

Analiza svojstava konstrukcijskih i alatnih čelika

Fember, Saša

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

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:128:082261>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-17**



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 REPOZITORIJ

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA
PROIZVODNO STROJARSTVO**

SAŠA FEMBER

**ANALIZA SVOJSTAVA KONSTRUKCIJSKIH I
ALATNIH ČELIKA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2016.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA
PROIZVODNO STROJARSTVO**

SAŠA FEMBER

**ANALIZA SVOJSTAVA KONSTRUKCIJSKIH I
ALATNIH ČELIKA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.

KARLOVAC, 2016.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J. J. Strossmayera 9
HR • 47000 Karlovac • Croatia
tel. +385 (0)47 843-510
fax. +385 (0)47 843-579
e-mail: referada@vuka.hr



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

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

Usmjerenje:PROIZVODNO STROJARSTVO.....Karlovac, ..22.02.2016.....

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:SAŠA FEMBER..... Matični broj:0111408003.....

Naslov:ANALIZA SVOJSTAVA KONSTRUKCIJSKIH I ALATNIH ČELIKA.....

Opis zadatka:

U radu je nakon uvoda u teorijskom dijelu potrebno opisati razvoj i podjelu čelika, te opisati konstrukcijske i alatne čelike i njihova svojstva. Posebno obraditi mehanička svojstva čelika. Nakon postavke zadatka, u eksperimentalnom dijelu, napraviti ispitivanje mehaničkih svojstava i utvrđivanje kemijskog sastava na probnim uzorcima iz 3 izabrane vrste čelika, te napraviti analizu dobivenih rezultata. Na kraju napisati zaključak. Eksperimentalni dio rada odraditi u laboratoriju Veleučilišta. Završni rad urediti prema pravilima VUK.a.

Zadatak zadan:
22.02.2016.

Rok predaje rada:
09.05.2016.

Predviđeni datum obrane:
30.05.2016.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA:

Izjavljujem da sam ja – student Saša Fember, matični broj 0111408003, upisan u IV. semestar specijalističkog diplomskog stručnog studija strojarstva akademske godine 2009./2010., radio ovaj rad samostalno koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja i rada u struci, te uz pomoć i vođenje mentorice Tihane Kostadin, mag.ing.stroj., kojoj se ovim putem zahvaljujem.

Saša Fember

Karlovac, __.04.2016.

SAŽETAK

Čelik je danas osnovni proizvod, gotovo nezamjenjivi resurs koji omogućava opstanak i razvoj suvremenog društva. Kroz povijest se čelik sve više usavršavao, ljudi su naučili mijenjati njegova svojstva i time omogućili realizaciju sasvim novih tehničkih rješenja i proizvoda. Od onog trenutka kad je čovjek postao svjestan svih prednosti čelika, njegova proizvodnja i potražnja eksponencijalno je rasla. Čelik ima veliku prednost u činjenici da se može reciklirati, preraditi i upotrijebiti u nekom drugom obliku.

Budući da se legiranjem može drastično utjecati na mehanička svojstva čelika, razvijeni su načini označavanja, kao i područja primjene pojedinih vrsta čelika. Novi, moderni materijali omogućili su i novi način gradnje i konstrukcije raznih proizvoda,

U ovome radu opisan je proces dobivanja čelika, njegova osnovna svojstva kao i način ispitivanja istih, te podjela čelika prema primjeni. U eksperimentalnom dijelu napravljena je analiza tri različite vrste čelika, usporedba i analiza rezultata, te opis mjerne opreme na kojoj je vršeno ispitivanje.

Ključne riječi: čelik, legiranje, mehanička svojstva, ispitivanje

SUMMARY

ANALYSIS OF PROPERTIES OF STRUCTURAL AND TOOL STEELS

Today steel is an essential product, an almost irreplaceable resource, which enables the survival and growth of modern society. Throughout history steel has been perfected, people have learned how to change its properties, and thus enabled the realization of completely new technical solutions and products. Since the moment man realized all the benefits of steel its production and demand have grown exponentially. One of steel's greatest advantages is it can be recycled, reworked and reused in some other form.

Since alloying can dramatically affect steel's mechanical properties, ways of marking have been developed as well as areas of use for each type of alloy. New modern materials have enabled novel ways of building and constructing products.

In this thesis a process of making steel has been described, its basic characteristics as well as a way of testing it, and the classification of steel by its use. In the experimental part, an analysis has been made of three different types of steel, comparison and analysis of the results, and description of the measurement apparatus used.

Keywords: steel, alloyng, mechanical properties, testing

SADRŽAJ

POPIS SLIKA:	10
POPIS TABLICA:.....	12
POPIS OZNAKA:.....	13
POPIS PRILOGA:.....	14
1. UVOD – MATERIJALI KROZ POVIJEST	15
2. OSNOVE PROIZVODNJE ČELIKA	17
2.1. Definicija čelika.....	17
2.2. Kratki povijesni pregled proizvodnje čelika.....	17
2.3. Dobivanje čelika	19
2.4. Pretaljivanje sirovog željeza	20
2.5. Dezoksidacija.....	21
2.6. Djelovanje primjesa u čelicima	21
2.7. Djelovanje legirnih elemenata	22
2.8. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na svojstva čelika	23
2.9. Fazne pretvorbe u čeliku.....	25
3. PODJELA ČELIKA	28
4. KONSTRUKCIJSKI ČELICI	29
4.1. Uvodno o konstrukcijskim čelicima	29
4.2. Ugljični (nelegirani) konstrukcijski čelici	30
4.3. Legirani konstrukcijski čelici	30
5. ALATNI ČELICI	32
5.1. Uvodno o alatnim čelicima.....	32
5.2. Nelegirani (ugljični) alatni čelici	34
5.3. Legirani alatni čelici	35
5.3.1. Niskolegirani alatni čelici.....	35
5.3.2. Visokolegirani alatni čelici.....	35
5.3.3. Martenzitni nehrđajući čelici.....	36
5.3.4. Alatni čelici za topli rad	36
5.3.5. Brzorezni čelici	37
5.3.6. Sinterirani alatni čelici	38

6.	SVOJSTVA MATERIJALA	39
6.1.	Uvodno o svojstvima materijala i vrstama ispitivanja.....	39
6.2.	Mehanička svojstva materijala	40
7.	STATIČKI VLAČNI POKUS	42
7.1.	Ispitni uređaji (kidalice).....	42
7.2.	Ispitni uzorci (eprovete).....	45
7.3.	Dijagram kidanja	46
7.4.	Dijagram naprezanje - istežanje $\sigma - \varepsilon$	47
8.	DINAMIČKA SVOJSTVA MATERIJALA	50
8.1.	Uvodno o dinamičkim svojstvima materijala	50
8.2.	Žilavost kao svojstvo materijala	50
8.3.	Ispitivanje udarnog rada loma – Charpyeva metoda	51
8.4.	Ispitni uzorci (eprovete).....	52
8.5.	Charpy bat.....	53
9.	TVRDOĆA I NAČIN ISPITIVANJA.....	55
9.1.	Pojam tvrdoće	55
9.2.	Brinell-ova metoda	55
9.3.	Vickers-ova metoda	57
9.4.	Rockwell-ova metoda	58
9.5.	Shore-ova metoda	59
10.	UTVRĐIVANJE KEMIJSKOG SASTAVA MATERIJALA	61
10.1.	Općenito o kemijskoj analizi.....	61
10.2.	Provođenje kvantitativne analize	61
10.2.1.	Izbor analitičke metode	61
10.2.2.	Uzrokovanje.....	62
10.2.3.	Priprema laboratorijskog uzorka	62
10.2.4.	Uklanjanje interferencija	62
10.2.5.	Baždarenje (umjeravanje, kalibracija) i završno mjerenje	62
10.2.6.	Izračunavanje rezultata	62
10.2.7.	Pogreške u kemijskoj analizi	62
10.3.	Spektroskopske metode	63

11.	POSTAVKA ZADATKA	64
12.	EKSPERIMENTALNI DIO	65
12.1.	Izrada uzoraka za statički vlačni pokus.....	65
12.2.	Izrada uzoraka za udarni rad loma i ispitivanje tvrdoće	67
12.3.	Specifikacije materijala korištenih na ispitivanju	68
12.3.1.	Č4141 (EN oznaka – 115CrV3)	68
12.3.2.	Č4570 (EN oznaka – X17CrNi16-2)	69
12.3.3.	Č4230 (EN oznaka – 67SiCr5).....	70
13.	OPREMA ZA ISPITIVANJE	71
13.1.	Univerzalna kidalica	71
13.2.	Charpyev bat	72
13.3.	Tvrdomjer	73
13.4.	Uređaj za kemijsku analizu metala	74
14.	REZULTATI ISPITIVANJA	75
14.1.	Rezultati ispitivanja materijala Č4141	75
14.2.	Rezultati ispitivanja materijala Č4570	77
14.3.	Rezultati ispitivanja materijala Č4230	79
15.	ANALIZA REZULTATA.....	81
16.	ZAKLJUČAK	83
	LITERATURA.....	84
	PRILOZI.....	86

POPIS SLIKA

Slika 1 – Povijesni tijek proizvodnje čelika	18
Slika 2 – Visoka peć.....	20
Slika 3 – Dijagram stanja Fe-C	25
Slika 4 – Opća podjela čelika prema namjeni	28
Slika 5 – Shematski prikaz podjele alatnih čelika.....	32
Slika 6 – Tvrdća nelegiranog alatnog čelika 100V2 u ovisnosti o temperaturi popuštanja ...	34
Slika 7 – Vrste opterećenja.....	41
Slika 8 – Univerzalna kidalica	42
Slika 9 – Elektromehanička kidalica.....	44
Slika 10 – Hidraulična kidalica.....	44
Slika 11 – Epruvete za statički vlačni pokus prema DIN 50115.....	45
Slika 12 – Epruveta u različitim fazama ispitivanja.....	46
Slika 13 – Dijagram kidanja.....	46
Slika 14 – Dijagram naprezanje – istežanje (Hooke-ov dijagram)	48
Slika 15 – Vrste dijagrama naprezanje – istežanje.....	49
Slika 16 – Utjecaj temperature na žilavost materijala.....	50
Slika 17 – Prikaz krtog i žilavog loma epruvete	51
Slika 18 – Charpyeva metoda.....	51
Slika 19 – Oblik i dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma.....	52
Slika 20 – Posebne epruvete za ispitivanje udarnog rada loma prema	53
Slika 21 – Shematski prikaz ispitivanja žilavosti Charpy-evim batom.....	54
Slika 22 – Primjeri uređaja Charpy-evog bata	54
Slika 23 – Penetrator i otisak kod Brinellove metode	55
Slika 25 – Slika penetratora i otisak kod Vickersove metode.....	57
Slika 26 – Slika penetratora i otisak kod Vickersove metode.....	58
Slika 27 – Princip ispitivanja tvrdoće po Shoreu	59
Slika 28 – Spektar elektromagnetskog zračenja.....	63
Slika 29 – Epruveta oblika B s navojnim glavama	65
Slika 30 – Epruvete iz materijala Č4141	66
Slika 31 – Epruvete iz materijala Č4570.....	66

Slika 32 – Epruvete iz materijala Č4230.....	66
Slika 33 – DVMK epruveta.....	67
Slika 34 – Epruvete iz materijala Č4141.....	67
Slika 35 – Epruvete iz materijala Č4570.....	67
Slika 36 – Epruvete iz materijala Č4230.....	67
Slika 37 – Potpuni ciklus uobičajene toplinske obrade niskolegiranih Cr – čelika	69
Slika 38 – Univerzalna hidraulička kidalica Tip U-60.....	71
Slika 39 – Charpyev bat	72
Slika 40 – Tvrdomjer "Fritz Hecket"	73
Slika 41 – Uređaj za kemijsku analizu metala "PolySpek"	74
Slika 42 – Primjer prikaza rezultata kemijske analize	74
Slika 43 – Uzorci iz materijala Č4141 nakon ispitivanja.....	75
Slika 44 – Dijagram naprezanje – istezanje za Č4141	76
Slika 45 – Uzorci iz materijala Č4570 nakon ispitivanja.....	77
Slika 46 – Dijagram naprezanje – istezanje za Č4570	78
Slika 47 – Uzorci iz materijala Č4230 nakon ispitivanja.....	79
Slika 48 – Dijagram naprezanje – istezanje za Č4230	80
Slika 49 – Dijagram naprezanje – istezanje – usporedba rezultata	81

POPIS TABLICA

Tablica 1 – Granični maseni udjeli elemenata za legirane čelike	22
Tablica 2 – Podjela konstrukcijskih čelika s obzirom na kemijski sastav	29
Tablica 3 – Dimenzije vlačne epruvete oblika B	65
Tablica 4 – Kemijski sastav materijala Č4141	68
Tablica 5 – Kemijski sastav materijala Č4570	69
Tablica 6 – Kemijski sastav materijala Č4230	70
Tablica 7 – Rezultati statičkog vlačnog pokusa za materijal Č4141	75
Tablica 8 – Rezultati udarnog rada loma i tvrdoće za materijal Č4141	76
Tablica 9 – Rezultati kemijske analize za materijal Č4141	76
Tablica 10 – Rezultati statičkog vlačnog pokusa za materijal Č4570	77
Tablica 11 – Rezultati udarnog rada loma i tvrdoće za materijal Č4570	78
Tablica 12 – Rezultati kemijske analize za materijal Č4570	78
Tablica 13 – Rezultati statičkog vlačnog pokusa za materijal Č4230	79
Tablica 14 – Rezultati udarnog rada loma i tvrdoće za materijal Č4230	80
Tablica 15 – Rezultati kemijske analize za materijal Č4230	80
Tablica 16 – Usporedba rezultata ispitivanih materijala	81

POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
F	N	Sila
F_e	N	Sila razvlačenja
F_k	N	Sila loma
F_m	N	Maksimalna sila
ΔL	mm	Produljenje
L_0	mm	Početna duljina epruvete
L_t	mm	Konačna duljina epruvete
L_c	mm	Ispitna duljina epruvete
S_0	mm^2	Početni presjek epruvete
d_0	mm	Promer epruvete
d_1	mm	Promjer glave epruvete
h	mm	Visina glave epruvete
A	%	Izduženje
Z	%	Kontrakcija
σ	N/mm^2	Naprezanje
ε	%	Istezanje
Re	N/mm^2	Granica razvlačenja
Rm	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
HRB	-	Tvrdoća po Rockwellu B
HRC	-	Tvrdoća po Rockwellu C
HS	-	Tvrdoća po Shoreu

POPIS PRILOGA

PRILOG 1 – diagram " <i>naprezanje – istezanje</i> " sa kidalice	87
PRILOG 2 – Izvješće sa ispitivanja mehanički svojstava za Č4141.....	88
PRILOG 3 – Izvješće sa kemijske analize za Č4141	89
PRILOG 4 – Izvješće sa ispitivanja mehanički svojstava za Č4570.....	90
PRILOG 5 – Izvješće sa kemijske analize za Č4570	91
PRILOG 6 – Izvješće sa ispitivanja mehanički svojstava za Č4230.....	92
PRILOG 7 – Izvješće sa kemijske analize za Č4230	93

1. UVOD – MATERIJALI KROZ POVIJEST

Povijest ljudskog roda najuže je povezana s razvojem materijala. Upravo su različiti materijali, koji su pretežno bili upotrebljavani u pojedinim epohama, obilježili čitave civilizacije. Po njima su i velika povijesna razdoblja dobila svoje ime: kameno doba, bakreno doba, brončano doba, željezno doba. S vremenom su se materijali za izradu oruđa i oružja, a zatim i raznovrsnih naprava te konačno i strojeva, sve više usavršavali. Ljudi su naučili mijenjati njihova svojstva prilagođavajući ih sve složenijim zahtjevima, ali i obrnuto: poboljšanje, a ponekad i skokovita promjena svojstava materijala, omogućavali su realizaciju sasvim novih tehničkih rješenja i proizvoda. Među raznovrsnim svojstvima materijala naročito mjesto zauzimaju mehanička svojstva. Ona uvjetuju čvrstoću, krutost, integritet, a uvelike i trajnost izradaka koji su od njih izrađeni.

Kroz povijest, znanje o materijalima, njihovoj proizvodnji, obradi, svojstvima, ali i primjeni, stjecalo se uglavnom empirijski. Često se radilo i o svojevrsnoj alkemiji, a slučajnost je igrala važnu ulogu u otkrivanju novih materijala i njihovom unapređenju. Tek od devetnaestog stoljeća sustavna istraživanja na području fizike i kemije dovela su do utemeljenja interdisciplinarne znanosti ili *nauke o materijalima*, koja se tom problematikom bavi na znanstvenoj osnovi.

Koncem mlađeg kamenog doba (neolitika) neke su civilizacije već otkrile i počele upotrebljavati i prve metale: zlato, srebro i bakar. Sve su njih ljudi prvotno bili upoznali u čistom obliku (dakle ne u spoju s drugim elementima kao u rudačama), za što su morali imati prilično mnogo sreće, a služili su im pretežno u ceremonijalne svrhe te za izradu ornamenata i nakita. To je zbog toga što su im s jedne strane bili dostupni u vrlo ograničenim količinama, a s druge strane bili su premekani za neku drugu "tehničku" namjenu. Neke su civilizacije naučile dobivati bakar iz njegove rude (uglavnom malahita), čime su se mogle dobiti neusporedivo veće količine tog korisnog metala. Jednako tako spoznali su da kovanjem bakrenog obratka mogu mijenjati ne samo njegov oblik, nego i mehanička svojstva: nakon kovanja bakreni bi obradak postajao tvrdim, čvršćim, a time i upotrebljivijim.

Osnovni nedostatak bakra je taj što je razmjerno mekan i nedovoljno čvrst za izradu učinkovitog oružja ili alata. No s vremenom se pokazalo da dodavanjem bakru manjih količina nekih drugih metala, odljevci postaju tvrdim i čvršćim. K tome mu se značajno snižuje talište, a talinu je lakše lijevati u kalupe, što je oboje također veoma povoljno. Tako je izumljeno legiranje metala.

Prva primjesa koju su ljudi namjerno počeli dodavati bakru bio je, po svemu sudeći, arsen. Pa je Cu-As prva poznata legura ili slitina. Ubrzo se idealnim za tu namjenu pokazao kositar. Slitina bakra i kositra (Cu-Sn) poznata je kao bronca, a najpovoljniji udio kositra u njoj iznosi 10%. Bronca već u početku ima znatno veću čvrstoću od bakra, što se plastičnom deformacijom još daje poboljšati. I napokon, bronca je manje krhka od slitine bakra i arsena.

Brončano doba, u kojemu su ljudi na primjeru bronce usvojili postupak legiranja te usavršili tehnologiju obrade metala od lijevanja do kovanja, u mnogim se kulturama protezalo kroz čitava dva tisućljeća. U sklopu složenog metalurškog procesa dobivanja bakra odnosno bronce iz malahita, njegovim taljenjem u pećima, čovjek je usput upoznao i željezo.

Željezo u čistom stanju mekše je od bronce, a k tome u dodiru s vlažnim zrakom brzo oksidira, tj. hrđa. Stoga drevim metalurzima nije ni moglo biti naročito zanimljivo – sve dok nije izumljen način da se dobije tzv. "dobro željezo".

"Dobro željezo" proizvodilo se ponavljanjem nekoliko ciklusa koji su se sastojali od zagrijavanja komada spužvastog željeza na temperaturu od oko 1200°C da bi omekšalo, a zatim udaranja čekićem da bi se uklonila šljaka, a željezo sabilo.

Zagrijavanje se obavljalo u posebnim pećima na drveni ugljen. Tom je prilikom željezo dolazilo u doticaj s ugljičnim monoksidom, kao produktom nepotpunog izgaranja drvenog ugljena. To je pak pogodovalo difuziji ugljika u površinski sloj željeza. Kao rezultat nastajala bi slitina željeza i ugljika bitno tvrđa i od bronce, čak i ako bi udio ugljika bio svega 0,5%. Pronađen je, dakle, čelik.

Njegova su se mehanička svojstva također mogla poboljšati plastičnom deformacijom. Povrh toga, ljudi su već u ono doba morali primijetiti da se pougljičenjem ograničenim samo na površinski sloj, npr. oštrice mača ili vrška alata, postiže vrlo povoljna kombinacija visoke površinske tvrdoće s dobrom duktilošću unutrašnjosti (jezgre) izratka. Opisana metoda selektivnog pougljičavanja u biti odgovara suvremenom postupku cementiranja.

Uloga ugljika u promjeni svojstava željeza, odnosno čelika, tadašnjim metalurzima naravno nije bila poznata. Znanje i vještina izrade dobrog oružja ili alata stjecali su se iskustvom. Zahvaljujući daljnjim dvjema otkrićima, mehanička svojstva čelika dodatno su se mogla poboljšati.

Prvo je kaljenje, tj. brzo ohlađivanje crveno užarenog pougljičenog željeza u hladnoj vodi. Ovim postupkom bitno se povisuje tvrdoća obratka, tako da on ponekad čak postane krhak. Takav bi, primjerice, kaljeni mač lako puknuo ili se čak raspao na više dijelova.

Drugo otkriće odnosi se na kratkotrajno ponovno zagrijavanje prethodno zakaljenog čeličnog obratka na temperaturu od oko 600 °C. Time mu se, tzv. popuštanjem, djelomično vraća prvobitna duktilnost i smanjuje krhkost na račun izvjesnog smanjenja tvrdoće.

Opisani postupak proizvodnje željeza kao nusprodukta pri proizvodnji bakra ili bronce potječe s Bliskog Istoka, odakle je, po svemu sudeći, prenesen i u Kinu. I tamo se isprva redukcijom željezne rude proizvodilo spužvasto željezo, koje bi se zatim pretvaralo u kovano željezo, da bi ga se onda pougljičilo, kalilo i popuštalo.

[1]

2. OSNOVE PROIZVODNJE ČELIKA

2.1. Definicija čelika

Željezo (Fe) u čistom obliku nije za tehničku uporabu i služi samo za specijalne namjene. Proizvodnja čistog željeza težak je i skup proces. Čelik, u usporedbi s čistim željezom, ima bitno bolja mehanička svojstva i šire područje primjene u svim industrijskim granama, kao i za potrebe u svakodnevnom životu ljudi.

Definicija čelika mijenjala se tijekom vremena. Europske norme definiraju čelik kao željezni materijal pogodan za toplu preradu. Svojstva čelika u znatnoj mjeri određuje ugljik kao njegov glavni sastojak. Stoga se čelik može definirati i kao željezna legura s najviše 2% masenog udjela ugljika i nizom drugih elemenata (mangan, silicij, sumpor, fosfor itd.). Čelik je deformabilna Fe-legura koja pored ugljika sadrži i brojne primjese. Primjese u čeliku mogu biti korisne (krom, nikal, molibden itd.) i štetne (uglavnom sumpor i fosfor). Čelik sadrži i oligoelemente (bakar, kositar, arsen itd.) i plinove (kisik, dušik, vodik) koji, u pravilu, pogoršavaju njegova svojstva. Čelik je višekomponentna Fe-legura kojoj se sadržaj najvažnijih elemenata kontrolira i regulira uvijek, a sadržaj ostalih elemenata stalno ili povremeno.

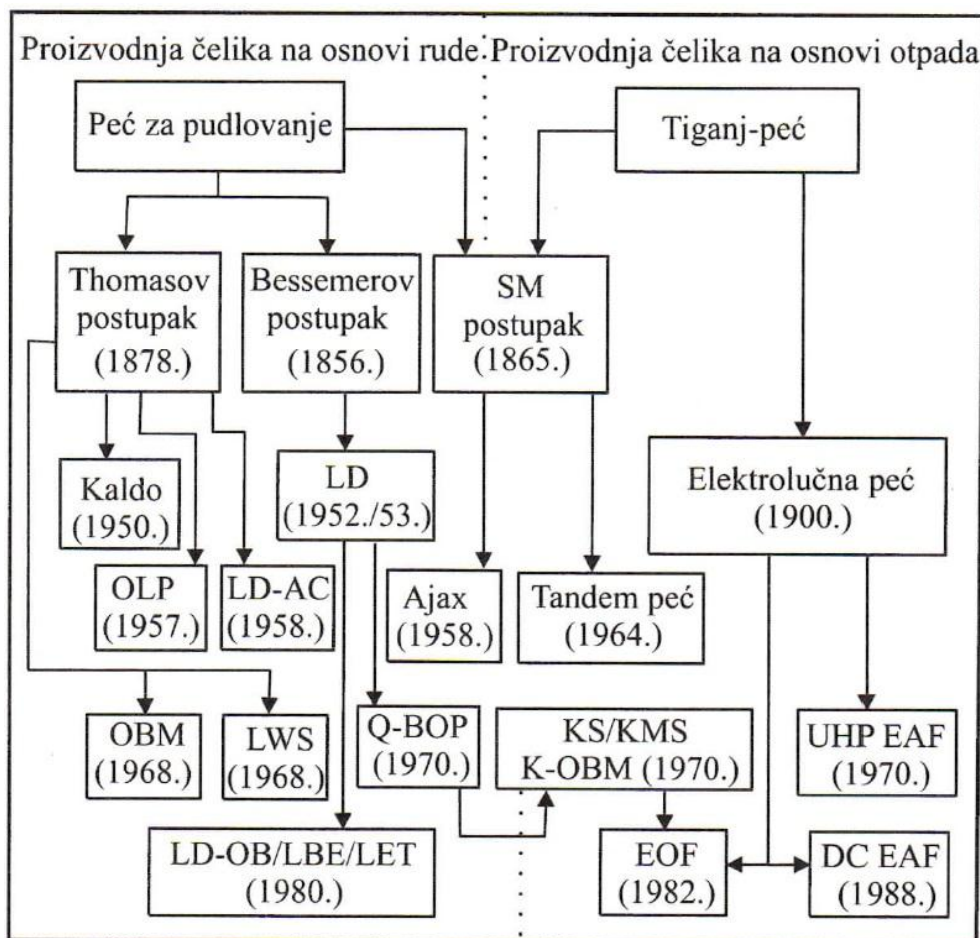
Osnova za višestruku uporabu čelika je mogućnost širokog djelovanja na njegova uporabna svojstva. Time se postiže dobra kombinacija čvrstoće, žilavosti, rastezljivosti, spojivosti, mogućnost oblikovanja deformiranjem, kao i mogućnost promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom itd. Svojstva čelika uvjetovana su određenim svojstvima čistog željeza (posebice polimorfija), prirodom i masenim udjelom pratećih elemenata, te odnosom između željeza, pratećih i legirajućih elemenata. Temeljna svojstva čelika određena su kemijskim sastavom, mikrostrukturom, te stanjem, oblikom i dimenzijama proizvoda. Primaran utjecaj ima sadržaj ugljika. S porastom masenog udjela ugljika smanjuje se sposobnost čelika za plastičnu deformaciju i zavarljivost, a prokaljivost raste. Feritno-perlitna mikrostruktura ima bitno drugačija svojstva od martenzitne ili austenitne. Hladno vučeno stanje proizvoda ima višu čvrstoću od toplo valjanog. Zahvaljujući brojnim svojstvima i ekonomičnom načinu proizvodnje (u usporedbi s drugim metalnim materijalima) čelik služi za mnogobrojnu i raznovrsnu uporabu. Koristi se u gotovo svim granama industrije, prometa, građevinarstva, poljoprivrede, obrtništva i drugih djelatnosti. Godišnja proizvodnja čelika (više od milijardu tona) ukazuje da se bez njega današnja razina tehnike i tehnologije ne može zamisliti. Neovisno o svim promjenama, uključujući razvoj i uporabu ostalih metalnih i nemetalnih materijala, čelik će i nadalje biti glavni konstrukcijski materijal. [2]

2.2. Kratki povijesni pregled proizvodnje čelika

Ljudi su još u antičkim vremenima znali kako dobiti željezo i od njega napraviti alat. Željezo se u Egiptu koristilo u doba faraona za izradu oružja i alata. Prema današnjim spoznajama, dobivanje željeza započelo je u Maloj Aziji, iako postoji vjerojatnost da je započelo istodobno na više različitih mjesta (zapadna Afrika, jugoistočna Europa, južna Indija, Kina).

