

Strenx 1100 je konstrukcijski čelik sa granicom razvlačenja minimalnom od 1100 MPa. Tipična primjena ove vrste čelika uključuje zahtjevne nosive konstrukcije. Unatoč svojoj čvrstoći, materijal je jednostavan za zavarivanje i savijanje.

Prednosti Strenx 1100 su:

- Dobra zavarljivost sa izvrsnom snagom i čvrstoćom
- Izuzetna konzistencija unutar ploče zajamčena bliskim tolerancijama
- Visoka otpornost na udarce koja osigurava dobru otpornost na prijelome
- Vrhunska savitljivost i kvaliteta površine

Strenx 1100 je dostupan u debljini ploče od 4 do 40 mm. Širine ovog čelika sežu do 3200 mm, dok duljine sežu do 14630 mm. [18]

U tablici 12. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 1100. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
4,0-4,9	1300	1250-1550	8
5,0-40,0	1100	1250-1550	10

U tablici 13. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 1100. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr (max)	Cu (max)	Ni (max)	Mo (max)	B (max)
0,21	0,50	1,40	0,020	0,005	0,80	0,30	3,0	0,70	0,005

U tablici 14. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 1100. [18]

Debljina ploče (mm)	4.0-4.9	5.0-7.9	8.0-14.9	15.0-40.0
1100 E CET	0,37 (0,57)	0,38 (0,58)	0,39 (0,62)	0,42 (0,73)
1100 F CET		0,40 (0,70)	0,40 (0,70)	0,42 (0,73)



Slika 19. Primjena Strenx-a 1100 [18]

### 4.2.3 Strenx1100 MC

Strenx 1100 MC je vruće valjani konstrukcijski čelik izrađen za hladno oblikovanje sa minimalnom granicom razvlačenja od 1100 MPa za lakše i jače konstrukcije. Daje nam izvrsnu točnost debljine i kvalitetu površine u odnosu na razinu čvrstoće. Tipične primjene obuhvaćaju širok raspon komponenata i dijelova kao što su zahtjevne nosive konstrukcije.

Strenx 1100 MC dostupan je u obliku reznih listova i to u debljinama od 3 do 8 mm, najveće širine može biti i do 1700 mm i duljine do 16 mm. [18]

U tablici 15. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 1100 MC. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
3,0-8,0	1100	1250-1450	7

U tablici 16. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 1100 MC. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Al (max)
0,15	0,50	1,8	0,020	0,005	0,015

U tablici 17. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 1100 MC. [18]

Debljina ploče	3.0-8.0
Tipični CET	0,33 (0,56)



Slika 20. Primjena Strenx-a 1100 MC [18]

#### 4.2.4 Strenx 1100 CR

Strenx 1100 CR je hladno valjani konstrukcijski čelik sa minimalnom granicom razvlačenja od 1100 MPa za teže i lakše strukture. Tipične primjene ovih vrsta čelika uključuju širok spektar komponenata i dijelova u najlakšim mogućim nosivim konstrukcijama. Isto tako je ova vrsta čelika dostupna u obliku reznog lima.

Strenx 1100 CR je dostupan u obliku lima sa debljinom ploče u granicama od 0,70 do 2,10 mm, širine do 1500 mm i duljine do 8 i pol metara. [18]

U tablici 18. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 1100 CR. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
0,70-2,10	1100	1300-1500	3

U tablici 19. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 1100 CR. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Al (max)	Nb+Ti (max)
0,16	0,40	1,8	0,020	0,010	0,015	0,10

U tablici 20. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 1100 CR. [18]

Debljina ploče	0,7-2,1
Tipični CET	0,30 (0,41)



Slika 21. Primjena Strenx-a 1100 CR [18]

#### 4.2.5 Strenx 960

Strenx 960 je konstrukcijski čelik sa garantiranom minimalnom granicom razvlačenja od 960 MPa, ovisno o debljini ploče. Uobičajene primjene su kod zahtjevnih nosivih konstrukcija.

