

# Primjena norme HRN EN ISO 6892-1- u ispitivanju materijala

---

**Lukić, Zlatko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:974902>

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

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



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PROIZVODNO STROJARSTVO

ZLATKO LUKIĆ

**PRIMJENA NORME HRN EN ISO 6892-1 U  
ISPITIVANJU MATERIJALA**  
ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC 2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PROIZVODNO STROJARSTVO

ZLATKO LUKIĆ

**PRIMJENA NORME HRN EN ISO 6892-1 U  
ISPITIVANJU MATERIJALA**  
ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Predavač:

Tihana Kostadin, mag. ing.stroj.

KARLOVAC 2016.



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

**Stručni / specijalistički studij:**.....STROJARSTVO.....  
(označiti)

Usmjerenje:.....PROIZVODNO STROJARSTVO.....Karlovac, .11.02.2016.....

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:.....ZLATKO LUKIĆ..... Matični broj:.....0110610100.

Naslov:..PRIMJEN NORME HRN EN ISO 6892-1 U ISPITIVANJU MATERIJALA..

.....  
.....  
Opis zadatka:

U završnom radu, nakon uvodnog dijela, potrebno je u teorijskom dijelu rada obraditi metalne materijale, a posebno konstrukcijske čelike, kao i postupke ispitivanja materijala, sa posebnim naglaskom na ispitivanju statičke vlačne čvrstoće. U eksperimentalnom dijelu rada, napraviti ispitivanje statičke vlačne čvrstoće zadanog materijala i obraditi primjenu odgovarajuće norme u ispitivanju materijala. Na kraju napraviti analizu rezultata i zaključak. Eksperimentalni dio rada odraditi u Laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu. Završni rad urediti prema pravilima VUK-a.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

...11.02.2016.....

26.09.2016....

07.10.2016.....

Mentor:

Tihana Kostadin, mag.ing.stroj

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

# IZJAVA

Izjavljujem da sam ja – student Zlatko Lukić, JMBG 2107987330178, matični broj 0110610100, upisan kao absolvent akademske godine 2015/2016., radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom školovanja na Veleučilištu u Karlovcu te uz stručnu pomoć i vođenje mentorice mag.ing.stroj Tihane Kostadin i u eksperimentalnom dijelu u Laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu uz stručnu pomoć laborantice Veleučilišta u Karlovcu struč.spec.ing.mech Ane Fudurić, kojima se ovim putem zahvaljujem.

Zlatko Lukić

---

Karlovac, \_\_\_\_\_

# SAŽETAK

U ovom završnom radu opisan je postupak ispitivanja statičke vlačne čvrstoće. Završni rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu opisana je podjela materijala, posebno su obrađeni čelici a zatim je obrađen postupak ispitivanja vlačne čvrstoće s teorijske strane.

U eksperimentalnom dijelu primjenjena je norma HRN EN ISO 6892-1 u ispitivanju materijala, ispitane i izračunate vrijednosti su analizirane, te je dat zaključak.

Ključne riječi: *čelici, materijali, vlačna čvrstoća, kidalica.*

# THE USE OF STANDARD EN ISO 6892-1 IN MATERIAL TESTING

## SUMMARY

This thesis describes the procedure for testing of static tensile strength. The final work consists of theoretical and experimental part.

The theoretical part describes the division of materials, with particular emphasis on steel and then a theory on procedure for testing the tensile strength.

In experimental part EN ISO 6892-1 standard was used in testing of materials, measured and calculated results were analyzed and final conclusion was given.

Keywords: *steels, materials, tensile strength, material testing machine.*

# SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>1</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>2</b>
<b>POPIS OZNAKA .....</b>	<b>3</b>
<b>POPIS PRILOGA .....</b>	<b>4</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>5</b>
1.1 Sistematizacija materijala .....	5
1.2 Metalni materijali .....	7
<b>2. TEORIJSKI DIO .....</b>	<b>8</b>
2.1 Čelici .....	8
2.1.1 Sistematizacija čelika .....	9
2.1.2 Opća svojstva čelika .....	10
2.2 Konstrukcijski čelici .....	10
2.2.1 Uvod .....	11
2.2.2 Opći konstrukcijski čelici .....	11
2.2.3 Čelici povišene čvrstoće .....	13
2.2.4 Ugljični čelici za tanke limove .....	13
2.2.5 Niskougljični čelici za trake .....	14
2.2.6 Čelici za žicu .....	15
2.2.7 Čelici za vijke, matice i zakovice .....	15
2.2.8 Čelici za cementiranje .....	16
2.2.9 Čelici za poboljšavanje .....	17
2.2.10 Čelici za opruge .....	18
2.2.11 Čelici poboljšane rezljivosti .....	19



2.2.12	Korozijski postojani čelici (nehrđajući) .....	19
2.2.12.1	Općenito o koroziji .....	19
2.2.12.2	Pojavni oblici korozije .....	20
2.2.12.3	Korozijska postojanost .....	21
2.2.12.4	Uvjeti korozijske postojanosti čelika .....	21
2.2.12.5	Feritni čelici .....	21
2.2.12.6	Martenzitni čelici .....	23
2.2.12.7	Austenitni čelici .....	23
2.2.13	Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama .....	25
2.2.13.1	Uvod .....	25
2.2.13.2	Vrste čelika za rad pri povišenim temperaturama .....	26
2.2.13.3	Vatrootporni čelici .....	27
2.2.13.4	Čelici za ventile motora .....	27
2.2.14	Čelici za rad pri niskim temperaturama .....	28
2.2.14.1	Uvod .....	28
2.2.14.2	Osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama .....	28
2.2.14.3	Vatrootporni čelici .....	28
2.2.15	Visokočvrsti čelici .....	29
2.2.15.1	Uvod .....	29
2.2.15.2	Osnovne skupine visokočvrstih čelika .....	30
2.3	Alatni čelici .....	31
2.3.1	Uvod .....	31
2.3.2	Podjela alatnih čelika .....	32
2.3.3	Zahtjevi na alatne čelike .....	33
2.3.4	Analiza primarnih zatjeva .....	33

<b>3. ISPITIVANJE MATERIJALA .....</b>	<b>35</b>
3.1 Uvod .....	35
3.2 Mehanički postupci ispitivanja .....	36
3.3 Vlačno ispitivanje .....	37
3.4 Kidalica .....	38
3.5 Dijagram naprezanje - istežanje .....	41
<b>4. POSTAVKA ZADATKA .....</b>	<b>43</b>
<b>5. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>44</b>
5.1 Norma .....	44
5.2 METALNI MATERIJALI – ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE –	
Metoda ispitivanja na sobnoj temeperaturi .....	45
5.2.1 Područje primjene .....	45
5.2.2 Pravni okvir .....	45
5.3 Termini i definicije .....	46
5.3.1 Mjerna duljina $L$ .....	46
5.3.2 Početna mjerna duljina $L_0$ .....	46
5.3.3 Konačna mjerna duljina $L_u$ .....	46
5.3.4 Istezljivost .....	46
5.3.5 Istezljivost u postocima .....	46
5.3.6 Trajno istežanje u postocima .....	46
5.3.7 Istezljivost u postocima nakon loma .....	47
5.3.8 Postotak smanjenja presjeka $Z$ .....	47
5.4 Maksimalna sila .....	47
5.4.1 Maksimalna sila $F_m$ .....	47
5.4.2 Naprezanje .....	47
5.4.3 Vlačna čvrstoća $R_m$ .....	47
5.4.4 Granica razvlačenja $R_e$ .....	47

5.5 Lom .....	48
5.6 Principi .....	48
5.7 Epruveta .....	48
5.7.1 Općenito .....	48
5.7.2 Obradene epruvete .....	49
5.7.3 Neobrađene epruvete .....	49
5.8 Tipovi .....	50
5.9 Priprema ispitnog uzorka .....	50
<b>6. ODREĐIVANJE POČETNOG POPREČNOG PRESJEKA .....</b>	<b>51</b>
<b>7. OBILJEŽAVANJE POČETNE MJERNE DULJINE .....</b>	<b>52</b>
<b>8. TOČNOST UREĐAJA ZA MJERENJE .....</b>	<b>53</b>
<b>9. RADNI UVJETI .....</b>	<b>54</b>
9.1 Podešavanje sile na nultu točku .....	54
9.2 Postupak zahvata .....	54
<b>10. ODREĐIVANJE POSTOTKA IZDUŽENJA NAKON LOMA .....</b>	<b>55</b>
<b>11. ODREĐIVANJE KONTRAKCIJE PRESJEKA NAKON LOMA .....</b>	<b>56</b>
<b>12. IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU .....</b>	<b>57</b>
12.1 Identifikacija ispitnog uzorka .....	57
12.2 Materijal ispitnog uzorka .....	59
12.3 Lokacija i mjesto ispitivanja .....	60
12.4 Rezultati ispitivanja .....	63
12.5 Analiza rezultata .....	67
<b>13. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>68</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>69</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>70</b>

# POPIS SLIKA

Slika 1. Shema dobivanja čelika i željeznih ljevova [1] .....	9
Slika 2. Tipična feritno-perlitna struktura općeg konstrukcijskog čelika a) čelik s 0,1 %C; b) čelik s 0,25 %C (povećanje 200:1) [1] .....	12
Slika 3. Dubina vučenja po Erichsenu ovisna o debljini lima [1] .....	14
Slika 4. Mikrostruktura cementiranog zupčanika od čelika 16MnCr5 (Č4320) .....	16
Slika 5. Karakteristična svojstva čelika za opruge u $\sigma - \epsilon$ dijagramu, u usporedbi s mekim čelikom [1] .....	18
Slika 6. Pojavni oblici korozije [1] .....	20
Slika 7. Mikrostruktura feritnog čelika (povećanje 100:1) [1] .....	22
Slika 8. Mikrostruktura austenitnog čelika (povećanje 100:1) [1] .....	24
Slika 9. Promjena mehaničkih svojstava s povišenjem temeprature [1] .....	26
Slika 10. Osnovne krivulje popuštanja različitih alatnih čelika [1] .....	34
Slika 11. Epruveta s dimenzijama [6] .....	37
Slika 12. Dijagram kidanja [7] .....	39
Slika 13. Elektromehanička kidalica [7] .....	40
Slika 14. Dijagram naprezanje – istezanje [7] .....	41
Slika 15. Epruveta s ispitivanja (prije loma) .....	57
Slika 16. Epruveta s ispitivanja (poslije loma) .....	58
Slika 17. Kidalica Otto Wolpert Werke .....	61
Slika 18. Kidalica Otto Wolpert Werke .....	62
Slika 19. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 1 .....	65
Slika 20. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 2 .....	65
Slika 21. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 3 .....	66
Slika 22. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 4 .....	66
Slika 23. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 5 .....	67

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela epruveta po dimenzijama [6] .....	37
Tablica 2. Glavni tipovi epruveta [11] .....	50
Tablica 3. Kemijski sastav materijala X20CrMoV12-1 [9] .....	59
Tablica 4. Mehanička svojstva materijala X20CrMoV12-1 [9] .....	59
Tablica 5. Značajke ispitivanja .....	67

# POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
L	mm	Duljina epruvete
$\Delta L_u$	mm	Produljenje epruvete nakon kidanja
$L_u$	mm	Mjerna duljina epruvete nakon kidanja
$L_0$	mm	Početna mjerna duljina epruvete
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje
F	N	Sila
S	mm <sup>2</sup>	Površina poprečnog presjeka
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
$\varepsilon$	mm/mm	Relativno produljenje ili istežanje
E	N/mm <sup>2</sup>	Modul elastičnosti
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja
$F_e$	N	Sila tečenja
$F_m$	N	Maksimalna sila
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna ili rastezna čvrstoća
$R_k$	N/mm <sup>2</sup>	Konačno naprezanje
$F_k$	N	Konačna sila

## **POPIS PRILOGA**

Prilog 1. Izvješće o ispitivanju materijala .....	70
---	----

# 1. UVOD

## 1.1 Sistematizacija materijala

U literaturi postoji nekoliko pristupa sistematizaciji materijala, a najčešći i najprirodniji je onaj prema sastavu, mikrostrukturi i načinu dobivanja. U skladu sa time podjela materijala je sljedeća:

### 1. METALNI MATERIJALI NA BAZI ŽELJEZA

#### 1.1 Konstrukcijski čelici:

- opći konstrukcijski,
- čelici povišene čvrstoće,
- ultračvrsti čelici,
- čelici za poboljšavanje,
- čelici za opruge,
- korozijski postojani čelici,
- vatrootporni čelici,
- čelici za rad na niskim temperaturama...

#### 1.2 Alatni čelici:

- čelici za hladni rad,
- čelici za topli rad,
- brzorezni čelici,

#### 1.3 Željezni ljevovi:

- čelični ljev,
- bijeli tvrdi ljev,
- sivi ljev,
- nodularni ljev,
- temper ljev.



## 2. LAKI I OBOJENI METALI I LEGURE (NEŽELJEZNI)

- Al-legure,
- Cu-legure,
- Ni-legure,
- Ti-legure,
- Mg-legure,
- Zn-legure...

## 3. NEMETALNI MATERIJALI

- Konstrukcijski polimerni materijali
  - Plastomeri,
  - Duromeri,
  - Elastomeri.
- Konstrukcijska keramika
  - Oksidna keramika,
  - Neoksidna keramika.

## 4. KOMPOZITNI MATERIJALI

- Kompoziti smetalnom matricom,
- Kompoziti s polimernom matricom,
- Kompoziti s keramičkom matricom. [1]

## 1.2 Metalni materijali

Metalni materijali obuhvaćaju čiste metale kao što su željezo, aluminij, cink, bakar, nikal i njihove kombinacije poznate pod imenom legure.

Odlikuju se dobrom električnom i toplinskom provodljivošću, relativno visokom čvrstoćom i tvrdoćom, dobrom duktilnošću (plastična svojstva i žilavost), obradljivošću i otpornosti prema udaru. Koriste se za izradu konstrukcija i visoko opterećenih elemenata.

Prema boji se dijele na crne (fero-metali, mangan, nikal, kobalt i njihove legure a najvažniji u skupini je čelik) i obojene (aluminij, zlato, platina, bakar, olovo, cink itd.)

Prema temperaturi topljenja dijele se na teško topljive (Cu, Ni, Fe, W, V, Mo) i lako topljive (Sn, Pb, Cd, Al, Mg, Zn).

Prema specifičnoj gustoći dijele se na lake (gustoća im je manja od  $5 \text{ g/cm}^3$ ) i teške (gustoća im je veća od  $5 \text{ g/cm}^3$ ). [2]

## 2. TEORIJSKI DIO

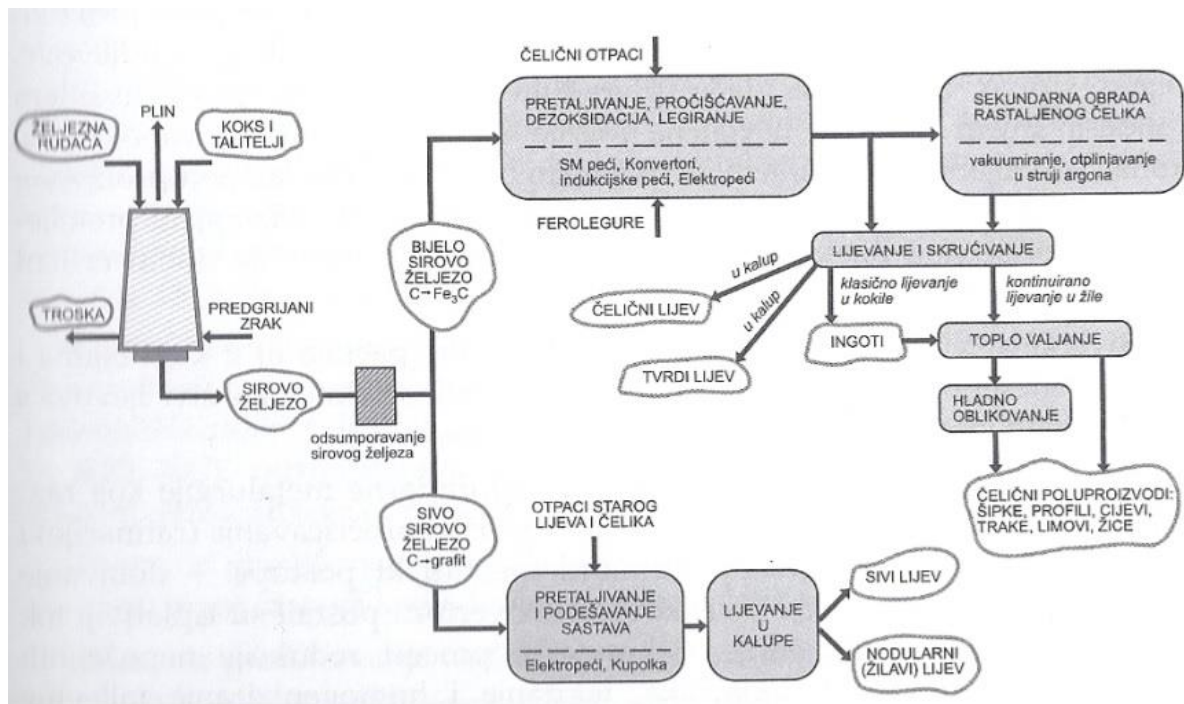
### 2.1 Čelici

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ( $\leq 2\%C$ ). Čelici se nakon lijevanja u kalupe oblikuju postupcima deformiranja (valjanje, prešanje, kovanje) u željeni oblik poluproizvoda (limova, trake, profila, šipki, cijevi i sl.). [1]

Gotovo sva količina sirovog željeza iz visoke peći se prerađuje u čelik, zato što ima superiornija mehanička svojstva. Odlikuje se velikom tvrdoćom, žilovašću, mogućnošću lijevanje i mehaničke obrade te velikim stupnjem elastičnosti. [3]

Slika 1. Prikazuje shemu dobivanja čelika i željeznih ljevova.