Postupci dobivanja čelika pudlovanjem i u tiganj pećima vrijede kao prapovijesni postupci. Tekući je čelik prvi put dobiven 1740. godine u posudama (loncima) od vatrostalnog materijala (*Crucible proces*).

Slika 1 prikazuje povijesni tijek proizvodnje čelika, uključujući godine prve industrijske primjene pojedinog postupka. Modernija proizvodnja čelika datira od 1856. godine, kada je *Henry Bessemer* predložio jednostavniji i jeftiniji postupak za masovnu proizvodnju lijevanog čelika propuhivanjem rastaljenog sirovog željeza zrakom.



Slika 1 – Povijesni tijek proizvodnje čelika [2]

Proces se odvijao u specijalnom konvertoru obloženom kiselim vatrostalnim materijalom. Koristilo se sirovo željezo s povišenim sadržajem silicija. Prvo iskustvo *H. Bessemera* s metalnim materijalima bilo je u tiskari njegovog oca. U razdoblju od 1838. do 1883. godine *H. Bessemer* je patentirao 117 pronalazaka od kojih je 37 neposredno vezano uz proizvodnju željeza i čelika. Najvrijedniji patent br. 356 od 12. veljače 1856. godine pod nazivom *Manufacture of malleable iron and steel (Izrada kovkog željeza i čelika)* predstavlja revolucionarni doprinos razvoju procesa proizvodnje čelika.

Posljednji uporabljeni 25-tonski Bessemerov konvertor u Engleskoj postavljen je od 1974. godine kao eksponat u otvorenom muzeju u Scheffieldu.

U Engleskoj je *S. G. Thomas* 1878/79. godine razvio inačicu Bessemerovog postupka s vatrostalnim materijalom bazičnih svojstava koristeći sirovo željezo povišenog sadržaja fosfora.

U Francuskoj su 1865. godine *Emile i Pierre Martin* u peći s otvorenim ognjištem iz sirovog željeza i čeličnog otpada (starog željeza) uspjeli dobiti čelik. Pritom je iskorišten princip predgrijavanja goriva i zraka toplinom otpadnih plinova u regeneratorima koje je razvio *C. W. Siemens*. Postupak je poznat kao Siemens-Martinov (SM) postupak.

Bessemerov i SM-postupak proizvodnje čelika bili su osnova za snažan industrijski razvoj mnogih država. Za manje od 100 godina svjetska proizvodnja čelika povećana je za 1000 puta (od 330 kt u 1868. na 346 Mt u 1960. godni). Krajem 20. stoljeća dolazi do gašenja SM-postupka (prije 40-ak godina ovim se postupkom proizvodilo oko 80%, a danas manje od 4% ukupno u svijetu proizvedenog čelika).

Početak 20. stoljeća donosi brojne prijedloge za iskorištenje električne energije pri proizvodnji sirovog željeza i čelika. To je rezultiralo puštanjem u proizvodnju elektrolučne peći (ELP) za recikliranje relativno jeftinog čeličnog otpada.

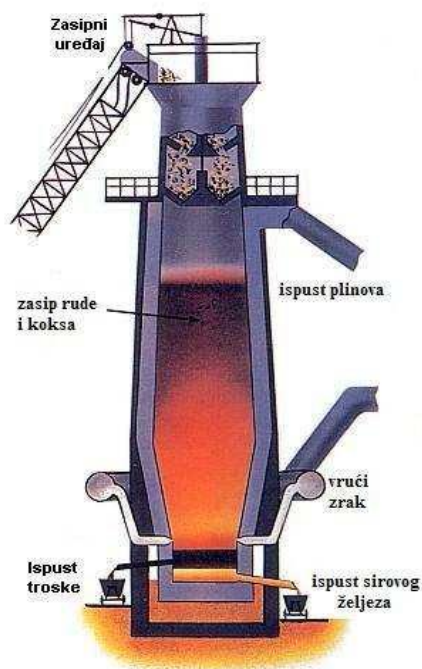
Zamjena zraka korištenog za izgaranje goriva i oksidaciju primjesa čistim kisikom, godinama je bila želja metalurga. Time se bitno mijenja toplinska bilanca procesa. Krajem 1950-ih godina, primjena kisika u proizvodnji čelika postala uobičajena praksa, posebice primjenom LD (*Linz-Donawitz*) konvertorskog postupka. U samo 10 godina (od 1960. do 1970. godine) proizvodnja čelika u svijetu povećana je od 346 na 603 Mt.

U posljednje vrijeme pojavili su se brojni procesi pretaljivanja: vakuum-indukcijsko pretaljivanje, vakuum-lučno pretaljivanje, različite izvedbe pretaljivanja pod troškom, pretaljivanje elektronskim snopom i plazma-lučne peći. U ovim se procesima kao uložak rabe gredice čelika već dobivene nekim od uobičajenih postupaka. [2]

2.3. Dobivanje čelika

Prvi korak kod proizvodnje čelika je dobivanje sirovog željeza. Ono se danas uglavnom proizvodi taljenjem željezne rude na oko 1150°C i procesima redukcije (oslobađanje od kisika) u visokim pećima (*slika 2*), u koje se kroz sapnice pri njihovom dnu upuhuju obilate količine predgrijanog zraka, da bi se postigla potrebna visoka temperatura. Kao gorivo i redukcijsko sredstvo služi koks, a kao taljivo vapnenac.

Proizvodnja sirovog željeza u svijetu u 2008. godini prelazi 1300 Mt, što zahtijeva odgovarajuće količine rude, koksa i metalurških dodataka. Dio sirovog željeza dobiva se i pretaljivanjem otpadnog željeza. Od ove količine željeza najviše se proizvodi ugljični čelik sa sadržajem ugljika do 0,4%, od kojeg se izrađuju različiti poluproizvodi: cijevi, limovi, profili, trupci, poluge, otkivci. Legirani čelici proizvode se u znatno manjim količinama i skuplji su od ugljičnog čelika.



Slika 2 – Visoka peć [3]

Proizvod visoke peći je sivo ili bijelo sirovo željezo s relativno visokim udjelom ugljika (2 do 4% C), fosfora, sumpora te ostalih primjesa (6 do 10%). Upravo zbog povišenog masenog udjela ugljika i fosfora, sirovo željezo je krhko i neupotrebljivo za tehničke primjene.

Ovisno o brzini hlađenja pri skrućivanju taljevine iz visoke peći i o masenom udjelu silicija ili mangana, nastaje bijelo ili sivo sirovo željezo. Siva boja prijeloma kod sivog željeza dolazi od finih ljuski grafitu u strukturi. Ugljik se izlučuje u obliku grafitu u uvjetima sporijeg skrućivanja i povišenog masenog udjela elemenata tzv. **grafitizatora** (Si). Bijelo sirovo željezo na prijelomu ima svijetlu boju i zrakasto kristalnu strukturu, jer je ugljik pretežno u cementitu Fe_3C , zahvaljujući bržem skrućivanju i većem masenom udjelu elemenata tzv. **cementatora** (Mn).

Bijelo sirovo željezo je osnovna sirovina za proizvodnju čelika, čeličnog i bijelog tvrdog lijeva, a sivo za dobivanje sivih ljevova. Od ukupne proizvodnje sirovog željeza oko 90% se prerađuje u čelik, a ostalih 10% u ljeveve. Bijelo sirovo željezo se dalje prerađuje oksidacijskim pročišćavanjem u čelične ingote ili kontinuirano lijevane žile te konačno, valjanjem, kovanjem ili vučenjem oblikuje u finalne poluprizvode – šipke, cijevi, limove, trake, žice, nosače itd.

[4]

2.4. Pretaljivanje sirovog željeza

Sirovo željezo je tehnički neupotrebljivo zbog visoke krhkosti koja je posljedica visokog masenog udjela ugljika i fosfora. U procesu pretaljivanja, izgaranjem se želi smanjiti maseni udjeli ugljika, fosfora i sumpora, a djelomice silicija i mangana. Njihovi udjeli smanjuju se na onu razinu koja odgovara sastavu čelika. Upuhivanjem zraka ili kisika u peć, dolazi do izgaranja ugljika u CO i CO_2 , a ostali se elementi vežu u čvrste okside koji se većinom skupljaju u šljaci i sa njom odstranjuju. Elementi manjeg afiniteta prema kisiku od željeza npr.: Sn, Mo, Co, Ni i Cu, na taj se način ne mogu odstraniti. Ovaj se postupak naziva i pročišćavanje ili rafinacija i provodi se u konverterima (peći kruškastog oblika) ili u drugim pećima različitog oblika i izvora energije za pretaljivanje.

Danas se kvalitetni i plemeniti čelici visoke čistoće podvrgavaju sekundarnoj obradi u vakuumu te propuhivanju inertnim plinovima, čime se postiže homogeniziranje taljevine, odstranjenje vodika, ekstremno razugličenje ($\leq 0,02\%$ C), odsumporavanje ($\leq 0,005\%$ S), modifikacija sulfida, visok stupanj dezoksidacije i visoko iskorištenje legiranih elemenata.

[4]

2.5. Dezoksidacija

Otklanjanje kisika tijekom proizvodnje čelika naziva se dezoksidacija. Tijekom proizvodnje, čelik dolazi u dodir s kisikom i dušikom i pri višim temperaturama može otopiti znatne količine plinova. Više od 0,03% kisika čini čelik osjetljivim na starenje, a više od 0,07% kisika osjetljivim na tzv. "crveni lom", jer sumpor ne veže kisik u plinske mjehuriće SO_2 , nego u tvrde uključke FeS . Prilikom valjanja između 800°C i 1000°C nastupa lom po granicama zrna zbog loše oblikovljivosti FeS .

2.6. Djelovanje primjesa u čelicima

Za kvalitetu čelika nisu odlučujući samo zahtijevani legirni elementi, nego i "neželjeni" tzv. pratioci i nečistoće, te nemetalni uključci. Prateće primjese su prisutne u svakom čeliku, a njihove masene udjele treba svesti na što je moguće manju mjeru.

Mangan je prateći element čiji je maseni udio obično od 0,2 do 0,8%. Mangan na sebe veže sumpor koji se u najvećoj mjeri odstranjuje šljakom, koja pliva po površini rastaljenog čelika.

Silicij je prateći element čiji maseni udio kod nelegiranih čelika iznosi 0,2 do 0,5%. Vrlo slično utječe na proces dobivanja čelika kao i mangan.

Aluminij se dodaje radi dezoksidacije čelika. Povećava krhkost i smanjuje prokaljivost čelika.

Sumpor predstavlja nepoželjnu primjesu, a dolazi iz rude i produkta izgaranja. Najveći dopušteni maseni udio sumpora je 0,05%. Sumpor sa željezom tvori nepoželjni sulfid FeS , koji se u mikrostrukturi čelika pojavljuje po granicama zrna. S obzirom da je talište FeS pri 985°C , pri vrućoj preradi koja se provodi iznad 1000°C , dolazi do rastaljivanja ovog sulfida što dovodi do tzv. "crvenog loma" i osjetnog smanjenja žilavosti. Zbog toga se čelici sa većim masenim udjelom sumpora ne mogu deformirati u toplom stanju. Štetan utjecaj FeS smanjuje se dodavanjem mangana koji tvori MnS (višeg tališta od temperature tople prerade), a ovaj se dobro plastično oblikuje na hladno i toplo.

Viši maseni udio sumpora (do 0,3%) može imati i pozitivan utjecaj ako se radi o čelicima koji trebaju imati povišenu obradivost odvajanjem čestica (rezivost).

Fosfor je nepoželjna primjesa i njegov maseni udio treba biti ispod 0,06%, a povišenje masenog udjela uzrokuje krhkost u hladnom stanju. Iznimno kod nekih čelika povišen je maseni udio fosfora, npr. kod čelika poboljšane rezivosti (čelici za obradu na automatima).

Dušik je uglavnom nepoželjna primjesa, a maseni udio je od 0,01 do 0,03%. Već 0,01% dušika povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali jako smanjuje deformabilnost i naročito udarni rad loma. Prisutnost dušika izaziva pojavu starenja i to naročito kod hladno deformiranih čelika, čiji je rezultat povišena čvrstoća i smanjena žilavost.

Vodik je jedan od elemenata sa najmanjim promjerom atoma pa je stoga brzina difuzije u željezo vrlo velika. Prisutnost vodika u mikrostrukturi teško se dokazuje, a uzrokuje (slično dušiku) pad žilavosti iako čvrstoća raste.

Kisik nije pri normalnoj temperaturi topiv u željezu. Slično djelovanju dušika i vodika, prisutnost kisika povisuje krhkost čelika. U mikrostrukturi niskougličnih čelika, gdje je maseni udio kisika izuzetno visok, često se nalazi željezni oksid FeO. On uzrokuje, slično kao FeS, crveni lom. Dezoksidacijom čelika uklanja se veći dio kisika. Pri tom nastaju oksidi Al_2O_3 i SiO_2 koji su tvrdi, najčešće kuglastog oblika. Krhke Al_2O_3 čestice valjanjem se razvlače u redove koji mogu dovesti do problema pri kasnijoj obradi čelika. [4]

2.7. Djelovanje legirnih elemenata

Niti jedna druga skupina materijala ne može legiranjem u tako širokom opsegu mijenjati svojstva kao čelik.

Legirani čelik, osim željeza i ugljika, sadrži jedan ili više legirnih elemenata. Promjene svojstava koje dobivamo legiranjem mogu se samo općenito naznačiti. Točnije predviđanje svojstava u pravilu nije moguće jer se djelovanje pojedinih elemenata ne može zbrajati. Često je prisutno međudjelovanje elemenata sa ugljikom ili željezom ili pak između legirnih elemenata. Čelik se legira određenom količinom nekog elementa da se dobilo traženo svojstvo ili kombinacija svojstava. Neminovno se legiranjem neka svojstva i pogoršavaju.

Prema europskim normama čelik je legiran ako sadrži jedan ili više elemenata čiji maseni udio prelazi vrijednosti navedene u *tablici 1*.

Tablica 1 – Granični maseni udjeli elemenata koji odjeljuju nelegirane čelike od legiranih (EN 10020) [4]

Legirni element	Granični maseni udio [%]
aluminij	0,10
bor	0,0008
krom	0,30
kobalt	0,10
bakar	0,40
rijetke zemlje - lantanidi (npr. cer, neodim, erbij)	0,05
mangan	1,60
molibden	0,08
nikal	0,30
niobij	0,05
olovo	0,40
selen; telur	0,10
silicij	0,50
titan	0,05
volfram, vanadij	0,10
cirkonij	0,05
ostali (izuzevši C, P, S, N i O)	0,05

Ukoliko se u nekom čeliku utvrdi niži udio elementa od granične vrijednosti navedene u *tablici 1*, tada se takav element smatra primjesom koja je u čelik dospjela nenamjerno tijekom procesa proizvodnje.

Gruba podjela čelika prema masenim udjelima legirnih elemenata je na:

- Niskolegirane (s udjelom legirnih elemenata do 5%),
- Visokolegirane (s masenim udjelom barem jednog legirnog elementa više od 5%).

[4]

2.8. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na svojstva čelika

Legirani čelici se primjenjuju u onim slučajevima gdje se traže neka istaknuta svojstva koja se ne mogu postići nelegiranim čelicima – npr. mehanička svojstva, prokaljivost, otpornost na koroziju, otpornost na trošenje, vatrootpornost i sl.

Najčešći legirni elementi u čelicima su: krom, nikal, mangan, silicij, volfram, vanadij i molibden. U posebnim slučajevima su to: kobalt, titan, aluminij, niobij i dr.

Utjecaj pojedinih elemenata na svojstva čelika su slijedeći:

MANGAN (Mn)

Kao što je već opisano, mangan djeluje dezoksidirajuće, a na sebe veže sumpor. Povećuje granicu razvlačenja kod konstrukcijskih čelika za oko 100 N/mm^2 za svakih 1% Mn, a povoljno djeluje i na žilavost. Znatno poboljšava prokaljivost čelika. Čelici legirani manganom skloni su pregrijavanju (brzom porastu zrna pri visokim temperaturama) i krhkosti nakon popuštanja. Mangan proširuje područje austenita (tzv. gamageni element), tako da su čelici s više od 12% Mn austenitne mikrostrukture i pri normalnoj temperaturi.

SILICIJ (Si)

Slično kao i Mn, silicij je dobar dezoksidator, pa se kao takav koristi kod proizvodnje čelika. Povećuje čvrstoću i otpornost na trošenje. Naročito djeluje na povišenje granice elastičnosti, a povećava i dinamičku izdržljivost te se zbog toga pojavljuje kao legirni element kod čelika za opruge. Pri toplinskoj obradi čelici legirani silicijem pokazuju sklonost razugličenju površine, a pri cementiranju silicij otežava difuziju ugljika u čelik. Blago povećava prokaljivost čelika.

KROM (Cr)

Krom je karbidotvorac i tvori tvrde karbide od cementita. Karbidi povećavaju otpornost na pritisak i otpornost na abrazivsko trošenje. Krom proširuje područje ferita jer je tzv. alfageni element. Povećuje prokaljivost tako da se čelici legirani kromom nakon austenitiziranja hlade u ulju ili čak na zraku. Uz monofaznu mikrostrukturu i više od 12% Cr u čvrstoj otopini čelika, dobiva se potpuna korozijska postojanost. Udarni rad loma čelika legiranih kromom je niži nego kod ostalih čelika jednake razine čvrstoće. Legiranje kromom utječe na sklonost krhkosti nakon popuštanja, koja se izbjegava legiranjem s molibdenom. Krom u čeliku djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti.

NIKAL (Ni)

Nikal je izraziti gamageni element, tako da su austenitni nehrđajući čelici uobičajeno legirani njime. Ne tvori karbide nego se otapa u rešetki željeza. Povišuje žilavost i pri niskim temperaturama, smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika. Najviše se koristi kao legirni element kod čelika posebnih svojstava – nehrđajući i kemijski postojani, čelici za povišene i niske temperature, vatrootporni, nemagnetični čelici. Zbog visoke cijene legira se gotovo uvijek u kombinaciji sa nekim drugim elementima.

VOLFRAM (W)

Volfram je karbidotvorac, a karbidi su mu vrlo tvrdi i toplinski postojani. Legiranje volframom omogućuje povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, a u manjoj mjeri i žilavosti. Djeluje povoljno na čvrstoću i otpornost na trošenje u toplom stanju te sprečava porast zrna pri povišenim temperaturama.

MOLIBDEN (Mo)

U pravilu se kombinira s drugim elementima. Utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, kao i granice puzanja. Kod Cr-Ni i Mn - čelika, dodaje se da bi smanjio opasnost od pojave krhkosti nakon popuštanja. Molibden povoljno djeluje na formiranje sitnozrnate mikrostrukture i na povišenje prokaljivosti. Kao jaki karbidotvorac doprinosi povišenju reznih karakteristika brzoreznih čelika.

VANADIJ (V)

Vanadij je jak karbidotvorac i na taj način povišuje tvrdoću i otpornost na trošenje pri normalnim i povišenim temperaturama. Usporava rast zrna pri povišenim temperaturama. Povišuje granicu razvlačenja pa je prisutan i kod čelika za opruge. Zbog skupoće obično se koristi u kombinaciji s drugim elementima.

KOBALT (Co)

Kobalt se rastvara u rešetki željeza i proširuje austenitno područje. Usporava rast zrna pri povišenim temperaturama, omogućuje postojanost mikrostrukture, te povišuje čvrstoću pri povišenim temperaturama. Zato su alatni čelici za topli rad i naročito brzorezni čelici legirani s kobaltom.

TITAN (Ti)

Titan ima jak afinitet prema kisiku, ugljiku, dušiku i sumporu. Najjači je karbidotvorac, a njegovi se karbidi teško raspadaju pri povišenim temperaturama. Usitnjuje zrno i smanjuje opasnost od pregrijavanja. Djeluje na sužavanje austenitnog područja.

ALUMINIJ (Al)

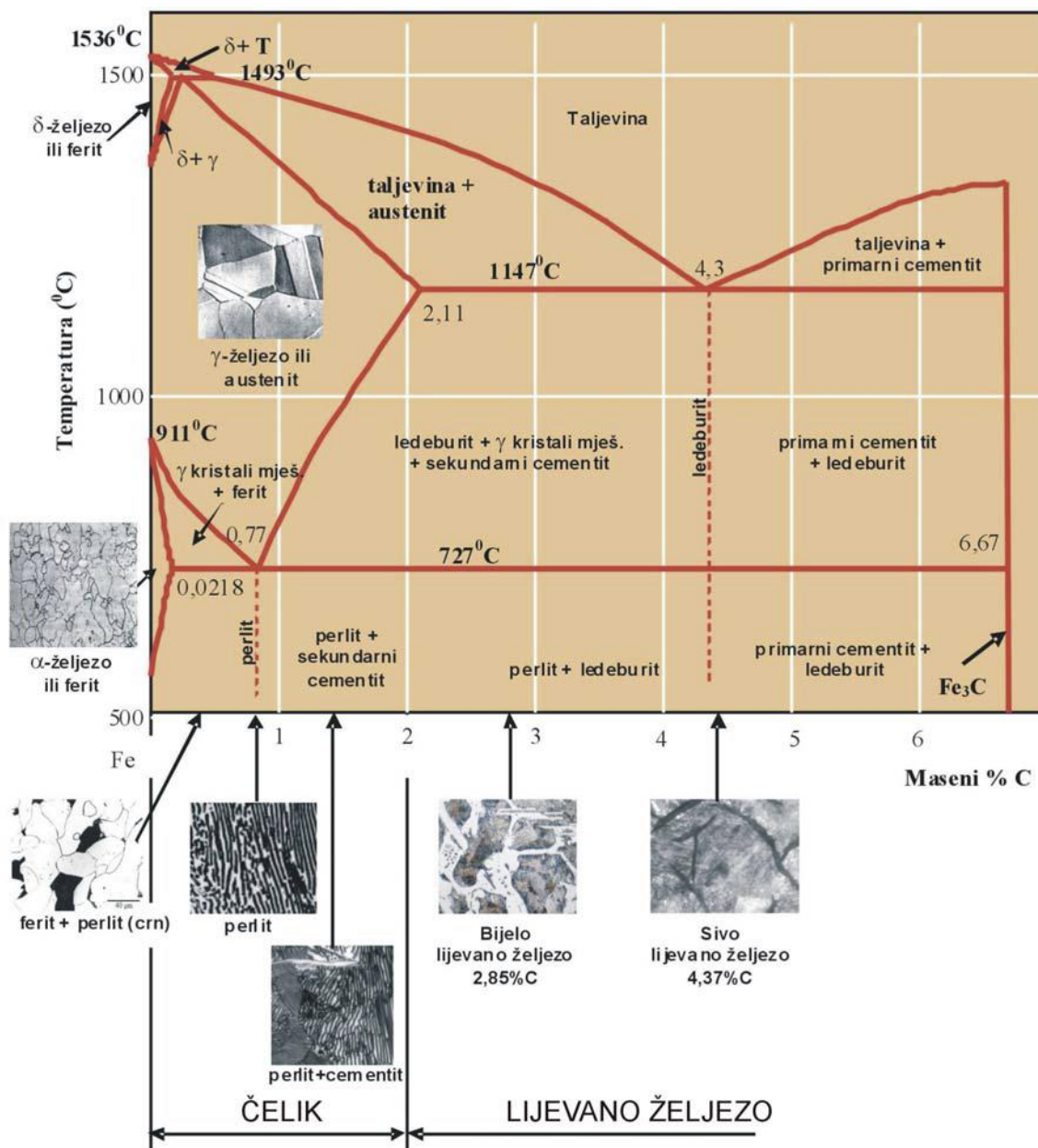
Najčešće se primjenjuje kao element za dezoksidaciju. Aluminij veže na sebe dušik i time smanjuje opasnost od pojave starenja. Jako sužava austenitno područje. Ne doprinosi poboljšavanju mehaničkih svojstava čelika.

[4]

2.9. Fazne pretvorbe u čeliku

Dijagram željezo-ugljik jedan je od najvažnijih dijagrama u tehničkoj praksi. Legure Fe-C kristaliziraju prema dijagramu stanja koji ima peritektički, eutektički i eutektoidni dio, (slika 3). Željezo je magnetično, sivo-bijele boje, duktilno, mekano i srednje čvrstoće. Stabilna kristalizacija čistih Fe-C legura može nastupiti samo kod ekstremno sporog hlađenja. Ovisno o temperaturi i sastavu, atomi ugljika u tom slučaju ulaze u rešetku željeza tvoreći tako intersticijske kristale mješance (δ , γ , α) ili kristale grafita.

[5]



Slika 3 – Dijagram stanja Fe-C [5]

U mikrostrukтури čelika mogu se javiti slijedeće faze i konstituenti:

- ferit, austenit, cementit, perlit, ledeburit, bainit, martenzit.

δ -ferit (δ -Fe) - predstavlja krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza, nemagnetičan je, te se javlja odmah nakon skrućivanja, njegova maksimalna topljivost ugljika iznosi 0,09% C pri $\sim 1456^{\circ}\text{C}$.

Austenit (γ -Fe) - predstavlja intersticijsku krutu otopinu ugljika u površinski centriranoj kubičnoj rešetci (FCC) željeza. Maksimalna topljivost ugljika u γ -Fe iznosi 2,06% kod 1147°C . Nestabilan je na sobnoj temperaturi, ali se može pod određenim uvjetima dobiti i na sobnoj temperaturi. Tvrdća austenita je 170-220 HB te je vrlo žilav. Austenit ima najmanji spesificični volumen u odnosu na sve mikrostrukturne faze čelika.

α -ferit (α -Fe) – predstavlja intersticijsku krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza. Maksimalna topljivost ugljika u α -Fe iznosi 0,025% kod 723°C i samo 0,008% na sobnoj temperaturi. To je najmekša faza u dijagramu Fe-Fe₃C, tvrdoće oko 60 HB.

Cementit (Fe₃C) – metastabilan intersticijski spoj koji sadrži 6,67% ugljika, tvrd i krhak željezni karbid (tvrdoće oko 800 HV) koji pravilno rasprostranjen doprinosi porastu tvrdoće čelika.

Perlit - eutektoidna smjesa ferita i cementita koja sadrži 0,8% ugljika, te nastaje pri 723°C vrlo polaganim hlađenjem. Lamelarna struktura perlita sastoji se od bijele feritne osnove ili matrice (koja čini većinu eutektoidne mješavine) i tankih pločica cementita.

Ledeburit - eutektična mješavina austenita i cementita koja sadrži 4,3% ugljika te nastaje kod 1147°C .