Prednosti ove vrste čelika su:

- Dobra zavarljivost sa izvrsnom snagom i čvrstoćom
- Izuzetna konzistencija unutar ploče zajamčena bliskim tolerancijama
- Visoka otpornost na udarce koja osigurava dobru otpornost na prijelome
- Vrhunska savitljivost i kvaliteta površine

Strenx 960 je dostupan u debljini ploče koja se kreće u granicama od 4 do 100 mm. Širina ovog čelika doseže do 3350 mm, dok duljina doseže do 14630 mm ovisno o debljini ploče. [18]

U tablici 21. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 960. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
4,0-53,0	960	980-1150	12
53,1-100	850	900-1100	10

U tablici 22. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 960. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr (max)	Cu (max)	Ni (max)	Mo (max)	B (max)
0,20	0,50	1,60	0,020	0,010	0,80	0,30	2,0	0,70	0,005

U tablici 23. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 960. [18]

Debljina ploče (mm)	4.0-34,9	35,0-100,0
CET (CEV)	0,38 (0,58)	0,41 (0,67)



Slika 22. Primjena Strenx-a 960 [18]

#### 4.2.6 Strenx 900

Strenx 900 je konstrukcijski čelik sa garantiranom granicom razvlačenja do 900 MPa ovisno o debljini.

Strenx 900 je dostupan u debljini ploče koje se kreću od 4 do 100mm te je dostupan u rasponu debljine do 80mm.

Prednosti ove vrste čelika su:

- Dobra zavarljivost sa izvrsnom snagom i čvrstoćom
- Izuzetna konzistencija unutar ploče zajamčena bliskim tolerancijama
- Visoka otpornost na udarce koja osigurava dobru otpornost na prijelome
- Vrhunska savitljivost i kvaliteta površine [18]

U tablici 24. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 900. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
4,0-53,0	900	940-1100	12
53,1-100	830	830-1100	12

U tablici 25. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 900. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr (max)	Cu (max)	Ni (max)	Mo (max)	B (max)
0,20	0,50	1,60	0,020	0,010	0,80	0,30	2,0	0,70	0,005

U tablici 26. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 900. [18]

Debljina ploče (mm)	4,0-80,0	80,1-100,0
CET (CEV)	0,39 (0,58)	0,41 (0,63)

#### 4.2.7 Strenx 700

Strenx 700 je konstrukcijski čelik sa garantiranom granicom razvlačenja od 650 do 700 MPa ovisno o debljini. Tipične primjene ove vrste čelika su kod nosivih konstrukcija.

Strenx 700E je dostupan u debljini ploče koja se kreće u granicama od 4 do 160 mm, dok je Strenx 700F dostupan u debljini ploče u granicama od 4 do 130 mm.

Prednosti ove vrste čelika su:

- Dobra zavarljivost sa izvrsnom snagom i čvrstoćom
- Izuzetna konzistencija unutar ploče zajamčena bliskim tolerancijama
- Visoka otpornost na udarce koja osigurava dobru otpornost na prijelome
- Vrhunska savitljivost i kvaliteta površine [18]

U tablici 27. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 700. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
4,0-53,0	700	780-930	14
53,1-100	650	780-930	14
100,1-160,0	650	710-900	14

U tablici 28. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 700. [18]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
(max)	(max)	(max)	(max)	(max)	(max)	(max)	(max)	(max)	(max)
0,20	0,60	1,60	0,020	0,010	0,80	0,30	2,0	0,70	0,005

U tablici 29. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 700E. [18]

Debljina ploče (mm)	4,0-5,0	5,1-30,0	30,1-60,0	60,1-100,0	100,1-130,0	130,1-160
700E CET (CEV)	0,34 (0,48)	0,32 (0,49)	0,36 (0,52)	0,39 (0,58)	0,41 (0,67)	0,43 (0,73)

U tablici 30. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 700F. [18]

Debljina ploče (mm)	4,0-5,0	5,1-30,0	30,1-60,0	60,1-100,0	100,1-130,0	130,1-160
700F CET (CEV)	0,38 (0,57)	0,38 (0,57)	0,39 (0,58)	0,39 (0,58)	0,41 (0,67)	-



*Slika 23. Primjena Strenx-a 700 [19]*



*Slika 24. Primjena Strenx-a 70 MC [18]*



*Slika 25. Primjena Strenx-a 70 [20]*

#### 4.2.8 Strenx 650 MC

Strenx 650 MC je vruće valjani konstrukcijski čelik izrađen za hladno oblikovanje s minimalnom snagom prinosa od 650 MPa za jače i lakše konstrukcije. Tipične primjene uključuju širok raspon komponenata i dijelova, kao što su zahtjevne nosive konstrukcije. Strenx 650 MC dolazi u zavojnice, prorezne zavojnice ili odrezane listove.