Niti jedna skupina materijala ne može legiranjem mijenjati svojstva kao što to može čelik. Legirani čelik osim željeza i ugljika sadrži i legirne elemente. Čelik se legira da bi se dobilo traženo svojstvo ili kombinacija svojstava, legiranjem se neka svojstva također mogu i pogoršati. Čelici se dijele na niskolegirane ( $< 5\%$  masenog udijela legirnih elemenata) i visokolegirane ( $> 5\%$  masenog udijela barem jednog ili više legirnih elemenata). [1]



Slika 1. Shema dobivanja čelika i željeznih ljevova [1]

### 2.1.1 Sistematizacija čelika

Čelici se mogu sistematizirati s obzirom na slijedeća obilježja:

- kemijski sastav,
- mikrostrukturu (feritni, feritno-perlitni , martenzitni, austenitni...),
- način proizvodnje,
- oblik i stanje,
- područja primjene – konstrukcijski i alatni čelici,
- svojstva. [1]

## 2.1.2 Opća svojstva čelika

Opća svojstva čelika određena su:

a) *Kemijskim sastavom* na svojstva utječu:

- Maseni udio ugljika:

Ugljik je osnovni i najutjecajniji element u čelicima. O njegovom masenom udjelu ovisi mikrostruktura čelika, a time i njegova svojstva. Porastom njegova masenog udjela smanjuje se sposobnost čelika za plastičnu deformaciju i zavarljivost, a raste zakaljivost (mogućnost postizanja što veće tvrdoće poslije kaljenja). Iz navedenog razloga velina konstrukcijskih čelika sadrže manje od 0,6% C.

- Maseni udio pratilaca i nečistoća: Mn, Si, P, S, Al, O, N itd.
- Vrsta i udio legirnih elemenata radi postizanja posebnih svojstava.

b) *Mikrostrukturu i stanjem* određeni su sastavom, prethodnim postupcima oblikovanja i toplinske obrade.

c) *Oblikom i dimenzijama poluproizvoda* - kod nekih čelika su mehanička svojstva za veće dimenzije presjeka manja nego kod manjih dimenzija npr. kod čelika za cementiranje ili poboljšavanje. [1]

## 2.2 Konstrukcijski čelici

### 2.2.1 Uvod

Konstrukcijski čelici se primjenjuju za tipične dijelova strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju – prijenos gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremanje i transport tekućina i plinova, zatvaranje ili spajanje konstrukcijskih elemenata. To su osovine, vijci, vratila, nosači, opruge, poklopci, kućišta, ventili...

Od konstrukcijskih čelika se traže sljedeća svojstva:

- a) *Mehanička svojstva*: visoka granica razvlačenja zbog plastične deformabilnosti, visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama, dovoljna žilavost i čvrstoća pri niskim, normalnim i visokim temperaturama, dovoljna dinamička izdržljivost itd.
- b) *Otpornost na trošenje*: što manji gubitak mase tj. što manja promjena stanja površine zbog međudjelovanja različitih dijelova.
- c) *Otpornost na koroziju*: korozijska postojanost u atmosferi ili tekućinama, otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama itd.
- d) *Tehnološka svojstva*: dobra zavarljivost, rezljivost i hladna oblikovljivost. [1]

## 2.2.2 Opći konstrukcijski čelici

### 1. Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije

U njihovoj primjeni prije svega se zahtjeva dovoljna *nosivost* i *sigurnost*, što se ostavlja dovoljnom granicom razvlačenja ( $R_e$ ), vlačnom čvrstoćom ( $R_m$ ), tlačnom čvrstoćom ( $R_{mt}$ ), savojnom čvrstoćom ( $R_{ms}$ ), smičnom čvrstoćom ( $R_{mu}$ ) i žilavošću.

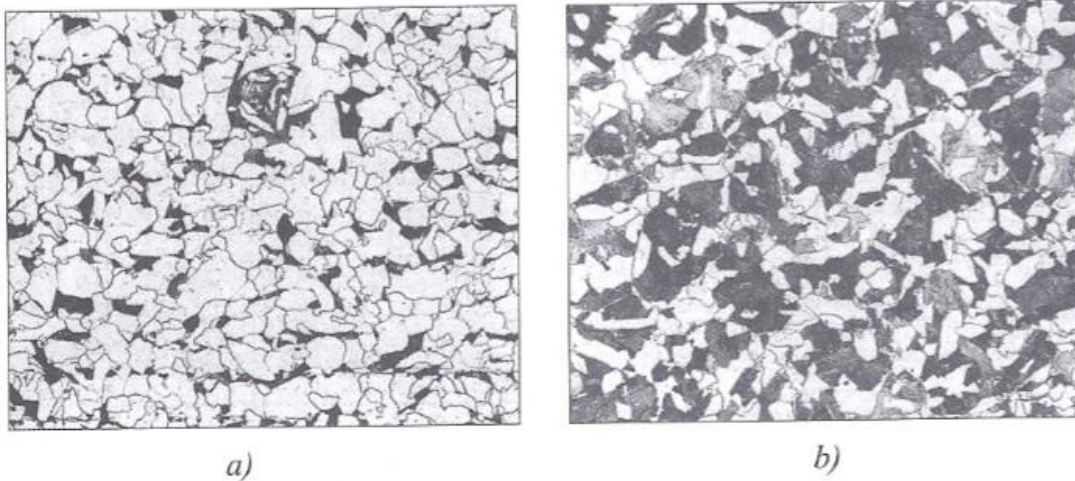
Od tehnoloških svojstava naročito je važna zavarljivost te hladna oblikovljivost – za savijanje, duboko vučenje, kovanje i rezanje itd.

To su nelegirani čelici sa feritno-perlitnom mikrostrukturom. Kemijski sastav nije propisan ali zato su zajamčena mehanička svojstva, zbog toga nisu predviđeni za toplinsku obradu.

## 2. Čelici za strojogradnju

Ovi čelici se primjenjuju za strojne dijelove koji se gibaju u odnosu na druge dijelove npr. osovine u kliznim ležajevima, zupčanici ili prenose sile i momente.

Prema normama nema zahtjeva na zavarljivost i žilavost. [1]



Slika 2. Tipična feritno-perlitna struktura općeg konstrukcijskog čelika

a) čelik s 0,1 %C; b) čelik s 0,25 %C (povećanje 200:1) [1]

### 2.2.3 Čelici povišene čvrstoće

Kod razvoja ovih čelika cilj je postignuće što više granice razvlačenja i više vlačne čvrstoće, a time i višem dopuštenom naprezanju u radu. Njihovom primjenom smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja tj. smanjuje se masa i volumen konstrukcije što dovodi do značajnih ušteta materijala i smanjenja gubitaka.

Osnovna podjela:

- a) *Normalizirani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće*
- b) *Poboljšani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće [1]*

### 2.2.4 Ugljični čelici za tanke limove

Ugljični čelici od kojih se uzrađuju tanki limovi debljine ispod 3 mm, podjeljenih u dvije skupine:

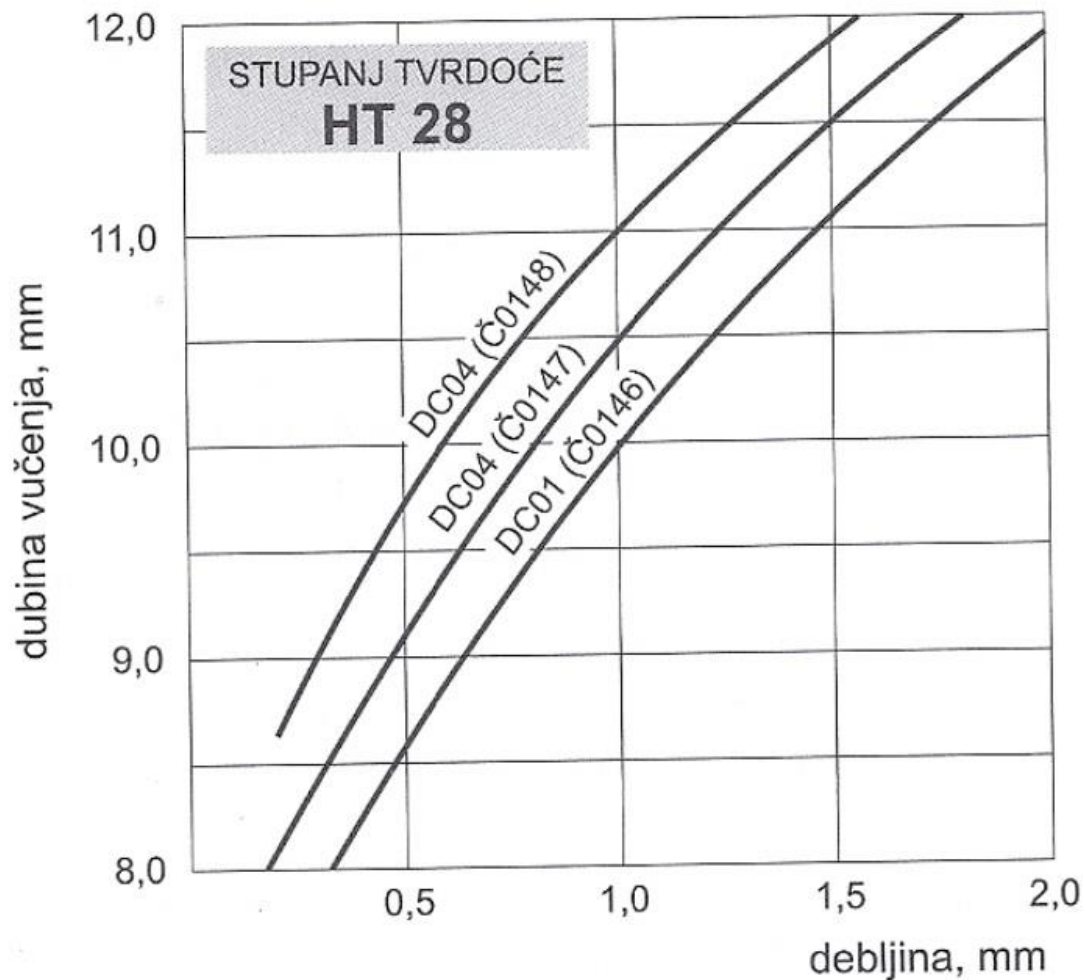
- a) *Niskougljični čelici za limove (oko 0,1% C) – namijenjeni za oblikovanje deformiranjem*
- b) *Ugljični čelici za limove sa zajamčenim mehaničkim svojstvima – spadaju u grupu općih konstrukcijskih čelika*

Najvažnije svojstvo ovih čelika je deformabilnosti (duktilnost), pa su zato prikladni za vučenje, savijanje i utiskivanje. Površina ovih limova je pogodna za nanošenje metalnih i nemetalnih prevlaka (emajliranje, lakiranje, prevlačenje, kromiranje). [1]



## 2.2.5 Niskouglični čelici za trake

To su niskouglični čelici ( $\leq 0,1 \%C$ ) koji se koriste za izradu hladnovaljanih traka s različitim stupnjem tvrdoće. Od njih se također izrađuju tanki limovi i žica, zavarljivost rastaljivanjem je vrlo dobra a moguća je primjena i točkastog zavarivanja. Stupnjevi tvrdoće ovise o deformiranom ili žarenom stanju. Prikladnost za vučenje utvrđuje se prema Erichsensu za pojedine stupnjeve tvrdoće. [1]



Slika 3. Dubina vučenja po Erichsensu ovisna o debljini lima [1]

## 2.2.6 Čelici za žicu

Ovi čelici se dijele prema svojstvima i primjeni u tri skupine:

- a) *Obične žice*
- b) *Specijalne žice* – različiti stupnjevi tvrdoće, što je viši stupanj tvrdoće, to je viša vlačna čvrstoća (od 300 do 600 N/mm<sup>2</sup>) a manja istežljivost.
- c) *Vučene žice* – za toplinsku obradu i posebne primjene. [1]

## 2.2.7 Čelici za vijke, matice i zakovice

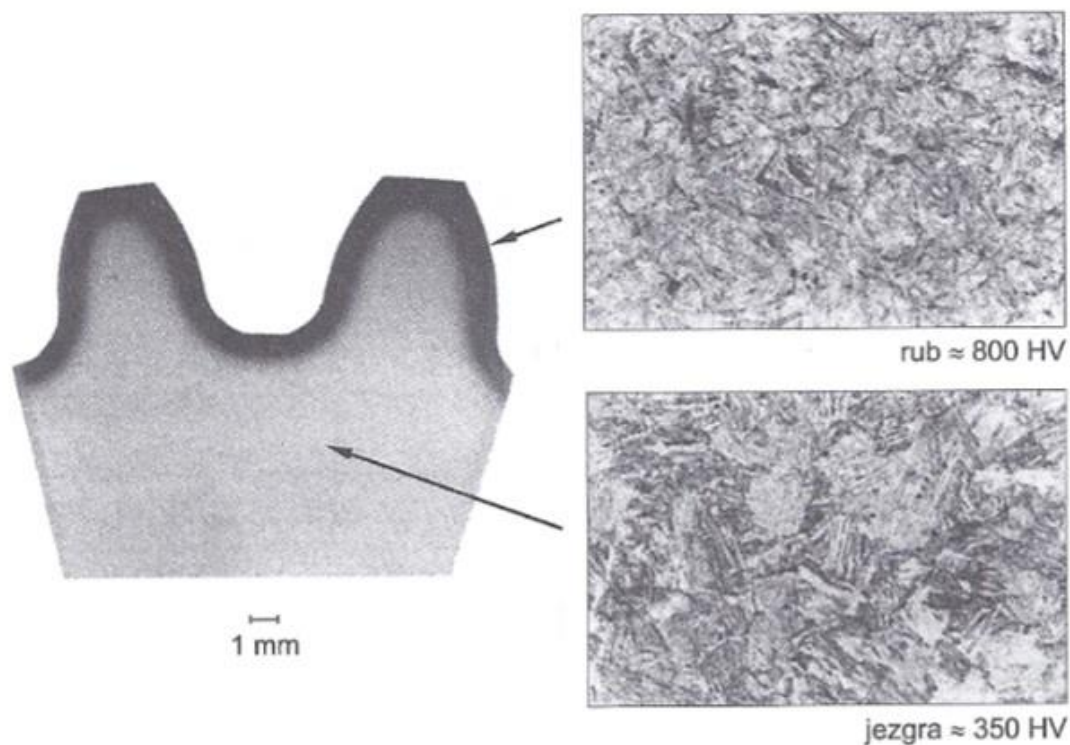
Grupa niskougličnih čelika (0,1...0,2 %C) koji se primjenjuju za izradu vijaka, matica i zakovica hladnim ili toplim postupcima deformiranja.