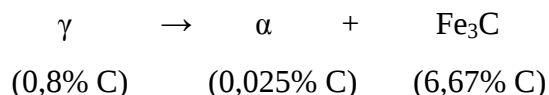
Bainit - Kada se čelik hladi brzinom između gornje i donje kritične brzine hlađenja na nižim temperaturama (između temperature stvaranja perlita i martenzita) tada se dobiva struktura sastavljena od ferita i cementita, ali različita od perlita. To je struktura međustupnja ili međustruktura nazvana bainit. Brzina difuzije atoma ugljika na ovoj temperaturi tako je mala da se atomi ugljika ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvoriti lamele cementita. Zbog toga se umjesto lamela ferita i cementita stvaraju samo lamele ferita na čijim granicama se izdvaja cementit u obliku sitnih, kuglastih čestica.

Martenzit – prezasićena kruta otopina ugljika u volumno centriranoj tetragonalnoj rešetci (BCT). Nastaje kada se čelik austenitne mikrostrukture ohladi na određenu, dovoljno nisku temperaturu (M_s - temperatura početka stvaranja martenzita; M_f - temperatura završetka stvaranja martenzita) donjom kritičnom brzinom hlađenja. U mikrostrukтури takvog tzv. kaljenog čelika, martenzit se javlja u obliku nakupina igličastih kristala, koji se sijeku pod određenim kutevima. Pretvorba je bez difuzije, zavisna samo o temperaturi, a ne i o vremenu (atermička reakcija). Nestabilan je, tvrd (728 HB) i krhak, te je odgovoran za veliku tvrdoću kaljenih čelika. Martenzit ima najveći specifični volumen u odnosu na sve mikrostrukturne faze čelika.

Najvažnije reakcije kod čelika odnose se na transformaciju iz austenitnog područja kod različitih brzina hlađenja. Kod veoma polaganog hlađenja (npr. hlađenje u peći) nastale mikrostrukture mogu se predvidjeti prema reakcijama u čvrstom stanju iz ravnotežnog faznog dijagrama. Ukoliko je hlađenje brže ovaj dijagram nije dostatan za pretpostavku o faznim transformacijama i nastalim mikrostrukturama.

Sporo hlađenje eutektoidnog čelika s 0,8% C karakterizira slijedeće:

- na temperaturi iznad 723°C čelik ima austenitnu mikrostrukturu,
- kod 723°C dolazi do eutektoidne reakcije:



Eutektoidni čelik ima u uvjetima sporog hlađenja perlitnu mikrostrukturu, koja se sastoji od naizmjenično raspoređenih lamela ferita i cementita. Lamelle ferita su znatno deblje od lamela cementita te se mogu vidjeti kod većeg povećanja svjetlosnog mikroskopa (npr. pri povećanju 500x).

Sporo hlađenje podeutektoidnog čelika s 0,4% C karakterizira slijedeće:

- na temperaturi iznad 800°C čelik ima austenitnu mikrostrukturu,
- na temperaturi malo iznad 723°C mikrostruktura čelika sastoji se od ferita s 0,025% C i austenita eutektoidnog sastava s 0,8% C,
- na temperaturi ispod 723°C austenit eutektoidnog sastava raspada se u perlit, pa se mikrostruktura sastoji od ferita (proeutektoidnog) i perlita.

Kada se podeutektoidni čelik hladi polako ispod linije A_{r3} (911 °C) dolazi do precipitacije ferita na granicama austenitnog zrna. Ukoliko je hlađenje brže ili su zrna austenita veoma velika, tada ferit, koji je kristalografski orijentiran kao i austenit, više neće precipitirati na granicama austenitnog zrna kao ekvialsijalna zrnca, već u obliku iglica ili pločica, pa nastaje tzv. Widmanstättenova struktura.

Sporo hlađenje nadeutektoidnog čelika s 1,2% C karakterizira slijedeće:

- na temperaturi iznad 840°C čelik ima austenitnu mikrostrukturu,
- na temperaturi malo iznad 723°C mikrostruktura se sastoji od austenita i sekundarnog cementita, koji se izlučuje na granicama austenitnog zrna,
- na temperaturi malo ispod 723°C austenit eutektoidnog sastava raspada se u perlit, pa se mikrostruktura čelika sastoji od perlita i cementita.

Ukoliko se čelik hladi s povećanom brzinom nedovoljno je vremena za završetak procesa difuzije, ili difuzija uopće ne započinje (difuzija je "beskonačno" spora). To se često događa u proizvodnji, gdje se uslijed ubrzanog hlađenja fazni preobražaji odvijaju pri nižim temperaturama od ravnotežnih ili do njih uopće ne dolazi. U tom slučaju, mikrostruktura čelika može se razlikovati od one koju daje ravnotežni dijagram stanja.

[5]

3. PODJELA ČELIKA

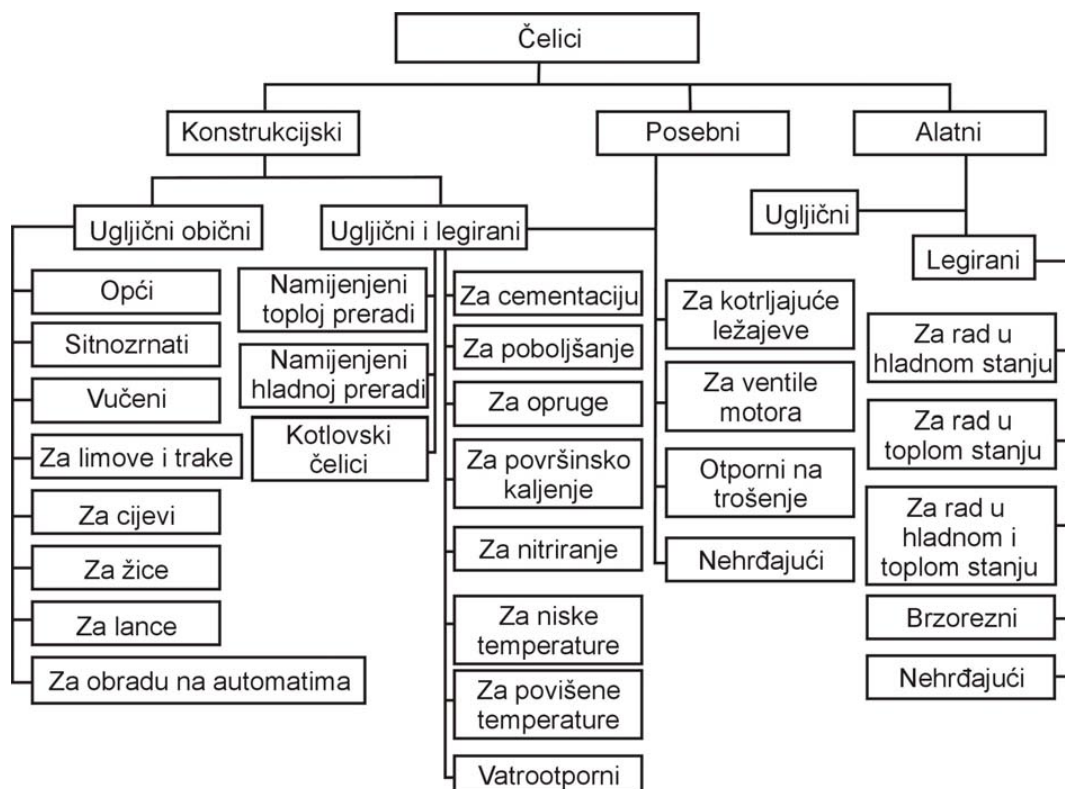
Čelik se može podijeliti prema mnogim osnovama: prema sastavu, mikrostrukтури, svojstvima, proizvodnom postupku, namjeni i dr.

Prema namjeni, čelik možemo podijeliti na konstrukcijski, specijalni (posebni) i alatni (slika 4).

Pojam “specijalni” čelik podrazumijeva željezne legure koje se svojim posebnim svojstvima razlikuju od uobičajenih masovnih čelika. Takva posebna svojstva mogu se postići na tri načina: utjecajem na kemijski sastav, proizvodnjom i preradom čelika. Čelik se smatra posebnim ukoliko su mu svojstva poboljšana barem jednim od tri spomenuta načina.

E. Houdremont definira specijalne čelike kao željezne legure, koje odgovaraju definiciji čelika, ali se od “običnih” (masovnih) čelika razlikuju po specijalnim svojstvima. Specijalni čelici su uglavnom legirani s jednim ili više elemenata. Dobivanje specijalnih čelika najčešće se provodi pojedinačnim ili kombiniranim legiranjem sa silicijem, manganom, kromom, niklom, volframom, molibdenom, vanadijem, kobaltom, titanom, bakrom, aluminijem, borom, niobijem, tantalom i dr.

Ukoliko je zbroj masenih udjela svih legirajućih elemenata prisutnih u čeliku ispod 5% takav čelik se smatra niskolegiranim. Visokolegirani čelik sadrži ukupno $\geq 5\%$ legirajućih elemenata. Međutim, u skupinu specijalnih čelika mogu se ubrojiti i ugljični nelegirani čelici posebnih svojstava (npr. kvalitetni konstrukcijski čelici, alatni nelegirani čelici, čelici za hladno oblikovanje i dr.). [5]



Slika 4 – Opća podjela čelika prema namjeni [5]

4. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

4.1. Uvodno o konstrukcijskim čelicima

Opći konstrukcijski čelici obuhvaćaju najširu grupu konstrukcijskih čelika, a najčešće se primjenjuju kod nosivih zavarenih konstrukcija velike mase. Ova skupina čelika najčešće se koristi za izradu mostova, dizalica, nosača, brodskih konstrukcija, dijelova vozila, opreme u industriji nafte i plina i dr.

Konstrukcijski čelici u strojarstvu koriste se kod izrade karakterističnih konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja. Najčešće služe za izradu vratila, osovina, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, kućišta itd. S obzirom na mehanička svojstva konstrukcijski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (radi izbjegavanja pojave krhkog loma), visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Pored toga, konstrukcijski čelici moraju biti otporni na trošenje i koroziju, te obradivi odvajanjem čestica (rezanje), zavarljivi, skloni hladnom oblikovanju (savijanje, štancanje, duboko vučenje) itd.

Općenito se konstrukcijski čelici mogu podijeliti na ugljične (nelegirane) i legirane (tablica 2). Konstrukcijski čelici (nelegirani i legirani koji sadrže $C < 0,60\%$) često se primjenjuju za izradu strojeva i uređaja koji rade u neagresivnim sredinama i pri temperaturama od -25 do 300°C , kao i za nosive i građevinske konstrukcije.

[5]

Tablica 2 – Podjela konstrukcijskih čelika s obzirom na kemijski sastav [5]

UGLJIČNI (NELEGIRANI) ČELICI	
Opće namjene	Posebne namjene
• obična kvaliteta • kvalitetni čelici	• za građevinarstvo • za brodogradnju i željeznice • za kotlove i posude pod tlakom • za karoserijske limove • za cijevi, žice, zakivke • za zavarene lance • čelici za automate • za elektrotehniku

LEGIRANI ČELICI	
Opće namjene	Posebne namjene
• za poboljšanje • za površinsko kaljenje • za cementaciju • za nitriranje	• za opruge • za kotrljajuće ležajeve • za rad pri niskim temperaturama • za ventile • čelici povišene čvrstoće (mikrolegirani)

4.2. Ugljični (nelegirani) konstrukcijski čelici

Ugljični čelici obične kvalitete svrstavaju se pretežno prema mehaničkim svojstvima te se koriste za slabije opterećene dijelove strojeva, uređaja, vozila ili za šipke i rešetke. Svi nelegirani čelici obične kvalitete primjenjuju se u sirovom stanju (bez toplinske obrade).

Srednje ugljični čelici (0,25-0,60% C) koriste se uglavnom u normaliziranom stanju, a u poboljšanom stanju služe za dijelove manjih presjeka. Čelici sa 0,5-0,60% ugljika primjenjuju se za dijelove otporne na trošenje, kao npr. zupčanici, pužni transporteri, ekscentri, klinovi. Sitni strojni dijelovi izrađuju se također od srednje ugljičnih čelika isporučenih u obliku limova, traka, žica, vučenih ili hladno valjanih šipki.

Čelici za građevinarstvo uglavnom su meki (niskougljični $C < 0,25\%$) čelici u obliku profila, limova, šipki, žica za armirani beton.

Čelici za brodogradnju su u obliku limova i profila od mekog čelika (zavarljivog), a za željeznicu u obliku posebnih valjanih proizvoda i otkivaka od nisko i srednje ugljičnih čelika (kotači, tračnice, osovine vagona).

Karoserijski limovi su čelici sa približno 0,1% ugljika, visoke čistoće (P i $S < 0,035\%$), dobro se izvlače i imaju glatku površinu.

Čelici za žice (0,3-1,0% C) služe za čelične sajle, žice kotača (npr. kod bicikla), žice kišobrana, žičane mreže i opruge najviše kvalitete.

Čelici za automate (valjane ili vučene šipke) koriste se za izradu sitnih dijelova na automatskim strojevima. To su ugljični čelici sa povećanim sadržajem fosfora (do 0,11%), sumpora (do 0,3%) ili olova (0,35%), što im daje lako lomljivu isprekidanu strugotinu. Zahvaljujući olovu postiže se veća brzina rezanja i bolja kvaliteta rezane površine.

[5]

4.3. Legirani konstrukcijski čelici

Legirani čelici za poboljšanje (0,25-0,60% C) mogu biti:

- manganski (1,20-1,60% Mn) – za osovine vratila, Mn-Si za veće zupčanike;
- kromovi (1-1,5% Cr-Si) - za jako opterećena koljenasta vratila, zupčanike;
- krom-molibdenski (1% Cr; 0,2% Mo) - za sitnije žilave dijelove,
- krom-niklovi (0,6-1,5% Cr i 1-3,5% Ni) - zupčanici mjenjača, dijelovi turbina koji rade na temperaturama do 500°C.

Za površinsko kaljenje koriste se Cr-Mn i Mn-Si čelici sa 0,3-0,5% ugljika. Za cementaciju upotrebljavaju se čelici sa $C < 0,25\%$ i legirani sa Cr, Cr-Mn, Cr-Mo i Cr-Ni. Tako se kromovi čelici koriste za bregaste osovine, osovine klipova, vretena i drugih dijelova izloženih trošenju. Slično ovome i krom-niklovi i krom-manganski čelici za cementaciju upotrebljavaju se za izradu zupčanika mjenjača i diferencijala, a krom-molibdenski čelici za bregaste osovine, zupčanike i kardanske zglobove. Čelici za nitriranje postižu traženu površinsku tvrdoću (900-950 HV) sitno dispergiranim nitridima aluminijskim, kroma i molibdena, bez naknadne toplinske obrade (neophodno je prethodno poboljšanje).

Ugljik se ograničava na 0,45% radi sprečavanja stvaranja karbida kroma i molibdena koji imaju manju tvrdoću nego nitridi. Nitriranju se podvrgavaju cilindri motora i pumpi, zupčanici, kalupi za lijevanje pod pritiskom, alati za prešanje, probijači i sl.

Čelici za opruge trebaju imati visoku granicu razvlačenja, zadovoljavajuću istezljivost, te odgovarajuću dinamičku izdržljivost (npr. opruge automobila, odbojnici vagona, oslonci temelja strojeva). Posebno se za neke primjene traži otpornost na koroziju i povišene temperature. Tražena svojstva postižu se hladnom deformacijom (valjanje, vučenje) ili toplinskom obradom. Svojstva elastičnosti poboljšava dodatak 0,15-1,8% silicija, a prokaljivost se kod većih presjeka povećava dodacima 1% mangana ili 1% kroma.

Čelici za kotrljajuće ležajeve trebaju imati veliku tvrdoću i otpornost na trošenje, sposobnost obradivosti rezanjem i deformiranjem, dobru prokaljivost uz minimalnu deformaciju. To su uglavnom kromovi čelici s visokim sadržajem ugljika i najviše čistoće sastava (1% C i 0,50-1,50% Cr). Toplinska obrada se sastoji od kaljenja sa 850°C u ulju i niskog popuštanja na 160°C.

Čelici za rad pri niskim temperaturama sadrže nikal ili mangan i nizak sadržaj ugljika (0,10-0,15%). Pri 3-5% nikla temperatura prelaska u krhko stanje je oko -100°C, a pri 8-10% nikla oko -200 °C. Uglavnom služe za izradu transportnih i stacionarnih rezervoara za suhi led (CO₂) ili tekući metan (CH₄). Za rad na još nižim temperaturama (npr. za skladištenje i transport tekućih tehničkih plinova) koriste se austenitni Cr-Ni čelici sa niskim sadržajem ugljika ili Cr-Mn-Ni-N-čelici.

Čelici za ventile motora sa unutarnjim izgaranjem izloženi su pri radu visokim temperaturama (do 900°C) i cikličkim promjenama temperature. Stoga moraju zadržati dobra mehanička svojstva na povišenim temperaturama i da budu vatrootporni. Najčešće se primjenjuju visokolegirani kromovi čelici.

Čelici povišene čvrstoće (mikrolegirani čelici) razvijeni su posljednjih tridesetak godina s ciljem da se smanji masa konstrukcije: mostova, brodova, rezervoara, cisterni, cijevi pod pritiskom i sl. Tehnologija mikrolegiranja omogućila je proizvodnju nove kategorije čelika, koji predstavljaju konvencionalne ugljične čelike sa minimalnim dodacima legirajućih elemenata (manje od 0,5%), radi povećanja granice razvlačenja, čvrstoće i tvrdoće. Prvi put je ova tehnika bila primijenjena na čeličnim limovima. Znatno kasnije mikrolegiranje je iskorišteno za proizvodnju šipki, da bi se izbjegla toplinska obrada poslije kovanja. Posebno je važna primjena ovih čelika za transportna sredstva gdje smanjenjem mase direktno utječe na moguće opterećenje. Trenutno se čelici povišene čvrstoće isporučuju u svim standardnim valjanim oblicima kao što su: limovi, trake, ploče, nosači, šipke i specijalni profili. Za ove čelike karakteristična je anizotropija mehaničkih svojstava, jer se obradivost deformiranjem i čvrstoća znatno mijenjaju u odnosu na smjer valjanja.

[5]

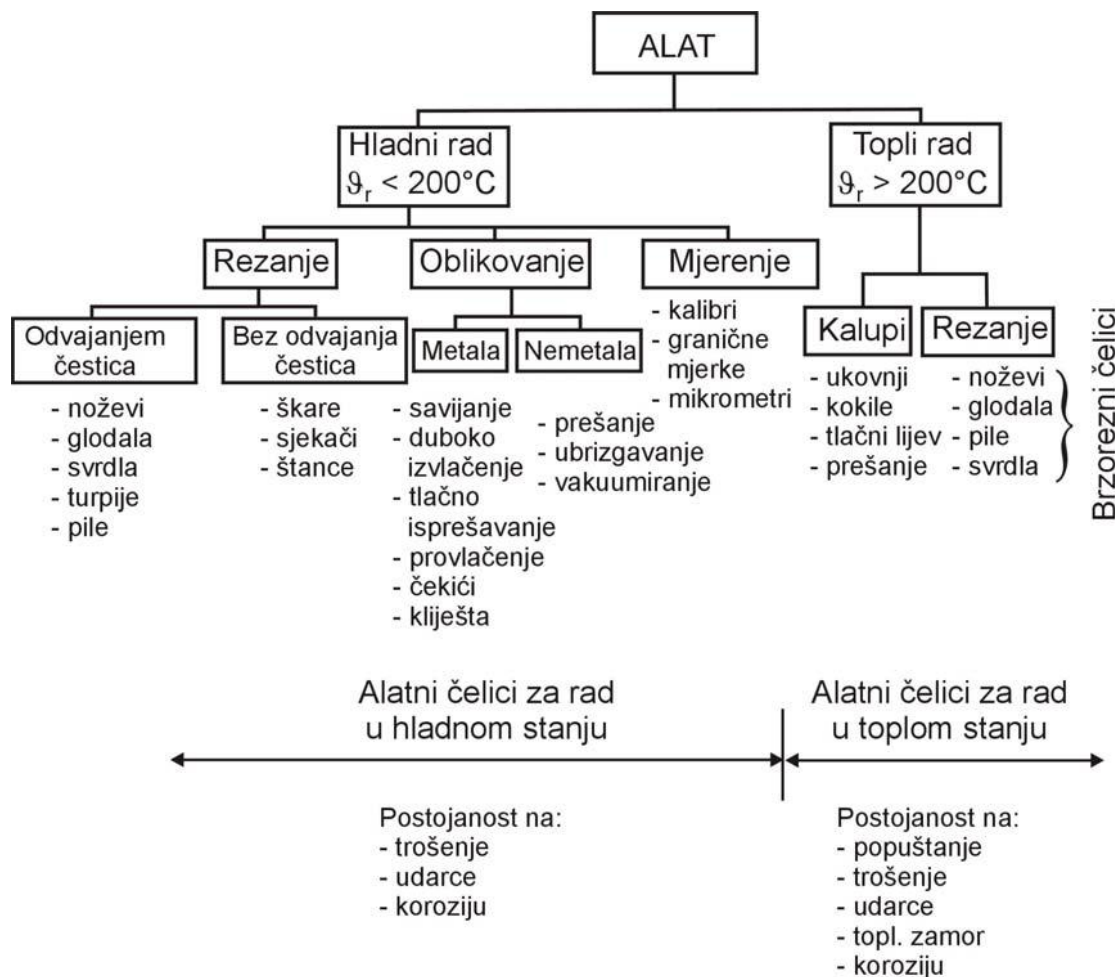
5. ALATNI ČELICI

5.1. Uvodno o alatnim čelicima

Upotreba raznih alata potječe od samih početaka ljudske civilizacije. Prvi korišteni alati bili su kamena sjekira, kameni nož te svi ostali predmeti koje je čovjek koristio u svakodnevnom životu. Prije 5000 godina započinje upotreba alata izrađenog od meteoritskog željeza. Kasnijim kontaktom takvog željeza sa vatrom i sredstvom za pougljičenje, nastaju prvi alati od čelika. Alat predstavlja svako sredstvo kojim čovjek olakšava ili omogućava izvršenje željene radnje bilo neposredno, snagom ruke, bilo posredno snagom nekog stroja.

Razvoj modernih industrijskih alata doživljava tehnološku revoluciju u drugoj polovici 19. stoljeća. U tom razvoju najvažnije je istaknuti slijedeće godine:

- 1868 g. MUSHET-ov čelik (2% C, 7% W, 2,5% Mo),
- 1898 g. TAYLOR-WHITE-ov brzorezni čelik (1,85% C, 3,8% Cr, 8% W),
- 1904 g. J. A. MATHEWS - brzorezni čelik s vanadijem,
- 1910 g. razvoj wolframovih čelika za topli rad,
- 1912 g. dodatak kobalta u alatne čelike,
- 1930 g. započinje razvoj brzoreznih čelika legiranih molibdenom.



Slika 5 – Shematski prikaz podjele alatnih čelika [5]

Osnovna svojstva koja alatni čelici moraju posjedovati su:

- otpornost na trošenje (martenzitna mikrostruktura s visokim udjelom karbida),
- udarna izdržljivost (žilavost, visoka udarna radnja loma).

Stručna literatura često navodi i otpornost na popuštanje kao osnovno svojstvo, ali prema nekim autorima to ipak pripada posebnim zahtjevima prema alatnim čelicima za rad pri povišenim temperaturama ($>200^{\circ}\text{C}$). Proizvodni (ekonomski) zahtjevi i svojstva prema alatnim čelicima su:

- mogućnost obrade alata odvajanjem čestica,
- visoka zakaljivost,
- visoka prokaljivost,
- zanemariva sklonost pogrubljenju zrna prilikom austenitizacije,
- neznatna promjena dimenzija tijekom rada,
- sigurnost s obzirom na pojavu pukotina i lomova tijekom toplinske obrade,
- neznatna sklonost razugljičenju tijekom toplinske obrade,
- otpornost na koroziju,
- mogućnost poliranja,
- ekonomičnost itd.

Alatni čelici se primjenjuju u toplinski obrađenom stanju (kaljenje i popuštanje). Dodatno se mogu provesti neki od postupaka oplemenjivanja površine. Poboljšavanje svojstava alata površinskim toplinskim obradama uglavnom se provodi slijedećim postupcima:

- površinsko kaljenje (plameno, indukcijsko, lasersko, elektronskim snopom, impulsno),
- termokemijski postupci (cementacija, nitiranje, karbonitriranje, boriranje, oksidacija, difuzija metalnih elemenata – V, Cr, Al, Si),
- tvrdo elektrokemijsko kromiranje,
- nanošenje karbida, nitrida, karbonitrida i oksida iz parne faze (CVD i PVD postupci),
- nanošenje dijamantnih slojeva (DLC – Diamond Like Carbon).

Zbog traženih svojstava i potrebe zakaljivanja i prokaljivanja alatni čelici u pravilu imaju viši udio ugljika ($>0,6\%$) nego konstrukcijski čelici. Uglavnom se isporučuju u toplovaljanom, hladnovučenom, kovanom ili lijevanom stanju u obliku šipki, traka ili ploča. S obzirom na kemijski sastav alatni čelici mogu biti:

- nelegirani,
- niskolegirani,
- visokolegirani.

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

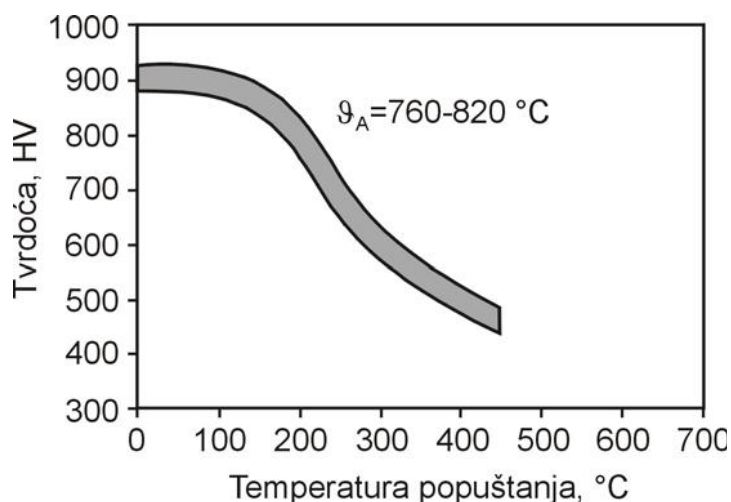
- alatne čelike za hladni rad ($<200^{\circ}\text{C}$),
- alatne čelike za topli rad ($>200^{\circ}\text{C}$),
- brzorezne čelike. [5]

5.2. Nelegirani (ugljični) alatni čelici

Do kraja 19. st. svi alati izrađivani su iz ugljičnih alatnih čelika. Trenutno nelegirani (ugljični) alatni čelici zauzimaju oko 10% udjela u ukupnoj masi proizvedenih alatnih čelika. Unatoč znatno nepovoljnijim svojstvima tako visoki udio ugljičnih alatnih čelika održao se zbog toga što su:

- najjeftinija vrsta alatnih čelika,
- najšireg asortimana dimenzija,
- jednostavni za toplinsku obradu,
- razmjerno niske temperature austenitizacije,
- manje osjetljivi prema razugličenju površine tijekom toplinske obrade,
- lakše obradivi odvajanjem čestica,
- bolje zavarljivi.

