

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET**

Prof.dr.sc. Stoja Rešković

**OSNOVE TEORIJE OBLIKOVANJA
DEFORMIRANJEM**

Sisak, 2020

Autor: prof.dr.sc Stoja Rešković
Naslov: Osnove teorije oblikovanja deformiranjem
Recezeni: izv.prof.dr.sc.Ljerka Slokar Benić
doc.dr.sc. Ivan Jandrlić
Izdavač: Metalurški fakultet Sisak
Temeljem članka 23 Statuta Metalurškog fakulteta Fakultetsko vijeće je na svojoj 10 redovitoj sjednici od 15.07.2020. godine, a na temelju prihvaćenih pozitivnih recenzija ovog nastavnog teksta, donjelo odluku da se tekst postavi na internetsku stranicu Metalurškog fakulteta.

Ovaj nastavni tekst namijenjen je studentima Metalurškog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i ne smije se koristiti u bilo kojem drugom obliku bez pisanog pristanka autora. Nije dozvoljeno umnožavanje niti dijeljenje ovog teksta u cjelini niti u dijelovima.

ZAHVALA

Za veliki doprinos u povećanju kvalitete ovih skripta zahvaljujem se izv. ptof. Ljerkij Slokar Benić i doc.dr.sc. Ivanu Jandriću. Njihov kritički osvrt i sugestije doprinjele su poboljšanju i boljem razumjevanju ovog teksta.

Autor

SADRŽAJ

Popis simbola i oznaka	v
Popis slika	vi
Popis tablica	viii
PREDGOVOR	ix
1. UVOD	1
2. TEORIJSKE OSNOVE OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM	3
2.1. Naprezanja i deformacije	6
2.2. Zakon o konstantnosti volumena	8
2.3. Plastičnost i deformabilnost	9
2.3.1. Pokazatelji plastičnosti	11
2.3.2. Analiza utjecajnih faktora na plastičnost	13
2.3.2.1. Utjecaj temperature	13
2.3.2.2. Utjecaj brzine deformacije	14
2.3.2.3. Utjecaj stanja naprezanja materijala	14
2.3.2.4. Utjecaj dimenzija deformiranog tijela	15
2.3.3. Mogućnosti povećanja plastičnosti	15
2.4. Deformacijski otpor	16
2.4.1. Utjecajni parametri na otpor deformaciji	16
2.4.1.1. Utjecaj kemijskog sastava	17
2.4.1.2. Utjecaj temperature deformacije	18
2.4.1.3. Utjecaj brzine deformacije	19
2.4.1.4. Utjecaj stupnja deformacije	20
2.4.2. Ovisnost deformacijskog otpora o kontaktnom trenju	20
2.5. Metode ispitivanje plastičnosti i otpora deformaciji	21
2.5.1. Određivanje deformacijskog otpora razvlačenjem	23
2.5.2. Određivanje deformacijskog otpora uvijanjem	24
2.5.3. Nove metode u ispitivanju plastičnosti i otpora deformaciji	25
2.5.3.1. Vizioplastičnost	26
2.5.3.2. Metoda vizioplastičnosti s digitalnom korelacijom slike (DIC)	28
2.5.3.3. Termografija	30
3. SVOJSTVA METALA I LEGURA KOJI SE OBLIKUJU DEFORMIRANJEM	33
3.1. Plastična svojstva čelika	33
3.1.1. Oblikovanje deformiranjem perlitnih čelika	35
3.1.2. Oblikovanje deformiranjem austenitnih čelika	36
3.1.3. Oblikovanje deformiranjem feritnih čelika	37
3.1.4. Utjecaj pratećih elemenata na plastičnost čelika	39
3.1.5. Utjecaj oligoelemenata na plastičnost čelika	44
3.2. Plastična svojstva aluminija i slitina aluminija	47

3.2.1. Utjecaj legirajućih elemenata na plastičnost slitina aluminijska	50
3.3. Plastična svojstva bakar i slitina bakra	53
3.3.1. Slitine bakra s cinkom	54
3.3.2. Slitine bakra s kositrom	57
3.4. Plastična svojstva nikla i slitina nikla	60
3.5. Plastična svojstva titana i slitina titana	61
3.6. Plastična svojstva magnezija i slitina magnezija	62
3.7. Plastična svojstva plemenitih metala i njihovih slitina	63
3.8. Plastična svojstva ostalih metala	64
3.8.1. Kositar i slitine kositra	64
3.8.2. Cink i slitine cinka	64
3.8.3. Olovo i slitine olova	65
4. TRENJE I TEORIJSKE OSNOVE TRENJA KOD OBLIKOVANJA DEFORMIRANJEM	66
4.1. Teorijske osnove trenja kod oblikovanja deformiranjem	66
4.2. Zakon kontaktnog trenja	68
4.3. Utjecaj pojedinih faktora na proces trenja u uvjetima oblikovanja metala deformiranjem	70
4.4. Utjecaj trenja na provedbu tehničkih procesa	73
4.5. Tehnološka maziva	75
5. PREGLED TEHNOLOGIJA OBLIKOVANJA DEFORMIRANJEM	77
5.1. Topla i hladna deformacija	77
5.1.1. Topla deformacija	77
5.1.2. Hladna deformacija	80
5.1.2.1. Očvršćivanje metala kod hladne deformacije	83
5.2. Pregled tehnologija oblikovanja deformiranjem	86
5.2.1. Oblikovanje metala kovanjem	86
5.2.2. Oblikovanje metala valjanjem	88
5.2.3. Oblikovanje metala prešanjem	88
5.2.4. Oblikovanje metala dubokim izvlačenjem	89
5.2.5. Oblikovanje metala provlačenjem u hladnom stanju	89
6 LITERATURA	90

Popis simbola i oznaka

Simbol / oznaka	Jedinica	Značenje
F	N	sila
A	mm ²	površina
T	°C	temperatura
t	s	vrijeme
σ_1	MPa	vertikalno naprezanje
σ_2	MPa	poprečno naprezanje
σ_3	MPa	uzdužno naprezanje
σ_n	MPa	normalno naprezanje
τ	MPa	smično naprezanje
τ_{max}	MPa	maksimalno smično naprezanje
\vec{s}		vektor punog naprezanja
T		tenzor naprezanja
ε	mm/mm	deformacija
V	mm ³	volumen
E	N/mm ²	modul elastičnosti
G		modul smika
μ		Poissonov koeficijent
Δh	mm	redukcija visine
Δb	mm	apsolutno širenje
Δl	mm	apsolutno produljenje
n	°/min	broj uvijanja
γ	°	kut uvijanja
M	Nm	moment uvijanja
D		deformabilnost
P		plastičnost
S_d		sposobnost za deformaciju
Re	MPa	granica razvlačenja
Rm	MPa	vlačna čvrstoća
A_0	%	istežljivost
Z	%	kontrakcija
v	m/s	brzina deformacije
k_f	MPa	deformacijski otpor
N	°	broj okretaja motora plastometra
ω	rad/s	kutna brzina
α	°	kut zahvata
μ		koeficijent trenja
R		otpor trenju
φ		logaritamska deformacija

Popis slika

- Slika 1.1. Trend proizvodnje čelika u svijetu
- Slika 1.2. a) Udio pojedinih zemalja u proizvodnji čelika u 2017. godini
b) Primjena čelika prema namjeni
- Slika 2.1. Naprezanja u elementarnom paralelopipedu
- Slika 2.2. Elastična deformacija
- Slika 2.3. Plastična deformacija
- Slika 2.4. Kristalna građa i promjene položaja u kristalnoj rešetci
- Slika 2.5. Dijagram naprezanje-istezanje
- Slika 2.6. Naprezanja u elementarnom paralelopipedu
- Slika 2.7. Utjecaj temperature na plastičnost
- Slika 2.8. Utjecaj brzine deformacije na plastičnost kod tople deformacije
- Slika 2.9. Utjecaj volumena na plastičnost kod tople deformacije
- Slika 2.10. Ovisnost deformacijskog otpora o kemijskom sastavu aluminija i aluminijskih slitina
- Slika 2.11. Ovisnost prirodnog deformacijskog otpora o temperaturi i brzini ispitivanja za čelik
- Slika 2.12. Utjecaj niobija na pripadni deformacijski otpor
- Slika 2.13. Ovisnost otpora deformaciji o kontaktnom trenju
- Slika 2.14. Osnovna podjela metoda ispitivanja u području oblikovanja deformiranjem
- Slika 2.15. Inženjerske metode proračuna procesa oblikovanja deformacijom
- Slika 2.16. Kidalica za ispitivanje u toplom stanju
- Slika 2.17. Plastometar
- Slika 2.18. Specijalne metode ispitivanja plastičnosti
- Slika 2.19. Primjer mreže prije (a) i nakon (b) deformacije za metodu vizioplastičnosti
- Slika 2.20. Ispitivanje metodom vizioplastičnosti a) digitalna kamera, b) uzorak s iscrtanom mrežom, c) uzorak s točkastim markerima
- Slika 2.21. Mjerenje deformacija metodom vizioplastičnosti
- Slika 2.22. Uzorci za digitalnu korelaciju slike a) Nasumično naneseni markeri za digitalnu korelaciju slike, b) Praćenje pomaka markera metodom digitalne korelacije slike
- Slika 2.23. Raspored opreme kod ispitivanja metodom DIC
- Slika 2.24. Kvalitativna analiza promjena deformacije pri statičkom vlačnom pokusu
- Slika 2.25. Kvalitativna i kvantitativna analiza deformacija u uzorku kod razvlačenja
- Slika 2.26. Raspored opreme kod ispitivanja metodom termografije
- Slika 2.27. Primjena termografije u istraživanju zone deformacije
- Slika 2.28. Kvalitativna analiza promjena temperature uslijed deformacije
- Slika 2.29. Raspodjela temperature u zoni deformacije pri razvlačenju
- Slika 3.1. Kristalna građa metala
- Slika 3.2. Dijagram stanja željezo – ugljik

- Slika 3.3. Ovisnost mehaničkih svojstva o postotku ugljika kod perlitnih čelika
- Slika 3.4. Utjecaj ugljika na mehanička svojstva čelika
- Slika 3.5. Ovisnost deformacijskog otpora i brzine deformacije kod čelika
- Slika 3.6. Ovisnost žilavosti o temperaturi kod feritnih čelika
- Slika 3.7. Širenje kod valjanja perlitnih, austenitnih i feritnih čelika
- Slika 3.8. Utjecaj udjela fosfora i sumpora na žilavost podeutektoidnih čelika
- Slika 3.9. Utjecaj udjela ugljika i mangana na strukturu čelika
- Slika 3.10. Stvaranje oksidnog sloja na površini čelika
- Slika 3.11. Ponašanje oligo elemenata kod zagrijavanja čelika.
- Slika 3.12. Naljepak kovarine s okluzijama oligo elemenata na pilger valjcima
- Slika 3.13. Utisnuće kovarine na površini bešavne cijevi
- Slika 3.14. Ovisnost R_m o sadržaju bakra, željeza, cinka i silicija u aluminiju
- Slika 3.15. Utjecaj hladne prerade na mehanička svojstva aluminija
- Slika 3.16. Ovisnost mehaničkih svojstava Al legura o stupnju hladne deformacije
- Slika 3.17. Ovisnost otpora deformacije o temperaturi kod aluminija i Al-legura
- Slika 3.18. Ravnotežni dijagram Al-Cu
- Slika 3.19. Ravnotežni dijagram Al-Mn
- Slika 3.20. Ravnotežni dijagram Al-Mg
- Slika 3.21. Ravnotežni dijagram Al-Si
- Slika 3.22. Ovisnost svojstava bakra o temperaturi žarenja
- Slika 3.23. Ovisnost mehaničkih svojstava bakra o stupnju hladne deformacije
- Slika 3.24. Ravnotežni dijagram Cu-Zn
- Slika 3.25. Ovisnost mehaničkih svojstava mesinga o kemijskom sastavu
- Slika 3.26. Utjecaj stupnja deformacije na mehanička svojstva mesinga
- Slika 3.27. Ravnotežni dijagram Cu-Sn
- Slika 3.28. Utjecaj udjela kositra na mehanička svojstva kositrene bronce
- Slika 3.29. Ravnotežni dijagram Cu-Al
- Slika 3.30. Ovisnost mehaničkih svojstava aluminijske bronce o količinskom udjelu aluminija
- Slika 3.31. Ovisnost mehaničkih svojstava nikla o stupnju hladne deformacije
- Slika 3.32. Ovisnost vlačne čvrstoće titana i Ti-legura o temperaturi
- Slika 3.33. Utjecaj vodika na žilavost titana
- Slika 3.34. Ravnotežni dijagram Ti-Al
- Slika 3.35. Ravnotežni dijagram Mg-Al
- Slika 3.36. Ravnotežni dijagram Zn-Al
- Slika 4.1. Model graničnog trenja
- Slika 4.2. Utjecaj temperature na faktor trenja
- Slika 4.3. Slojevi oksida na površini metala
- Slika 4.4. Ovisnost debljine kovarine o temperaturi
- Slika 4.5. Utjecaj brzine deformacije na faktor trenja
- Slika 4.6. Utjecaj broja provlaka kod valjanja na faktor trenja i potrošnju maziva
- Slika 5.1. Promjena veličine zrna kod tople deformacije
- Slika 5.2. Promjena strukture tijekom tople deformacije
- Slika 5.3. Prikaz rekristalizacije u deformiranom zrnu pri termomehaničkoj obradi niobijem mikrolegiranog čelika
- Slika 5.4. Usitnjenje zrna pri toploj plastičnoj deformaciji

- Slika 5.5. *Promjena mikrostrukture kod hladne deformacije*
Slika 5.6. *Mehanička svojstva niskougličnog čelika u ovisnosti o stupnju hladne deformacije*
Slika 5.7. *Ovisnost oporavka zrna o vremenu*
Slika 5.8. *Ovisnost veličine zrna o stupnju deformacije i temperaturi*
Slika 5.9. *Krivulja očvršćivanja materijala hladnom deformacijom*
Slika 5.10. *Krivulja očvršćivanja određena tangentom u točki lokalizacije naprezanja*
Slika 5.11. *Postupci prerade metala i njihovih legura*
Slika 5.12. *Shematski prikaz slobodnog kovanja*
Slika 5.13. *Shematski prikaz kovanja u kovačkim kalupima*
Slika 5.14. *Shematski prikaz procesa valjanja metala*
Slika 5.15. *Shematski prikaz prešanja istiskivanjem*
Slika 5.16. *Shematski prikaz dubokog izvlačenja*
Slika 5.17. *Shematski prikaz provlačenja*

Popis tablica

- Tablica 2.1. *Stanje naprezanja, plastičnost i deformacijski otpor*
Tablica 2.2. *Metode ispitivanja plastičnosti i deformacijskog otpora čelika*
Tablica 2.3. *Brzine deformacije u ovisnosti o metodi ispitivanja*
Tablica 3.1. *Kemijski elementi u čeliku*
Tablica 3.2. *Utjecaj nekih legirajućih elemenata na svojstva čelika*
Tablica 3.3. *Plastičnost Al i Al legura u hladnom stanju*
Tablica 3.4. *Slitine bez Cu manje naginju puzanju*
Tablica 4.1. *Uloga trenja kod procesa oblikovanja deformiranjem*
Tablica 4.2. *Faktor trenja u zadanim uvjetima*
Tablica 4.3. *Faktor trenja pri zahvatu metala valjcima i pri ustaljenom procesu valjanja*

PREDGOVOR

Opće je poznato da su metali nezamjenjivi u ljudskom društvu. Od svih metala najveću upotrebu imaju čelici. Proizvodnja čelika u stalnom je porastu i danas se proizvodi oko 1800 milijuna tona godišnje. Osim čelika, u stalnom je porastu proizvodnja aluminija, bakra njihovih i legura. Danas se također bilježi i brzi porast u proizvodnji i upotrebi novih legura.

Preko 85% proizvedenog čelika oblikuje se deformacijom. Više je razloga za to, ali važno je naglasiti da se oblikovanjem metala deformiranjem postiže veća produktivnost, visoka dimenzionalna točnost proizvoda i dobivanje metalnih proizvoda vrlo složenih oblika. Zbog toga je važno poznavanje ponašanja čelika tijekom deformacije, kako teorijskih zakona deformacije, tako i osobitosti pojedinih tehnologija kojima se metali oblikuju deformacijom.

Namjera autora je da studentima olakša razumijevanje osnovnih pojmova iz teorije i tehnologija oblikovanja metala deformiranjem kao što su: naprezanja kod djelovanja sila na metalno tijelo, elastična i plastična deformacija, svojstva metala koja su važna kod oblikovanja deformiranjem, uloga trenja u procesima deformacije te utjecaj različitih parametara na deformaciju.

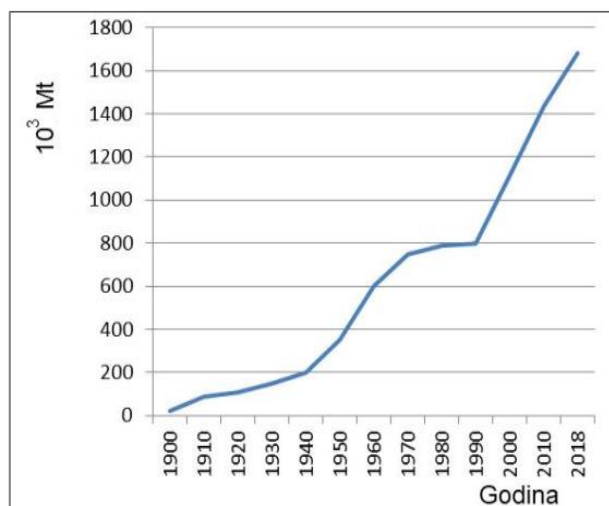
Ova skripta namijenjena je studentima druge godine preddiplomskog studija Metalurgije, smjer Metalurško inženjerstvo, na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu za pomoć u svladavanju znanja iz kolegija „Osnove teorije oblikovanja deformiranjem“. Dio gradiva koji je obrađen u ovim skriptama, slušao se do akademske 2018./2019. godine (kada je ovaj predmet prvi put uveden u nastavni program) u okviru kolegija „Teorija oblikovanja deformiranjem“ na Diplomskom sveučilišnom studiju Metalurgije na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

1.UVOD

Čovjek se koristio neobrađenim materijalom još u prapovijesti. Najprije su korišteni različiti materijali u onom obliku u kojem su se nalazili u prirodi. Poslije su se metali počeli dobivati prženjem različitih rudača s drvenim ugljenom. U Europi i Aziji dobivene su prve bronce, a u Africi željezo. Bakar i bronce su se počeli oblikovati i koristiti oko 8000 godina prije Krista. Vrlo je malo informacija u pisanim dokumentima iz toga vremena o oblikovanju metala. Prvi pisani zapisi o oblikovanju metala potječu iz XI. stoljeća. Procjenjuje se da je u 15. stoljeću u Europi proizvedeno 60 000 t željeza, od toga 30 000 t u Njemačkoj. U 18. stoljeću proizvodili su se i prerađivali niskouglični čelici, a u 20. stoljeću legirani i austenitni čelici. Industrijska proizvodnja i prerada aluminijska započela je u Švicarskoj krajem 19. stoljeća.

Razvitak metalurgije na području Hrvatske započeo je 4000. g. prije Krista i vezan je na rad Samoborskih rudnika bakra i Vučedolsku kulturu. Na području Siska i Banovine metalurgija se razvila od Vučedolske kulture, a razvili su je Kelti u tadašnjem središtu Segestika, danas grad Sisak. Dolaskom Kelta Segestika se razvija u naselje Siscija, koja postaje najveće metalurško središte rimskog carstva. Nakon propasti rimskog carstva, metalurške aktivnosti u Sisciji zamiru. Dolaskom Sasa u 11. stoljeću metalurška proizvodnja je obnovljena. Prodorom Turaka na ovo područje, metalurška proizvodna ponovo zamire. Ponovo je obnovljena u 18. stoljeću. U Željezari Sisak prva visoka peć izgrađena je 1939. godine, a prva industrijska proizvodnja čelika započela 1951. godine. 1952. godine izgrađena je valjaonica bešavnih cijevi s tri linije, a do 1991. godine izgrađene su valjaonica traka i gredica valjaonica toplovaljanih šavnih cijevi, valjaonica za hladnu preradu cijevi s postrojenjima za hladno provlačenje, valjaonica za hladno provlačenje i hladno pilgerovanje cijevi, tvornicu cijevnih lukova i metalne galanterije. Od 1991. do danas Željezara Sisak promijenila je više vlasnika i danas radi samo čeličana s vrlo niskim kapacitetom i valjaonica za hladno provlačenje i hladno pilgerovanje cijevi, također s manjim kapacitetom.

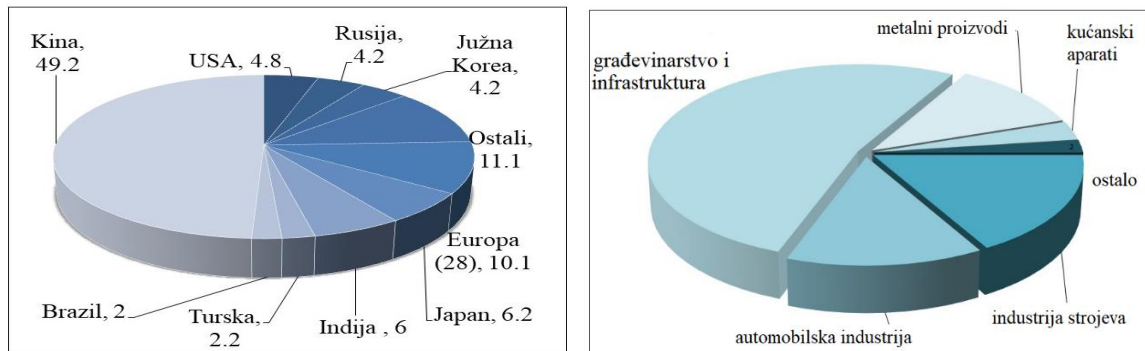
Od svih metala najveći napredak u tehnologijama i najveća proizvodnja i primjena ostvarena je u proizvodnji i oblikovanju čelika, slika 1.1.



Slika 1.1. Trend proizvodnje čelika u svijetu [5]

Svi ostali metali dobivaju se i koriste u daleko manjoj mjeri. Najveća primjena čelika je u strojogradnji, automobilskoj industriji, brodogradnji i željezničkom prometu. Danas je čelik jedan od najvažnijih tehničkih materijala. Od početka dvadesetog stoljeća do danas bilježi se stalni porast proizvodnje i upotrebe čelika.

Trend proizvodnje čelika, udio pojedinih zemalja u proizvodnji čelika te upotreba čelika po različitim područjima ljudske djelatnosti prikazani su na slici 1.2.



Slika 1.2. a) Udio pojedinih zemalja u proizvodnji čelika u 2017. godini, %
b). Primjena čelika prema namjeni [5]

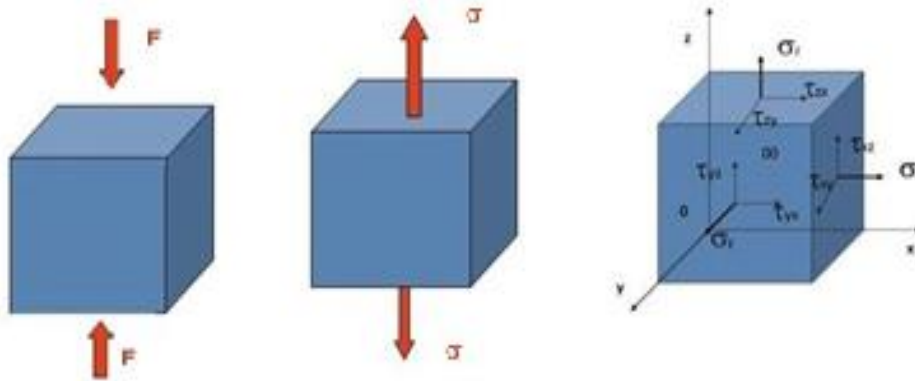
Povećanjem proizvodnje i potrošnje čelika, te zahtjevi za stalnim porastom u kvaliteti metalnih proizvoda nametnute su potrebe za stalnim razvojem u teoriji i tehnologijama proizvodnje čelika. Kako se preko 85% proizvedenog čelika oblikuje deformacijom, to su i zahtjevi za novim spoznajama u teoriji i tehnologijama oblikovanja deformiranjem najveći. Teorija oblikovanja deformiranjem je sveobuhvatna znanstvena disciplina koja, polazeći od osnovnih zakona fizikalnih i kemijskih procesa koji se odvijaju u metalu tijekom deformacije, proučava među utjecaje parametara deformacije sa strukturnim karakteristikama i mehaničkim svojstvima materijala. Ona razrađuje metode proračuna naprezanja, deformacije i rada, te njihovu primjenu u tehnologijama oblikovanja deformiranjem. Također, razrađuje matematičke modele pojedinih procesa oblikovanja deformiranjem i pojašnjava fizikalnu bit plastične deformacije, kinetiku toka materijala u zoni deformacije, plastičnost, otpor deformaciji i trenje.

Procesi oblikovanja deformiranjem odvijaju se po određenim zakonima. Osnovni zakoni koji se koriste u teorijskim postavkama kod opisivanja procesa deformacije su: zakon o konstantnosti volumena, zakon najmanjeg otpora, zakon neravnomjerne deformacije i zaostalih naprezanja te zakon sličnosti i modeliranje procesa. Istraživanja u cilju razvoja teorije oblikovanja deformiranjem danas se provodi na više razina. Analiziraju se parametri deformacije i međuutjecaji mehanizama koji se odvijaju kod tople i hladne deformacije. Posebno se istražuju mikro naprezanja i razvoj mikrostrukture. Isto tako provode se fizikalna modeliranja procesa što je osnova za daljnje numeričko modeliranje. Prate se utjecajni parametri i razvoj strukture i substrukture u svakom dijelu zone deformacije. Zahtjevi koji se postavljaju na tehnologije toplog i hladnog oblikovanja metala i njihovih slitina su: stalno poboljšanje kvalitete proizvoda, smanjenje proizvodnih troškova, povećanje proizvodnosti i veća fleksibilnost s obzirom na proizvodni asortiman.

2. TEORIJSKE OSNOVE OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM

Oblikovanje deformiranjem provodi se s ciljem dobivanja željenog oblika i dimenzija metalnih materijala u hladnom ili toplom stanju pri čemu volumen ostaje isti. Kažemo da provodimo plastičnu deformaciju. Plastična deformacija je obrada metala i njihovih slitina bez razaranja pri čemu se mijenja oblik i dimenzije, a volumen ostaje isti.

Kad na metale i njihove slitine djelujemo vanjskom silom, u njima se javlja protusila koju nazivamo naprezanjem. Unutar svakog metalnog tijela na kojeg djeluju vanjske sile može se izdvojiti elementarni paralelepiped čije su stranice orijentirane u pravcu koordinatnih osi. U svakoj ravnini tog elementarnog paralelepipeda djeluje jedno normalno i dva smična (tangencijalna) naprezanja. Ukupno naprezanje čine tri komponente normalnih naprezanja σ_x , σ_y , σ_z i šest komponenti smičnih naprezanja τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} i τ_{zy} , slika 2.1.



Slika 2.1. Naprezanja u elementarnom paralelepipedu

Ukupno naprezanje čini suma normalnih naprezanja σ_n i smičnih naprezanja τ . Oni se mogu izraziti preko sljedećih općih izraza:

$$\sigma_n^2 = (\sigma_1 a_1^2 + \sigma_2 a_2^2 + \sigma_3 a_3^2)^2 \quad (2.1)$$

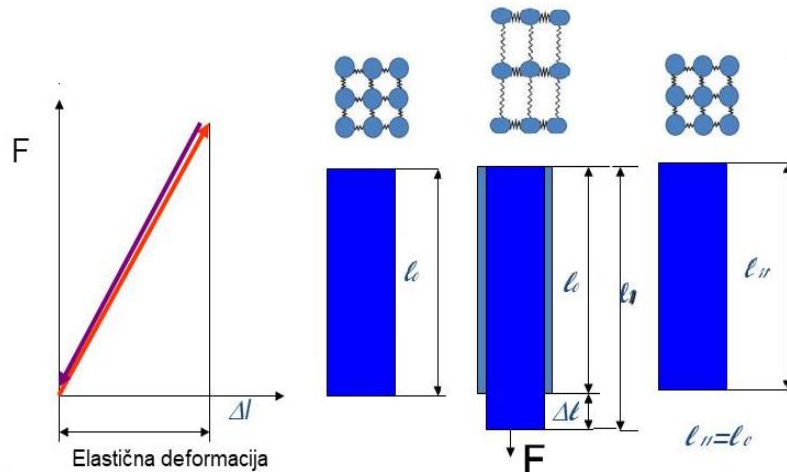
$$\tau^2 = \sigma_x^2 a_x^2 + \sigma_y^2 a_y^2 + \sigma_z^2 a_z^2 - (\sigma_x a_x^2 + \sigma_y a_y^2 + \sigma_z a_z^2)^2 \quad (2.2)$$

$$\sigma_u^2 = \sigma_n^2 + \tau^2 \quad (2.3)$$

Naprezanje ili unutarnja sila koja se suprotstavlja djelovanju vanjskih sila različita je za svaki metal ili slitinu i ovisi o više faktora, u prvom redu o njihovoj kristalnoj građi.

Kad je vanjska sila veća od one protusile koja se stvara u metalima ili slitinama dolazi do deformacije. Kad na neko tijelo početne duljine l_0 djeluje sila F , slika 2.2., doći će do deformacije i povećanja njegove duljine za Δl . Deformacija može biti elastična ili plastična. Ako se nakon prestanka djelovanja sile tijelo vrati u prvobitni položaj, $l_n = l_0$, govorimo o elastičnoj deformaciji. Kod elastične deformacije produljenje ispitnog uzorka proporcionalno je porastu sile. Promatra li se pri tome metal na atomskoj razini, zapaža se da dolazi do povećanja rastojanja

između atoma, ali ne i pucanja veza među njima. Nakon prestanka djelovanja sile, atomi se vraćaju u ravnotežni položaj. Pri tome se ne mijenja oblik i dimenzije deformiranog uzorka.

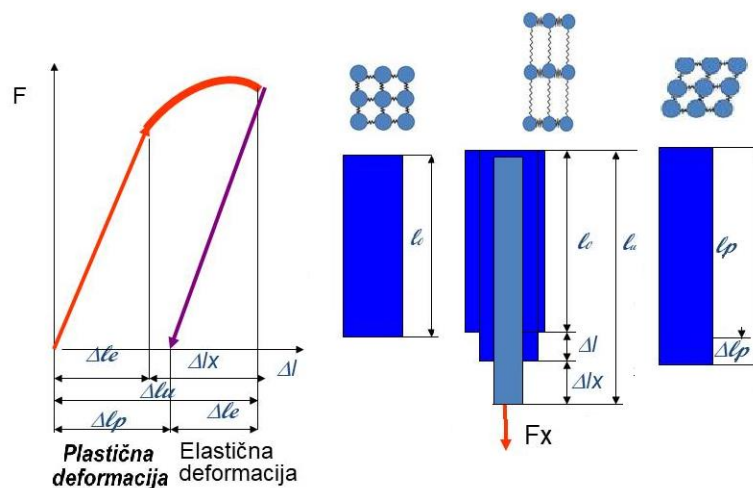


Slika 2.2. Elastična deformacija [4]

U praksi se uzima da, kod većine metalnih materijala, elastična deformacija postoji samo do produljenja ispitnog uzorka od približno 0,005 %.

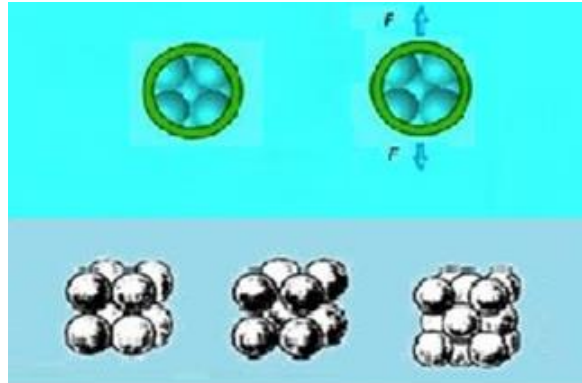
Ako se sila F_x poveća, iznad točke proporcionalnosti dolazi do daljnje deformacije, slika 2.3. Sila i deformacija nije proporcionalna sve do točke maksimalne sile. Nakon prestanka djelovanja sile deformirani metal se ne vraća u prvobitni položaj dolazi do povećanja duljine za Δl_p . U ovom području odvija se plastična deformacija pri čemu nastaju trajne promjena oblika i dimenzija deformiranog tijela. Δl .

Ova trajna promjena oblika tijela na kojeg djeluju sile naziva se plastična deformacija. Ona imaju za cilj izmijeniti oblik i dimenzije deformiranog tijela od metala i legura uz ostvarivanje promjena u strukturi i postizanje odgovarajućih fizičkih i mehaničkih svojstava. Kad sila razvlačenja dostigne maksimalnu vrijednost, u točki R_m , ona se smanjuje jer u materijalu nastaju mikropukotina koje daljnjim razvlačenjem uzorka dohode do loma materijala.



Slika 2. 3. Plastična deformacija [4]

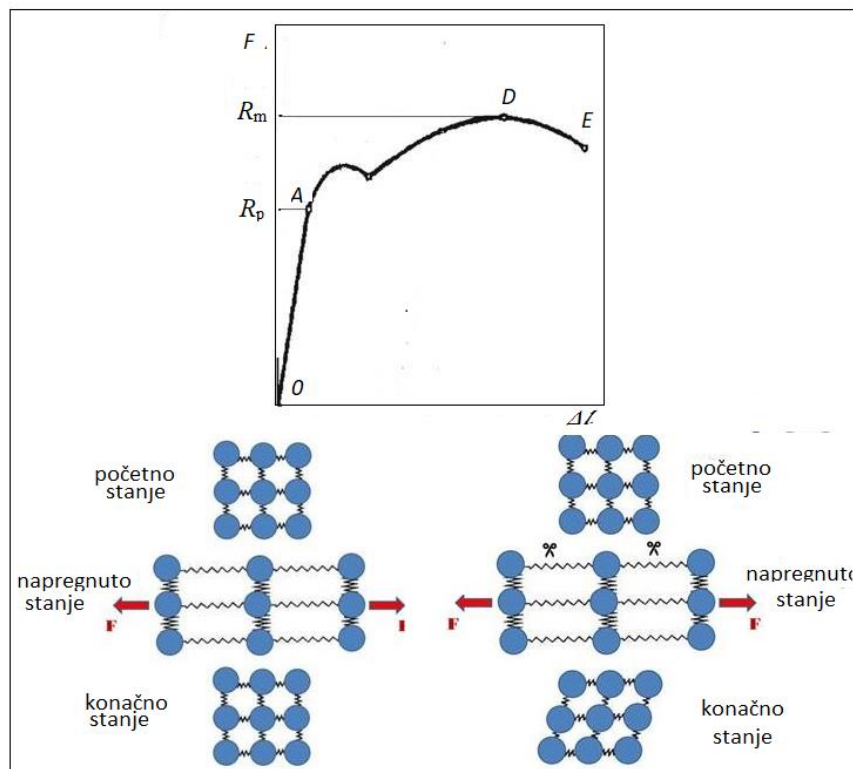
Na atomskoj razini gledano, vidljivo je da dolazi do kidanja atomskih veza i odmah, dok su atomi još u pokretu, stvaranja novih atomskih veza sa susjednim atomima. Pri tome atomi zauzimaju nove stabilne položaje. Kako će se atomi pomicati u kristalnoj rešetki ovisi o njihovoj kristalnoj građi, slika 2.4.



Slika 2.4. Kristalna građa i promjene položaja atoma u kristalnoj rešetki usljed deformacije

Promjenom položaja atoma deformirani metal mijenja svoj oblik, ali mu volumen ostaje isti. Plastična deformacija se očituje kao promjena oblika i dimenzija deformiranog tijela pri čemu volumen ostaje nepromijenjen.

Prema slici 2.5, elastična deformacija odvija se do granice proporcionalnosti, R_p (točka A), a nakon toga do R_m (područje A-D) odvija se plastična deformacija.



Slika 2.5. Dijagram naprezanje-istezanje [4]

Nakon dostizanja R_m (područje D-E), atomi ne stvaraju nove veze i u materijalu nastaje pukotina koja pod djelovanjem sile dovodi do loma uzorka. Da bi se metali i njihove slitine mogle plastično oblikovati moraju imati odgovarajuća svojstva. Ponašanje metalnih materijala pri oblikovanju deformacijom opisuje se njihovom plastičnošću, deformabilnošću i obradivošću. U teoriji i tehnologijama oblikovanja metala deformacijom važno je poznavati značenje tih pojmova.

Plastičnost je stanje metala, a deformabilnost je svojstvo materijala da se plastično deformira u toplom i hladnom stanju. Obradivost je također svojstvo materijala da se deformira kako plastičnom deformacijom (bez razaranja) tako i s razaranjem (odvajanjem čestica). Plastična deformacija je promjena oblika i dimenzija proizvoda iz kovinskih materijala bez razaranja.

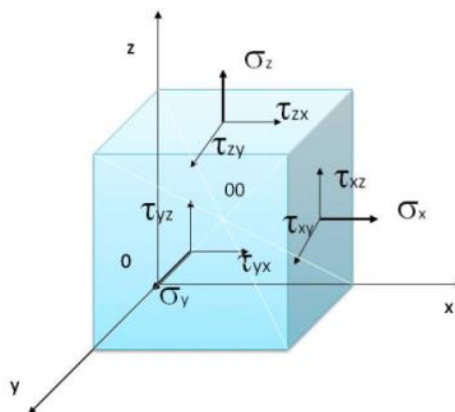
2.1. Naprezanja i deformacije

Kada na neko tijelo djeluje sustav sila u njemu se javljaju protusile. Sile koje djeluju na neko tijelo mogu biti aktivne - vanjske sile i reaktivne - unutarnje sile koje nastaju kao posljedica djelovanja vanjskih sila. Intenzitet reaktivnih sila naziva se naprezanje, a stanje tijela pod djelovanjem naprezanja naziva se napregnuto stanje. Ako su aktivne - vanjske sile po iznosu veće od unutarnjih - reaktivnih, dolazi do trajnih promjena na tijelu. Pri tome ne dolazi do razaranja, mijenja se samo oblik deformiranog tijela.