Dije se u tri osnovne skupine:

- a) *Čelici za hladni i topli postupak izrade vijaka, matica i zakovice* – sniženi maseni udjeli P i S što osigurava dobra svojstva elastičnosti tj. nisu sklone pojavi pukotina u toplom i hladnom stanju, te imaju smanjenu sklonost pojavi krhkog loma.
- b) *Čelici za izradu matica na toplo* – povišeni udio fosfora (0,08...0,25 %P) koji smanjuje opasnost od pojave toplinskih pukotina.
- c) *Čelici za izradu matica na hladno* – povišeni maseni udio sumpora (0,08...0,12 %S) zbog bolje rezljivosti. [1]

## 2.2.8 Čelici za cementiranje

Legirani ili nelegirani niskouglični čelici ( $< 0,25\% \text{C}$ ) čiji je sastav zajamčen a po masenim udjelu nečistoća spadaju kvalitetne i plemenite čelike. Plemeniti čelici sadrže manji maseni udio sumpora i fosfora ( $< 0,035\% \text{S}$  i  $\text{P}$ ) od kvalitetnih ( $< 0,045\% \text{S}$  i  $\text{P}$ ) te veću kvalitetu površine. Ovi čelici se podvrgavaju toplinskoj obradi cementiranja, koja se sastoji od pougljeničavanja površinskih slojeva, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Nakon postupke cementiranja površinski slojevi su tvrdi (61...64 HRC) i otporni na trošenje dok jezgra ostaje feritno-perlitna i otporna na dinamička i udarna opterećenja. [1]



Slika 4. Mikrostruktura cementiranog zupčanika od čelika 16MnCr5 (Č4320)

## 2.2.9 Čelici za poboljšavanje

Skupina čelika koja sadrži 0,2...0,6 %C a prema svom kemijskom sastavu spadaju u kvalitetne i plemenite čelike. Oni se podvrgavaju postupku poboljšavanja (kaljenje i visokotemperaturno popuštanje) u cilju postizanja visoke granice razvlačenja i vlačne čvrstoće uz visoku žilavost i dinamičku izdržljivost. Zbog toga se primjenjuju za dinamički visoko opterećene dijelove strojeva i uređaja poput osovina, vratila, zupčanika itd.

Osnovna podjela:

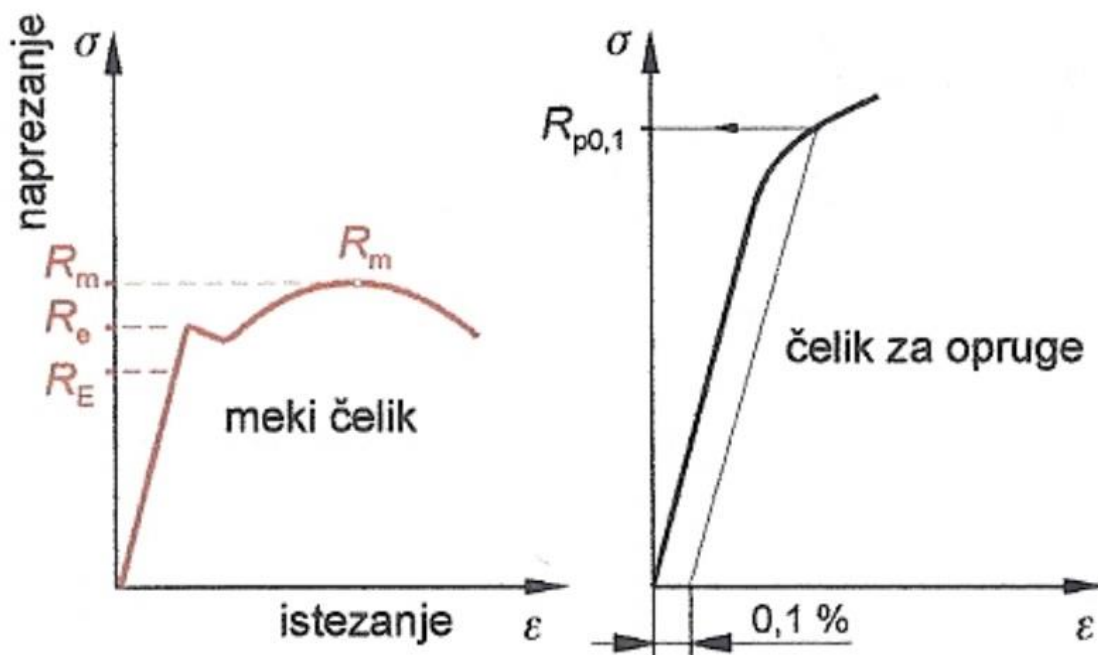
- a) *Čelici za površinsko kaljenje* – ako se želi postići velika otpornost na trošenje i dinamička izdržljivost površinskih slojeva, neki od čelika za poboljšavanje se mogu i površinski zakaliti a da se pri tome ne pogoršavaju druga mehanička svojstva.
- b) *Čelici za velike otkovke* – podvrsta čelika za poboljšavanje koja se primjenjuje kod otkovaka promjera preko 100 mm, čija je masa također velika. Zbog velikih dimenzija i masa dolazi do značajnih razlika u temperaturi između površine i jezgre što ima za posljedicu pojavu zaostalih naprezanja, te se stoga posebno pazi prilikom pretaljivanja, ljevanja u blokove te kovanju. [1]

## 2.2.10 Čelici za opruge

Od opruge se očekuje da pod utjecajem dinamičkog opterećenja ostvari traženu plastičnu deformaciju. U području elastičnih deformacija svi će čelici ostavirati jednako opružno djelovanje jer je to posljedica jednakog modula elastičnosti (E) i modula smičnosti (G) - za torzijski opterećene opruge.

Svojstva čelika za opruge:

- *Visoka granica razvlačenja* –  $R_e$ ,  $R_{p0,1}$ , odnosno visoku granicu elastičnosti ( $R_E$ ), kao i visoku vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ),
- Sigurnost protiv krhkog loma,
- *Visoku dinamičku izdržljivost* ( $R_d$ ) – otpornost na lom od umora, te se stoga zahtjeva visoka kvaliteta površine i mikrostruktura čelika,
- Otpornost na udarno opterećenje – dovoljna žilavost. [1]



Slika 5. Karakteristična svojstva čelika za opruge u  $\sigma - \epsilon$  dijagramu, u usporedbi s mekim čelikom [1]

### 2.2.11 Čelici poboljšane rezljivosti

Čelici koji su namjenjeni za izradu sitnih dijelova na visokoproduktivnim automatskim strojevima (masovna i serijska proizvodnja). Njihovo glavno svojstvo je bolja obradljivost odvajanjem čestica rezanjem (rezljivost) što podrazumijeva mogućnost postizanja velikih brzina rezanja uz sporije trošenje oštrice alata. [1]

### 2.2.12 Korozijski postojani čelici (nehrđajući)

#### 2.2.12.1 Općenito o koroziji

Korozija je spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija – plina, kapljevine ili krutih agresivnih čestica, a zbog kemijskih ili elektro kemijski procesa.

Kemijska korozija – nastaje djelovanjem vrućeg i suhog zraka i plinova ili neelektrolita kao što su benzin ili aceton na površini čelika, gdje dolazi do kemijske reakcije, pretežno oksidacije.

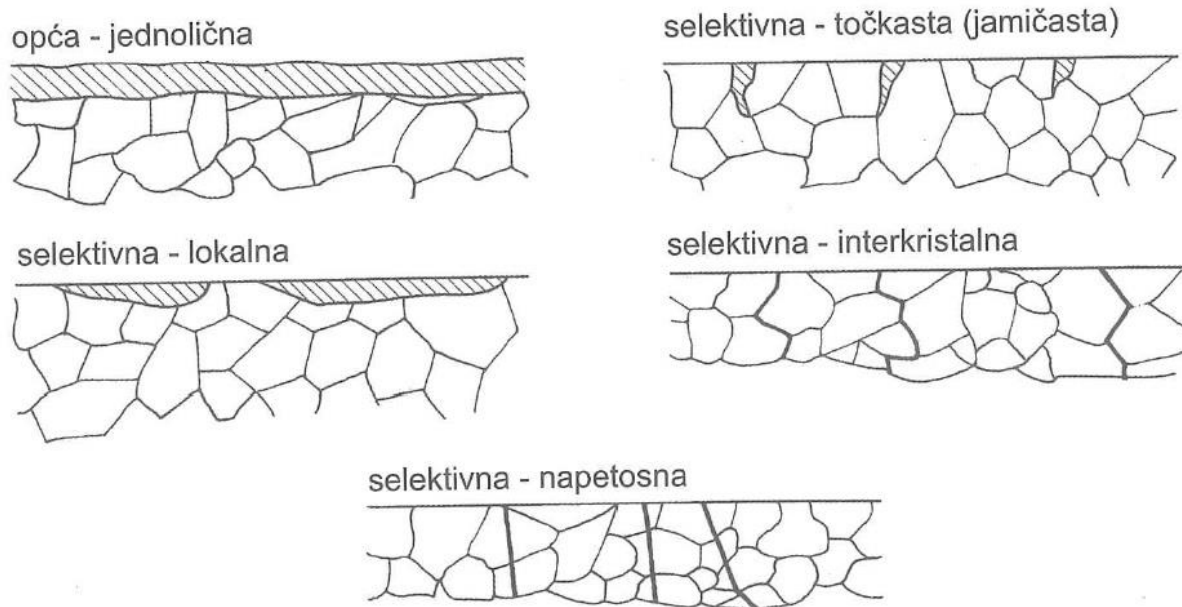
Elektrokemijski korozija – razvija se uz postojanje elektrolita (vlažnih plinova ili vodljive kapljevine) pri čemu se korodirani metal ponaša kao anoda i u obliku iona ulazi u otopinu. Elektrokemijski proces nastupa kada postoji razlika elektropotencijala između dva kratkospojena galvanska elementa, npr. dva različita metala u elektrolitu, različiti mikrostrukturni konstituenti ili nehomogenosti u strukturi metala.

Na vrstu i brzinu mehanizma korozijskih procesa utječu:

- a) *unutrašnji faktori*: sastav čelika, čistoća i udjel uključaka u čeliku, mikrostruktura – stanje i strukturna anizotropija, raspodjela naprezanja.
- b) *vanjski faktori*: vrsta medija i njegov sastav, promjena sastava u radnim uvjetima, temperatura okolnog medija, tlak okolnog medija, brzina strujanja medija, mehanička i tribološka naprezanja, djelovanje elektromagnetskog polja i radioaktivnog zračenja i sl. [1]

### 2.2.12.2 Pojavni oblici korozije

Osnovni pojavni oblici korozije na čelicima shematski su prikazani na slici 6.



Slika 6. Pojavni oblici korozije [1]

- a) *Opća (jednolična korozija):* ovo je najčešći i najrašireniji, ali i najmanje opasan oblik korozije, a nastupa jednolično po cijeloj površini. Opću koroziju uobičajeno nazivamo „hrđanje“. Čelik u atmosferi zbog različitih vodenih otopina, kondenzirajućih i suhih plinova korodira tim jače što je viši udio %C.
- b) *Posebni oblici korozije – selektivna, lokalna:* kod čelika koje smatramo korozijski postojanim naročito na opću koroziju, mogu nastupiti neki posebni korozijski procesi koji mogu biti mnogo opasniji od opće korozije jer nisu toliko uočljivi i odvijaju se u postrojenjima i uređajima prehrambene, kemijske, petrokemijske i drugih industrija.

Selektivna korozija pojavljuje se mjestimično na površini i širi se prema unutrašnjosti presjeka dijela, ili započinje negdje u unutrašnjosti dijela što je opasnije jer nije vidljiva. Neki od posebnih tipova korozije su točkasto-jamičasta („pitting“) korozija, kontaktna korozija, interkristalna korozija, napetosna korozija, erozija, kavitacija itd. [1]

### 2.2.12.3 Korozijska postojanost

Korozijska postojanost je svojstvo otpornosti materijala na djelovanje okolnog medija. Korozijski postojaniji je onaj materijal kod kojeg u jednakim vanjskim uvjetima dolazi do manje intenzivnijeg razaranja površine ili do neželjenih promjena mikrostrukture.

U praksi se kombiniraju različiti *načini zaštite* od korozije: primjena korozijski postojanog materijala, površinska zaštita manje postojanog materijala različitim metalnim i nemetalnim prevlakama, katodna zaštita, konstrukcijske mjere, dodavanje inhibitora korozije u okolni medij i dr. [1]

### 2.2.12.4 Uvjeti korozijske postojanosti čelika

Da bi čelik bio potpuno korozijski postojan, moraju se istovremeno ispuniti dva uvjeta.

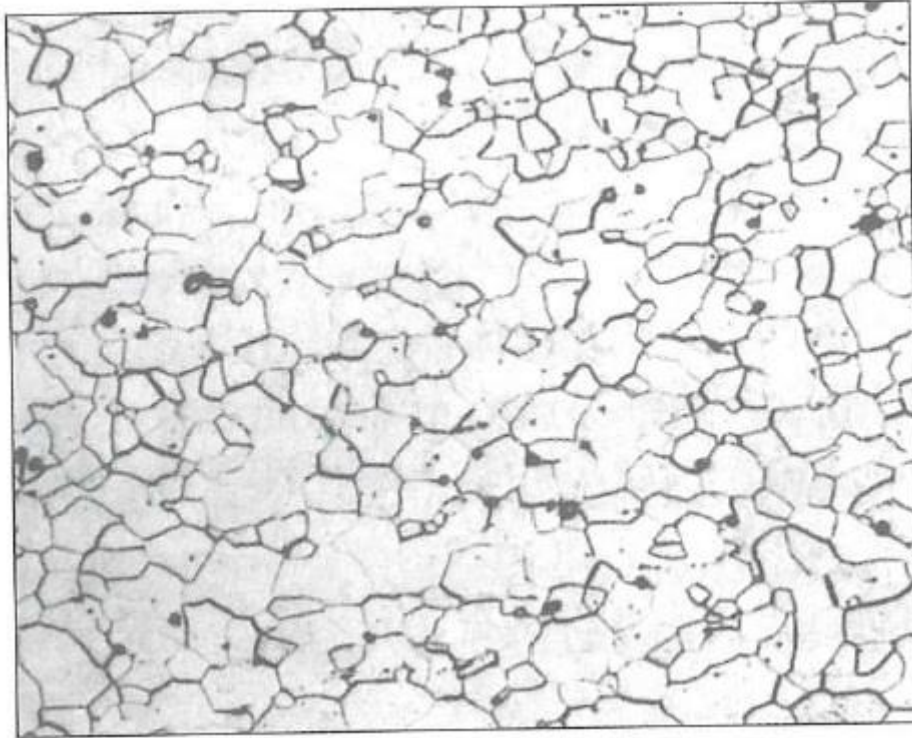
Prvi nužan uvjet pasivnosti čelika (*pasiviranje* površine tj. stvaranje tanke guste zaštitne prevlake), odnosno potpune korozijske postojanosti, je da čelik sadrži barem 12 %Cr i to u čvrstoj otopini. Moderni korozijski postojani čelici sadrže i do 30 %Cr.

Drugi uvjet korozijske postojanosti je homogena *monofazna mikrostruktura*. Da bi se izbjegla opasnost od nastanka lokaliteta čiji je elektropotencijal različit od potencijala osnovne mase čelika, korozijski postojani čelici teorijski bi morali imati potpuno feritnu (F), austenitnu (A) ili martenzitnu (M) mikrostrukturu bez karbida, oksida ili drugih intermetalnih faza. [1]

### 2.2.12.5 Feritni čelici

Feritni čelici sadrže < 0,1 %C i 13...17 %Cr i zbog toga zadržavaju mikrostrukturu (Slika 7.) pri gotovo svim temperaturama, pa se ne mogu zakaliti. Primjenjuju se u brušenom ili fino polirano žarenom stanju.





Slika 7. Mikrostruktura feritnog čelika (povećanje 100:1) [1]

Osnovna svojstva feritnih čelika jesu: relativno su mekani, magnetični su, relativno slabo zavarljivi, slabo oblikovljivi deformiranjem, bolje obradljivi odvajanjem čestica od austenitnih, postojani prema oksidirajućim kiselinama i neosjetljivi na plinove koji saadrže sumpor, manje osjetljivi na pojavu napetosne korozije i jamičastog oštećenja, nisu otporni na rastaljene metale (Al, Sb, Pb), sklone su lomljivosti pri nižim temperaturama, niže cijene od ostalih nehrđajućih čelika. [1]

### 2.2.12.6 Martenzitni čelici

Zbog potrebe zakaljivanja imaju povišen maseni udio ugljika (0,15...1,0 %C), te u pravilu preko 13 %Cr. Moguće je legiranje s Mo i Ni.

Optimalna mehanička svojstva i korozijsku postojanost postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Mala toplinska vodljivost ovih čelika zahtijeva postepeno ugrijavanje na temperaturu austenitizacije i gašenje u ulju ili u vakuumu (i zbog opasnosti od oksidacije). Što je viši %C i %Cr to će biti potrebna viša temperatura austenitizacije da se otopi što više ugljika u austenitu (zbog zakaljivosti) i što više kroma (zbog korozijske postojanosti).