Nelegirani alatni čelici pripadaju skupini plemenitih čelika, a sadrže 0,5-1,5% ugljika te manje udjele silicija i mangana. Što je viši udio ugljika u čeliku, to je viša tvrdoća (viši udio sekundarnog cementita), a niža žilavost. Budući da nisu legirani, ova skupina čelika ima nisku prokaljivost (~10 mm). Zbog niske prokaljivosti imaju bolju žilavost u odnosu na druge alatne čelike jer se kaljenjem u rubnim slojevima postiže martenzitna mikrostruktura, dok u jezgri ostaje eutektoidna mikrostruktura. Ova skupina alatnih čelika kali se na relativno niskim temperaturama austenitizacije u vodi i nisko popušta (<200°C) zbog pada tvrdoće (slika 6). Prije kaljenja obično se provodi sferoidizacijsko (meko) žarenje kojim se olakšava obrada odvajanjem čestica i priprema za kasniju austenitizaciju. [5]



Slika 6 – Tvrdoća nelegiranog alatnog čelika 100V2 u ovisnosti o temperaturi popuštanja
 ϑ_A – temperatura austenitizacije [5]

Ovisno o udjelu ugljika i mikrostrukturi, nelegirani alatni čelici mogu biti:

- podeutektoidni (do 0,8 %C): feritno-perlitni,
- eutektoidni (0,8 %C): perlitni,
- nadeutektoidni (>0,8 %C): perlitno-cementitni.

Glavni nedostatak ugljičnih alatnih čelika je vrlo kratko inkubacijsko trajanje do pretvorbe pothlađenog austenita u eutektoidne ili bainitne konstituente. Budući da taj period traje svega nekoliko sekundi, nužno je intenzivno hlađenje u vodi. To može dovesti do pojave velikih naprezanja koja uzrokuju napuknuća i lomove.

Najvažnije pozitivno svojstvo ove skupine alatnih čelika predstavlja njihova žilavost, pa stoga mjesto primjene uglavnom pronalaze u izradi udarnih alata.

[5]

5.3. Legirani alatni čelici

5.3.1. Niskolegirani alatni čelici

Zajednička karakteristika ove skupine čelika je niska otpornost na popuštanje, osrednja žilavost (u odnosu na ugljične alatne čelike) te visoka otpornost na trošenje. Osnovni cilj zbog kojeg se provodi legiranje ovih čelika predstavlja povišenje prokaljivosti te dobivanje kvalitetnijih i postojanijih karbida u odnosu na karbid Fe_3C . Niskolegirani alatni čelici popuštaju se nisko ($\leq 250^\circ\text{C}$) pri čemu je primarni cilj izbjegavanje pojave velikih naprezanja i pukotina.

Niskolegirani alatni čelici dijele se na:

- Visokougljične,
- Nisko i srednje ugljične,
- Niskolegirane Cr-čelike,
- Niskolegirane Mn-Cr-V i Mn-Cr-W čelike.

Ovi čelici u praksi primjenjuju se kao: razni rezni alati, dlijeta za ručnu obradu, turpije, valjci za hladno valjanje, šiljci tokarilica, mjerni alati (kalibri), noževi za papir...

5.3.2. Visokolegirani alatni čelici

Glavni legirajući element ove skupine čelika je krom (>5%) uz moguće dodatno legiranje vanadijem, molibdenom i/ili volframom. Krom pritom može djelovati na:

- nastanak karbida koji utječe na porast otpornosti na trošenje,
- povišenje temperature austenitizacije,
- porast otpornosti na koroziju (što je manji udio ugljika više će se kroma otopiti u austenitu).

Povišenjem stupnja legiranosti i temperature austenitizacije raste udio zaostalog austenita u zakaljenoj mikrostrukturi što može smanjiti pojavu deformacija nakon kaljenja.

Visokolegirani alatni čelici dijele se na:

- čelike sa približno 5% kroma,
- visokolegirane ledeburitne čelike sa 12% kroma,
- martenzitne nehrđajuće čelike.

Glavna primjena ovih čelika u praksi je za izradu škara i alata za oblikovanje lima, mjernog alata, razvrtala, nareznih svrdala, nareznica, matrica složenih oblika, alata za preradu polimera itd.

[5]

5.3.3. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici sadrže 0,2-0,9% ugljika, 13-18% kroma, 0,5-1,2% molibdena i do 0,1% vanadija. Da bi se kaljenjem postigla martenzitna mikrostruktura nužno je otopiti ugljik i krom u austenitu na dovoljno visokoj temperaturi austenitizacije (950-1080°C). Kaljenjem u ulju može se izbjeći izlučivanje karbida koji bi snizili otpornost na koroziju. Pored martenzita u mikrostrukturi preostane i dio zaostalog austenita. Razlika potencijala martenzita i zaostalog austenita je vrlo mala pa se u pogledu korozijske otpornosti takva mikrostruktura smatra monofaznom. Nakon kaljenja slijedi popuštanje pri nižim temperaturama (150-250°C) radi izbjegavanja izlučivanja karbida popuštanja koji smanjuju korozijsku postojanost.

U isporučenom sferoidiziranom stanju (1160-1180°C) martenzitni čelici su vrlo dobro obradivi odvajanjem čestica, pa je postupak sferoidizacije kod konačnog korisnika čelika rijetko potreban. Uobičajeno sferoidizacijsko žarenje provodi se oko temperature A_1 koja za čelike s 12-18% Cr iznosi 820-860°C.

Budući da martenzitni čelici sadrže relativno mali udio karbida, već se i u sferoidiziranom stanju mogu kvalitetno polirati što je važno za njihovu konačnu primjenu. Visokolegirani martenzitni nehrđajući alatni čelici za hladan rad najčešće se primjenjuju za:

- medicinske instrumente (npr. skalpeli, škare, zubarska kliješta, pincete i sl.),
- pribor za jelo (npr. noževi),
- žilete, britve,
- krojačke škare,
- matrice itd.

[5]

5.3.4. Alatni čelici za topli rad

Alatni čelici za rad u toplom stanju primjenjuju se za izradu alata koji su tijekom rada zagrijani na temperaturu višu od 200°C. Najvažnije svojstvo alatnih čelika za topli rad predstavlja otpornost na popuštanje. Otpornost na popuštanje obuhvaća pojave koje se mogu javiti tijekom izloženosti povišenim temperaturama (npr. smanjenje tvrdoće, mikrostrukturne promjene, toplinski zamor).

Pored otpornosti na popuštanje pred alatne čelike za topli rad postavljaju se još i dodatni zahtjevi poput otpornosti na:

- trošenje,
- visokotemperaturnu koroziju,
- pojavu plastičnih deformacija,
- udarno opterećenje (žilavost).

Postizanje povoljnih svojstava postiže se legiranjem (npr. karbidotvorcima – W, Mo, Cr, V) i niskim udjelom ugljika. Legiranje karbidotvorcima omogućuje stvaranje karbida popuštanja čime se povisuje otpornost na trošenje i otpornost na popuštanje. Nikal se dodaje radi povećanja žilavosti i prokaljivosti, a silicij radi poboljšanja dinamičke izdržljivosti.

Toplinska obrada ove skupine alatnih čelika sastoji se od austenitizacije i popuštanja (dva ili tri puta). Parametri austenitizacije (temperatura i vrijeme) odabiru se tako da dođe do otapanja karbida te da legirajući elementi poput kroma, molibdena i volframa uđu u austenit. Također, treba paziti da ne dođe do porasta zrna i smanjenja žilavosti. Višekratno popuštanje se koristi radi omogućavanja transformacije zaostalog austenita. Alate koji su toplinski visokopterećeni treba najprije predgijavati kako bi se smanjila toplinska naprezanja koja mogu uzrokovati pojavu pukotina uslijed toplinskog zamora. [5]

5.3.5. Brzorezni čelici

Brzorezni čelici su alatni čelici predviđeni za rad u uvjetima povišene i visoke temperature oštice tj. za rezanje velikim brzinama. Najčešće su brzorezni čelici u radu izloženi lokalnom zagrijavanju do $\approx 600^{\circ}\text{C}$ (ponekad i 1000°C), trošenju te udarnom djelovanju obratka na alat. Kemijski sastav ove skupine čelika karakterizira povišeni udio ugljika (0,7-1,3%) i legiranje jakim karbidotvorcima poput kroma, volframa, vanadija i molibdena. Povišeni udio ugljika utječe na stvaranje karbida koji su postojani i pri povišenim temperaturama. Poput svih alatnih čelika brzorezne čelike karakterizira višefazna mikrostruktura sastavljena od metalne osnove i karbida. Kompleksna legiranost brzoreznih čelika uzrokovana je pojavom različitih vrsta karbida.

Brzorezni čelici se uobičajeno isporučuju u meko žarenom stanju (tvrdoća 240-300 HB). Budući da pripadaju grupi ledeburitnih (podeutektoidnih) čelika, temperatura austenitizacije ove skupine čelika je izrazito visoka ($1200-1300^{\circ}\text{C}$), tj. svega 20°C ispod solidus temperature. Pri tim temperaturama austenit otapa dovoljno ugljika (0,5-0,6%) što je glavni preduvjet za postizanje visoke tvrdoće martenzita nakon kaljenja. Radi postizanja dovoljnog sadržaja ugljika u austenitu na temperaturi austenitizacije treba se raspasti i oko 2/3 volumena svih karbida (nalaze se u obliku karbidne mreže) te njihove sastavne dijelove otopiti u austenitu. Otapanje karbida je difuzijski proces ovisan o temperaturi i vremenu zadržavanja (austenitizacije). Kod nedovoljnog vremena austenitizacije ne postiže se dovoljna koncentracija ugljika u austenitu. Nasuprot tome, predugo držanje na visokim temperaturama uzrokovat će porast austenitnog zrna. Stoga je nužno za svaki brzorezni čelik utvrditi optimalne parametre austenitizacije. Radi visokog sadržaja legirajućih elemenata brzorezni čelici imaju slabu toplinsku vodljivost te su vrlo osjetljivi na način zagrijavanja.

Toplinska obrada brzoreznih čelika je izrazito kompleksna tako da se često provodi predgrijavanje u tri stupnja (550, 850 i 1050 °C) radi osjetljivosti čelika na nagle promjene temperature. [5]

5.3.6. Sinterirani alatni čelici

Istraživanje i razvoj različitih procesa te laboratorijskih metoda sinteriranja, započeli su početkom 20. stoljeća znanstvenici poput Moissona, Troosta, Wedekinda i dr. Spomenuti istraživači predstavljaju začetnike nove industrijske discipline – metalurgije praha (eng. Powder Metallurgy – PM).

Današnji suvremeni materijali dobivaju se optimiranjem sastava i mikrostrukture materijala prema željenim svojstvima. Metalurgija praha pruža velike mogućnosti za ostvarenje takvog pristupa proizvodnji materijala i različitih dijelova strojeva. Metalurgija praha obuhvaća ne samo proizvodnju metala u obliku praha nego i nemetalnog praha, te oblikovanje dijelova iz takvog praha postupkom sinteriranja, odnosno srašćivanja.

Fucks i Kopietz uspjeli su legiranjem volframovog karbida WC s elementima željezne grupe (npr. Fe, Ni, Co, Mn), kromom i titanom dobiti vrlo žilave, ali mekše materijale te prvi puta uvode postupak sinteriranja pod tlakom tzv. legure TIZIT. Kasnije, 1922. god., dolazi do poboljšanja legure TIZIT smanjenjem udjela metala željezne grupe, a povišenjem udjela titanovih karbida. Tako dobivena legura prethodnik je kasnije razvijenim i poznatijim legurama FERRO-TITANIT.

Nakon 1945. god. uglavnom je prevladavalo istraživanje metoda sinteriranja metalnih karbida, ali započinje i rad na ispitivanju mogućnosti sinteriranja keramičkih i željeznih materijala. U razvoju procesa sinteriranja posljednji su usavršavani alati od sinteriranog čelika. Prvi prihvatljivi postupci sinteriranja čelika opisani su tek 1953. god. (W. Hotop i E. Ritzau).

R. Kieffer je definirao sinteriranje kao postupak koji predstavlja prevođenje praha metala, metaloida, metalnih ili nemetalnih spojeva u čvrstu kompaktnu materiju pod utjecajem topline, a da pri tom bar jedna komponenta ostane nerastaljena. Općenito, sinteriranje predstavlja proces srašćivanja čestica istog ili različitog materijala koji se intenzivnije odvija pri višim temperaturama te ukoliko su čestice koje srašćuju manjih dimenzija.

Intenzivniji razvoj metalurgije praha počeo je proizvodnjom i uporabom "tvrdih metala", a posljednjih godina prolazi kroz razdoblje značajnijeg napretka. Danas se postupcima metalurgije praha mogu postići jednaka ili bolja svojstva od tradicionalnih postupaka oblikovanja metala. Postupci oblikovanja praha danas se također primjenjuju u proizvodnji keramike i metalnih kompozita.

Sinterirani čelici u praksi primjenjuju se za: alate za duboko vučenje, alate za valjanje navoja, razne kalupe, alate za obradu odvajanjem strugotina kao što su: spiralna svrdla, tokarski noževi, glodala, alat za narezivanje navoja, razvrtala, itd...

[5]

6. SVOJSTVA MATERIJALA

6.1. Uvodno o svojstvima materijala i vrstama ispitivanja

Ispitivanje materijala je područje znanosti o materijalima, koje je usko povezano s drugim znanostima i inženjerskim disciplinama kao što su: mehanika krutog tijela, tehnika konstruiranja, tehnika proizvodnje i tehnika automatizacije.

Znanost o materijalima izučava ovisnost između kemijskog sastava, strukturne građe, kemijskih i elektromagnetskih utjecaja. Svojstva materijala koja su bitna za strojarske konstrukcije mogu se općenito podijeliti na:

- mehanička,
- tehnološka,
- kemijska,
- fizikalna,
- eksploatacijska.

Temeljna svojstva materijala s gledišta strojarstva su mehanička: čvrstoća, granica razvlačenja, modul elastičnosti, modul smika, istezljivost, žilavost, tvrdoća, puzavost, dinamička čvrstoća i slično.

Tehnološka svojstva pokazuju njegovu sposobnost za obradu različitim postupcima, kao što su livljivost, deformabilnost u toplom i hladnom stanju, zavarljivost, rezivost odvajanjem čestica, sabijanje, savijanje, duboko izvlačenje lima, spljoštavanje cijevi, proširivanje cijevi, posuvraćivanje cijevi, ispitivanje žice i slično.

Kemijska svojstva su kemijski sastav i korozijska svojstva.

Fizikalna svojstva su električna, magnetna, toplinska, optička, gustoća, talište itd.

Eksploatacijska svojstva pokazuju otpornost materijala u uporabi. To su npr. otpornost na trošenje, otpornost na koroziju, mehanička svojstva proizvoda, funkcionalnost proizvoda i slično.

Vrste ispitivanja materijala su sljedeća:

- mehanička (ispituju se svojstva materijala kao npr. čvrstoća, tvrdoća, udarni rad loma itd.),
- tehnološka (ispituju se uporabna svojstva materijala npr. deformabilnost u toplom i hladnom stanju, zavarljivost itd.),
- ispitivanja bez razaranja materijala (ispituju se pogreške u materijalima npr. defekti, poroznosti, uključci, pukotine, lunke, dvoplatnosti itd.),
- metalografska (ispituje se mikro i makrostruktura, veličina zrna, stanje toplinske obrade itd.),
- kemijska (ispituje se sadržaj elemenata, otpornost prema koroziji itd.),
- fizikalna (ispituju se toplinska, električna, magnetska, optička svojstva itd.).

Mehanička ispitivanja materijala ili ispitivanja materijala s razaranjem, bez podjele na ispitivanja tvrdoće i tehnološka ispitivanja, dijele se na:

- statička i dinamička (prema načinu opterećivanja),
- kratkotrajna i dugotrajna (prema vremenu opterećivanja),
- povišenoj ili sniženoj temperaturi (prema temperaturi ispitivanja),
- prema vrsti opterećivanja.

Kao skupina elemenata, metali imaju niz zajedničkih svojstava, koja se bitno razlikuju od svojstava nemetalnih elemenata. Većina tih svojstava čini ih pogodnima za tehničku primjenu. Pojedina se svojstva javljaju kao trajne, jednom utvrđene (ispitane) vrijednosti, a podaci o njima obično su sređeni u tablicama. Druga se svojstva za svaki pojedini materijal moraju utvrditi ispitivanjem. Svojstva materijala su sređena i napisana u normama. Ispitivanjem normiranog materijala provjerava se ispunjava li taj materijal uvjete iz predviđene norme. Međutim, u praksi se ponekad upotrebljavaju nenormirani, kao i stari materijali bez podataka o njihovim svojstvima. Ako se takvi materijali žele iskoristiti, njihova se svojstva moraju utvrditi ispitivanjem.

[6]

6.2. Mehanička svojstva materijala

Kod mehaničkih svojstava metala koriste se pojmovi kao što su:

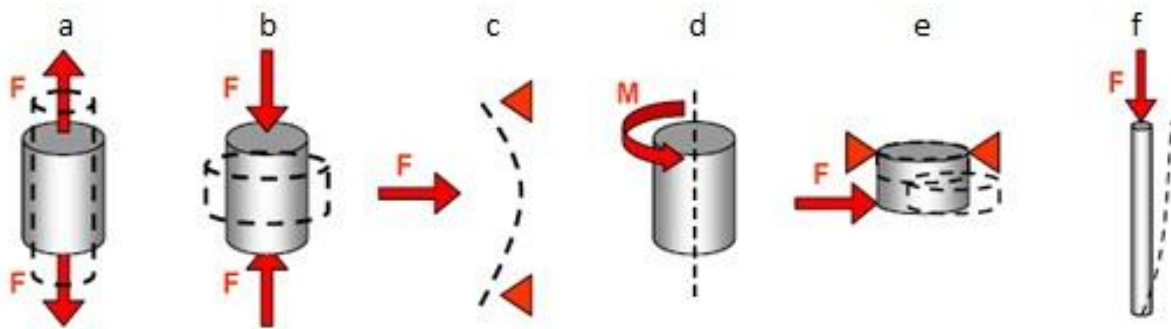
- opterećenje - djelovanje vanjske sile (F) na pojedini strojni dio,
- naprezanje - ima smjer suprotan smjeru sile koja ga izaziva,
- otpornost ili čvrstoća - je sposobnost materijala da se unutrašnjim silama odupire djelovanju vanjskih sila.

Mehanička svojstva dijele se na: statička svojstva, dinamička svojstva i svojstva tvrdoće. Na *slici 7* prikazano je šest vrsta opterećenja, koja se vrlo rijetko javljaju u čistom obliku, nego uglavnom u kombinaciji, a to su:

- vlačno opterećenje,
- tlačno opterećenje,
- savojno opterećenje,
- opterećenje na uvijanje (torziju),
- odrezno (smicno) opterećenje,
- opterećenje na izvijanje.

Navedenim opterećenjima suproavlja se čvrstoća materijala u obliku unutrašnjih sila. Tako postoje naprezanja:

- vlaka,
- tlaka,
- savijanja,
- torzije,
- odreza,
- izvijanja.



Slika 7 – Vrste opterećenja: a) vlak, b) tlak, c) savijanje, d) torzija ili uvijanje, e) odrez ili smik, f) izvijanje [7]

Da ne bi došlo do razaranja materijala, njegova čvrstoća mora biti uvijek veća od naprezanja izazvanog vanjskim silama. S vanjskom silom se računa jer je ona zadana u konstrukciji. Unutrašnje sile se mogu povećati na dva načina i to:

- uzimanjem materijala s većom čvrstoćom i
- povećanjem poprečnog presjeka strojnog elementa, jer se povećava nosivost proporcionalno s presjekom.

Svaka vanjska sila koja djeluje na neko materijalno tijelo zove se opterećenje. Opterećenje deformira tijelo i u njemu izaziva reakciju koja se, svedena na jedinicu površine, naziva **naprezanje**. Naprezanje je mjera intenziteta sila koje nastaju zbog utjecaja vanjskih opterećenja i kao reakcija na njih.

Naprezanje može biti **normalno** i **tangencijalno**.

Kada se radi o normalnoj sili F_n , koja djeluje okomito na presjek S , nastaje normalno naprezanje, koje uzrokuje skraćenje, odnosno produljenje. Tangencijalna sila F_t , koja djeluje okomito na os predmeta, uzrokuje tangencijalno naprezanje i time opterećenje na odrez.

[6]

7. STATIČKI VLAČNI POKUS

7.1. Ispitni uređaji (kidalice)

Statička svojstva odnose se na otpornost koju pojedini metal pruža prema djelovanju statičkih sila. Za takva ispitivanja upotrebljavaju se kidalice. To su strojevi s hidrauličkim ili mehaničkim djelovanjem, najčešće univerzalni, s dodatnom opremom i za druga mehanička ispitivanja kao na primjer: sabijanje, savijanje, odrez i tehnološka ispitivanja. Najnoviji strojevi imaju računalnu potporu, koja omogućuje jednostavnije i brže dobivanje traženih vrijednosti i dijagrama, spremanje u datoteke, prikaz na monitoru ili ispis, a ako su umreženi, slanje na daljinu i razmjenu podataka. Jedna takva kidalica prikazana je na slici 8.

[6]



Slika 8 – Univerzalna kidalica [8]

Ispitni uzorak se kontinuirano vlačno opterećuje do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje ispitnog uzorka te se pisačem grafički ispisuje dijagram $F - \Delta L$ (sila –produljenje). Uređaji za ispitivanje mogu biti različite veličine s obzirom na silu kojom mogu djelovati na uzorak, te postoje različite konstrukcijske izvedbe. Najčešće se sastoje od ove grupe dijelova:

- kućište,
- mehanizam za prijenos sile na uzorak (mehanički ili hidraulički),
- čeljusti za prihvat uzorka,
- uređaj za mjerenje sile i produljenja,
- uređaj za ispis dijagrama naprezanja $F - \Delta L$.

Kućište se sastoji od postolja i dvaju stupova povezanih gornjom poprečnom gredom. Između stupova također se nalaze gornja i donja stezna glava (čeljusti).

Mehanizam za prijenos sile na uzorak ima uljnu pumpu, koja tlači ulje priključkom ispod klipa, koji se nalazi u cilindru. Na taj način se nametne opterećenje potrebno za ispitivanje čvrstoće, koje će podizati pokretni most. Pokretni most i postolje imaju čeljusti za stezanje ispitnog uzorka ili epruvete, koja će se uslijed podizanja mosta istezati.

Čeljusti (stezne glave) osiguravaju kvalitetan prihvatač uzorka kako bi se osiguralo precizno ispitivanje. Obično su izrađene od legure čelika i velikom tlačnom silom prihvaćaju ispitni uzorak.

Uređaj za mjerenje sile sastoji se od cilindra, u koji preko voda iz uljne pumpe dolazi ulje i potiskuje klip. Klip će posredno djelovati na gibanje položaja, te će podizati uteg. On će preko njihala pokretati kazaljku, pa se na skali mogu očitati vrijednosti postignute sile istezanja (opterećenja) ispitnog uzorka ili epruvete.

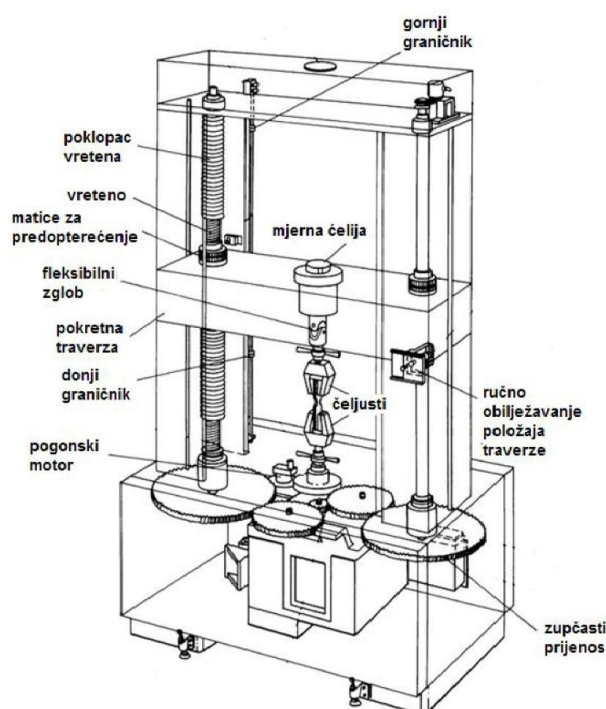
Uređaj za mjerenje produljenja (deformacije) je obično u sklopu uređaja za ispis dijagrama naprezanja $F - \Delta L$ (sila–apsolutno produljenje). On se sastoji od valjka na kojemu je namotan papir (obično milimetarski). Valjak se okreće pomoću uzice koja je namotana na osovinu kazaljke. Da bi uzica bila uvijek zategnuta, na njenom kraju nalazi se uteg. Svaki pomak kazaljke izazvat će isti pomak valjka na kojem će pisaljka zabilježiti promjenu vrijednosti sile po ordinati dijagrama. Promjenu deformacije će pisaljka bilježiti po apscisi horizontalnim gibanjem po vodilici, izazvanim uzicom. Uzica je vezana za pokretni most, te putem kolotura vodi do pisaljke. Stalnu napetost u uzici vrši uteg.

Uređaj za ispis dijagrama naprezanja $F - \Delta L$ bilježi deformaciju ispitnog uzorka ili epruvete, tj. njezino povećavanje početne duljine L_0 . Naime, gibanjem mosta prema gore, on za sobom povlači uzicu, a ona pisaljku, te će svaka deformacija epruvete za određenu vrijednost sile biti zabilježena na papiru omotanom oko valjka. Deformacija se može mjeriti i izravno. Uz pokretni most je pričvršćena skala u milimetrima, a na pokretnom mostu je pričvršćen nonius skala (kao pomično mjerilo), koja omogućuje očitavanje deformacije točnosti do 0,01 mm. Suvremene kidalice mogu podatke o vrijednostima sile i deformacije prikazati i digitalno. Podatke o sili i deformaciji obrađuje računalo koje na monitoru ispisuje sliku dijagrama naprezanja. Sliku ispitnog dijagrama možemo putem pisača ispisati na papir.

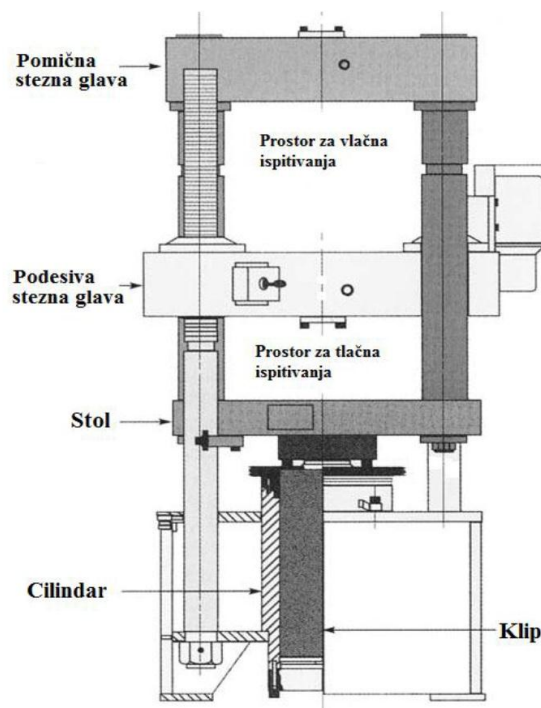
Ispitni uređaji za statička vlačna ispitivanja su najčešće univerzalni uređaji za ispitivanje vlačnih, tlačnih i savojnih svojstava materijala. Uređaji su pogonjeni elektromehanički ili hidraulički. Glavna razlika između njih je u načinu generiranja sile, koja savija, tlači ili rasteže ispitni uzorak.