Intenzitet djelovanja reaktivnih - unutarnjih sila označava se kao vektor punog naprezanja i označava se sa \vec{S} .

$$\vec{S} = \frac{dF}{dA} \quad (2.4)$$

Vektor punog naprezanja se može rastaviti na dvije komponente naprezanja: normalno naprezanje σ i smično naprezanje τ . Normalno naprezanje σ leži okomito na promatranu plohu R , a smično naprezanje τ leži u ravnini promatrane plohe R . Ako se elementarni paralelepiped na presječnoj ravnini R , sa stranicama d_x , d_y i d_z , a čiji su rubovi a , b i c orijentirani u pravcu koordinatnih osi promotri u koordinatnom sustavu, u svakoj ravnini elementarnog paralelepipeda, slika 2.6., djeluje jedno normalno i dva smična naprezanja.



Slika 2.6. Naprezanja u elementarnom paralelepipedu [4]

Indeksi koji stoje uz normalno naprezanje pokazuju pravac njihovog djelovanja prema usvojenom koordinatnom sustavu. Prvi indeks uz smično naprezanje, analogno indeksu uz normalno naprezanje, pokazuje pravac njihovog djelovanja dok drugi indeks pokazuje pravac normale na plohu u kojoj se on nalazi.

Vektor punog naprezanja čini devet komponenti naprezanja i to:

- tri komponente normalnih naprezanja σ_x , σ_y , σ_z i
- šest komponenti smičnih naprezanja τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} i τ_{zy} .

Vektora punog naprezanja predstavlja sumu vektora naprezanja po osima x , y i z , odnosno kvadrat vektora punog naprezanja je jednak sumi kvadrata normalnih i smičnih naprezanja.

$$S^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = \sigma_1^2 \cdot a_1^2 + \sigma_2^2 a_2^2 + \sigma_3^2 a_3^2 \quad (2.5)$$

$$S^2 = \sigma_n^2 + \tau^2 \quad (2.6)$$

Normalno naprezanje

$$\sigma_n^2 = (\sigma_1 \cdot a_1^2 + \sigma_2 \cdot a_2^2 + \sigma_3 \cdot a_3^2)^2 \quad (2.7)$$

Smično ili smično naprezanje

$$\tau^2 = S^2 - \sigma_n^2 \quad (2.8)$$

$$\tau^2 = \sigma_x^2 \cdot a_x^2 + \sigma_y^2 a_y^2 + \sigma_z^2 a_z^2 - (\sigma_x a_x^2 + \sigma_y a_y^2 + \sigma_z a_z^2)^2 \quad (2.9)$$

Indeksi x , y i z često se zamjenjuju s indeksima 1,2 i 3, pa je npr. normalno naprezanje po osi x (σ_x) označava sa σ_1 , po osi y σ_2 i po osi z σ_3 .

U teoriji plastične deformacije sva naprezanja mogu se opisati s 9 komponenti i prikazati u simetričnoj matrici koja se naziva tenzor naprezanja:

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Naprezanja se mogu izračunati iz poznatih sila koja djeluje na neko tijelo prema sljedećim izrazima:

$$\sigma_\alpha = \frac{F}{A} \cos^2 \alpha, \quad (2.11)$$

$$\tau_\alpha = \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{2} \sin 2\alpha = \frac{\sigma}{2} \sin 2\alpha \quad (2.12)$$

Iz poznatih naprezanja moguće je odrediti deformacije, kao na primjer iz normalnih naprezanja:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu \cdot (\sigma_2 - \sigma_3)] \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu \cdot (\sigma_3 + \sigma_1)] \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu \cdot (\sigma_2 + \sigma_1)] \quad (2.15)$$

gdje je E modul elastičnosti, a μ Poissonov koeficijent.

Relativna deformacija ostvaruje relativnu promjenu volumena:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{1 - 2\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.16)$$

Teorija deformacije kod oblikovanja metala i njihovih slitina je vrlo složena i obrađuje se posebno.

2.2. Zakon o konstantnosti volumena

Razmatrajući zakonitosti plastične deformacije polazi se od činjenice da se volumen materijala tijekom deformacije ne mijenja, te vrijedi zakon konstantnosti volumena.

U tehnologijama oblikovanja metala valjanjem dolazi do:

- visinske redukcije s h_0 na h_1 : $\Delta h = h_0 - h_1$,
- apsolutnog širenja s b_0 na b_1 : $\Delta b = b_0 - b_1$,
- apsolutnog produljenja s l_0 na l_1 : $\Delta l = l_0 - l_1$.

Pri deformaciji dolazi samo do promjene dimenzija i oblika tijela.

$$V_0 = V_1 = \text{const}, \quad (2.17)$$

$$V_0 = V_1 = h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1 \quad (2.18)$$

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{l_1}{l_0} = \gamma\beta\mu = 1 \quad (2.19)$$

gdje su - γ - faktor redukcije,
 - β - faktor širenja,
 - μ - faktor produljenja.

Ako taj izraz logaritmiramo, dobije se:

$$\frac{\ln h_1}{h_0} + \frac{\ln b_1}{b_0} + \frac{\ln l_1}{l_0} = \ln \gamma + \ln \beta + \ln \mu = 0 \quad (2.20)$$

Iz prikazanih jednadžbi može se zaključiti da je pri plastičnoj deformaciji algebarski zbroj logaritamskih deformacija u tri međusobno okomita smjera jednak nuli. Deformacija u jednom smjeru je suprotnog predznaka u odnosu na druge dvije, te je po iznosu jednaka njihovom zbroju. Iz toga proizlazi da se volumen ne mijenja, mijenja se oblik i dimenzije deformiranog tijela.

2.3. Plastičnost i deformabilnost

Kako je već rečeno, plastična deformacija je promjena oblika i dimenzija proizvoda iz kovinskih materijala bez razaranja. Da bi se metalni materijali mogli oblikovati deformacijom bez razaranja moraju imati odgovarajuća svojstva, kažemo moraju imati svojstvo obradivosti. Pod obradivosti metala i njihovih slitina podrazumijeva se maksimalno moguća deformacija koju metal može izdržati, a da ne dođe do njegovog mehaničkog razaranja. Pojmovi obradivost i plastičnost su se dugo koristili u istom smislu. Iz njih su proizišli pojmovi sposobnost za oblikovanje deformiranjem (deformabilnost) i plastičnost. Pod sposobnosti za oblikovanje deformiranjem (deformabilnost) treba podrazumijevati svojstvo metala ili slitina, određenog oblika, koja omogućava nepovratnu promjenu oblika pri oblikovanju deformacijom u različitim uvjetima deformacije. Sukladno tome mogu se definirati sljedeći pojmovi:

- **plastičnost (P)** je prirodno svojstvo materijala,
- **deformabilnost (D)** je svojstvo materijala da se oblikuje deformacijom u toplom i hladnom stanju
- **obradivost (O)** je svojstvo materijala da se deformira kako plastičnom deformacijom (bez razaranja) tako i s razaranjem (odvajanjem čestica).

Iz toga proizlazi da je sposobnost za oblikovanje deformacijom vezana za sljedeće faktore:

- svojstvo samog metala, koja omogućuje nepovratnu promjenu oblika tijela tj. njegova plastičnost
- uvjete deformacije, koji vladaju pri određenoj tehnologiji oblikovanja
- karakteristike samog deformiranog tijela, njegove dimenzije i oblik.

To znači da na sposobnost za deformaciju utječe suma različitih faktora. Svi oni mogu se svrstati u dvije osnovne grupe:

- faktori plastičnosti
- vanjski (mehanički) faktori

$$D=f(F_p, F_v) \quad (2.21)$$

Plastičnost **P** je stanje materijala kada pri djelovanju sila dolazi do nepovratne promjene oblika i dimenzije, a da pri tome ne dolazi do njegovog mehaničkog razaranja. Faktori plastičnosti ovise o kemijskom sastavu, strukturi, brzini deformacije, temperaturi te veličini i dimenzijama deformiranog tijela. Funkcionalna ovisnost plastičnosti o navedenim faktorima dana je u sljedećoj jednadžbi:

$$P = f(KS, s, v, T, n, V, a) \quad (2.22)$$

rugi faktori kao što su: sheme napregnutog stanja, tehnološka nejednolikost deformacije, brzina deformacije i više uzastopnih deformacija s malim stupnjem redukcije (usitnjenost deformacije), karakteriziraju uvijete deformacije metalnog tijela.

Prema tome, može se reći da je deformabilnost D funkcija faktora plastičnosti i vanjskih faktora:

$$D=f(f_t, f_{b,i}, f_{k,s}, f_r, f_d, f_o, f_{n,s}, f_{r,d}, f_{n,d}, f_{b,d}) \quad (2.23)$$

f_t – faktor temperature
 $f_{b,i}$ – faktor brzine ispitivanja
 $f_{k,s}$ – faktor kemijskog sastava
 f_r – faktor čistoće granice zrna
 f_d – faktor dimenzije tijela
 f_o – faktor oblika tijela
 $f_{n,s}$ – faktor napregnutog stanja
 $f_{r,d}$ – faktor nejednakosti deformacije
 $f_{n,d}$ – faktor usitnjenosti deformacije
 $f_{b,d}$ – faktor brzine deformacije

Kako se iz prethodne jednadžbe vidi sposobnost za deformaciju je složena funkcija većeg broja varijabli čije se vrijednosti mogu mijenjati u širokim granicama i pri tome smanjivati ili poboljšavati sposobnost za deformaciju. Pri tome se plastičnost javlja samo kao jedan od faktora koji utječu na deformabilnost.

Različita tijela će imati različitu sposobnost za deformaciju ako se razlikuju u nekim od faktora koji utječu na sposobnost za deformaciju. Tako na primjer materijali istog kemijskog sastava koji se deformiraju po istim parametrima, ali imaju različite dimenzije, imaju i različitu sposobnost za deformaciju. Ili materijali istog kemijskog sastava i istih dimenzija, ako se deformiraju na različitim temperaturama imaju različitu sposobnost za deformaciju. Važan praktičan značaj ima i činjenica što mnogi faktori koji utječu na sposobnost za deformaciju su međusobno povezani.

Postoji pet stupnjeva deformabilnosti za različite metale i tehnologije njihovog oblikovanja. U prvom stupnju odvija se znatno narušavanje cjeline. Daljnja deformacija proizvoda je nemoguća i uz odgovarajuću korekciju stupnja redukcije. Kod drugog stupnja narušavanje cjeline je znatno manje. Ako se provede odgovarajuća korekcija stupnja deformacije moguća je daljnja deformacija. Kod trećeg stupnja deformabilnosti na površini deformiranog tijela nastaju sitne greške, ali sposobnost za deformabilnost nije narušena. U četvrtom stupnju deformabilnosti javlja se pojedinačno sitno narušavanje koje ne utječe na proces deformacije. Broj i veličina grešaka ne prelazi dozvoljenu granicu. I na kraju, u petom stupnju deformabilnosti, deformacija tijela protječe bez nastanka površinskih grešaka. Pri navedenoj ocjeni uzimaju se o obzir greške koje su nastale tijekom deformacije, a ne greške koje su postojale prije deformacije.

2.3.1. Pokazatelji plastičnosti

Za definiranje plastičnosti u određenim uvjetima koriste se pokazatelji plastičnosti. Oni su podijeljeni u četiri grupe:

- a) analogni,
- b) jednostavni,
- c) složeni i
- d) univerzalni.

a) Analogni pokazatelji

Analogni pokazatelji odgovaraju određenim uvjetima tehnoloških procesa. Koriste se za ocjenu plastičnosti procesa i uvjeta za koji su određeni. Određuju se valjanjem pravokutnih uzoraka „na klin“ u specijalno ekscentrično urezanim kalibrima pri čemu se kao pokazatelj plastičnosti uzima stupanj deformacije ε_{puk} na mjestu pojave prve pukotine:

$$\varepsilon_{puk} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \quad (2.24)$$

gdje je h_0 početna visina a h_1 konačna visina.

Nedostatak ovakvog ispitivanja je u tome što se kod legura s većom plastičnosti često u laboratorijskim uvjetima ne može osigurati pojava pukotine i nemoguće je konstruirati dijagram plastičnosti. Ispitivanje tlačenjem najbolje odgovara uvjetima kovanja. Određivanje pojave prve pukotine je otežano. Mala veličina uzorka u odnosu na stvarne veličine u industrijskim uvjetima čine značajnu razliku kod ispitivanja. Ovi i još drugi faktori čine ovu metodu nedovoljno pouzdanom.

b) Jednostavni pokazatelji

To su pokazatelji dobiveni pri jednostavnim shemama naprezanja: linijski vlak, linijski tlak i uvijanje ili torzija. Dije se u dvije grupe:

1. kod vlaka:

- relativno produljenje ε ,
- relativno produljenje kod loma A ,
- relativna kontrakcija uzorka Z .

2. kod uvijanja do loma:

- broj uvijanja n , $n = f(\gamma)$
- kut uvijanja γ

U oba slučaja ovi pokazatelji daju temperaturni interval maksimalne plastičnosti. Oni, međutim, ne daju mogućnost definiranja kvantitativnih kriterija plastičnosti već samo temperaturni interval maksimalne plastičnosti. Vlačno ispitivanje našlo je široku primjenu. Najpouzdaniji pokazatelj plastičnosti kod ove metode je pojava prve pukotine, što je vrlo teško identificirati. Zbog toga se plastičnost ocjenjuje na osnovi podataka o lomu ispitnog uzorka ili na osnovi relativne kontrakcije.

Najširu primjenu u praksi imaju pokazatelji dobiveni ispitivanjima uvijanjem uzoraka na povišenim temperaturama. Osnovne prednosti ove metode ispitivanja su:

- kod ispitivanja uzoraka uvijanjem prevladavaju smična naprezanja koja igraju veliku ulogu kod svih procesa oblikovanja deformiranjem,
- širok raspon brzina deformacije koje odgovaraju relativnim vrijednostima u industrijskim procesima toplog oblikovanja,
- u odnosu na druga ispitivanja, ispitivanja uvijanjem uzoraka do loma imaju zadovoljavajuću točnost,
- također, u odnosu na druga ispitivanja, ispitivanja uvijanjem uzoraka imaju veliku osjetljivost na strukturne promjene.

Temperaturno područje maksimalnog broja uvijanja ispitivanih uzoraka je područje maksimalne plastičnosti ispitivanog metala. Ova ispitivanja provode se na plastometrima i izrada krivulje ovisnosti $n=f(T)$ je brza i jednostavna.

c) Složeni pokazatelji

Uzimaju u obzir karakter loma kao i ukupan stupanj deformacije. Po Gubkinu se određuje srednja vrijednost rezultata ispitivanja po više metoda:

$$D = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} \quad (2.25)$$

gdje je n broj vrsta ispitivanja. Na osnovi tako dobivenih vrijednosti deformabilnosti Gubkin je predložio proračun sposobnosti za deformaciju po formuli:

$$S_d = \frac{aD + b}{3} \quad (2.26)$$

gdje je a – faktor koji ovisi o metodi a b - faktor koji ovisi o materijalu.

Složeni pokazatelji dobiju se kod ispitivanja razvlačenjem, na tlak, uvijanjem, dinamičkim savijanjem i kod određivanja udarnog rada loma. Osnovni nedostatak ove metode je u određivanju srednje vrijednosti svih pokazatelja, a koji se značajno razlikuju.

d) Univerzalni pokazatelji

Univerzalni pokazatelji daju kvantitativnu ocjenu plastičnosti. Dobiju se svođenjem jediničnih pokazatelja koji se određuju laboratorijskim metodama ispitivanja (vlakom, tlakom, uvijanjem) na jedan ekvivalentni pokazatelj koji ne ovisi o shemi napregnutog stanja, a time ni o metodi ispitivanja. Pokazatelj plastičnosti P je omjer smičnog naprezanja i faktora naponskog stanja n :

$$P = \frac{\tau_s}{n} \quad (2.27)$$

$$n = \frac{2}{1 + \sqrt{(1 - Z) - (1 - Z_p)}} \quad (2.28)$$

Z - kontrakcija probe na mjestu loma, Z_p - kontrakcija probe do pojave sužavanja.

U slučaju ispitivanja uvijanjem faktora naponskog stanja n jednak je 1.

2.3.2. Analiza utjecajnih faktora na plastičnost

Plastičnost (P) kao stanje metala, a ne njegovo svojstvo, ovisi od niza faktora:

$$P = f(KS, s, t, v, n, V, a) \quad (2.29)$$

Ks - kemijskog sastava,

s - strukture,

T - temperature

v - brzine deformacije

n - sheme naponskog stanja

V - dimenzija deformiranog uzorka

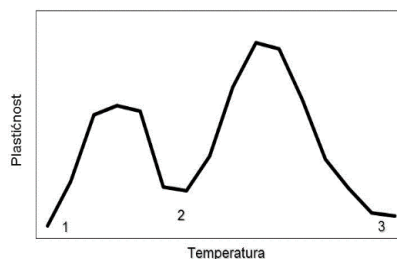
a - okružujuća sredina.

Utjecaj kemijskog sastava i strukture na plastičnost je velika. Najbolju plastičnost imaju čisti metali. Prisustvo primjese pogoršava plastičnost. Intenzitet pogoršanja plastičnosti ovisi o vrsti primjese i načinu vezivanja u osnovnom metalu. Netopive primjese, primjese po granicama zrna u obliku mreže, veća razlika u promjerima atoma i veća koncentracija slobodnih elektrona pogoršavaju plastičnost.

Do pogoršavanja plastičnosti može doći i ako primjese s osnovnom komponentom čine lako topljive eutektike u temperaturnim intervalima taljenja ovog eutektika. Druge komponente u strukturi s različitom kristalnom rešetkom pogoršavaju plastičnost. Nepovoljan utjecaj na plastičnost imaju i strukturne nehomogenosti. Dobru plastičnost imaju metali s plošno centrirane kubične rešetke (Pb, Al, Pt, Au, Ag, Cu), a najmanju plastičnost imaju metali s gusto složenom heksagonalnom rešetkom (Mg, Cd, Zn, Ti).

2.3.2.1. Utjecaj temperature

Porastom temperature plastičnost raste. Tako čelik ima najveću plastičnost na temperaturama rekristalizacije.



Slika 2.7. Utjecaj temperature na plastičnost [1]

U području $\alpha \rightarrow \gamma$ transformacije, slika 2.7, (područje 2) plastičnost se smanjuje zbog različitog ponašanja α i γ kristalne rešetke pri deformaciji. Na visokim temperaturama (područje 3), zbog porasta zrna, plastičnost također opada.

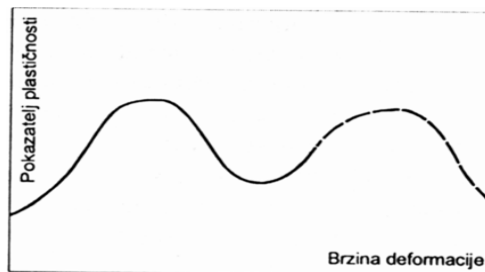
2.3.2.2. Utjecaj brzine deformacije

Utjecaj brzine deformacije na plastičnost razmatramo s dva aspekta:

1. brzina deformacije direktno ili indirektno (putem toplinskog efekta ili izmjenom faktora vanjskog trenja) pokazuje utjecaj na otpor deformaciji, a samim time i na plastičnost,
2. u pogledu vremena dovoljnog ili nedovoljnog za nastajanje fizikalno–kemijskih promjena u strukturi, koje mogu nastati u procesu deformacije.

Plastičnost se pogoršava s povećanjem brzine deformacije, slika 2.8. Kad brzina deformacije u toplom stanju poraste iznad brzine dinamičke rekristalizacije, neće biti vremena za potpunu rekristalizaciju. Što je razlika u tim brzinama veća, manji broj kristalnih zrna će rekristalizirati i to će dovesti do pogoršanja plastičnosti.

Utjecaj brzine deformacije na plastičnost kod hladne deformacije znatno je manji, jer se ne odvijaju dinamička rekristalizacija i dinamički oporavak.



Slika 2.8. Utjecaj brzine deformacije na plastičnost kod tople deformacije [1]

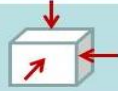
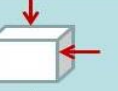
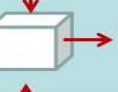
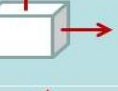
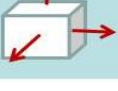
2.3.2.3. Utjecaj stanja naprezanja materijala

Naprezanje je unutarnja sila u materijalu koja se suprotstavlja djelovanju vanjske sile. Shema naprezanja pokazuje djelovanje naprezanja u koordinatnom sustavu, a koja se suprotstavlja vanjskoj sili. Značajan utjecajni faktor na plastičnost metala je stanje naprezanja. Ovisno o shemi napregnutog stanja mijenja se plastičnost i otpor deformaciji, tablica 2.1.

Plastičnost je označena s 1D (loše) do 7D (vrlo velika), a otpornost deformaciji od 1K (mali) do 4K (vrlo veliki). Slabija plastičnost metala biti će pri njegovom oblikovanju izvlačenjem nego prešanjem. Na osnovi strukture metala mogu se unaprijed predvidjeti sheme napregnutog stanja pri kojima je moguće njihovo uspješno oblikovanje.

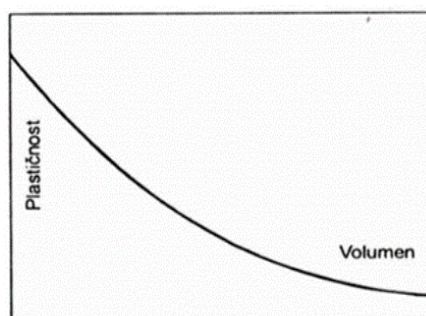
Utjecaj mehaničke sheme deformacije na plastičnost je veći što je manja osnovna plastičnost metala.

Tablica 2.1. Stanje naprezanja, plastičnost i deformacijski otpor [4]

Shema		Plastičnost	Deformacijski otpor
	P(- - -)	Vrlo velika 7 D	Vrlo velik 4K
	R(- - 0)	Nešto manja 6 D	Nešto manji 3K
	R(- + 0)	Manja 4 D	Mali 1K
	R(+ + 0)	Vrlo mala 2 D	Nešto manji 3K
	P(+ + +)	Loša 1 D	Vrlo velik 4K

2.3.2.4. Utjecaj dimenzija deformiranog tijela

Dimenzije deformiranog tijela mogu pokazati veći utjecaj na plastičnost, slika 2.9. Kod deformacije metala većeg volumena nije uvijek moguće ostvariti jednaku deformaciju po cjelom presjeku.



Slika 2.9. Utjecaj volumena na plastičnost kod tople deformacije [1]

Na primjer, kod valjanja slabova i blumova većih dimenzija, u prvoj/prvima provlakama nije moguće postići jednaku deformaciju po presjeku slaba ili bluma. Da bi se to postiglo u procesu valjanja, u prvim provlakama slabovi/ blumovi se okreću u položaj maksimalne redukcije.

2.3.3. Mogućnosti povećanja plastičnosti

Osnovni parametri povećanja plastičnosti su sljedeći:

- reguliranje kemijskog sastava metala iste strukture,
- osiguranje optimalnih temperaturno- brzinskih uvjeta deformacije,
- primjena odgovarajućeg jednolikog zagrijavanja i

- odabir najpovoljnije sheme deformacije.

Kao kriterij plastičnosti služi relativno sažimanje, jednačba 2.24, izraženo u % (po Čížikovu):

$$\varepsilon_{puk} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100, \%$$

h_p – visina prije deformacije, h_k – visina poslije deformacije

Prema granici plastičnosti svi metali i slitine mogu se podijeliti u sljedeće grupe:

najplastičniji	$\varepsilon = 80 \dots do \dots 100, (\%)$
visoko plastični	$\varepsilon = 60 \dots do \dots 80, (\%)$
srednje plastični	$\varepsilon = 40 \dots do \dots 60, (\%)$
nisko plastični	$\varepsilon = 20 \dots do \dots 40, (\%)$
krhki metali	$\varepsilon < 20, (\%)$

Primjenom specijalnog termo-mehaničkog postupka mogu se mijenjati brzine i temperature deformacije i na taj način povećati plastičnost.

2.4. Deformacijski otpor

Otpor deformaciji je otpor što ga pruža materijal promjeni svoga oblika, naziva se i prirodni deformacijski otpor, a često i specifični deformacijski otpor (k_f). Ovisan je o vrsti materijala, načinu i uvjetima deformacije:

$$k_f = f(\text{vrsta materijala, način i uvjeti deformacije}) \quad (2.30)$$

Dakle, sile deformacije moraju savladati otpor što ga materijal pruža promjeni svoga oblika i otpor koji je uvjetovan postupkom deformacije. Predstavlja ravnotežu unutarnjih sila koje se suprotstavljaju promjeni oblika. Uz k_f , postoji i k_w . k_w je ukupni otpor deformaciji koji u sebi sadrži i plastičnost i utjecaj postupaka oblikovanja. Teorijom plastičnosti može se postaviti izraz koji definira deformacijsku silu potrebnu za ostvarivanje zadane deformacije. Izraz ima oblik:

$$k_w = f(k_f, F_t, F_s) \quad (2.31)$$

gdje su: k_f – prirodni deformacijski otpor, F_t – sila za savladavanje vanjskog trenja, F_s – sila za savladavanje unutarnjeg smika.

2.4.1. Utjecajni parametri na otpor deformacije

Prirodni deformacijski otpor ovisan je o vrsti materijala (kemijski sastav), strukturi, temperaturi, brzini i stupnju deformacije.

$$k_f = f(Ks, s, T, v, \varepsilon) \quad (2.32)$$

gdje je: Ks – kemijski sastav, s – strukturno stanje, T – temperatura, v – brzina deformacije i ε – stupanj deformacije

2.4.1.1. Utjecaj kemijskog sastava

Utjecaj kemijskog sastava na otpor deformaciji povezan je s utjecajem elemenata na strukturu u polaznom stanju. Općenito se može reći da dobru plastičnost imaju Pb, Al, Pt, Au, Ag i Cu. Nešto manju plastičnost imaju Fe, Cr, Mo i V, dok Mg, Cd, Zn i Ti imaju lošu plastičnost. Legirni elementi povećavaju deformacijski otpor. Povećanjem udjela ugljika u čeliku na temperaturama iznad 950 - 1050°C povećava se otpor deformaciji. Međutim, pri daljnjem povećanju sadržaja ugljika i temperaturama od 1000°C otpor deformaciji se nešto smanjuje, što je posljedica sniženja temperature taljenja zbog povećanog sadržaja ugljika.

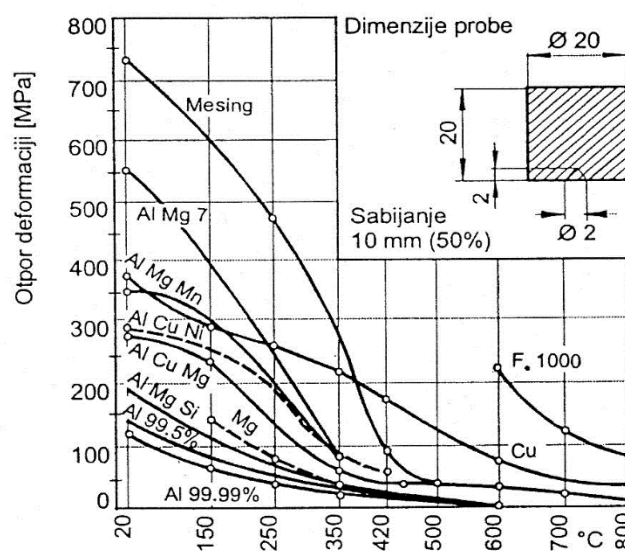
U pravilu legirajući elementi povećavaju otpor deformaciji, a kod visoko legiranih čelika pri visokim temperaturama povećavaju otpor deformaciji i nekoliko puta. Čelici legirani kromom i molibdenom također pokazuju porast prirodnog deformacijskog otpora k_f . Razloga tome je što su krom i molibden vezani kao karbidi. Kod čelika jednog kemijskog sastava na tok prirodnog deformacijskog otpor k_f utječe stupanj čistoće čelika, stvaranje pojedinih faza, polazno stanje materijala, odnosno izrada čelika i pred – deformacija. Ovi parametri su direktno vezani za izradu i preradu čelika, a njihov utjecaj se istražuje u ovisnosti od odstupanja rezultata ispitivanja.

U literaturi postoji više empirijskih formula za kvantitativno izračunavanje deformacijskog otpora u ovisnosti o kemijskom sastavu i temperaturi. Ovisnost deformacijskog otpora o kemijskom sastavu aluminija i aluminijskih legura prikazana je na slici 2.10. Npr. po Ekelundu:

$$k_f = (1,4 + C + Mn + 0,3Cr) \cdot (14 - 0,01T) \quad (2.33)$$

gdje su: T– temperatura, u °C; C, Cr, Mn – udjeli ugljika, kroma i mangana u %.

Navedena jednadžba ne uzima u obzir utjecaj stupnja i brzine deformacije kao ni utjecaj ostalih legirajući elemenata, zbog čega nije našla značajnu primjenu.



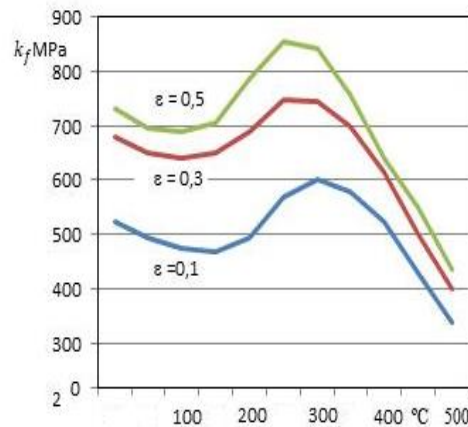
Slika 2.10. Ovisnost deformacijskog otpora o kemijskom sastavu Al i Al slitina [1]

U literaturi postoje i drugi izrazi za određivanje pripadnog deformacijskog otpora u ovisnosti o kemijskom sastavu, ali uglavnom oni kao i navedeni izraz od Ekelunda danas nemaju veći značaj. To je zato što je posljednjih tridesetak godina razvojem suvremenih metoda za određivanje prirodnog deformacijskog otpora, skoro za sve komercijalne čelike ispitan prirodni deformacijski otpor i njegove ovisnosti o temperaturi i brzini deformacije.

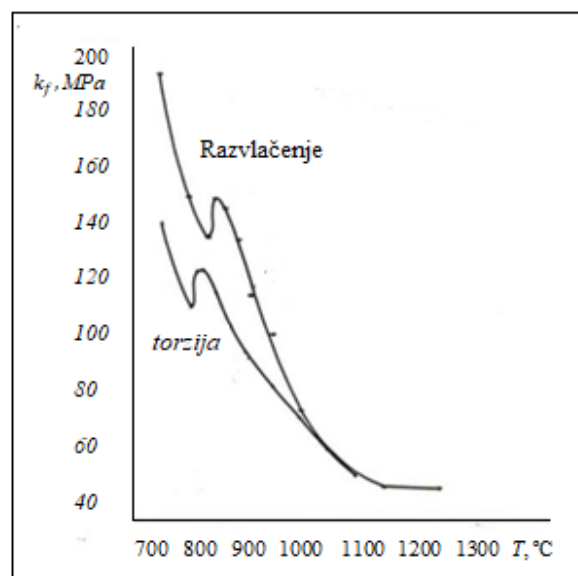
2.4.1.2. Utjecaj temperature deformacije

Povećanjem temperature otpor deformaciji se smanjuje. Smanjenje otpora deformacije s povećanjem temperature nije jednoliko, slika 2.11. U temperaturnom intervalu 150 - 300 °C, otpor deformaciji se povećava zbog izdvojenih disperznih čestica druge faze koje ometaju plastični tok deformacije. Utjecaj temperature ispitivanja treba promatrati zajedno s utjecajem brzine deformacije.

Istraživanja na mikrolegiranom čeliku su pokazala da u području deformacijom inducirane precipitacije dolazi do povećanja prirodnog deformacijskog otpora, slika 2.12.



Slika 2.11. Ovisnost prirodnog deformacijskog otpora o temperaturi i brzini ispitivanja za čelik



Slika 2.12. Utjecaj niobija na pripadni deformacijski otpor (10)

Što je viša temperatura čelika to je manji otpor deformacije i po pravilu bolja plastičnost. Suviše visoka temperatura zagrijavanja može uzrokovati pregrijanost, prekomjernu oksidaciju, razugljičenje i sl.

Osim temperature značajni utjecajni parametri na otpor deformacije i plastičnost u realnim uvjetima su brzina deformacije, te režim i trajanje procesa zagrijavanja čelika. Nepravilan izbor navedenih parametara dovodi do stvaranja toplinskih naprezanja koja pogoršavaju plastičnost i dovode do stvaranja unutarnjih pukotina. Navedeni parametri imaju različit značaj za različite grupe čelika:

- **Niskougljični čelici** imaju visoku toplinsku provodljivost i dovoljnu plastičnost pa se u temperaturnom intervalu 0-500°C mogu brzo zagrijavati, bez štetnih posljedica.
- **Ugljični čelici** sa srednjim sadržajem ugljika znatno slabije provode toplinu od niskougljičnih čelika i imaju slabiju plastičnost, naročito u lijevanom stanju. Zato se u početku zagrijavanje mora provoditi sporije. Ugljični čelici s visokim sadržajem ugljika posebno su skloni toplinskim naprezanjima pri brzom zagrijavanju. U hladnom stanju plastičnost im je mala
- **Niskolegirni čelici** s visokim sadržajem C i legirnih elemenata naročito su osjetljivi na naprezanja pri zagrijavanju. Naprezanja pri zagrijavanju ovise o sadržaju ugljika, vrsti i sadržaju legirnog elementa. Zato se moraju sporo zagrijavati.
- **Feritni čelici** imaju dobru plastičnost i neosjetljivi su na toplinska naprezanja (osim u slučaju pojave sigma faza)
- **Martenzitni čelici** najviše su skloni toplinskim naprezanjima i pojavi toplih i hladnih pukotina. Redovito su u njima prisutna i unutarnja naprezanja nastala pri hlađenju nakon prethodne faze obrade. Time im je i plastičnost jako niska. Zagrijavanje i hlađenje moraju biti spori i strogo kontrolirani.
- **Austenitni visokolegirni čelici** imaju izuzetno nisku toplinsku provodljivost i veliko toplinsko širenje. To dovodi do velikih temperaturnih razlika po presjeku i pojavu znatnih toplinskih naprezanja. Međutim, ovi čelici imaju austenitnu strukturu i kod sobne temperature pa su vrlo plastični, ali se zbog stvaranja pukotina moraju usporeno zagrijavati.

2.4.1.3. Utjecaj brzine deformacije

Općenito se može reći da se s povećanjem brzine deformacije povećava otpor deformaciji, a snižava plastičnost. Promjena brzine kod hladne plastične deformacije ne utječe na otpor deformaciji u određenom intervalu. Kod velikih brzina utjecaj je vidljiv zbog zaostajanja brzine plastične deformacije u usporedbi s brzinom elastične deformacije. Kod tople plastične deformacije istovremeno se odvijaju dva procesa suprotnih utjecaja na otpor deformaciji: očvršćavanje (deformacija) i omekšavanje (rekristalizacija). U ovisnosti o njihovom odnosu na određenoj temperaturi, mijenjat će se i otpor deformaciji. Pri maloj brzini tople deformacije, rekristalizacija će pratiti deformaciju. Pri velikim brzinama deformacije brzina rekristalizacije ne može pratiti brzinu deformacije pa je omekšavanje oporavkom i rekristalizacijom nepotpuno. Zbog toga se otpor deformacije povećava.

Postoji u literaturi više izraza za analitičko određivanje ovisnosti otpora deformacije o brzini deformacije. Najčešće se navode jednadžbe prema Ludwiku i Reitu :

Ludwik-u:

$$k_f = k_0 + m \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (2.34)$$

Reit-u:

$$k_f = k_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^n \quad (2.35)$$

gdje su n , m – koeficijenti koji ovise o vrsti materijala i imaju u navedenim izrazima različite vrijednosti.

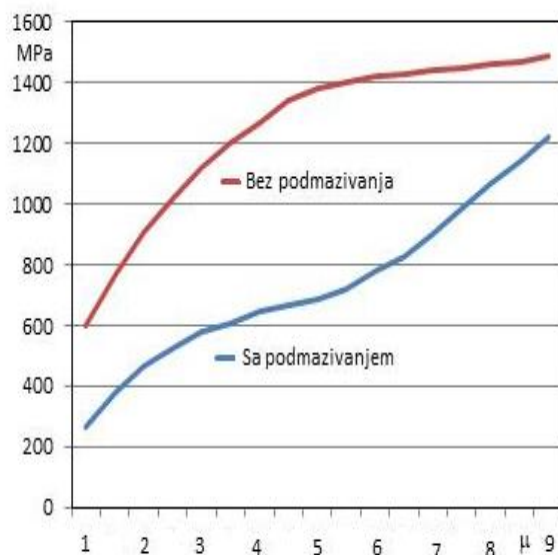
Kod velikih brzina deformacije, moguće je samo djelomično omekšavanje. To znači, da je kod velikih brzina deformacije otpor deformaciji veći. Međutim, ovdje treba naglasiti da kod velikih brzina deformacije, uslijed toplinskog efekta, dolazi do povećanja temperature, povećanja stupnja rekristalizacije i smanjenja njegovog otpora deformaciji. Toplinski efekt ima znatno manji utjecaj s povećanjem temperature.