Strenx 650 MC je dostupan u debljinama od 2,00 do 10,00 mm, a širine do 1600 mm kao zavojnice, prorezne zavojnice ili odrezane listove duljine do 16 metara. [18]

U tablici 31. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 650 MC. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja ReH1)2), (min MPa)	Vlačna čvrstoća Rm (min MPa)	Produljenje A803) (min %)	Produljenje A5 (min %)
2-3	650	700-850	12	144
3,01-6	650	700-850	-	14
6,01-10	650	710-900	-	14

Mehanička svojstva se ispituju u uzdužnom smjeru.

1) Ako ReH nije primjenjiv, koristi se Rp 0,2. , 2) Na debljini > 8 mm minimalna snaga prinosa može biti manja od 20 MPa. , 3) Vrijednost A80 vrijedi za debljinu <3,00 mm. , 4) Vrijednost A5 vrijedi za debljinu lima  $t \geq 3$  mm. , 5) i za uzdužni i poprečni smjer.

U tablici 32. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 650 MC. [18]

C (max)	Si1) (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Altot (max)	Nb2) (max)	V2) (max)	Ti2) (max)
0,12	0,21	2,00	0,025	0,010	0,015	0,09	0,20	0,15

1) Ako se materijal treba vruće pocinčavati prema kategoriji A ili kategoriji B u EN 10149-2 to mora biti navedeno u trenutku narudžbe. Druge klase pocinčavanja s višim Si-sadržajem dostupne su nakon dogovora. , 2) zbroj Nb, V i Ti = max 0,22%

U tablici 33. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 650 MC. [18]

Debljina ploče (mm)	2,0-10,0
CET (CEV)	0,22 (0,34)





Slika 26. Primjena Strenx-a 700 [18]

#### 4.2.9 Strenx 110 XF

Strenx 110 XF je termomehanički valjani čelik od 110 MPa izrađen za hladno oblikovanje i koristi se za lagane i teške transportne komponente i rješenja. Dolazi u obliku zavojnica, prorezima zavojnice ili u obliku odrezanih listova.

Strenx 110 XF dostupan je u debljinama od 2 do 10 mm, a širine do 1600 mm kao svitak, rezani svitak i rezani na duljinu listova u dužinama do 1630 mm (1600 mm). [18]

U tablici 34. Prikazana su mehanička svojstva Strenx-a 110 XF. [18]

Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_{50}$ , sheet thickness $t > 2\text{mm}$ (min %)	Minimalni unutarnji radius savijanja za savijanje od $90^\circ$
2-3,48	110	118	15	0,8xt
3,49-5,9	110	118	15	1,2xt
6-10	110	118	15	1,6xt

U tablici 35. Prikazani je kemijski sastav za Strenx 110 XF. [18]

C (max)	Si <sup>1)</sup> (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Al (max)	Nb <sup>2)</sup> (max)	V <sup>2)</sup> (max)	Ti <sup>2)</sup> (max)
0,12	0,21	2,10	0,025	0,010	0,015	0,09	0,20	0,15

1) Ako materijal treba biti vruće pocinčan, to mora biti navedeno u trenutku narudžbe.

2) zbroj Nb, V i Ti = 0,22% maksimalno

#### 4.2.10 Strenx tube 700MH

Strenx Tube 700MH je zavaren hladno oblikovani konstrukcijski šuplji dio izrađen od vruće valjanog čelika visoke čvrstoće s minimalnom snagom prinosa od 700 MPa. Njegova visoka čvrstoća u kombinaciji s prirodno krutom obliku zavarenog šupljeg dijela omogućuje izradu jačih i lakših konstrukcija.

Tipične primjene uključuju nosive konstrukcije u segmentima podizanja, rukovanja i transporta. Maksimalna duljina cijevi je 12-18 metara, ovisno o veličini. Na zahtjev su dostupne više ili precizne cijevi. Strenx Tube 700MH dostupan je u kružnim, kvadratnim i pravokutnim oblicima. Ostali oblici i veličine dostupni su na zahtjev. Kružni oblik je u dimenzijama od 33,7 do 323,9 mm, kvadratni oblik 30x30-300x300 mm, dok je pravokutni oblik u dimenzijama 50x30-400x200 mm. Debljina zida je u rasponu od 2,0-10,0 mm. [18]

U tablici 36. Prikazana su mehanička svojstva Strenx tube-a 700MH. [18]