Elektromehanički uređaji (slika 9) imaju električni motor, koji preko reduksijskog sustava i vretena pomiče stezne čeljusti gore ili dolje i tako opterećuje ispitni uzorak tlačnom ili vlačnom silom. Brzina pomicanja čeljusti može se mijenjati promjenom brzine vrtnje elektromotora. Primjenom servo elektromotora ili koračnih elektromotora može se vrlo precizno upravljati brzinom pomaka steznih čeljusti.

[5]



Slika 9 – Elektromehanička kidalica [9]



Slika 10 – Hidraulična kidalica [10]

Hidraulični ispitni uređaji (slika 10) imaju jedan ili dva klipa koji pokreću stezne čeljusti. U ručno upravljanim uređajima operater podešava otvor igličastog ventila kako bi upravljao prirastom opterećenja. Za preciznije upravljanje, igličasti ventil se zamjenjuje električno upravljanim servo ventilom.

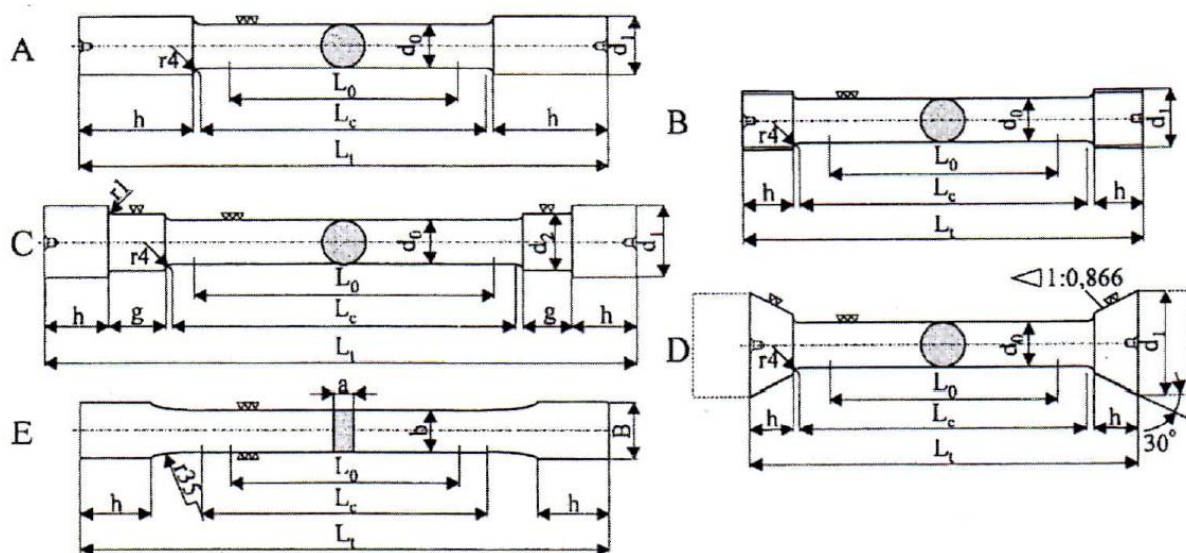
Općenito, elektromehaničkim uređajima se može postići širi raspon brzina ispitivanja i veći razmak steznih čeljusti, dok su hidraulički uređaji isplativiji kod ispitivanja s većim silama. Ispitni uređaji mjere opterećenje primijenjeno na ispitnom uzorku, stoga uređaj za mjerenje sile mora biti umjeren u skladu s važećim normama.

[6]

7.2. Ispitni uzorci (epruvete)

Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka, kao i način ispitivanja, točno su propisani normama. Postoje obrađeni i neobrađeni ispitni uzorci. Neobrađeni ispitni uzorci imaju po cijeloj duljini jednak poprečni presjek, a izrađuju se od šipki, žica i sl. Obrađeni uzorci su na srednjem dijelu stanjeni na određenu dimenziju. Tipične epruvete za statički vlačni pokus prema DIN 50115 prikazane su na slici 11.

[6]



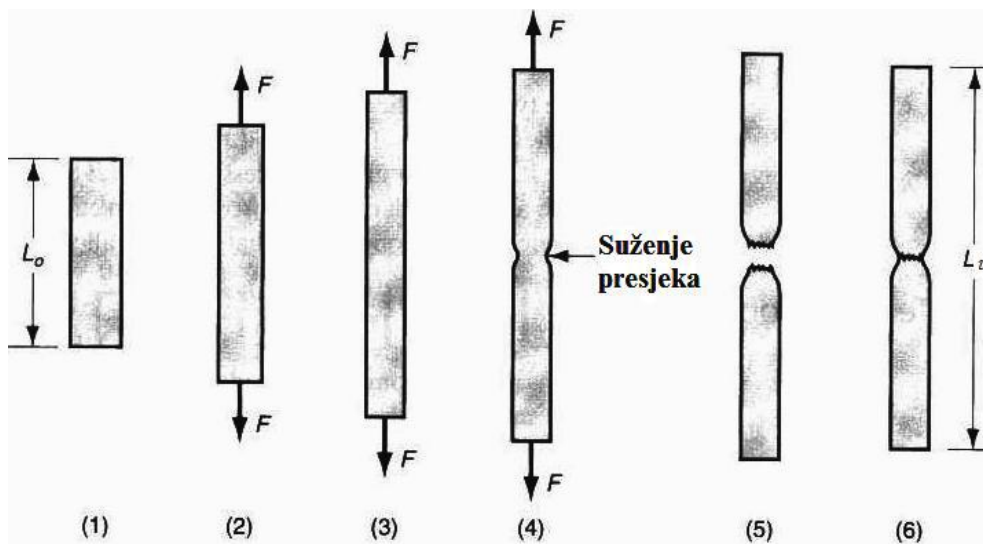
Slika 11 – Epruvete za statički vlačni pokus prema DIN 50115 [6]

Mjerna duljina (L_0) je područje na kojem se vrše mjerenja i ispitivanja. Smješteno je na sredini ispitnog uzorka, a promjer (d_0) je u tom području smanjen u odnosu na ostatak ispitnog uzorka, tako da se osigura deformacija i lom upravo na tom dijelu.

Mjerna duljina epruvete je $5d_0$ (kratka epruveta) ili $10d_0$ (duga epruveta) i označava se na epruveti. Epruveta se stavlja u kidalicu i opterećuje na vlak do loma. Brzina opterećivanja ne smije prijeći vrijednost 9,8 MPa/s, a na povećanu brzinu posebno su osjetljivi metali niskog tališta.

Budući da u svakom tijelu opterećenje, odnosno proizvedeno naprezanje izaziva deformaciju, tako će se i pri statičkom vlačnom ispitivanju epruveta produljivati. Stoga se u ispitivanju pored vrijednosti sile prati i produljenje epruvete. Na pisaču kidalice se za vrijeme ispitivanja crta dijagram "sila – produljenje", $[F - \Delta L]$, koji se naziva "dijagram kidanja". Produljenje ΔL [mm], predstavlja povećanje duljine L_0 koja je naznačena na epruveti prije ispitivanja. Veličina L_t predstavlja konačnu duljinu epruvete. Tijek ispitivanja prikazan je na slici 12.

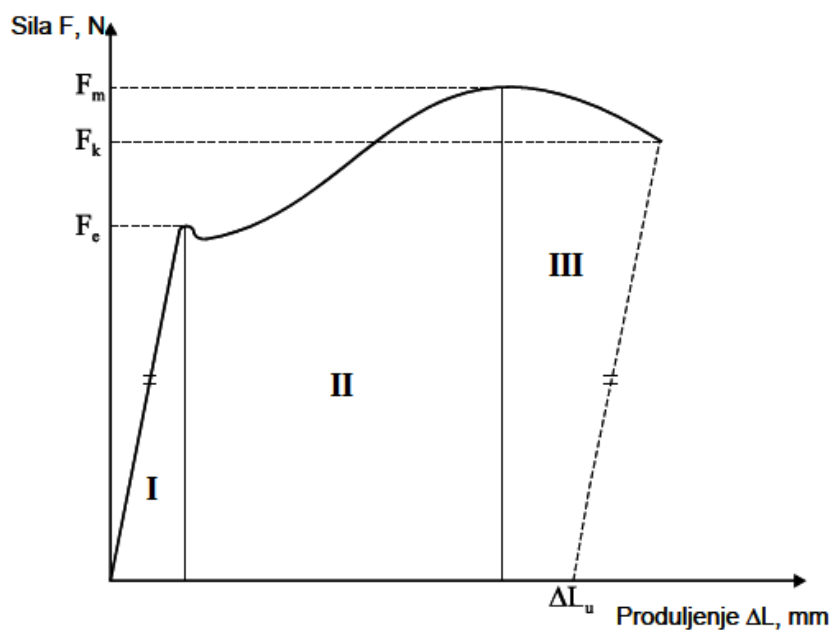
[6]



Slika 12 – Epruveta u različitim fazama ispitivanja [10]

7.3. Dijagram kidanja

Kao što je već navedeno, na pisaču kidalice se za vrijeme statičkog vlačnog pokusa crta dijagram kidanja. Na slici 13. prikazan je dijagram kidanja za konstrukcijski čelik. Na apscisi su vrijednosti deformacija, a na ordinati sile (F).



Slika 13 – Dijagram kidanja [11]

Dijagram kidanja je podijeljen na tri područja:

U prvom području prikazana je linearna ovisnost sile i produljenja. To znači da istim prirastima sile odgovaraju i jednaka produljenja. Ono vrijedi sve do vrijednosti sile F_e (sila na granici tečenja ili tzv. sila razvlačenja). Nakon prestanka djelovanja tih sila deformacija nestaje i materijal se vraća u položaj prije opterećenja.

U drugom području dijagrama nakon sile razvlačenja, više nema linearne ovisnosti između povećanja sile i produljenja. Epruveta se nastavlja produljivati uz čak mali pad opterećenja. Za daljnje produljenje potreban je ponovni porast sile. Opterećenje raste sve do dostizanja maksimalne sile F_m .

U trećem područje dijagrama, nakon sile F_m epruveta se nastavlja produljivati uz sve manju silu. Konačno, pri vrijednosti sile F_k dolazi do loma epruvete. Produljenje ispitivane epruvete nakon kidanja iznosi: $\Delta L_u = L_u - L_0$, mm.

Analizom očitanih sila na instrumentu kidalice i računom određuju se svojstva čvrstoće i druge karakteristike materijala opterećenog na vlak.

Čvrstoća materijala na vlak definira se kao omjer maksimalne sile pri statičkom vlačnom pokusu i početnog presjeka epruvete:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

gdje je F sila u N , a S_0 površina presjeka epruvete u mm^2 .

Istezanje ili relativno produljenje računa se prema izrazu:

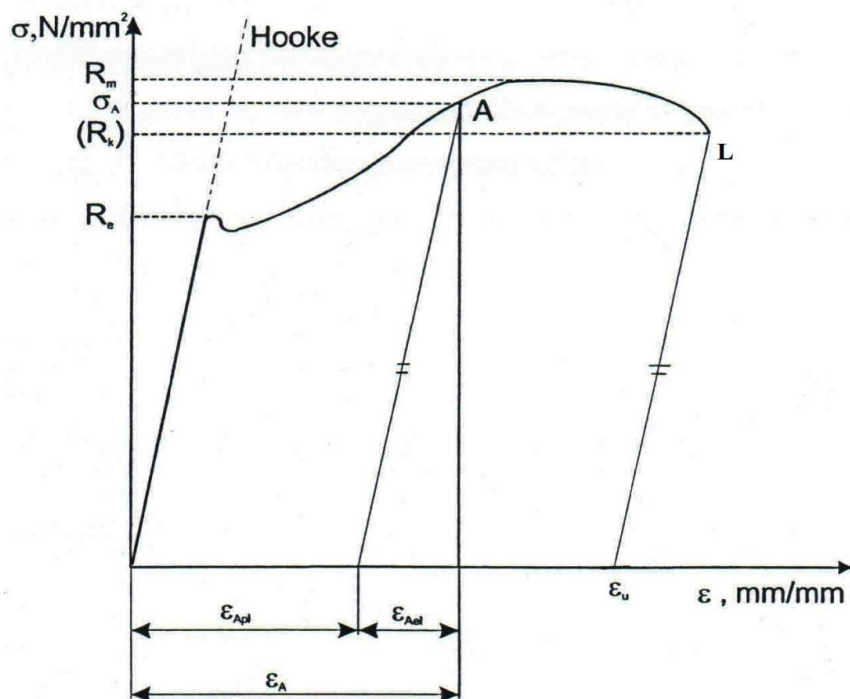
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 [\%]$$

Budući da je istezanje bezdimenzionalna veličina [mm/mm], u praksi se rezultat uvijek množi sa 100, a vrijednost izražava u postocima [%]. [11]

7.4. Dijagram naprezanje - istezanje $\sigma - \varepsilon$

Uvođenjem veličina σ i ε može se nacrtati dijagram "*naprezanje – istezanje*" tj. *Hooke-ov dijagram*. Na apscisi su vrijednosti istezanja ε u postocima, a na ordinati su vrijednosti naprezanja σ u N/mm^2 . Na slici 14 prikazan je Hooke-ov dijagram za konstrukcijski čelik.

Krivulja *naprezanje – istezanje* gotovo je neovisna o dimenzijama ispitnog uzorka, za razliku od krivulje *sila – produljenje*, koja će za ispitni uzorak od istog materijala, ali drugih dimenzija, biti drugačija. Nakon što je iscrtana krivulja *naprezanje – istezanje*, pomoću nje se mogu odrediti mnoga mehanička svojstva materijala.



Slika 14 – Dijagram naprezanje – istezanje (Hooke-ov dijagram) [11]

Granica elastičnosti označava područje krivulje gdje se javlja elastična deformacija. Materijal se u ovom području ponaša prema Hooke-ovom zakonu, koji kaže da je istezanje linearno proporcionalno naprezanju:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

gdje je E modul elastičnosti za određeni materijal u N/mm^2 . Modul elastičnosti ili Youngov modul elastičnosti je nagib krivulje naprezanje – istezanje u njezinom linearnom dijelu. To je osnovno fizikalno svojstvo svakog materijala. Ako sila nije premašila granicu elastičnosti, uzorak se može rasteretiti, mogu se otkloniti nepravilnosti i ispitivanje se može ponovno pokrenuti, bez utjecaja na rezultate.

Granica proporcionalnosti je trenutak kad prestaje linearan odnos između naprezanja i istezanja, pa malo povećanje naprezanja uzrokuje veće povećanje istezanja. Granica proporcionalnosti i granica elastičnosti se smatraju identičnima u većini realnih slučajeva. Teoretski, smatra se da je granica elastičnosti malo višlja od granice proporcionalnosti.

Granica razvlačenja označava točku u kojoj dolazi do popuštanja koheziono-molekularnih sila među kristalima, pa sila počinje opadati dok deformacija istodobno raste. Nakon toga materijal ponešto očvršne, te za daljnji porast deformacija treba ponovni porast sile.

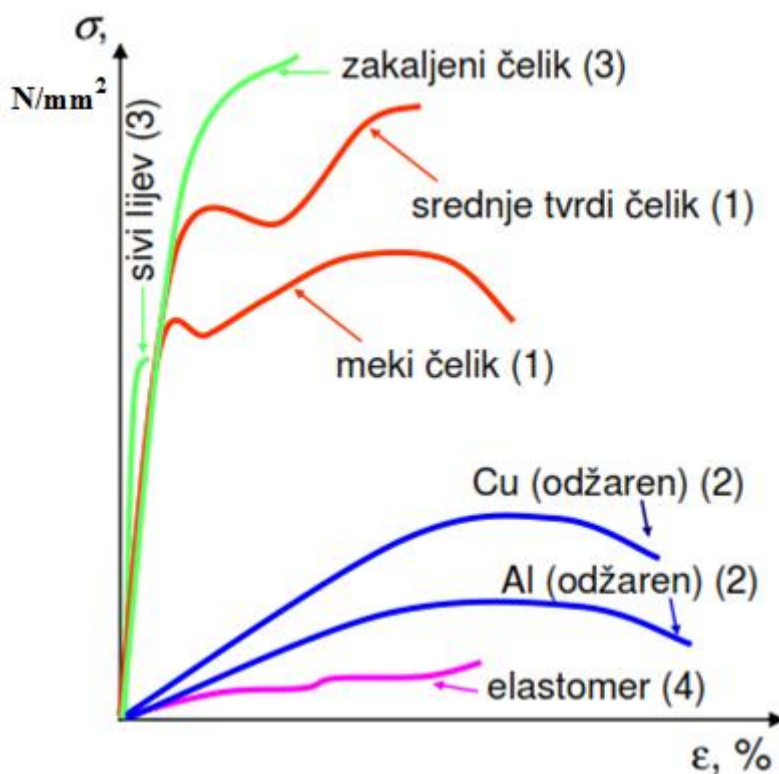
Maksimalna sila je najveća sila postignuta pri statičkom vlačnom pokusu. U tom trenutku na jednom se mjestu epruveta stanjuje i to je mjesto gdje će kasnije nastati lom. Tako se smanjuje presjek epruvete, pa su za daljnju deformaciju dovoljne manje sile. Smanjivanje sile se nastavlja do loma i tada dolazi do potpunog kidanja epruvete.

Granica loma je opterećenje pri kojem dolazi do puknuća epruvete.

Svaki materijal ima svoj karakterističan dijagram naprezanje – istezanje, no dijagrami različitih materijala mogu se podijeliti na četiri osnovna oblika prikazanih na slici 15.

1. s izraženom granicom razvlačenja (npr. meki i srednje tvrdi čelici),
2. s kontinuiranim prijelazom iz elastičnog u elastično/plastično područje deformacija (npr. bakar i aluminij),
3. bez područja elastično/plastičnih deformacija (krhki materijali koji se lome gotovo bez plastične deformacije, npr. sivi lijev, zakaljeni čelik),
4. s viskoelastičnom deformacijom, npr. neki organski materijali i polimeri (elastomeri).

Kod viskoelastične deformacije, ukupna deformacija ovisi o trajanju djelovanja sile. Svaki organski materijal ima viskoelastično ponašanje, pa prilikom ispitivanja takvih materijala mora se uzeti u obzir i vrijeme opterećivanja.



Slika 15 – Vrste dijagrama naprezanje – istezanje [12]

8. DINAMIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

8.1. Uvodno o dinamičkim svojstvima materijala

U dinamička svojstva uglavnom se ubrajaju udarni rad loma i dinamička izdržljivost. U praksi su strojni elementi vrlo rijetko opterećeni statičkim silama. Sile najčešće rastu skokovito ili im se ciklički mijenja smjer, pa je strojni element izložen velikom broju promjena intenziteta i smjera sila. Tada se radi o dinamičkim naprezanjima. Kada se radi o naglom rastu sila, nastaje dinamičko udarno opterećenje, a kada sile mijenjaju smjer, govori se o dinamičkom cikličkom naprezanju. Svakako postoji i kombinacija jednog i drugog. Kod dinamičkog naprezanja često dolazi do lomova, pa je svrha dinamičkih ispitivanja utvrđivanje ponašanja metala kod ovakvih opterećenja. [6]

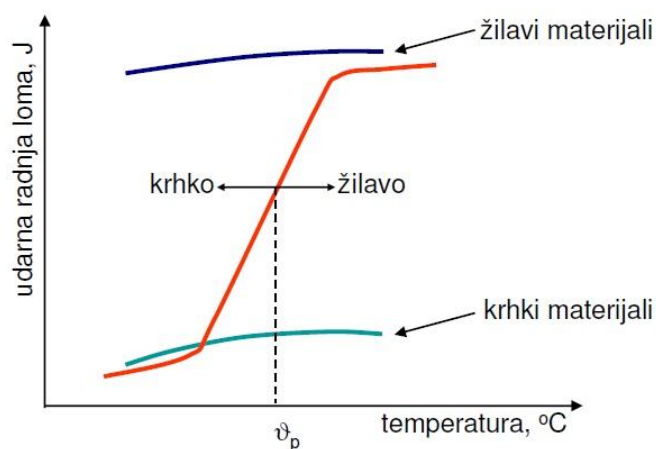
8.2. Žilavost kao svojstvo materijala

Udarna žilavost je svojstvo otpornosti materijala prema udarnom opterećenju. Kod žilavih materijala dolazi do znatnije plastične deformacije prije samog loma. Suprotno svojstvu žilavosti je krhkost, gdje pri uvjetima udarnog opterećenja lom nastupa bez vidljive trajne deformacije. U pravilu rastezljivi metali su i žilaviji, ali to ne smije biti presudan podatak pošto se rastezljivost odnosi na statičko ispitivanje rastezanjem uzorka, dok je žilavost svojstvo povezano sa udarnim opterećenjem. Kod nekih metala se promjenom vanjskih parametara naglo mijenjaju mehanička svojstva, tj. kod spomenutih metala dolazi do naglog smanjenja žilavosti na sniženim temperaturama (npr. ugljični nelegirani čelici).

Utjecajni faktori na rezultate ispitivanja su:

- temperatura,
- kemijski sastav,
- mikrostruktura (fazni sastav).

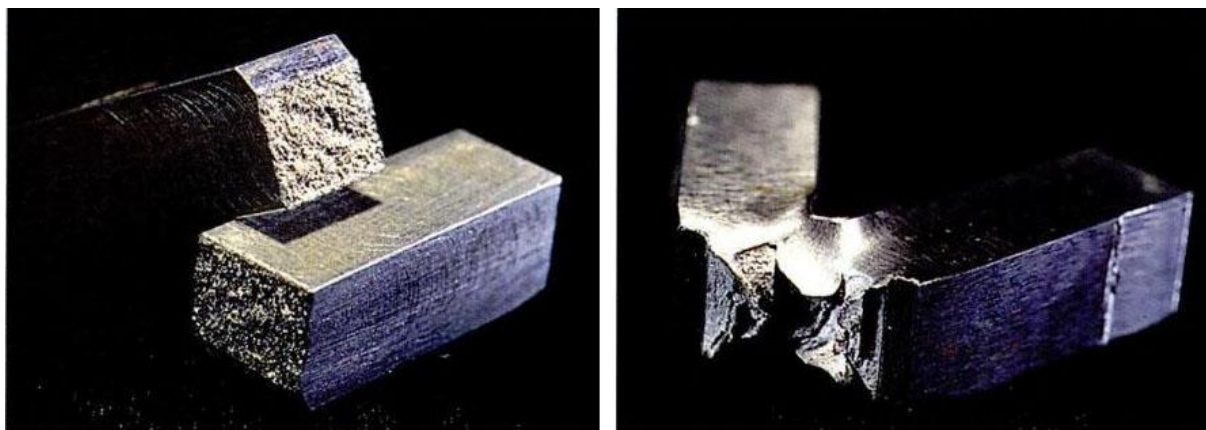
Temperatura pri kojoj se vrši ispitivanje znatno utječe na rezultate ispitivanja. Utvrđeno je da većina metala koji podliježu lomljivosti imaju kritično temperaturno područje ili tzv. kritičnu zonu, kod koje se žilavost naglo smanjuje (Slika 16). [17]



Slika 16 – Utjecaj temperature na žilavost materijala [13]

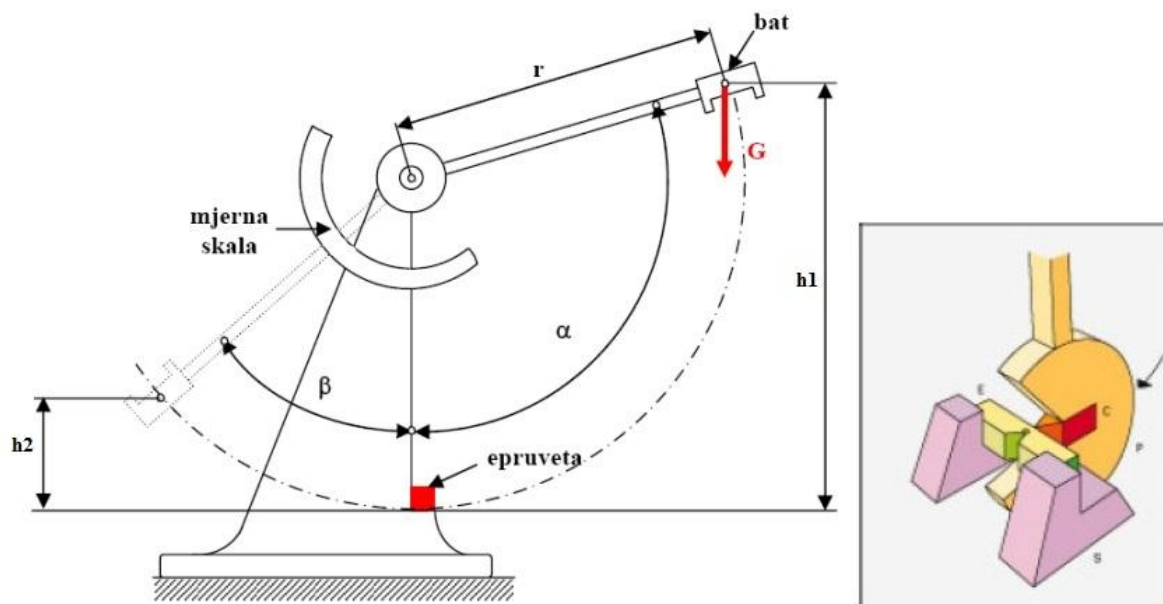
8.3. Ispitivanje udarnog rada loma – Charpyeva metoda

Ispitivanje udarne radnje loma zasniva se na principu mjerenja utrošene energije za lom epruvete. Razlika početne potencijalne energije i potencijalne energije bata nakon udara, predstavlja energiju utrošenu na razaranje epruvete. Dodatne informacije o žilavosti materijala mogu se dobiti promatranjem mjesta loma epruvete te mjerenjem povećanja zareza ukoliko nije došlo do potpunog loma epruvete (Slika 17).



Slika 17 – Prikaz krtog i žilavog loma epruvete [14]

Jedan od načina za ispitivanje udarnog rada loma je *Charpyeva metoda*, čiji princip je prikazan na slici 18. Epruveta kvadratnog presjeka, sa U ili V urezom, stavlja se u ležište uređaja i slomi slobodnim puštanjem bata. Bat uređaja pušta se sa visine $h1$ i udara po sredini epruvete, te se provlači kroz oslonce i potom penje na visinu $h2$. Udarni rad loma se mjeri kao utrošen rad, a žilavost kao utrošen rad loma po mm^2 .