2.4.1.4. Utjecaj stupnja deformacije

Utjecaj stupnja deformacije na specifični otpor deformaciji pri konstantnoj temperaturi i brzini deformacije predstavlja krivulju tečenja. Pri hladnoj preradi odvija se samo proces deformacije, ali ne i rekristalizacije. Povećanjem stupnja deformacije povećava se očvršćivanje i otpor deformaciji.

2.4.2. Ovisnost deformacijskog otpora o kontaktnom trenju

Kontaktno trenje ima značajan utjecaj na otpor deformaciji. Povećanjem faktora kontaktnog trenja otpor deformaciji raste, slika 2.13.



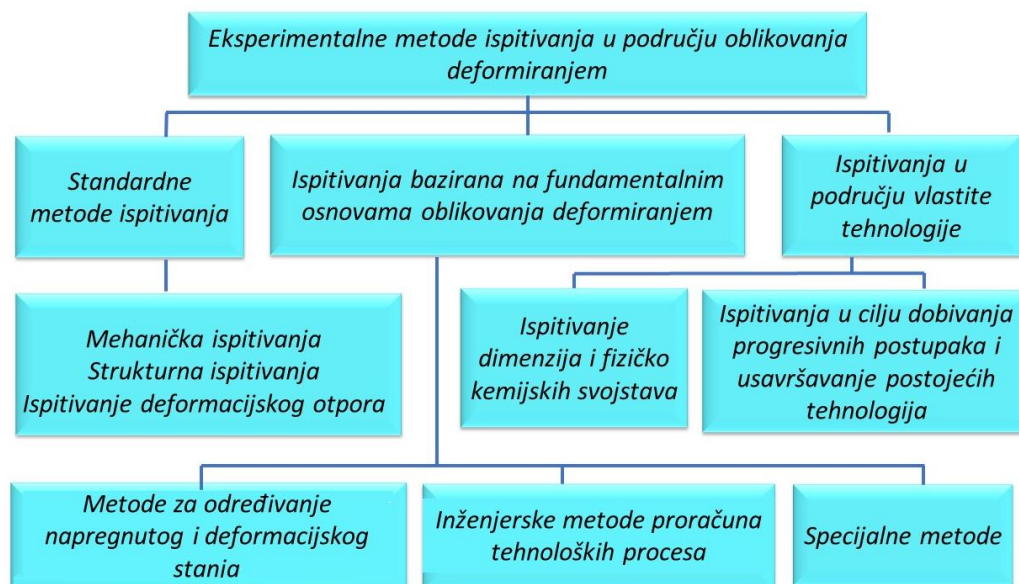
Slika 2.13. Ovisnost otpora deformaciji o kontaktnom trenju

2.5. Metode ispitivanje plastičnosti i otpora deformaciji

Intenzivan razvoj tehnologija u području oblikovanja metala deformiranjem zahtijevao je brz razvoj teorije procesa koji se pri tom odvijaju i samim tim brzi razvoj metoda ispitivanja ponašanja metala kod oblikovanja deformacijom. Sve teorijske spoznaje čvrsto su vezane na fundamentalne znanosti (matematika, mehanika i fizika metala) i na razvoj tih znanosti. Na osnovi tih spoznaja razvile su se metode za teorijska razmatranja plastičnosti metala. Pomoću njih moguće je proučiti:

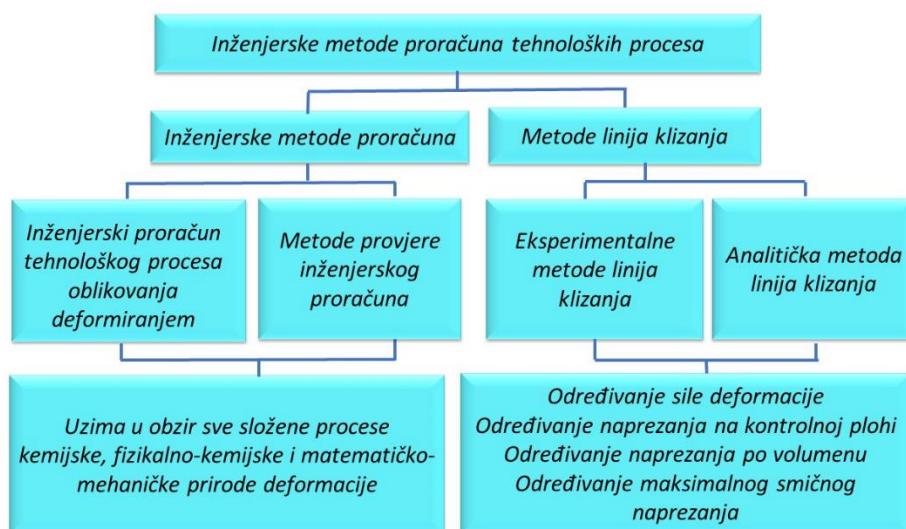
- kinetiku procesa deformacije (napregnuto i deformirano stanje)
- tečenje metala u eksperimentalnim zonama deformacije
- kontaktni prijenos na dodirnim plohama u zoni deformacije
- modeliranje procesa plastične prerade metala
- deformacije I, II i III reda
- metode progresivnih postupaka u području vlastite tehnologije.

Općenito, sve metode ispitivanja ponašanja metala i njihovih slitina kod oblikovanja deformacijom mogu se podijeliti na standardne metode, metode koje se koriste za istraživanja novih materijala i tehnologija, a bazirane su na fundamentalnim osnovama oblikovanja deformiranjem i specijalne metode prilagođene određenoj tehnologiji, slika 2.14.



Slika 2.14. Osnovna podjela metoda ispitivanja u području oblikovanja deformiranjem [4]

Najveću primjenu imaju inženjerske metode koje se bave proračunom pojedinih procesa, slika 2.15. Uzimaju u obzir sve složenosti te tehnologije i pojedinačnog procesa unutar te tehnologije kao i karakteristike materijala koji se oblikuje istom tehnologijom.



Slika 2.15. Inženjerske metode proračuna procesa oblikovanja deformacijom [4]

Najčešće korištene laboratorijske metode za ispitivanje plastičnosti i deformacijskog otpora su sabijanje, vlak i torzija (uvijanje), tablice 2.2. Osim navedenih koristi se jednostavni kovački pokus, tlačni pokus u toplom, pokus toplog savijanja i drugi.

Tablica 2.2. Metode ispitivanja plastičnosti i deformacijskog otpora čelika[4]

Parametri pokusa	SABIJANJE	TOTZIJA	VLAK
Postojanost temperature	Samo kod stepenastog sabijanja	Uzorak se zagrijava tijekom pokusa	Uzorak se zagrijava kod deformacije iznad $0,01/s^{-1}$
Mogućnost deformacije	Do $1000 s^{-1}$	Do $20 s^{-1}$	Do $5 s^{-1}$ Pri udarnom vlaku od $1000 s^{-1}$
Maksimalna veličina deformacije	Do $\ln(h_0/h_1) \leq 2$	Metoda nije ograničena	Do $\ln(h_0/h_1) \leq 7$
Mogućnost programiranja deformacije	OGRANIČENO	Moguće	OGRANIČENO
Deformacijski otpor	DA	DA	OGRANIČENO
Plastičnost	NE	DA	DA

Ako se zahtjeva održavanje stalne temperature, ispitivanje se mora provoditi u peći, no temperatura uzorka neće biti stalna za vrijeme ispitivanja, jer se i sam materijal zagrijava što su brzina i stupanj deformacije veći. Suvremenija oprema omogućava i ispitivanje pri konstantnoj temperaturi tako što se u ispitne uzorke postavljaju termoparovi koji mjere temperaturu, a regulacijska oprema regulira rad peći.

Brzina deformacije ima značajan utjecaj na deformacijski otpor. Zato se kod izbora metode određivanja deformacijskog otpora odabire ona koja ima široko područje promjene brzine deformacije, tablica 2.3.

Tablica 2.3. Brzine deformacije u ovisnosti o metodi ispitivanja [4]

Primjenjena metoda		Maksimalna brzina deformacije, ϵ , s ⁻¹
Tehnološki postupak		
Valjaonica		
1	lakih profila	200
	debelih limova	10
	širokih traka	200
	blokova pruga	10
2	Preša	1
3	čekić	500
Laboratorijski pokus		
1	sabijanje	25
2	sabijanje plosnatog uzorka	1000
3	torzija	20
4	vlak hidraulički	5
5	vlak udarom	1000

Iz tablice je vidljivo da se laboratorijskim metodama ispitivanja mogu postići vrlo velike brzine deformacije, veće od onih koje se ostvaruju u industrijskim uvjetima. Maksimalna deformacija ograničena je metodom ispitivanja i kvalitetom materijala. Tako će primjerice pri torzijskom ispitivanju krhki materijal imati mali broj uvijanja do loma, u usporedbi s visoko plastičnim koji izdrži i do nekoliko stotina uvijanja do loma.

2.5.1. Određivanje deformacijskog otpora razvlačenjem

Najviše primjenjivana metoda je vlačni pokus u toplom stanju. Provodi se na kidalicama koje imaju peć za zagrijavanje uzorka. Na slici 2.16. prikazana je kidalica Zwick za određivanje deformacijskog otpora. Peć je postavljena na traverzama kidalice.



Slika 2.16. Kidalica za ispitivanje u toplom stanju

Prije ispitivanja napravi se plan pokusa koji mora sadržavati broj ispitivanih uzoraka i temperature na kojima se provode ispitivanja. Peć se zagrijava na temperaturu ispitivanja. Zatim se pripremljeni standardni ispitni uzorak postavi u čeljust kidalice i zagrijava se na temperaturu ispitivanja propisano vrijeme (koje je ovisno o vrsti metala ili slitine koja se ispituje). Temperatura uzorka se mjeri i očitava na skali, slika 2.16, a sila na skali ili kao ispis na papiru. Danas postoje puno suvremenije kidalice s znatno većim mogućnostima mjerenja temperature i sile.

2.5.2. Određivanje deformacijskog otpora uvijanjem

Pokus toplog uvijanja je jedina metoda koja zadovoljava u pogledu traženih veličina. Dovoljno je osjetljiva da se ocijeni kvaliteta i plastičnost čelika. Kod ove metode moguće su dosta velike brzine deformacije. Ako se cilindrični uzorak dužine l kružnog poprečnog presjeka, čiji je jedan kraj fiksiran a drugi slobodan, zakreće momentom M_t za određeni kut ω , dolazi do torzijske deformacije. Deformacija pri torziji ovisna je o obliku ispitnog uzorka i torzijskom kutu:

$\gamma = \frac{r}{l} \omega$, gdje je r - polumjer probe, l - duljina probe, ω - kutna brzina.

U laboratorijskim uvjetima moguća je simulacija procesa. Tako npr. kod simulacije procesa valjanja, torzijskim ispitivanjem može se postaviti veza između broja okretaja motora plastometra i parametara valjanja dana je izrazom:

$$N = 318 \frac{\varepsilon \cdot \omega}{\alpha}, \quad \frac{1}{min} \quad (2.36)$$

N - broj okretaja motora plastometra

ε - stupanj deformacije

ω - kutna brzina valjanja,

α - kut zahvata

$$\varepsilon = \frac{\pi \cdot d}{l} \frac{\omega}{60}, \quad s^{-1} \quad (2.37)$$

Smično naprezanje se izračunava pomoću izmjerenog momenta torzije:

$$\tau = \frac{l}{2\pi r^3} 3M_t \quad (2.38)$$

U praktičnim uvjetima prevladava jednoosno vlačno stanje naprezanja, stoga je veza između vlačnog i smičnog naprezanja dana izrazom:

$$\sigma = \tau\sqrt{3} = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot r^3} \cdot 3M_t\sqrt{3} \quad (2.39)$$

Usporedba za stupanj deformacije:

$$\varepsilon = \gamma \cdot \frac{l}{\sqrt{3}} = \frac{\pi \cdot d}{l \cdot \sqrt{3}} \cdot \omega \quad (2.40)$$

Usporedba za brzinu deformacije:

$$\varphi = \varepsilon \cdot \frac{l}{\sqrt{3}} = \frac{\pi \cdot d}{l \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{N}{60}, s^{-1} \quad (2.41)$$

gdje je N broj okretaja (uvijanja) ispitnog uzorka do loma. Ovi izrazi koriste se u praksi. Kriterij za ocjenu sposobnosti oblikovanja (plastičnosti) koristi broj okretaja ispitnog uzorka do loma.

Broj okretaja ovisi o:

- kvaliteti čelika,
- obliku probe,
- temperaturi,
- brzini okretanja motora stroja itd.

Svi uređaji za ispitivanje torzijskih pokusa su vrlo slični. slika 2.17, prikazuje shemu uređaja za izvođenje torzijskog pokusa, a naziva se plastometar.

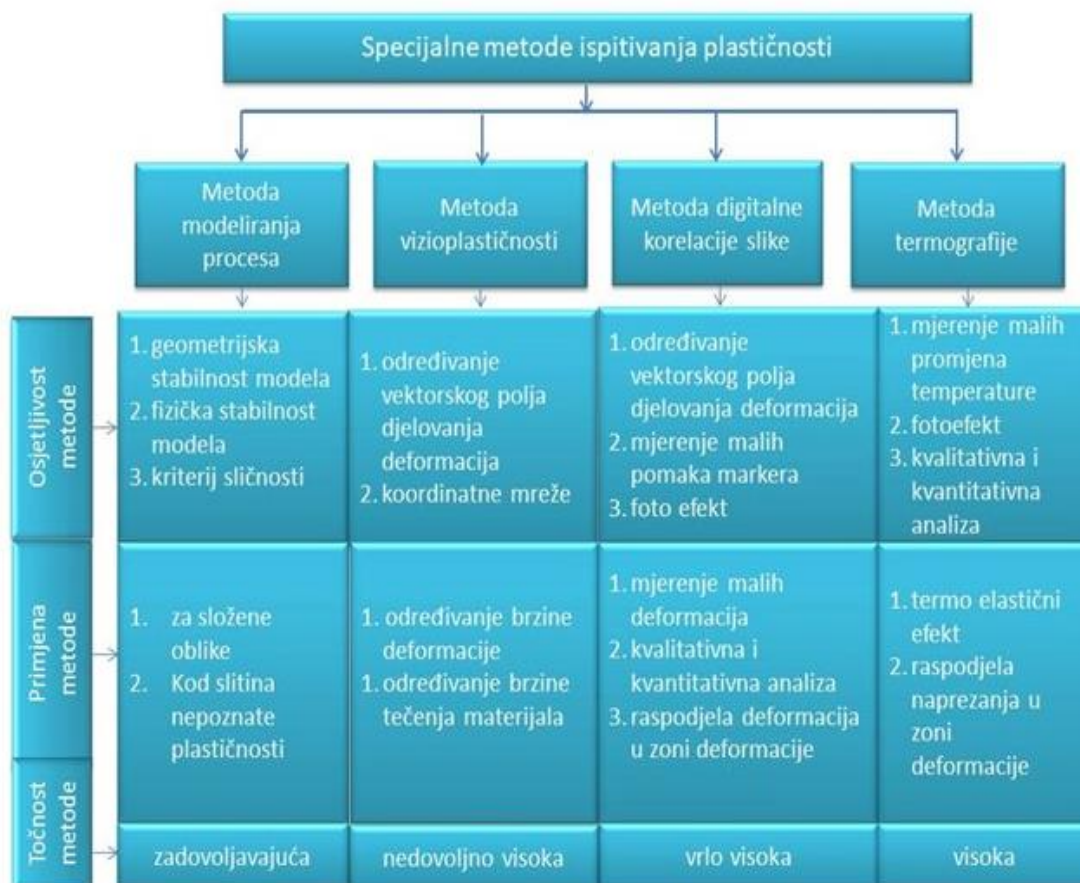


Slika 2.17. Plastometar

Plastometar se sastoji od motora A koji pokreće rotirajuću glavu D. Broj okreta regulira se preko reduktora B. Uzorak je postavljen tako da je s jedne strane vezan na rotirajuću glavu D, a s druge na fiksnu glavu F. Uzorak se zagrijava indukcijski na traženu temperaturu u induktor E. Kod ispitivanja je potrebno registrirati moment motora, broj okreta do loma i vrijeme. Promjene ovih veličina prenose se do instrumenta za registraciju.

2.5.3. Nove metode u ispitivanju plastičnosti i otpora deformaciji

Danas se u istraživanju plastičnog ponašanja materijala koriste metode digitalne korelacije slike (DIC) i termografije, slika 2.18.

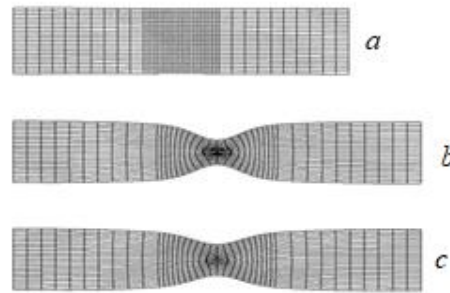


Slika 2.18. Specijalne metode ispitivanja plastičnosti

Posljednjih desetak godina dolazi do razvoja novih metoda u istraživanju toka materijala tijekom deformacije. Napretkom digitalne tehnologije usavršavaju se i neke postojeće metode istraživanja toka deformacije. Većina od tih metoda baziraju se i na video tehnologiji. Uz kvantitativne vrijednosti promjene nekih fizikalnih veličina, koji opisuju tok deformacije, daju i kvalitativne informacije u vidu vizualnih prikaza promjena u zoni deformacije. Novim metodama je moguće stoga vizualizirati mjesto formiranja zone deformacije, tok materijala, raspodjelu naprežanja u zoni deformacije, te veličinu i smjer odvijanja deformacije.

2.5.3.1. Vizioplastičnost

Jedna od novijih metoda ispitivanja koja omogućuje uz kvantitativna mjerenja ujedno i vizualizaciju toka materijala je i metoda vizioplastičnosti, slika 2.19.

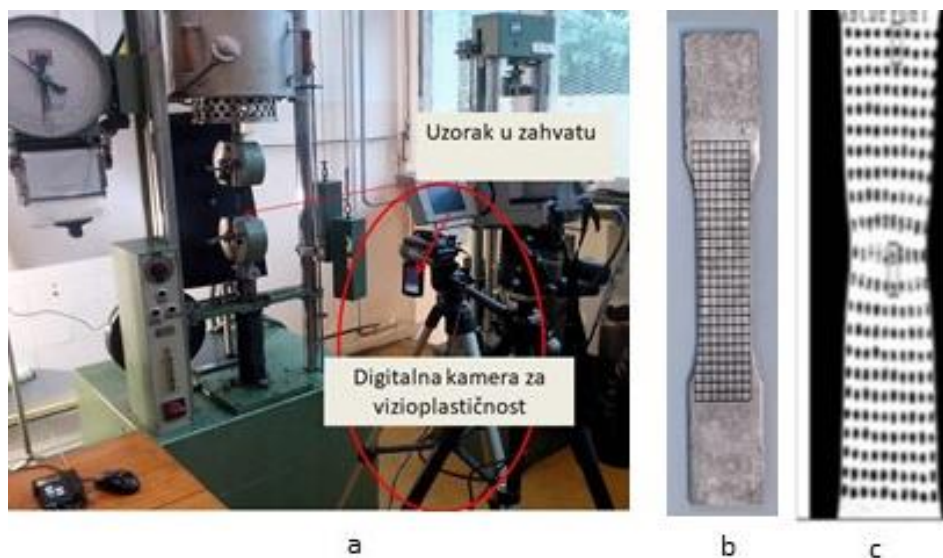


Slika 2.19. Primjer mreže (a) prije deformacije, (b) i (c) nakon deformacije [11]

Vizioplastičnost je metoda određivanja raspodjele deformacija, brzina deformacije i toka materijala po zoni deformacije. Vizioplastičnost nije nova metoda, korištena je posljednjih tridesetak godina. Uveo ju je Thomsen, a razvili Shabaik i Kobayashi.

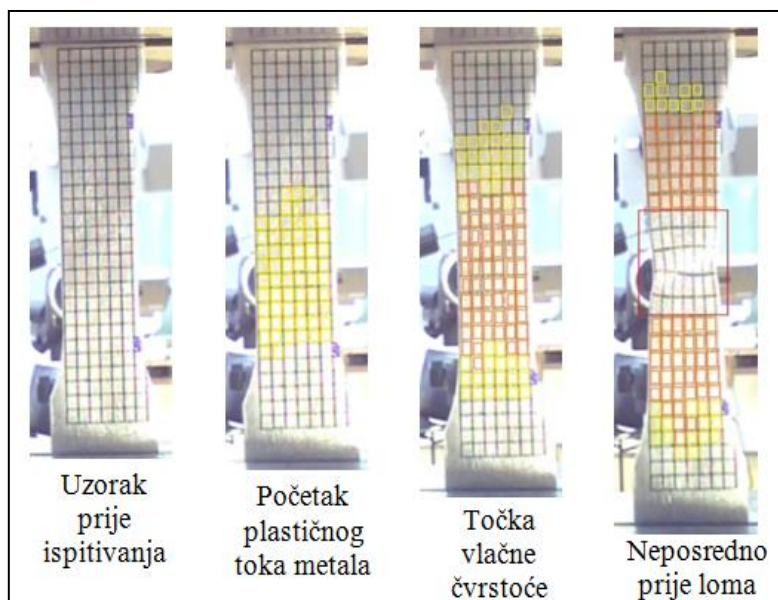
Ispitivanja se provode statičkim vlačnim pokusom na uzorcima, okruglog ili plosnatog presjeka na kojima su ucrtane mreže ili nanošeni pravilno raspoređeni markeri. Mreža se može nanositi urezivanjem crtalom u površinu uzoraka pri čemu urezane linije mogu predstavljati inicijalne pukotine na uzorku. Kako bi izbjegli potencijalne greške pri mjerenjima, mreža se na uzorak danas nanosi nekom drugom metodom, kao npr. korištenjem sitotiska.

U početku primjene ove metode ispitivali su se uzorci s iscrtanim mrežama i nakon ispitivanja analizirali. Danas se proces deformacije tijekom razvlačenja uzorka snima digitalnom kamerom (slika 2.20). Na taj način moguće je mjerene i brzine deformacije.



Slika 2.20. Ispitivanje metodom vizioplastičnosti a) digitalna kamera, b) uzorak s iscrtanom mrežom, c) uzorak s točkastim markerima [11]

Mjerenje promjena uslijed deformacije provodi se na način da se uspoređuje stanje iscrtanih mreža ili pravilno raspoređenih markera (koja se nanosi na uzorke prije ispitivanja) prije i poslije deformacije, slika 2.21.



Slika 2.21. Mjerenje deformacija metodom vizioplastičnosti [11]

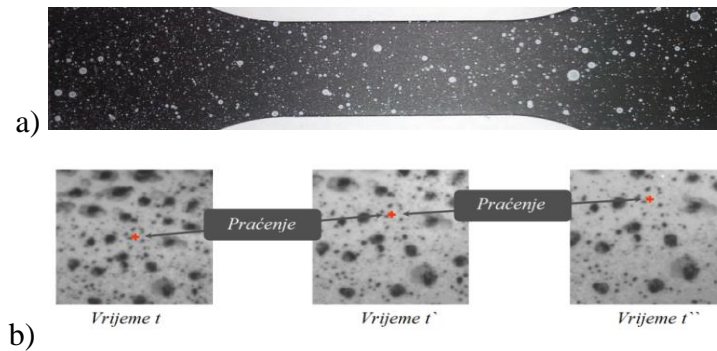
Tijekom deformacije mreža se deformira zajedno s metalom. Mjerenjem dimenzija pojedinih polja mreže prije i nakon deformacije, te njihovom usporedbom, moguće je odrediti iznose deformacije u određenim dijelovima uzorka. Iz izmjerenih deformacija pojedinih polja mreže dobije se prikaz toka materijala u zoni deformacije i stupnjeva deformacije u pojedinim dijelovima uzorka. Ukoliko se ispitivanje provodi uz upotrebu digitalne kamere, naknadnom analizom moguće je odrediti i stupnjeve deformacije u različitim periodima tijekom deformacije.

2.5.3.2. Metoda vizioplastičnosti s digitalnom korelacijom slike (DIC)

Razvojem digitalne tehnologije, a na osnovama metode vizioplastičnosti, razvijena je nova metoda ispitivanja plastičnog ponašanja metala DIC (Digital Image Correlation). Ona se zasniva na praćenju pomaka markera, slično kao i vizioplastičnost. No za razliku od vizioplastičnosti, kod ove metode se markeri nasumično nanose na površinu uzorka i različitih su oblika.

Metoda DIC-a omogućava mjerenje realnih pomaka i deformacijskih polja na površini uzorka pri različitim shemama naprezanja uzorka tijekom deformacije. Tijekom deformiranja površina uzorka se snima s jednom ili dvije digitalne kamere. Radi točnosti mjerenja kamera treba imati što veću rezoluciju i mogućnost veće frekvencije snimanja s čime se osigurava detektiranje i najmanjih promjena pomaka i pri većim brzinama. Pri ispitivanju je vrlo bitno da je kamera postavljena okomito na uzorak i da se može snimiti promatrana površina tijekom cijelog procesa deformacije.

Osnovna razlika od prethodne metode vizioplastičnosti je u pripremi uzorka. Kod DIC-a koriste se nasumično postavljeni markeri različite veličine i oblika po površini uzorka, primjer na slici 2.22.



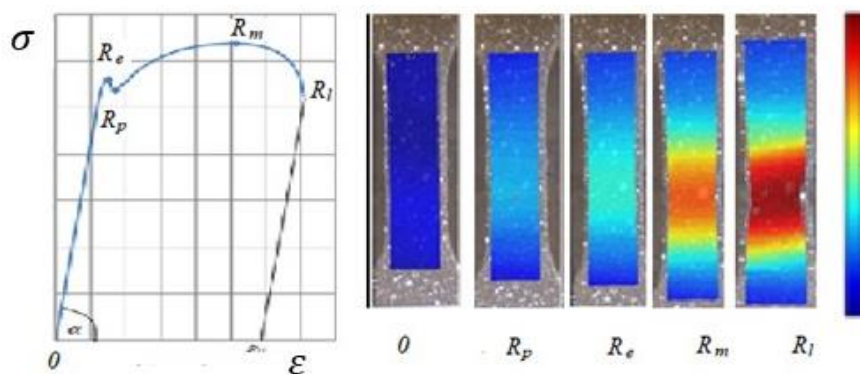
Slika 1. Uzorci za metodu DIC-a) nasumično nanoseni markeri, b) praćenje pomaka markera kod deformacije [16]

Nasumično nanošenje markera provodi se različitim metodama: printanjem, koristeći naljepnica, ili najčešće špricanjem uzoraka s dvije boje koje ostvaruju povoljan kontrast. Nevisno o metodi pripreme uzoraka bitno je zadovoljiti dva kriterija: Prvi kriterij je da su markeri nasumični i različitih veličina, a drugi da je ostvaren kontrast između osnovne pozadine i markera. U protivnom se korelacija snimljenih slika neće moći provesti sa željenom točnošću. Nakon nanošenja markera provodi se statički pokus uz snimanje s digitalnom optičkom kamerom, slika 2.23.

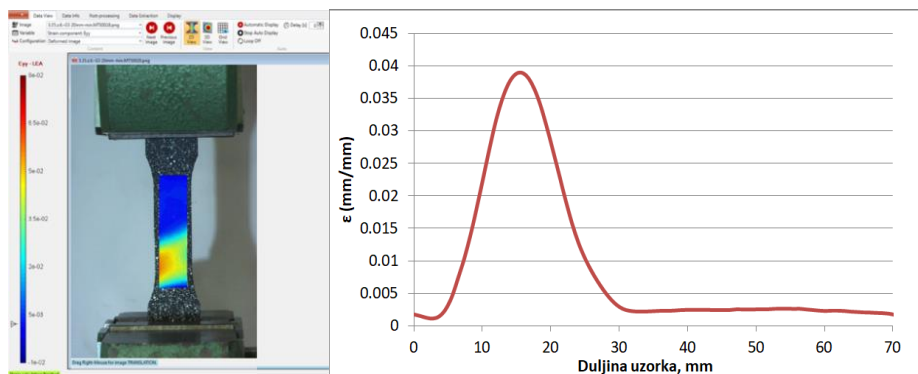


Slika 2.23. Raspored opreme kod ispitivanja metodom DIC [11]

Za analizu mjerenja koriste se odgovarajući programski paketi. Promjene tijekom deformacije mogu se utvrditi kvalitativnom i kvantitativnom analizom, slike 2.24. i 2.25.



Slika 2.24. Kvalitativna analiza promjena deformacije pri statičkom vlačnom pokusu [15]



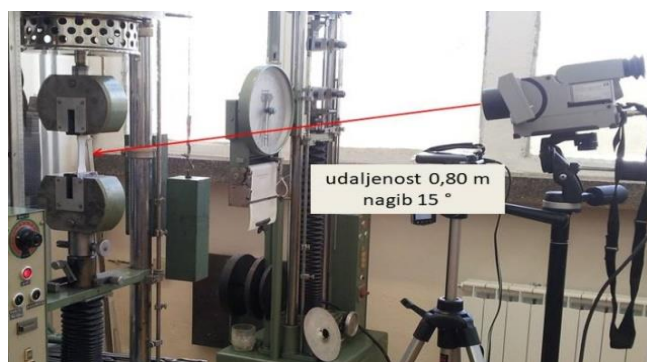
Slika 2.25. Kvalitativna i kvantitativna analiza deformacija u uzorku kod razvlačenja [15]

Ovom metodom moguće je ostvariti mjerenja vrlo malih promjena u pomacima, te time mjeriti vrlo male nehomogene deformacije. Izmjerena je deformacija na početku plastičnog toka materijala kod ispitivanja čelika kod kojih dolazi do pojave Lüdersove linije u iznosu od 0,02 do 0,04 mm/mm.

Prednost ove metode je u prvom redu što je njome moguće mjeriti i vrlo male deformacije. Priprema uzoraka je brza i jednostavna. Ovom metodom moguće je ispitivanje i nespecifičnih uzoraka. Korištenjem programskih paketa za analizu rezultata mjerenja otvorena je mogućnost analiza s različitih aspekata promatranja plastičnog toka materijala.

2.5.3.3. Termografija

Najnovija istraživanja zone deformacije, toka materijala i utjecaja različitih parametara počinju koristiti i još jednu metodu ispitivanja, a to je metoda termografije. Osnovni uređaj za ovu metodu ispitivanja je termovizijska kamera, kojom se mjere temperaturne promjene u uzorcima tijekom deformacije uzorka. Kod ispitivanja plastičnosti i deformabilnosti mjerenja se najčešće provode statičkim vlačnim pokusom. Princip metode prikazan je na slici 2.26. Kamera se postavlja na udaljenosti od 0,80 m.



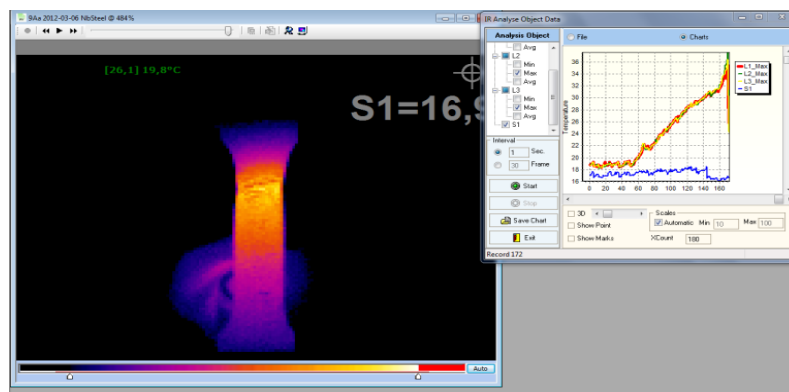
Slika 2.26. Raspored opreme kod ispitivanja metodom termografije [15]

Termografske kamere mjere trenutnu temperaturu predmeta na osnovi detektiranja infracrvenih elektromagnetskih valova nevidljivog spektra svjetlosti koje sva tijela iznad apsolutne nule emitiraju u okolinu. Ovisno o temperaturi ispitnog uzorka, veći ili manji dio emitirane energije nalazi se u infracrvenom spektru, zbog čega ispitni uzorak zrači energiju (prema zakonu o zračenju crnog tijela). Ukoliko je tijelo na temperaturi ispod 500°C , sva njegova toplinska energija emitira se u potpunosti unutar infracrvenog spektra te je moguće mjerenje ukupne toplinske energije, odnosno temperature toga tijela. Znači moguće je mjerenje svih promjena temperature koje nastaju deformacijom. Termovizijska kamera, ili često zvana infracrvena ima u sebi detektor zračenja i mjeri promjene i raspodjelu temperature ispitnog uzorka tijekom deformacije.

Da bi se dobili točni rezultati potrebno je osigurati kod provođenja mjerenja određene uvjete, a to se odnosi na uklanjanje vanjskih utjecajnih faktora i pripremu uzorka. Vanjski faktori mogu biti svi izvori infracrvenog zračenja koje kamera može detektirati. Osim toga, potrebno je, osigurati konstantne uvjete u prostoru u kojem se vrši ispitivanje, na način da nema strujanja zraka i promjene temperature okoline.

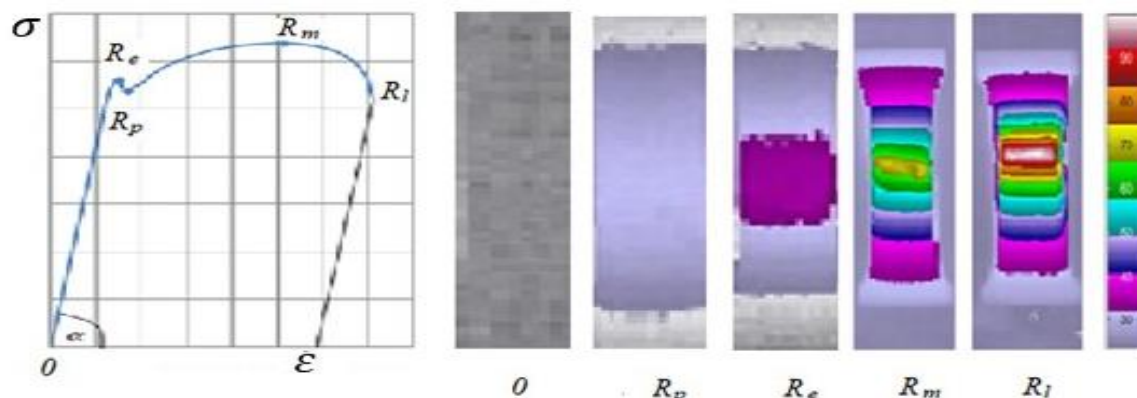
Standardni uzorak za statički vlačni pokus priprema se tako da se na njega nanosi crni premaz s faktorom emisivnosti što bliže 1 (onu koje ima idealno crno tijelo). Faktor emisivnosti tijela opisuje sposobnost materijala da emitira ili otpušta toplinsku energiju koju je apsorbiralo. Na ovaj način ujedno se ukloni refleksija od površine ispitivanog materijala i dobije se ujednačen faktor emisivnosti ispitnih uzoraka po cijeloj zoni deformacije.

Tijekom deformacije metala dolazi do promjene unutrašnje energije deformiranih metala koja se manifestira kao promjena temperature. Što je veći stupanj deformacije to se više povećava unutarnja energija i temperatura. U zoni deformacije nije potpuno homogena struktura pa se i deformacija neće odvijati jednako u svakoj točki zone deformacije. Termografske kamere bilježi površinsku promjenu temperaturu promatranog tijela. Ispitivanjima metodom termografije moguće je dobiti pouzdane informacije o početku plastičnog toka i raspodjeli naprezanja u zoni deformacije u elastičnom i plastičnom području, te pojavu prve pukotine prije loma ispitnog uzorka, slika 2.27. Za detaljniju analizu zapaženih promjena koje se odvijaju u zoni deformacije, rezultati termografskih mjerenja analiziraju se odgovarajućim programskim paketima, npr Irbis Professional.

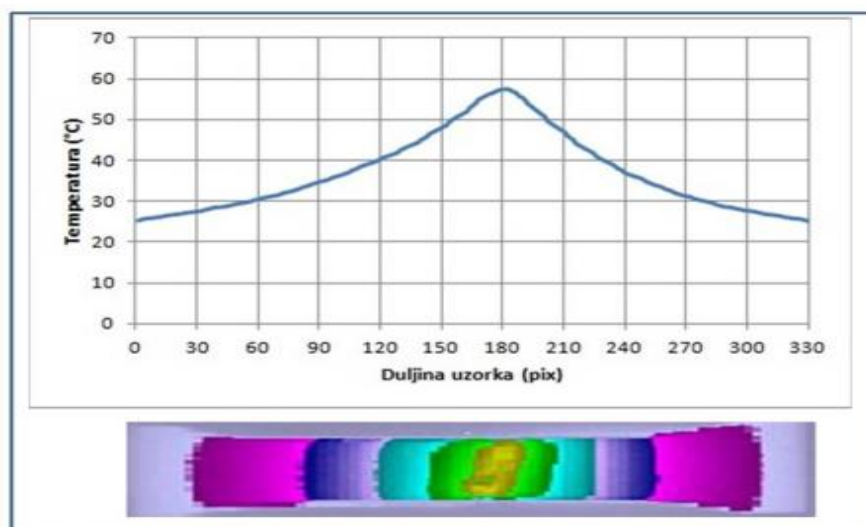


Slika 2.27. Primjena termografije u istraživanju zone deformacije [16]

Ovom metodom moguće je dobiti kvalitativne, slike 2.28. i kvantitativne promjene slika 2.29 u zoni deformacije.