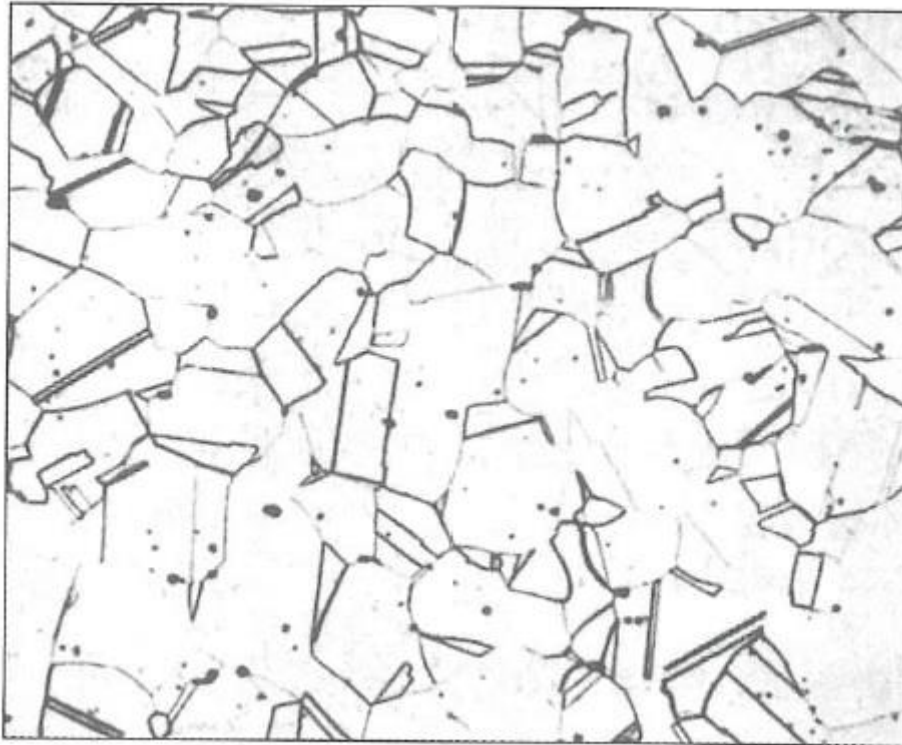
U odnosu na feritne i austenitne čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje. [1]

### 2.2.12.7 Austenitni čelici

Radi se o visokolegiranim čelicima s Cr i Ni (Mn) koji proširuju austenitno područje sve do normalnih temperatura. Tipična mikrostruktura austenitnog čelika prikazana je na Slici 8.

Karakteristike kemijskog sastava jesu:

- maseni udio ugljika treba biti što manji (< 0,15 %C) jer je onda manja opasnost od stvaranja karbida (npr.  $Cr_{23}C_6$ ),
- maseni udio Cr što viši (> 18 %Cr) zbog uvjeta antikorozivnosti,
- maseni udio Ni što viši (> 8 %Ni) jer je Ni gamageni element koji mora prevladati alfabeno djelovanje Cr, tako da nastane austenitna mikrostruktura,
- moguće dodatno legiranje s Mo, Ti, Nb, Ta koji pospješuju pojavu ferita u mikrostrukturi ili djeluju stabilizirajuće kod opasnosti interkristalne korozije, povišen maseni udio dušika (0,2...0,4 %N) djeluje naročito na povišenje čvrstoće te otpornost na jamičastu i napetosnu koroziju.



Slika 8. Mikrostruktura austenitnog čelika (povećanje 100:1) [1]

Neka od svojstava austenitnih čelika jesu: nemagnetični zbog austenitne strukture, dobro oblikovljivi u hladnom stanju a hladnom deformacijom mogu očvrsnuti, uz dodatno legiranje s Mo, W i V pokazuju vrlo dobru otpornost na puzanje pri temperaturama  $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zbog zadovoljavajuće žilavosti pri sniženim temperaturama teoretski se primjenjuju do  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ , otporni na organske i anorganske kiseline, lužine i soli; u određenim uvjetima su podložni interkristalnoj koroziji. [1]

## 2.2.13 Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama

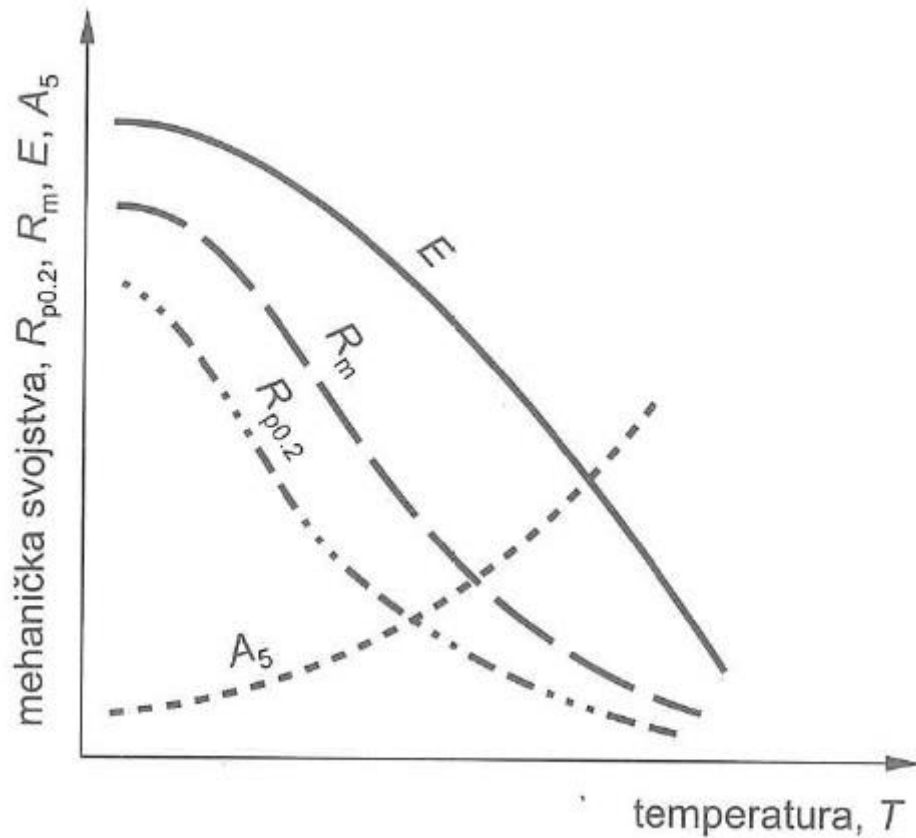
### 2.2.13.1 Uvod

Čelici predstavljaju materijale čija je temperatura tališta relativno visoka u odnosu npr. aluminij, bakar i njihove legure ili pak polimerne materijale, te zbog bolje mehaničke otpornosti pri povišenim temperaturama imaju prednost u primjeni u odnosu na te materijale.

Kod čelika i željeznih materijala do 180 °C nema bitnijih promjena mehaničkih svojstava, pa se te temperature smatraju niskim. Radne temperature od 180...450 °C za čelik su povišene, a one iznad 450 °C su visoke jer pri njima počinje puzanje čelika. Povišene ili visoke temperature vladaju u termoenergetskim postrojenjima – generatori pare (parni kotlovi), plinske i parne turbine, kemijskim i procesnim postrojenjima, u metalurškim pogonima, motorima s unutrašnjim izgaranjem, raketama, svemirskim brodovima i sl. Većina tih uređaja mora raditi i po nekoliko godina bez prekida, a ukupan radni vijek za ugrađene materijale iznosi i preko 20 godina.

Pri izboru materijala za dijelove takvih uređaja najvažnije svojstvo je mehanička otpornost, a uz to, često se traži i kemijska postojanost na različite medije, djelovanje plinova i vatre (otpornost na intenzivnu oksidaciju). Tipične pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim i visokim temperaturama jesu:

1. Sniženje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti uz istovremeno povišenje istežljivosti, suženja poprečnog presjeka i žilavosti (Slika 9.).
2. Pojava puzanja – što je viša temperatura uz konstantno naprezanje u radu, to je veća brzina puzanja kod jednog te istog čelika, a time i kraće vrijeme do pojave loma.
3. Snižavanje dinamičke izdržljivosti – povišenjem temperature dinamička izdržljivost se smanjuje ili uopće ne postoji, tj. dolazi do loma kod određenog broja opterećenja.



Slika 9. Promjena mehaničkih svojstava s povišenjem temperature [1]

### 2.2.13.2 Vrste čelika za rad pri povišenim temperaturama

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

- Ugljični (nelegirani) čelici – pr. čelici za kotlovske limove,
- Niskolegirani čelici – pr. niskolegirani s Mo ili Mo i Cr,
- Visokolegirani čelici – pr. super 12 %Cr martenzitni čelici,
- Visokolegirani austenitni čelici – pr. austenitni Cr-Ni čelici. [1]

### 2.2.13.3. Vatrootporni čelici

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

Kod nelegiranih čelika stvaraju se na površini slojevi oksida FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ovi oksidi nisu dovoljno kompaktni da bi spriječili daljnu difuziju kisika i porast debljine sloja, pa s vremenom dolazi do ljuštenja sloja zbog tlačnih naprezanja i stvaranja novih oksida.

Legiranjem čelika s elementima koji imaju veći afinitet prema kisiku, a to su Cr, Si i Al, pospješuje najprije oksidaciju tih elemenata i površinskom sloju, a time i daljnje kočenje difuzije. Oksidi Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MoO<sub>2</sub> su kompaktni i štite čelik od stvaranja tzv. ogorine u obliku ljuski. Na vatrootpornost čelika najpovoljnije djeluje legiranje skromom. Čelik na taj način postaje postojan na intenzivnu oksidaciju, tj. *otporan ljuškanju* ili vatrootporan. [1]

### 2.2.13.4 Čelici za ventile motora

Ventili motora s unutrašnjim izgaranjem izloženi su vrlo visokim temperaturama (ispušni do 700 °C a ponekad i do 900 °C, usisni dio do 500°C) i naglim promjenama temperature (toplinski šokovi). Čelici koji se primjenjuju za izradu ventila motora moraju zadovoljiti visoke i složene zahtjeve:

- dovoljna čvrstoća i dinamička izdržljivost pri povišenim temperaturama,
- dobra otpornost na oksidaciju i koroziju,
- mala toplinska rastezljivost i velika toplinska vodljivost,
- velika otpornost na trošenje.

Ventili se uglavnom izrađuju od čelika za poboljšavanje, martenzitnih i austenitnih čelika. [1]

## 2.2.14 Čelici za rad pri niskim temperaturama

### 2.2.14.1 Uvod

Snižanjem temperature padaju vrijednosti: duktilnost – istezljivost, kontrakcije presjeka, udarnog rada loma (žilavost), toplinske rastezljivosti i toplinske vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta, a rastu: tvrdoća, vlačna čvrstoća i granica razvlačenja.

Osnovni zahtjev u primjeni čelika pri niskim temperaturama je dovoljna žilavost, odnosno traži se neosjetljivost na krhki lom. Kod većine konstrukcijskih čelika s BCC rešetkom pada žilavost dok to nije slučaj kod konstrukcijskih čelika s FCC rešetkom. Vrijednost udarnog rada loma pri radnoj temperaturi i visina prijelazne temperature gotovo su jedini kriteriji za izbor čelika. Kao „*hladno žilav*“ je onaj čelik koji pri temperaturi  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  postiže vrijednost udarnog loma ili je imao prijelaznu temperaturu žilavosti nižu od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [1]

### 2.2.14.2. Osnovne skupine čelika za rad pri niskim temperaturama

Razlikujemo tri osnovne skupine čelika:

- a) *Niskolegirani (mikrolegirani) sitnozrnati* čelici u normalizarnom stanju se primjenjuju do  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Imaju nižu prijelaznu temperaturu kao posljedicu sitnog zrna te više čistoće od klasičnih konstrukcijskih čelika.
- b) *Čelici legirani s Ni (1,5...9 %Ni) za poboljšavanje* se primjenjuju u temperaturnom području od  $-85$  do  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nikal pospješuje stvaranje sitnog zrna i žilavog Fe-Ni martenzita nakon kaljenja što kao posljedicu ima povećanje žilavosti pri niskim temperaturama. Skloni pojavi krhkosti nakon popuštanja.

c) *Cr-Ni* i *CR-Ni-N (Nb, Ti)*, *Cr-Ni-Mo-N* i *Cr-Mn-Ni-N* austenitni čelici koji i blizu apsolutne nule imaju dovoljnu žilavost. Glavni problem kod ovih čelika je nedovoljno istražena mikrostrukturna transformacija austenita u tzv. deformacijski  $\epsilon$ -martenzit pri niskim temperaturama, te zbog velikog toplinskog rastezanja sniženjem temperature dolazi do znatnih smanjenja dimenzija što može uzrokovati naprezanja viša od granice razvlačenja tj. izazvati hladno očvrstnuće.

Kod ovih svih navedenih skupina čelika maseni udio ugljika treba biti što manji jer se na taj način ostvaruje niža prijelazna temperatura. Neki primjeri primjene ovih čelika jesu: spremnici tekućih plinova pod tlakom, cjevovodi za tekuće plinove, uređaji u tehnici hlađenja itd. [1]

## **2.2.15 Visokočvrsti čelici**

### **2.2.15.1 Uvod**

Kombinacijom različitih očvrstnuća – usitnjenjem zrna, martenzitnom transformacijom, precipitacijom (dozrijevanjem ili starenjem) povezano s deformacijom austenita, mogu se postići najviše vrijednosti granice razvlačenja ( $R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$ ) i čvrstoće od svih polikristaličnih materijala.

Važna svojstva za primjenu visokočvrstih čelika su: dovoljan duktilnost i otpornost na krhki lom, lomna žilavost, dovoljna otpornost na umor, zadovoljavajuća korozijska postojanost, čvrstoća pri povišenim i visokim radnim temperaturama, laka obradljivost odvajanjem čestica, zadovoljavajuća zavarljivost. [1]



## 2.2.15.2 Osnovne skupine visokočvrstih čelika

Visokočvrsti čelici mogu se svrstati u sljedeće skupine:

1. Niskolegirani niskopopušteni čelici – legirani silicijem ili niklom te kombinacijama Cr-Mo-V. Silicij pomiče područje niskotemperaturne krhkosti k višim temperaturama ( $> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), te omogućuje povišenje  $R_{p0,2}$ , srednjim popuštanjem pri oko  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Čelici bez Si, ali s Ni i CR, Mo i V imaju također dovoljnu žilavost nakon srednjotemperaturnog popuštanja.
2. Visokolegirani CR-MO-V visokopopušteni čelici - Po sastavu (oko 0,4 %C, oko 1 %Si, oko 5 %Cr; 1,3...“ %Mo i 0,4...1,0 %V) te načinu provedbe toplinske brade (kaljenje i visokotemperaturno popuštanje) poznati su i kao alatni čelici za topli rad. Kod ovih čelika postiže se potpuna prokaljivost i za velike dimenzije (promjeri do 300 mm). Vrijednost vlačne čvrstoće iznosi i do  $2000\text{ N/mm}^2$ .
3. Termomehanički obrađeni čelici – Kombinacijom postupaka oblikovanja deformiranjem i toplinske obradi kaljenjem i izotermičkog poboljšavanja postojećih čelika, moguće je istovremeno dobiti visoku granicu razvlačenja i čvrstoću uz relativno dobru plastičnost (duktilnost), odnosno visoku sigurnost od krhkog loma.

Danas se primjenjuju sljedeće termomehaničke ili mehanotermičke obrade: „Ausforming“ postupak, postupak TRIP (eng. Transformation Induced Plasticity), „Perlifforming“, „Isoforming“, „Marforming“.

4. Korozijski postojani precipitacijski očvrsnuti čelici – Razvojem korozijski postojanih precipitacijski očvrnutih čelika (PH – eng. Precipitation Hardened) željelo se ostvariti visoku granicu razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozijske postojanosti. Uz potreban što niži maseni udio ugljika i visok stupanj legiranosti, veliko očvrsnuće se u osnovi postiže preko precipitacije intermetalnih spojeva.

S obzirom na strukturu precipitacije razlikujemo: martenzitni PH-čelici, poluaustenitni PH čelici i austenitni PH čelici.

5. Čelici „maraging“ – Naziv maraging dolazi iz engleskog – „*Martensite aging*“ (dozrijevanje martenzita). Čelici maraging su po sastavu niskouglični ( $< 0,03\% \text{C}$ ), visokolegirani u ternarnom sustavu: Fe-Ni-Co ili u podsustavima Fe-Ni-Cr i Fe-Co-Cr s dodacima Mo, Ti, Al i Co. Nakon rastvornog žarenja čelik se mora intenzivno gasiti u vodi, ulju ili na zraku čime se dobiva masivni *nikl-martenzit*.