Slika 18 – Charpyeva metoda [13]

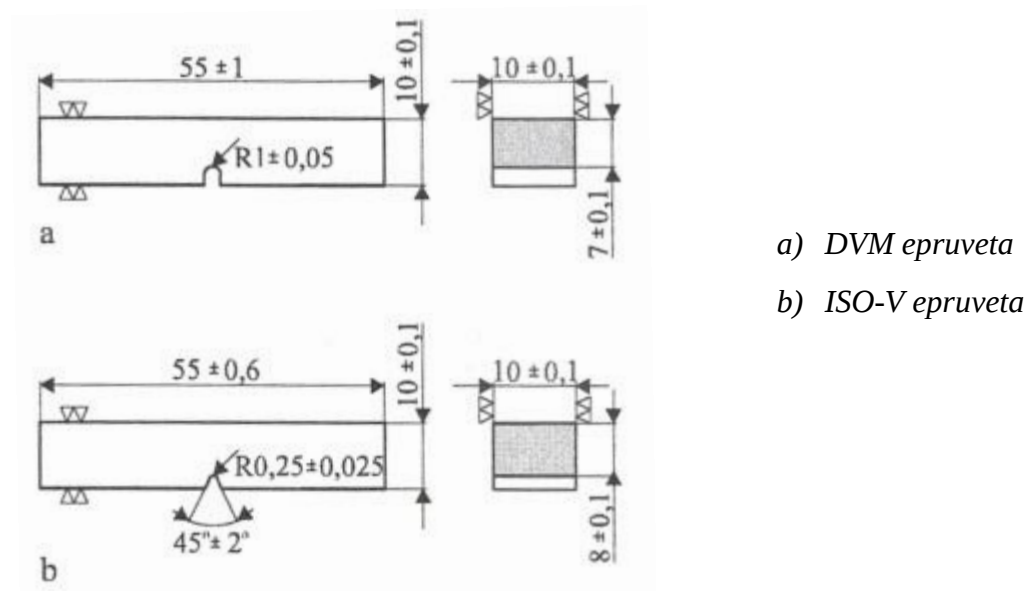
Noviji batovi umjesto kutne skale za očitavanje kuteva α i β imaju skalu na kojoj se izravno očitava utrošen rad, koji se jednostavno podijeli s površinom presjeka epruvete.

Ispitivanjem udarnog rada loma utvrđuje se reakcija materijala na kratkotrajno udarno opterećenje. Pri tome materijal može reagirati žilavo ili krhko.

Udarni rad loma se ispituje na temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Kada se ispituje kod drugih temperatura to se mora naznačiti (0°C , -20°C , -40°C , -60°C), jer je žilavost u zavisnosti od temperature vrlo promjenjiva. Krhki materijali, posebno na niskim temperaturama, lome se bez većih deformacija, što se naziva krhki lom. Žilavi materijali, posebno na višim temperaturama, pri lomu se i znatno deformiraju, pa se govori o plastičnom lomu.

8.4. Ispitni uzorci (epruvete)

Na slici 19 prikazana su dva oblika epruveta koji se najčešće koriste za ispitivanje udarnog rada loma. To je epruveta sa "V" utorom dubine 2mm, poznata pod imenom ISO-V epruveta, te epruveta sa "U" utorom dubine 3mm, koja se naziva DVM epruveta.



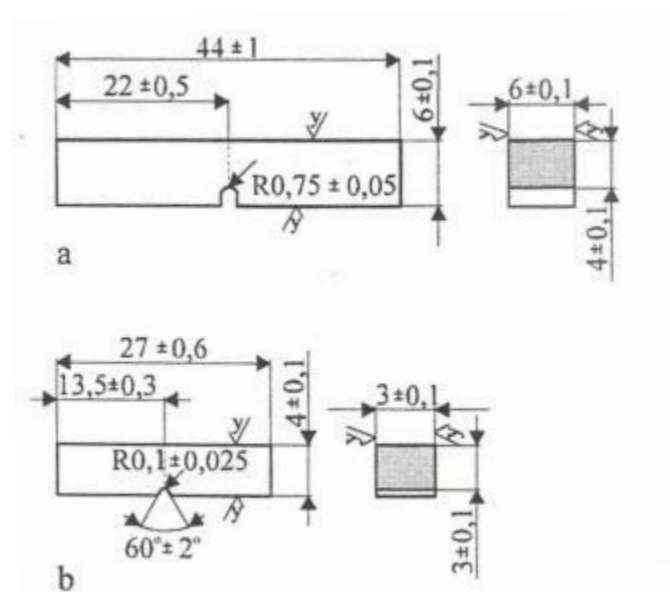
Slika 19 – Oblik i dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma prema DIN 50115[16]

Urez koji se nalazi u sredini ispitnog uzorka, osigurava da se lom dogodi baš na tom mjestu. Ispitni uzorak sa "V" urezom upotrebljava se za ispitivanje žilavih materijala, kao što su čelici s malim postotkom ugljika, dok se ispitni uzorak sa "U" urezom upotrebljava za ispitivanje krhkih materijala.

Tendencija je da se u većini slučajeva upotrebljavaju ispitni uzorci s "V" urezom.

U slučaju nedovoljne količine raspoloživog materijala, koriste se epruvete manjih dimenzija prikazane na slici 20.

[16]



a) DVMK epruveta

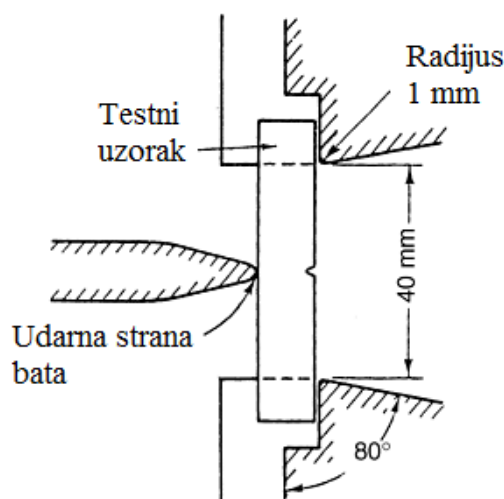
b) najmanja epruveta

Slika 20 – Posebne epruvete za ispitivanje udarnog rada loma prema DIN 50115 [16]

8.5. Charpy bat

Charpy-ev bat je zasigurno najpopularniji i najzastupljeniji uređaj za ispitivanje žilavosti. Princip rada stroja zasniva se na određivanju utroška energije bata na lom epruvete sa urezom (utorom, zarezom). Testiranjem žilavosti materijala Charpy-evim batom ne mogu se dobiti točni podaci tranzicijskih temperatura materijala koje i predstavljaju najveći problem. Temperatura je najveći čimbenik koji određuje žilavost materijala, posebno kod konstrukcijskog čelika. Za uspješno testiranje i prikupljanje podataka potrebno je pripremiti više uzoraka koji se ispituju na različitim temperaturama. Najčešće se koristi 4 do 8 uzoraka. Kod ovoga testa uspješnost ovisi o tome dali je ispitni uzorak pukao ili nije, što i nije loše pošto je sam test lako reproducirati te tako možemo preciznije doći do podataka postepenim povećanjem energije udara bata.

Testni uzorak na Charpy-evom batu je oslonjen na dva kraja i mora biti slomljen jednostrukim udarcem bata, koji udara po sredini epruvete na suprotnoj strani od utora (Slika 21). Uzorak mora puknuti po sredini te dva komada izlijeću van, dok bat prolazi između dva oslonca. Visina bata prije udarca i visina bata nakon udarca se mjere, a njihova razlika je količina energije utrošena na razbijanje epruvete odnosno vrijednost udarne žilavosti. Stroj se mora kalibrirati tako da vrijednost koja se očita bude konačna veličina žilavosti materijala, odnosno tako da svi gubitci uslijed trenja u ležajevima budu uračunati u konačan rezultat.



Slika 21 – Shematski prikaz ispitivanja žilavosti Charpy-evim batom [17]

Postoje razni standardi koji se vežu na Charpy ispitivanje i koji se uglavnom odnose na izgled i geometriju samog bata kao i na njegove tolerancije, izgled i dimenzije potporna za epruvete, samo kretanje i udar bata na uzorak te verifikacija i atestiranje uređaja, a sve u svrhu mogućnosti prihvaćanja tih rezultata kao vjerodostojnima.

Charpy uređaj za ispitivanje se može naći sa različitim veličinama energije udara, ovisno o potrebama ispitivanja. Razlikuju se prema količini energije koju mogu utrošiti u obliku udarca. Najpopularnija mjerna područja su od: 150 [J], 300 [J] i 400 [J]. Masa bata koji proizvodi rad od 300 [J] iznosi 20 kg, a prosječna brzina bata kod pada je 6 m/s. Postoje uređaji kod kojih se može mijenjati količina energije dodavanjem utega na sami bat. Važno je dobro procijeniti kolika količina energije će se koristiti, jer su poznati slučajevi kod kojih je pri ispitivanju vrlo žilavih materijala došlo do puknuća ručke bata.

[17]

Neki primjeri uređaja prikazani su na slici 22.



Slika 22 – Primjeri uređaja Charpy-evog bata [13]

9. TVRDOĆA I NAČIN ISPITIVANJA

9.1. Pojam tvrdoće

Tvrdoća se definira na više načina. Po jednom od njih to je otpornost protiv prodiranja u površinu. Međutim, takvo se tumačenje ne može uzeti doslovno, jer prodiranje jednog tijela u drugo ne ovisi samo o tvrdoći tijela u koje se prodire, već i o obliku tijela koje prodire.

Unatoč tome što tvrdoća ne predstavlja fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava. Razlog tome je s jedne strane što je tvrdoća u korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima (npr. vlačnom čvrstoćom), a s druge strane mjerenje tvrdoće je jednostavnije i prije svega brže od ispitivanja nekih drugih mehaničkih svojstava.

Nadalje, za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je mjerenje moguće, ovisno o metodi, na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima. Zbog toga su se s vremenom razvile različite metode mjerenja tvrdoće.

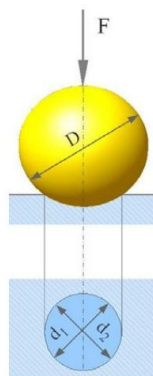
Jedan od prvih načina određivanja tvrdoće bio je prema Mohsovoj skali, koja ima raspon od 0 do 10. To je niz od deset minerala, poredanih po tvrdoći, koji se koristi za procjenu relativne tvrdoće drugih minerala ili tvari. Ukoliko nepoznata tvar može zarezati površinu minerala iz Mohsove skale, ona je tvrđa od tog minerala. Skala nije linearna i za tehniku je takova gradacija tvrdoće bila nedovoljna, pa se do danas razvilo nekoliko metoda, a primjenjuju se uglavnom:

- Brinellova,
- Vickersova,
- Rockwellova,
- Shoreova.

[6]

9.2. Brinell-ova metoda

Ispitivanje se izvodi na uređaju za ispitivanje tvrdoće po Brinellu tako da se u ravnu i glatku površinu materijala, pod određenim opterećenjem F [N] i u određenom vremenu t , utiskuje čelična kaljena kuglica (penetrator) promjera D , prikazana na slici 23.



Slika 23 – Penetrator i otisak kod Brinellove metode [19]

Kuglica pri tome u materijalu ostavi otisak promjera d s dimenzijom koja ovisi o tvrdoći materijala i opterećenju. Nakon rasterećenja mjeri se promjer otiska u dva smjera međusobno okomita, a uzima se srednja vrijednost promjera otiska. Tvrdoća se zatim na osnovi srednje vrijednosti promjera otiska d , promjera kuglice D i opterećenja F očitava iz posebnih tablica ili se izračuna po formuli:

$$HB = \frac{0.102 \cdot F}{S} = \frac{0.204 \cdot F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Promjer čelične kuglice D može biti od 1-10 mm (1, 2, 2.5, 5 i 10 mm), a mjerenje je valjano ako promjer otiska d iznosi od 0,25 do 0,5 D . Za pravilno mjerenje potrebna je debljina uzorka: $S > 0.8 h$, gdje je h dubina prodiranja kuglice. Na slici 24 prikazane su varijante kuglica za Brinellovu metodu, kao i otisci na ispitnom uzorku.

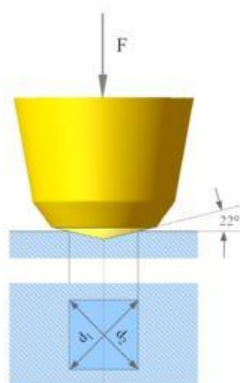


Slika 24 – Izvedbe kuglica kod Brinellove metode i otisci na uzorku [18]

Ovaj postupak je relativno precizan, ali ima i nedostataka. Ne mogu se ispitivati uzorci tanji od 8 dubina otiska, npr. limovi. Ne mogu se ispitivati materijali tvrdi od 450 HB, jer se tada kuglica počinje deformirati. Izuzetno, ako je kuglica od tvrdog metala, mogu se ispitivati materijali do 800 HB. Otisak je relativno velik, pa funkcionalno ili estetski nagrđuje površinu, ukoliko se tvrdoća mjeri na proizvodu, a ne na uzorku. [6]

9.3. Vickers-ova metoda

Vickers je svojom metodom uklonio glavne nedostatke Brinellove metode (ograničenost područja mjerenja i ovisnost tvrdoće o sili utiskivanja), pa je primjenom ove metode moguće mjeriti i najtvrdije materijale. Kao penetrator koristi se dijamantna istostrana četverostrana piramida s kutom između stranica od 136° (slika 25). Ovakav kut odabran je zbog činjenice da se utiskivanjem penetratora s tim kutom dobivaju vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili.



Slika 25 – Slika penetratora i otisak kod Vickersove metode [19]

Površina materijala koja se ispituje mora biti ravna, glatka i čista. Nakon rasterećenja mjere se dijagonale otiska s točnošću $\pm 0,001$ mm. Obje dijagonale se izmjere, a zatim se izračuna njihova srednja vrijednost. Tvrdoća se zatim izračuna ili se traži u odgovarajućim tablicama. Ako se koriste tablice, mora se koristiti tablica za odgovarajuću silu. Tvrdoća po Vickersu je također koeficijent iste i površine otiska. Moderni uređaji nakon očitavanja veličine dijagonala, digitalno daju traženi podatak o tvrdoći u HV jedinicama za odgovarajuću silu. Tvrdoća po Vickersu izračunava se izrazom:

$$HV = 0.189 \frac{F}{d^2} \quad \text{gdje je} \quad d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

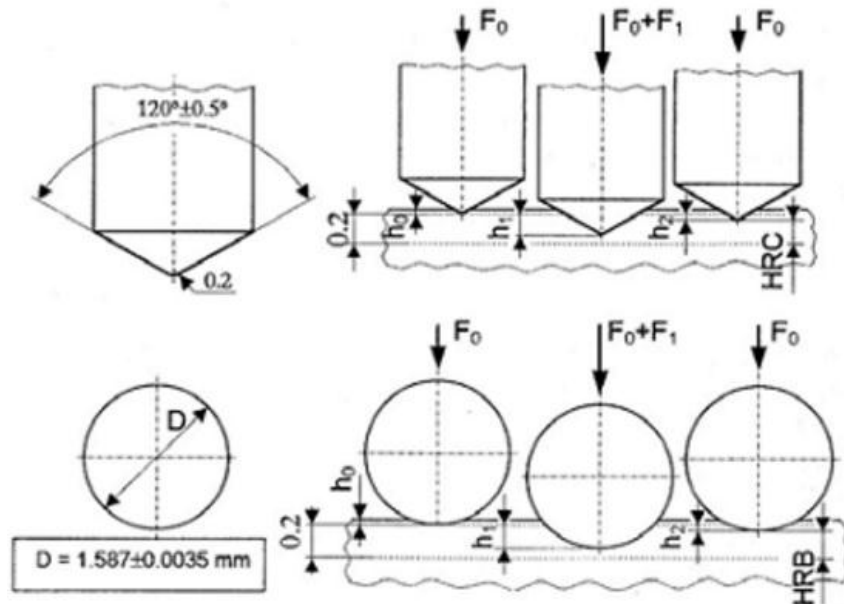
Vickersova metoda je najpreciznija metoda za mjerenje tvrdoće. Nema ograničenja u pogledu veličine tvrdoće mjernog uzorka, jer je penetrator dijamantna piramida, a mogu se mjeriti i najtanji metalni listići. Pri radu treba biti pažljiv, jer je dijamantni vrh osjetljiv na udarce pa se lako ošteti. Ako primjenjena sila utiskivanja iznosi od 1,96 do 49 N, govori se o mikrotvrdoći. Mjerenje mikrotvrdoće provodi se prvenstveno pri ispitivanju tvrdoće tankih uzoraka te tankih slojeva.

Vickersova metoda koristi se za mjerenje od najniže do najviše tvrdoće, a potrebna je fino brušena ili polirana površina za ispitivanje. Uz iznos tvrdoće navodi se sila i vrijeme utiskivanja npr.: 210 HV30/20, što znači da je tvrdoća iznosila 210 HV, sila utiskivanja 30 kp (296 N) i vrijeme utiskivanja 20 s. [6, 18]

9.4. Rockwell-ova metoda

Kod ove metode kao penetrator koristi se dijamantni stožac (engl. "cone" - *HRC metoda*) s vršnim kutem od 120° ili kuglica od kaljenog čelika (engl. "ball" - *HRB metoda*), a koristi se za mjerenje tvrdoće samo metalnih materijala.

Kod Rockwellove metode, za razliku od Brinellove i Vickersove, mjeri se dubina prodiranja penetratora, a ne veličina otiska.



Slika 26 – Slika penetratora i otisak kod Vickersove metode [20]

Tvrdoća se po HRC metodi mjeri na slijedeći način:

1. U položaju 1 penetrator se predopterećuje silom $F_0=98$ N što za posljedicu ima prodiranje penetratora ispod površine uzorka (dubina h_0) i time se izbjegava utjecaj neravnina na rezultat određivanja tvrdoće. Tom prilikom instrument pokaže neku vrijednost, ali se kazaljka ponovno vrati na nulu.
2. Nakon predopterećenja, slijedi glavno opterećenje od 883 N za kuglicu, a 1373 N za dijamantni stožac, pa je za:

$$HRB... F_0 + F_1 = 98 + 883 = 981 \text{ N}$$

$$HRC... F_0 + F_1 = 98 + 1373 = 1471 \text{ N}$$

Penetrator tada prodire na dubinu h_1 .

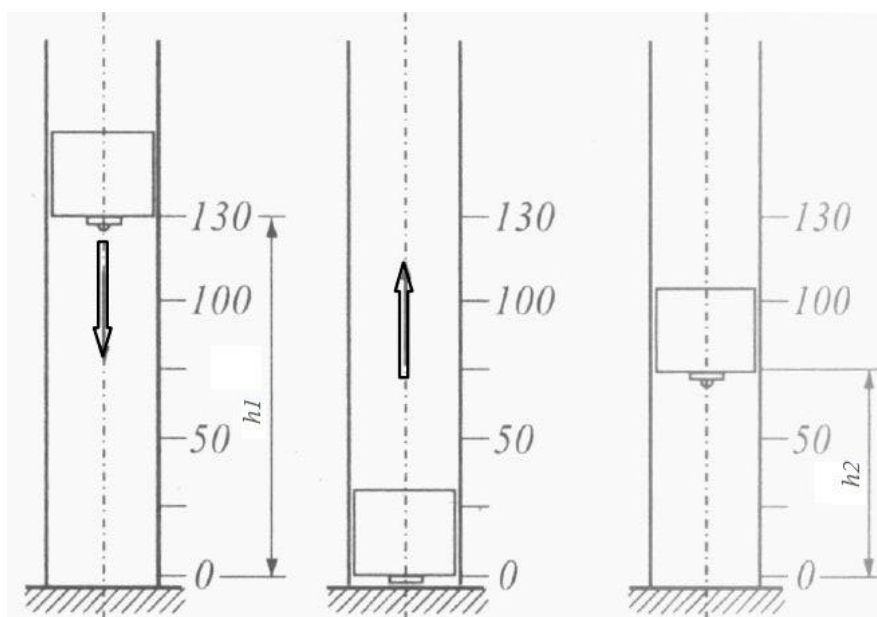
3. Nakon smirivanja kazaljke, slijedi rasterećenje glavnog opterećenja, pa ostaje samo predopterećenje ($F_0=98$ N). Penetrator se uslijed elastičnosti materijala vrati u položaj h_2 i ova dubina predstavlja tvrdoću, tj. u ovom položaju se očitava tvrdoća na skali tvrdomjera.

Čelična kaljena kuglica najviše se upotrebljava za ispitivanje nekaljenih čelika, mjedi, bronce i slično. Prije ispitivanja, etalomom poznate tvrdoće uvijek je potrebno provjeriti ispravnost uređaja. Skala ima dvije podjele i to za HRB postupak, od 0 do 130, koja je crvene boje (B) i za postupak HRC, od 0 do 100, koja je crne boje (C). Svaka crtica na skali nosi pomak penetratora u dubinu materijala od 0,002 mm. Moderniji uređaji imaju digitalnu skalu. Uvijek se izvedu dva do tri otiska i izračuna srednja vrijednost tvrdoće. Minimalna debljina materijala koji se ispituje mora pri tome biti $8h$, pri čemu je h dubina otiska.

U praksi je mjerno područje od 20 do 70 HRC, a budući da je ova metoda zadovoljavajuće precizna i vrlo brza, koristi se u pogonima za serijsku proizvodnju za mjerenje tvrdoće na toplinski obrađenim čelicima. [6, 18]

9.5. Shore-ova metoda

Prethodni postupci ispitivanja tvrdoće oštećuju površinu ispitivanog materijala. Kod ovog postupka nema oštećenja, jer se za mjerenje tvrdoće koristi visina odskoka malog batića. Shematski to prikazuje *slika 27*. Kod ove metoda vrijednosti tvrdoće određuje se posredno preko ispitivanja elastičnih svojstava površine materijala. Pošto se moduli elastičnosti različitih materijala znatno razlikuju, mogu se uspoređivati tvrdoće samo istih materijala.



Slika 27 – Princip ispitivanja tvrdoće po Shoreu [21]

Pri mjerenju tvrdoće po Shoreu (*HS*) postoji nekoliko varijanti mjerenja u dinamičkim i statičkim uvjetima. Za ispitivanje metalnih materijala koriste se metode Shore C i D, a uređaj za ispitivanje naziva se "Skleroskop".

Skleroskop se sastoji od staklene cijevi na kojoj je ucrtana baždarena skala od 0 do 140 skleroskopskih podjela. U cijevi se nalazi čelični batić mase oko 2,5 grama koji okomito s visine h_1 slobodno pada na površinu epruvete.

Nakon kontakta sa ispitivanom površinom, batić se odbije na visinu h_2 , ovisno o tvrdoći materijala. Očita se vrijednost h_2 , a te se vrijednosti nanose na apscisu dijagrama tvrdoće i projekcijom na ordinati očita se tvrdoća po Vickersu.

Metoda je vrlo jednostavna, ali i dosta neprecizna. Svaki aparat i grupa materijala sličnih svojstava za koje se aparat upotrebljava, imaju pripadajući dijagram tvrdoće. Svaki skleroskop ima etalon za provjeru točnosti pokazivanja uređaja (± 2 jedinice HS).

Metoda nije naročito precizna. Postupak treba više puta ponoviti i konačni rezultat izračunati kao srednju vrijednost. Unatoč tome, u nekim proizvodnjama je gotovo nezamjenjiva (na primjer kod ispitivanja tvrdoće kuglica za kuglične ležajeve). [6]

10. UTVRĐIVANJE KEMIJSKOG SASTAVA MATERIJALA

10.1. *Općenito o kemijskoj analizi*

Kemijska analiza je skup operacija kojima se nekoj tvari određuje kemijski sastav. Kemijska analiza može biti kvalitativna i kvantitativna. Kvalitativnom analizom određuju se sastojci od kojih se sastoji neka tvar, a kvantitativnom analizom određuje se u kojoj se količini ili u kojem se međusobnom omjeru nalaze pojedini sastavni dijelovi u nekoj tvari. Kvalitativna i kvantitativna kemijska analiza usko su povezane, jer se bez poznavanja kvalitativnog sastava uzorka ne može provesti ispravna kvantitativna analiza.

Kvantitativne metode mogu se podijeliti na:

- apsolutne (kemijske ili klasične) i
- usporedbene (fizikalne ili instrumentalne).

Apsolutne (kemijske ili klasične) metode zasnivaju se uglavnom na kemijskim reakcijama u vodenim otopinama. Posljednjih 40-50 godina razvijene su nove komparativne ili usporedbene (fizikalne ili instrumentalne) metode analize, koje su jako pogodne za brzo ispitivanje različitih uzoraka.

Usporedbene (fizikalne ili instrumentalne) metode su one u kojima se koncentracija analita u uzorku tvari određuje usporedbom s poznatim standardom. U njima se instrumentom određuje neko fizikalno svojstvo analita u uzorku tvari. To svojstvo mora se na poznat i ponovljivi način mijenjati s koncentracijom analita.

[22]

10.2. *Provođenje kvantitativne analize*

Tipična kvantitativna analiza provodi se u sljedećem nizu stupnjeva:

- izbor analitičke metode,
- uzorkovanje,
- priprema laboratorijskog uzorka,
- uklanjanje interferencija,
- baždarenje (umjeravanje) i završno mjerenje,
- izračunavanje rezultata.

10.2.1. *Izbor analitičke metode*

Analiza realnog uzorka za kemičare je izazov koji zahtijeva znanje, intuiciju i iskustvo. Razvijanje postupaka analize realnih uzoraka nije jednostavno, čak ni za iskusne kemičare, a izbor metode zahtijeva dobru prosudbu i temeljito znanje o prednostima i ograničenjima raspoloživih analitičkih metoda. Također, ne može se propisati način na koji će se izabrati analitička metoda, jer ne postoji jedna jednostavna, najbolja metoda koja bi se mogla primijeniti za sve analize. Na početku analize treba jasno definirati što se analizom želi postići.

10.2.2. Uzrokovanje

U kemijskoj analizi radi se o ispitivanju neke određene, manje količine tvari. Najčešće treba analizirati neku sirovinu ili proizvod, koji se nalazi u velikim količinama na skladištu, u transportu i sl. U ovom slučaju govorimo o krutim uzorcima. Uzorak mora biti reprezentativan, tj. mora imati jednaki kemijski sastav kao i čitava količina materijala, a na temelju rezultata analize procjenjuje se vrijednost čitave količine tvari. Postupak kojim se dobiva reprezentativni dio ispitivane tvari naziva se uzrokovanje, a ovaj korak u analizi je najvažniji i vrlo često i najteži.

10.2.3. Priprema laboratorijskog uzorka

Prije analize, uzorak se gotovo uvijek mora prevesti u oblik pogodan za analizu. To se postiže otapanjem ili nekom drugom razgradnjom, kao npr. taljenjem ili spaljivanjem uzorka.

10.2.4. Uklanjanje interferencija

Interferencije se pojavljuju u kemijskoj analizi uvijek kada matrica uzorka sadrži vrstu koja ili proizvodi signal koji se ne razlikuje od signala analita ili na neki drugi način utječe na signal analita. Tek su neka analitička mjerenja potpuno specifična, a time ne podliježu interferencijama. Slijedom toga, važan korak u većini analiza je onaj kojime se uklanjaju kemijske vrste koje interferiraju (smetaju).

10.2.5. Baždarenje (umjeravanje, kalibracija) i završno mjerenje

Baždarenje je postupak usporedbe mjernog sustava sa standardnim sustavom, a provodi se jedino kod usporedbenih metoda. Svrha baždarenja je ukloniti ili minimizirati pogrešku mjernog sustava. Za baždarenje se upotrebljavaju referentni materijali poznatog kemijskog sastava.

Nakon baždarenja slijedi završno mjerenje koncentracije analita u uzorku.

10.2.6. Izračunavanje rezultata

Izračunavanje koncentracije analita iz eksperimentalnih podataka uglavnom je jednostavan i lagan posao, posebice uporabom osobnih računala. Takva računanja temelje se na eksperimentalnim podacima skupljenim pri završnom mjerenju.

10.2.7. Pogreške u kemijskoj analizi

Nemoguće je izvesti kemijsku analizu tako da rezultat bude potpuno bez pogrešaka ili neodređenosti. Cilj je pogreške držati na podnošljivoj razini ili njihovu veličinu procijeniti s prihvatljivom točnošću.