Slika 2.28. Kvalitativna analiza promjena temperature uslijed deformacije [15]



Slika 2.29. Raspodjela temperature u zoni deformacije pri razvlačenju [4]

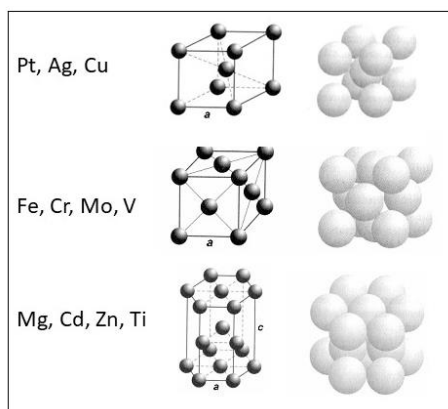
Ovisno o programskom paketu s kojim se provodi analiza moguće je detaljno analizirati promjene temperature u zoni deformacije u jednoj točki, u jednom području ili linijska analiza u bilo kojem području.

Postoje i još neke druge metode koje su razvijene posljednjih nekoliko godina u cilju izučavanja nekog konkretnog slučaja. Ali viziopastičnost, termografija pa i metoda DIC-a su izuzetno važne nove metode koje kvantificiraju promjene u zoni deformacije i daju jasnu vizualnu predodžbu o tečenju materijala u zoni deformacije. Ako se ima na umu s jedne strane nedovoljna istraženost utjecajnih faktora na tok materijala i raspodjelu naprezanja u zoni deformacije i s druge da o toku materijala ovise svojstva proizvoda oblikovanog deformiranjem, onda je značaj nabrojanih metoda jasan.

3. SVOJSTVA METALA I SLITINA KOJI SE OBLIKUJU DEFORMIRANJEM

Skoro sve metale i njihove slitine možemo oblikovati plastičnom deformacijom. Različiti metali i njihove slitine imaju različitu plastičnost. Najbolju plastičnost imaju čisti metali. Drugi elementi koji dolaze u metalima kao primjese ili koje dodajemo kao legirajuće elemente utječu na plastičnost metala. Tako će primjese, ovisno o vrsti primjese i načinu vezivanja u osnovnom metalu pogoršati plastičnost osnovnog metala. Netopive primjese više pogoršavaju plastičnost od čvrstih otopina. Primjese po granicama zrna u obliku mreže najviše pogoršavaju plastičnost. Ako primjese s osnovnom komponentom čine lako topljive eutektike u temperaturnim intervalima taljenja ovog eutektika dolazi do pogoršavanja plastičnosti. Veća razlika u promjerima atoma komponenti slitina dovodi do pogoršanja plastičnosti. Veća koncentracija slobodnih elektrona također pogoršava plastičnost.

Najveću plastičnost imaju metali plošno centrirane kubične rešetke, npr. - Pb, Al, Pt, Au, Ag, Cu itd., slika 3.1. Manju plastičnost imaju metali prostorno-centrirane kubične rešetke - Fe, Cr, Mo, V, a najmanju metali gusto složene heksagonalne rešetke - Mg, Cd, Zn, Ti.



Slika 3.1. Kristalna građa metala [8]

Različita kristalna rešetka druge komponente pogoršava plastičnost. Nepovoljan utjecaj na plastičnost imaju i strukturne nehomogenosti. Dobro se oblikuju deformacijom željezo i slitine željeza, nikal i slitine nikla, laki metali i slitine (Al, Mg, Ti), bakar i slitine bakra, olovo, kositar i cink.

U praksi se rijetko koriste čisti metali, već su oni u obliku raznih slitina koje mogu biti čvrste otopine koje imaju dobru plastičnost, eutektične smjese koje imaju nešto manju plastičnost, te kemijski spojevi koji imaju najlošiju plastičnost od svih.

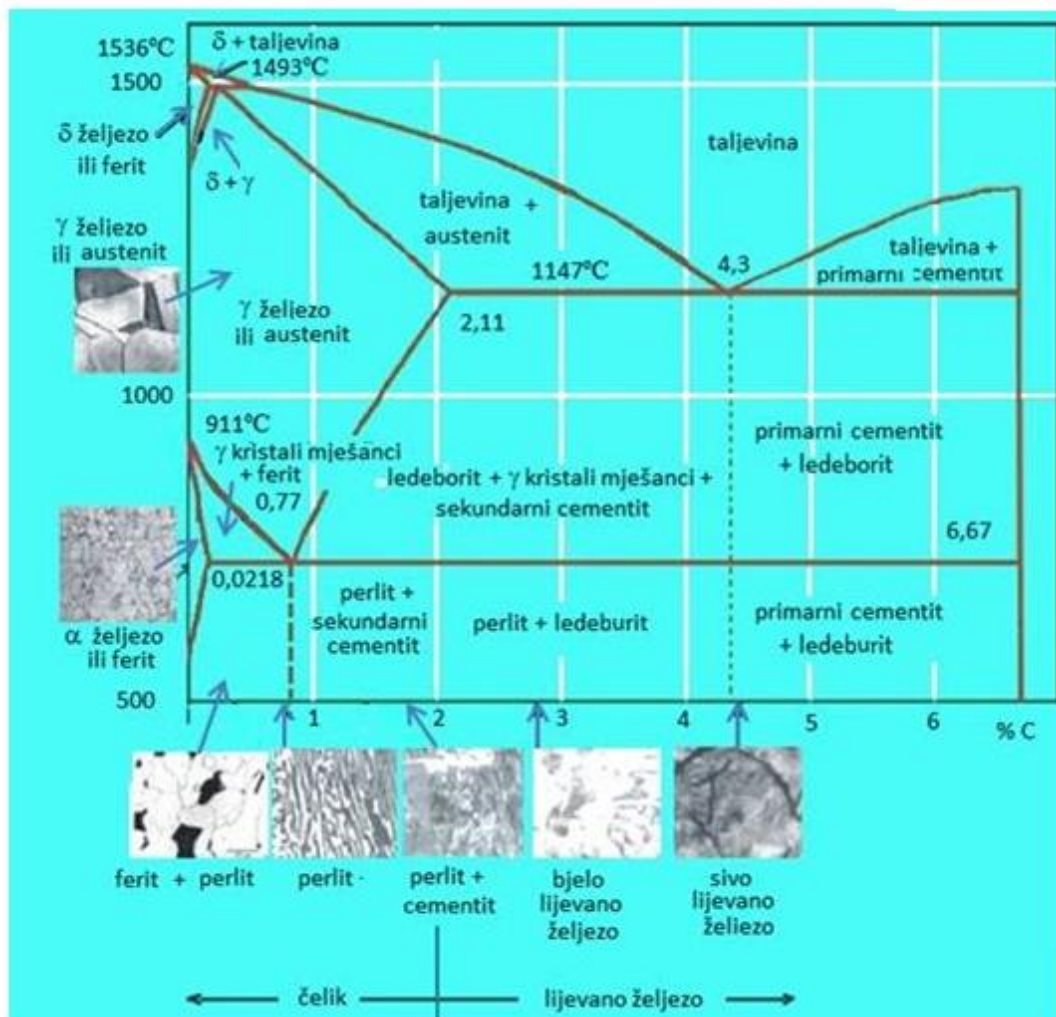
3.1. Plastična svojstva čelika

Od svih metala željezo ima najveću primjenu. Čisto željezo je relativno mekano i male vlačne čvrstoće. Najpoznatija slitina željeza je čelik. Pojam čelik se tokom vremena znatno transformirao, pa je zato korisno spomenuti današnju definiciju prema europskoj normi „čelik je materijal čiji je maseni udio željeza veći od pojedinačnih masenih udjela ostalih elemenata, pri

čemu je sadržaj ugljika manji od 2 %, te sadrži i druge elemente“. Prema Europskoj normi EN 10027-1 čelik je slitina željeza koja sadrži manje od 2 % ugljika i može se oblikovati deformacijom. Slitine željeza s više od 2 % ugljika su željezni ljevovi.

Čelik s 0,8 mas.%C naziva se eutektoidni ili perlitni, s manje od 0,8 mas. %C podeutektoidni, podperlitni ili hipoeutektoidni, a s više od 0,8 mas.%C nadeutektoidni, nadperlitni ili hipereutektoidni.

Ovisno o sadržaju ugljika u čeliku i temperaturi na kojoj se promatra, struktura čelika može biti feritna, perlitna, austenitna, martenzitna, bainitna, te kao cementit i ledeburit, slika 3.2.



Slika 3.2. Dijagram stanja željezo – ugljik

Oblikovanjem deformiranjem, prema Fe-C dijagramu, slika 3.2, oblikuju se čelici do 2% ugljika a to su feritni, austenitni, te bainitni i martenzitni čelici.

δ -Ferit (δ -Fe) je čvrsta otopina ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza. Pri $\sim 1456^\circ\text{C}$ maksimalna topljivost ugljika u δ -feritu iznosi 0,09 %C. Nastaje brzo nakon skrućivanja.

α -Ferit (α -Fe) je intersticijska čvrsta otopina ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza. Maksimalna topljivost ugljika u α -feritu iznosi 0,025% pri 723 °C. Na sobnoj temperaturi topljivost ugljika je samo 0,008%. Najmekši je od svih faza Fe-C i ima tvrdoću 60 HB.

Perlit je eutektoidna smjesa ferita i cementita. Sadrži 0,8% ugljika. Javlja se pri 723 °C kod vrlo polaganog hlađenja. Ima lamelarnu strukturu. Ta lamelarna struktura se sastoji od feritne osnove i tankih pločica cementita.

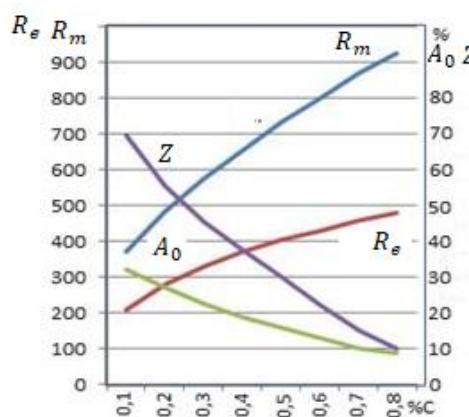
Austenit (γ -Fe) predstavlja intersticijsku čvrsta otopinu ugljika u plošno centriranoj kubičnoj rešetci (FCC) željeza. Maksimalna topljivost ugljika u γ -Fe iznosi 2,06% kod 1147 °C. Nestabilan je na sobnoj temperaturi. U odnosu na sve mikrostrukturne faze čelika ima najmanji specifični volumen. Vrlo je žilav i ima tvrdoću 170-220 HB.

Bainit ima lamelarnu strukturu koju čine lamele ferita. Nastaje kod hlađenja čelika pri određenoj brzini hlađenja. To je temperatura koja se nalazi između temperature nastajanja perlita i temperature nastajanja martenzita. Kod ove temperature brzina difuzije atoma ugljika je vrlo mala, što ima za posljedicu da se atomi ugljika ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvoriti lamele cementita. Zbog toga umjesto lamela ferita i cementita nastaju samo lamele ferita na čijim se granicama izdvaja cementit.

Martenzit ima strukturu u obliku nakupina igličastih kristala, koji se sijeku pod određenim kutovima. To je prezasićena čvrsta otopina ugljika u volumno centriranoj tetragonalnoj rešetci (BCT). Nastaje iz austenita pri određenoj brzini hlađenja. Ova pretvorba se odvija bez difuzije. Ima najveći specifični volumen u odnosu na sve mikrostrukturne faze čelika. Nestabilan je, tvrd i ne može se oblikovati deformacijom.

3.1.1. Oblikovanje deformiranjem perlitnih čelika

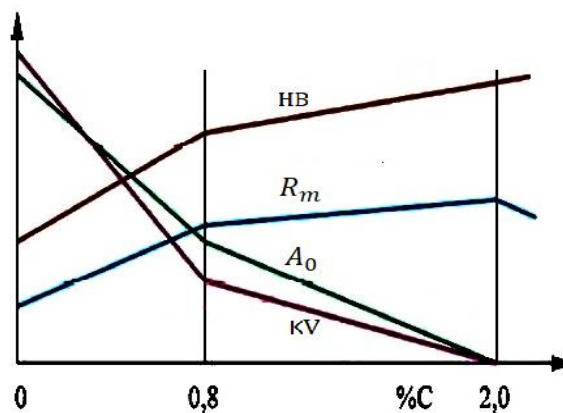
Perlitni čelici imaju dobru plastičnost ovisno o udjelu ugljika. U perlitne čelike spadaju podeutektoidni ugljični čelici i nisko-legirani čelici kod kojih legirajući elementi ne mijenjaju znatno izgled Fe - Fe₃C dijagrama, slika 3.2. U tim čelicima povećanje C za svakih 0.1 % povećava R_m za 90 MPa, R_e za 45 MPa, a tvrdoću za 7.3 %, dok se povećanjem % C smanjuje plastičnost, istežanje i sužavanje, slika 3.3.



Slika 3.3. Ovisnost mehaničkih svojstva o postotku ugljika kod perlitnih čelika

Pravilnim zagrijavanjem utjecaj se ugljika na plastičnost perlitnih čelika znatno smanjuje. Zagrijavanjem se smanjuje i specifični otpor deformaciji. To vrijedi za sve metale i slitine. Smanjenje deformacijskog otpora, tvrdoće i čvrstoće metala i njihovih slitina zagrijavanjem nije uvijek linearno. Postoje temperaturni intervali u kojima dolazi do povećanja čvrstoće i smanjenja plastičnosti.

Tvrdoća čelika raste od mekog ferita do čistog cementita za oko deset puta. Tvrdoća brže raste u podeutektoidnom području, a kasnije se porast usporava u nadeutektoidnom području. Naime, dodatno povećanje tvrdoće zbog izlučivanja sekundarnog cementita po granicama austenitnih zrna ne može znatnije mijenjati tvrdoću, koja je već jako visoka za čisti perlit. Čisti ferit ima dobru sposobnost oblikovanja deformacijom, dok se cementit praktički nemože oblikovati deformacijom. Porastom udjela cementita smanjuje mu se plastičnost. Pad plastičnosti veći je u podeutektoidnom području, dok u nadeutektoidnom području plastičnost dodatno pada zbog sekundarnog cementita. Porast udjela perlitne faze znatno očvršćuje čelik. Čvrstoća perlita je za oko tri puta veća od čvrstoće ferita. U nadeutektoidnom području čvrstoća sporije raste zbog velike krhkosti čelika. Utjecaj ugljika na mehanička svojstva čelika dan je na slici 3.4.



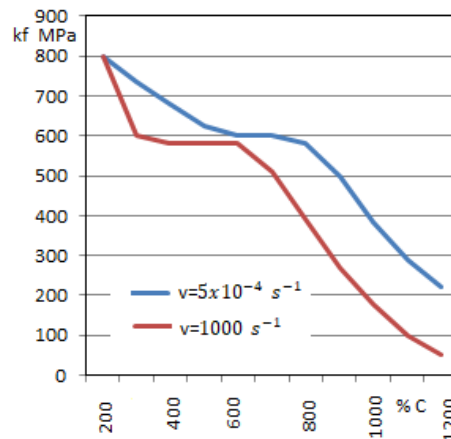
Slika 3.4. Utjecaj ugljika na mehanička svojstva čelika

Kod perlitnih čelika u temperaturnim intervalima između 200 do 500 °C i 850 do 1050 °C može doći do izrazito smanjene elastičnosti. To je područja tzv. plavog i crvenog loma. Podeutektoidni perlitni čelici se lako oblikuju plastičnom deformacijom u toplom i hladnom stanju. Temperatura rekristalizacije perlitnih čelika je 550 do 700 °C i ovisi o sadržaju ugljika u čeliku. Kod hladne plastične deformacije znatno se mijenjaju mehanička svojstva čelika. Stupanj deformacije ima velik utjecaj na svojstva čelika.

3.1.2. Oblikovanje deformiranjem austenitnih čelika

Austenitni čelici, zbog visokog udjela gamagenih elemenata (Mn, Ni, itd.) imaju i na sobnoj temperaturi austenitnu strukturu (plošno centriranu kubičnu rešetku). Ti se čelici ne mogu kaliti, nisu magnetični, a otporni su na koroziju. Imaju malu vlačnu čvrstoću i granicu rastezanja, a veliku žilavost, istezljivost i duktilnost. Austenitni čelici mogu se dobro hladno oblikovati

deformiranjem. Zbog velike otpornosti na toplinu, austenitni čelici imaju kod viših temperatura veliki deformacijski otpor koji ovisi i o brzini deformacije, slika 3.5.



Slika 3.5. Ovisnost deformacijskog otpora i brzine deformacije kod čelika

Hudremon je ispitivanjem deformacijskog otpora na temperaturi 1050 °C utvrdio:

- za podeutektoidni čelik s 0,1% C: 132 MPa,
- za feritni čelik s 0,3% C i 30% Cr: 140MPa,
- za martenzitni čelik s 1% C i 18% Cr: 220 MPa,
- za austenitni čelik s 14% Ni i 14% Cr: 320 MPa.

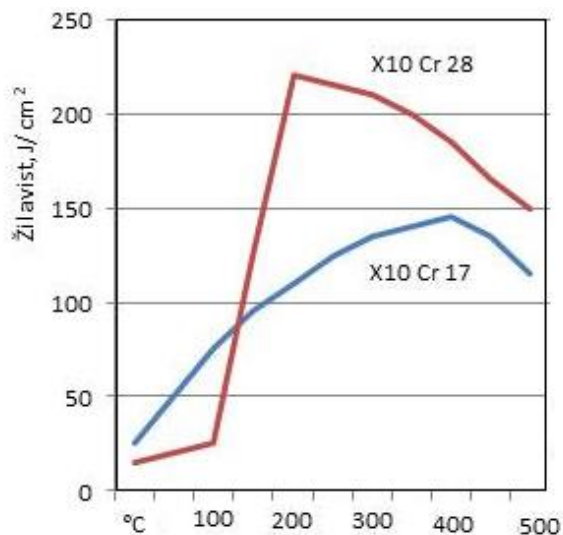
Pokusi su provedeni deformacijskim brzinama jednakim onima kod valjanja. Temperatura rekristalizacije kod austenitnih čelika vrlo je visoka (iznad 900°C), dok je brzina rekristalizacije mala. Zbog toga je temperatura tople deformacije austenitnih čelika 1050 °C do 1250 °C.

Visoko legirani austenitni čelici imaju malu toplinsku vodljivost, koja se smanjuje povećanjem udjela legirajućih elemenata. Stoga se posebna pažnja mora posvetiti zagrijavanju prije tople deformacije i hlađenju nakon deformacije austenitnih čelika.

3.1.3. Oblikovanje deformiranjem feritnih čelika

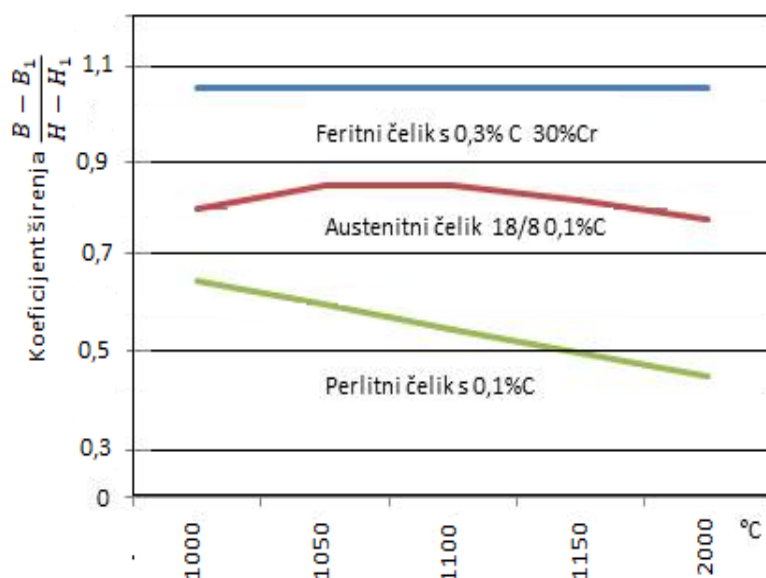
Feritni čelici, koji kod svih temperatura zadržavaju strukturu α - otopine danas se relativno malo upotrebljavaju. Ovi čelici se ne mogu kaliti, a magnetični su i otporni na koroziju. Mehaničke osobine ovise o % C u čeliku. Ako je udio C u njima manji od 0,1% takvi su čelici mekani. Hladna plastična deformacija feritnih čelika na sobnoj temperaturi nije moguća zbog njihove krhkosti. U temperaturnom intervalu između 100°C i 400°C znatno se povećava žilavost feritnih čelika, slika 3.6.

Zato se feritni čelici plastično oblikuju u temperaturnom intervalu od 100 °C do 300 °C, npr. hladnim pilgerovanjem. Povećanim udjelom Cr i Si u tim čelicima opada mogućnost za oblikovanje deformacijom. Kod temperatura oko 475°C primjećuje se ponovni porast krhkosti feritnih čelika. Krhkost raste povećanjem Cr iznad 12%. Povećanjem udjela C, a s time i udjela krom-karbida, krhkost kod 475°C opada.



Slika 3.6. Ovisnost žilavosti o temperaturi kod feritnih čelika

Feritni čelici imaju lošu toplinsku vodljivost tako da se moraju kod tople plastične obrade posebno pažljivo zagrijavati i hladiti. Kod zagrijavanja feritnih čelika dolazi do znatnog povećanja kristalnog zrna. Dodatkom Ti rast zrna pri zagrijavanju može se donekle spriječiti. Zbog toga se topla plastična deformacija feritnih čelika odvija odmah iznad temperature rekristalizacije, u temperaturnom intervalu 800 °C do 1000 °C. Temperatura rekristalizacije za feritne čelike je 600 °C. Kod kalibriranja valjaka za toplo valjanje feritnih čelika, kao i austenitnih čelika, treba uračunati puno veće širenje tih čelika od onih podeutektoidnih ugljičnih čelika, slika 3.7.



Slika 3.7. Širenje kod valjanja perlitnih, austenitnih i feritnih čelika

Kod kalibriranja valjaka za toplo valjanje feritnih čelika (isto vrijedi i za austenitne i martenzitne čelike) treba uračunati puno veće širenje tih čelika od onih podeutektoidnih ugljičnih čelika.

3.1.4. Utjecaj pratećih elemenata na plastičnost čelika

Čelik je deformabilna željezna slitina s ugljikom i drugim elementima. Primaran utjecaj na kvalitetu čelika ima sadržaj ugljika. Ugljik je osnovni legirajući element. S porastom udjela ugljika do približno 0,85% opada plastičnost, granica razvlačenja i žilavost, a raste vlačna čvrstoća, tvrdoća i otpornost prema habanju. Nasuprot tomu, žilavost i zavarljivost se smanjuju. Ako se udio ugljika povećava iznad određene granice u običnom čeliku, gotovo potpuno nestaje njegova sposobnost da se toplo ili hladno oblikuju. U području od 1,7% do 4,5% ugljika govorimo o lijevanom željezu. Također, utječe na sposobnost legiranja s drugim elementima. Ovisno o strukturi i afinitetu, legirajući element s ugljikom mogu tvoriti čvrstu otopinu ili karbid ili oboje, a time često nepovoljno utjecati na plastičnost i mehanička svojstva čelika.

Ostali kemijski elementi u čeliku, osim željeza i ugljika, dolaze kao prateće primjese ili elementi koji se dodaju u cilju dobivanja boljih svojstava, tablica 3.1.

Tablica 3.1. Kemijski elementi u čeliku [1]

Prateće primjese	Štetni elementi u čeliku	Oligo elementi	Legirajući elementi
Mn, Si, Al, P, S, Cu, N, H, O	P, S, N, H, O, Cu,	Cu, Sn, Sb, As	Mn, Cr, Co, Mo, Ni, Ti, V, W, Nb, Si,

Primjese u čeliku mogu biti korisne (Cr, Mo, Ni, V, itd.) i štetne (S i P). Prateće primjese u čeliku vode porijeklo iz rude željeza (mangan, silicij, fosfor), iz starog željeza koje se pretapa (mangan, silicij, sumpor, fosfor i aluminij) i od sredstava za dezoksidaciju (mangan, aluminij i silicij). Količina pratećih elemenata ovisi od polazne sirovine (rude, staro željezo, goriva, talitelja). Najveći štetan utjecaj na ponašanje čelika kod oblikovanja deformacijom imaju sumpor i fosfor.

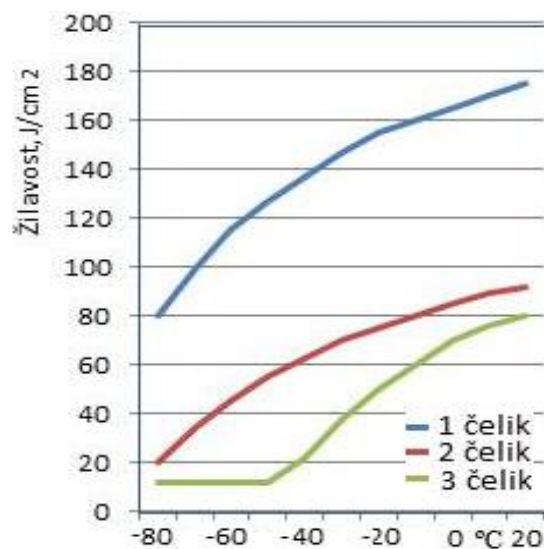
Sumpor smanjuje plastičnost i žilavost čelika, te jako naginje segregaciji i poželjno je da ga ima što manje. U ovisnosti od načina proizvodnje u čelicima, uvijek ga ostaje 0,005 do 0,006%. Već pri tako minimalnim koncentracijama tvori sulfid željeza (FeS) koji dovodi do pojave „crvenog loma“ (nastaje pri početnim temperaturama valjanja ili kovanja). Budući da talište sulfida FeS iznosi 985 °C, a topla deformacija se provodi na temperaturi iznad 1000 °C, dolazi do taljenja FeS i pojave „crvenog loma“.

Prilikom zagrijavanja čelika na visoke temperature (kod zavarivanja uz sami spoj i kod kovanja) dolazi do taljenja sulfida i nastanka toplih pukotina po granicama zrna. Današnji čelici sadrže uglavnom malo sumpora i pojava toplih pukotina je rijetka. Štetan utjecaj FeS uklanja se dodatkom mangana i nastajanjem sulfida MnS. Međutim on je puno mekši od ostalih mikrokonstituenata u čeliku i kod valjanja se manganovi sulfidi izdužuju i dovode do „trakaste strukture“. Izduživanje sulfida u vrijeme tople plastične deformacije ima za posljedicu da poslije laganog hlađenja s temperature valjanja ili kovanja proeutektoidni ferit u podeutektoidnim čelicima kristalizira na sulfidima pa se zbog toga izdvaja u nizovima. Austenit se pri tom potiskuje u međuprostore pa nakon fazne transformacije dolazi do razdvajanja ferita i perlita u nizove i

dobije se takozvana „trakasta struktura“. MnS razbijaju homogenost čelika i slabe ga prema poprečnom opterećenju. Brzim hlađenjem kod $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije ovakav štetan utjecaj sumpora može se djelomično ili u potpunosti odstraniti.

Fosfor, kao i sumpor, je nepoželjna primjesa u čeliku. Njegov maseni udio treba biti što je moguće niži (prema današnjim normama ispod 0,06%). Uzročnik krhkosti čelika. Krhkost čelika je izraženija čim je prisutan viši sadržaj ugljika, te što je viša temperatura austenitizacije. Fosfor dovodi do nehomogenosti u sadržaju ugljika u čeliku. Pri hlađenju se ferit prvenstveno izdvaja na mjestima koja su siromašna ugljikom odnosno bogata fosforom, perlit koji nastaje kasnije izdvaja se na mjestima bogatim ugljikom, a siromašnim fosforom. Zone sa različitim sadržajem fosfora imaju različitu tvrdoću, čvrstoću i žilavost.

Fosfor kod čelika izaziva i pojavu krhkosti u hladnom stanju koja se karakterizira porastom čvrstoće i padom žilavosti. Segregacije fosfora su nepoželjne u čelicima jer predstavljaju štetnu nehomogenost strukture. Fosfor u količinama do 0.3% utječe na mehaničke svojstva perlitnih čelika kao i ugljik. Međutim, udio fosfora u tim čelicima ne smije biti veći od 0.02 do 0.04%. Već male količine P u čeliku smanjuju njegovu žilavost i duktilnost, slika 3.8.



Slika 3.8. Utjecaj udjela fosfora i sumpora na žilavost podeutektoidnih čelika

Osnovna podjela čelika je na ugljične i legirane. Ugljični čelici su čelici u kojima odlučujući utjecaj na njegova svojstva ima ugljik. Drugih elemenata, ima samo u količinama koje nemaju bitnog utjecaja na njegova svojstva. Tako je u ugljičnim čelicima maseni udio mangana < 0,8%, silicija < 0,6%, niklja < 0,3%, bakara < 0,3%, kroma < 0,2%, volframa < 0,1%, molibdena < 0,05 %, kobalt < 0,05 %, titana < 0,05% i aluminijska < 0,05%. Budući da je ugljik sastavni dio čelika (maksimalno 2%) ne smatra se legirajućim elementom iako ima najveći utjecaj na svojstva čelika. Porastom udjela ugljika u čeliku rastu čvrstoća i granica razvlačenja, a smanjuju se duktilnost i žilavost.

Legirani čelici su čelici u kojima odlučujući utjecaj na njegova svojstva imaju legirajući elementi, tj. oni kemijski elementi koji se namjerno dodaju da bi se postigla određena svojstva. Niskolegirani čelici imaju do 5% dodanih elemenata, a visokolegirani više od 5%.

Prema količini legiranih elemenata mogu se podijeliti na nekoliko grupa:

- mikrolegirani ili sitnozrnati čelici
- niskolegirani čelici ili kaljeni poboljšani čelici
- legirani čelici
- visokolegirani čelici.

Mikrolegirani ili sitnozrnati čelici legirani su uglavnom manganom Mn (preko 1,5%) te malim količinama drugih elemenata (N, Al, Ti, Nb, V,...). Sadržaj ugljika je nizak, tako da se teško zakaljuje. Sitno zrno daje im povišenu čvrstoću i žilavost, posebice na niskim temperaturama.

Niskolegirani čelici je grupa čelika legirana kromom i molibdenom do cca. 2% do 3% ukupno, uz dodatke manjih količina Ni, Nb, V, i dr. Ovisno o udjelu ugljika, mogu se dobiti metali visoke čvrstoće i tvrdoće. Legirani čelici sadrže 5-10% legirajućih elemenata i povišeni sadržaj ugljika. Uz krom, nikal, vanadij, niobij, često se dodaju titan, volfram te kobalt. Visokolegirani čelici legirani su kromom i niklom, te manjim količinama ostalih elemenata. Svrha legiranja je izmjena i poboljšanje nekih fizikalnih, mehaničkih, tehnoloških i drugih svojstava što je povezano s promjenom strukture čelika. U tablici 3.2. prikazan je utjecaj nekih elemenata na svojstva čelika.

Olovo segregira na granicama zrna prilikom skrućivanja taline i na tim se mjestima mogu pojaviti pukotine za vrijeme tople deformacije čelika.

Aluminij- male količine u čeliku (0,06%) povećavaju vlačnu čvrstoću, ali smanjuju plastičnost i udarnu žilavost. Povećava sklonost prema pukotinama. Aluminij je značajan element koji zbog svog neravnomjernog rasporeda u strukturi dosta utječe na toplu obradivost čelika uslijed dvofazne strukture. Pojava dvofazne strukture uvjetovana je istovremenom prisutnošću povećanog sadržaja dušika. Sadržaj Al pri niskim sadržajima dušika ispod 0,005% ne pogoršava toplu obradivost. Preporuča se limitiranje prosječnog sadržaja Al na najviše 0,1 %, pri prosječnom sadržaju dušika do 0,005 %. Čelici bez N₂ koji su rađeni u vakuumu i umireni s Al ne pokazuju sniženje plastičnosti. Zajedno s kromom i silicijem, aluminij povećava otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama, te se smatra najraširenijim dezoksidansom u proizvodnji čelika.

Mangan - obično je prisutan u iznosu od 0,5% do 2%, ali određeni specijalni čelici imaju i do 20% (manganski čelici). Povećavanjem sadržaja mangana povećavaju se vlačna čvrstoća i tvrdoća, a u manjoj mjeri i granica razvlačenja. Također se smanjuje udarna žilavost. Pri sadržaju mangana iznad 1% povećava se sklonost čelika prema kaljenju i zavarivanje je otežano. Smanjenjem sadržaja mangana ispod 0,5% vlačna se čvrstoća znatno smanjuje, ali se udarna žilavost povećava.

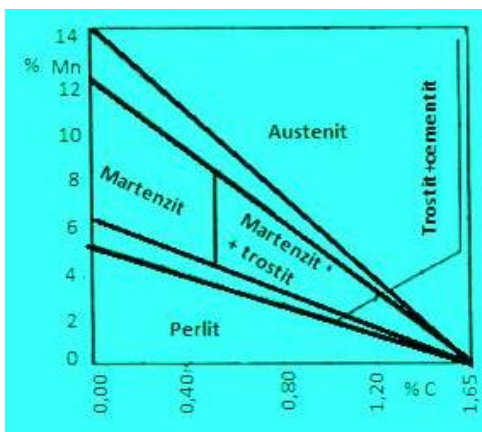
Mangan u perlitnim čelicima povoljno utječe na plastičnost, jer veže sumpor i tako smanjuje njegov nepovoljan utjecaj. Za čelike koji se toplo plastično oblikuju preporučuje se omjer S i Mn od 1:7 do 10. Kao gamageni element proširuje γ -područje, slika 3.9.

Tablica 3.2. Utjecaj nekih legirajućih elemenata na svojstva čelika

Element	Minimalan maseni udio u legiranim čelicima, %	Mehanička svojstva	Plastičnost
Ni	0,30	Ima povoljan utjecaj na mehanička svojstva čelika.	Utječe pozitivno na plastičnost, u toplom i hladnom stanju.
Al	0,30	Povećava mehanička svojstva čelika.	Iznad 5% ima negativan utjecaj, smanjuje plastičnost.
Co	0,30	Malo povećava mehanička svojstva čelika.	Smanjuje plastičnost čelika.
Si	0,60	Povećava mehanička svojstva čelika.	Smanjuje plastičnost čelika u hladnom stanju.
Mn	1,65	Snižava čvrstoću čelika.	Ima povoljan utjecaj na plastičnost čelika.
Cr	0,30	Povećava mehanička svojstva čelika.	Nema značajnijeg utjecaja, ne smanjuje plastičnost ali proširuje α područje.
V	0,10	Povećava mehanička svojstva čelika.	Smanjuje plastičnost zbog nastajanja karbida.
Mo	0,08	Povećava mehanička svojstva čelika.	Smanjuje plastičnost zbog nastajanja karbida.
W	0,30	Povećava mehanička svojstva čelika.	Smanjuje plastičnost zbog nastajanja karbida.
Nb	0,06	Povećava kod niskolegiranih čelika.	Malo povećava plastičnost, prevladava utjecaj precipitata NbC kod tople deformacije.
Ti	0,05	Malo povećava mehanička svojstva čelika.	Malo povećava plastičnost, prevladava utjecaj precipitata TiC kod tople deformacije.
Zr	0,05	Ima mali utjecaj na mehanička svojstva čelika.	Povećava plastičnost pri 0,32% S
Cu	0,04	Povećava mehanička svojstva čelika.	Do 0,20% nema značajnijeg utjecaja na plastičnost.
B	0,0008	Ima mali utjecaj na mehanička svojstva čelika.	Malo povećava plastičnost.

Silicij smanjuje sposobnost deformacije čelika u hladnom stanju, a već mali udio silicija u čeliku otežava kovačko zavarivanje.

Bakar- povećavanjem sadržaja bakra iznad 0,5% povećavaju se vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Povećavanje sadržaja bakra iznad 3,9% neznatno povećava izduženje i ubrzano smanjuje udarnu žilavost. Bakar do 0.20 % nema većeg utjecaja na plastičnost čelika.



Slika 3.9. Utjecaj udjela ugljika i mangana na mikrostrukturu čelika [1]

Nikal- udio nikla do 10% povećava granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću, a neznatno smanjuje istežljivost. Nikal ne tvori karbide u čeliku već ostaje otopljen u feritu, dajući ovoj fazi čvrstoću i žilavost. Nikal općenito povećava prokaljivost i udarnu čvrstoća čelika. Udarna čvrstoća na niskim temperaturama naročito se poboljšava ako je sadržaj kisika, dušika, sumpora, fosfora, mangana i silicija nizak. Nikal tvori grafit i nalazi se u čvrstoj otopini u feritu, znatno povećavajući njegovu čvrstoću bez primjetnog snižavanja žilavosti i plastičnosti. Povećava otpornost koroziji, u većoj količini onemogućava transformaciju austenita u ferit, tako da na sobnoj temperaturi ostane stabilna austenitna faza.

Krom- često se dodaje čeliku zbog ostvarivanja povećane otpornosti na koroziju i oksidaciju, povećanja zakaljivosti ili čvrstoće pri visokim temperaturama. U funkciji otvrdnjavanja čelika, često se koristi u kombinaciji s niklom da bi se dobila vrhunska mehanička svojstva. Krom je jako sklon tvorbi karbida te pogoršava zavarljivost čelika. Krom ne smanjuje plastičnost perlitnih čelika, a kao alfa-gen proširuje α -područje Fe - Fe₃C dijagrama.

Molibden- povećava prokaljivost čelika. Pored toga, poboljšava mehanička svojstva na povišenim temperaturama, sprječava krhkost i poboljšava korozijsku otpornost čelika.

Vanadij- čelici legirani vanadijem su pri zavarivanju osjetljiviji na pukotine i zahtijevaju posebnu tehnologiju zavarivanja. Povećanjem sadržaja vanadija povećava se vlačna čvrstoća te otpornost materijala prema oksidaciji na povišenim temperaturama. Povećanjem sadržaja vanadija iznad 0,05% povećava otpornost prema starenju, a iznad 0,5% udarna žilavost opada.