U takvom stanju izradak se oblikuje u željeni oblik i dimenzije. Čelici maraging imaju bolja tehnološka svojstva u odnosu na ostale visokočvrste čelike, a to su: male deformacije pri toplinskoj obradi, nema opasnosti od razugljeničavanja i oksidacije, laka obradljivost odvajanjem čestica i hladna deformabilnost nakon rastvornog žarenja, dobra zavarljivost zahvaljujući niskim udjelima C, P i S. Čelici maraging nalaze i konstrukcijsku i alatnu primjenu.

6. Hladnom deformacijom očvrnuti nelegirani i niskolegirani čelici – Kao što je poznato, hladna deformacija povišuje granicu razvlačenja i čvrstoću zbog povišene gustoće dislokacija, ali ovaj mehanizam očvrnuća snizuje duktilnost i povišuje prijelaznu temperaturu. U praksi se na taj način očvršćuju tanke žice za transportnu užad i užad žičara, žice za opruge, tanki limovi i trake i sl. [1]

## 2.3 Alatni čelici

### 2.3.1 Uvod

Alatni čelici služe za izradu alata kojima se obrađuju i oblikuju metalni ili nemetalni materijali. Zbog visokih opterećenja u radu i specifičnih funkcija, od alatnih čelika se zahtijevaju posebna svojstva: visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, postojanost tvrdoće pri visokim radnim temperaturama, otpornost na popuštanje. Primjenjuju se u toplinski obrađenom stanju primarno zakaljeni i popušteni.

Primjeri alata:

- a) Alati za obradu odvajanjem čestica: *tokarski noževi, svrdla, razvrtala*
- b) Alati za rezanje i hladno oblikovanje metala: *čekići, kliješta*
- c) Alati za toplo oblikovanje metala: *ukovnji, kalupi za prešanje metala*
- d) Alati za oblikovanje nemetala: *kalupi za prešanje keramike, kalupi za prešanje polimera*
- e) Mjerni alati: *pomična mjerila, kutnici* itd.

Zbog navedenih traženih svojstava i potrebe zakaljivanja te što boljeg prokaljivanja ti čelici u pravilu imaju viši maseni udio ugljika od konstrukcijskih čelika. [4]

### 2.3.2 Podjela alatnih čelika

Prema radnoj temperaturi i uvjetima primjene alatni čelici dijele se na:

- Alatni čelici za hladni rad ( $t_r < 200\text{ °C}$ ) – nelegirani i niskolegirani čelici, svojstva bitno ovise o masenom udjelu ugljika (0,5 ... 1,3 %C), viši udio ugljika znači višu tvrdoću i nižu žilavost i obratno.
- Alatni čelici za topli rad ( $t_r > 200\text{ °C}$ ) – vrlo visoka otpornost na popuštanje, zbog visokih radnih temperatura. Zbog visokih temperatura rada od ovih čelika se zahtjeva otpornost na trošenje, otpornost na plastične deformacije i visoka žilavost.
- Brzorezni čelici – čelici legirani s jakim karbidotvorcima (Cr, W, V, Mo) i s povišenim udjelom ugljika (0,7 ... 1,3 %C) koji stvaraju karbide postojane pri visokim temperaturama. Zbog takvog sastava i mikrostrukture se odlikuju visokom otpornošću na trošenje i popuštanje pri radnim temperaturama od 500 do 600 °C. [4]

### 2.3.3 Zahtjevi na alatne čelike

a) Primarni (temeljni) zahtjevi i svojstva:

- Otpornost na trošenje,
- Žilavost,
- Otpornost na popuštanje.

b) Proizvodni i ekonomski (sekundarni) zahtjevi i svojstva:

- mogućnost obrade alata,
- što veća zakaljivost,
- što veća prokaljivost,
- što manja promjena mjera u radu,
- što manje deformacije pri kaljenju,
- sigurnost protiv pojave pukotina i lomova tijekom toplinske obrade,
- što manja sklonost razugljeničavanju,
- mogućnost prebrušavanja u radu,
- prikladnost za poliranje,
- otpornost na koroziju,
- mogućnost nabave
- što manja cijena. [1]

### 2.3.4 Analiza primarnih zahtjeva

Otpornost na trošenje – Iskustvo pokazuje da 90% alata dotrajava zbog trošenja, pretežno abrazivnim mehanizmom – „mikrorezanjem“, pa je otpornost na trošenje najvažnije pri izboru alatnih čelika. U pravilu, trošenje izazva zatupljivanje oštrice reznog alata.

Otpornost na abrazijsko trošenje alata primarno je funkcija mikrostrukturnog stanja čelika tj. traži se:

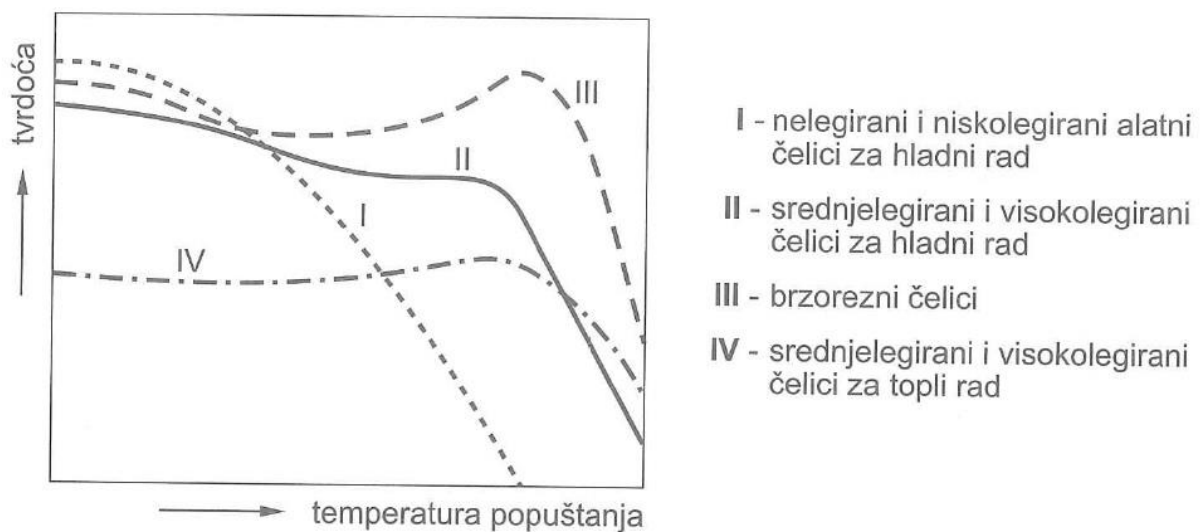
- **martenzitna struktura** sa što višom čvrstoćom,
- što viši udio kvalitetnih **karbida**.

Žilavost – Osim zbog prekomjernog trošenja alati stradavaju i zbog pojave pukotina ili loma. Sposobnost akumulacije udaraca može se poboljšati povećanjem duktilnosti materijala, ali je tada nužna manja granica tečenja ili povišena granica tečenja ali uz manju duktilnost materijala. S obzirom da se od čelika traži što veća tlačna opteretivost u radu, pogodnije je da čelik ima visoku granicu tečenja i manju duktilnost.

Velika žilavost traži se od posebno udarno opterećenih alata – čekići, dlijeta, dijelovi štanci, ukovnji i sl. Optimalna žilavost (duktilnost) pojedinog čelika postiže se pravilnim popuštanjem.

Otpornost na popuštanje – Ovo je bitan zahtjev za alate koji rade pri visokim temperaturama npr. kokile i ukovnji ili za alate kod kojih se u radu razvijaju visoke temperature npr. visokopterećeni rezni alati.

Povišena temperatura uzrokuje veći ili manji pad tvrdoće i čvrstoće i otpornosti na trošenje, već prema kojoj vrsti čelika se radi. Prema obliku krivulje popuštanja za čelike svrstavamo ih u četiri skupine prema Slici 10. [1]



Slika 10. Osnovne krivulje popuštanja različitih alatnih čelika [1]

## 3. ISPITIVANJE MATERIJALA

### 3.1 Uvod

Postupci dobijanja metala odavno su poznati. U prvo vrijeme metali su korišteni u stanju u kakvom su dobijeni iz ruda. Krajem devetnaestog stoljeća saznalo se da se svojstva metala osjetno mogu mijenjati nekim postupcima obrade (zagrijavanjem, kovanjem, valjanjem i sl.). Od tada se postepeno počelo sa sustavnim istraživanjem osobina metala, odnosno legura, pa se s vremenom razvila nova grana znanosti – metalurgija.

Njen zadatak je da ispituje fizičko – kemijska, posebno strukturna i mehanička svojstva metala i legura i da unapređuje metode njihovog istraživanja. Ona nastoji da se veliki broj podataka koji se s vremenom skupi, sredi i svede na ograničen broj principa i osnovnih zakona u cilju racionalnijeg razvoja proizvodnje metala i izbjegavanja čisto empirijskog rada.

S vremenom se razvio čitav niz postupaka ispitivanja kojima je cilj da se svojstva materijala što bolje upoznaju i tako što racionalnije iskoriste. Sve veći broj raznovrsnih materijala u primjeni i sve oštriji zahtjevi u pogledu kvalitete nametnuli su potrebu da se izvrši standardizacija i propišu osnovna svojstva raznih vrsta materijala, a samim tim i standardizacija postupaka ispitivanja.

Danas nije moguće zamisliti ni jedno poduzeće koje se bavi obradom metala, odnosno izradom metalnih proizvoda bez vlastite laboratorije sa opremom za različite vrste ispitivanja.

Značaj ispitivanja metala za razvoj tehnike i dosadašnja postignuća (od željeznice do zrakoplovstva) je nemjerljiv. [5]

## 3.2 Mehanički postupci ispitivanja

Rasprostranjena primjena metala kao gradivnih materijala pripisuje se prvenstveno njihovim izvanrednim mehaničkim svojstvima – visokoj čvrstoći uz odgovarajuću sposobnost deformiranja. Određivanje ovih svojstava vrši se mehaničkim postupcima ispitivanja.

S obzirom na način djelovanja sile, vrstu naprezanja i uvjete pri kojima se ova svojstva određuju može se načiniti više podjela:

- Prema načini djelovanja sile razlikuju se statička i dinamička ispitivanja:
  - Pod statičkim ispitivanjima podrazumijevaju se ona koja se obavljaju pri mirnom djelovanju sile tako da naprezanje postepeno raste, obično ne brže od  $10 \text{ N/m}^2$  u sekundi.
  - Kod dinamičkog ispitivanja sila djeluje udarno ili se često mijenja po određenom zakonu. Broj promjena opterećenja obično se kreće u granicama od 3 do 20,000 u minuti.
- S obzirom na vrstu naprezanja razlikuje se vlačno ispitivanje, tlačno ispitivanje, savijanje, uvijanje, smicanje itd. uz mogućnost njihovog kombiniranja. Sva ova ispitivanja mogu se vršiti pri statičkom ili dinamičkom djelovanju sile.

Mehanička ispitivanja uglavnom se rade na sobnoj temperaturi, ali isto tako i na niskim, odnosno povišenim temperaturama.

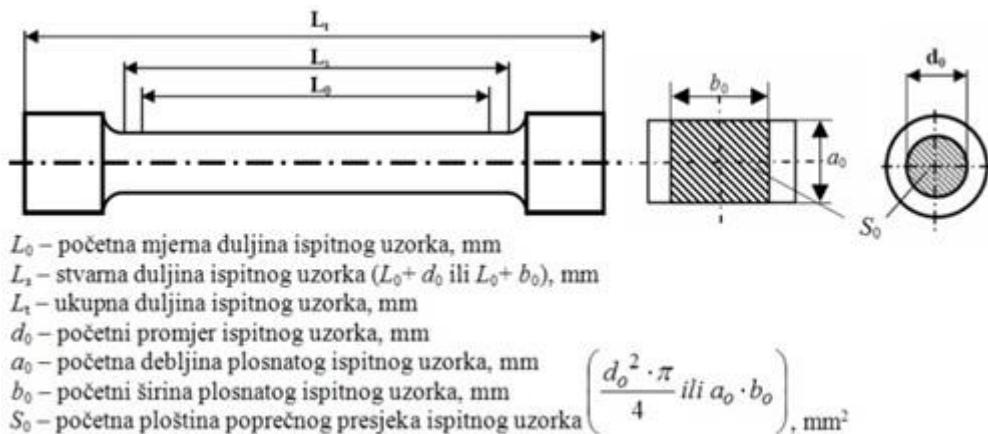
Posebnu skupinu čine tzv. tehnološka ispitivanja. Za razliku od mehaničkih ispitivanja pri kojima se određuju svojstva otpornosti, kod tehnoloških ispitivanja vrijednosti sila nisu od interesa već se isključivo promatra način deformiranja, odnosno oštećenja uslijed djelovanja vanjskih sila. [5]

### 3.3 Vlačno ispitivanje

Statičkim vlačnim pokusom utvrđuju se osnovna mehanička svojstva kao što su granica razvlačenja, modul elastičnosti, vlačna čvrstoća, suženje, istezljivost itd.

Vlačno ispitivanje materijala se provodi na uređaju tzv. *kidalici*, gdje se ispitni uzorak kontinuirano vlačno opterećuje sve do loma. Tokom ispitivanja kontinuirano se mjere sila i produljenje ispitnog uzorka te se pisačem grafički registrira dijagram *sila – produljenje*. [6]

Po pravilu, za ispitivanje materijala, ispitni uzorak izrađuje se u obliku epruvete cilindričnog ili prizmatičnog oblika. Srednji dio epruvete ima manju površinu poprečnog presjeka od poprečne površine krajeva da bi se lom tokom ispitivanja osigurao na mjernoj sredini. Ispitivanje statičke vlačne čvrstoće na kidalici pruža najpotpuniju sliku mehaničkih svojstava materijala, pa se stoga najčešće i primjenjuje. [5] [6]



Slika 11. Epruveta s dimenzijama [6]

Dijagram 1. Podjela epruveta po dimenzijama [6]

Razlikuju se dva osnovna tipa ispitnih uzoraka: normalni i proporcionalni. Po obliku su jednaki, ali se razlikuju po dimenzijama.

Tip ispitnog uzorka	Dimenzije presjeka $d_0$ , ili $a_0, b_0$ , mm	Početni presjek $S_0$ , mm <sup>2</sup>	Mjerna duljina $L_0$ , mm
Normalni	20	314	200
Prporcionalni, dugi	$d_0$	$S_0$	$10 d_0$
Prporcionalni, kratki	$d_0$	$S_0$	$5 d_0$
Plosnati prporcionalni, dugi	$a_0, b_0$	$S_0$	$11,3\sqrt{S_0}$
Plosnati prporcionalni, kratki	$a_0, b_0$	$S_0$	$5,65\sqrt{S_0}$

U izvještaju o rezultatima ispitivanja uvijek se mora navesti i vrsta epruvete.



### 3.4 Kidalica

Kidalica je mjerni instrument za statičko vlačno ispitivanje materijala. Svaka kidalica se sastoji od:

- kućišta
- mehanizma za prijenos sile na uzorak (mehanički ili hidraulički)
- pristroja za držanje uzorka ("čeljusti")
- uređaju za registriranje sile i produljenja

Kidalice su napredovale od čisto mehaničkih uređaja do modernih elektromehaničkih i hidrauličkih uređaja s naprednom elektronikom i mikroračunalima. Danas postoji čitav niz kidalica, od kojih je najraširenija univerzalna kidalica koja može opterećivati vlačno, tlačno i savojno.