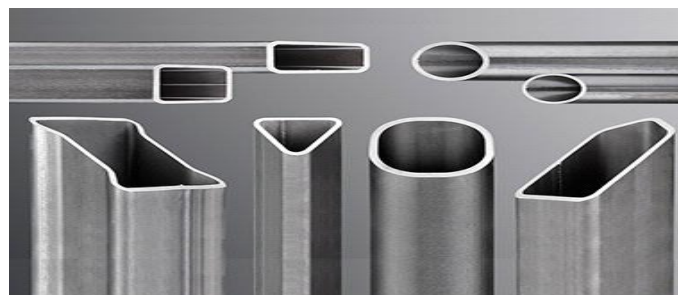
Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
700	750-950	10

U tablici 37. Prikazani je kemijski sastav za Strenx tube 700MH. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Al (max)	Nb (max)	V (max)	Ti (max)
0,12	0,25	2,10	0,020	0,012	0,015	0,09	0,20	0,15

U tablici 38. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx 700MH. [18]

CEV	0,38
CET	0,24



Slika 27. Primjena Strenx tube-a 700MH [18]

#### 4.2.11 Strenx tube 900MH

Strenx Tube 900MH je HF-zavaren hladno oblikovani konstrukcijski šuplji dio izrađen od vruće valjanog čelika visoke čvrstoće s minimalnom snagom prinosa od 900 MPa.

Njegova visoka čvrstoća u kombinaciji s prirodno krutom obliku zavarenog šupljeg dijela omogućuje izradu jačih i lakših konstrukcija.

Tipične primjene uključuju nosive konstrukcije u segmentima podizanja, rukovanja i transporta. Strenx Tube 900MH dostupan je u kružnim, kvadratnim i pravokutnim oblicima. Ostali oblici i veličine dostupni su na zahtjev. Maksimalna duljina cijevi je 12-18 metara, ovisno o veličini. Na zahtjev su dostupne više ili precizne cijevi. Ne preporučuje se vruće pocinčavanje šupljih profila Strenx Tube 900MH. [18]

U tablici 39. Prikazana su mehanička svojstva Strenx tube-a 900MH. [18]

Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , (min MPa)	Vlačna čvrstoća $R_m$ (min MPa)	Produljenje $A_5$ (min %)
900	930-1200	7

U tablici 40. Prikazani je kemijski sastav za Strenx tube 900MH. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Al (max)	Nb (max)	V (max)	Ti (max)
0,10	0,25	1,30	0,020	0,010	0,015	0,050	0,05	0,07

U tablici 41. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx tube 900MH. [18]

CEV	0,50
CET	0,25



Slika 28. Primjena Strenx tube-a 900MH [18]

#### 4.2.12 Strenx section 900

Strenx <sup>TM</sup> section 900 je hladno oblikovani čelični profil izrađen od vruće valjanog čelika visoke čvrstoće s minimalnom granicom razvlačenja od 900 MPa.

Njegova visoka čvrstoća u kombinaciji s prirodno krutim oblikom omogućuje izradu jačih i lakših struktura. Tipične primjene uključuju zahtjevne konstrukcije nosivosti u segmentima podizanja, rukovanja i transporta.

Strenx Section 900 dostupan je kao U-profil. Ostali oblici i varijacije dostupni su na zahtjev. Maksimalna duljina sekcija je 21 m, isto tako su i rezni dijelovi dostupni na zahtjev. [18]

U tablici 42. Prikazana su mehanička svojstva Strenx section 900. [18]

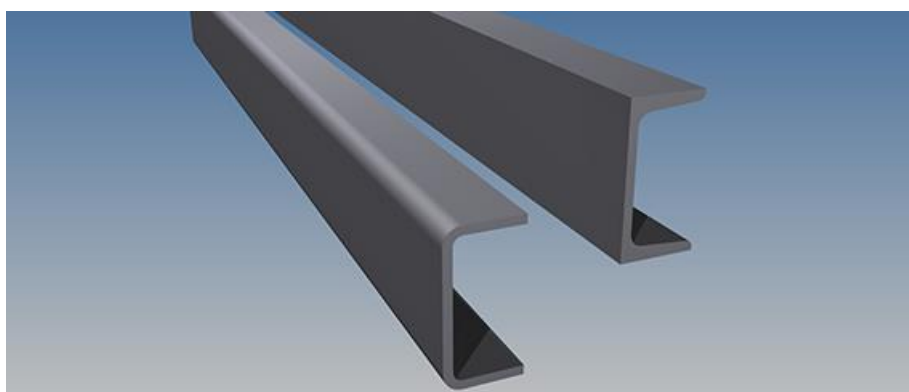
Debljina ploče (mm)	Granica razvlačenja R <sub>p0,2</sub> , (minMPa)	Vlačna čvrstoća R <sub>m</sub> (min MPa)	Produljenje A <sub>5</sub> (min %)
3,0-6,0	900	930-1200	8