Aluminij u udjelu iznad 5% smanjuje duktilnost čelika u toplom i hladnom stanju.

Volfram, molibden i vanadij su karbidotvorni elementi, i manjuju duktilnost čelika zbog nastajanja tvrdih karbida.

Niobij- povećava zateznu čvrstoću do sadržaja 1,2%, ali utječe na smanjenje udarne žilavosti. Kao i titan, niobij za sebe veže ugljik i ne dopušta tvorbu krom-karbida, te time poboljšava otpornost zavarenih spojeva prema koroziji u agresivnim medijima (interkristalnoj koroziji).

Čelik sadrži plinove (dušik, kisik, vodik) koji uglavnom pogoršavaju njegova svojstva. Nemetale kao što su O, H, N, S i P nastoji se ukloniti, jer negativno utječu na čvrstoću, žilavost, pojavu pukotina i loma.

3.1.5. Utjecaj oligoelemenata na plastičnost čelika

Oligoelementi dolaze sa sirovinama i tijekom proizvodnje ostaju u izvjesnoj količini u čeliku. Po količini jako variraju, a navedeni redosljed Cu, Sn, As, Sb, Co, Ti, V, Pb, Al, označuje njihovu učestalost, vjerojatan utjecaj i koncentracijsko područje. Kad se danas govori o štetnom utjecaju oligo elemenata u čeliku, u prvom redu se misli na 4 elementa, a to su: Cu, Sn, As i Sb. Oni se iz čelika ne mogu ukloniti danas niti jednom poznatom, industrijski prihvatljivom, tehnologijom. Problem je veći zbog činjenice da se danas proizvodi čelik IV generacije. Pod tim se misli da je čelik proizveden iz rude ugrađen u čelične proizvode i nakon završenog vijeka upotrebe tih proizvoda (staro željezo) ponovo pretopljen i poznatim tehnologijama proizveden novi čelik, čelik II generacije. Proces se ponavlja. Zbog toga se kaže da je čelik zeleni materijal, može se reciklirati. Svaki put u starom željezu se udio oligo elemenata povećava, pa kod svakog pretapanja starog željeza, u proizvedenom čeliku se povećava sadržaj oligo elemenata. Zbog toga je iznimno važno poznavati mehanizme njihovog djelovanja kod oblikovanja čelika deformacijom.

Razlikuju se dvije vrste neravnomjerne raspodjele oligoelemenata u čeliku:

- primarna koja se javlja pri skrućivanju čelika,
- sekundarna do koje dolazi uslijed zagrijavanja čelika prije oblikovanja deformiranjem.

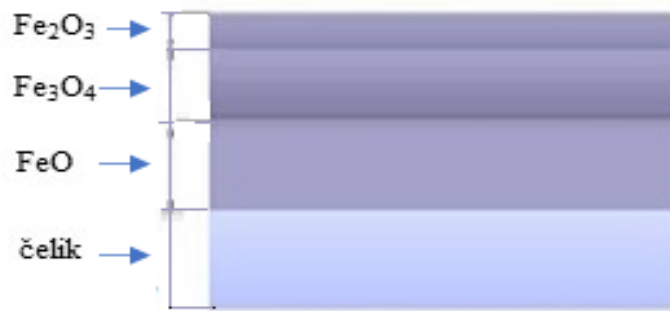
Primarna neravnomjernost rasporeda ovih elemenata, koji nastaje u fazi proizvodnje čelika, najviše ovisi od veličine ingota. Već su na ingotima ustanovljene pukotine, čija je pojava objašnjena segregacijom Cu i Sn na granicama zrna i precipitacijom tekuće faze Cu-Sn. Segregacija Sn, koja se pojavljuje u obliku lokalnih koncentracija je uzrok što pri zagrijavanju prije tople deformacije ne dolazi do potpune transformacije $\alpha \rightarrow \gamma$ faza u čeliku. Na taj način nastaje dvofazna struktura $\alpha + \gamma$ koja ima za posljedicu heterogenu deformaciju. Nepoželjan utjecaj kositra još povećava i prisutnost bakra. Sklonost segregacijama pokazuje i As i Sb.

Sekundarna neravnomjernost povezana je s koncentracijom oligoelemenata na površini čelika pri zagrijavanju. Pri zagrijavanju čelika prije tople deformacije u oksidacijskoj atmosferi, odvijaju se dva procesa:

- površinska koncentracija oligo elemenata u kovarini pod utjecajem oksidacije čelika, i
- difuzija oligoelemenata tijekom zagrijavanja prije tople deformacije.

Kod zagrijavanja čelika u pećima prije tople deformacije dolazi do nastajanja oksidnog sloja (kovarine, cundera) na površini čelika, slika 3.10.

Željezo s kisikom tvori i okside željeza: do 570 °C nastaje Fe₂O₃ a iznad 570 °C nastaje Fe₃O₄ i FeO. Brzina oksidacije se značajno povećava na temperaturama 850 - 900 °C. Iznad 1000 °C oksidni sloj brzo raste. Kod 1300°C brzina je najveća i 7 puta je veća od brzine oksidacije pri 900 °C. Što je vrijeme zagrijavanja duže debljina oksidnog sloja biti će veća.

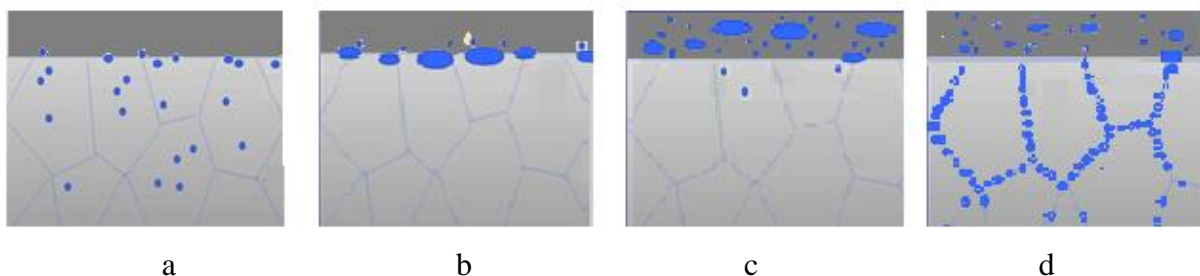


Slika 3.10. Nastajanje oksidnog sloja na površini čelika [5]

Oligo elementi (Cu, Sn, As, Sb) imaju nižu točku topljenja od čelika. Kod zagrijavanja čelika oni se otapaju i difundiraju na površinu metala i u kovarini stvaraju okluzije.

Kao plemeniti metali, oligo elementi iz čelika difundiraju na površinu čelika i nakupljaju se između metala i kovarine ili u kovarini. Mehanizam difuzije oligo elemenata na površinu može se prikazati kroz četiri faze, a-d, slika 3.11.

U prvoj fazi (a) oligo elementi difundiraju kroz metal ka površini čeličnog bloka koji se zagrijava. Kad dođe na površinu nakuplja se na granici metala i oksidnog sloja (b). Ovisno o temperaturi otopljeni oligo elementi difundiraju u poroznu kovarinu (c) i čine okluzije u oksidnom sloju. S rastom debljine kovarine usporava se brzina oksidacije površine čelika a time se smanjuje nakupljanje bakra i ostalih oligo elemenata na granici oksidni sloj - metal pa procesi difuzije u metal i okluzija sve više prevladavaju.



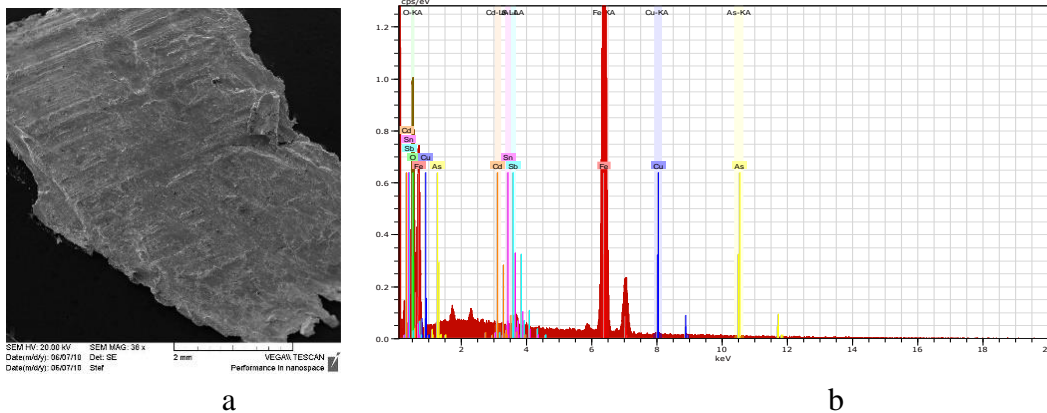
Slika 3.11. Ponašanje oligo elemenata kod zagrijavanja čelika.

Da li će doći do nastajanja okluzija (da li će Cu biti usisan u kovarinu) ovisi o energiji međufazne granice tekući Cu - oksidni sloj. Ako je energija mala, Cu će stvarati okluzije, a ako je velika Cu će difundirati nazad u metal i segregirati po granicama zrna.

Povećan sadržaj kositra u čeliku povećava negativan utjecaj bakra. Kositar jako smanjuje topljivost Cu u austenitu. To utječe na povećano nakupljanje Cu ispod kovarine. Otapanjem kositra u fazi bogatoj s Cu nastaje spoj Cu-Sn-Fe koji usporava difuziju Cu nazad u austenit. Otežava unutarnju oksidaciju čelika i time usporava okluziju faze bogate Cu u kovarinu.

Daljnje ponašanje oligo elemenata može biti dvojako. S jedne strane, oni se ponovo vraćaju u čelik i raspoređuju se po granicama zrna i čine čelik krhkim kod daljnje deformacije. S druge

strane, krhki oksidni sloj zasićen okluzijama oligo elemenata se lomi i nastaje meka mješavina oksidnog sloja i otopljenih oligo elemenata. Ta masa se manifestira kao naljepak na valjcima, slika 3.12, ili površini valjanog čelika. Ako se naljepak stvori na valjcima, on može tvoriti otisak na cijevima ili se kao i naljepak koji se nalazi na površini valjanog materijala utiskuje u površinu valjanog poluproizvoda., slika 3.13.



Slika 3.12. Naljepak kovarine s okluzijama oligo elemenata na pilger valjcima [17]

Postoji više izraza pomoću kojih se određuje kvantitativna ovisnost osjetljivosti na pukotine o sadržaju oligoelemenata u čeliku. Tako na primjer kod reduciranja bešavnih cijevi vrijedi izraz:

$$\text{Cu} + 3\text{As} + 8\text{Sn} \leq 0.3 \quad (3.1)$$

Stupanj koncentracije oligoelemenata na površini i njihov gradijent koncentracije u čeliku ovisi o temperaturi, oksidacijskim uvjetima i vremenu. Što je utjecaj oksidacije izraženiji, to mora biti niži sadržaj oligoelemenata u čeliku. Kod oblikovanja deformacijom čelika u vakuumu ne dolazi do koncentracije oligo elemenata. Tako se teorijski može prerađivati čelik s 3% Cu, 2% Sn. Povećani sadržaj sumpora može povoljno djelovati na ograničavanje površinskih pukotina pri preradi čelika, jer sumpor ima veći afinitet prema Cu nego prema Mn, i u rasponu temperature 800 °C do 1300 °C formira Cu₂S.

Utjecaj antiomona vezan je s koncentracijama ugljika. Antimon smanjuje topljivost ugljika u feritu, te se izlučeni ugljik raspoređi po granicama zrna. Negativan utjecaj uočen je kod sadržaja antimona 0,12 do 0,18%. Pri zagrijavanju čelika antimon se nakuplja na granici metal – oksidni sloj i rastvara u fazi bogatoj s Cu i Sn. Jako utječe na topivost Cu u austenitu Povećan sadržaj antimona u prisutnosti Cu i Cu+Sn povećava njihov negativan utjecaj na nastajanje pukotina.

Arsen ima sličan utjecaj kao i antimon. Ovisi o sadržaju ugljika i fosfora. Kod čelika s 0,15%C i 0,015% P zabilježen je utjecaj As iznad 0,75%, a kod čelika s 0,15%C i 0,06% P utjecaj As zabilježen je iznad 0,14%.

Ispitivanja provedena u CMC d.o.o Sisak potvrdila su da u naljepku postoje sva četiri oligo elementa: Sn, Sb, As i Cu, slika 3.12. Slika 3.13 pokazuje utisnut naljepak na bešavnoj toplovaljanoj cijevi.

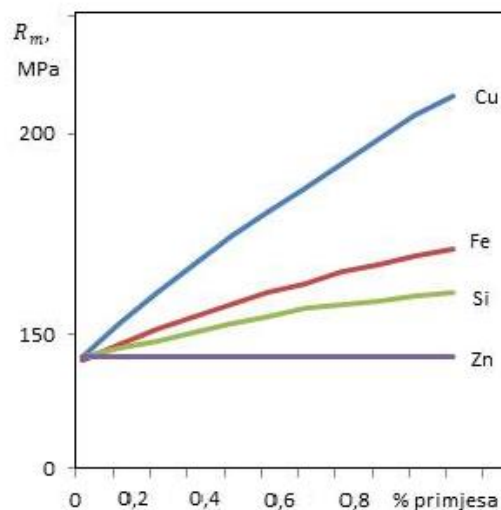


Slika 3.13. Utisnuće kovarine na površini bešavne cijevi [20]

U praksi se zagrijavanje mora izvoditi tako da se što više ograniči površinska koncentracija oligoelemanata. Pri tome u čeliku mora biti samo određeni sadržaj ovih elemenata, kako bi bio sposoban za plastičnu preradu. Pukotine se javljaju kod sadržaja bakra većim od 0,17 %, a postaju znatnije kod 0,28 do 0,34 % Cu, ako je istovremeno sadržaj kositra iznad 0,05 % dobivaju se pukotine već kod 0,08 % Cu. Već vrlo male koncentracije, uz istovremeno prisutnost kositra, se negativno odražavaju na kvalitetu površine hladno deformiranih materijala.

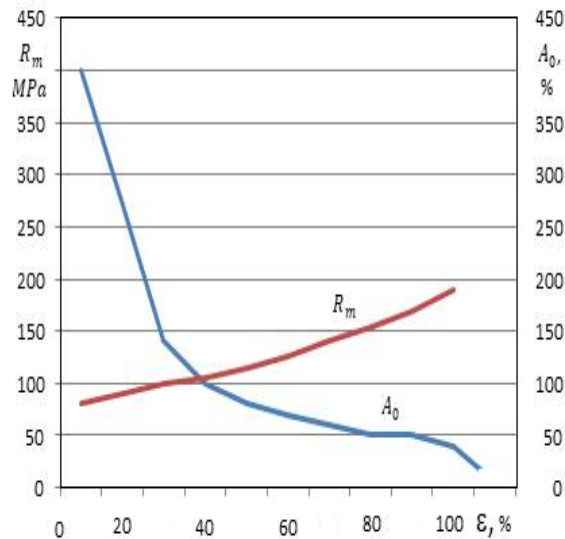
3.2. Plastična svojstva aluminija i slitina aluminija

Tehnički čisti aluminij (99.0 do 99.8%) ima R_m od 100 MPa i plošno centriranu kubičnu rešetku pa je zbog toga jako duktilan, a oblikovanje deformiranjem se može lako hladno i toplo oblikovati. Metalurški aluminij može se valjati s redukcijom do 30%. Slitine aluminija valjaju se uz niža oduzimanja jer se legiranjem povećava njihova čvrstoća i dolazi do jakih segregacija. Već mali dodaci Cu, Fe, Si, itd. povećavaju vlačnu čvrstoću i otpor deformaciji, slika 3.14. Čisti aluminij i njegove slitine daju se lako kemijski i elektrolitički polirati. Tehnološki postupak poliranja je slijedeći: komad se mehanički grubo polira, odmasti, kemijski polira, ispere, konzervira, ispire i po potrebi elektrolitički oksidira (eloksira).



Slika 3.14. Ovisnost R_m o sadržaju bakra, željeza, cinka i silicija u aluminiju

Kod hladne plastične deformacije aluminija, debljina valjanog komada, bez međuzarenja, može se smanjiti za 95%. Rekristalizacijsko međuzarenje odvija se na temperaturi iznad 200°C. Kako na novostvoreno kristalno zрно utječe stupanj prethodne plastične deformacije, potrebno je deformaciju izvršiti iznad kritične granice deformacije i odrediti pravilnu brzinu zagrijavanja, kako bi se dobila struktura sa sitnim zrnom. Kod Al, koji nema alotropskih modifikacija, nije moguće krupno zрно vratiti u sitno žarenjem kao na primjer, kod željeza. Hladnom plastičnom deformacijom povećava se čvrstoća, a izrazito smanjuje istežanje, slika 3.15.



Slika 3.15. Utjecaj hladne prerade na mehanička svojstva aluminija

Legiranjem se mogu tehničke osobine Al znatno popraviti, često na štetu antikorozijske i dobre električne vodljivosti. Slitine Al dijele se na slijedeće:

- one koje se oblikuju lijevanjem;
- one koje se oblikuju deformiranjem,
- slitine za dodavanje,
- slitine za spajanje (lemljenje i zavarivanje).

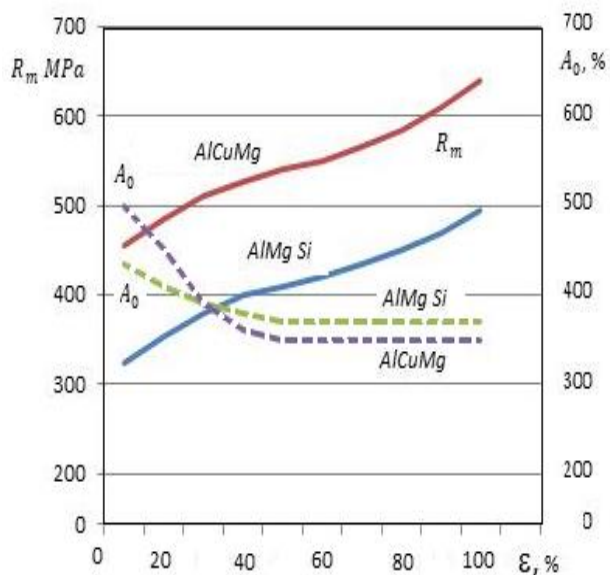
Slitine imaju do 6% Cu, 5% Mg, 1,5% Mn, 0,4% Cr rjeđe Zn i dodatke Si, Pb i Bi. Kao kod čistog Al tako i kod Al-slitina hladnom deformacijom može se povećati čvrstoća. Što je slitina mekša utoliko se lakše hladno deformira. Kod slitina koje se ne mogu toplinski očvršćivati (npr. Slitine AlMn, AlMg i do AlMg7, AlMgMn), maksimalna čvrstoća ovisi samo od početnih mehaničkih svojstava i od stupnja plastične deformacije. Kod slitina koje se mogu toplinski očvršćivati (kao npr. AlMgSi1, AlCuMg1, AlZnMg, AlZn Mg Cu1.5, itd.), mogu se u kombinaciji s hladnom deformacijom postići daleko bolja mehanička svojstva.

Međutim, što je veća početna čvrstoća, utoliko se teže takva slitina može hladno plastično oblikovati, tablica 3.3.. Povećanjem temperature znatno opada čvrstoća Al i Al-l slitina

Tablica 3.3. Plastičnost Al i Al slitina u hladnom stanju

Dobra plastičnost u hladnom stanju		Srednja plastičnost u hladnom stanju		Loša plastičnost u hladnom stanju	
Tehnički čisti Al	meki	AlMgMn	meki	AlMgSi	toplo očvršćen
Al Mn	meki	AlMg3	meki	AlMgMn	polutvrđ
Tehnički čisti Al	polutvrđ	AlCuMg	meki	AlMg5	polutvrđ
Al Mn	polutvrđ	AlMg5	meki	AlCuMg	normalan
		AlMgMn	meki	AlCuMg	očvršćen
		AlMg7	meki	AlMg7	polutvrđ
				AlMgMn	tvrd

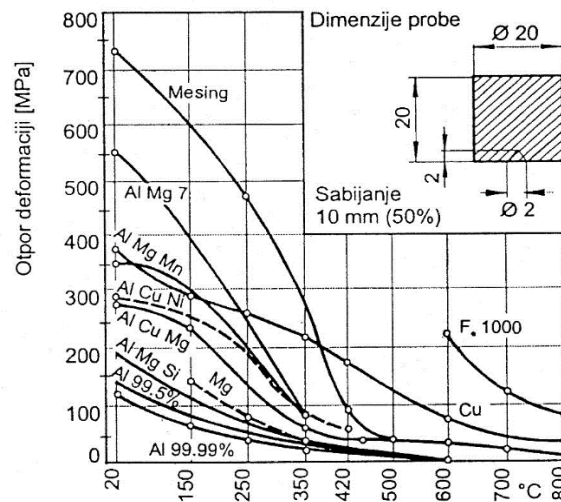
Usporedno sa smanjenjem granice razvlačenja opada i otpor deformacijama kovanjem, valjanjem, prešanjem i izvlačenjem.



Slika 3.16. Ovisnost mehaničkih svojstava Al slitina o stupnju hladne deformacije

Otpor deformaciji Al- slitina, koji ovisi o temperaturi i legirajućim elementima, vidi se na slici 3.17.

Najmanje povećanje specifičnog deformacijskog otpora postiže se legiranjem s Mg + Si, veće legiranjem s Cu + Mg, a najviše dodacima samo Mg od 5 - 7%. Mali dodaci Mn znatno povećavaju otpor deformaciji u Al-slitinama. Otpor deformaciji kod sabijanja u toplom stanju prema Zeerleder-u iznosi: Al: AlMgSi: AlCuMg: Čelik = 1:1,5:3,5:3.



Slika 3.17. Ovisnost otpora deformacije o temperaturi kod aluminija i Al- slitina [1]

Otpor deformaciji kod Al- slitina ovisi i od strukturnog stanja slitine. Najteže se deformira struktura lijeva, zbog struktura s grubim zrnom i krhki slojeva na granicama kristala. Radi toga se Al-slitine najprije toplo valjaju, ili prešaju iznad temperature rekristalizacije u poluproizvode, a poluproizvodi se potom hladno oblikuju u gotove proizvode.

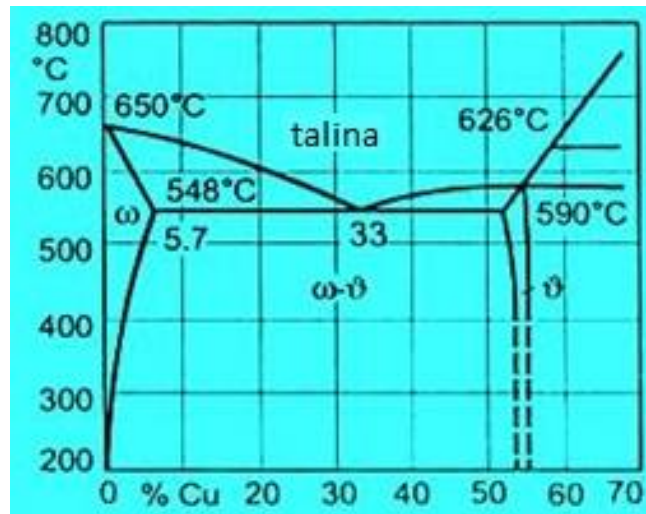
Manja plastičnost Al- slitina posljedica je kemijskih spojeva u takvim slitinama. Oblikovanje deformiranjem u toplom stanju na temperaturi između 300 do 520°C provodi se kovanjem u kalupima, valjanjem poluproizvoda, prešanjem istiskivanjem, savijanjem cijevi i profila, itd. Plastičnom preradom u toplom stanju u temperaturnom intervalu između 100 i 200°C oblikuju se Al-slitine kojima je prethodno toplinskom obradom povećana čvrstoća koju materijal mora zadržati nakon plastičnog oblikovanja. Tako se mogu oblikovati predmeti iz slitine Al-Mg-Si dok se kod slitine sustava Al-Cu-Mg zagrijavanjem od 100 do 200°C smanjuju mehanička svojstva do kojih se došlo toplinskom obradom.

3.2.1. Utjecaj legirajućih elemenata na plastičnost slitina aluminija

Bakar daje čvrste otopine maksimalne topljivosti Cu od 5,7% na temperaturi od 548 °C, a 0,1% Cu na sobnoj temperaturi te eutektik s 33% Cu i intermetalni spoj s 55% Cu. Povećanjem postotka bakra u Al-Cu slitinama povećava se čvrstoća i otpor deformaciji. Topljivost bakra u mješancu aluminija je znatno manja nego obrnuto - topljivost aluminija u bakru. Na slici 3.18. prikazan je ravnotežni dijagrama slitine Al-Cu. Slitine sustava Al-Cu mogu se očvrnuti toplinskom obradom zahvaljujući smanjenju topljivosti bakra u aluminiju prilikom hlađenja, od skoro 6% na eutektičkoj temperaturi na praktički potpunu netopljivost na sobnoj temperaturi. Naglim hlađenjem slitine s homogenom fazom do sobne temperature bakar ostane otopljen u rešetki aluminija, što predstavlja nestabilnu strukturu. Difuzijom (tijekom vremena, dakle prirodno, ili zagrijavanjem, umjetno) dolazi do izlučivanja u intermetalnog spoja CuAl_2 koji jako očvrstne materijal. U očvrnutom stanju slitina ima vlačnu čvrstoću 400 MPa, što odgovara čvrstoći nelegiranog

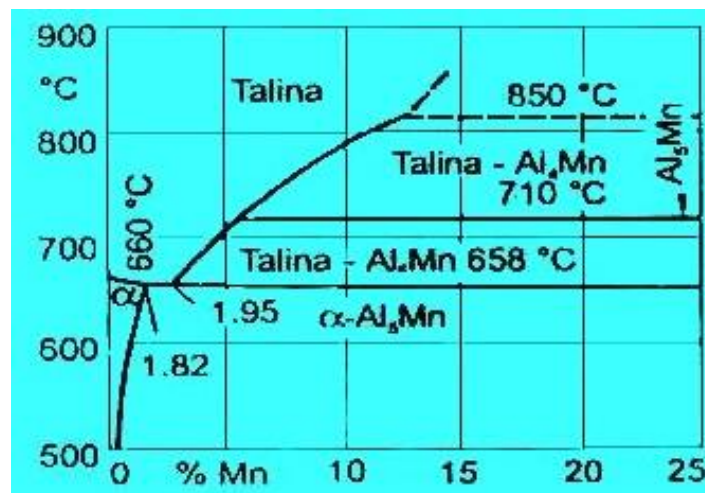
niskougličnog čelika. Čvrstoća se može još povećati izlučivanjem. Al-Cu slitine s dodacima od 1% Mn i 0,5% Mg (dural ili duraluminij) mogu se dobro plastično oblikovati u hladnom i toplom stanju.

Zagrijavanje izaziva starenje slitine i pad mehaničkih svojstava.



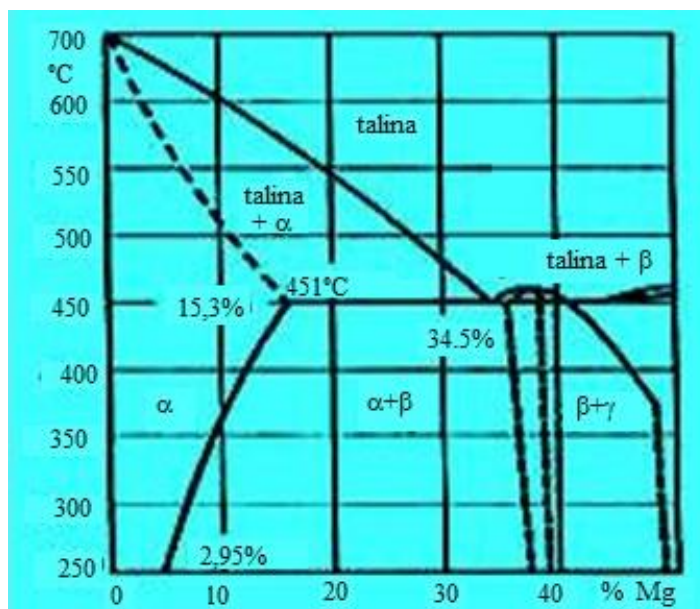
Slika 3.18. Ravnotežni dijagram Al-Cu

Mangan daje čvrste otopine s maksimalno 1,82% Mn kod eutektične temperature na 660°C. Mn se dodaje Al- slitinama do 1,5% udjela. Mn povećava nešto čvrstoću, žilavost i otpor prema koroziji. Al-Mn slitine mogu se dobro oblikovati deformiranjem u toplom i hladnom stanju. Povećanje čvrstoće izlučivanjem nije moguće, slika 3.19.



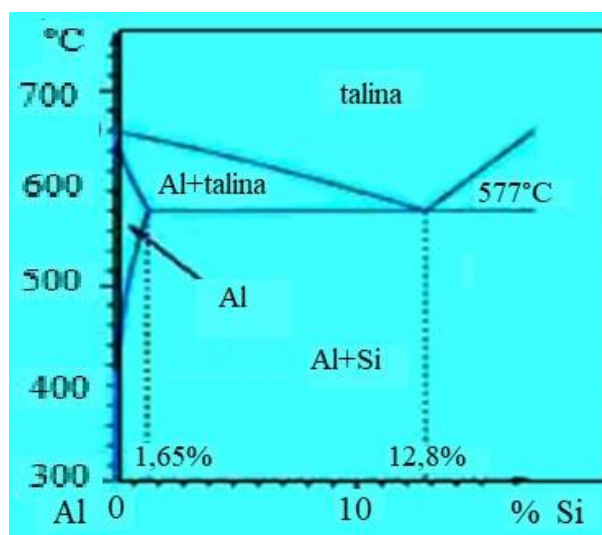
Slika 3.19. Ravnotežni dijagram Al-Mn

Magnezij daje čvrste otopine s maksimumom od 15,3% Mg kod eutektične temperature na 451°C, i s 2,95% Mg kod sobne temperature te eutektik s 34,5% Mg i intermetalne spojeve Al₃Mg₂ i Al₃Mg₄. S povećanim udjelom Mg raste čvrstoća, do 400 MPa, i otpor deformaciji kod Al-Mg slitina, tako da se Al Mg 7 teško može hladno plastično deformirati. Zagrijavanjem čvrstoća pada zbog rekristalizacije ugnječene strukture, slika 3.20.



Slika 3.20. Ravnotežni dijagram Al-Mg

Slitine sustava aluminij-silicij su eutektičke slitine s alfa mješancima aluminija i raspršenim kristalima silicija u matrici. Slabo su očvrstive. Slitine eutektičke koncentracije s 12,8% Si koriste se kao ljevovi, a kao deformacijom oblikovane slitine do 5% Si. Na slici 3.21. prikazan je dijagram lijevanja Al-Si. Kod ljevova, naročito iz recikliranog aluminija, moguće je nastajanje tvrdih silicijevih spojeva s nečistoćama u otpadu, tako da je obrada rezanjem otežana.



Slika 3.21. Ravnotežni dijagram Al-Si

Slitine aluminij-cink-magnezij su očvrstive slitine s kompliciranom strukturom u kojoj je izlučeno nekoliko intermetalnih spojeva aluminija i magnezija, te aluminija, magnezija i cinka. Postižu visoku čvrstoću i koriste se kao konstruktivni elementi.

Slitine aluminija s litijem razvijene su nedavno. Legira se malom količinom litija (oko 2-3%) ili se pravi ternarna slitina s malom količinom cirkonija. Ovim se postiže ušteda na težini do 10%

čime se kod zrakoplova smanjuje potrošnja goriva ili povećava korisna nosivost. Ove slitine imaju i oko 10% veći modul elastičnosti što povećava krutost konstrukcije. Očvršćuje se toplinskom obradom dozrijevanja. Očvršćenje se postiže izlučivanjem intermetalne faze Al_3Li i Al_3Zr . Na taj način vlačna čvrstoća poraste do 630 MPa. Daljnjim dozrijevanjem metastabilna faza Al_3Li prelazi u stabilnu Al-Li slitinu. Nedostatak ove slitine u odnosu na ostale slitine aluminija je smanjena žilavost i neotpornost prema napetospnoj koroziji. Ove slitine su prije svega namijenjene avioindustriji.

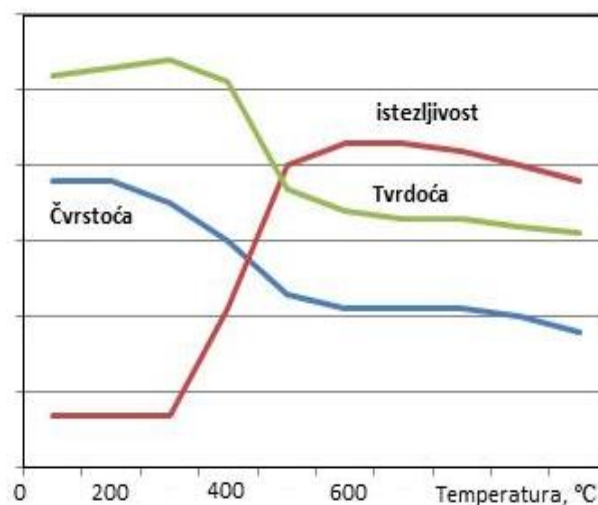
Titan smanjuje zrno u svim Al- slitinama (djeluje kao modifikator) i tako povećava njihova mehanička svojstva.

Nikal u manjim količinama u Al- slitinama povećava čvrstoću, žilavost i postojanost na višim temperaturama, te omogućava bolje poliranje površine.

Olovo i bizmut u malim količinama povećavaju sposobnost rezanja Al- slitina koje se koriste za obradu na automatima. Dodaci Pb i Bi u Al slitinama otežavaju toplu plastičnu deformaciju tih slitina.

3.3. Plastična svojstva bakar i slitina bakra

Bakar ima plošno centriranu kubičnu rešetku i malu tvrdoću R_m od 200 MPa, pa zbog toga posjeduje veliku duktilnost, te se deformacijom može dobro hladno i toplo oblikovati. Mogućnost plastične deformacije bakra je velika, tako se mogu izvlačiti i vrlo tanke žice. Na slici 3.22. prikazana je ovisnost istezljivosti bakra o temperaturi žarenja nakon deformacije

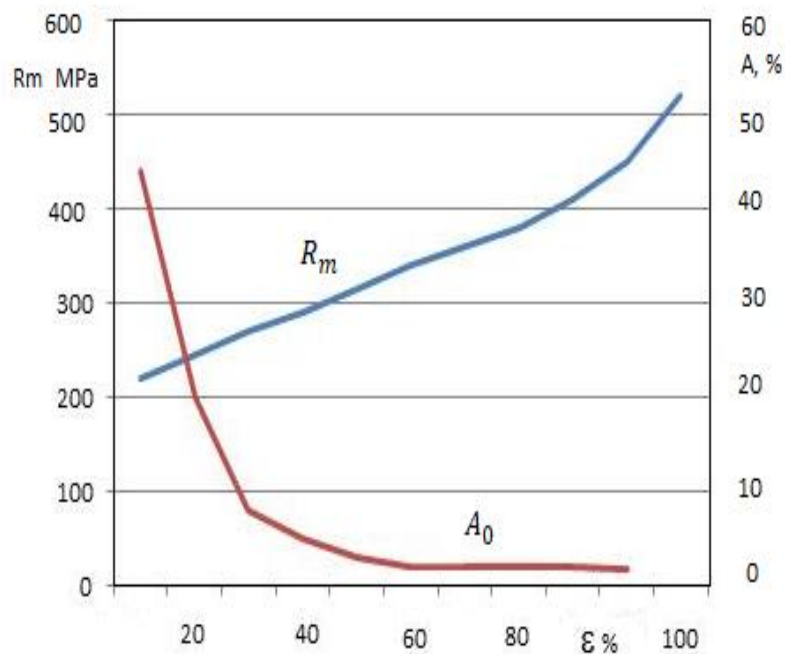


Slika 3.22. Ovisnost svojstava bakra o temperaturi žarenja nakon deformacije

Oko primarnih kristala je krhki eutektikum, okruglaste čestice Cu_2O u bakru koji smanjuje vlačnu čvrstoću (oko 200 MPa). Toplom deformacijom ljevačke strukture iznad temperature

rekristalizacije (oko 650°C), dobiva se usitnjena struktura s izdrobljenim eutektikumom, povećane čvrstoće i istezljivosti. Hladnim oblikovanjem deformiranjem povećava se čvrstoća na 400 MPa, ali istezljivost pada.

Mehanička svojstva Cu mogu se mijenjati samo hladnom plastičnom deformacijom, slika 3.23. Rekristalizacijskim žarenjem iznad 200°C vraća se hladno deformirani Cu u prvobitno stanje. Kod žarenja i zagrijavanja mora se paziti da bakar ne dođe u dodir s H, jer vodik difundira u njega i veže se s kisikom tvoreći pri zagrijavanju unutrašnje pukotine - vodikovu bolest bakra. U toplom stanju bakar se valja u temperaturnom intervalu između 600 i 800°C .