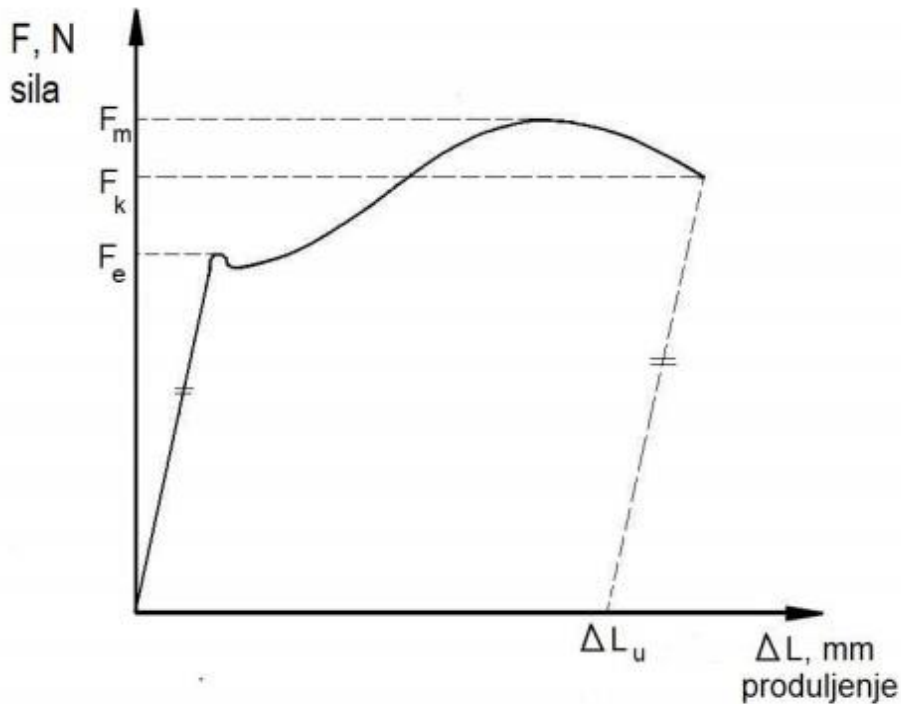
Suvremene kidalice trebaju biti što lakše za rukovanje, manje mase, da se opterećenje na uzorak prenosi na pravilan način te s točnim očitanjem sile. Opterećenje se postiže mirno, bez udara i drži konstantnim dulje vrijeme ako treba.

Podjela kidalica je prema:

- sustavu za opterećivanje
- položaju osi ispitnog uzorka
- vrsti uređaja za očitavanje, namjeni i sl.

S obzirom na položaj ispitnog uzorka, kidalice se dijele na horizontalne i vertikalne. Vertikalne kidalice su daleko zastupljenije u svakodnevnom radu, s maksimalnim silama do 1000 kN, pa i više. Često su tako konstruirane da se osim razvlačenja, mogu obavljati tlačna, savojna ispitivanja te smicanje.

Uređaj za mjerenje deformacije je obično u sklopu uređaja za ispis dijagrama naprezanja  $F - \Delta L$  (sila–apsolutno produljenje). On se sastoji iz valjka na kojemu je namotan papir (obično milimetarski). [7]



Slika 12. Dijagram kidanja [7]

Iz dijagrama (slika 7.)  $F_e$  predstavlja silu razvlačenja,  $F_m$  maksimalnu silu a  $F_k$  konačnu silu prilikom koje dolazi do loma epruvete.

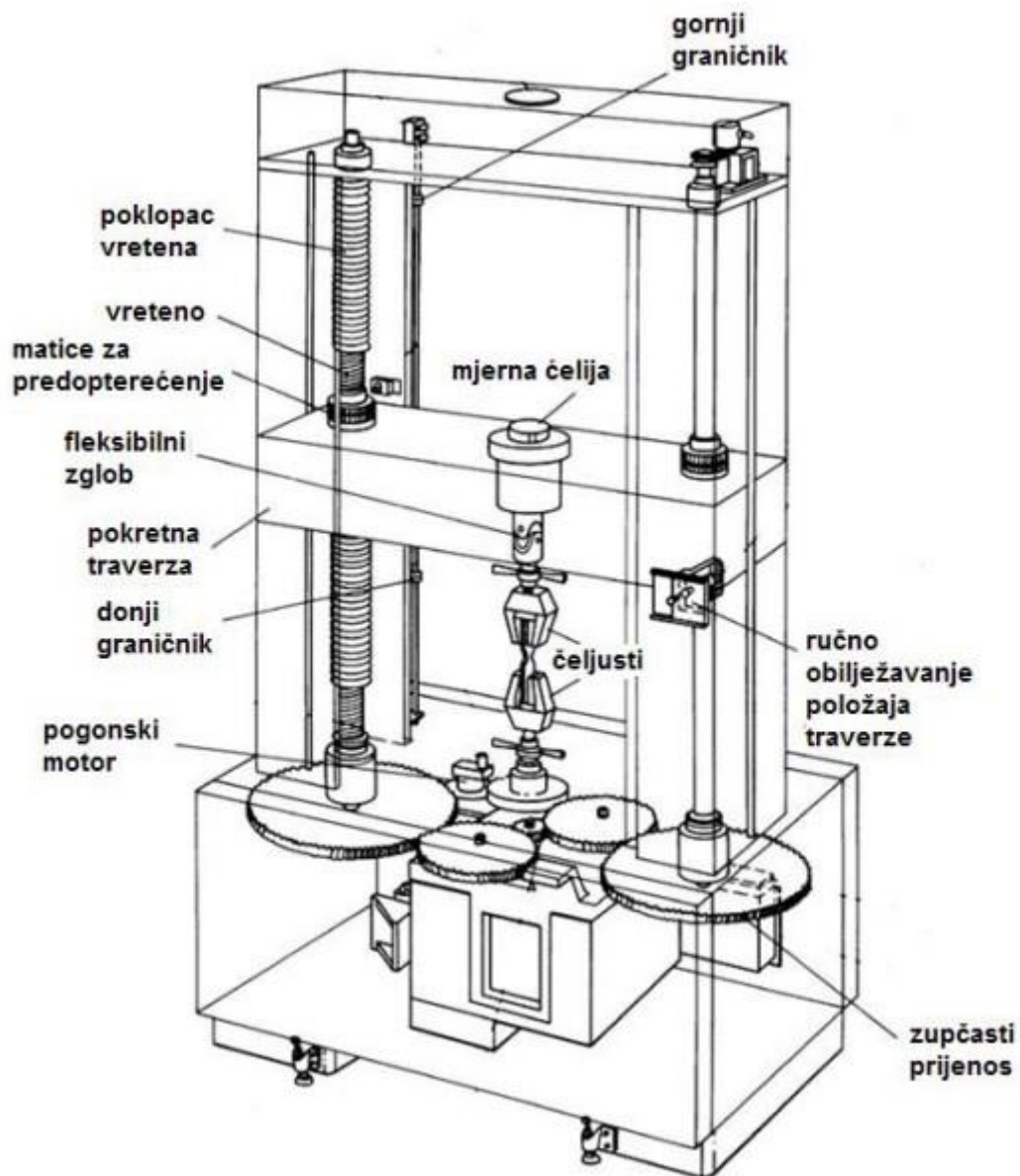
Ponašanje materijala pri vlačnom ispitivanju može se predstaviti dijagramom napreznja (sila – produljenje). Dijagram napreznja prikazuje međusobnu ovisnost  $\sigma$  - vlačnog napreznja i  $\varepsilon$  - relativnog produljenja ili linijske vlačne deformacije. U materijalu koji je opterećen nekom silom  $F$  nastaju napreznja  $\sigma$  koja uzrokuju njegovo rastezanje. Napreznje  $\sigma$  je omjer sile  $F$  i ploštine  $A$  presjeka štapa ili šipke (okomitog na smjer sile):

$$\delta = \frac{F}{A} \quad [N/mm^2]$$

Zbog djelovanja sile  $F$  (a time nastalog napreznja  $\sigma$ ) štap ili šipka će se od početne duljine  $L_0$  rastegnuti na duljinu  $L$ . Tako je produljenje štapa ili šipke:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [mm/mm]$$

[7] [8]



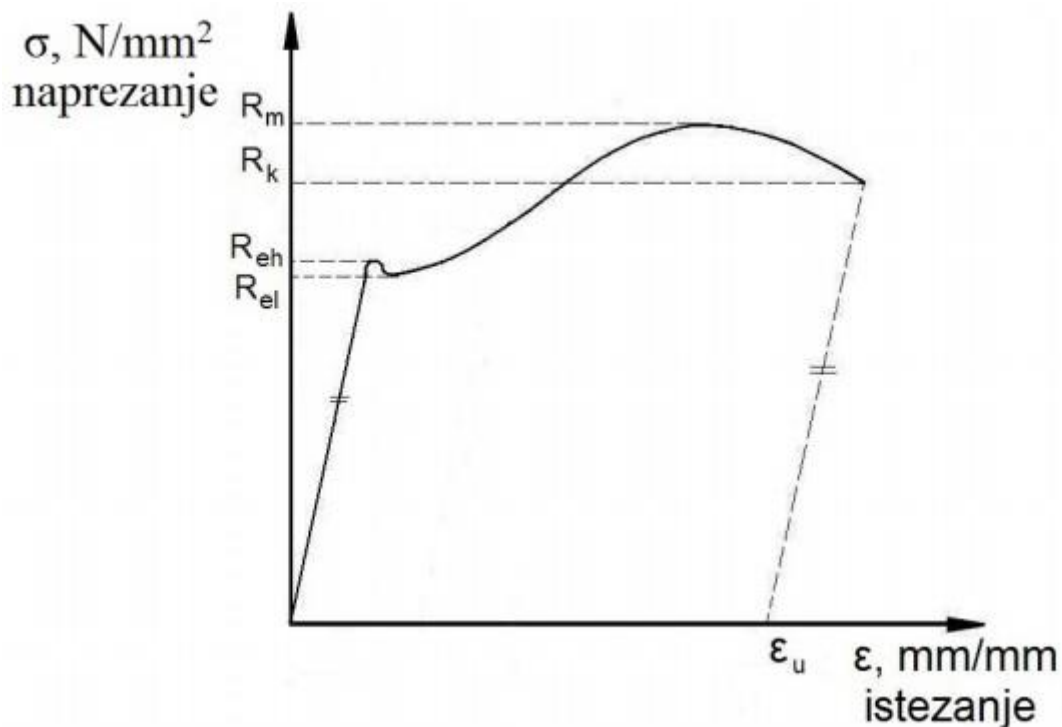
Slika 13. Elektromehanička kidalica [7]

### 3.5 Dijagram naprezanje – istežanje

Dijagram (slika 8.) počinje pravcem koji se naziva Hookeovim pravcem , u kojem vrijedi Hookeov zakon:

$$\delta = E \cdot \varepsilon \quad [N/mm^2]$$

gdje je E modul elastičnosti. U području u kojem vrijedi Hookeov zakon javljaju se samo elastične deformacije i nakon prestanka djelovanja sile materijal se vraća u početno stanje.



Slika 14. Dijagram naprežanje – istežanje [7]

Granica razvlačenja  $R_e$  utvrđena je izrazom:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [N/mm^2]$$

gdje je  $F_e$  sila tečenja a  $S_0$  početna površina poprečnog presjeka epruvete. Granicu razvlačenja određuju dvije vrijednosti: gornja granica razvlačenja  $R_{eh}$  i donja granica razvlačenja  $R_{el}$ .

Granica razvlačenja predstavlja naprezanje prema kojem se uz dopušteni stupanj sigurnosti predstavlja određuje maksimalno naprezanje pri radu strojnih dijelova.

Naprezanja veća od  $R_m$  uz elastičnu izaziva i elastičnu (trajnu) deformaciju. Naprezanje kod maksimalne sile  $F_m$  naziva se vlačna ili rastezna čvrstoća  $R_m$ . Vlačna čvrstoća  $R_m$  određena je omjerom maksimalne sile  $F_m$  i početne površine poprečnogpresjeka  $S_0$ .

Naprezanje do kojeg dolazi do loma naziva se konačno naprezanje  $R_k$ , ono je određeno je omjerom konačne sile  $F_k$  i početne površine poprečnog presjeka  $S_0$ . [7]

## 4. POSTAVKA ZADATKA

Nakon teorijskog dijela, slijedi eksperimentalni dio u kojem će biti prikazana primjena norme HRN ISO 6892-1 u ispitivanju materijala. Ispitivanje se radilo u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu (VUK-a). Nakon izvršenog ispitivanja, slijedi prikaz i analiza rezultata.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1 Norma

ISO (International Organization of Standardization) , hrv. Međunarodna organizacija za standardizaciju, je svjetska federacija nacionalnih standarda (ISO member bodies). Rad na pripremi Međunarodnih Standarda se radi kroz ISO-ov tehnički komitet. Svaki član zainteresiran za materiju zbog koje je sazvan tehnički komitet ima pravo sudjelovanja u samom komitetu. Međunarodne organizacije, vlade i NVO sektor, u suradnji s ISO-om, također sudjeluju u radu. ISO blisko surađuje s Međunarodnim elektrotehničkim komitetom (IEC) na svim pitanjima vezanim za elektrotehničku standardizaciju.

Glavni zadatak tehničkih komiteta je priprema Međunarodnih standarda. Skice Međunarodnih Standarda usvojenih od strane tehničkog komiteta su prosljeđene članovima tijela i stavljene na glasovanje. Publikacija kao Međunarodni Standard zahtjeva odobrenje najmanje 75% članova tijela koji su prisutni tokom glasovanja.

Pozornost se usmjerava na mogućnost da su neki elementi ovih dokumenata podložni patentnim pravima. ISO neće biti odgovoran za identifikaciju bilo kojeg ili svih patentnih prava.

ISO 6892-1 je pripremljen od strane Tehničkog komiteta ISO/TC 164, *Mechanical testing of metals*. Podkomitet SC 1, *Uniaxial testing*.

Prvo izdanje ISO 6892-1 ukida i zamjenjuje ISO 6892: 1998. [11]

## 5.2 METALNI MATERIJALI

### – ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE –

#### Metoda ispitivanja na sobnoj temeperaturi

##### 5.2.1 Područje primjene

Ovaj dio ISO 6892 specificira metodu vlačnog ispitivanja metalnih materijala i definira mehanička svojstva koja mogu biti određena na sobnoj temperaturi. [11]

##### 5.2.2 Pravni okvir

Sljedeći dokumenti su neophodni za primjenu ovog dokumenta. Za datu referencu, samo citirano izdanje se primjenjuje. Za nedatirane reference, primjenjuje se zadnje izdanje referentnog dokumenta (uključujući izmjene i dopune).

ISO 377, *Steel and steel products -- Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing*

ISO 2566-1, *Steel -- Conversion of elongation values -- Part 1: Carbon and low alloy steels*

ISO 2566-2, *Steel -- Conversion of elongation values -- Part 2: Austenitic steels*

ISO 7500-1, *Metallic materials -- Calibration and verification of static uniaxial testing machines -- Part 1: Tension/compression testing machines -- Calibration and verification of the force-measuring system*

ISO 9513, *Metallic materials -- Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing* [11]



## **5.3 Termini i definicije**

Za potrebe ovog dokumenta, primjenjuju se ovi termini i definicije.

### **5.3.1 Mjerna duljina $L$**

Duljina paralelnog dijela epruvete na kojem je istežanje mjereno u bilo kojem trenutku tokom ispitivanja. [11]

### **5.3.2 Početna mjerna duljina $L_0$**

Duljina između obilježenih dijelova mjerne duljine (5.3.1) na epruveti mjereno pri sobnoj temperaturi prije ispitivanja. [11]

### **5.3.3**

#### **Konačna mjerna duljina nakon loma**

#### **Konačna mjerna duljina nakon loma $L_u$**

Duljina između obilježenih dijelova mjerne duljine (5.3.1) na epruveti mjereno pri sobnoj temperaturi poslije pucanja, dva komada pažljivo spojena natrag zajedno, tako da im osi leže u ravnoj liniji. [11]

### **5.3.4 Istezljivost**

Povećanje u početne mjerne duljine (5.3.2) u bilo kojem trenutku tokom ispitivanja. [11]

### **5.3.5 Istezljivost u postocima**

Produljenje izraženo kao postotak početne mjerne duljine,  $L_0$  (5.3.2). [11]

### **5.3.6 Trajno istežanje u postocima**

Povećanje izvorne mjerne duljine (5.3.2) epruvete nakon rasterećenja, izraženo kao postotak početne mjerne duljine,  $L_0$ . [11]

### 5.3.7 Istezljivost u postocima nakon loma

Trajna istezljivost mjerne duljine nakon loma ( $L_u - L_0$ ), izražena kao postotak od početne mjerna duljina,  $L_0$ . [11]

### 5.3.8 Postotak smanjenja presjeka Z (kontrakcija)

Najveća promjena poprečnog presjeka koja se dogodila za vrijeme ispitivanja, ( $S_0 - S_u$ ), izraženo kao postotak početnog poprečnog presjeka,  $S_0$ :

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad [\%]. \quad [11]$$

## 5.4 Maksimalna sila

### 5.4.1 Maksimalna sila $F_m$

Najveća sila koju ispitni uzorak može izdržati tokom ispitivanja. [11]

### 5.4.2 Naprezanje

U bilo kojem trenutku tokom ispitivanja, sila podijeljena s početnim poprečnim presjekom epruvete,  $S_0$ . [11]

### 5.4.3 Vlačna čvrstoća $R_m$

Naprezanje pri maksimalnoj sili,  $F_m$  (5.4.1). [11]

### 5.4.4 Granica razvlačenja $R_e$

Naprezanje koje odgovara točki postignutoj tokom ispitivanja na kojem se plastična deformacija pojavljuje bez povećanja sile. [11]

## 5.5 Lom

Pojava koja se dogodi kada dođe do konačnog odvajanje epruvete (puknuća). [11]

## 5.6 Principi

Ispitivanje uključuje naprezanje ispitnog komada vlačnom silom, do loma, za određivanje jednog ili više mehaničkih svojstava.