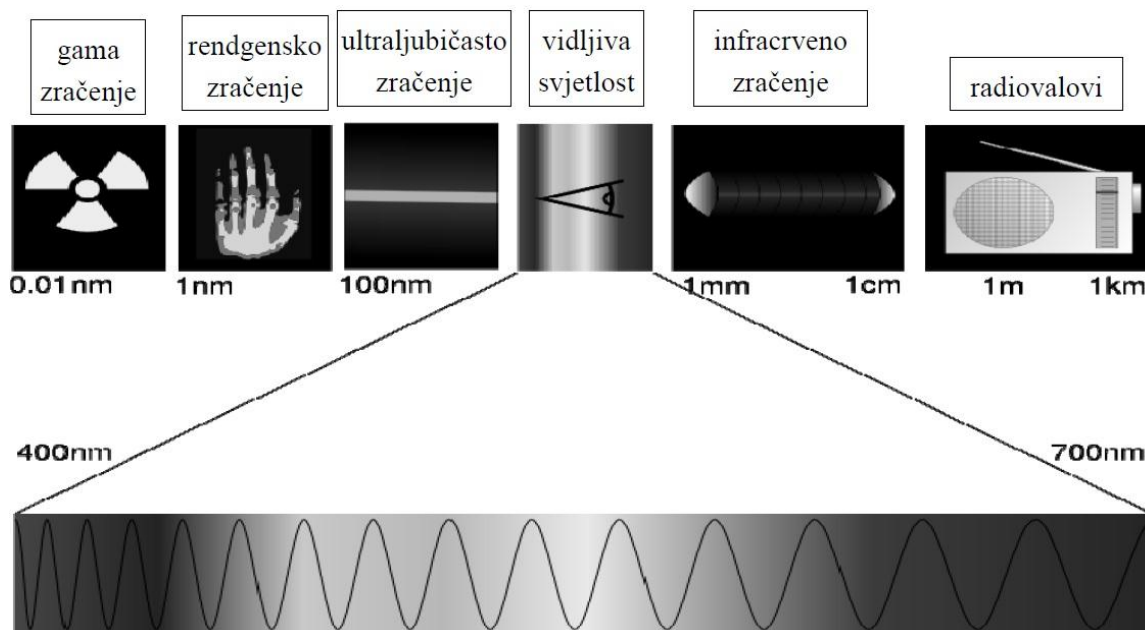
[22]

10.3. Spektroskopske metode

Izraz spektroskopija s povijesnog gledišta odnosi se na granu znanosti koja se bavila svjetlošću (tj. vidljivim zračenjem: od približno 380 nm do 780 nm), razlučenom u komponente, valne duljine, koje tvore spektar. Tijekom vremena značenje spektroskopije se proširilo, uz proučavanje svjetlosti uključujući i druge vrste elektromagnetskog zračenja kao što su X-zrake, zatim ultraljubičasto, infracrveno, mikrovalno i radiofrekvencijsko zračenje.

Spektar elektromagnetskog zračenja se dijeli na više dijelova (*Slika 28*). Podjela ovisi i o znanosti koja koristi spektar. Općenita podjela je na:

- gama zračenje,
- rendgensko zračenje,
- ultraljubičasto zračenje,
- vidljivu svjetlost,
- infracrveno zračenje,
- mikrovalno zračenje i
- radiovalove.



Slika 28 – Spektar elektromagnetskog zračenja [22]

Atomska spektroskopija temeljena je na ultraljubičastom i vidljivom zračenju. Prednosti ovih metoda su brzina, prikladnost, uglavnom visoka selektivnost te umjerene cijene instrumenata. Prvi korak svih atomskih spektroskopskih postupaka je *atomizacija*, proces kojim se uzorak isparava i razgrađuje uz nastajanje atomske pare. To znači da je atomizacija najkritičniji korak u atomskoj spektroskopiji.

Plamena atomska apsorpcijska spektroskopija je trenutno zbog svoje jednostavnosti, učinkovitosti i relativno niskih cijena, najčešće primjenjivana od svih atomskih metoda. Pod uobičajenim uvjetima, relativna pogreška s plamenom apsorpcijskom analizom iznosi 1 do 2%. Uz posebne mjere opreza taj se broj može smanjiti na nekoliko desetinki postotka. [22]

11. POSTAVKA ZADATKA

U teoretskom dijelu rada objašnjen je postupak dobivanja čelika, te kako legiranjem različitim elementima možemo utjecati na mehanička svojstva. Također su opisana svojstva i njihovo ispitivanje.

U eksperimentalnom dijelu rada odabrane su tri različite vrste čelika:

- Č4141,
- Č4570 i
- Č4230.

Iz navedenih materijala biti će izrađeni ispitni uzorci, te će se provesti:

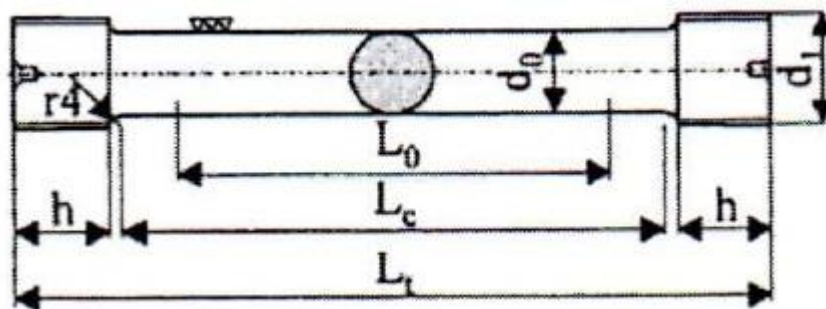
- ispitivanje vlačne čvrstoće,
- ispitivanje udarnog rada loma,
- mjerenje tvrdoće,
- ispitivanje kemijskog sastava.

Izabrane su tri različite vrste legiranih čelika, a ovim ispitivanjem se htjelo pokazati kakvih su svojstava ispitani uzorci, koje su razlike među njima, te koliko se ispitane vrijednosti podudaraju sa propisanim vrijednostima za pojedini materijal.

12. EKSPERIMENTALNI DIO

12.1. Izrada uzoraka za statički vlačni pokus

Za ispitivanje vlačne čvrstoće korištena je okrugla epruveta oblika B s navojnim glavama (slika 29). Dimenzije epruvete prikazane su u tablici 3.



Slika 29 – Epruveta oblika B s navojnim glavama [6]

- d_0 – promjer epruvete [mm]
- d_1 – metrički navoj – ISO
- h – visina glave epruvete [mm]
- L_0 – početna mjerna duljina epruvete ($L_0 = 5 d_0$) [mm]
- L_c – ispitna duljina epruvete ($L_c \geq L_0 + d_0$) [mm]
- L_t – ukupna duljina epruvete [mm]

Tablica 3 – Dimenzije vlačne epruvete oblika B

d_0	L_0	d_1	h min	L_c min	L_t min
8	40	M12	10	48	75

Za svaki materijal izrađeno je po 5 epruveta, koje su označena brojčanim simbolima prikazanim na slikama 30, 31 i 32.

Slika 30 prikazuje epruvete za statički vlačni pokus iz materijala Č4141. Epruvete su označene na slijedeći način:

- epruveta 1: 11,
- epruveta 2: 12,
- epruveta 3: 13,
- epruveta 4: 14,
- epruveta 5: 15.



Slika 30 – Epruvete iz materijala Č4141

Slika 31 prikazuje epruvete za statički vlačni pokus iz materijala Č4570. Epruvete su označene na slijedeći način:

- epruveta 1: 21,
- epruveta 2: 22,
- epruveta 3: 23,
- epruveta 4: 24,
- epruveta 5: 25.



Slika 31 – Epruvete iz materijala Č4570

Slika 32 prikazuje epruvete za statički vlačni pokus iz materijala Č4230. Epruvete su označene na slijedeći način:

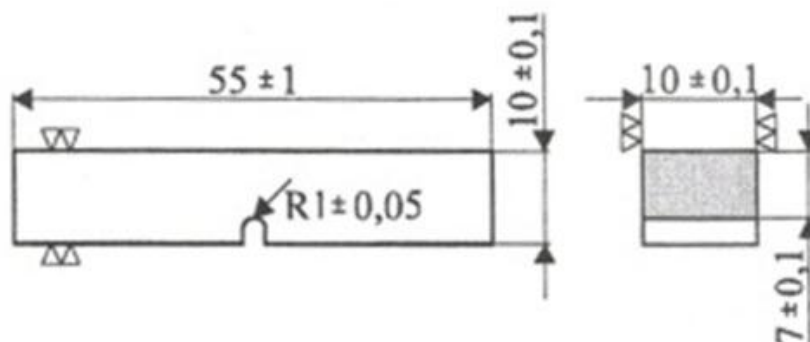
- epruveta 1: 31,
- epruveta 2: 32,
- epruveta 3: 33,
- epruveta 4: 34,
- epruveta 5: 35.



Slika 32 – Epruvete iz materijala Č4230

12.2. Izrada uzoraka za udarni rad loma i ispitivanje tvrdoće

Zbog ograničenih dimenzija raspoloživog materijala, za udarni rad loma korištene su DVMK epruvete prikazane na slici 33. Ista epruveta korištena je i za ispitivanje tvrdoće.



Slika 33 – DVMK epruveta [16]

Za svaki materijal izrađeno je po 3 epruvete, koje su označena brojevnim simbolima prikazanim na slikama 34, 35 i 36.

Slika 34 prikazuje epruvete za udarni rad loma iz materijala Č4141. Epruvete su označene na sljedeći način:

- epruveta 1: 11,
- epruveta 2: 12,
- epruveta 3: 13.



Slika 34 – Epruvete iz materijala Č4141

Slika 35 prikazuje epruvete za udarni rad loma iz materijala Č4570. Epruvete su označene na sljedeći način:

- epruveta 1: 21,
- epruveta 2: 22,
- epruveta 3: 23.



Slika 35 – Epruvete iz materijala Č4570

Slika 36 prikazuje epruvete za udarni rad loma iz materijala Č4230. Epruvete su označene na sljedeći način:

- epruveta 1: 31,
- epruveta 2: 32,
- epruveta 3: 33.



Slika 36 – Epruvete iz materijala Č4230

12.3. Specifikacije materijala korištenih na ispitivanju

12.3.1. Č4141 (EN oznaka – 115CrV3)

Č4141 spada u grupu legiranih specijalnih alatnih čelika. Iz osnovne oznake vidljivo je da se radi o jednostruko legiranom alatnom čeliku, a najutjecajniji legirni element je krom (4=Cr).

U praksi se ovi čelici primjenjuju kod izrade alata za rad u hladnom stanju:

- spiralna svrdla (manjih promjera, zubarska svrdla),
- ureznici i nareznici,
- razvrtači,
- upuštači,
- probijači,
- pile za metal,
- rotacijske turpije...

Kemijski sastav materijala prikazan je u *tablici 4*:

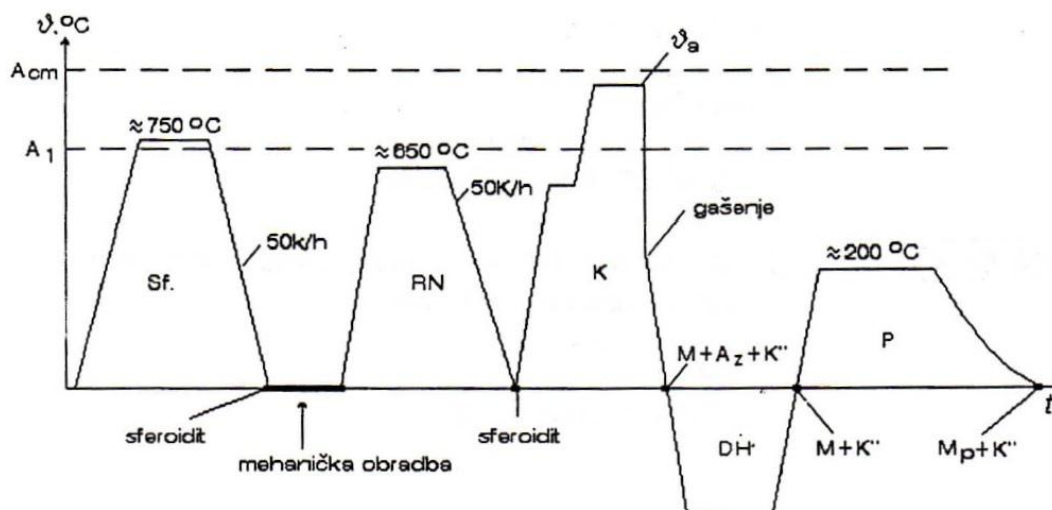
Tablica 4 – Kemijski sastav materijala Č4141

C	Si	Mn	P	S	Cr	V
0,10-1,25	0,15-0,30	0,20-0,40	0,03	0,03	0,50-0,80	0,07-0,12

Osnovni podaci o obradi:

- žarenje (sferoidizacija 720-760°C),
- gruba obrada,
- redukcija napetosti (600°C),
- fina obrada,
- predgrijavanje (550°C),
- austenitizacija (780 -820°C),
- gašenje (voda, ulje),
- duboko hlađenje (-196°C),
- popuštanje (150-250°C),
- završna obrada (brušenje, poliranje...).

Optimalna struktura za obradu ovih alatnih čelika je sitni sferoidit (sitne globulirane karbidne čestice u feritnoj masi), te kako je to ujedno i optimalna polazna struktura za toplinsku obradu, to treba zahtijevati upravo takvo dobavno stanje materijala. Žarenjem pri 750°C te hlađenjem brzinom oko 50 K/h postiže se upravo takvo stanje, a tvrdoća u tom slučaju je oko 210 HB. Čelici ove grupe kaljivi su u vodi, no dimenzije ispod $\varnothing 25\text{mm}$ mogu se kaliti u ulju. Osrednje su osjetljivi na razugličenje, pa ih treba zaštititi, posebno ako se radi o većim dimenzijama alata. Kod gašenja su također osrednje dimenzijski stabilni. Kod popuštanja se pojavljuje nepovratna niskotemperaturna krhkost, pa se prije popuštanja obično duboko hladi (najsigurnije na -196°C) da se eliminira zaostali austenit. Potpuni ciklus uobičajene toplinske obrade za niskolegirane Cr – čelike prikazan je na *slici 37*. [23]



Slika 37 – Potpuni ciklus uobičajene toplinske obrade niskolegiranih Cr – čelika [23]

12.3.2. Č4570 (EN oznaka – X17CrNi16-2)

Č4570 spada u grupu legiranih specijalnih nehrđajućih čelika. Iz osnovne oznake vidljivo je da su najutjecajniji legirni elementi krom (4 = Cr) i nikal (5 = Ni), te da je materijal kemijski postojan (70). Najčešće se upotrebljava tamo gdje 12% kromni čelik ne predstavlja dovoljnu korozivnu zaštitu ili kada žilavost 12% matenzitnog nehrđajućeg čelika nije dovoljna. Otpornost na koroziju je dobra, a ovisna je i o stanju površine tj. polirana površina pokazuje daleko veću korozivnu otpornost od grube i neobrađene površine istog materijala. Posebno je otporan na morsku vodu i oksidirajuće kiseline. Materijal je toplinski obradiv i zavarljiv. Obradivost ove vrste nehrđajućih čelika direktno je u vezi sa njegovom tvrdoćom, a obrađuje se slično ugljičnom čeliku iste tvrdoće koji je puno češći u praksi.

Kemijski sastav materijala prikazan je u tablici 5:

Tablica 5 – Kemijski sastav materijala Č4570

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,12-0,22	1,00	1,50	0,04	0,02	15,50-17,00	1,50-2,50

U praksi se ovi čelici najčešće primjenjuju u :

- autoindustriji,
- kemijskoj industriji,
- avioindustriji,
- petrokemijskoj industriji,
- strojarstvu (propeleri brodova, dijelovi pumpa, turbinske osovine, ventili...).

12.3.3. Č4230 (EN oznaka – 67SiCr5)

Č4230 spada u grupu specijalnih legiranih opružnih čelika. Iz osnovne oznake vidljivo je da su najutjecajniji legirni elementi krom (4 = Cr) i silicij (2 = Si), te da je materijal namijenjen za toplinsku obradu (30).

Opruge su posebni strojni dijelovi, koji imaju specijalna mehanička svojstva. Materijal za opruge mora biti podložen elastičnoj deformaciji, mora biti otporan na udarce i na naizmjenična opterećenja. Čelici za opruge spadaju u grupu konstrukcijskih čelika, koji su naročito pogodni za hladnu i termičku obradu, čime se postižu najbolji rezultati.

Materijal za opruge može biti različitog oblika, od vruće i hladno valjanih traka do vučenih žica, šipki, čelika plosnatog oblika i raznih profila.

Ovi čelici imaju dobru temperaturnu postojanost i otporni su na trošenje, pa se osim za izradu opruga upotrebljavaju i za izradu torzijskih vratila, ventila, steznih čahura, smicnih noževa, itd.

Kemijski sastav materijala prikazan je u *tablici 6*:

Tablica 6 – Kemijski sastav materijala Č4230

C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
0,68-0,77	0,90-1,10	0,40-0,60	max 0,025	0,01-0,03	0,60-0,80	

Od čelika za opruge osobito se traži:

- da ima što veću granicu razvlačenja i da je područje plastične deformacije što veće,
- da prilikom prerade ima što veću sposobnost plastične deformacije, koja se ogleda u visokom izduženju i kontrakciji,
- da ima visoku trajnu čvrstoću kod dinamičkih opterećenja.

Na osobine čelika za opruge ne utječe samo kemijski sastav, nego u velikoj mjeri način prerade i toplinska obrada. Konkretno u praksi, materija Č4230 koristi se za:

- zavojne opruge napregnute na udar,
- torzijske opruge,
- opruge ventila.

[24]

13. OPREMA ZA ISPITIVANJE

13.1. Univerzalna kidalica

U laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu na univerzalnoj hidrauličkoj kidalici Tip U-60 (Otto Wolpert Werke) (slika 38) provedeno je statičko vlačno ispitivanje. Kidalica ima mjerno područje:

- 0 – 60 kN,
- 0 – 120 kN,
- 0 – 300 kN,
- 0 – 600 kN.



Slika 38 – Univerzalna hidraulička kidalica Tip U-60

Mjerni uređaj mehaničkim putem bilježi dijagrama naprezanja $F - \Delta L$ (sila–apsolutno produljenje) na milimetarskom papiru, koji je namotan oko valjka kojega pak pokreće pokretni most kidalice.

13.2. Charpyev bat

Na uređaju Amsler Otto Woplpert Werke GMBH (slika 39), izvršeno je ispitivanje udarnog rada loma. Mjerni uređaj ima mjerno područje:

- 0 – 150 J,
- 0 – 300 J.



Slika 39 – Charpyev bat

13.3. Tvrdomjer

Na tvrdomjeru Vickers – Brinell "Fritz Heckert" (slika 40) izvršeno je ispitivanje tvrdoće u brinelima na ispitnim uzorcima.



Slika 40 – Tvrdomjer "Fritz Hecket"

Brinellovom metodom s kuglicom od kaljenog čelika smiju se mjeriti tvrdoće do 450 HB. Kod viših tvrdoća došlo bi do oštećenja penetratora, stoga se za takove tvrdoće mora koristiti kuglica izrađena od tvrdog metala (HBW).

13.4. Uređaj za kemijsku analizu metala

Utvrdjivanje kemijskog sastava izvršeno je na spektrometru *PolySpek* prikazanom na slici 41. Nakon što se odradi standardizacija uređaja, slijedi ispitivanje uzorka. Na zaslonu računala prikazuje se napredak spaljivanja, počevši od ispiranja argonom pa do samog spaljivanja uzorka. Na kraju mjerenja ispisuju se rezultati, a potrebno je napraviti i drugo mjerenje kako bi potvrdili analizu uzorka. Primjer rezultata ispitivanja prikazan je na slici 42.



Slika 41 – Uređaj za kemijsku analizu metala "PolySpek"

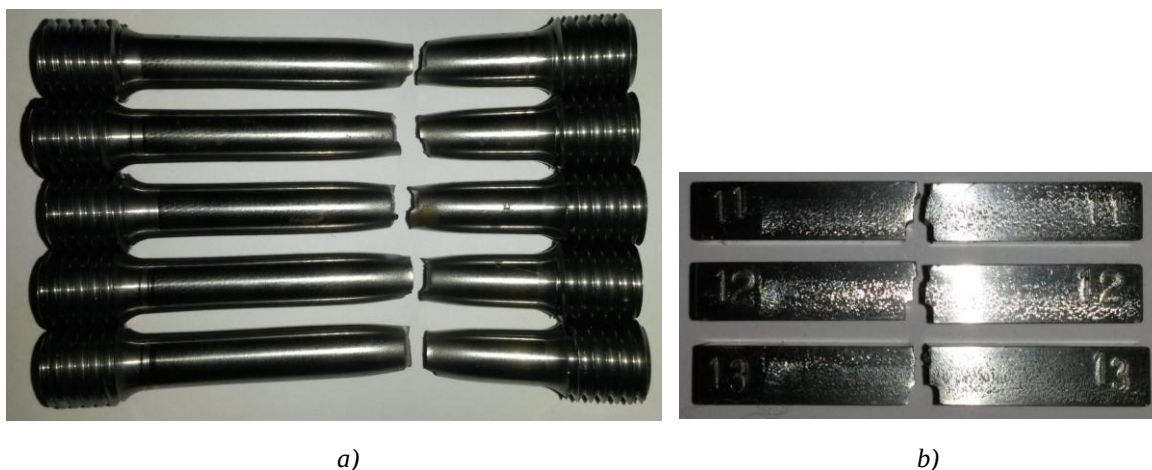
PolySpek Ready for Analysis													
Id / Spk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg	SD	RSD
Fe	95.86	95.85									95.85	0.0035	0.0036
C	0.932	0.935									0.933	0.0024	0.2543
Si	0.601	0.597									0.599	0.0026	0.4411
Mn	1.10	1.10									1.10	0.0003	0.0282
P	0.031	0.031									0.031	0.0007	2.1266
S	0.006	0.006									0.006	0.0003	5.7835
Cr	0.154	0.153									0.154	0.0006	0.3617
Mo	0.492	0.491									0.491	0.0002	0.0474
Ni	0.035	0.035									0.035	0.0002	0.5821
Al	0.078	0.078									0.078	0.0003	0.3464
B	<0.001	<0.001									<0.001	0.0001	25.640
Co	<0.001	<0.001									<0.001	0.0000	0
Cu	0.102	0.102									0.102	0.0001	0.0515

Slika 42 – Primjer prikaza rezultata kemijske analize

14. REZULTATI ISPITIVANJA

14.1. Rezultati ispitivanja materijala Č4141

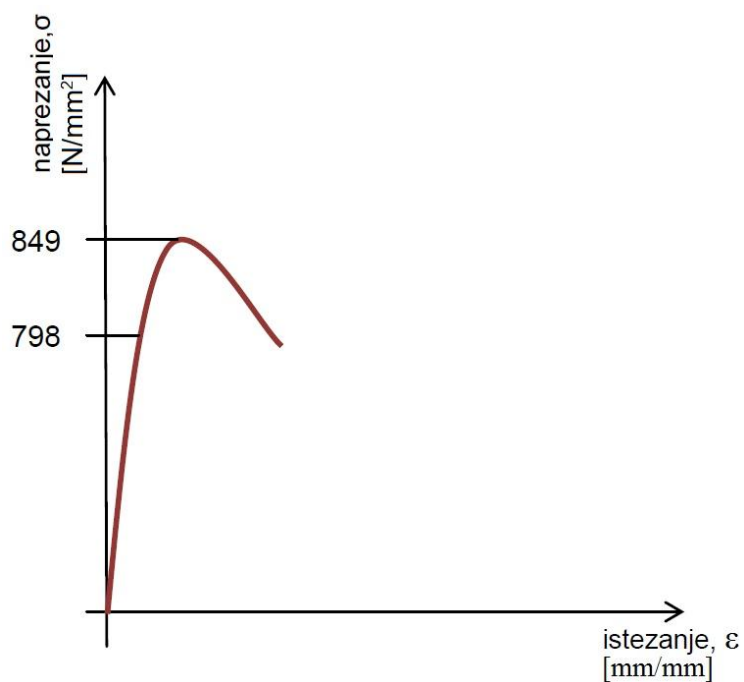
Na slici 43 a i b prikizani su uzorci iz materijala Č4141 nakon ispitivanja. Ispitivani materijal bio je u žarenom stanju. U tablici 7, 8 i 9 prikazani su rezultati za statički vlačni pokus, udarni rad loma te za kemijski sastav. Slika 44 prikazuje dijagram naprezanje – istezanje za Č4141.



Slika 43 – Uzorci iz materijala Č4141 nakon: a) statičkog vlačnog pokusa b) udarnog rada loma

Tablica 7 – Rezultati statičkog vlačnog pokusa za materijal Č4141

Oznaka epruvete	Dimenzije epruvete	Granica razvlačenja Re [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²]	Izduženje A [%]	kontrakcija Z [%]
Epruveta 1-1	ø8	736	845	12,55	36
Epruveta 1-2	ø8	806	845	11,8	33,78
Epruveta 1-3	ø8	796	845	12,5	33,57
Epruveta 1-4	ø8	826	855	8,87	12,36
Epruveta 1-5	ø8	826	855	13,62	37,99
Prosječna vrijednost		798	849	11,87	30,74



Slika 44 – Dijagram naprezanje – istezanje za Č4141

Tablica 8 – Rezultati udarnog rada loma i tvrdoće za materijal Č4141

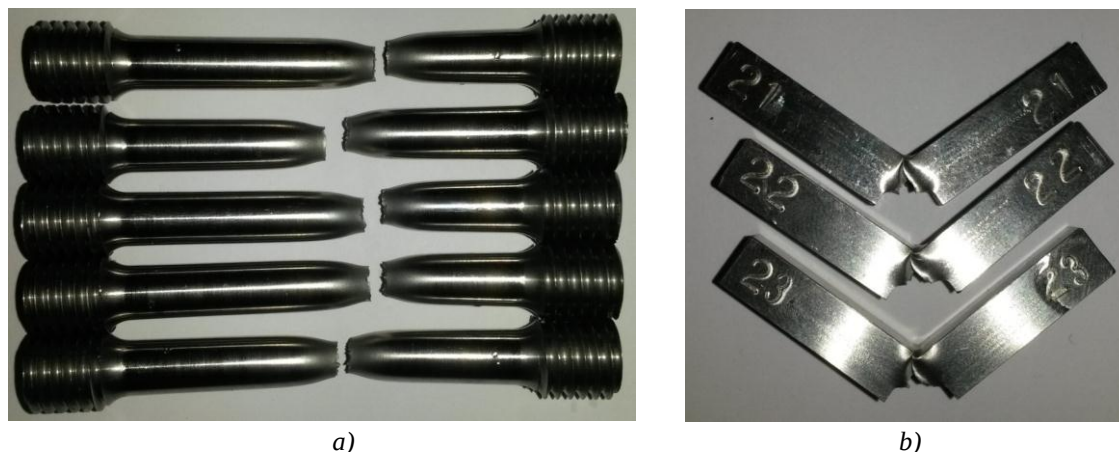
Oznaka epruvete	Dimenzije epruvete	Udarni rad loma KU [J] 20°C	Tvrdoća HB
Epruveta 1-1	DVMK	4	257,6
Epruveta 1-2	DVMK	4	254,8
Epruveta 1-3	DVMK	3	256,2
Prosječna vrijednost		3,67	256,20

Tablica 9 – Rezultati kemijske analize za materijal Č4141

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
Propisane vrijednosti	0,10-1,25	0,15-0,30	0,20-0,40	0,03	0,03	0,50-0,80	0,07-0,12
Vrijednosti dobivene kemijskom analizom	1,44	0,306	0,298	0,002	0,010	0,525	0,103

14.2. Rezultati ispitivanja materijala Č4570

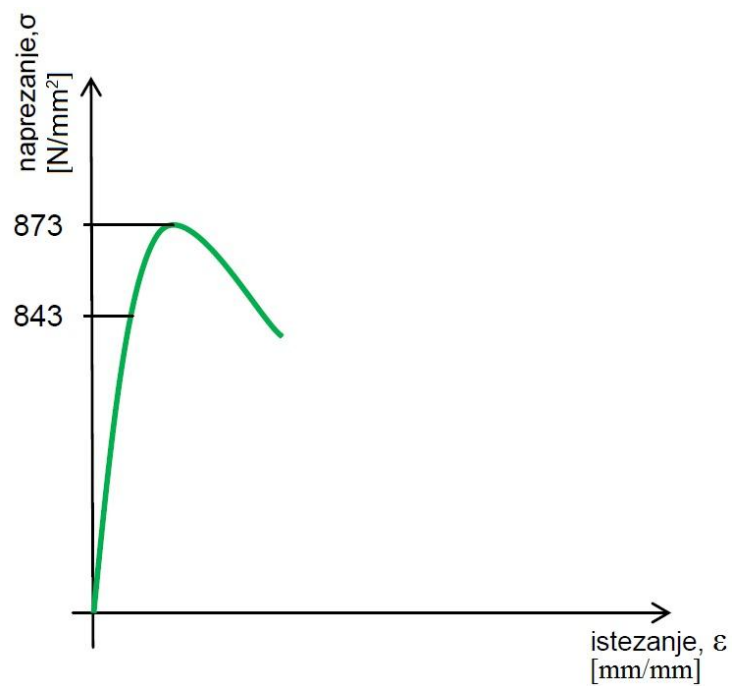
Na slici 45 a i b prikazani su uzorci iz materijala Č4570 nakon ispitivanja. Ispitivani materijal bio je u žarenom stanju. U tablici 10, 11 i 12 prikazani su rezultati za statički vlačni pokus, udarni rad loma te za kemijski sastav. Slika 46 prikazuje dijagram naprezanje – istezanje za Č4570.