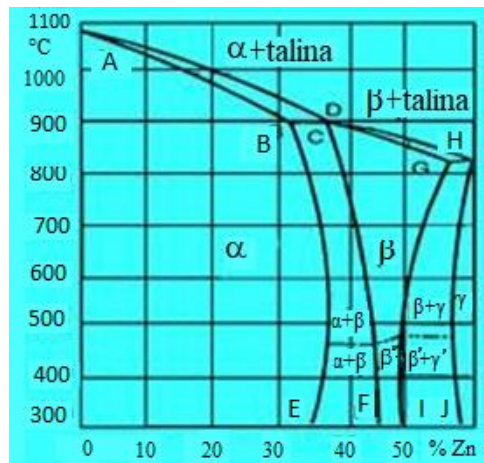


Slika 3.23. Ovisnost mehaničkih svojstava bakra o stupnju hladne deformacije

3.3.1. Slitine bakra sa cinkom

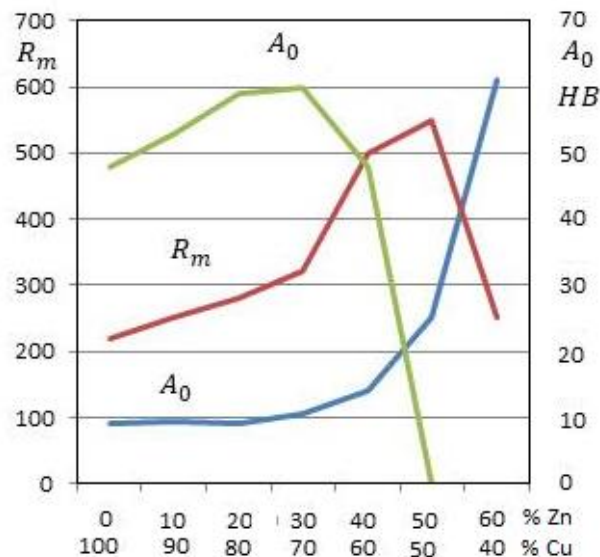
Slitine bakra s cinkom nose oznaku mesing ili mjed. Mesinzi se dijele na slitine za oblikovanje deformiranjem i lijevanjem. Mesing s visokim udjelom Cu poznat je kao tombak ili crveni metal. Mesing za oblikovanje deformiranjem oblikuje se najprije toplo, valjanjem ili prešanjem, a tako dobiveni poluproizvodi oblikuju se dalje hladnim izvlačenjem i hladnim valjanjem.

Hladnom i toplom deformacijom mogu se dobro oblikovati Cu-Zn slitine koje imaju do 38% Zn, slika 3.24. Toplom deformacijom oblikuju se slitine koje imaju do najviše 46%. Najviše se koriste mjedi s 25-44% Zn. Homogeno područje alfa mješanaca s plošno centriranom kubnom rešetkom je do 32,5% Zn.



Slika 3.24. Ravnotežni dijagram Cu-Zn

Za više koncentracije cinka dobiva se dvofazna $\alpha + \beta$ struktura. Dalje područje homogene beta faze je krhko zbog komplicirane prostorno centrirane kubične rešetke. Područje dvofazne $\beta + \gamma$ strukture se ne koristi zbog krhke rešetke intermetalnog spoja γ mjedi. Ovisnost mehaničkih svojstava mesinga o kemijskom sastavu dan je na slici 3.25.

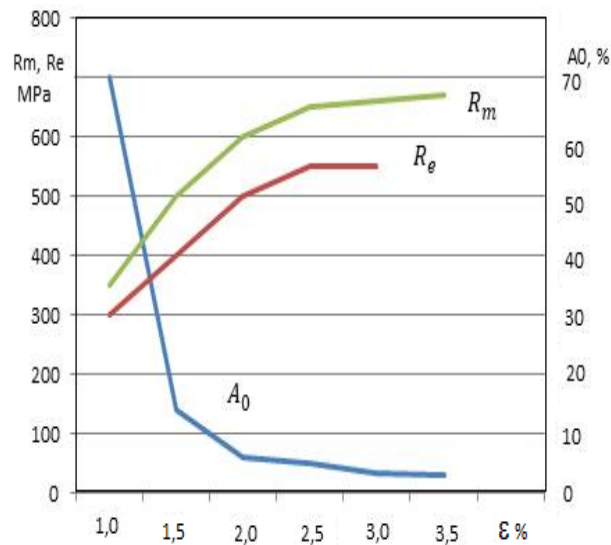


Slika 3.25. Ovisnost mehaničkih svojstava mesinga o kemijskom sastavu

Mehanička svojstva mjedi jako ovise o stupnju deformacije. Čvrstoća se kreće od 250 do 600 MPa, a produljenje A_{10} do 45%. Najveću istežljivost imaju homogene mjedi s maksimalnim sadržajem cinka, dok se u heterogenoj, dvofaznoj mjeđi postiže najveća čvrstoća. Stoga, ako želimo izrađivati predmete postupkom u kojem se predviđa visoki stupanj deformacije koristimo upravo mjeđ iz homogenog područja s maksimalnom koncentracijom Zn (oko 32,5%), slika 3.26.

Ovdje dolazi do odstupanja od pravila da plastičnost opada s rastućim udjelom otopljene komponente i deformacije rešetke mješanca. Razlog ovoga odstupanja je u tome što je α mješanca s velikom koncentracijom bakra šupljikav zbog sklonosti upijanja plinova pa dolazi do velike

koncentracije naprezanja oko šupljina što znatno obara istezljivost. Ako mjed nije potrebno oblikovati velikim stupnjem deformacije, uzimamo mjedi iz heterogenog područja zbog niže cijene (manja količina bakra) i veće čvrstoće. Mjedi iz heterogenog područja mogu se zagrijavanjem (iznad 320°C) dovesti u homogenu područje u kojem se dobro oblikuju deformacijom. Iz mjedi se izrađuju predmeti u velikim serijama obradom odvajanjem čestica. Kod rada na automatima je povoljno da se lako otkida čestica, pa se mjed namijenjena takvom radu naziva mjed za automate (ili prskava mjed). Odvajanje čestice postiže se dodavanjem male količine olova u mjed koja razbija homogenost metala jer se ne otapa u slitini. Zagrijavanjem mjedi s olovom može doći do interkristalnog taljenja i pucanja na mjestima gdje se nalazi olovo, što je posebno izraženo kod homogene mjedi. Kod dvofazne, heterogene mjedi, olovo se pretvorbom alfa u beta može zadržati unutar novog zrna, pa grijanjem ne izaziva pukotine. Kako binarne slitine Cu-Zn u čvrstom stanju nemaju transformacijskih faza, njihova se čvrstoća toplinskom obradom ne može povećati. Povećanje čvrstoće može se postići samo hladnom deformacijom, slika 3.26.



Slika 3.26. Utjecaj stupnja deformacije na mehanička svojstva mesinga

Prema načinu rekristalizacijskog žarenja možemo dobiti mesing krupnog ili sitnog zrna. Mesing koji ima strukturu s krupnim zrnima (žarenje u kraćem vremenu na višim temperaturama) pogodan je za daljnju deformaciju, ali se teže polira. Rekristalizacija mesinga počinje na temperaturama između 200°C i 300 °C.

Mjedima se osim cinka dodaju i drugi legirajući elementi, kao što su Al, Mn, Fe, Ni, Si ili Sn koji poboljšavaju otpornost prema koroziji, povećavaju mehanički čvrstoću ili omogućavaju veću plastičnu deformaciju.

Olovo se dodaje mesingu radi povećanja njegove plastičnosti. Olovo se u mesingu nalazi u obliku finih kapljica koje se tope već na 327°C. Zbog toga, kod tople deformacije, uzrokuje u mesingu iste pojave kao i sumpor u čeliku u području crvenog loma. Ako je mesing namijenjen obradi na automatima, dodaje mu se olovo.

Kositar u mesingu povećava otpornost prema koroziji u morskoj vodi. Kositar, ovisno o udjelu Cu u mesingu, povećava čvrstoću, a značajnije ne utječe na istežanje i plastičnost.

Aluminij znatno povećava čvrstoću, a jače ne mijenja istežanje i plastičnost. Dodaci aluminijske površine formiraju tanke oksidne filmove, što na temperaturi žarenja znatno štiti od oksidacije. Dodatkom 2% Al potpuno prestaje oksidacija mesinga na višim temperaturama.

Željezo u mesingu usitnjuje njegovo kristalno zрно. Dodaci iznad 0,2% Fe povećavaju čvrstoću i temperaturu rekristalizacije mesinga.

Nikal povećava njegovu otpornost prema koroziji i usitnjava zрно kod žarenja. Slitinama iz $\alpha+\beta$ područja znatno povećavaju čvrstoću, dok se taj utjecaj u slitinama iz α -područja ne primjećuje.

Mangan povećava korozijsku otpornost mesinga u morskoj vodi. Do 4% Mn povećava čvrstoću, bez smanjenja žilavosti i plastičnosti. Veći dodaci Mn smanjuju znatno duktilnost. Mn daje mesingu lijepu smeđu boju. Fosfor u mesingu usitnjava zрно i smanjuje unutarnja naprezanja.

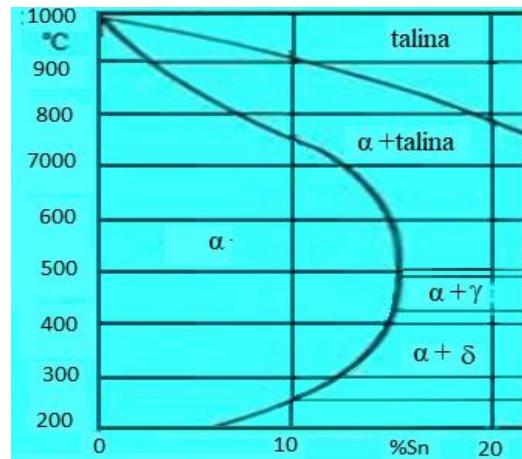
Binarni mesing, koji sadrži dodatke, poznat je kao specijalni mesing. Limovi, trake i folije mesinga proizvode se hladnim i toplim valjanjem iz brama, slabova i platina. Šipke, profili i žica mesinga izrađuju se iz okruglih blokova koji se lijevuju kontinuirano ili polukontinuirano i prešaju istiskivanjem na horizontalnim prešama. Tako dobiveni profili mogu se dalje prerađivati hladno, vučenjem na vučnim klupama. Na isti način iz mesinga se proizvode i cijevi i cijevni profili. Prešanje istiskivanjem može se odvijati u hladnom ili toplom stanju, dok se vučenje mesinga obavlja uvijek u hladnom stanju.

3.3.2. Slitine bakra s kositrom

Bronce su slitine bakra i kositra s dodacima cinka, olova, aluminijske, željeza, mangana, itd. Ako se jedan od navedenih legirajućih elemenata nalazi u bronci u većem udjelu, bronca dobiva naziv po tom metalu: Al - bronca, Si - bronca, itd. Bronce se kao i mesinzi dijele na one koji se daju oblikovati deformiranjem i one koje se oblikuju lijevanjem.

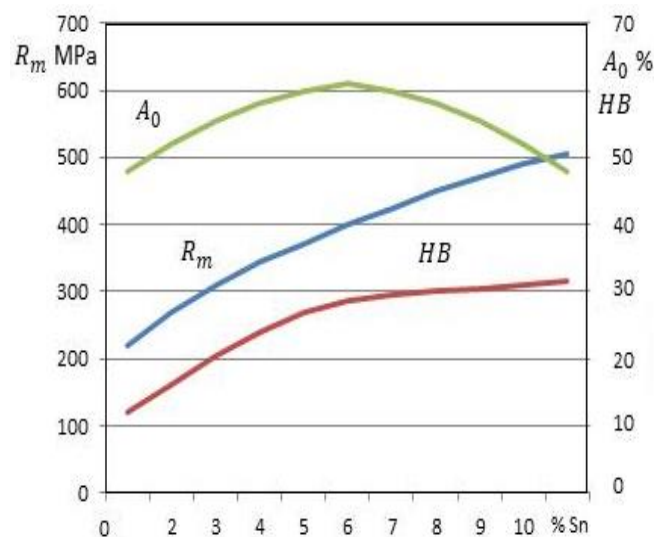
Ravnotežni dijagram bakar-kositar, slika 3.27, je peritektički dijagram s nepotpunom topljivošću. U praksi se koristi samo ograničeni dio slitina bakra, samo one čija je koncentracija do najviše nekoliko desetaka postotaka legirajućih elemenata.

Kositar ima tetragonsku prostorno centriranu kubičnu rešetku i u smjesi s bakrom tvori plošno centrirani kubični mješanac do koncentracija 5-8% Sn, ovisno od brzine hlađenja. Oblikovati deformiranjem se mogu samo bronce u kojima udio kositra ne prelazi 10%. Na sobnoj temperaturi je dvofazna $\alpha + \delta$ struktura za koncentracije iznad homogenog područja. Tvrdocu daje δ rešetka intermetalnog spoja. Slitine iznad 20 % Sn se zbog tvrdoće praktički ne upotrebljavaju. Slitine iz homogenog područja oblikuju se deformiranjem, dok se heterogene slitine s višim sadržajem kositra koriste za izradu odljevaka. δ i ϵ faza su intermetalni spojevi komplicirane rešetke i jako su krhki. Čvrstoća bronce iznosi do 300 MPa bez posebne toplinske ili mehaničke prerade.



Slika 3.27. Ravnotežni dijagram Cu-Sn

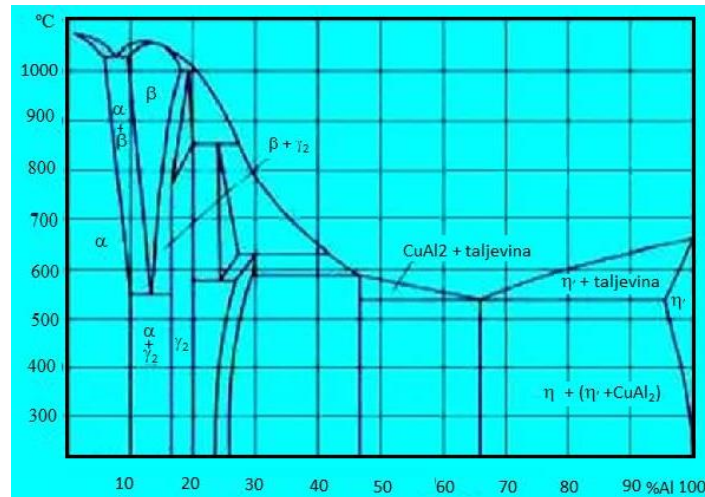
Povećanjem udjela Sn u kositrenim broncama povećava se vlačna čvrstoća, tvrdoća i otpor deformaciji. Povećanjem udjela Sn iznad 5 % dolazi do naglog opadanja istežanja i žilavosti, slika 3.28. Kositrene bronce za oblikovanje deformiranjem se sve više zamjenjuju aluminijskim broncama, koje se mogu bolje oblikovati, otpornije su prema koroziji te znatno jeftinije.



Slika 3.28. Utjecaj udjela kositra na mehanička svojstva kositrene bronce

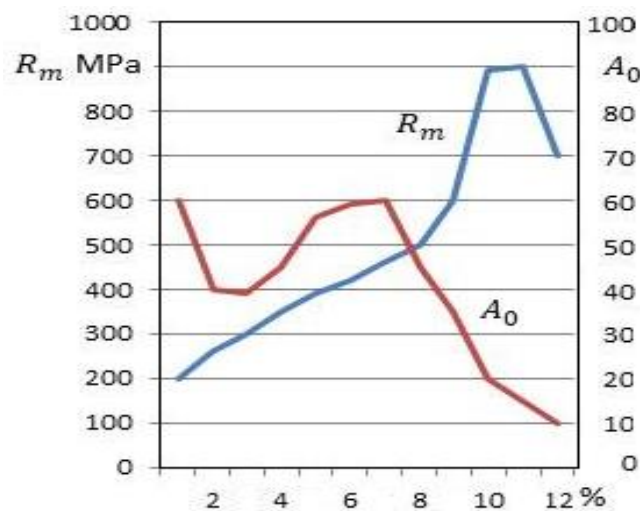
Aluminijske bronce su slitine Cu s Al i manjim dodacima Ni i Fe radi poboljšanja mehaničkih svojstava. Najčešće sadrže 8-11% Al. Aluminijska bronca se koristi do najviše 15% Al, jer za veće koncentracije nastaju krhke faze. Dijagram je prikazan na slici 3.29. Al-bronce s većim postotkom Al (iznad 9%) imaju pored α -faze i β -fazu koja pri 565 °C tvori eutektoid. Ove slitine se mogu dobro oblikovati deformiranjem u toplom stanju (na temperaturi od 850 do 900 °C), dok se u hladnom stanju teško oblikuju deformiranjem. Zbog faznih promjena moguće je sve Al-bronce kaliti. To su heterogene Al-bronce.

Od aluminijske bronce izrađuju se deformacijom oblikovane slitine u homogenom području i ljevačke u heterogenom. Uz visoku čvrstoću, Al bronca je jako otporna na koroziju u morskoj vodi i odlično se zavaruje.



Slika 3.29. Ravnotežni dijagram Cu-Al

Bronce se mogu toplinski i mehanički obrađivati radi povećanja čvrstoće ili plastičnosti. Koriste se za jako opterećene dijelove u korozivnim sredinama i za izradu kovanih dijelova za rad na toplo pod pritiskom. Na slici 3.30 prikazan je utjecaj sadržaja aluminija u aluminijskoj bronci na mehanička svojstva materijala.



Slika 3.30. Ovisnost mehaničkih svojstava aluminijske bronice o količinskom udjelu aluminija

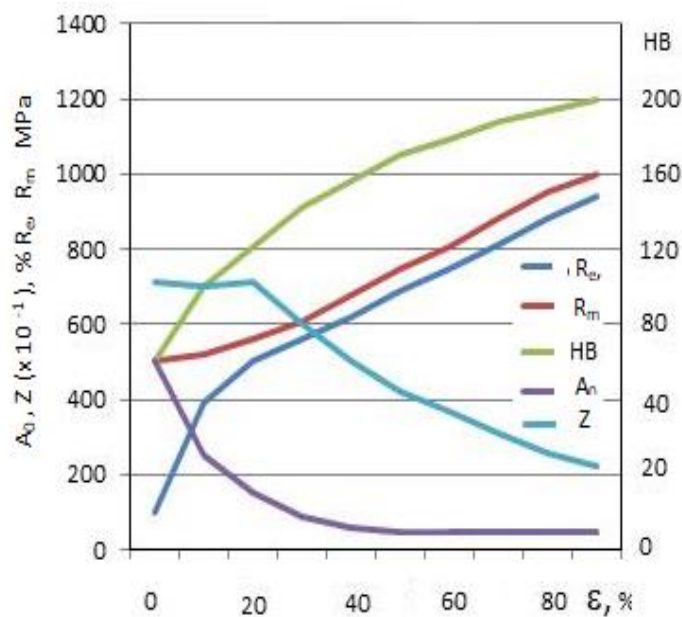
osforna bronca sadrži malu količinu fosfora uz uobičajene količine kositra, koji poboljšava livljivost i dobro dezoksidira talinu. Fosfor s bakrom tvori fosfid Cu_3P , koji fino raspršen u matrici povećava čvrstoću metala, a na taj način i tvrdoću. Tako fosforna bronca ulazi u grupu materijala otpornih na trošenje. Dodatak berilija povećava čvrstoću uz mali pad električne vodljivosti, do vrijednosti od 1500 MPa (radi usporedbe čelici normalne čvrstoće imaju čvrstoću oko 400 MPa).

Silicij bronce legirane su s Si i Mn i to Mn-Si-bronice grupe A s 3% Si i 1% Mn i grupe B s 2% Si i 0,5% Mn. Ove bronce se u hladnom stanju mogu dobro oblikovati deformiranjem, a uglavnom se upotrebljavaju u tehnici hlađenja.

3.4. Plastična svojstva nikla i slitina nikla

Nikal plošno centrirane kubične rešetke i vlačne čvrstoće R_m od 400 do 500 MPa može se u hladnom i toplom stanju dobro oblikovati deformiranjem. Čvrstoća toplo oblikovanog nikla ide do 850 MPa, a istežljivost do 40%. Zadržava čvrstoću i na 400°C, otporan na oksidaciju i koroziju u brojnim agresivnim sredinama.

Već i mala onečišćenja sumporom znatno smanjuju njegovu plastičnost kod viših temperatura. Kisik, kojega Ni znatno apsorbira na sobnoj temperaturi, također smanjuje njegovu plastičnost. Do smanjenja plastičnosti dolazi radi nastanka NiS točke taljenja od 645°C. Zbog toga kod tople plastične deformacije (temperatura rekristalizacije Ni je u intervalu 600 do 700 °C u ovisnosti o stupnju čistoće) nikla onečišćenog sumporom dolazi kod 650°C do slične pojave kao i kod čelika u temperaturnom području crvenog loma. Hladnom deformacijom dolazi do promjene mehaničkih svojstava nikla, slika 3.31.



Slika 3.31. Ovisnost mehaničkih svojstava nikla o stupnju hladne deformacije

Slitine nikla mogu se, prema upotrebi, podijeliti u više grupa, a daju se dobro oblikovati deformiranjem. Slitine Ni - Cu - Zn: novo srebro, argentan, alpaka, monel metal, itd. koje imaju veliku duktilnost i upotrebljavaju se za predmete široke potrošnje.

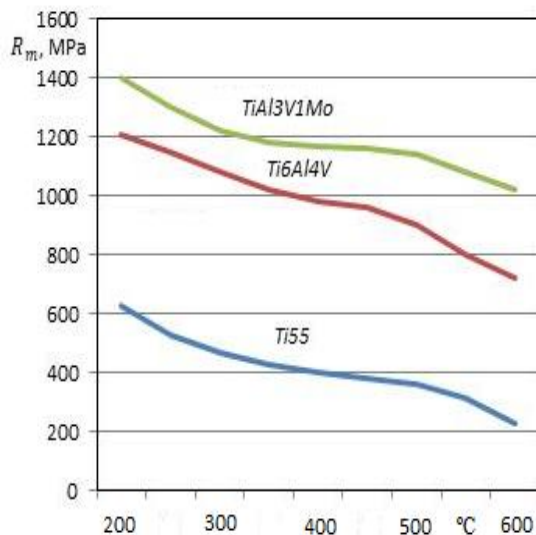
Slitine bakra i nikla tvore sustav potpune topljivosti u čvrstoj otopini, sa zamjenskim mješancima s plošno centriranom kubičnom rešetkom. Za sadržaje nikla ispod 30% radi se o slitini sa svojstvima bližim bakru, a za sadržaje preko 70% Ni slitine ubrajaju se u grupu slitina nikla pod nazivom monel metal. Bakar-nikal slitine su otporne na koroziju u morskoj vodi i kavitaciju. Čvrstoća iznosi do 450 MPa u deformiranom otvrdnutom stanju. Odlično se zavaruju i otporne su na obrastanje morskih organizama.

Neke slitine nikla mogu se očvrnuti izlučivanjem sekundarnih faza. Odlika im je zadržavanje čvrstoće na visokim temperaturama i otpornost puzanju.

3.5. Plastična svojstva titana i slitine titana

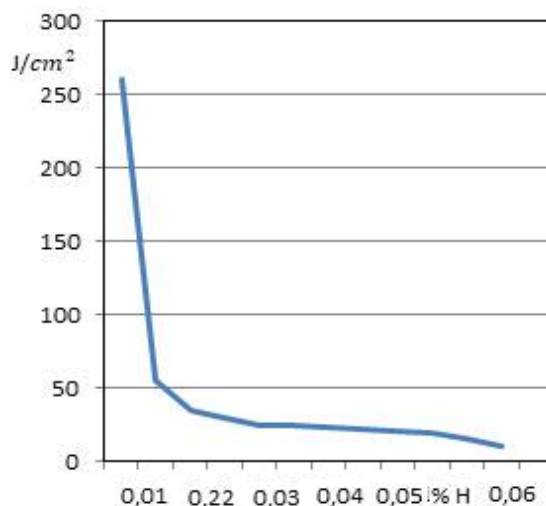
Titan (α Ti) ima heksagonalnu kristalnu rešetku do 885°C , a iznad te temperature prostorno centriranu kubičnu rešetku (β Ti). Glavne karakteristike Ti i Ti- slitina jesu:

- velika otpornost na koroziju,
- velika otpornost na toplinu, slika 3.32.



Slika 3.32. Ovisnost vlačne čvrstoće titana i Ti - slitina o temperaturi

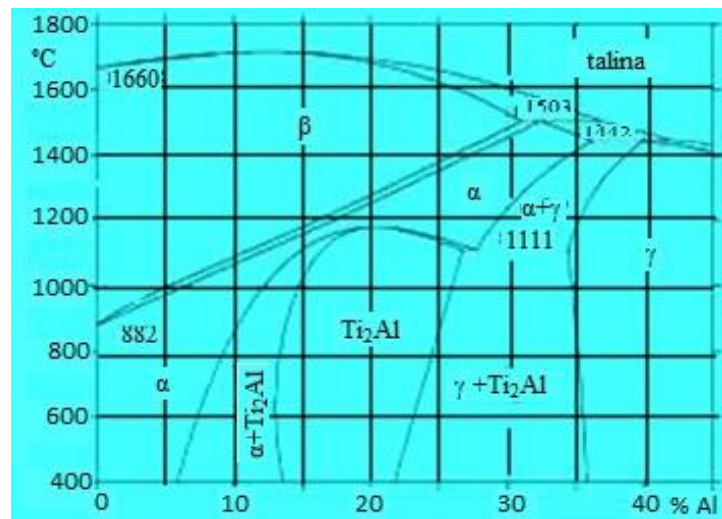
Zbog ovih svojstava Ti i Ti- slitine, iako 30 do 40 puta skuplji od nehrđajućih čelika, sve se više upotrebljavaju u kemijskoj, avionskoj i raketnoj industriji. Titan u zagrijanom stanju prima veće količine N, O i H s kojima daje intersticijske čvrste otopine. Već količine ispod 1% ovih elemenata znatno smanjuju njegovu plastičnost. Onečišćenja vodikom od 0,02 % smanjuju žilavost titana od 260 J/cm^2 na 20 J/cm^2 , slika 3.33. Ta pojava se tumači nastajanjem titanhidrida koji u metalnoj masi titana djeluje analogno grafitnim lamelama u perlitnoj masi sivog lijeva.



Slika 3.33. Utjecaj vodika na žilavost titana

Zbog toga što topljivost plinova u Ti ovisi o temperaturi, oblikovanje deformiranjem u toplom stanju mora se provesti na što nižim temperaturama, samo nešto iznad temperature rekristalizacije (između 600 i 800°C). Atmosfera u zagrijanoj peći mora imati što manje H, O i N. Kod oblikovanja deformacijom Ti i Ti - slitina oblikovanje deformacijom se provodi silama većim za 30% od onih kojima se oblikuje čelik.

Titan teško ispunjava šupljine u ukovnjima, pa se gravure za kovanje Ti i Ti - slitina moraju izvesti s velikim zaobljenjima. Kod oblikovanja deformacijom u hladnom stanju Ti i Ti - slitina (npr. kod valjanja) mora se oblikovati s malom redukcijom i čestim međužarenjem. Titan se legira s Fe, Cr, Mn, Mo, C, N, Al, Ci i Bo. Na slici 3.34. prikazan je dijagram Ti-Al slitine.



Slika 3.34. Ravnotežni dijagram Ti-Al

Titan se legira zamjenski s aluminijem koji stabilizira α fazu, zatim kromom, niobijem, bakrom, manganom, željezom koji stabiliziraju β fazu, te kositrom i cirkonijem koji nemaju utjecaja na modifikaciju rešetke. Legiranje kisikom, dušikom i ugljikom također stimulira α , a vodikom β fazu. Kombinacije različitih legirajućih elemenata daju slitine s α , ($\alpha + \beta$) i β fazom. ($\alpha + \beta$) i β slitine se mogu očvrnuti toplinskom obradom do čvrstoće do 1200 MPa.

3.6. Plastična svojstva magnezij i slitina magnezija

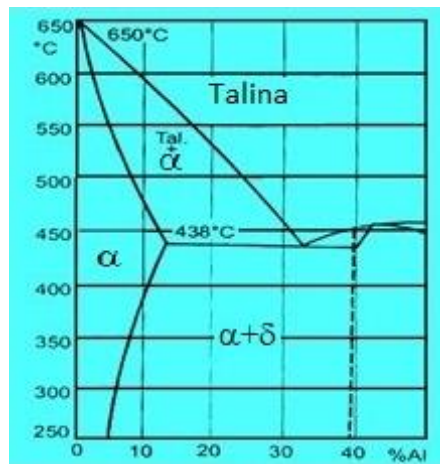
Karakteristična svojstva magnezija jesu:

- mala plastičnost zbog gusto složene heksagonalne kristalne rešetke;
- veliki afinitet prema kisiku;
- mala gustoća, 1.74 g/cm³.

Zbog heksagonalne strukture čisti Mg teško se oblikuje deformiranjem. Na temperaturi iznad 220°C mijenja se duktilnost Mg skokovito i na tim temperaturama, koje ovise o stupnju deformacije i udjelu Mg, oblikovanje deformacijom mnogo je lakše. Zbog loše plastičnosti Mg i Mg- slitine uglavnom se oblikuju lijevanjem i prešanjem, a valjaju se rjeđe. Mg se legira s Al,

Zn, Mn, Si i Ag. Al i Zn povećavaju vlačnu čvrstoću, Mn korozivsku zaštitu i duktilnost kod povišenih temperatura, a Si livljivost.

Aluminij se najčešće upotrebljava kao legirajući element magnezija. Magnezij daje s Al čvrste otopine (kod 436 °C sadrži 12,6% Al, a na sobnoj temperaturi 2%). Kod većih koncentracija pojavljuje se δ -struktura Al_2Mg_3 koja je krhka, pa se, zbog toga, u industriji ne koristi Mg-Al slitine s više od 10% Al. Al povećava čvrstoću Mg - slitina. Slitine s 10% Al imaju čvrstoću od oko 370 i 9% istezanja. Toplinskom obradom može se čvrstoća povisiti do 950 MPa, dok istezanje pada na 3% slika 3.35.



Slika 3.35. Ravnotežni dijagram Mg-Al

Cink je iza Al, najvažniji legirajući element u Mg- slitinama, a obično se upotrebljava uz Al. Pozitivno djeluje na istezanje što je važno za slitine koje se oblikuju deformiranjem. Iz Mg-Zn slitina s i do 6% Zn izrađuju se profili za lake konstrukcije, a dodaje se još i 2 do 5 % Al. Mangan se dodaje slitinama magnezija koje se oblikuju deformiranjem. Mn povećava čvrstoću i čini ih otpornijima na koroziju.

U novije se vrijeme iz magnezija, aluminija i kadmija (8% Cd) izrađuju ultra lake slitine, kojima se poslije valjanja u toplom stanju čvrstoća povećava na 40 MPa kod 12% istezanja. Postoje i ultra lake slitine: magnezija - cera, magnezija - cinka i cera, te magnezija - aluminija i srebra. Slitine magnezij - cer pogodne su za primjenu pri višim temperaturama, jer se mehanička svojstva kod njih ne mijenjaju otprilike do 300 °C. Sve ove slitine daju se oblikovati plastičnom deformacijom.

3.7. Plastična svojstva plemenitih metala i njihovih slitina

Danas se osam elemenata smatra plemenitim metalima. To su zlato i platina, srebro i paladij, te rodij, osmij, iridij i rutenij. Upotrebljavaju se u industriji nakita, elektrotehnici, automobilske industriji, u medicini, kemijske industriji itd.

Zlato je kemijski element s atomskim brojem 79 i relativnom atomskom masom 196,9667. Svrstava se u teške i plemenite metale. Čisto zlato je mekano pa se uglavnom upotrebljavaju slitine zlata koje imaju dovoljnu čvrstoću i tvrdoću. Slitine zlata s bakrom, katkad i sa srebrom, niklom i cinkom, imaju čvrstoću 3 do 5 puta veću od čistog zlata. Dodatak bakra ne utječe na duktilnost zlata, ali slitine s bakrom koje sadrže olovo ili kositar postaju krhke. Slitina zlata s bakrom općenito je tvrđa, veće vlačne čvrstoće. Zlato je visoko duktilni metal i dobro se oblikuje deformacijom. Može oblikovati u toplom i u hladnom stanju.

Platina ima plošno centriranu kubičnu rešetku. Platina po svojoj gustoći spada u grupu teških metala ($21,45 \text{ g/cm}^3$). Ima visoka plastična svojstva, malu tvrdoću te visoko istezanje i kontrakciju. Hladna deformacija utječe na očvršćavanje platine povećavajući pri tome tvrdoću i čvrstoću, a smanjujući plastična svojstva. Mehanička svojstva slitina platine su ovisna o legirajućem elementu i njihovoj koncentraciji. Legirajući elementi, koji s platinom tvore čvrste otopine, poboljšavaju mehanička svojstva. Još veći utjecaj na mehaničkih svojstava imaju legirajući elementi s heksagonalnom rešetkom. Najčešće upotrebljavane slitine platine su platina-volfram, platina–nikal, platina-rodij i platina-iridijum. Pored velike gustoće ($21,45 \text{ g / cm}^3$), ima i veliku duktilnost i povećanu vatrostalnost (tope se pri $1772 \text{ }^\circ\text{C}$).

Srebro je mekano (gustoća $10,5 \text{ g / cm}^3$) i duktilno, stoga se može oblikovati u toplom i u hladnom stanju. Srebro je prilično mekan i duktilni metal koji se lako oblikuje, topi, miješa u slitine s drugim metalima i ne oksidira u normalnim uvjetima kisikom.

Paladij je lagan metal, njegova gustoća je $12,02 \text{ g / cm}^3$. Sadržan je kao nečistoća u bakrenim i niklenim rudama, što ga čini najdostupnijim među ostalim elementima platinske skupine. Glavne značajke paladija su duktilnost i otpornost na koroziju.

Rodij, rutenij, iridij i osmij su vrlo krhki metali, imaju visoku tvrdoću i ne oblikuju se deformacijom.

3.8. Plastična svojstva ostalih metala

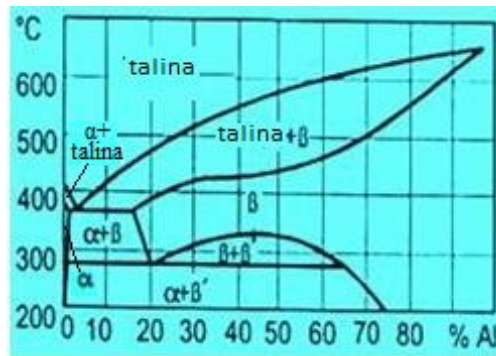
3.8.1. Kositar i slitine kositra

Kositar kristalizira tetragonalno i prelazi pri 13°C u plošno centriranu kubičnu rešetku. Ima malu vlačnu čvrstoću i temperaturu rekristalizacije kao i kod Pb ispod 20°C . To je jako duktilan metal kod koga se čvrstoća ne može povećati hladnom deformacijom. Kositar se može hladno valjati u najtanje folije (staniol). Najpoznatije slitine Sn koje se oblikuju deformiranjem su: - "Britanija metal" slitine s 90 do 92 % Sn, 4 do 9 % Sb i do 3% Cu, oblikuje se u limove koji se upotrebljavaju za prešanje i utiskivanje. Slitina kositra s olovom za izradu folija, primjenjuje se za proizvodnju ogledala (staniol za ogledala).

3.8.2. Cink i slitine cinka

Cink kristalizira heksagonalno i ima vlačnu čvrstoću od svega 20 MPa, tvrdoću 40 HB i neznatno istezanje. Točka taljenja Zn je kod $420 \text{ }^\circ\text{C}$. Kod temperatura između $90 \text{ do } 110^\circ\text{C}$ i $135 \text{ do } 170^\circ\text{C}$

može se Zn dobro valjati, vući, kovati i prešati. Toplo valjani cink ima čvrstoću od 14 do 16 MPa i istezanje od 15 do 35%. Toplo valjani cink ima orijentirane kristalite i može se dalje hladno valjati. Obično se valja u lim. Već mali dodaci Fe i Sn otežavaju valjanje cinka. Rekristalizacija Zn leži nešto iznad 50 °C. Najvažniji legirajući elementi cinka jesu Al i Cu. Al se dodaje Zn u količinama od 1 do 11 % a Cu oko 1 % , slika 3.36.



Slika 3.36. Ravnotežni dijagram Zn-Al

Dodaci Al jače utječu na mehanička svojstva nego dodaci Cu. Osim toga l slitine bez bakra manje naginju "puzanju" od Zn-slitina s Cu, kao što se vidi iz tablice 3.4.

Tablica 3.4. Slitine bez Cu manje naginju puzanju [1]

Vrijeme opterećenja	Zn Al H	Zn Al4 Cu1
5 tjedana	0,032	0,069
6 mjeseci	0,056	0,103
5 godina	0,073	0,136
8 godina	0,079	0,141

U posljednje vrijeme razvijene su Zn-slitine na bazi Zn-Cu-Ti s 1 % Cu i 0.1 do 0.2 % Ti. Ove slitine otporne su na puzanje, imaju visoku temperaturu rekristalizacije i mali koeficijent linearnog širenja. Dok metalurški cink već kod žarenja na 200°C ima strukturu s grubim zrnom, slitine na bazi Cu-Ti imaju i kod žarenja na 300 °C još uvijek strukturu s finim zrnom. Temperatura rekristalizacije ove slitine je iznad 300 °C.

3.8.3. Olovo i slitine olova

Olovo kristalizira u plošno centriranoj kubičnojrešetki, ima vrlo malu vlačnu čvrstoću (R_m od 10 do 15 MPa i temperaturu kristalizacije ispod 20 °C). Odlično se plastično deformira i podnosi uzastopne deformacije, jer mu je temperatura rekristalizacije niska. Vrlo je duktilno, pa se samo u hladnom stanju oblikuje deformiranjem. Legiranjem sa Sn, Sb, Cu i Fe olovu se povećava čvrstoća. Te slitine valjane u ploče i limove upotrebljavaju se u grafici, kao slitine za ležaje i za proizvodnju cijevi istiskivanjem, itd. Slitine sa Sn, Zn i Cu mogu se očvrnuti brzim hlađenjem.

4. TRENJE I TEORIJSKE OSNOVE TRENJA KOD OBLIKOVANJA DEFORMIRANJEM

Trenje nastaje u slučaju uzajamnog djelovanja tijela koja se dodiruju neposredno ili preko drugog tijela. Kontaktno trenje pri oblikovanju deformacijom je trenje koje se odvija na dodirnim površinama alata i proizvoda koji se deformira. S trenjem su povezani energetske uvjeti deformacije, postojanost alata, kvaliteta proizvoda i izbor tehnologije proizvodnje. Zbog toga se pri provedbi procesa deformaciji pridaje značajna pozornost i upotrebljavaju se maziva. Trenje u procesima plastične deformacije metala je po pravilu granično trenje. Razlog tome je visok radni tlak.

Pristupi u razvoju teorije trenja su:

- 1) Geometrijski pristup
- 2) Molekularni pristup
- 3) Deformacijski pristup
- 4) Kombinirani pristup.

Geometrijski pristup tumači trenje na osnovu mikrohrapavosti i čisto je geometrijski pogled na trenje. U procesu valjanja određuje se na osnovi kuta zahvata: $\mu = tga$. Molekularni pristup tumači trenje kao rezultat djelovanja molekularnog privlačenja i zasniva se na molekularno – kinetičkim predodžbama. Deformacijski pristup tumači trenje preko rada potrebnog za deformaciju nekog volumena, a uzrok trenju je otpor metala neravninama. Kombinirani pristup povezuje pojedine pravce razvoja teorije trenja te uzima u obzir mikroneravnine, kao i međumolekularno privlačenje.

4.1. Teorijske osnove trenja kod oblikovanja deformiranjem

Na dodirnim površinama između dva metala javlja se trenje zbog neravnih (hrapavih) površina. Čestice jednog metala ulaze u neravnine drugog metala. Isto tako dolazi do zaljepljivanja potpuno čistih, neoksidiranih površina metala. Znatno zaljepljivanje moguće je samo pri trenju površina u vakuumu kad na tim površinama nema oksidnog sloja. U običnim uvjetima postupaka oblikovanja deformiranjem na dodirnim površinama se nalazi neki sloj, bilo da je oksidni sloj ili mazivo.

Kontaktno trenje se javlja pri svim tehničkim procesima oblikovanja metala deformacijom. Naziva se trenjem na dodirnoj plohi između alata i proizvoda koji se deformira. Ima veliki utjecaj na provedbu tehničkih procesa oblikovanja metala deformacijom:

- 1) izmjene sheme sila pri deformaciji;
- 2) izaziva nejednoliku raspodjelu deformacije, tvori područje otežane deformacije, izaziva pojavu dopunskih i zaostalih naprezanja prvog reda,
- 3) zahtjeva dopunski rad
- 4) negativno utječe na trenje alata radi povećanog zagrijavanja.

Uvjetno možemo razlikovati sljedeće vrste trenja:

- a) suho trenje
- b) granično trenje
- c) polusuho trenje (trenje uz apsorbirano mazivo)
- d) tekuće trenje odvija se uz hidro dinamičko mazivo .

Suho trenje je trenje bez sloja koji razdjeljuje površine. Rijetko se susreće u praksi i to najčešće u specijalnim laboratorijskim uvjetima. Značajan je kod oblikovanja deformacijom u visokom vakuumu.

Granično trenje (polusuho trenje) je trenje uz adsorpciju maziva. Mazivo se u ovom slučaju ponaša kao tvrdo tijelo odnosno tijelo koje ne posjeduje osnovno svojstvo tekućina – sposobnost tečenja. Zato zakoni trenja u ovom slučaju ne mogu biti opisani osnovnim zakonitostima hidrodinamike. Takva definicija najbolje odgovara uvjetima oblikovanja metala deformacijom. Trenje se javlja kad je prevlaka vrlo tanka i nema svojstvo tekućine. Uzrok trenja je visoki radni tlak. Ovaj oblik trenja važan je za procese oblikovanja deformiranjem.

Tekuće trenje se javlja kad se koristi tekuće mazivo – trenje uz hidro dinamičko mazivo. Za tekuće trenje vrijedi Newton-ov zakon:

$$F = \frac{z \cdot A_v}{h} \quad (4.1)$$

F -sila trenja; z -sposobnost tečenja; A -površina klizanja; v -brzina relativnog premještanja; h -debljina sloja maziva.

Druga podjela se može izvršiti na osnovi relativnog kretanja. Razlikuje se:

- **Trenje mirovanja** – veličina djelovanja dvaju dodirujućih tijela nedovoljna da dođe do njihovog međusobnog premještanja.
- **Trenje kretanja** - sila je dovoljno velika i gibanje tijela postoji. Ovisno o kretanju postoji trenje klizanja i trenje kotrljanja.

U praksi oblikovanja deformiranjem razlikuju se 3 vrste trenja :

- 1) statičko, kod kojeg je otpor trenja $R = \mu \cdot F$
- 2) dinamičko, kod kojeg je otpor trenja $R = \mu' \cdot F$
- 3) kotrljajuće, kod kojeg je otpor trenja $R = \mu'' \cdot F$

gdje je μ faktor trenja.

Odnos $\mu:\mu'$ je sljedeći:

- trenje čelik na čelik $\mu:\mu' = 0,15:0,09$ do $0,03:0,08$
- trenje čelik na broncu $\mu:\mu' = 0,19:0,18$.

Pri plastičnoj deformaciji metala javlja se polutekuće trenje. Ono obnavlja kontaktne površine deformiranog proizvoda radi izlaska na površinu unutarnjih čestica metala. Kod ovog trenja veća je stvarna kontaktna površina i znatna je zaostala deformacija površinskog sloja. Javljaju se veći tlakovi i anizotropija u trenju.

4.2. Zakon kontaktnog trenja

Krajem sedamnaestog stoljeća Amonton je predložio zakon suhog trenja prema kojem je sila trenja jednaka:

$$F_t = \mu \cdot F_N \quad (4.2)$$

gdje je: F_t - sila trenja, μ - koeficijent trenja, F_N - sila normalnog pritiska.

Gubkin je navedenu ovisnost nazvao “zakonom kontaktnog trenja“. Veličina sile trenja određuje se preko faktora trenja. Prema navedenom izrazu trenje je opisano vrlo jednostavno, što u stvarnosti nije slučaj. Tako određen faktor trenja ne odražava fizičko stanje procesa trenja, posebno u uvjetima oblikovanja metala deformiranjem. Zbog toga se ovaj izraz u navedenom obliku uzima samo kao njegova srednja vrijednost za neke konkretne slučajeve. Faktor trenja je složena funkcija više faktora. Empirijska ovisnost faktora trenja o pojedinim faktorima ne daje uvijek jednoznačnu vrijednost. U praksi može igrati ulogu ukupnog korekcijskog faktora koji odražava ne samo uvjete trenja u danom slučaju već i druge faktore. Zato se smatra da faktor trenja nije fizička konstanta već samo pogodan oblik sila trenja koje se javljaju i igraju bitnu ulogu u procesima deformacije. U nekim graničnim uvjetima koji se ne susreću kod oblikovanja metala deformiranjem (relativno mali tlakovi, neznatno mala dodirna površina) faktor trenja može odražavati zakonitosti trenja. U uvjetima oblikovanja deformiranjem faktor trenja može približno karakterizirati uvjete procesa. Detaljna istraživanja zasnovana na navedenom Amonton-ovom izrazu razmatrala su molekularno uzajamno djelovanje dodirnih površina. Iz tih razmatranja proizišao je zakon Amonton - Coulon gdje je:

$$F_t / F_N = \mu = \operatorname{tg} \alpha \quad (4.3)$$

gdje je α kut nagiba tangente na mikroneravnine.

Taj kut obično iznosi 5° do $8,5^\circ$ a što po navedenom izrazu odgovara faktoru trenja od 0,12 do 0,15. U praksi oblikovanja deformiranjem susreću se znatno veći faktori trenja, pa ovakva interpretacija također nije bila dovoljna. Zbog tog su Amonton - Coulon uzeli u obzir i međumolekularne privlačne sile:

$$F = \mu(F_N + F_{No}) \quad (4.4)$$

gdje je F_{No} sila molekularnog privlačenja dva tijela. Pri većim stvarnim površinama dodira, sila molekularnog privlačenja se može odrediti:

$$F_{No} = F_{Po} \cdot A_d \quad (4.5)$$

gdje je F_{Po} sila molekularnog privlačenja na jedinici površine a A_d stvarna površina dodira. Sile uzajamnog međumolekularnog djelovanja djeluju samo pri dovoljno malim razmacima među površinama, 5×10^{-5} mm i manjim. Iz toga slijedi:

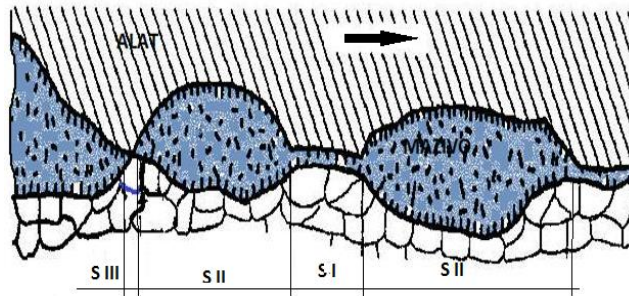
$$F = \mu \cdot [(F_N + F_{Po}) \cdot S] \quad (4.6)$$

Eksperimentalno je utvrđeno da je najpogodniji izraz za stvarnu dodirnu površinu:

$$A = \frac{1,65 \cdot S_1^{\frac{1}{3}} \cdot \gamma_1^{\frac{1}{3}} \cdot \gamma_2^{\frac{1}{3}} \cdot F_N^{\frac{2}{3}}}{K^{\frac{2}{3}}} \quad (4.7)$$

gdje je A –izračunata površina dodira, γ_1, γ_2 –tangensi mikroneravnina, K –faktor tvrdoće.

Što je veća stvarna površina dodira to je sila trenja veća. Iz ovog izraza proizlazi da pri opterećenju jednakom nuli vanjsko trenje ne iščezava. I danas se proučavaju složeni procesi trenja pri deformaciji. Ovi izrazi se koriste kod proračuna sila. Pri graničnom trenju se uzima da je mazivo čvrsto tijelo. Niti s prethodno navedenim izrazom za silu međumolekularne privlačnosti nije uzeto u obzir niz pojava koje se javljaju na dodirnoj površini. Svojstva tankih slojeva znatno se razlikuju od svojstava tekućina u debljem sloju zbog uzajamnog djelovanja tekućina s površinom. Kod svih razmatranja se mazivo, čak i u obliku tekućina smatra tvrdim tijelom. Pri tome se granično trenje razmatra s pozicije čvrstog tijela, a ne s pozicije hidrodinamike. Opće zakonitosti graničnog trenja pokazuju bitnu razliku od zakona trenja uz hidrodinamičko mazivo. Zakonitosti trenja uz hidrodinamičko mazivo mogu biti opisane matematičkim izrazima s relativnom točnošću. Zakonitosti graničnog trenja se ne mogu opisati s prihvatljivom točnošću. Postoji više hipoteza o mehanizmu graničnog trenja, ali nema jedne opće prihvatljive teorije. Postoje različiti pretpostavljeni modeli trenja koji uzimaju u obzir maziva. Pretpostavljeni model graničnog trenja prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1. Model graničnog trenja [4]

Prema prikazanom pretpostavljenom modelu trenja na dodiru između alata i materijala pokazuje se da je prisutno:

- granično trenje I reda, S_I – porastom tlaka prelazi u zavarenu površinu,
- granično trenje II reda S_{II} – smanjenjem tlaka može prijeći u hidrodinamičko trenje (trenje s tekućim slojem maziva),
- S_{III} su površine na kojima dolazi do svarivanja alata i materijala.

Granično trenje I. i II. reda susreće se kod valjanja, a granično trenje II. reda kod izvlačenja. Veličina sile trenja određuje se na osnovu faktora trenja.

Za određivanje faktora trenja primjenjuju se sljedeće eksperimentalne metode:

- metoda koničnog čekića (metoda Gupkina)
- metoda zahvata kliještama (metoda Pavlova)
- metoda maksimalnog kuta zahvata (metoda Čižikova)
- metoda klizanja uzorka (metoda Pavlova i Kostičeva).

4.3. Utjecaj pojedinih faktora na proces trenja u uvjetima oblikovanja metala deformiranjem

Najvažniji faktori koji utječu na proces trenja su: kemijski sastav metala koji se oblikuje deformacijom, stanje površine radnog alata, stanje površine deformiranog metala, temperatura deformacije, brzina deformacije, tlak na dodirnoj plohi, put klizanja, stupanj deformacije oblikovanog metala i broj provlaka.

a) Utjecaj kemijskog sastava na proces trenja

Za toplu deformaciju je važan kemijski sastav metala. Povećanjem udjela ugljika u čeliku faktor kontaktnog trenja se smanjuje, a povećanjem mangana u manganskim čelicima povećava se faktor trenja. Za hladnu deformaciju je važan kemijski sastav maziva.

b) Utjecaj stanja površine alata na proces trenja

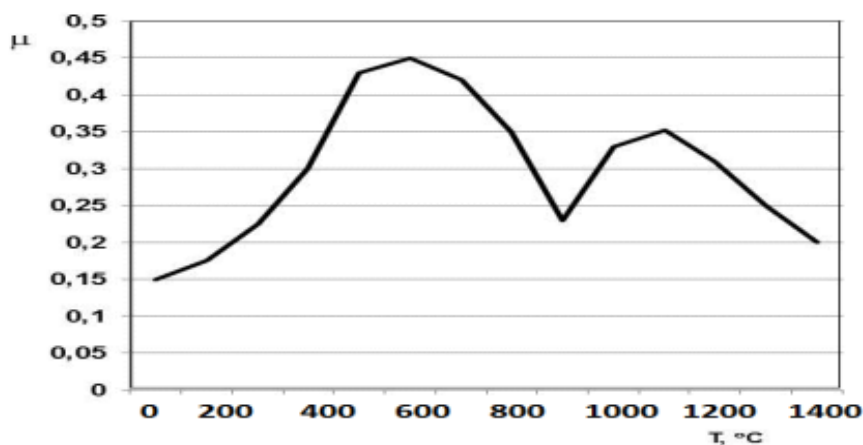
Utjecaj stanja površine alata na proces trenja može se mijenjati u širokim granicama ($\mu = 0.05$ do 0.70). Kod grublje površine alata, faktor trenja je veći i utječe na anizotropiju trenja.

c) Utjecaj stanja površine deformiranog tijela na proces trenja

Stanje površine deformiranog tijela utječe na veličinu trenja samo u početnom momentu plastične deformacije. Veći utjecaj pokazuje prisutnost oksidnog sloja na površini deformiranog tijela.

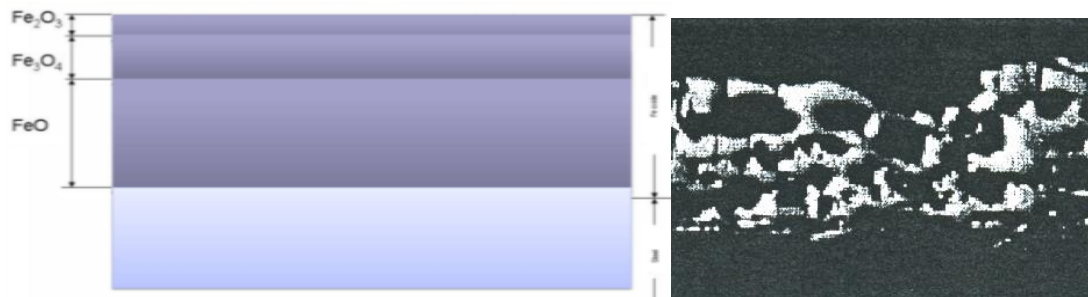
d) Utjecaj temperatura deformacije na proces trenja

Utjecaj temperatura deformacije na proces trenja je složen. Prikazan je na slici 4.2. Vidljiva su 3 minimuma i 2 maksimuma. U početku, povišenjem temperature povećava se i faktor trenja do maksimalne vrijednosti pri $450 - 500^\circ\text{C}$. U temperaturnom intervalu 550 do 750°C faktor trenja opada. Daljnjim povećanjem temperature do $950-1050^\circ\text{C}$ ponovo raste. Nakon toga ponovo opada.



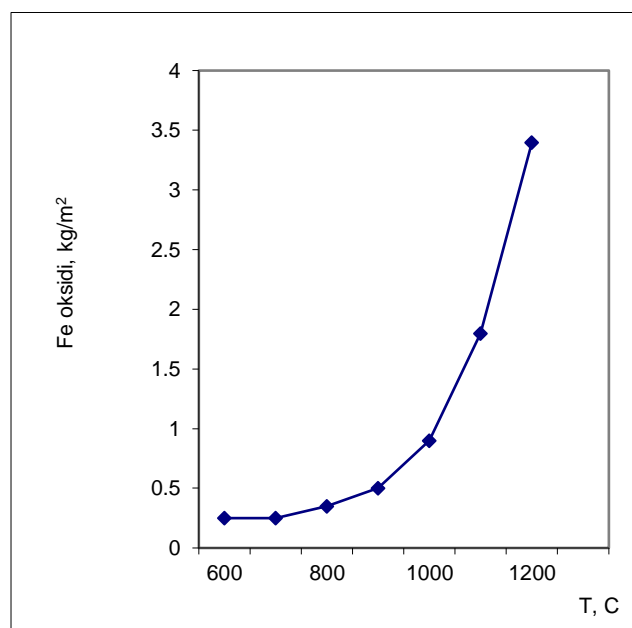
Slika 4.2. Utjecaj temperature na faktor trenja [1,4]

Kod visoko temperaturnih procesa na površini nastaju složeni spojevi oksida Fe i O. Oni utječu na trenje i mogu dovesti do pada faktora trenja. Pad faktora trenja kod temperature oko 950°C, ovisi o vrsti materijala. Povezan je s nastankom nove faze FeO u kovarini, slika 4.3.



Slika 4.3. Slojevi oksida na površini metala [5]

Čelik se prije deformacije zagrijava od 1200 do 1300°C, ovisno o kvaliteti čelika. Zagrijavanje se najčešće provodi u pećima s plinskom oksidacijskom atmosferom. Pri zagrijavanju dolazi do oksidacije površinskog sloja i nastajanja oksidnog sloja. Veličina oksidnog sloja iznosi 2 do 3% presjeka lijevanog čelika a kod višekratnog zagrijavanja čak 4 do 5%. S aspekta ponašanja oligoelemenata u čeliku, vrlo je važna debljina oksidnog sloja. Željezo s kisikom tvori okside željeza: Fe₃O₄, Fe₂O₃ i FeO. Brzina oksidacije se značajno povećava na temperaturama 850 -900 °C. Iznad 1000 °C oksidni sloj brzo raste. Kod 1300°C brzina je najveća i oko 7 puta je veća od brzine oksidacije pri 900 °C, slika 4.4.



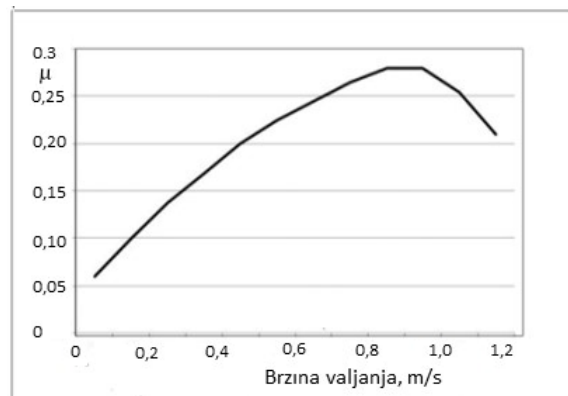
Slika 4.4. Ovisnost debljine kovarine o temperaturi [5]

Što se duže vrijeme zagrijava oksidni sloj je veći. Atmosfera u peći je jako važna za debljinu oksidnog sloja. Može biti oksidacijska, neutralna i redukcijaska. Oksidacijsku atmosferu čine kisik, ugljični dioksid, sumporni dioksid i vodena para. Slobodni kisik koji ulazi u sastav produkata gorenja povećava oksidni sloj. Ako su temperature u peći visoke, što je slučaj kod peći s radijacijskim zagrijavanjem, dolazi do taljenja željeznih oksida s površine. Temperatura taljenja je: FeO - 1377°C; Fe₃O₄ - 1527°C i Fe₂O₃ - 1565°C. U tim slučajevima oksidni sloj se ponaša kao kruto mazivo.

Ova faza oksidnog sloja omogućava daljnju intenzivnu oksidaciju čelika što dovodi do nastajanja drugog maksimuma. Jasno je vidljivo da oksidni sloj ima značajan utjecaj na trenje. Na smanjenje faktora trenja u temperaturnom intervalu 550-750°C utječe intenzivna oksidacija, a kod 1000-1100°C oksidni sloj se ponaša kao mazivo.

e) Utjecaj brzine deformacije na proces trenja

Brzina deformacije bitno utječe na veličinu faktora trenja. Povećanjem brzine deformacije faktor trenja se smanjuje, (i pri hladnoj i pri toploj deformaciji), slika 4.5.



Slika 4.5. Utjecaj brzine deformacije na faktor trenja [1, 4]

f) Utjecaj tlaka na dodirnoj plohi na proces trenja

Zbog neutvrđene veze između promjene stanja površine tijekom deformacije i tlaka koji djeluje na toj površini postoje različita mišljenja o utjecaju tlaka na proces trenja. S jedne strane, povećanjem tlaka sve neravnine na kontaktnoj se površini gube. Na taj način smanjuje se faktor trenja. S druge strane, povećanjem tlaka dolazi do povećanja uzajamnog djelovanja sila kontaktnih površina. To dovodi do razaranja sloja maziva i povećanja faktora trenja.

g) Utjecaj puta klizanja na proces trenja

Obično je utjecaj puta klizanja ograničen i uvjeti se od početka do kraja mijenjaju, te se kod svih procesa deformacije razlikuju. Promjene nastaju zbog povišenja temperature, povećanja tlaka i nakupljanje produkta habanja na površini. Ovisnost sile trenja o putu klizanja može se podijeliti u pet grupa:

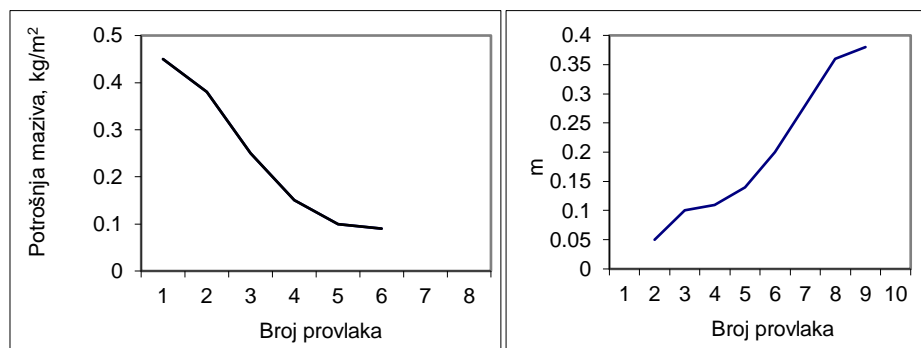
- sila trenja ne ovisi o putu klizanja (stalna je); -aktivna maziva;
- sila trenja ne ovisi o putu klizanja na određenom dijelu, nakon kojeg raste; -maziva visokih podmazujućih svojstva;
- rast sile trenja prati i oštećenje površine; - maziva visokih podmazujućih svojstva;
- sila trenja stalno raste; - visoko efektivna maziva
- sila trenja neprekidno se smanjuje: - vrlo kompaktna maziva.

h) Utjecaj stupnja deformacije

Stupanj deformacije također utječe na faktor trenja. Povećanjem stupnja deformacije, povećava se faktor trenja.

i) Utjecaj broja provlaka na proces trenja

Povećanjem broja provlaka, faktor trenja se povećava, jer se količina maziva smanjuje, slika 4.6.



Slika 4.6. Utjecaj broja provlaka kod valjanja na faktor trenja i potrošnju maziva [1,4]

4.4. Utjecaj trenja na provedbu tehničkih procesa

Kod hladne plastične deformacije redovito na dodirnim površinama alata i materijala koji se oblikuje deformiranjem nastaju veliki pritisci. Kod hladne deformacije skoro redovito se upotrebljavaju maziva. Višak maziva smješta se u šupljinama na dodirnim površinama (hrapavost površine). Najčešće se koriste mineralna ulja koja se u cilju povišenja kemijske aktivnosti miješaju s odgovarajućim dodacima. Obično su to različite vrste aditiva koji redovito imaju aktivatore na bazi sumpora i fosfora. Vrlo često se koriste grafitna maziva. Grafit se upotrebljava u obliku listića i pri velikim pritiscima čestice se razmazuju po površini. Grafit je jeftino mazivo i zato se dosta često upotrebljava. Posljednjih godina koristi se i molibdenov sulfid. Učinak mu je efikasniji kad je na dodirnim ploham njegov sloj tanji, a to se upravo događa kod visokih pritisaka. Vrlo je skup i to mu je osnovni nedostatak.

Kod tople deformacije maziva moraju biti postojana na visokim temperaturama. Temperature toplog oblikovanja čelika su u temperaturnom intervalu 850°C do 1250°C. Na tim temperaturama od svih maziva jedino je grafit postojan. Zato se koristi koloidna otopina grafita u vodi. Kod tople deformacije uvijek se radi o graničnom trenju. Vrijednost faktora trenja ovisno o vrsti materijala dana je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Uloga trenja kod procesa oblikovanja deformiranjem [4]

VALJANJE	KOVANJE	PREŠANJE	IZVLAČENJE
Sila trenja je aktivna (samo u početku zone deformacije)	Sila trenja je reaktivna	Sila trenja je reaktivna	Sila trenja je reaktivna
Utječe na širenje	Izaziva područje otežane deformacije	Neravnomjerna deformacija po dužini i presjeku	Otežava kutnu deformaciju
Utječe na tjeck procesa valjanja	Tlak je najveći u sredini	Utječe na kinetiku širenja	Izaziva nejednoliku deformaciju

Veličina faktora trenja za različite metale i slitine dane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Faktor trenja u zadanim uvjetima [4]

Vrsta materijala ili slitina	Brzina alata, m/min	Veličina faktora trenja, μ			Uz podmazivanje
		Bez podmazivanja			
Ugljični čelik	1,0	0,40 0,35	0,45 0,40	0,35 0,30	0,12 0,06 U ovisnosti o kvaliteti metala i površini alata
Aluminijeve slitine	1,0	0,50 0,48	0,48 0,45	0,35 0,30	
Magnezijeve slitine	1,0	0,40 0,35	0,38 0,32	0,32 0,24	
Slitine teških Obojenih metala	1,0	0,32 0,30	0,34 0,32	0,26 0,24	
Vatrootporne slitine teških metala	1,0	0,28 0,25	0,26 0,22	0,24 0,22	

Faktor trenja kod valjanja pri zahvatu metala valjcima i pri ustaljenom procesu valjanja u ovisnosti o valjcima i mazivu dan je u tablici. 4.3.

Tablica 4.3. Faktor trenja pri zahvatu metala valjcima i pri ustaljenom procesu valjanja [4]

	Valjci	Mazivo	Maksimalni kut zahvata, α	Faktor trenja pri zahvatu, μ
Hladno valjanje	Polirani	Mineralno ulje	3-4	0,052-0,070
	Slabo polirani	Mineralno ulje	6-7	0,105-0,123
	S grubom površinom	Bez podmazivanja	Do 8	0,150
Toplo valjanje	Glatki za valjanje uskih traka	Bez podmazivanja	22-24	0,404-0,445
	Kalibrirni	-	24-25	0,445-0,446
	Kalibrirni s pravokutnim kalibrima	-	28-30	0,532-0,577
	Kalibrirni s pravokutnim kalibrima, nasječeni	-	28-34	0,532-0,675
	Na kontinuiranim prugama	-	27-30	0,509-0,577

4.5. Tehnološka maziva

Osnovna funkcije maziva za oblikovanje deformiranjem čelika su podmazivanje, hlađenje, uklanjanje otpadnih metala, zaštitu od korozije, smanjenje kontaktnog trenja i smanjenja površinskog trošenja.

Maziva moraju ispuniti više zahtjeva. U prvom redu moraju imati visoku sposobnost podmazivanja. to jest nastajanja tanke ravne opne koja razdvaja kontaktne plohe. Tehnološka maziva moraju imati potrebnu viskoznost. Temperaturna postojanost naročito je bitna kod tople deformacije. U tehnološkim procesima je važna i mogućnost brzog nanošenja maziva. Maziva ne smiju izazivati koroziju deformiranog metalnog proizvoda i alata. Također ne smiju imati štetan utjecaj na čovjeka pri neposrednom rukovanju. Prilikom odabira vrste maziva koja će se koristiti, potrebno je uzeti u obzir sve faktore zajedno s metodom primjene u odnosu na vrijeme i lokaciju.

Osnovne grupe maziva su:

1. mazive masti,
2. tekuća maziva,
3. kruta maziva.

Mazive masti i smjese biljnih i mineralnih ulja se koriste pri hladnom valjanju i izvlačenju metala velikog otpora prema deformaciji. Mineralno ulje dominantno je bazno ulje za masti. Sve više se razvijaju na osnovi sintetičkih ulja zbog znatno boljih svojstava u odnosu na mineralna ulja kao što su oksidacijska stabilnost, tečnost pri niskim temperaturama, visokotemperaturna svojstva,

vodljivost i dr. No iako ima mnogo prednosti, sintetičke masti imaju i nekoliko mana. Primjerice silikonsko ulje ima bolji temperaturni raspon viskoznosti, ali je loše pri graničnom podmazivanju čelika.

Polifenileter ima visoku cijenu i slaba niskotemperaturna svojstva. Za primjenu su bolji diesteri, poliolesteri, polialfaolefini, alkildifenil esteri i dr. Izbor baznog ulja za proizvodnju masti ovisi o zahtjevima primjene a za biološki razgradljive primjenjuju se esteri.

Od mazivih masti najčešće se primjenjuju grafit i molibdenov disulfid, posebno za podmazivanje opterećenih kliznih površina kod manjih brzina. Mazive masti plastična su maziva kod kojih je sredstvima za zgušnjavanje bazno ulje dovedeno u stanje gela.

Tekuće emulzije najčešće se koriste kod hladnog valjanja čelika. Također se koriste i kod toplog valjanja koje se provodi pri velikim brzinama. Sastoje se od baznog ulja i aditiva. Bazno ulje može biti mineralno ili sintetičko. Mineralno bazno ulje proizvodi se rafinacijom teških frakcija nafte dobivenih vakuumskom destilacijom na temperaturi višoj od 350 °C i danas čini više od četiri petine od ukupno proizvedenih količina maziva. Maziva ulja mineralne osnove primjenjuju se za podmazivanje većine strojeva prilikom oblikovanja deformiranjem.

Glavno svojstvo tekućih maziva je viskoznost kao mjera njegova unutarnjeg trenja. Za podmazivanje uz veće brzine gibanja potrebna je manja viskoznost, a uz veća opterećenja veća viskoznost maziva. Viskoznost ovisi o temperaturi pa se s njezinim porastom smanjuje. Aditivima se može smanjiti ovisnost viskoznosti o temperaturi, poboljšati viskoznost pri niskim i postojanost pri višim temperaturama, povećati sposobnost zaštite od korozije, te čvrstoća mazivoga sloja i time poboljšati podnošenje iznimno velikih tlakova, te smanjiti trošenje strojnih dijelova.

Kruta maziva su metalna i praškasta maziva i prozirna staklasta maziva. Mogu se upotrebljavati kao suha maziva ili koloidne otopine mineralnih ulja i vode povezanih sredstvom za zgrušnjavanje (sapun, parafin, vosak).

Prašasta maziva mogu biti suha poput sapunskih prašaka ili strugotina, a primjenjuju se prilikom izvlačenja čelika. Koriste se pri visokim temperaturama, i silama na dodirnim ploham, kod oblikovanja deformacijom u tehnologijama izvlačenja čelika itd. Najčešće korištena kruta maziva su molibden disulfid (MoS_2), grafit, politetrafluoretilen (PTFE), volfram disulfid (WS_2), olovo i dr. Molibden disulfid i grafit imaju niski koeficijent trenja i mogu podnijeti visoka opterećenja.

Metalna maziva su meki metali kao npr. Pb i Cu. Koriste se pri izvlačenju čelika visoke čvrstoće.

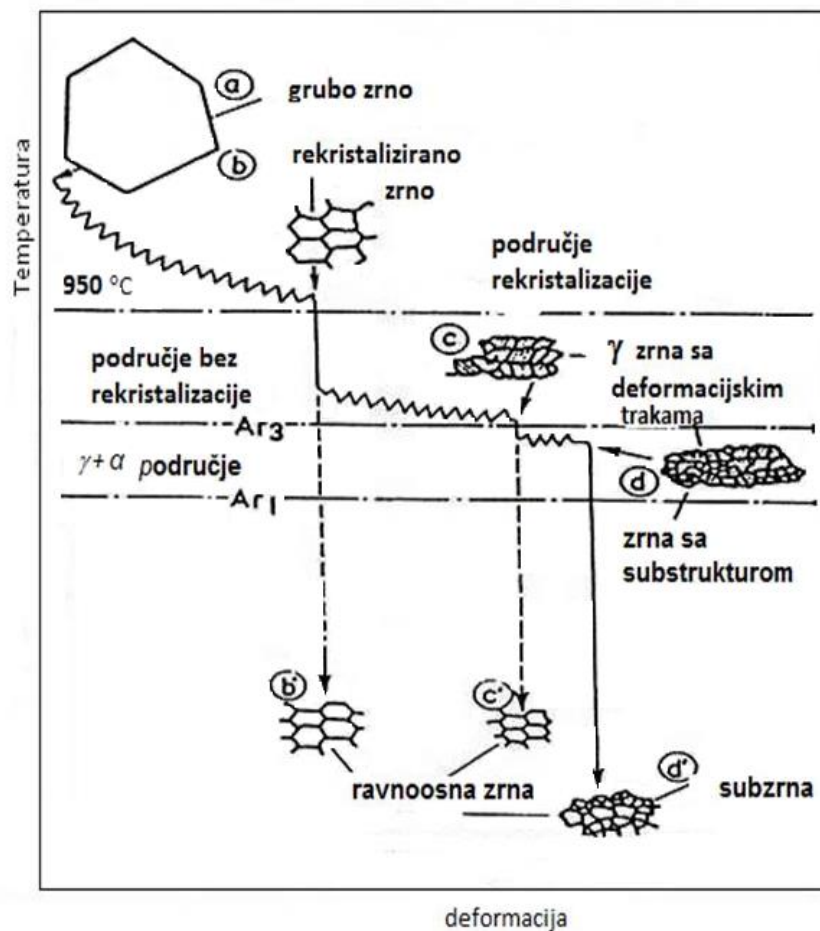
5. PREGLED TEHNOLOGIJA OBLIKOVANJA DEFORMIRANJEM

Metali i njihove slitine se mogu oblikovati deformiranjem u toplom i u hladnom stanju. Kod većine metala provodi se najprije topla deformacija, a nakon toga daljnje oblikovanje deformiranjem može se provoditi u toplom ili hladnom stanju.

5.1. Topla i hladna deformacija

5.1.1. Topla deformacija

Ako se metali i njihove slitine oblikuju deformiranjem na temperaturama iznad temperature rekristalizacije onda govorimo o toploj plastičnoj deformaciji. Metali se prije tople deformacije zagrijavaju na temperaturu koja će osigurati da se planirana deformacija završi iznad temperature rekristalizacije, slika 5.1.

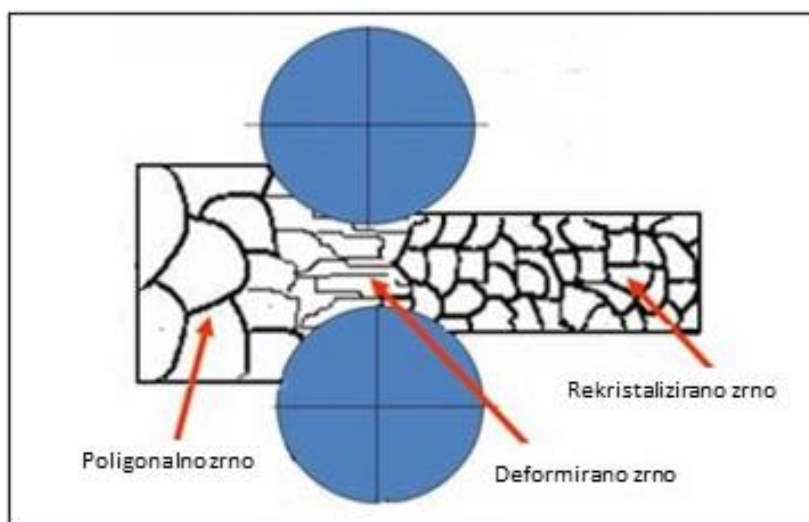


Slika 5.1. Promjena veličine zrna kod tople deformacije [10]

Kod tople plastične deformacije istovremeno s deformiranjem u strukturi deformiranog metala odvijaju se složeni procesi koji su uzajamno povezani. Toplina apsorbirana u metalu

zagrijavanjem povećava energiju toplinskih oscilacija atoma i na taj način se povećava njihova pokretljivost unutar slojeva atoma. To dovodi do porasta kristalnog zrna. Deformiranjem se atomi premještaju iz jednog u drugi ravnotežni položaj pri čemu su veze među njima postojane. Deformiranjem u kristalnoj rešetci nastaje velik broj defekata – grešaka. Najvažnije greške su dislokacije. Što je njihov broj veći to je veće narušavanje idealne građe kristalne rešetke i daljnja deformacija je otežana. Kažemo dolazi do očvršćavanja.

Kada se ostvari kritični stupanj deformacije, istovremeno s procesom deformacije (očvršćavanjem) odvijaju se procesi oporavka i rekristalizacije (omekšanja). Nazivamo ih dinamički oporavak i dinamička rekristalizacija, slika 5.2. Pojednostavljeno rečeno, oporavak je proces kod kojeg se smanjuje broj dislokacija, a veličina zrna ostaje nepromijenjena. Rekristalizacija je proces kod kojeg iz jednog deformiranog zrna nastaje više sitnijih nedeformiranih zrna koji ne sadrže dislokacije, slika 5.3.



Slika 5.2. Promjena strukture tijekom tople deformacije [4]

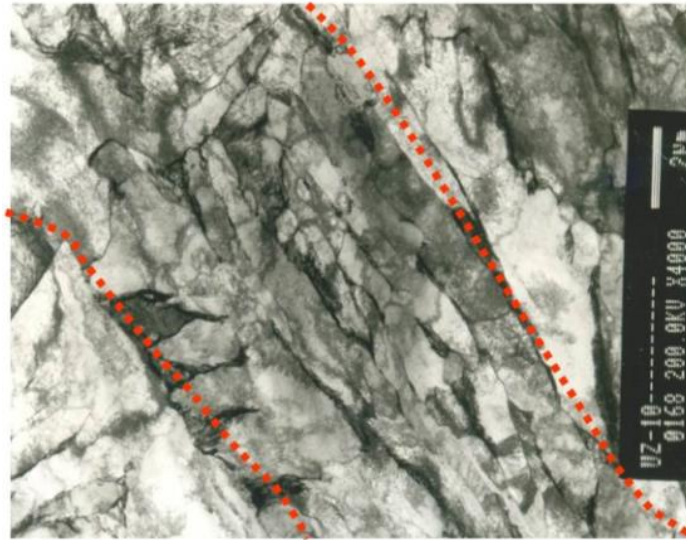
Za svaki metal ili slitinu temperatura rekristalizacije T_R i temperatura oporavka T_o određeni su temperaturom topivosti T_t tog metala ili slitine. Temperatura rekristalizacije dana je sljedećom jednačinom:

$$T_R = 0,4T_t \quad (5.1)$$

A temperatura oporavka:

$$T_o = (0,25 \text{ do } 0,30)T_t \quad (5.2)$$

I nakon oporavka i nakon rekristalizacije deformacija se može nastaviti. Kaže se da dolazi do omekšanja.



Slika 5.3. Prikaz rekristalizacije u deformiranom zrnju pri termomehaničkoj obradi niobijem mikrolegiranog čelika [4, 10]

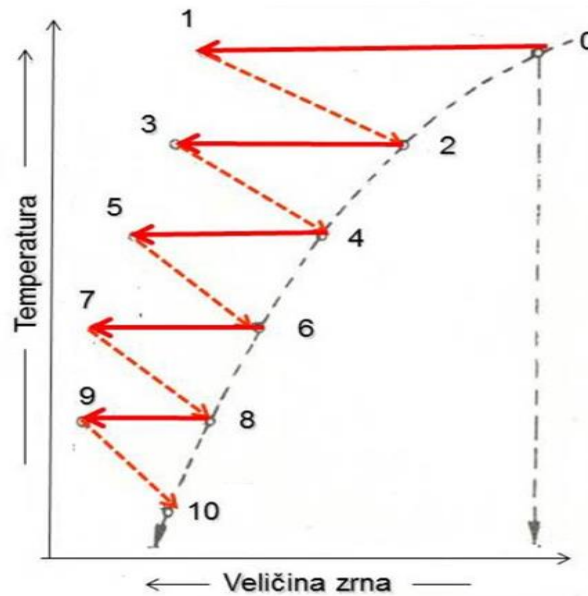
Ako se rekristalizacija i oporavak odvijaju istovremeno s deformiranjem, odvija se dinamička rekristalizacija i oporavak. Ako se pak oni odvijaju kad završi deformacija, odvija se statička rekristalizacija i statički oporavak.

Daljnijim deformiranjem rekristalizirana zrna se ponovo deformiraju i ponovo rekristaliziraju. Nakon završene tople deformacije iz jednog zrna rekristalizacijom nastaje više sitnijih zrna. Na taj način toplom deformacijom se kristalna zrna usitnjavaju, slika.5.1., što ima za posljedicu bolja mehanička svojstva.

Toplo valjanje limova i traka odvija se u više prolaza ovisno o tipu valjačke pruge. Uložak iz niskougličnog i nekih drugih čelika se prije valjanja zagrijava na temperaturu koja uglavnom mora biti dovoljno visoka da se valjanje završi iznad temperature transformacije austenita u feritno-perlitnu strukturu, slika.5.1.

Proces valjanja obično se odvija u dvije faze: preddeformacija i završna deformacija. U preddeformaciji, koja se odvija na visokim temperaturama i uz visoke stupnjeve redukcije (visok stupanj deformacije), odvija se potpuna dinamička rekristalizacija i postiže značajno usitnjenje zrna. U završnoj deformaciji, koja se također odvija u više provlaka, postiže se konačno usitnjenje zrna. Stupnjevi deformacije su ovisni o temperaturi i u zadnjoj provlaci ne smije biti manji od 16%. Brzina deformacije se prema kraju povećava i ako prelazi brzinu rekristalizacije oporavak i rekristalizacija se ne stignu odviti i izostaju.

Završna temperatura deformacije je bitna za svojstva valjanog proizvoda. Ako se deformacija završi na visokim temperaturama konačna veličina zrna nakon fazne transformacije je krupnija u usporedbi kad se valjanje završi na temperaturama bliskim temperaturi fazne transformacije. Ovdje je bitna i brzina hlađenja nakon deformacije. Što je brzina hlađenja veća dobije se sitnije konačno zrno, slika 5.4.



Slika 5.4. Usitnjenje zrna pri toploj plastičnoj deformaciji [4]

Kod tople deformacije utjecaj brzine deformacije je veći. Razlog tome je što kod tople deformacije teku paralelno dva suprotna procesa (proces očvršćivanja i proces rekristalizacije).

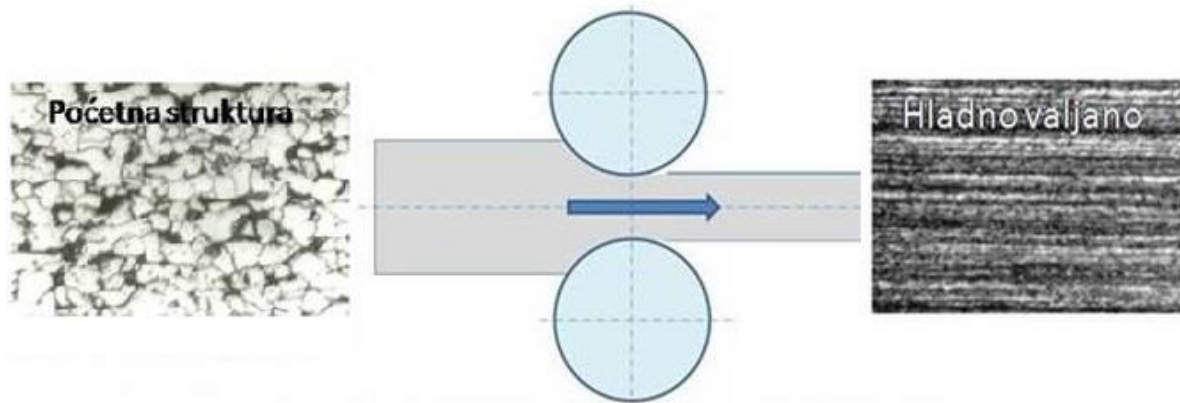
Prednosti tople deformacije su u tome što je otpor deformaciji znatno manji pa je moguće provoditi veće stupnjeve deformacije. Kod oblikovanja čelika deformiranjem, lijevani čelik (čelik proizveden u čeličani) uvijek se najprije oblikuje deformiranjem u toplom stanju.

5.1.2. Hladna plastična deformacija

Hladna deformacija se provodi na temperaturama nižim od temperature rekristalizacije i na taj način specifična je za svaki materijal. To znači da se deformiranjem zrno izdužuje i ne nastaju nova zrna, slika 5.5.

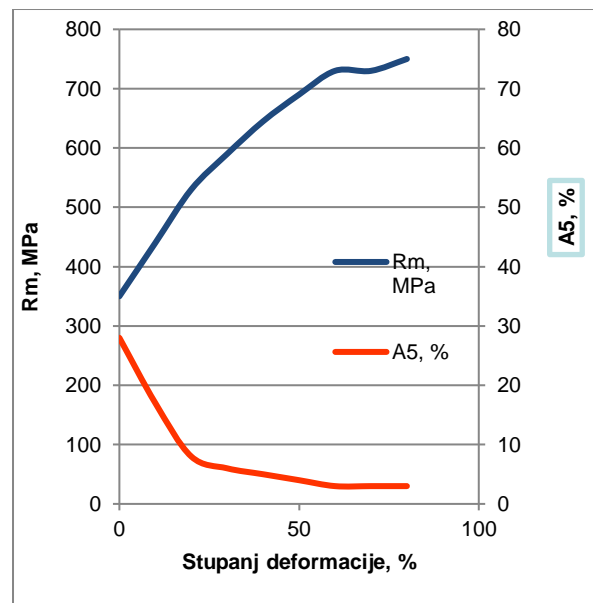
Kod hladne deformacije veći dio mehaničke energije utrošene na deformaciju transformira se u unutarnju energiju deformiranog materijala i alata što se opaža njihovim zagrijavanjem. Manji dio te energije “pohrani” se u metalu u obliku energije naprezanja. Povezana je s povećanjem broja dislokacija. Količina pohranjene energije ovisi o više faktora. Smatra se da pohranjena energija raste s porastom stupnja deformacije, ali i sa smanjenom brzinom deformacije. Kod hladne deformacije značajno se povećava broj dislokacija, jer se kod hladne deformacije ne odvijaju mehanizmi rekristalizacije i oporavka tijekom procesa (dinamički procesi).

Brzina očvršćivanja pri hladnoj deformaciji je manja kod metala koji imaju gusto složenu heksagonsku rešetku. Porastom temperature smanjuje se brzina deformacijskog očvršćivanja. Kod hladne plastične deformacije dolazi do smanjenja plastičnosti i povećanja deformacijskog otpora. Dolazi do pojave trakaste strukture ili teksture, slika 5.5.



Slika 5.5. Promjena mikrostrukture kod hladne deformacije

Kristalna tekstura se pojavljuje samo kod metala oblikovanih u hladnom stanju. Hoće li nastati trakasta ili vlaknasta struktura ovisi o tehnologiji oblikovanja deformiranjem. Vlaknasta tekstura nastaje kod hladnog vučenja i prešanja a trakasta kod hladnog valjanja. Strukturna tekstura nastaje vlaknastom ili trakastom raspodjelom nehomogenih primjesa u metalu. Hladnom plastičnom deformacijom mijenjaju se mehanička svojstva. S porastom stupnja deformacije čvrstoća se povećava a istežljivost smanjuje, slika 5.6.



Slika 5.6. Mehanička svojstva niskougličnog čelika u ovisnosti o stupnju hladne deformacije [1]

Ako se hladno deformirani metal zagrijava na određenu temperaturu mogu mu se djelomično ili potpuno vratiti njegova osnovna mehanička i fizikalna svojstva. Zagrijavanjem hladno deformiranog metala u njemu se mogu, ovisno o temperaturi, odvijati dva procesa:

- statičko oporavljanje i
- statička rekristalizacija.

Oporavljanjem, fizička i mehanička svojstva metala i njihovih slitina, teže da se vrate početnim vrijednostima. Kako je već rečeno oporavljanje se odvija na temperaturi koja iznosi 0,25 do 0,30 od temperature taljenja. Na oporavljanje hladno deformiranog metala utječe temperatura naknadnog zagrijavanja, trajanje zagrijavanja i stupanj prethodne hladne deformacije. Što je veći stupanj hladne plastične deformacije tim će se brže metal oporavljati

. Ovisnost trajanja oporavljanja od temperature može se izraziti jednadžbom:

$$t = Ke^{-\alpha T} \quad (5.3)$$

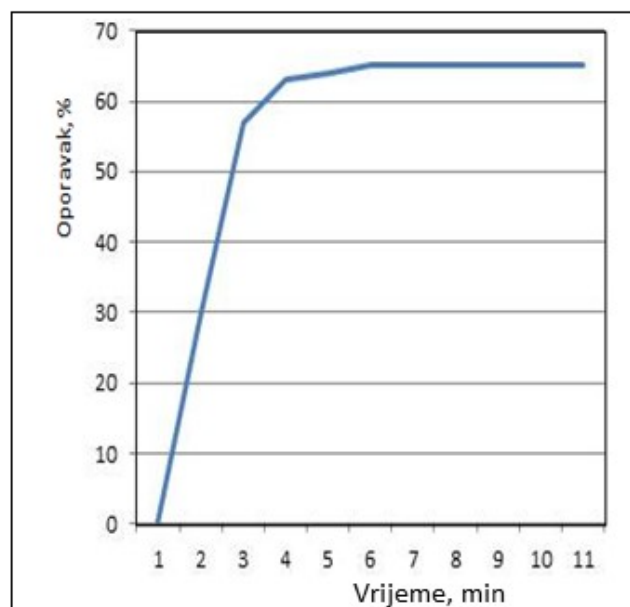
t – trajanje (vrijeme) zagrijavanja za oporavljanje

T – temperatura zagrijavanja,

K – konstanta ovisna o karakteristikama metala.

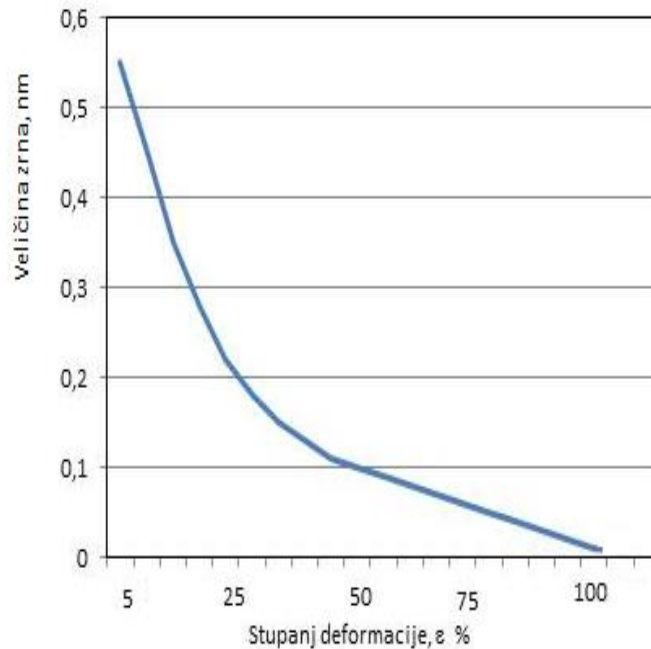
Rezultate oporavljanja moguće je prikazati dijagramom oporavljanja, slika 5.7.

Na temperaturama višim od temperature oporavljanja dolazi do rekristalizacije. Početak rekristalizacije najavljuje pojava rekristalizacijskih klica ili rekristalizacijskih centara. Temperatura rekristalizacije T_R je kao i temperatura oporavka T_o ovisna o sastavu materijala odnosno o temperaturi taljenja T_t . Do rekristalizacije dolazi pod određenim uvjetima. Stupanj hladne plastične deformacije mora prijeći određenu kritičnu vrijednost. Kritični stupanj deformacije različit je za razne metale i leži između 2 i 10%. Svaki metal ima kritičnu temperaturu iznad koje počinje proces rekristalizacije.



Slika 5.7. Ovisnost oporavka zrna o vremenu

Kod viših temperatura moguće je nepoželjni porast zrna i time pogoršanje svojstava. Rezultati promjena strukture prikazuju se u obliku rekristalizacijskih dijagrama, slika 5.8..



Slika 5.8. Ovisnost veličine zrna o stupnju deformacije (1)

Povećanjem stupnja deformacije veličina zrna se smanjuje, a povećanjem temperature zagrijavanja veličina zrna raste. Taj porast je viši što je manji stupanj deformacije. Kod velikih deformacija i visokih temperatura žarenja može doći do određenog nepoželjnog povećanja zrna. Ta pojava vezana je uz sekundarnu rekristalizaciju.

5.1.2.1. Očvršćivanje metala kod hladne deformacije

Funkcionalna ovisnost promjene specifičnog deformacijskog otpora o stupnju deformacije grafički je predstavljena krivuljom očvršćivanja. Razlikuju se tri reda krivulja očvršćivanja:

- krivulje očvršćivanja prvog reda, gdje se deformacija izražava produljenjem

$$\varepsilon = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5.4)$$

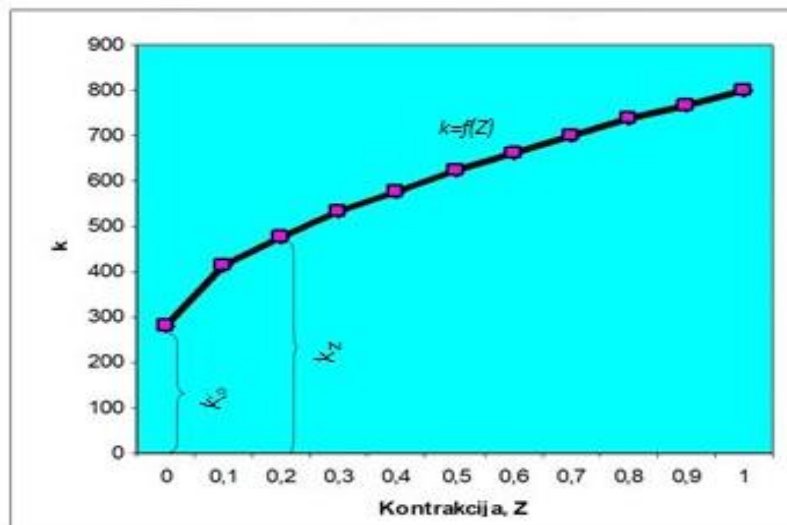
- krivulje očvršćivanja drugog reda, gdje se deformacija izražava kontrakcijom

$$Z = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (5.5)$$

- krivulje očvršćivanja trećeg reda, gdje se deformacija izražava logaritamski:

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h} \quad (5.6)$$

Krivulje očvršćivanja određujemo vlačnim pokusom pri jednolikoj deformaciji probnog uzorka. Završna točka krivulje očvršćivanja dobivena vlačnim pokusom odgovara deformaciji u momentu pojave lokalne kontrakcije. Deformacija koja odgovara pojavi lokalne kontrakcije je relativno mala u usporedbi s deformacijama koje se javljaju u realnim procesima. Na slici 5.9. je prikazana krivulja očvršćivanja II reda.



Slika 5.9. Krivulja očvršćivanja materijala hladnom deformacijom [1]

Analitička predodžba krivulja očvršćivanja drugog reda po GUBKI-novoj metodi je:

$$k = k_0 + (k_m - k_0) \left(\frac{Z}{Z_m} \right)^2 \quad (5.7)$$

gdje je:

$$k_0 = R_e \quad (5.8)$$

$$k = \frac{R_m}{1 - Z_m} \quad (5.9)$$

$$k = k_m \left(\frac{1 - 2Z_m + Z}{1 - Z_m} \right) \quad (5.10)$$

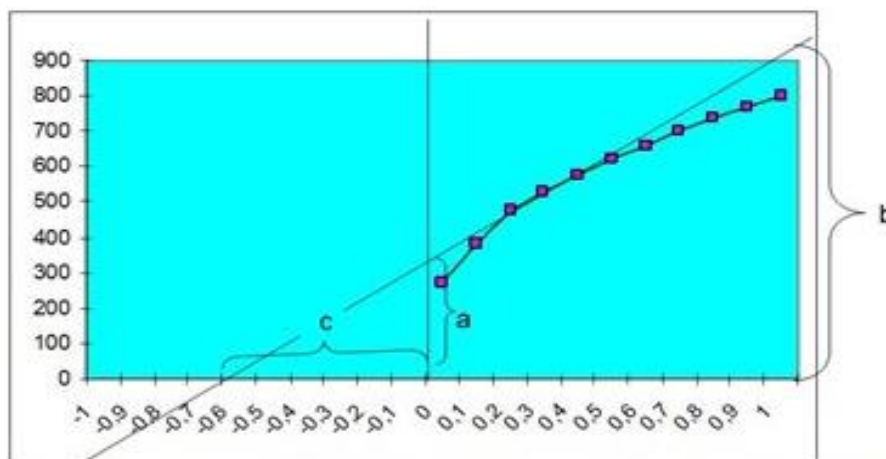
$$Z_m = \frac{A_0 - A_m}{A_0} \quad (5.11)$$

$$n = \frac{k_m}{k_m - k_0} \cdot \frac{Z_m}{1 - Z_m} \quad (5.12)$$

$$R_m = \frac{F_m}{A_0} \quad (5.13)$$

Krivulja očvršćivanja predstavlja funkcionalnu ovisnost stvarnog naprezanja u ispitnom uzorku o deformaciji. Stvarno naprezanje u ispitnom uzorku u jednom momentu sveden je na trenutni presjek ispitnog uzorka.

Grafički prikaz krivulje očvršćivanja provodi se na način da se za eksperimentalno određene kontrakcije Z izračuna k , te prikaže njihova ovisnost, slika 5.10.



Slika 5.10. Krivulja očvršćivanja po Gupkinu određena tangentom u točki lokalizacije naprezanja

Jednadžba tangente na krivulju očvršćivanja u točki lokalizacije deformacije je:

$$k = k_m \left(\frac{1 - 2Z_m + Z}{1 - Z_m} \right) \quad (5.14)$$

Karakteristični odsječci tangente na osima k (a) i (b), te na osi Z (c). Za :

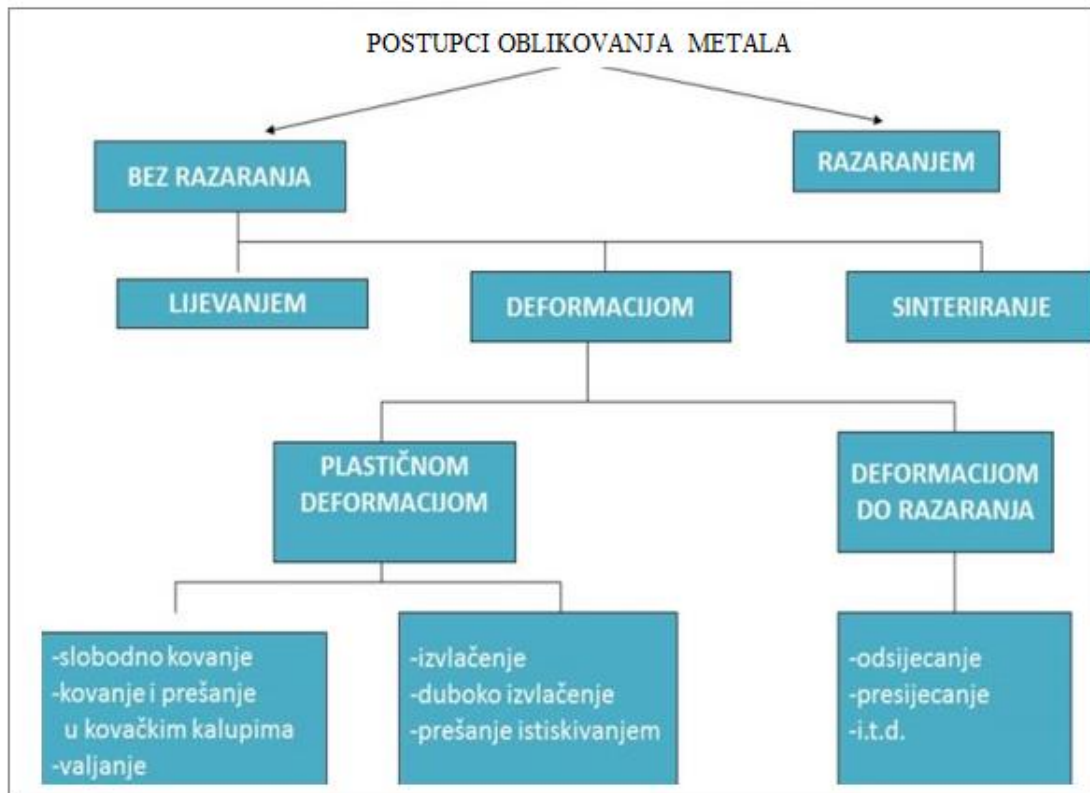
$$Z = 0 \quad a = k_m \frac{1 - 2Z_m}{1 - Z_m} \quad (5.15)$$

$$Z = 1 \quad b = 2k_m \quad (5.16)$$

$$k = 0 \quad c = 1 - 2Z_m \quad (5.17)$$

5.2. Pregled tehnologija oblikovanja deformiranjem

Metali i njihove slitine se oblikuju bez razaranja lijevanjem, deformiranjem i sinteriranjem. Preko 85% proizvedenog čelika prerađuje se oblikovanjem deformiranjem. Na slici 5.11. dan je pregled postupaka obrade metala deformiranjem.

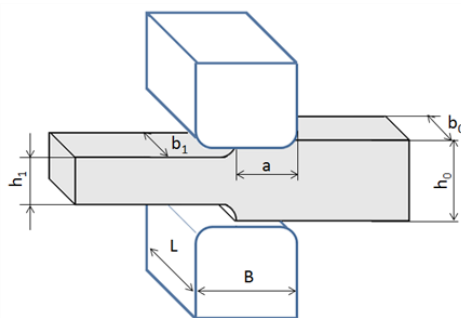


Slika 5.11. Postupci oblikovanja metala i njihovih slitina deformacijom [5]

Glavni industrijski postupci kojima se plastičnom deformacijom oblikuju metalni predmeti su slobodno kovanje i prešanje, kovanje i prešanje u kalupima, prešanje istiskivanjem, prešanje tečenjem, izvlačenje, duboko izvlačenje, valjanje i savijanje.

5.2.1. Oblikovanje metala kovanjem

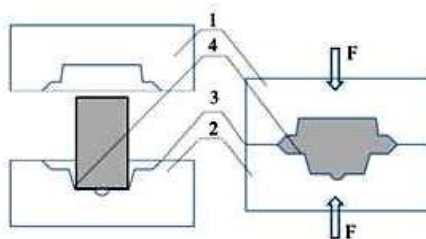
Slobodno kovanje ili prešanje je najstariji postupak oblikovanja materijala deformiranjem. Provođi se između dvije paralelne plohe na čekićima i prešama u toplom stanju višestrukim udarcima malja po zagrijanom metalu, slika 5.12. Brzina alata na čekićima je 5-7 m/s, a na prešama do 1,5 m/s.



Slika 5.12. Shematski prikaz slobodnog kovanja [5]

Ovim postupkom oblikuju se otkivci mase do 400 t. Otkivci imaju velike tolerancije na dimenzije. Konačan oblik proizvoda postiže se naknadnom strojnom obradom zbog čega otkivci imaju i određeni dodatak za strojnu obradu.

Za razliku od slobodnog kovanja gdje materijal može slobodno teći u pravcima normalnim na pravac kretanja alata – čekića, kod kovanja u kovačkim kalupima ili ukovnjima tečenje materijala ograničeno je zidovima gravure, slika 5.13.. Kovanjem u kovačkim kalupima proizvode se otkivci složenog oblika. Deformacija se provodi u toplom stanju. Zagrijani metal se utiskuje u gravuru kovačkog kalupa udarcima čekića ili tlakom preše. Otkivak poprima oblik kalupa.

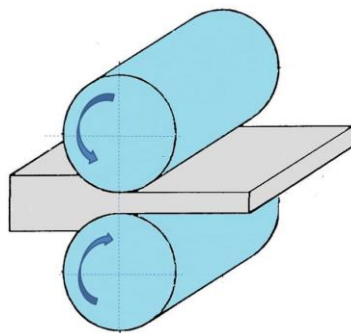


Slika 5.13. Shematski prikaz kovanja u kovačkim kalupima (1- gornji kalup, 2 - donji kalup, 3 – vijenac, 4 – gravura) [5]

Ovom tehnologijom obrađuju se otkivci u velikim serijama, za razliku od slobodnog kovanja kod kojeg su otkivci jednostavnog oblika. Ovom tehnologijom proizvode se otkivci maksimalne mase do nekoliko stotina kilograma. Za postizanje konačnog oblika potrebna je samo djelomična strojna obrada.

5.2.2. Oblikovanje metala valjanjem

Valjanje je najzastupljeniji postupak oblikovanja deformiranjem. Provodi se prolaskom metala između valjaka koji se okreću u suprotnom smjeru, slika 5.14. Pri tome se ostvaruje smanjenje poprečnog presjeka i povećava duljina. Valjanjem se dobivaju poluproizvodi i gotovi proizvodi različitog oblika (profili, limovi i trake, nosači, cijevi itd.). Poluproizvodi se valjaju u toplom stanju, a gotovi proizvodi u toplom i hladnom stanju.

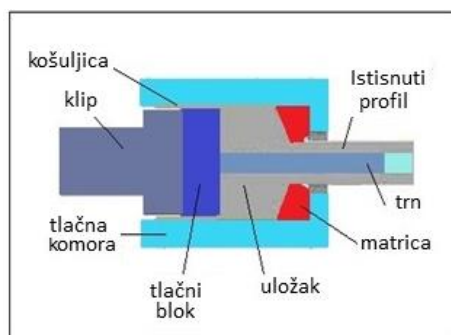


Slika 5.14. Shematski prikaz procesa valjanja metala [5]

Provodi se između valjaka koji se okreću u suprotnom smjeru na komadima velike dužine. Valjanje je masovna proizvodnja. Može biti toplo (poluproizvodi) i hladno (gotovi proizvodi). Valjaju se različiti profili, najčešće plosnati i okrugli.

5.2.3. Oblikovanje metala prešanjem

Prešanje profila i cijevi istiskivanjem provodi se u toplom ili hladnom stanju tako da se zagrijani metal istiskuje kroz profilnu matricu, slika 5.15. Matrice na sebi mogu imati jedan ili više otvora.

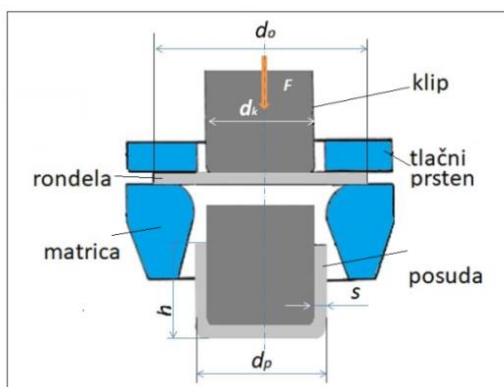


Slika 5.15. Shematski prikaz prešanja istiskivanjem [5]

Na ovaj način proizvode se cijevi složenih oblika uglavnom iz lakih metala i njihovih slitina. Duljina je ograničena dimenzijama strojeva i kreće se uglavnom do 25m. Danas je ovaj postupak osnovni postupak za oblikovanje deformiranjem obojenih metala i slitina.

5.2.4. Oblikovanje metala dubokim izvlačenjem

Najčešće se provodi hladna deformacija. Izrađuju se posude, karoserije itd., slika 5.16.

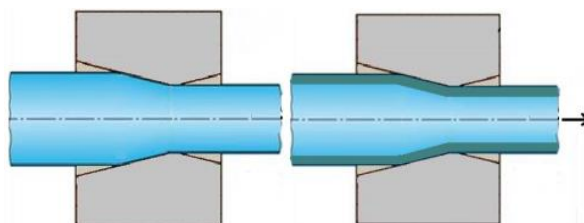


Slika 5.16. Shematski prikaz dubokog izvlačenja [5]

Duboko izvlačenje provodi se uglavnom u hladnom stanju. Metalna ploča se učvrsti i utiskivačem utiskuje u matricu i na taj način dobiva željeni oblik. Na ovaj način proizvode se posude različita oblika, kao što su: boce za plinove, posude, karoserije automobila itd. Proces se provodi u više faza s različitim alatom.

5.2.5. Oblikovanje metala provlačenjem u hladnom stanju

Provlačenjem u hladnom stanju oblikuju se puni ili šuplji profili različitih oblika. Proces se odvija provlačenjem materijala kroz matricu koja određuje završni oblik proizvoda, slika 5.17. Pri tome se ostvaruje redukcija od 10 do 30%. Postupak se provodi uglavnom u hladnom stanju iako se može materijal zagrijati prije deformacije. U toplom stanju ovim postupkom se proizvode cijevi, profili i žice. Karakteristike ovog procesa su značajno povećanje čvrstoće i tvrdoće metala te dobivanje površine vrlo visoke kvalitete.



Slika 5.17. Shematski prikaz provlačenja [5]

Vlačno naprezanje postignuto je silom provlačenja dok tlačno naprezanje nastaje u kontaktu deformiranog metala sa stjenkom matrice.

6. LITERATURA

1. I. Mamuzić: *Teorija plastične deformacije metala*, skripta, Metalurški fakultet, Sisak 2000.
2. B. Grizelj: *Oblikovanje metala deformiranjem*, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod 2002.
3. Čaušević: *Teorija plastične prerade metala*, Svjetlost, Sarajevo 1979.
4. Rešković: *Teorija oblikovanja deformiranjem*, recenzirana predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak 2014.,
<https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/1-godina-diplomskog-studija/S%20Reskovic%20TEORIJA%20OBLIKOVANJA%20DEFORMIRANJEM.pdf/view>
5. S. Rešković, I. Jandrlić: *Tehnologije oblikovanja deformiranjem*, interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak 2017.
6. M. Čaušević: *Obrada metala valjanjem*, Veselin Maslaša, Sarajevo 1983.
7. F. Vodopivec: *Kovine i zlitine, kristalna zgradba, mikrostruktura, procesi sestava in lasnosti*, Inštitut za kovinske materijale in zlitine, Ljubljana 2002
8. T. Matković, P. Matković, Lj. Slokar: *Zmamost omatalima* Zbirka riješenih zadataka, Metalurški fakultet Sisak 2010.,
<https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/preddiplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-preddiplomskog/Zadaci%20iz%20FM%20re-TNR-Boja-1.pdf/view>
9. T. Matković, P. Matković: *Fizikalna metalurgija 1*, skripta, sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak 2014.
<https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/preddiplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-preddiplomskog/Fizikalna%20metalurgija%20I.pdf/view>
- 10 S. Rešković; *Studij mehanizama precipitacije i rekristalizacije u području završnog oblikovanja mikrolegiranog čelika*, Doktorska disertacija, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Sisak 1997. g
- 11 I. Jandrlić., *Raspodjela naprezanja u zoni deformacije niobijem mikrolegiranog čelika* 2015., doktorska disertacija, Metalurški fakultet, Sisak
- 12 Brlić, Tin; Debruyne, Dimitri; Lava, Pascal; Rešković, Stoja; Jandrlić, Ivan *Identification of Lüders bands using digital image correlation // The Holistic Approach to Environment*, 9 (2019), 1; 8-11
- 13 Brlić, Tin; Rešković, Stoja; Jandrlić, Ivan: *Study of Inhomogeneous Plastic Deformation Using Thermography // 16th International Scientific Conference on Production Engineering - CIM 2017 / Zagreb: HUPS, 2017. str. 65-68*
- 14 Jandrlić, Ivan; Rešković, Stoja; Brlić, Tin; Lazić, Ladislav; Aleksandrov Fabijanić, Tamara: *Investigation of deformation by digital image correlation // 16th International Foundrymen Conference, Global Foundry Industry - Perspectives for the Future / Sisak: University of Zagreb Faculty of Metallurgy, 2017. str. 115-121*
- 15 I. Jandrlić, T. Brlić *Termografija, DRUGA RADIONICA HRZZ projekta "Istraživanja početka plastičnog toka metala kod hladne deformacije"* Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak , 12.02.2020.
- 16 T. Brlić *Karakterizacija nehomogenih deformacija na početku plastičnog toka kod hladne deformacije niobijem mikrolegiranog čelika, DRUGA RADIONICA HRZZ projekta "Istraživanja početka plastičnog toka metala kod hladne deformacije"* Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak 12.02.2020

- 17 Brlić, Tin; Rešković, Stoja; Jandrlić, Ivan Influence of Niobium Content on Strain Amount in Lüders Bands in Niobium Microalloyed Steel // *Metals and materials international*, **26** (2020), 2; 179-187
- 18 Jandrlić, Ivan; Brlić, Tin; Rešković, Stoja: Application of thermography in the production and processing of metallic materials // *Proceedings Book of 15th International Foundrymen Conference / Sisak: Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet*, 2016. str. 99-108
- 19 S. Rešković i suradnici. Ispitivanje naljepka na pilger valjcima, izvješće za CMC Sisak, d.o.o Metalurški fakultet, Sisak 2006.
- 20 Ispitivanje naljepka na valjcima i bešavnim cijevima, Tehnička kontrola, Željezara Sisak 1988.
- 21 S. Rešković, A. Preloščan; Međutjecaji mehanizama ojačanja, omekšanja i izlučivanja u završnoj termomehaničkoj obradi čelika mikrolegiranog niobijem, *Strojarstvo*, 32(1990)2, s.137-142
- 22 Rešković, Stoja; Slokar Benić, Ljerka; Lovrenić- Jugović, Martina, The Interdependence of the Degree of Precipitation and Dislocation Density during the Thermomechanical Treatment of Microalloyed Niobium Steel // *Metals*, **10** (2020), 2; 1-11
- 23 S. Rešković: Tehnologije oblikovanja deformiranjem, interna skripta, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak 2011.
- 24 I. Mamuzić, V. Drujan: Teorija, materijali, tehnologija čeličnih cijevi, Hrvatsko metalurško društvo, Zagreb 1996.
- 25 S. Rešković: Ispitivanje materijala, Metalurški fakultet, Sisak 2008, <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/preddiplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-preddiplomskog/web1.pdf/view>
- 26 P. Pavlović: Materijal čelik, SKTH Kemija u industriji, Zagreb 1990.