Ispitivanje se provodi na sobnoj temperaturi u prostoriji u kojoj je temperatura između 10 i 35 °C, osim ako nije drugačije naznačeno. Test se obavlja u kontroliranim uvjetima, na temperaturi od 23 ° C ± 5 ° C. [11]

## 5.7 Epruveta (oblik i dimenzije)

### 5.7.1 Općenito

Oblik i dimenzije epruvete mogu biti ograničene na oblik i dimenzije metalnog proizvoda od kojeg je ispitni uzorak uzet.

Epruveta se obično dobije obradom uzorka iz proizvoda , prešanjem ili lijevanjem. Međutim, proizvodi jednolikog presjeka (profili, šipke, žice i sl.) i izliveni ispitni uzorci (od lijevanog željeza i obojenih legura) mogu se ispitati bez strojne obrade.

Poprečni presjek epruveta može biti kružni, kvadratni, pravokutni, prstenasti ili u posebnim slučajevima, neki drugi tip presjeka.

Poželjne epruvete imaju izravan odnos između početne mjerne duljine  $L_0$  i početnog poprečnog presjeka  $S_0$ , izraženo jednačinom  $L_0 = k\sqrt{S_0}$ , gdje je  $k$  koeficijent proporcionalnosti, i zato se zovu proporcionalni ispitni komadi. Međunarodno usvojena vrijednost za  $k$  je 5,65. Početna mjerna duljina ne smije biti manja od 15 mm. Kada je površina poprečnog presjeka epruvete premala za  $k= 5,65$ , mogu se uzeti veće vrijednosti (poželjno 11,3) ili ne-proporcionalni ispitni uzorci.

### NAPOMENA

Koristeći početnu mjerna duljinu manju od 20 mm, mjerna nesigurnost se povećava.

Za ne-proporcionalne epruvete, početna mjerna duljina  $L_0$  je neovisna od početnog presjeka  $S_0$ .

Drugi ispitni uzorci kao oni navedeni u relevantnim proizvodnim ili nacionalnim standardima mogu se koristiti u dogovoru s klijentom/kupcem, npr. ISO 3183 (API 5L), ISO 11960 (API 5CT), ASTM A370, ASTM E8M, DIN 50125, IAKS W2 i JIS Z2201. [11]

### **5.7.2 Obrađene epruvete**

Obrađene epruvete trebaju imati ugrađeni prijelazni radijus između glave za prihvat i paralelne dužine ako imaju različite dimenzije. Dimenzije prijelaznog radijusa su važne, a preporučuje se da se definiraju u specifikaciji materijala ako nisu navedene u odgovarajućem dodatku.

Glava za prihvat može biti bilo kojeg oblika koji odgovara hvataljkama ispitnog stroja. Os epruvete mora biti podudarna s osi primjenjene sile.

Paralelna duljina  $L_c$ , ili u slučaju kad epruveta nema prijelazni radijus, slobodna duljina između hvataljki, uvijek će biti veća od početne mjerne duljine,  $L_0$ . [11]

### **5.7.3 Neobrađene epruvete**

Ako se epruveta sastoji od neobrađenog proizvoda ili neobrađene šipke, slobodna duljina između hvataljki mora biti dovoljna za mjerač da se nalazi na razumnoj udaljenosti od hvataljki.

Izlivene epruvete trebaju imati ugrađeni prijelazni radijus između hvataljki i paralelne duljine. Dimenzije ovog prijelaznog radijusa su važne i preporučljivo je da budu definirane u proizvodnom standardu.



Glave za prihvat mogu biti bilo kojeg oblika koji odgovaraju hvataljkama ispitnog stroja. Paralelna duljina  $L_c$ , uvijek će biti veća od početne mjerne duljine  $L_0$ . [11]

## 5.8 Tipovi

Tipovi epruveta su definirani prema obliku i dimenzijama (tablica 2.). Drugi tipovi mogu biti navedeni u proizvodnim standardima.

Tablica 2. Glavni tipovi epruveta [11]

Dimenzije u milimetrima

Type of product		Corresponding Annex
<b>Sheets — Plates — Flats</b>  <b>Thickness</b> $a$	<b>Wire — Bars — Sections</b>  <b>Diameter or side</b>	
$0,1 \leq a < 3$	—	B
—	$< 4$	C
$a \geq 3$	$\geq 4$	D
<b>Tubes</b>		E

## 5.9 Priprema ispitnih uzoraka

Ispitni uzorci će biti pripremljeni u skladu s propisima relevantnih Međunarodnih standarda (npr. ISO 377). [11]

## 6. ODREĐIVANJE POČETNOG POPREČNOG PRESJEKA

Relevantne dimenzije epruvete treba mjeriti sa dovoljnom okomicom poprečnog presjeka na uzdužnu os središnjeg dijela paralelne dužine epruvete.

Početni poprečni presjek  $S_0$ , je prosječna površina poprečnog presjeka i izračunava se iz mjerenja odgovarajućih dimenzija. Točnost ovog izračuna ovisi o prirodi i vrsti epruvete.

Početni poprečni presjek računa se po formuli:

$$S_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} \text{ [mm}^2\text{]}; \text{ gdje je:}$$

$d_0$  – promjer epruvete [11]

## 7. OBILJEŽAVANJE POČETNE MJERNE DULJINE

Svaki kraj početne mjerne duljine  $L_0$ , moraju biti označeni pomoću finih oznaka ili obilježenih linija, ali ne i urezi koji bi mogli dovesti do preranog loma.

Za proporcionalnost ispitnih uzoraka, izračunata vrijednost početne mjerne duljine može biti zaokružena na najbližu vrijednost do 5 mm, s tim da je razlika između izračunate i obilježene mjerne duljine mora biti manja od 10%  $L_0$ . Početna mjerna duljina mora biti označena s točnošću od  $\pm 1\%$ .

Ako je paralelna duljina  $L_c$ , mnogo veća od početne mjerne duljine kao što je, primjerice, slučaj s neobrađenim epruvetama, niz preklapajućih mjernih duljina može biti obilježeno.

U nekim slučajevima može biti korisno nacrtati, na površini epruvete, paralelnu liniju s uzdužnom osi, duž koje su mjerne duljina označene. [11]

## 8. TOČNOST UREĐAJA ZA MJERENJE

Sustav za mjerenje sile ispitnog uređaja mora biti kalibriran u skladu s ISO 7500-1, klasa 1, ili bolje.

Za određivanje konvencionalne granice razvlačenja upotrijebljeni ekstenziometar mora biti u skladu s ISO 9513, klasa 1 ili bolje, u odgovarajućem rasponu. Za ostala svojstva (s višom deformacijom) može se koristiti ISO 9513, ekstenziometar klase 2 u odgovarajućem rasponu. [11]



## 9. RADNI UVJETI

### 9.1 Podešavanje sile na nultu točku

Sustav za mjerenje sile mora biti postavljen na nulu nakon što je ispitan i sastavljen, ali prije nego što je epruveta stegnuta u pakne na oba kraja. Nakon što je nulta točka postavljena, sustav za mjerenje sile se ne može mijenjati na bilo koji način tijekom ispitivanja.

NAPOMENA Korištenje ovog postupka osigurava da se s jedne strane težina sustava za stezanje kompenzira silom mjerenja, a s druge strane, bilo koja posljedica djelovanja stezanja ne utječe ovo mjerenje. [11]

### 9.2 Postupak zahvata

Uzorci moraju biti uhvaćena sa prikladnim sredstvima, potrebno je osigurati da se epruvete održavaju na takav način da se sila primjenjuje osno što je više moguće, kako bi se smanjilo savijanje. To je posebno važno kada se ispituje lomljiv materijal ili pri određivanju granice razvlačenja (plastična deformacija, ukupna deformacija).

Da bi se dobila ravna epruveta i osigurano usklađivanje epruvete i zahvata, može se primijeniti preliminarna sila pod uvjetom da ne prelazi vrijednost koja odgovara 5% navedene ili očekivane granice razvlačenja.

Korekciju produženja treba provesti i uzeti u obzir učinak preliminarne sile. [11]

## 10. ODREĐIVANJE POSTOTKA ISTEZANJA NAKON LOMA

U tu svrhu, dva slomljena komada epruvete treba pažljivo spojiti natrag zajedno, tako da njihove osi leže u ravnoj liniji.

Moraju se poduzeti posebne mjere opreza kako bi osigurali ispravan kontakt između polomljenih dijelova epruvete kada mjerimo konačnu mjernu duljinu. To je osobito važno za epruvete s malim poprečnim presjekom i one s malom vrijednošću istezanja.

Postotak produljenje nakon loma računa se po formuli:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_u} \times 100 \text{ [%]}; \text{ gdje je:}$$

$L_0$  – početna mjerna duljina

$L_u$  – konačna mjerna duljina (nakon loma) [11]

## 11. ODREĐIVANJE KONTRAKCIJE PRESJEKA NAKON LOMA

Ako je potrebno, dva slomljena komada epruvete treba pažljivo spojiti natrag zajedno, tako da njihove osi leže u ravnoj liniji.

Kontraktcija poprečnog presjeka računa se po formuli:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 \quad [\%]; \text{ gdje je:}$$

$S_0$  – početni poprečni presjek mjerne duljine

$S_u$  – minimalni poprečni presjek (nakon loma) [11]

## 12. IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU

### 12.1 Identifikacija ispitnog uzorka

Ispitni uzorak je epruveta, ispitano je 5 epruveta.

Dimenzije:  $d_0 = 8 \text{ mm}$

$$S_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} = 50,265 \text{ mm}^2$$



Slika 15. Epruveta s ispitivanja (prije loma)



Slika 16. Epruvete s ispitivanja (nakon loma)

## 12.2 Materijal ispitnog uzorka

Materijal X20CrMoV12-1:

- visokolegirani čelik – Super +12 %Cr
- martenzitni čelik (M+F)
- povišena mehanička otpornost pri povišenim temperaturama:
  - $T_r = 550 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$
- Visoka postojanost na opću koroziju [9]

Tablica 3. Kemijski sastav materijala X20CrMoV12-1 [9]

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>Struktura</b>
0,17	0,3	0,1	11,0	0,30	0,8	0,25	M+F
do	do	do	do	do	do	do	
0,23	0,8	0,5	12,5	0,80	1,2	0,35	

Tablica 4. Mehanička svojstva materijala X20CrMoV12-1 [9]

<b>R<sub>m</sub>, MPa</b>	<b>R<sub>e</sub>, MPa</b>	<b>A<sub>5</sub>, %</b>	<b>HB</b>
900 - 1050	700	>11	285 - 293

## 12.3 Lokacija i mjesto ispitivanja

Ispitivanje materijala je obavljeno u laboratoriji za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu, Trg J. J. Strossmayera 9. Karlovac.

Unutar strojarskih laboratorija Veleučilišta u Karlovcu moguće je vršiti : **ispitivanje čvrstoće materijala**, ispitivanje tvrdoće materijala, udarni rad loma, metalografska ispitivanja i kemijsku analizu materijala.

Statičkim vlačnim ispitivanjem na kidalicama koje posjeduje Veleučilište u Karlovcu moguće je utvrditi osnovne značajke materijala kao što su :

- Vlačna čvrstoća –  $R_m$ ,
- Granica razvalačenja materijala –  $R_e$ ,
- Istezljivost –  $A$ ,
- Kontrakcija –  $Z$ ,
- Modul elastičnosti –  $E$ . [10]

## Kidalica Otto Wolpert Werke

Tip U60, 1953. godina:

- mjerno područje: do 600 kN
- Mjerenje: vlačne i tlačne čvrstoće, granice razvlačenja, istezanja, kontrakcije...
- Tehnološke probe: savijanje, spljoštavanje, proširivanje, duboko izvačenje, ...
- Ispitivanje limova, zavara [10]



Slika 17. Kidalica Otto Wolpert Werke





Slika 18. Kidalica Otto Wolpert Werke

## 12.4 Rezultati ispitivanja

Granica razvlačenja  $R_e$

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Rezultati:

$$\text{Epruveta 1. } R_{e1} = \frac{42500}{50,265} = 845 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Epruveta 2. } R_{e2} = \frac{43500}{50,265} = 865 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Epruveta 3. } R_{e3} = \frac{46000}{50,265} = 915 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Epruveta 4. } R_{e4} = \frac{41500}{50,265} = 826 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Epruveta 5. } R_{e5} = \frac{45000}{50,265} = 905 \text{ N/mm}^2$$

Vlačna čvrstoća  $R_m$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Rezultati:

$$\text{Epruveta 1. } R_{m1} = \frac{50000}{50,265} = 995 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Epruveta 2. } R_{m2} = \frac{49000}{50,265} = 975 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Epruveta 3. } R_{m3} = \frac{52000}{50,265} = 1035 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Epruveta 4. } R_{m4} = \frac{50500}{50,265} = 1005 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Epruveta 5. } R_{m5} = \frac{48500}{50,265} = 965 \text{ N/mm}^2$$

### Izduženje A

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_u} \times 100 \text{ [%]}$$

#### Rezultati:

$$\text{Epruveta 1. } A_1 = \frac{54,57 - 46,72}{46,72} \times 100 = 16,8 \%$$

$$\text{Epruveta 2. } A_2 = \frac{50,17 - 44,8}{44,8} \times 100 = 12 \%$$

$$\text{Epruveta 3. } A_3 = \frac{53,82 - 46,4}{46,4} \times 100 = 16 \%$$

$$\text{Epruveta 4. } A_4 = \frac{46,66 - 43,2}{43,2} \times 100 = 8 \%$$

$$\text{Epruveta 5. } A_5 = \frac{51,08 - 45,2}{45,2} \times 100 = 13 \%$$

### Kontrakcija Z

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 \text{ [%]}$$

#### Rezultati:

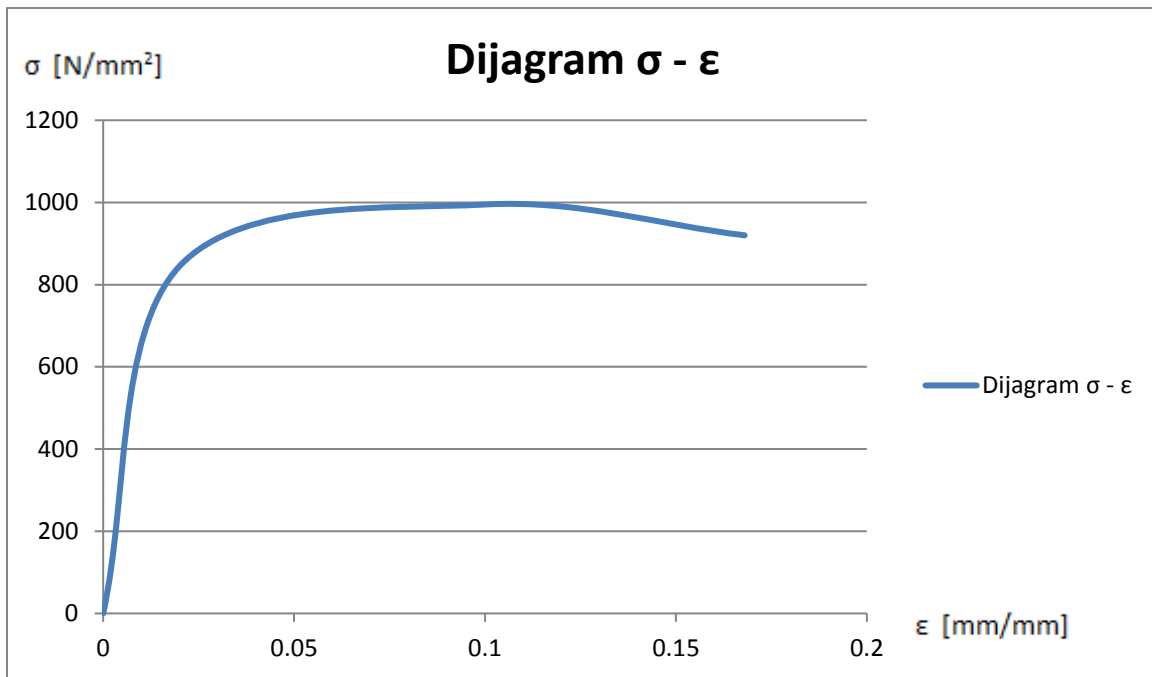
$$\text{Epruveta 1. } Z_1 = \frac{5,68 - 2,86}{5,68} \times 100 = 49,6 \%$$

$$\text{Epruveta 2. } Z_2 = \frac{5,48 - 2,53}{5,48} \times 100 = 52 \%$$

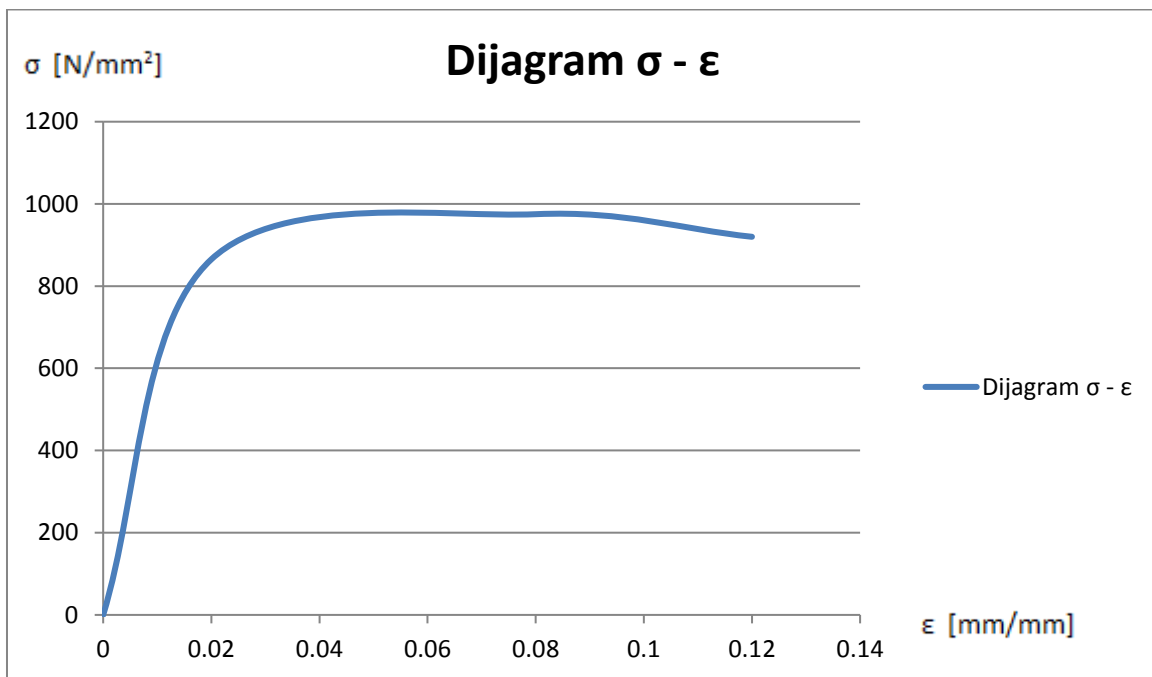
$$\text{Epruveta 3. } Z_3 = \frac{5,67 - 2,84}{5,67} \times 100 = 49,8 \%$$

$$\text{Epruveta 4. } Z_4 = \frac{5,52 - 2,76}{5,52} \times 100 = 50 \%$$

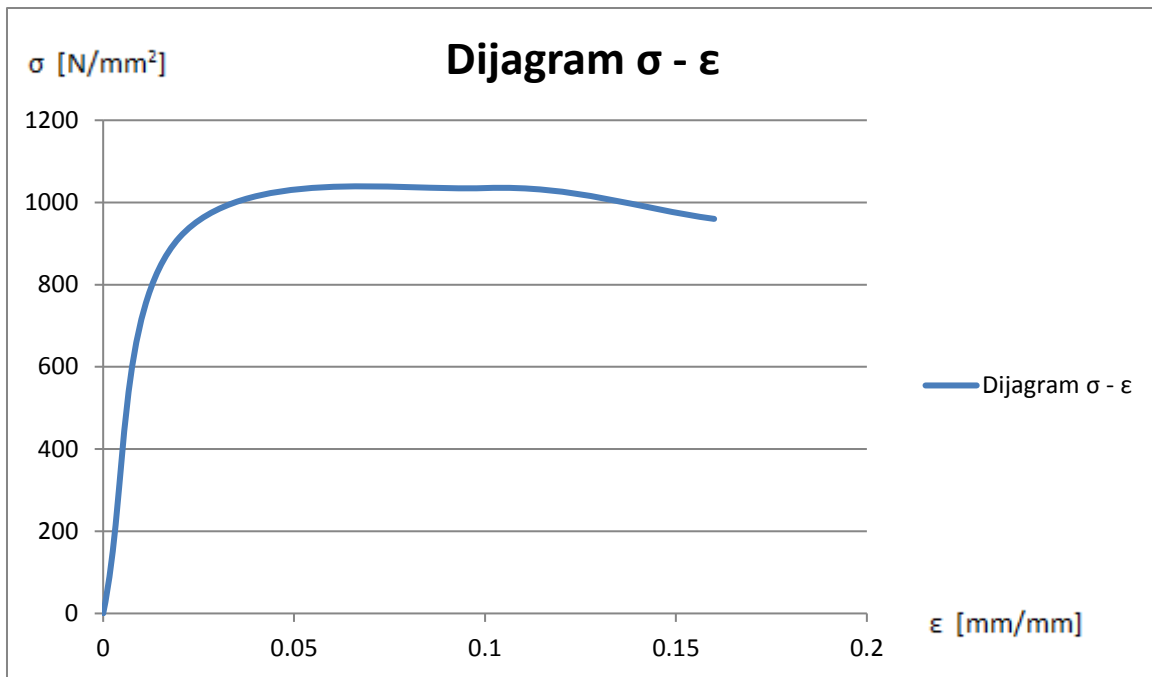
$$\text{Epruveta 5. } Z_5 = \frac{5,33 - 2,36}{5,33} \times 100 = 55,61 \%$$



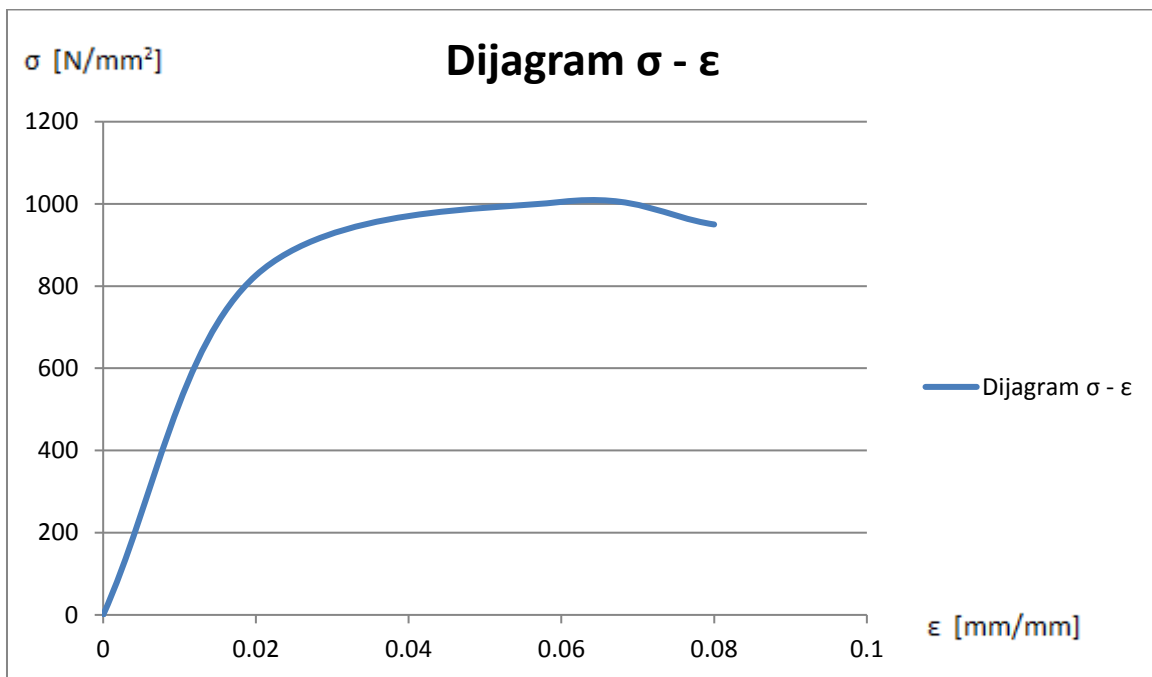
Slika 19. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 1



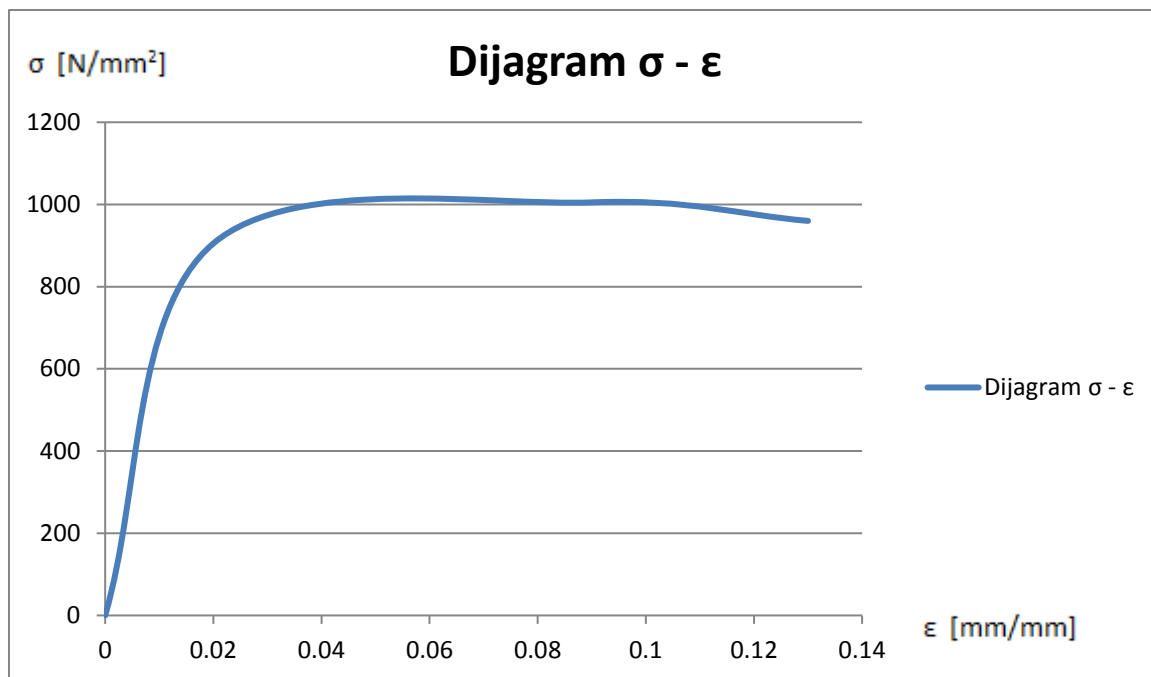
Slika 20. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 2



Slika 21. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 3



Slika 22. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 4



Slika 23. Dijagram „naprezanje – istezanje“ za epruvetu 5

## 12.5 Analiza rezultata

U tablici 5. prikazane su sve značajke ispitivanja dobivene ispitivanjem na kidalici te izračunima po poznatim formulama, iz tih značajki možemo izvršiti analizu rezultata.

Tablica 5. Značajke ispitivanja

Značajke ispitivanja	Granica razvlačenja $R_e$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vlačna čvrstoća $R_e$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Izduženje A [%]	Kontrakcija Z [%]	Dimenzije epruvete [mm]
Epruveta 1	845	995	16,8	49,6	Ø8
Epruveta 2	865	975	12	52	Ø8
Epruveta 3	915	1035	16	49,8	Ø8
Epruveta 4	826	1005	8	50	Ø8
Epruveta 5	905	965	13	55,61	Ø8

Analizom rezultata ispitivanja može se potvrditi da su mehanička svojstva epruveta od materijala X20CrMoV12-1, unutar već utvrđenih vrijednosti mehaničkih svojstava za dani materijal (tablica 4.). Jedino uočeno odstupanje se nalazi kod epruvete 4., gdje je izračunato izduženje A, manje od utvrđene vrijednosti (norme) za dani materijal.

## 13. ZAKLJUČAK

Konstruktivski čelici predstavljaju najveću i po upotrebi najrašireniju skupinu čelika, nalaze upotrebu u svim segmentima ljudskog djelovanja (strojarstvo, brodogradnja, građevinarstvo, kemijska, petrokemijska, farmaceutska i prehrambena industrija itd.). Sposobnost konstruktivskih čelika da svojom mikrostrukturom, legiranjem i raznim vrstama obrada i poboljšavanja odgovore na postavljene zahtjeve i svojstva čine ih nezaobilaznim u svim konstruktivskim rješenjima i izazovima.

Vlačno ispitivanje je najvažnija metoda ispitivanja materijala, jer daje najpotpuniju sliku vrijednosti mehaničkih svojstava. U eksperimentalnom dijelu ovog rada, vlačnim ispitivanjem vršenom po normi ISO 6892-1 dokazana je visoka preciznost i pouzdanost mjerenja vrijednosti mehaničkih svojstava na kidalici. Nema nikakve sumnje da će ova metoda mjerenja i u budućnosti biti jedna od temeljnih u ispitivanju i razvoju metalnih materijala.

# LITERATURA

[1] Tomislav Filetin, Franjo Kovačićek, Janez Indof - Svojstva i primjena materijala, Zagreb 2006

[2] <https://ironlady003.wordpress.com/2013/09/12/znacaj-podela-i-vrste-materijala/>

[3] <http://hr.wikipedia.org/wiki/čelik>

[4] Nikola Sonički – Tehnički materijali, Karlovac 2013

[5] Petar Terzić „Ispitivanje metala“ Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1988.

[6] Prof. Dr. Ivica Kladarić – Mehanička svojstva materijala: statički vlačni pokus

[7] Analiza utjecaja broja predopterećenja na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja – završni rad, Robert Renjo, Zagreb 2010

[8] [https://hr.wikipedia.org/wiki/dijagram\\_naprezanja](https://hr.wikipedia.org/wiki/dijagram_naprezanja)

[9] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/visoko.pdf>

[10] <http://cmk.vuka.hr/hr/ispitivanje-materijala/>

[11] Metalni materijali – Ispitivanje vlačne čvrstoće – 1. Dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi (ISO 6892-1:2009; EN ISO 6892-1:2009)



# PRILOZI

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING								
<u>Radni nalog</u> Work order		<u>Naručitelj</u> Purchaser	<u>Veleučilište u Karlovcu</u>					
<u>Broj crteža</u> Drawing No.		<u>Narudžba br.</u> Order No.						
<u>Materijal</u> Material	X20CrMoV12-1	<u>Količina</u> Quantity						
<u>Norma</u> Standard		<u>Tehnički propis</u> Technical Specifications						
<u>Broj šarže</u> Cast No.		<u>Broj probe</u> Test piece No.						
<u>Dimenzija</u> Dimension		<u>Toplinska obrada</u> Heat treatment						
<u>Predmet</u> Object								
MEHANIČKA SVOJSTVA / MECHANICAL PROPERTIES								
Značajke ispitivanja Test marks	Dimenzija epruvete [mm] Dimension test piece	Granica razvlačenja Re [N/mm <sup>2</sup> ] Yield strenght	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm <sup>2</sup> ] Tensile strenght	Izduženje A [%] Elongation	Kontrakcija Z [%] Contraction	Udarni rad loma KU [J] 20°C Impact energy	Tvrdoća HB Hardness value	Savijanje Bending
<u>Zahtijevano</u> In accordance	Ø8							
<u>Utvrđeno</u> Realized 1	Ø8	42 500 <b>845</b>	50 000 <b>995</b>	46,72 <b>16,8</b>	5,68 <b>49,6</b>			
<u>Utvrđeno</u> Realized 2	Ø8	43 500 <b>865</b>	49 000 <b>975</b>	44,8 <b>12</b>	5,48 <b>53</b>			
<u>Utvrđeno</u> Realized 3	Ø8	46 000 <b>915</b>	52 000 <b>1035</b>	46,4 <b>16</b>	5,67 <b>49,8</b>			
<u>Utvrđeno</u> Realized 4	Ø8	41 500 <b>826</b>	50 500 <b>1005</b>	43,2 <b>8</b>	5,52 <b>50</b>			
<u>Utvrđeno</u> Realized 5	Ø8	45 500 <b>905</b>	48 500 <b>965</b>	45,2 <b>13</b>	5,33 <b>55,61</b>			

Prilog 1. Izvješće o ispitivanju materijala