U tablici 43. Prikazani je kemijski sastav za Strenx section 900. [18]

C (max)	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Al (max)	Nb (max)	V (max)	Ti (max)
0,12	0,25	1,30	0,020	0,010	0,015	0,050	0,05	0,07

U tablici 44. Prikazani je maksimalni ekvivalent ugljika CET (CEV) za Strenx section 900. [18]

Debljina ploče	2,5-10,0
CET	0,28 (0,51)



Slika 29. Primjena Strenx section 900 [18]

### 4.3 Rezanje Strenx-a

Strenx čelici su iznimno čisti čelici. Čistoća sa njihovim niskim sadržajem legirnih elemenata zajedno ih čini vrlo lako rezljivim. Strenx čelici se mogu rezati pomoću svih metoda toplinskog rezanja i to uključujući:

- plinsko rezanje
- rezanje plazmom
- lasersko rezanje
- rezanje vodenim mlazom. [18]

#### 4.3.1 Plinsko rezanje

Većina Strenx čelika umjerene debljine ima dovoljno visoku otpornost na vodikove pukotine pa je nepotrebno poduzimati dodatne korake, kao npr. predgrijavanje, kako bi se izbjeglo lomljenje ruba. Rizik za rezanje rubnog ruba može se smanjiti bilo pregrijavanjem poča ili korištenjem naknadnog grijanja ili laganog rezanja. Prikladne temperature predgrijavanja za Strenx od 700 do 960 MPa su 150°C. Za Strenx 1100 je prikladna temperatura predgrijavanja ispod 150°C. [18]



*Slika 30. Plinsko rezanje Strenx čelika [18]*

#### 4.3.2 Rezanje laserom

Rezanje laserom brže je od plinskog rezanja i daje puno bolju kvalitetu nego rezanje plazmom. Zbog relativno tankih debljina i malih toplinskih udara, predgrijavanje nije potrebno kod rezanja laserom. Nema prevelike razlike kod rezanja Strenx čelika u usporedbi sa običnim čelikom. [18]



*Slika 31. Rezanje laserom Strenx čelika [18]*

### 4.3.3 Plazma rezanje

Strenx čelici se lako režu pomoću plazme postupka rezanja. Rezanje plazme ima ograničenja kada je riječ o debljini materijala, glavna debljina koja se treba rezati mora se rezati ispod 50 mm. Također i kod plazma rezanja, dodatno predgrijavanje nije potrebno i nema prevelike razlike kod rezanja Strenx čelika u usporedbi sa običnim čelikom. [18]



*Slika 32. Plazma rezanje Strenx čelika [18]*

### 4.4 Zavarivanje Strenx-a

Što se tiče zavarivanja Strenx-a, potrebno je očistiti spoj te ukloniti strane stvari kao što su vlaga, ostaci ulja i ostale nečistoće prije zavarivanja. Osim dobre „higijene“ zavarivanja, važni su i ovi parametri:

- unos topline
- zaštitni plin
- dodatni materijal za zavarivanje
- predgrijavanje i dogrijavanje da bi se izbjegle vodikove pukotine itd. [18]

Zavarljivost Strenx-a je vrlo dobra i to prvenstveno zbog niskog sadržaja ugljika, koji je manji od 0,25% te isto tako zbog niskog sadržaja ostalih legiranih elemenata. Ova dobra svojstva čelika visoke čvrstoće se narušavaju procesom zavarivanja i to zbog unosa topline i naknadnog veoma brzog hlađenja. [15]



*Slike 32 i 33. Zavarivanje Strenx-a[18]*

## 4.5 Glodanje Strenx-a

Što se tiče glodanja Strenx-a, u nastavku su navedeni najčešći savjeti za ovu strojnu obradu:

- potrebno je izbjegavati rezanje kroz središnju liniju rezača, jer to može generirati vibracije
- preporuka je da širina rezanja bude 25 ili 75-80% promjera
- potrebno je koristiti valjanje u rezu
- ako se koristi umetak preporuča se suho glodanje
- ako je snaga stroja niska, potrebno je koristiti grubi rezač
- uvijek je potrebno koristiti što bolju opremu za stezanje
- dubina rezanja s brusnim rubovima za rezanje mora biti najmanje 2 mm, kako bi se izbjegao tvrdi sloj površine reznog ruba. [18]

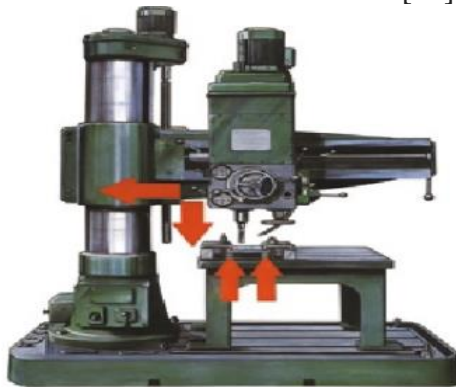


*Slika 34. Glodanje Strenx-a [18]*

## 4.6 Bušenje Strenx-a

Što se tiče bušenja Strenx-a, u nastavku su navedeni najčešći savjeti za ovu strojnu obradu:

- potrebno je minimizirati udaljenost između vrha bušenja i izratka
- ne preporuča se korištenje veće bušotine nego što je potrebna
- uvijek je potrebno koristiti metalne nosače i potrebno je čvrsto stegnuti obradak
- stol na kojem se buši mora biti što čvršći
- potrebno je koristiti rashladnu tekućinu
- preporuka za rashladno sredstvo iznosi od 8 do 10% [18]



*Slika 35. Bušenje Strenx-a [18]*

## 4.7 Urezivanje navoja na Strenx-u

S pravim alatima i držačima alata preporučuje se urezivanje navoja do 500 Brinella koje mogu izdržati vrlo visok okretni moment koji se javlja tijekom urezivanja u tvrdim materijalima. Ako promjer nije kritičan, bušena rupa može biti 3% veća od standarda. To će ujedno povećati i vijek trajanja urezanog navoja. U nekim situacijama nije pogodno urezivati navoj i to prvenstveno kad se urezuje navoj M5 na S 1100 i S 1300 i kada se urezuje navoj M6 na S 1300. Tada se vrši glodanje navoja. Za glodanje navoja potreban je CNC stroj. [18]

Preporuke za urezivanje i glodanje navoja su:

- urezivanje navoja kod slijepih rupa ima kraći vijek trajanja zbog manjeg promjera jezgre
- prije urezivanja navoja potrebno je provjeriti je li bušena rupa u dobrom stanju (nikako se ne smiju upotrebljavati istrošene bušilice)
- uvijek je potrebno koristiti premazane ureznice
- glodanje navoja je potrebno provlačiti u 2 prolaza
- potrebno je provjeriti je li mješavina rashladnog sredstva između 8 i 10 % [18]



*Slike 36.i 37. Urezivanje navoja na Strenx-u [18]*

## 4.8 Tokarenje Strenx-a

Što se tiče tokarenja Strenx-a, ova strojna obrada se primjenjuje kod Strenx čelika i to za teže cementirane karbidne kvalitete površina. [18]

Dakle, Strenx čelici se zapravo tokare u vrlo rijetkim slučajevima.



*Slika 38. Tokarenje Strenx-a [18]*



## 5. Zaključak

Konstruktivski visokočvrsti čelici su vrsta čelika koja se danas sve više upotrebljava i to prije svega kao što i sami podnaslov govori kod konstrukcija. Međutim, nije uvijek tako. Ova vrsta čelika je pronašla primjenu i kod drugih područja ljudskog djelovanja kao što su industrija, građevinarstvo, strojarstvo, brodogradnja, itd. Visokočvrsti čelici se najčešće primjenjuju kod konstruiranja i proizvodnje visokopterećenih dijelova vozila, kranova, dizalica, viličara, strojeva dizalica, mostova, ali isto tako i kod manjih dijelova kao što su razni oblici cijevi, profila, pa isto tako i kod vijaka i matica. Najvažnije svojstvo ove vrste čelika je njihova vrlo visoka granica razvlačenja, koja može i kod neke podvrste doseći i 1300 MPa.

Što se tiče njihovog kemijskog sastava, sadrže najčešće kemijske elemente poput silicija, mangana, molibdena, volframa, bakra i drugih, ali isto tako i nečistoće poput fosfora i sumpora. Udio ekvivalenta ugljika kod pojedine podvrste visokočvrstih čelika ne prelazi preko 0,45%, što znači da su relativno dobro ili u nekim slučajevima ograničeno zavarljivi.

Čelici visoke čvrstoće načinjeni su termo – mehanički kontroliranim procesom valjanja, kojim se postižu ciljana mikrostrukturalna svojstva, a također visoka čvrstoća, dobra žilavost i zavarljivost ovih čelika.

SSAB je nordijsko-američki proizvođač čelika visoke čvrstoće i nudi proizvode s dodanom vrijednošću i usluge razvijene u bliskoj suradnji sa svojim kupcima u cilju stvaranja jačeg, lakšeg i održivog svijeta.

Primjena visokočvrstih čelika u konstrukcijama još uvijek nije u prednosti pred običnim čelicima. Razlog jest veća cijena osnovnog materijala, smanjena krutost konstrukcije, zbog veće konvencionalne granice razvlačenja veća je osjetljivost na zarezno djelovanje, povećana brzina propagacije pukotina u materijalu te neka ograničenja pri zavarivanju.



IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, IVAN MERKAC-HUDOPIŠK (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom SVOJSTVA I PRIMJENA VISOKOCVRSTIH (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

ČELIKA

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Ivan Merkać

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, IVAN MERKAC-HUDOPIŠK (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom SVOJSTVA I PRIMJENA VISOKOCVRSTIH (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

ČELIKA

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Ivan Merkać

(vlastoručni potpis)

## 6. Literatura

- [1] T. Filetin, F. Kovačević, J. Indof, SVOJSTVA I PRIMJENA MATERIJALA, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb, 2009.
- [2] <http://www.gradimo.hr/clanak/celicni-profili-i-limovi/12459> preuzeto 10. svibnja
- [3] [http://pakovanje.rs/celicna\\_traka.html](http://pakovanje.rs/celicna_traka.html) preuzeto 10. svibnja
- [4] <http://www.amidoo.rs/sr/shop/celicne-sipke/okrugle-sipke/> preuzeto 10. svibnja
- [5] <https://www.conrad.hr/%C8eli%E8ni-zup%E8anik,-modul-1-Modelcraft.htm?websale8=conrad-hr&pi=231770> preuzeto 10. svibnja
- [6] <http://www.opruge-jatic.hr/> preuzeto 10. Svibnja
- [7] <https://www.fg.com.br/porca-sextavada-nc-3-16--zincada/p> preuzeto 20.svibnja
- [8] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka:641/preview> preuzeto 19.srpnja [14] S.Kožuh : SPECIJALNI ČELICI – SKRIPTA , Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [9] <http://www.opruga.hr/en/products/springs/coil-springs/> preuzeto 20. svibnja
- [10] [http://www.polilasshop.com/index.php?route=product/category&path=2\\_63](http://www.polilasshop.com/index.php?route=product/category&path=2_63) preuzeto 21.svibnja
- [11] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1352739925-0-pmm\\_i\\_pred.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1352739925-0-pmm_i_pred.pdf) preuzeto 19.srpnja
- [12] <http://novamedia.rs/showCategory/3764/alatni-celici> preuzeto 21.svibnja
- [13] Demery Y.M., ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS, United States of America, 2013.
- [14] Pongrac M., MATERIJALI ZA ČVRSTE POSUDE, završni rad, 2016.
- [15] Majcen Z., ZAVARIVANJE VISOKOČVRSTIH ČELIKA, završni rad, 2017.
- [16] [https://www.researchgate.net/figure/Ausforming-experiment-procedures\\_fig1\\_308065717](https://www.researchgate.net/figure/Ausforming-experiment-procedures_fig1_308065717) preuzeto 4.lipnja
- [17] <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-alloy-steels-irons/maraging-steels.php> preuzeto 11.lipnja
- [18] <https://www.ssab.com/products/brands/strenx>
- [19] <https://www.indiamart.com/proddetail/strenx-700-s690ql-weldox-en-10025-high-tensile-steel-plates-4472691648.html> preuzeto 2.srpnja
- [20] <http://www.acerosurssa.es/en/high-elastic-limit-steels/19-strenx-700-high-strenght-steel.html> preuzeto 2.srpnja