Slika 45 – Uzorci iz materijala Č4570 nakon: a) statičkog vlačnog pokusa b) udarnog rada loma

Tablica 10 – Rezultati statičkog vlačnog pokusa za materijal Č4570

Oznaka epruvete	Dimenzije epruvete	Granica razvlačenja Re [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²]	Izduženje A [%]	kontrakcija Z [%]
Epruveta 2-1	ø8	835	875	14,1	56,6
Epruveta 2-2	ø8	845	875	15,45	56,44
Epruveta 2-3	ø8	855	875	11,65	54,61
Epruveta 2-4	ø8	835	875	13,6	56,94
Epruveta 2-5	ø8	845	865	11	56,78
Prosječna vrijednost		843	873	13,16	56,27



Slika 46 – Dijagram naprezanje – istezanje za Č4570

Tablica 11 – Rezultati udarnog rada loma i tvrdoće za materijal Č4570

Oznaka epruvete	Dimenzije epruvete	Udarni rad loma KU [J] 20°C	Tvrdoća HB
Epruveta 2-1	DVMK	17	252
Epruveta 2-2	DVMK	16	263,4
Epruveta 2-3	DVMK	17	254,8
Prosječna vrijednost		16,67	256,73

Tablica 12 – Rezultati kemijske analize za materijal Č4570

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Propisane vrijednosti	0,12-0,22	1,00	1,50	0,04	0,03	15,0-17,0	1,50-2,50
Vrijednosti dobivene kemijskom analizom	0,289	0,444	0,682	0,013	0,030	15,170	< 5,00

14.3. Rezultati ispitivanja materijala Č4230

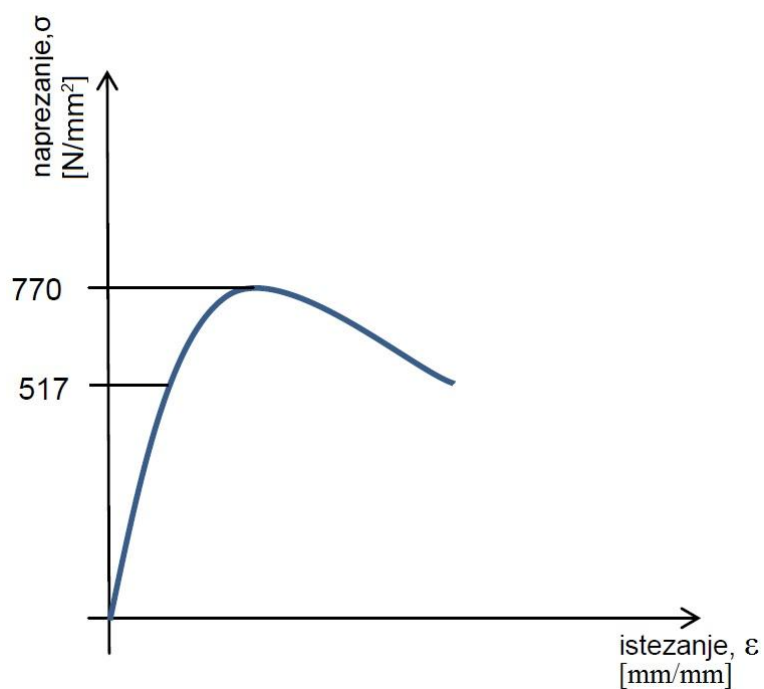
Na slici 47 a i b prikazani su uzorci iz materijala Č4230 nakon ispitivanja. Ispitivani materijal bio je u žarenom stanju. U tablici 13, 14 i 15 prikazani su rezultati za statički vlačni pokus, udarni rad loma te za kemijski sastav. Slika 48 prikazuje dijagram naprezanje – istezanje za Č4230.



Slika 47 – Uzorci iz materijala Č4230 nakon: a) statičkog vlačnog pokusa b) udarnog rada loma

Tablica 13 – Rezultati statičkog vlačnog pokusa za materijal Č4230

Oznaka epruvete	Dimenzije epruvete	Granica razvlačenja R_e [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća R_m [N/mm ²]	Izduženje A [%]	kontrakcija Z [%]
Epruveta 3-1	Ø8	557	766	23,37	44,12
Epruveta 3-2	Ø8	527	776	23,15	44,68
Epruveta 3-3	Ø8	507	766	21,32	43,19
Epruveta 3-4	Ø8	477	766	18,72	45,06
Epruveta 3-5	Ø8	517	776	22,62	46,17
Prosječna vrijednost		517	770	21,84	44,64



Slika 48 – Dijagram naprežanje – istezanje za Č4230

Tablica 14 – Rezultati udarnog rada loma i tvrdoće za materijal Č4230

Oznaka epruvete	Dimenzije epruvete	Udarni rad loma KU [J] 20°C	Tvrdoća HB
Epruveta 3-1	DVMK	8	223,1
Epruveta 3-2	DVMK	9	223,1
Epruveta 3-3	DVMK	9	221,9
Prosječna vrijednost		8,67	222,70

Tablica 15 – Rezultati kemijske analize za materijal Č4230

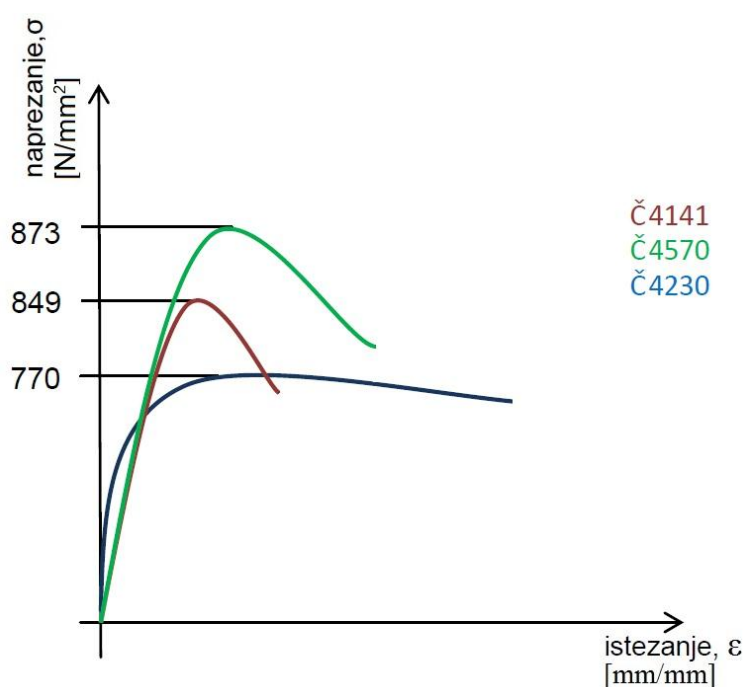
Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr
Propisane vrijednosti	0,68-0,77	0,90-1,10	0,40-0,60	max 0,025	0,01-0,03	0,60-0,80
Vrijednosti dobivene kemijskom analizom	0,78	1,261	0,438	0,026	0,018	< 8,00

15. ANALIZA REZULTATA

U tablici 16 prikazana je usporedba rezultata mehaničkih svojstava u statičkim i dinamičkim uvjetima. U tablici su izražene srednje vrijednosti, a svi materijali bili su u žarenom stanju. Slika 49 prikazuje usporedbu dijagrama naprezanje – istezanje sva tri materijala.

Tablica 16 – Usporedba rezultata ispitivanih materijala

Materijal	Granica razvlačenja Re [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²]	Izduženje A [%]	kontrakcija Z [%]	Udarni rad loma KU [J] 20°C
Č4141	798	849	11,87	30,74	3,67
Č4570	843	873	13,16	56,27	16,67
Č4230	517	770	21,84	44,64	8,67



Slika 49 – Dijagram naprezanje – istezanje – usporedba rezultata

Iz rezultata je vidljivo da je najveće izduženje kod materijala Č4230, a to i je glavna odlika opružnih čelika.

Najveću vrijednost vlačne čvrstoće očekivano pokazuje čelik Č4570

Kemijska analiza je uglavnom dala rezultate u zadanim okvirima za pojedini materijal. Malo je povećan udio ugljika kod Č4141, ali u ovom slučaju to ne utječe ni na toplinsku obradu, kao ni kasnije na mehanička svojstva poboljšanog materijala.

Kod čelika Č4570 uočena je nešto manja razina silicija i mangana, dok je kod Č4230 razina silicija iznad gornje granične vrijednosti i u ovom slučaju bi bilo potrebno napraviti analizu kako ovo odstupanje utječe na mehanička svojstva nakon toplinske obrade, te koja toplinska obrada bi dala najbolje rezultate, no to je tema za daljnja ispitivanja.

16. ZAKLJUČAK

Nakon provedenog ispitivanja materijala u žarenom stanju i usporedbom rezultata, možemo zaključiti da nema velikih odstupanja od propisanih vrijednosti. Neke manje nepravilnosti dobivene kod kemijske analize mogu se pripisati i greški u mjerenju, budući da je uređaj univerzalnog karaktera, a ispitni uzorci su, zbog nedostatka materijala, dimenzijski bili na donjoj granici ispitne mogućnosti uređaja.

Također, sva tri materijala na kojima je rađeno ispitivanje, u eksploataciji se koriste u poboljšanom stanju, tako da bi bilo potrebno napraviti dodatna ispitivanja kojim bi se utvrdilo koliko ta odstupanja utječu na toplinsku obradu i na mehanička svojstva u poboljšanom stanju.

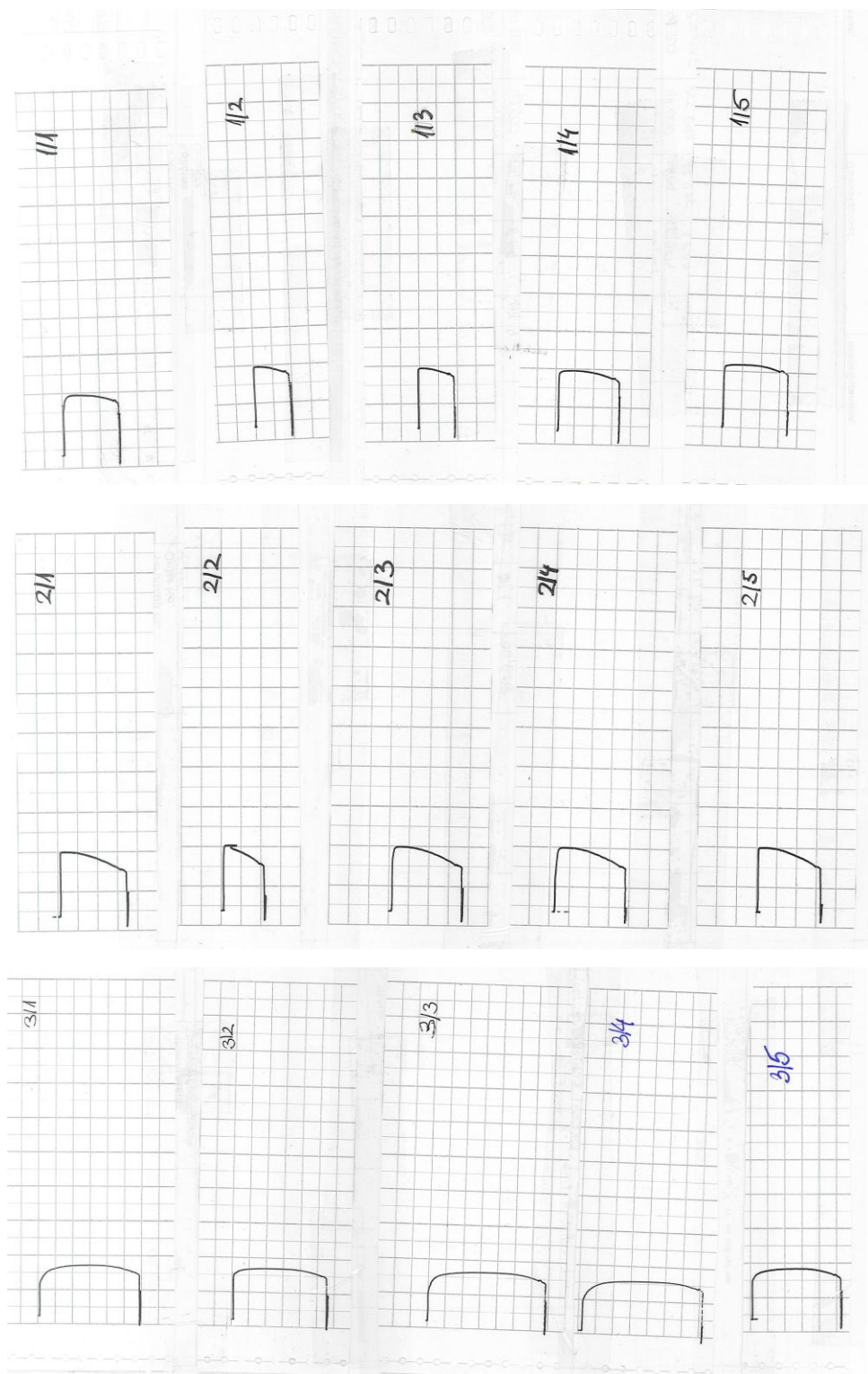
LITERATURA

1. http://old.riteh.hr/zav_katd_sluz/zm/pdf/mehanika_materijala/Povijest.pdf
2. M. Gojić – Metalurgija čelika – Metalurški fakultet, Sisak, 2005.
3. https://bs.wikipedia.org/wiki/Visoka_pe%C4%87
4. T.Filetin, F. Kovačiček, J. Indof – Svojstva i primjena materijala – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002
5. Dr. Sc. Stjepan Kožuh, doc – Specijalni čelici – skripta – Sveučilište u zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010
6. Nikola Sonički, – Mehanička svojstva materijala – Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2011.
7. <https://ironlady003.wordpress.com/2013/09/16/mehanicka-ispitivanja-materijala/>
8. http://liangong.en.alibaba.com/product/695624566-200650950/Packing_Belt_Pulling_Force_and_Elongation_Testing_Machine_Tensile_Tester.html
9. https://www.google.hr/search?q=univerzalna+kidalica&rlz=1C1GGGE_enHR561HR590&espv=2&biw=1920&bih=1099&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjgwbLpzfTLAhVLEJoKHVazAeEQ_AUIBigB#tbm=isch&q=elektromehani%C4%8Dka+kidalica&imgsrc=a99Xg08gLHleBM%3A
10. <http://home.ufam.edu.br/berti/nanomateriais/0495296023MaterialsEnginee.pdf>
11. Franz Mladen., Materijali I – 3. dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2009.
12. <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Vlacni%20pokus.pdf>
13. Prof. dr. sc. Ivica Kladarić – Materijali I, mehanička svojstva materijala, ispitivanje udarnje radnje loma – skripta – Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
14. <https://bsclarified.wordpress.com/2012/04/12/why-the-rms-titanic-fractured-clues-from-the-ships-hull/>
15. <http://www.directindustry.com/prod/mts-systems-china-co-ltd/drop-tester-54100-1158189.html>
16. M. Franz : Mehanička svojstva materijala, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb 1998
17. ASM Mechanical Testing and Evaluation Volume 8, ASM Handbook, 2000.
18. Prof. dr. sc. Ivica Kladarić – Materijali I, mehanička svojstva materijala, ispitivanje tvrdoće – skripta – Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
19. <http://www.guitel.de/edelinkwiki/haerte.htm>
20. http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer_tvr_hr.html

21. https://www.google.hr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwIj0oCUgvXLAhWBvBQKHYY1rBZQQjhwIBQ&url=http%3A%2F%2Fpompysr.ubowe.eu%2Fwykres_wydajnosci_cz1.html&bvm=bv.118443451,d.bGs&psig=AFQjCNFGNmhsLf_F6eD4ZHJry04oc2847Q&ust=1459860460834677
22. TEHNIČKA ENCIKLOPEDIJA – Izdanje i naklada Jugoslavenskog leksikografskog zavoda – Zagreb 1980.
23. M. Novosel, F. Cajner, D. Krumes – Alatni materijali – Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
24. Josip Kerec – Čelični materijali – Metalbiro Zagreb, 1975.
25. M. Novosel, D. Krumes – Posebni čelici – Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.

PRILOZI

PRILOG 1 – dijagram "naprezanje – istezanje" sa kidalice



PRILOG 2 – Izvješće sa ispitivanja mehanički svojstava za Č4141

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	IZVJEŠĆE / REPORT	Broj/No: LMT.2016.A.007

LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU
LABORATORY FOR MATERIALS TESTING AND HEAT TREATMENT

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING

Radni nalog Work order		Naručitelj Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.		Narudžba br. Order No.	-
Materijal Material	Č.4141	Količina Quantity	5xvlačna čvrstoća, 3xžilavost, 1xtvrdoća
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	1/1; 1/2; 1/3; 1/4; 1/5
Dimenzija Dimension	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probne epruvete		

MEHANIČKA SVOJSTVA / MECHANICAL PROPERTIES

Značajke ispitivanja Test marks	Dimenzija epruvete [mm] Dimension test piece	Granica razvlačenja Re [N/mm ²] Yield strenght	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] Tensile strenght	Izduženje A [%] Elongation	Kontrakcija Z [%] Contraction	Udarni rad loma KU [J] 20°C Impact energy	Tvrdoća HB Hardnes s value	Savijanje Bending
Utvrđeno Realized 1/1	Ø8	736	845	12,55	36			
Utvrđeno Realized 1/2	Ø8	806	845	11,8	33,78	1/1 - 4 1/2 - 4 1/3 - 3	257,6	
Utvrđeno Realized 1/3	Ø8	796	845	12,5	33,57		254,8	
Utvrđeno Realized 1/4	Ø8	826	855	8,87	32,36		256,2	
Utvrđeno Realized 1/5	Ø8	826	855	13,62	37,99			

Primjedba:

Remark:

Ispitivanje u svrhu izrade završnog rada studenta Saše Fembera.

Datum/Date:	Ispitao/Examined:	Odobrio/Approved:	Nadzor/Supervision:
02-02-2016	Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Marijan Brozović, dipl.ing.	

2.2.2016. T1:55 PM

Ana Fudurić

QO 7.5-08-3, izmj. 4

PRILOG 3 – Izvješće sa kemijske analize za Č4141

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	IZVJEŠĆE / REPORT	Broj/No: LMT.2016.C.003

LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU LABORATORY FOR MATERIAL TESTING AND HEAT TREATMENT

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING			
Radni nalog Work order	-	Naručitelj Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.	-	Narudžba br. Order No.	Završni rad
Materijal Material	Č.4141	Količina Quantity	1
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	-
Objekat Plant	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probni uzorak		

KEMIJSKI SASTAV / CHEMICAL ANALYSIS										
Br. Uzorka Sample No.	Fe %	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	V %
Zahtijevano In accordance										
Utvrđeno Realized	96,72	1,44	0,306	0,298	0,002	0,010	0,525	0,067	0,073	0,103
Zahtijevano In accordance										
Utvrđeno Realized										

Primjedba: Remark:			
Datum/Date: 19.02.2016.	Ispitao/Examined: Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Odobrio/Approved: Marijan Brozović, dipl.ing.	Nadzor/Supervision:

PRILOG 4 – Izvješće sa ispitivanja mehanički svojstava za Č4570

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	IZVJEŠĆE / REPORT	Broj/No: LMT.2016.A.008

LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU
LABORATORY FOR MATERIALS TESTING AND HEAT TREATMENT

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING

Radni nalog Work order		Naručilac Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.		Narudžba br. Order No.	-
Materijal Material	Č.4570	Količina Quantity	5xvlačna čvrstoća, 3xžilavost, 1xtvrdća
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	2/1; 2/2; 2/3; 2/4; 2/5
Dimenzija Dimension	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probne epruvete		

MEHANIČKA SVOJSTVA / MECHANICAL PROPERTIES

Značajke ispitivanja Test marks	Dimenzija epruvete [mm] Dimension test piece	Granica razvlačenja Re [N/mm ²] Yield strenght	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] Tensile strenght	Izduženje A [%] Elongation	Kontrakcija Z [%] Contraction	Udarni rad loma KU [J] 20°C Impact energy	Tvrdoća HB Hardnes s value	Savijanje Bending
Utvrđeno Realized 2/1	Ø8	835	875	14,1	56,60			
Utvrđeno Realized 2/2	Ø8	845	875	15,45	56,44	1/1 - 17 1/2 - 16 1/3 - 17	252,0 263,4 254,8	
Utvrđeno Realized 2/3	Ø8	855	875	11,65	54,61			
Utvrđeno Realized 2/4	Ø8	835	875	13,6	56,94			
Utvrđeno Realized 2/5	Ø8	845	865	11	56,78			

Primjedba:
Remark:

Ispitivanje u svrhu izrade završnog rada studenta Saše Fembera.

Datum/Date:	Ispitao/Examined:	Odobrio/Approved:	Nadzor/Supervision:
02-02-2016	Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Marijan Brozović, dipl.ing.	

PRILOG 5 – Izvješće sa kemijske analize za Č4570

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	IZVJEŠĆE / REPORT	Broj/No: LMT.2016.C.001

LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU LABORATORY FOR MATERIAL TESTING AND HEAT TREATMENT

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING			
Radni nalog Work order	-	Naručilac Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.	-	Narudžba br. Order No.	Završni rad
Materijal Material	Č.4570	Količina Quantity	1
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	-
Objekat Plant	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probni uzorak		

KEMIJSKI SASTAV / CHEMICAL ANALYSIS										
-------------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Br. Uzorka Sample No.	Fe %	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	V %
Zahtijevano In accordance										
Utvrđeno Realized	81,47	0,289	0,444	0,682	0,013	0,030	15,17	0,131	<5,00	0,051
Zahtijevano In accordance										
Utvrđeno Realized										

Primjedba: Remark:			
Datum/Date: 09.02.2016.	Ispitao/Examined: Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Odobrio/Approved: Marijan Brozović, dipl.ing.	Nadzor/Supervision:

PRILOG 6 – Izvješće sa ispitivanja mehanički svojstava za Č4230

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	IZVJEŠĆE / REPORT	Broj/No: LMT.2016.A.009

LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU LABORATORY FOR MATERIALS TESTING AND HEAT TREATMENT
--

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING

Radni nalog Work order		Naručilac Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.		Narudžba br. Order No.	-
Materijal Material	Č.4230	Količina Quantity	5xvlačna čvrstoća, 3xžilavost, 1xtvrdoća
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	3/1;3/2;3/3;3/4;3/5
Dimenzija Dimension	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probne epruvete		

MEHANIČKA SVOJSTVA / MECHANICAL PROPERTIES

Značajke ispitivanja Test marks	Dimenzija epruvete [mm] Dimension test piece	Granica razvlačenja Re [N/mm ²] Yield strenght	Vlačna čvrstoća Rm [N/mm ²] Tensile strenght	Izduženje A [%] Elongation	Kontrakcija Z [%] Contraction	Udarni rad loma KU [J] 20°C Impact energy	Tvrdoća HB Hardness value	Savijanje Bending
Utvrđeno Realized 3/1	Ø8	557	766	23,37	44,12			
Utvrđeno Realized 3/2	Ø8	527	776	23,15	44,68	1/1 - 8 1/2 - 9 1/3 - 9	223,1 223,1	
Utvrđeno Realized 3/3	Ø8	507	766	21,32	43,19			
Utvrđeno Realized 3/4	Ø8	477	766	18,72	45,06		221,9	
Utvrđeno Realized 3/5	Ø8	517	776	22,62	46,17			

Primjedba: Remark: Ispitivanje u svrhu izrade završnog rada studenta Saše Fembera.
--

Datum/Date:	Ispitao/Examined:	Odobrio/Approved:	Nadzor/Supervision:
02-02-2016	Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Marijan Brozović, dipl.ing.	

PRILOG 7 – Izvješće sa kemijske analize za Č4230

	VELEUČILIŠTE U KARLOVCU KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	
	IZVJEŠĆE / REPORT	Broj/No: LMT.2016.C.002

LABORATORIJ ZA MATERIJALE I TOPLINSKU OBRADU LABORATORY FOR MATERIAL TESTING AND HEAT TREATMENT

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA / REPORT ABOUT MATERIALS TESTING			
Radni nalog Work order	-	Naručilac Purchaser	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža Drawing No.	-	Narudžba br. Order No.	Završni rad
Materijal Material	Č.4230	Količina Quantity	1
Norma Standard	-	Tehnički propis Technical Specifications	-
Broj šarže Cast No.	-	Broj probe Test piece No.	-
Objekat Plant	-	Toplinska obrada Heat treatment	-
Predmet Object	Probni uzorak		

KEMIJSKI SASTAV / CHEMICAL ANALYSIS										
Br. Uzorka Sample No.	Fe %	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	V %
Zahtijevano In accordance										
Utvrđeno Realized	96,53	0,783	1,261	0,438	0,026	0,018	<8,0	0,072	0,215	0,012
Zahtijevano In accordance										
Utvrđeno Realized										

Primjedba: Remark:			
Datum/Date: 09.02.2016.	Ispitao/Examined: Ana Fudurić, bacc.ing.mech.	Odobrio/Approved: Marijan Brozović, dipl.ing.	Nadzor/Supervision: