

Pogreške u postupcima oblikovanja metala deformiranjem

Bratić, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:363339>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**POGREŠKE U POSTUPCIMA
OBLIKOVANJA METALA
DEFORMIRANJEM**

Mentor:

Doc. dr. sc. Zdenka Keran, dipl. ing.

Student:

Mateo Bratić

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Mateo Bratić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mateo Bratić** Mat. br.: **0035214070**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Pogreške u postupcima oblikovanja metala deformiranjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Defects in metal forming processes**

Opis zadatka:

U postupcima oblikovanja metala deformiranjem veliki je broj utjecajnih faktora. Faktori koji najviše utječu na proces deformacije metalnog materijala, u smislu mogućnosti pojave pogreške, jesu temperatura na kojoj se proces odvija, ukupna deformacija, mehanička svojstva materijala, brzina deformacije i stanje naprezanja.

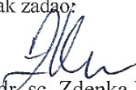
U završnom radu potrebno je proučiti faktore koji utječu na pojavu pogreške i dati pregled njihovog pojedinačnog utjecaja. Prema pojedinom postupku oblikovanja ili prema skupinama postupaka oblikovanja objasniti pojavnosti tipičnih pogrešaka. Posebnu pažnju usmjeriti na postupke valjanja kao temeljne postupke u proizvodnji metanih obradaka.

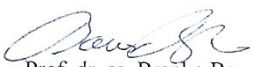
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
 30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

 Doc. dr. sc. Zdenka Keran

Predsjednik Povjerenstva:

 Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
1.1. Tehnologija oblikovanja deformiranjem	1
1.2. Fizikalna priroda deformacije	1
1.2.1. Deformacija monokristala	2
1.2.2. Nesavršenosti u kristalnoj rešetci	3
1.2.3. Deformacija polikristala	4
2. FAKTORI KOJI UTJEČU NA POJAVU POGREŠKI KOD DEFORMACIJE METALNIH MATERIJALA	6
2.1. Temperatura	6
2.1.1. Hladna plastična deformacija	6
2.1.2. Topla plastična deformacija	7
2.1.3. Usporedba obrade hladnom i toplom plastičnom deformacijom	8
2.2. Trenje	9
2.2.1. Vrste trenja	10
2.2.2. Trenje u hladnoj plastičnoj deformaciji	10
2.2.3. Trenje u toploj plastičnoj deformaciji	11
2.3. Stupanj deformacije	12
2.4. Mehanička svojstva materijala	13
2.5. Brzina deformacije	13
2.6. Shema napregnutog stanja	14
3. UOBIČAJENE POGREŠKE PREMA POSTUPCIMA	16
3.1. Valjanje	16
3.1.1. Tehnologija valjanja	16
3.1.2. Greške dimenzija i oblika	17
3.1.3. Površinske greške	23
3.1.4. Unutarnje greške nastale valjanjem	27
3.2. Kovanje	28
3.2.1. Tehnologija kovanja	28
3.2.2. Geometrijske greške prilikom kovanja	29
3.2.3. Površinske i strukturne greške	30
3.3. Istiskivanje (ekstruzija)	32
3.3.1. Tehnologija istiskivanja	32
3.3.2. Površinske greške	32
3.3.3. Strukturne greške	33
3.4. Provlačenje	35

3.4.1. Tehnologija provlačenja	35
3.4.2. Greške kod provlačenja	35
3.5. Štancanje i probijanje	36
3.5.1. Tehnologija štancanja i probijanja	36
3.5.2. Greške kod štancanja i probijanja	36
3.6. Savijanje	37
3.6.1. Tehnologija savijanja	37
3.6.2. Greške kod savijanja	37
3.7. Duboko vučenje	38
3.7.1. Tehnologija dubokog vučenja	38
3.7.2. Greške kod dubokog vučenja	39
4. ZAKLJUČAK	41
LITERATURA	42

POPIS SLIKA

Slika 1.	Postupci oblikovanja metala [1].....	1
Slika 2.	a) prostorno centirana, b) plošno centirana, c) heksagonska [4].....	2
Slika 3.	Dislokacije: a) vijčana dislokacija; b) rubna dislokacija [7]	2
Slika 4.	Deformacija: a) klizanjem; b) blizančenjem [2]	3
Slika 5.	Ravnine klizanja u FCC rešetki [8]	3
Slika 6.	Nesavršenosti u kristalnoj rešetci [1]	4
Slika 7.	Orijentacija ravnina klizanja [1]	4
Slika 8.	Dijagram optimalne deformabilnosti u ovisnosti o temperaturi [2].....	6
Slika 9.	Promjena oblika zrna hladnom deformacijom [9]	6
Slika 10.	Promjena svojstava materijala uslijed hladne deformacije [2]	7
Slika 11.	Promjena strukture tijekom tople deformacije [1]	8
Slika 12.	Nejednolika deformacija i mrtve zone kod tlačenja [2]	9
Slika 13.	Bowden – Taborov model trenja [2]	10
Slika 14.	Usporedba koeficijenta trenja grafita i molibdenskulfida ovisno o tlaku [2]	11
Slika 15.	Promjene dimenzija prizme pri sabijanju silom F [11]	12
Slika 16.	Ovisnost mehaničkih svojstava o stupnju deformacije [1].....	12
Slika 17.	Kvalitativni σ - ϵ dijagrami [12]	13
Slika 18.	Utjecaj brzine deformacije na specifični deformacijski otpor [13].....	14
Slika 19.	Utjecaj brzine deformacije na plastičnost kod tople deformacije [1].....	14
Slika 20.	Smještaj sulfida i fosfida na granicama zrna [2].....	15
Slika 21.	Ovisnost deformabilnosti i otpora deformaciji od sheme napregnutog stanja [2] .	15
Slika 22.	Proces valjanja	16
Slika 23.	Valjački stanovi: a) reverzibilni duo stan; b) stan sa tri valjka; c) reverzibilni kvatro stan; d) složeni valjački stan [2].....	17
Slika 24.	Nepravilni oblici izvaljanih blumova: a) blum romboičnog presjeka; b) blum sa brkom; c) uvrnuti blum; d) blum sa različitim stranicama [14].....	17
Slika 25.	Ekscentričnost [15].....	18
Slika 26.	Oblici okruglih profila: a) pravilan oblik; b-i) nepravilni oblici [14]	19
Slika 27.	Oblici kvadratnih profila: a) pravilan oblik; b-f)nepravilni oblici [14].....	20
Slika 28.	Oblici plosnatih profila: a) pravilan oblik; b-g) nepravilni oblici [14]	20
Slika 29.	Nepravilni kutni profili [14]	21
Slika 30.	Iskrivljeni profili: a) srpovit; b)nesrpovit [14].....	22
Slika 31.	Uvrnuti plosnati profil: a) jednaka debljina po širina; b) različita debljina po širina [14]	23
Slika 32.	Reljefnost uzrokovana utiskivanjem naljepaka [15]	24
Slika 33.	Nanešena ljuska [15]	24
Slika 34.	Jednostruka prevaljanost [15]	25
Slika 35.	Dvostruka prevaljanost [15].....	25
Slika 36.	Poprečno oštećenje cijevi [15]	25
Slika 37.	Greške nastale valjanjem na nasječenim i navarenim valjcima [16]	26
Slika 38.	Crta nastala tijekom valjanja [16]	26
Slika 39.	Uvaljana kovarina i šamot [16].....	27
Slika 40.	Pukotine uzrokovane unutarnjim naprezanjima [15]	27
Slika 41.	Slobodno sabijanje valjka: a) početni oblik; b) stvarni oblik; c) idealni oblik [1]	28
Slika 42.	Loše ispunjavanje kalupa zbog prevelike visina sirovca i preoštrih radijusa ukovnja [2].....	29
Slika 43.	Prikaz nastajanja preklopa [19].....	29
Slika 44.	Ilustracija pomaka ukovnja [20]	30

Slika 45.	Površinska pukotina nastala tijekom hladnog kovanja [21]	30
Slika 46.	Unutarnje pukotine [22].....	30
Slika 47.	Prikaz mrtvih zona u kutovima kalupa [22]	31
Slika 48.	Početno taljenje na granicama zrna [23].....	31
Slika 49.	Prikaz lokalizacije tečenja [22]	32
Slika 50.	Istosmjerno istiskivanje [2].....	32
Slika 51.	Površinske pukotine nastale ekstrudiranjem [25]	33
Slika 52.	Ogrebotina na ekstrudiranom profilu [26]	33
Slika 53.	Nepravilno tečenje materijala [26].....	34
Slika 54.	Lijevak nastao ekstrudiranjem [26].....	34
Slika 55.	Cijevna greška [27]	34
Slika 56.	Unutarnja pukotina nastala ekstrudiranjem [25]	35
Slika 57.	Redukcija presjeka provlačenjem [2]	35
Slika 58.	Razlika između štancanja i probijanja [28]	36
Slika 59.	Neravan rub [30]	36
Slika 60.	Kružno savijanje (lijevo) i oštro kutno savijanje (desno) [28]	37
Slika 61.	Pukotine nastale savijanjem [32]	37
Slika 62.	Elastični povrat [33]	38
Slika 63.	Ogrebotine nastale savijanjem [34].....	38
Slika 64.	Postupak dubokog vučenja [35].....	39
Slika 65.	Puknuto dno posude [35].....	39
Slika 66.	Uške na posudi [37].....	39
Slika 67.	Nabori na prirubnici (lijevo) i na stijenci (desno) [39]	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste trenja.....10
Tablica 2. Klasični postupci oblikovanja deformiranjem.....16

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
τ_{AB}	N/mm ²	Tangencijalno naprezanje u proizvoljnom presjeku
σ_y	N/mm ²	Vanjsko opterećenje
α	°	Nagib ravnine presjeka
A_0	mm ²	Početna površina
A_1	mm ²	Konačna površina
T	°C	Temperatura
T_o	°C	Temperatura oporavljanja
T_t	°C	Temperatura taljenja
T_R	°C	Temperatura rekristalizacije
h	mm	Visina
d	mm	Promjer
F	N	Vanjska sila
μ	-	Faktor trenja
p	N/mm ²	Tlak
a_0, b_0, h_0	mm	Početna širina, duljina i visina pravokutne prizme
a_1, b_1, h_1	mm	Konačna širina, duljina i visina pravokutne prizme
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_h$	mm/mm	Logaritamski stupanj deformacije širine, duljine i visine
V_0	mm ³	Početni volumen
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
R_e	N/mm ²	Granica razvlačenja
A	%	Istezljivost
Z	%	Kontrakcija
σ	N/mm ²	Naprezanje
ε	mm/mm	Istezanje
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
k	N/mm ²	Specifični deformacijski otpor
v	m/s ²	Brzina deformacije

SAŽETAK

Tehnologija oblikovanja deformiranjem podrazumijeva izradu proizvoda deformacijom materijala, bez odvajanja čestica. U radu je, uz pomoć znanja stečenog tokom studija i dodatne literature, proučen mehanizam deformacije metala, faktori koji utječu na pojavu pogreški i tipične pogreške kod klasičnih postupaka obrade deformiranjem. Deformacija metala objašnjava se na dva načina. Prvi način jest deformacija monokristala, a drugi deformacija polikristala, odnosno realnog slučaja. Iako u stvarnosti metal nije građen kao monokristal, ovakav način proučavanja bitan je za razumijevanje procesa koji se odvijaju unutar jedinice građe metala tijekom deformacije. Prikazan je pregled faktora koji igraju važnu ulogu kod oblikovanja deformiranja te kakav utjecaj ima pojedini faktor tijekom obrade. Određeni faktori mogu pozitivno utjecati na pojedina svojstva, ali negativno na druga pa je potrebno pažljivo određivanje parametara obrade. Nadalje, napravljen je pregled grešaka ovisno o vrsti postupka sa naglaskom na valjanje koji prethodi brojnim drugim obradama. Naime, valjanje je najrasprostranjenija tehnologija obrade deformiranjem te će se greške koje nastanu kod valjanja zasigurno zadržati na gotovom proizvodu. Kod grešaka su navedeni uzroci nastanka te smjernice kako spriječiti pojavu takvih grešaka.

Ključne riječi: oblikovanje metala deformiranjem; greške kod deformiranja; faktori nastanka pogrešaka; valjanje; parametri obrade

SUMMARY

Metal forming technology implies metal part production only by material deformation, without cutting. This thesis gives a study of deformation mechanism, factors that influence the occurrence of material defects and typical defects in basic deformation processes, collected from the knowledge gained during the study and from the literature review. Metal deformation is explained in two ways. The first way is the simplified case - deformation of the monocrystalline, and the second one presents the real case - deformation of the polycrystal. Although metal is not built as a monocrystal, this way of study is essential for understanding the processes that take place within the metal structure unit during deformation. The thesis gives an overview of the factors that play an important role in deformation process and explains the impact of a particular factor during material processing. Certain factors can have a positive effect on individual properties, but negatively on others, so careful determination of processing parameters is required. Furthermore, an overview of defects was made depending on the type of forming process with focus on rolling which precedes many other types of processes. Namely, rolling is the most widespread metal forming technology and defects that are made when rolling will surely be kept on the finished product. Causes of defects are given and guidelines for preventing such defects.

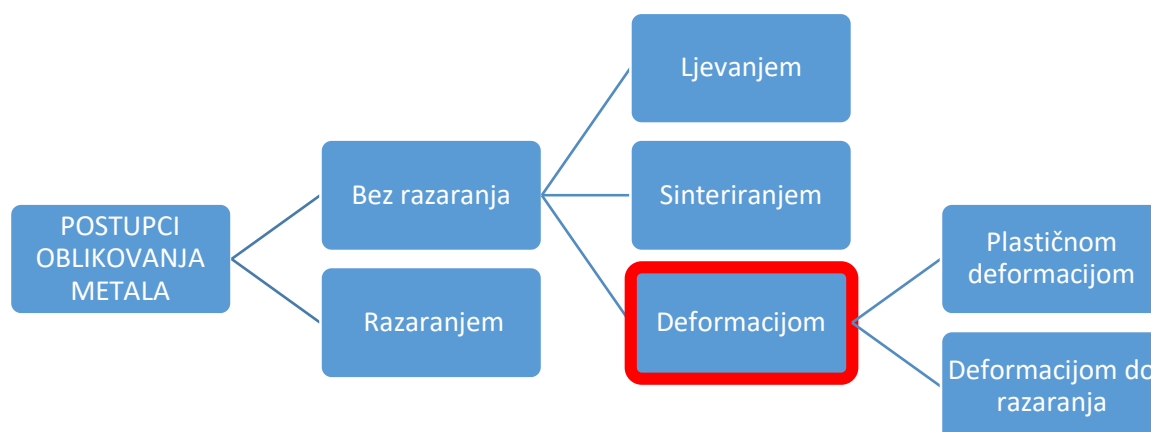
Key words: metal forming; metal forming defects; defect factors; rolling; processing parameters

1. UVOD

1.1. Tehnologija oblikovanja deformiranjem

Svrha oblikovanja metala deformiranjem jest izmjena oblika i dimenzija izradaka ne upotrebljavajući razaranje materijala. U tom procesu nastaju željena fizička i mehanička svojstva. Oblikovanje deformiranjem je najstariji način oblikovanja metala i legura. Više od 85 posto ukupnog čelika i više 90 posto obojenih metala i pripadajućih legura danas se prerađuje deformiranjem [1].

Sa velikom ekonomičnosti mogu se proizvoditi teško opterećeni dijelovi turbina, obradnih strojeva, vozila (zrakoplova, radnih strojeva, automobila), oružje, generatori pare i sl. U masovnoj proizvodnji robe široke potrošnje izrađuju se vijci, matice, uređaji i alati, pribor za jelo, pa se može reći da je oblikovanje deformiranjem nezaobilazna proizvodna tehnologija [2]. Oblikovanje metala može se provoditi uz razaranje ili bez njega. Ako se upotrebljava razaranje onda se moraju odvajati čestice za dobivanje konačnog oblika proizvoda. Tehnologije oblikovanja metala bez razaranja su lijevanje, deformiranje i sinteriranje. Na slici 1. prikazana je podjela postupaka oblikovanja metala [1].



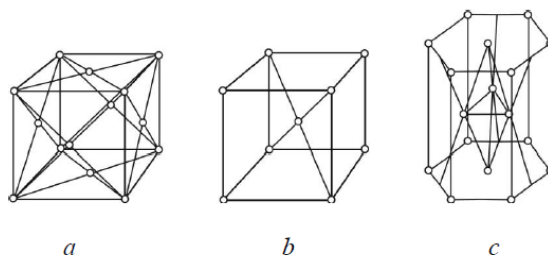
Slika 1. Postupci oblikovanja metala [1]

1.2. Fizikalna priroda deformacije

Kada na tijelo djeluje vanjska sila dolazi do deformacije tog tijela. Deformacija je izmjena pozicija atoma u kristalnoj rešetki deformiranog tijela uslijed čega se njegov oblik i dimenzije mijenjaju, dok se volumen ne mijenja. Deformacija varira ovisno o vrsti kristalne strukture, greškama unutar strukture deformiranog tijela i intenzitetu djelovanja sila. Kada vanjske sile djeluju na metalno tijelo njima se suprotstavljaju unutarnje sile sprječavajući pomak atoma iz njihovih ravnotežnih položaja. Te unutarnje sile nazivaju se naprezanja. Naprezanja se dijele na normalna i tangencijalna [1].

Vrsta kristalne strukture bitno određuje svojstva materijala. Najveći broj metala kristalizira se u tri vrste rešetki, slika 2., postoji ih još nekoliko no nisu važne za shvaćanje prirode

deformacije. Plošno centrirana rešetka odlikuje se najvećom oblikovljivošću dok heksagonska ima najmanju deformabilnost, prostorno centrirana rešetka ima srednju oblikovljivost [3].



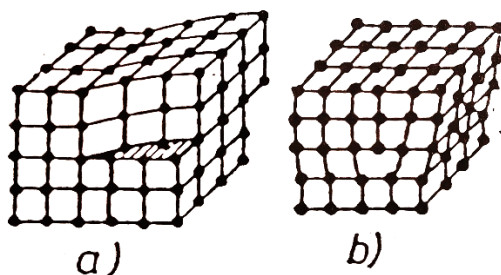
Slika 2. a) prostorno centrirana, b) plošno centrirana, c) heksagonska [4]

1.2.1. Deformacija monokristala

Monokristal nazivamo dio metala u kojem, neovisno o zoni ili vanjskom obliku, egzistira jedinstvena kristalna rešetka i na njima je najlakše objasniti fizikalne procese deformacije [5]. Kada vanjske sile djeluju na neko tijelo nastaju promjene u vidu dimenzija i oblika dotičnog tijela. Radi se o promjenama koje se obuhvaćaju povratne, reverzibilne elastične deformacije i nepovratne, ireverzibilne plastične deformacije. Prilikom manjih opterećenja deformacija postoji velika povezanost između deformacije i unutarnje energije jer se radi o elastičnoj deformaciji. Ukoliko vanjske sile premaše određenu granicu, atomi zauzimaju nove pozicije u rešetki. Uzimajući u obzir da su te nove pozicije ravnotežne, ta vrsta deformacije ostaje i nakon rasterećenja i naziva se plastična deformacija. Granica preko koje deformacija postaje plastična zove se granica elastičnosti.

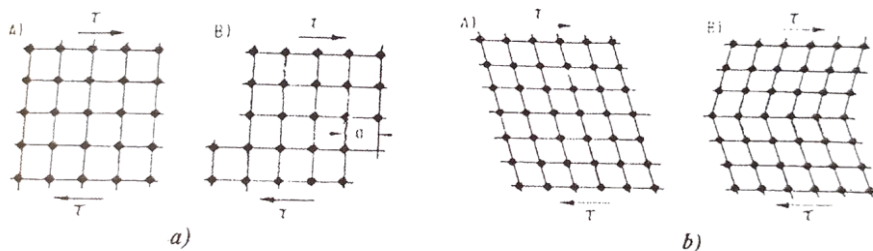
Gibanje atoma iziskuje goleme razine energije duž ravnina sa maksimalnim razmakom među atomima i shodno tome sila veze minimalna. Ukoliko metal posjeduje dislokacije, slika 3., u blizini dislokacija postoji regija smanjene čvrstoće zbog nepravilnog razmaka atoma duž dislokacije koji narušava veze među atomima. Opterećenje koje ima mali iznos i ne bi značajno utjecalo na idealni kristal uspjeli će protjerati dislokaciju kroz kristal [2].

Fundamentalno vrijedi da je plastična deformacija gibanje dislokacija kroz rešetku i ako se želi spriječiti plastična deformacija materijala, potrebno je spriječiti gibanje dislokacija [6].



Slika 3. Dislokacije: a) vijčana dislokacija; b) rubna dislokacija [7]

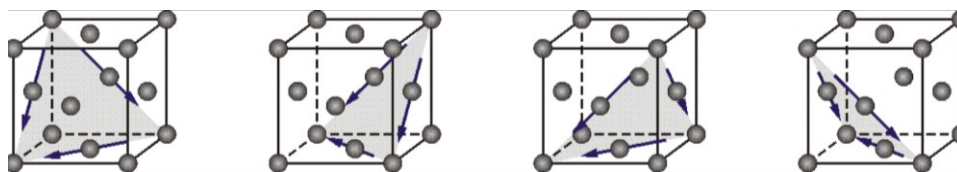
Plastična deformacija obično se zbiva na dva načina: klizanje i blizančenje, slika 4., pri čemu klizanje predstavlja pomicanje tankih slojeva monokristala u odnosu na susjedne slojeve. Blizančenjem nazivamo gibanje atoma u rešetki zbog kojeg dolazi do podjele rešetke u dva simetrična dijela različite orijentacije. Obično se blizančenje događa u ravninama koje nazivamo ravnine blizančenja [2].



Slika 4. Deformacija: a) klizanjem; b) blizančenjem [2]

Klizanje se događa po specifičnim kristalografskim ravninama koje se zato nazivaju ravninama klizanja i obično su to ravnine sa najgušće raspoređenim atomima, a pravci klizanja oni gdje je razmak atoma najmanji, slika 5.

Kada su deformacije u metalu velike za njega kažemo da je deformabilan ili oblikovljiv. Ako je deformacija relativno mala, onda je on krhak. Stupanj deformacije pokazatelj je deformabilnosti, iako u pojedinim uvjetima opterećenja deformabilan materijal može puknuti bez znatne deformacije, kao što se i malo deformabilan materijal može značajno deformirati u određenim uvjetima. Metali koji imaju velik broj kliznih ravnina i pravaca klizanja u pravilu će biti deformabilniji, što je i uzrok da su metali sa kubnom rešetkom deformabilniji od metala heksagonskom ili tetragonskom [2].



Slika 5. Ravnine klizanja u FCC rešetki [8]

Sprječavanjem gibanja deformacija povećava se otpor deformaciji. Strani atomi se generalno nastoje uvući u zone sa defektima gdje postoje prostori za njihovo smještanje, veći ili manji. Ti prostori sa utisnutim stranim atomima sprječavaju gibanje dislokacija duž rešetke kristala, pa se tako objašnjava povećanje čvrstoće kod metala, iako spoznaje ovom području nisu u potpunosti razjašnjene [2].

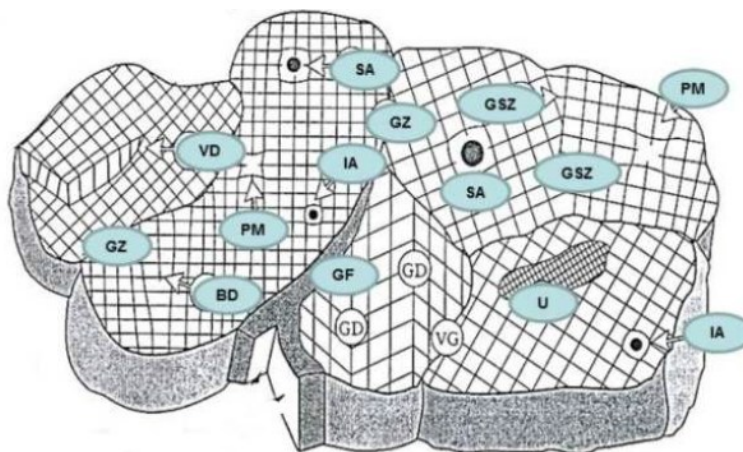
Ako je vanjsko opterećenje znano, tada je iznos tangencijalnog naprezanja τ_{AB} u proizvoljnom presjeku AB, ovisno o nagibu ravnine presjeka:

$$\tau_{AB} = 0.5 \sigma_y \sin(2\alpha) \quad (1)$$

Iz ovoga izraza slijedi da najveće tangencijalno naprezanje postoji kada je iznos $\sin(2\alpha) = 1$, ili kada $\alpha = \pi/4$ (45°). Zbog toga kada su klizne ravnine usporedne ili okomite na pravac djelovanja sile, neće doći do klizanja i kristal će se prelomiti ili dolazi do blizančenja. Također, deformacija u kristalu nastaje u ravninama koje su postavljene na pravac djelovanja sile tako da je komponenta koja uzrokuje klizanje maksimalna. To se događa ako su ravnine postavljene pod kutom od 45° na pravac djelovanja sile. Plošno centrirana kubna rešetka uvijek ima neku ravninu koja je povoljno orijentirana za deformaciju. Heksagonska rešetka ima puno manji broj kliznih ravnina ili ravnina blizančenja. [2]

1.2.2. Nesavršenosti u kristalnoj rešetki

Postoje točkaste, linijske, površinske i volumne nesavršenosti u kristalnoj rešetki. Slika 6. prikazuje nesavršenosti u kristalnoj rešetki u stvarnoj strukturi.



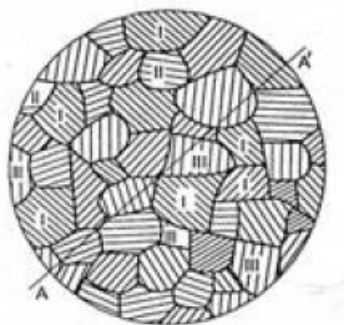
Slika 6. Nesavršenosti u kristalnoj rešetci [1]

Točkaste nesavršenosti predstavljaju prazna mjesta (PM), intersticijski atom (AM) i supstitucijski atomi (SA). Linijske nesavršenosti čine dislokacije koje mogu biti vijčane (VD) i stepenaste (SD). Površinske nesavršenosti su granice zrna (GZ), granice subzrna (GS) i granice faza. Volumne nesavršenosti su prazna mjesta (mikro i makro šupljine ili prazna mjesta) (PM), uključci (U) i druga faza.

Granice zrna su vrlo važne u procesu plastične deformacije polikristala jer je na granicama polikristala jako narušena zakonitost atomske strukture. Do nesavršenosti u kristalnoj rešetci dolazi već kod skrućivanja metala i slitina. Nesavršenosti koje tada nastanu najčešće ne leže na ravninama klizanja i zbog nemaju velik utjecaj na plastičnu deformaciju [1].

1.2.3. Deformacija polikristala

Polikristalnu strukturu čine različita kristalna zrna drugačije orijentiranosti koja uz to posjeduju i nesavršenosti. Monokristali se izrađuju isključivo za znanstvena istraživanja, a u industriji se upotrebljavaju polikristalični metali s kristalitima uglavnom nasumično orijentiranima, slika 7.[1].



Slika 7. Orijentacija ravnina klizanja [1]

Mehanizam plastične deformacije u polikristalu, odnosno stvarnom metalu, puno je složeniji nego u monokristalu. Kristalna zrna polikristala razlikuju se po veličini i obliku, ali i orijentaciji. Uzimajući u obzir različitu orijentaciju u polikristaličnom metalu, kada na njega djeluju sile, najprije će doći do klizanja u ravninama sa najpovoljnijom orijentacijom za deformaciju [4]. Kada deformacija dođe do neke veličine, nema daljnje mogućnosti za deformaciju. No, tijekom deformacije jednih kristalnih zrna drugi se rotiraju i time dolaze u pogodnu orijentaciju za deformaciju [2].

Rezultat toga je da se ta kristalna zrna istežu u smjeru najvećeg tečenja materijala time uzrokujući anizotropiju mehaničkih svojstava [4].

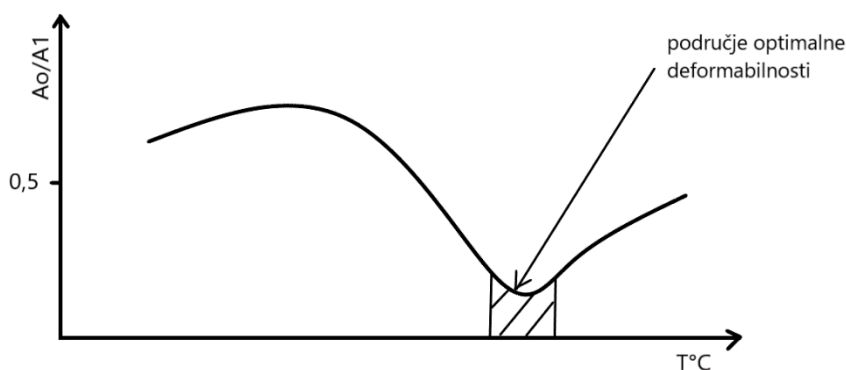
Nedaleko od granica zrna smješteni su slojevi sa otežanom deformacijom zbog međusobnog djelovanja kristalnih zrna različite orijentacije. Također, uz granice zrna mogu se smjestiti mikrošupljine nastale tijekom skrućivanja. Granice zrna predstavljaju veliku smetnju kretanju dislokacija. Kada ih deformacije ne savladaju, zaustave se i talože se na granicama zrna. Upravo tamo pojavljuju se ogromne koncentracije naprezanja [1].

Kada je zrno sitnije, duljina granica je veća što otežava deformaciju metala. [2]

2. FAKTORI KOJI UTJEČU NA POJAVU POGREŠKI KOD DEFORMACIJE METALNIH MATERIJALA

2.1. Temperatura

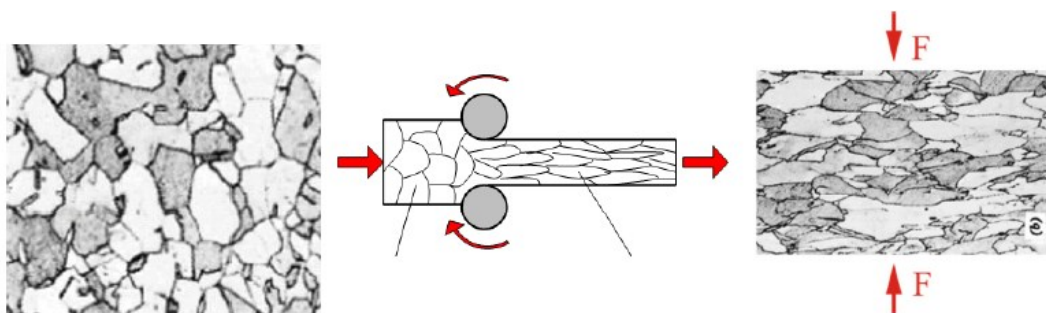
Ovisno o temperaturi na kojoj se deformacija odvija, ona može biti hladna ili topla deformacija. Hladna deformacija je ona koja se provodi na temperaturama nižim od temperature rekristalizacije, obično na sobnoj temperaturi, i na taj način karakteristična je za svaki materijal. Topla deformacija provodi se na temperaturama višim od temperature rekristalizacije [1]



Slika 8. Dijagram optimalne deformabilnosti u ovisnosti o temperaturi [2]

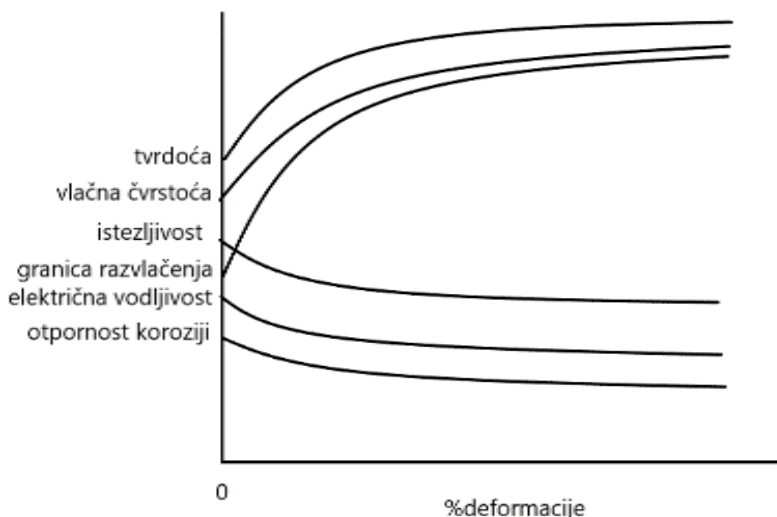
2.1.1. Hladna plastična deformacija

Kod hladne plastične deformacije dolazi do smanjenja plastičnosti i povećanja deformacijskog otpora metala. Uzrok tomu je znatno povećanje broja dislokacija u metalu jer kod hladne deformacije ne dolazi do rekristalizacije i oporavka u tijeku procesa, slika 9.



Slika 9. Promjena oblika zrna hladnom deformacijom [9]

Povećanjem stupnja deformacije povećava se stupanj očvršćivanja, što ima za posljedicu povećanje tvrdoće, vlačne čvrstoće i granice razvlačenja. Dolazi do smanjenja istezljivosti, električne vodljivosti i otpornosti na koroziju, slika 10.



Slika 10. Promjena svojstava materijala uslijed hladne deformacije [2]

Grijanjem hladno deformiranog metala mogu se odvijati dva različita mehanizma, statičko oporavljanje i statička rekristalizacija, koji će se odvijati ovisi o temperaturi. Statičko oporavljanje mehanizam je izmjene karakteristika hladno deformiranih metala uslijed kojega ne dolazi do znatne promjene mikrostrukture, ali doći će do nove raspodjele dislokacija i smanjenja napreznja unutar materijala. Fizička i mehanička svojstva materijala žele se vratiti izvornim vrijednostima. Temperatura oporavljanja T_o , ovisi o sastavu deformiranog materijala, a utvrđuje se na bazi temperature taljenja T_l konkretnog materijala[1]:

$$T_o = (0,25 \text{ do } 0,3) T_l \quad (2)$$

Mehanizam oporavljanja tijekom hladne deformacije nije ostvariv, on može nastupiti jedino pri naknadnom zagrijavanju i zove se statičko oporavljanje. Temperatura naknadnog zagrijavanja, vremensko razdoblje zagrijavanja i nivo prijašnje hladne deformacije imaju utjecaj na odvijanje mehanizma oporavljanja. Sa većim stupnjem hladne deformacije metal će imati brži oporavak. Pri temperaturama većim od temperature oporavljanja doći će do statičke rekristalizacije. Statička rekristalizacija je mehanizam pri kojemu se grijanjem na propisanu temperaturu poslije hladne deformacije iz deformiranog zrna s velikom gustoćom dislokacija, pojavljuju nova sitna kristalna zrna koja nemaju zaostalih napreznja (dislokacije). Temperatura rekristalizacije T_R , poput temperature oporavka T_o , ovisi o sadržaju materijala, točnije o temperaturi taljenja T_l :

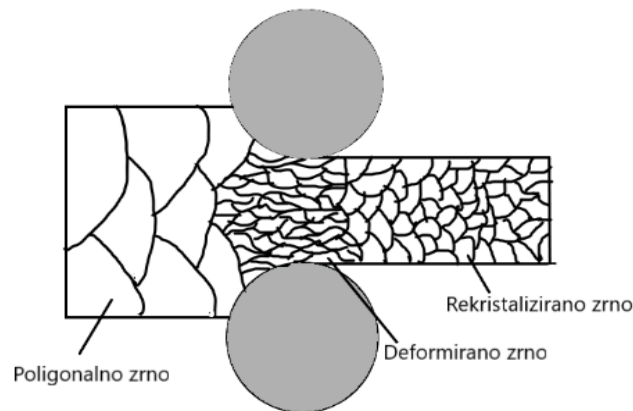
$$T_R = 0,4 T_l \quad (3)$$

Određeni uvjeti moraju se ispuniti kako bi došlo do rekristalizacije. Stupanj hladne plastične deformacije treba premašiti određenu kritičnu vrijednost (ovisno o metalu između 2 i 10 posto). Svaki metal posjeduje kritičnu temperaturu čijim prekoračenjem započinje mehanizam rekristalizacije. Na višim temperaturama može se dogoditi rast zrna koji nije poželjan jer dovodi do pogoršanja svojstava [1].

2.1.2. Topla plastična deformacija

Tijekom procesa tople plastične deformacije, nakon što se postigne kritični stupanj deformacije, istodobno s odvijanjem procesa deformacije zbivaju se procesi oporavka i rekristalizacije. Te

processe nazivamo dinamički oporavak i dinamička rekristalizacija, slika 11. Mehanizmi odvijanja deformacija isti su kao i kod hladne deformacije, klizanjem i blizančenjem. U zrnima koja su imala povoljnu orijentaciju za deformaciju, kada se postigne kritični stupanj redukcije, započinje dinamički oporavak i dinamička rekristalizacija [1].



Slika 11. Promjena strukture tijekom tople deformacije [1]

Zbog deformacije izdužuju se kristalna zrna. Izdužena, deformirana, zrna posjeduju ogromnu gustoća dislokacija. Zbog odvijanja procesa deformacije dislokacije se gibaju. Kada naiđu na prepreke (uključci, precipitati, druge dislokacije, itd.) i zaustave se, započinje deformacija segmenta kristalne rešetke i kreiranja subzrna. Na granicama subzrna postoji velika gustoća dislokacija. Subzrna su klice novonastalih zrna koja nastaju rekristalizacijom ostvarivanjem kritičnog stupnja deformacije. Nastavkom tijeka procesa deformacije rekristalizirana zrna opet se deformiraju i opet prolaze kroz proces rekristalizacije. Po završetku tople deformacije iz jednog zrna rekristalizacijom pojavljuje se veći broj sitnijih zrna [1].

2.1.3. Usporedba obrade hladnom i toplom plastičnom deformacijom

U usporedbi sa toplom deformacijom, prednosti hladne deformacije su [10]:

- Zagrijavanje nije potrebno
- Bolja kvaliteta površine
- Bolja dimenzijska točnost, stoga generalno, naknadna obrada nije potrebna
- Veća čvrstoća i tvrdoća, otpornost na zamor materijala i trošenje
- Moguće oblikovanje željenih svojstava u željenom smjeru
- Manji ukupni uložak energije

Mane hladne deformacije su [10]:

- Potrebne veće sile za deformiranje
- Teža i jača oprema
- Manja duktilnost
- Površine moraju biti čiste
- Pojava očvršćenja zrna
- Nepoželjna zaostala naprezanja

U usporedbi sa hladnom deformacijom, prednosti tople deformacije su [10]:

- Nema očvršćenja zrna
- Potrebne manje sile za deformaciju
- Veća duktilnost

- Potrebna oprema manje snage
- Nema zaostalih naprezanja

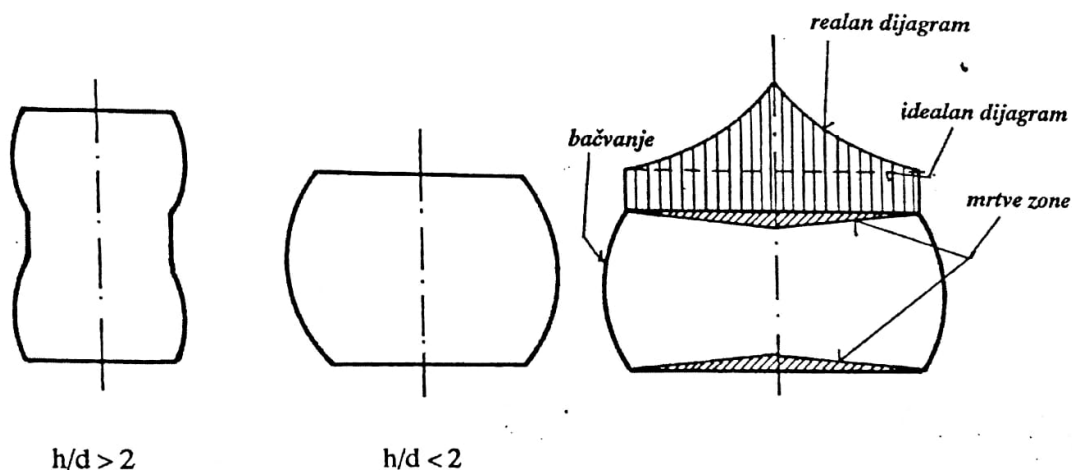
Mane tople deformacije su [10]:

- Upotreba toplinske energije
- Loša kvaliteta površine
- Loša dimenzijska točnost
- Rukovanje i održavanje metala toplim je zahtjevno
- Kraći životni vijek alata i opreme

2.2. Trenje

Trenje postoji u svakom postupku oblikovanja deformiranjem i generalno govoreći povećava sile deformiranja, zbog trenja metal nejednoliko teče i nastaju zaostala naprezanja, ima utjecaj na kvalitetu i izgled površine deformiranog materijala, potrebni su veći radni pritisci i smanjuje trajanje alata, a samim time zahtijeva veću količinu rada deformacije. Otpor koji daju dva tijela koja su uzajamno u kontaktu pri relativnom gibanju zove se kontaktno trenje. Trenje utječe na energetske i termoenergetske uvjete deformacije, kvalitetu obrađene površini i odabir tehnologije. Pokazatelj da u stvarnom postupku deformiranja vanjsko kontaktno trenje postoji su [2]:

- Oštećenje alata
- Oblik bačvice tlačnog punog cilindra
- Različita tvrdoća u uzdužnom presjeku tlačnog valjka



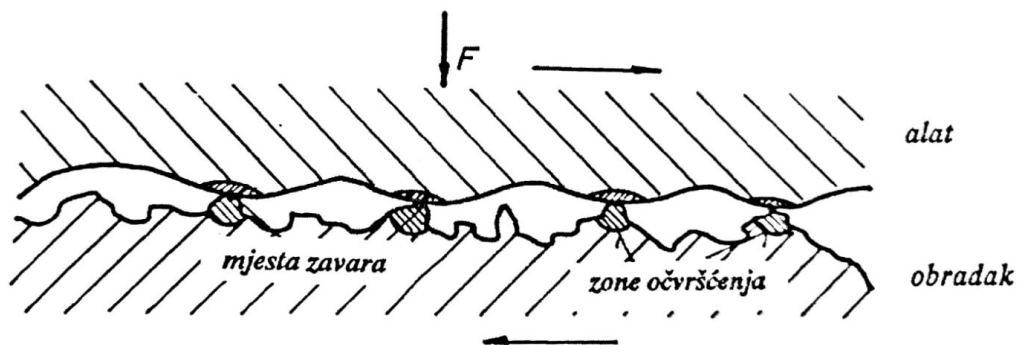
Slika 12. Nejednolika deformacija i mrtve zone kod tlačenja [2]

Na slici 12. može se vidjeti nejednolika deformacija cilindra, a ucrtane su i mrtve zone gdje je otežano tečenje materijala pa je tamo i tvrdoća manja. Zbog toga su obradak i alat različito opterećeni ovisno o mjestu na poprečnom presjeku. Najveća opterećenja pojavljuju se na sredini alata, pošto je tamo i specifični pritisak najveći pa se nastanak prvih oštećenja očekuje na tom mjestu [2].

Kontaktno trenje jako je kompliciran fizikalni i kemijski proces. O samom trenju postoji nekoliko teorija, no ona koja se danas najviše koristi i koja je najmlađa po svom postanku je

teorija koja objašnjava pojavu trenja uzimajući u obzir mikroneravnine i njihove elasto-plastične deformacije, ali i postojanje međumolekularnih sila privlačenja (adhezija).

Bez trenja ne bi bio moguć postupak valjanja, ali istovremeno trenje negativno utječe na trajnost alata, uzrokuje nehomogene deformacije i zaostala naprezanja te može povećati zagrijavanje alata. U oblikovanju deformiranjem danas je najčešće korišten Bowden – Taborov model, slika 13., koji daje pogled na prirodu i veličinu trenja u ovisnosti o stanju površine i upotrijebljenih maziva [2].



Slika 13. Bowden – Taborov model trenja [2]

2.2.1. Vrste trenja

Postoje četiri osnovne vrste trenja, svaka vrsta sa pripadajućim karakteristikama, kako je prikazano u tablici 1.[2].

Tablica 1. Vrste trenja

	Suho	Granično	Mješovito	Hidrodinamsko
Koeficijent trenja	0,5	0,3	0,1	0,001
Postojanost sloja maziva	/	Slaba	Srednja	Jaka
Šanse za pojavu greške	Velike	Velike	Srednje	Male

2.2.2. Trenje u hladnoj plastičnoj deformaciji

S obzirom da se u obradi metala deformiranjem često radi sa ogromnim specifičnim pritiscima, važno je da monomolekularni sloj ispunjava određene zahtjeva[2]:

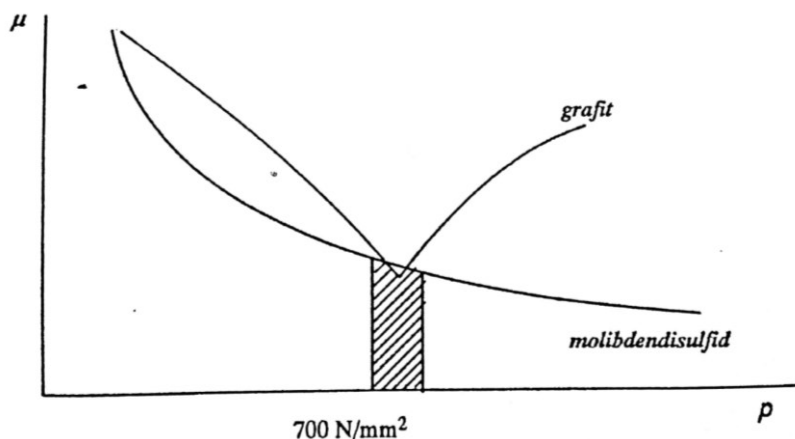
- Brzo stvaranje, odnosno, mazivo mora posjedovati veliku kemijsku aktivnost. Obično se u hladnoj obradi upotrebljavaju mineralna ulja u koja se dodaju određeni dodaci čime se tako dobivaju ulja HD (*heavy duty*) ili EP (*extreme pressure*) kakvoće

- Nužno je da monomolekularni sloj bude žilav zato što kada se on prekine, alat i obradak dolaze u direktan kontakt
- Dobra antikoroziivna svojstva da ne dođe do nagrizanja dijelova koji su podmazivani tijekom obrade
- Dobra adhezija prema metalu zbog održavanja sloja maziva tijekom velikih specifičnih pritisaka
- Jednako svojstvo podmazivanja za sve debljine maziva radi sprečavanja neujednačenog tečenja materijala
- Lako uklanjanje poslije obrade radi lakog čišćenja materijala od maziva

Višak maziva tijekom hladne obrade smješta se u prazninama i svojim nepromjenjivim volumenom onemogućuje izravan kontakt alata i obratka. Odlomljene čestice plivaju u prazninama i ne mogu oštetiti površine frikcijskog para. Za deformaciju u hladnom stanju obično vrijedi da postoji mješovito ili miješano trenje sa faktorom kontaktnog trenja $\mu \approx 0,1$. Maziva korištena u ovom tipu deformacije su [2]:

- Maziva pomiješana s vodom (sapuni, kreda, emulzije)
- Različita ulja (prirodna, mineralna, sintetska) i različite masti
- Filmovi, folije (termoplasti, polietilen, polipropilen, akrilne smole) i lakovi
- Grafit (otopljen u vodi ili ulju), molibdensulfid (obično u smjesi sa uljem) i politetrafluoretilen (teflon), u pravilu kao uljna otopina

Od svih navedenih maziva najzanimljiviji su grafit i molibdensulfid. Grafit je vrlo privlačan zbog svoje niske cijene i svojstva kalavosti koje sprečava direktan kontakt frikcijskog para i kod relativno velikih pritisaka. Molibdesulfid je mazivo novijeg datuma, a odlika mu je to što je tanji sloj maziva, efikasnost podmazivanja je veća. No, molibdensulfid je relativno skup tako da se grafit češće upotrebljava [2].



Slika 14. Usporedba koeficijenta trenja grafita i molibdendisulfida ovisno o tlaku [2]

2.2.3. Trenje u toploj plastičnoj deformaciji

Najveći izazov kod podmazivanja u toploj plastičnoj deformaciji je održavanje mazivog sloja na visokim temperaturama. Ulja imaju plamište na temperaturama nižima od temperature obrade čelika tako da podmazivanje njima nije izvedivo. No, s obzirom grafit je postojan na visokim temperaturama često se upotrebljava. Obično se koristi u vodi ili ulju, ulje izgori, voda ispari, a grafit bude jednoliko raspoređen po površinama koje treba podmazivati i ima ulogu graničnog sloja. Može se upotrebljavati i molibdendisulfid, no opet je cijena prepreka širokoj uporabi. Neovisno o mazivu kod tople plastične deformacije uvijek se radi o graničnom trenju. Nekada se kod kovanja koristila piljevina, a danas se još uvijek koriste razne vrste soli i stakla. Problem kod stakla je što čestice lebde u zraku te tako ljudi mogu oboljeti od silikoze. Soli su

vrlo agresivne te redovno dolazi do korozije uređaja i strojeva tako da se ipak one danas nastoje izbjeći, kao i staklo. Također vrijedi spomenuti da se s porastom temperature mijenja količina i sastav oksidne površine, a i čistoća površine što sve utječe na veličinu koeficijenta trenja [2].

2.3. Stupanj deformacije

Stupanj deformacije opisuje promjene duljine, presjeka i volumena određenog tijela uslijed djelovanja vanjske sile. Kod sabijanja pravokutne prizme, slika 15, od početnih h_0 , a_0 , b_0 na finalne dimenzije h_1 , a_1 , b_1 , zbog $h_0 \times a_0 \times b_0 = h_1 \times a_1 \times b_1 = V_0 = \text{konst.}$ vrijedi:

$$\varphi_h + \varphi_a + \varphi_b = 0, \quad (4)$$

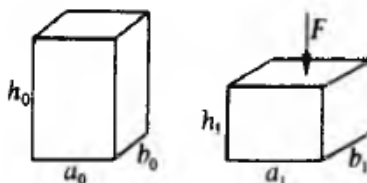
gdje su

$$\varphi_h = \ln(h_0/h_1) \quad (5),$$

$$\varphi_a = \ln(a_0/a_1) \quad (6),$$

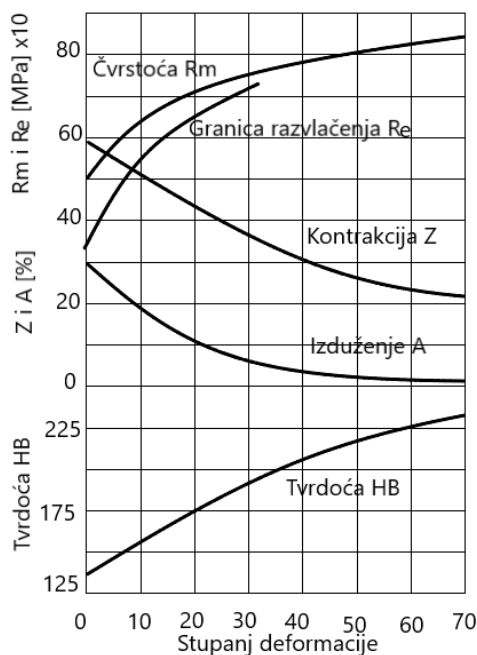
$$\varphi_b = \ln(b_0/b_1) \quad (7),$$

logaritamski stupnjevi deformacije [11].



Slika 15. Promjene dimenzija prizme pri sabijanju silom F [11]

Povećanjem stupnja deformacije povećava se faktor trenja, a mijenjaju se i mehanička svojstva materijala, slika 16. [1].

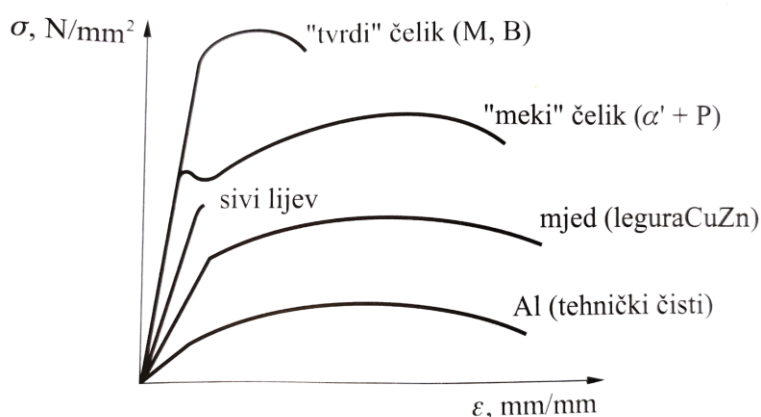


Slika 16. Ovisnost mehaničkih svojstava o stupnju deformacije [1]

2.4. Mehanička svojstva materijala

Sile deformiranja i mogućnost deformiranja ovise o mehaničkim svojstvima materijala koja ovise o strukturi i uvjetima obrade. Čvrstoću, tvrdoću, elastičnost, plastičnost i žilavost smatramo mehaničkim svojstvima. Podaci o mehaničkim svojstvima mogu se dobiti standardiziranim ispitivanjem na sobnoj ili povišenoj temperaturi. Ta ispitivanja mogu biti statička ili dinamička. Osnovna mehanička svojstva određuju se epruvetama napregnutima na vlak u uvjetima statičkog vlačnog opterećenja i takvo ispitivanje nazivamo statičko vlačno ispitivanje. Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 17.

Obično materijali sa većom otpornošću, odnosno većom čvrstoćom, imaju manju deformabilnost i obrnuto. Vrijedno je spomenuti da postoje izuzeci kao što je sivi lijev. Iako sivi lijev ima manji modul elastičnosti i manji nagib Hooke-ovog pravca, on gotovo da nema nikakvu mogućnost plastične deformacije. Tvrdoća i čvrstoća najčešće su u korelaciji [12].

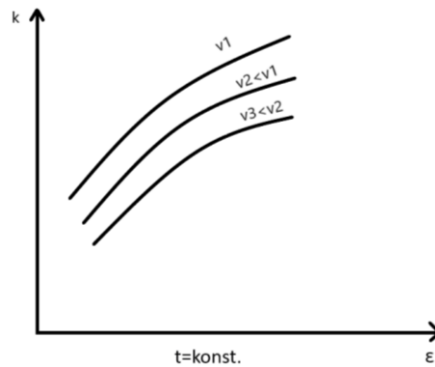


Slika 17. Kvalitativni σ - ϵ dijagrami [12]

Ispitivanje žilavosti nekog materijala provodi se pomoću ispitivanja udarnog rada loma, najčešće Charpy-evim batom. Što je udarni rad loma veći to je materijal žilaviji. Generalno, materijali veće istezljivosti imaju i veći udarni rad loma dok materijali visoke čvrstoće najčešće imaju mali udarni rad loma [12].

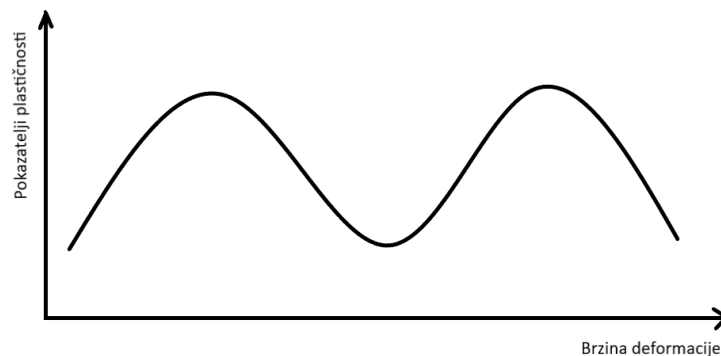
2.5. Brzina deformacije

Generalno vrijedi da povećanje brzine deformiranja smanjuje deformabilnost. Naime, s većom brzinom deformacije naprezanje plastičnog tečenja povećava se, slika 18., što za posljedicu ima pad deformabilnosti. Procesom sporog tlačenja ili sabijanja moguće je ostvariti velike stupnjeve deformacije, no brzo provođenje procesa rezultira većom čvrstoćom i općenito bolja mehanička svojstva. Poseban slučaj u kojem brzina deformacije utječe na deformabilnost jesu magnezijske slitine. Kod kovanja na batovima magnezijske slitine pucaju pri maloj deformaciji, ali ako se provodi sporo sabijanje, izvedivi su veliki stupnjevi deformacija uz odsustvo pukotina [2].



Slika 18. Utjecaj brzine deformacije na specifični deformacijski otpor [13]

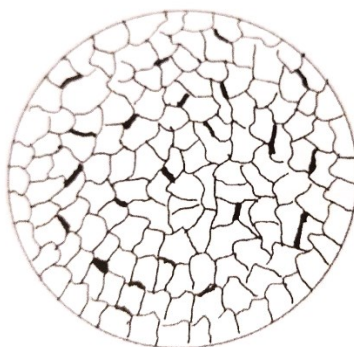
Utjecaj brzine deformacije kod hladne obrade značajno je manji nego kod tople. Razlog tomu je što se, kao što je prije spomenuto, kod tople obrade istovremeno s procesom deformacije odvijaju oporavak i rekristalizacija. Prilikom viših brzina deformacije i manjih brzina rekristalizacije, deformirani polikristali metala nemaju vremena oporaviti se i rekristalizirati. Višom brzinom deformacije dubina rasprostiranja deformacije biti će manja što za posljedicu ima nehomogenost deformiranog materijala [1].



Slika 19. Utjecaj brzine deformacije na plastičnost kod tople deformacije [1]

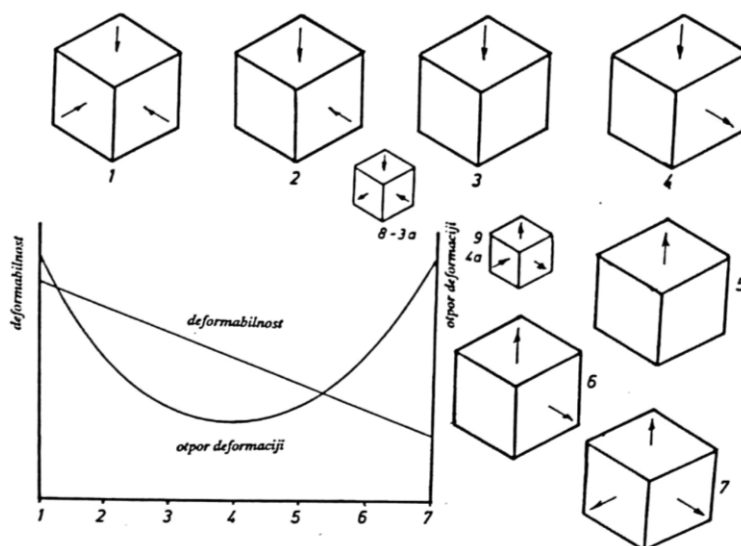
2.6. Shema napregnutog stanja

Ako znamo da netopivi sulfidi i fosfidi uredno borave na granicama kristalnih zrna, slika 20., jasno je da je to mjesto diskontinuiteta i oslabljena pozicija materijala. Ako djeluju tlačna naprežanja takvi se sulfidi i fosfidi usitnjuju zajedno sa kristalnim zrnima, no ukoliko je naprežanje vlačno ovo će mjesto uzrokovati početne mikropukotine koje se zbog prisutnosti vlačnog naprežanja započinju širiti te mogu uzrokovati lom [2].



Slika 20. Smještaj sulfida i fosfida na granicama zrna [2]

Iz rečenoga slijedi važan zaključak, glasi da materijal bolje podnosi tlačna naprezanja nego li vlačna, i da će materijal napregnut mahom tlačnim napreznjima biti deformabilniji i biti sposoban podnijeti, uz iste uvjete, veći stupanj deformacije. Doneseni zaključak zorno se vidi na slici 21., na kojoj je prikazana ovisnost deformabilnosti o shemi napregnutog stanja [2].



Slika 21. Ovisnost deformabilnosti i otpora deformaciji od sheme napregnutog stanja [2]

Vidljivo je da se udjelom vlačnih naprezanja deformabilnost se smanjuje, a istodobno se vidi kako se ponaša otpor deformaciji za različite sheme napregnutog stanja. Važno je uočiti da energija deformiranja izravno ovisi o deformabilnosti. Shema napregnutog stanja broj 1 omogućuje maksimalnu deformabilnost, ali je i otpor deformaciji vrlo velik, kumulativna energija za ostvarivanje odgovarajućeg stupnja deformacije, promatrajući sa stajališta bilance utrošene energije nije nužno velika [2].

3. UOBIČAJENE POGREŠKE PREMA POSTUPCIMA

Postupci oblikovanja deformiranjem mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine prikane u tablici 2.

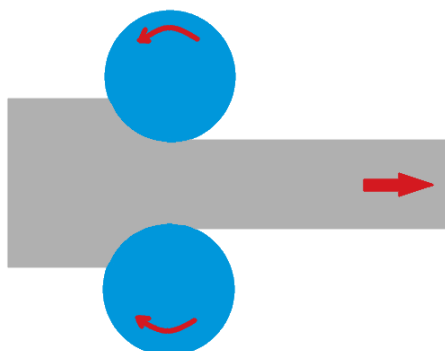
Tablica 2. Klasični postupci oblikovanja deformiranjem

Volumensko oblikovanje	Oblikovanje lima
Valjanje	Štancanje i probijanje
Kovanje	Savijanje
Provlačenje	Duboko vučenje
Istiskivanje(ekstruzija)	

3.1. Valjanje

3.1.1. Tehnologija valjanja

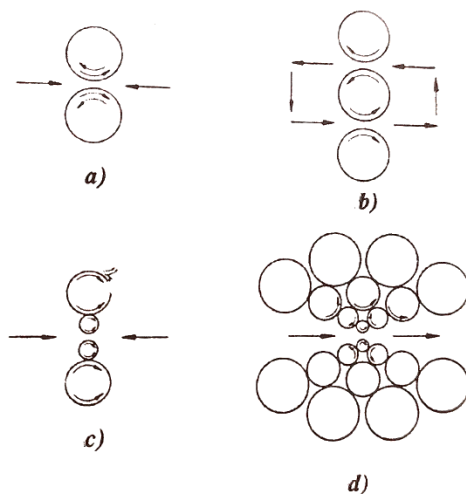
Valjanje je proces plastične deformacije materijala koji se odvija među valjcima koji se okreću u suprotnom smjeru pri čemu dolazi do smanjenja poprečnog presjeka i povećanja duljine, slika 22. Među svim postupcima, valjanje je zasigurno najrasprostranjenija tehnologija. Znan broj metalnih proizvoda u određenom je razdoblju proizvodnog procesa prošla kroz postupak valjanja. Predmeti većeg presjeka valjaju se u toplom stanju dok se tanki limovi i trake najčešće valjaju u hladnom stanju zbog glađe površine i užih tolerancija, ali i zbog ekonomičnosti. Postupak valjanja kreće valjanjem ingota u poluproizvode (blum, slab, gredice) koji se koriste za valjanje konačnih proizvoda poput profila, tračnica, žica, limova, cijevi i traka [11].



Slika 22. Proces valjanja

Strojevi koji se koriste za valjanje nazivaju se valjački stanovi, slika 22. Sustava valjačkih stanova ima nekoliko. Najjednostavniji valjački stan ima dva valjka koji su obično reverzibilni što znači da mogu valjati u oba smjera. Smanjenjem promjera valjaka smanjuje se i trenje između komada i valjaka što znači da je potrebna i manja snaga. Suprotno tome, smanjenje promjera smanjuje se krutost valjaka. Sile koje nastaju tijekom deformacije materijala savijaju valjke što znači da je valjani materijal deblji u sredini nego na krajevima. Tu pojavu se djelomično može smanjiti na način da promjer u sredini valjaka bude veći nego na krajevima. Taj postupak nazivano bombiranje. Unatoč tome, tim načinom moguće je ispraviti jedino manje greške uslijed savijanja valjaka. Ukoliko je savijanje veće, nužno je valjke poduprijeti sa

valjcima većeg promjera, odnosno veće krutosti, čime nastaju sustavi sa više valjaka, slika 23.[2].



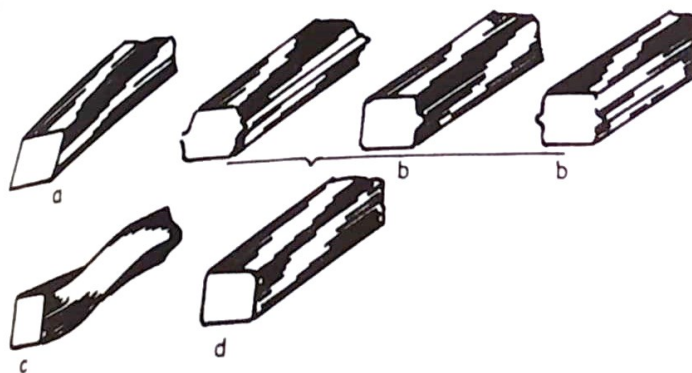
Slika 23. Valjački stanovi: a) reverzibilni duo stan; b) stan sa tri valjka; c) reverzibilni kvatro stan; d) složeni valjački stan [2]

Broj valjaka može biti i dvanaest, no takvi valjci puno koštaju tako da se obično upotrebljavaju za valjanje u hladnom stanju zbog visokih zahtjeva za točnosti proizvoda naprema toplo valjanih materijala [2].

3.1.2. Greške dimenzija i oblika

3.1.2.1. Nepravilan profil poluproizvoda

Nepravilan profil izvaljanog poluproizvoda rezultat je nepravilnog valjanja. Slika 24. prikazuje nekoliko nepravilnih oblika presjeka izvaljanih poluproizvoda. Poluproizvod, blum u ovom slučaju, kosog presjeka posljedica je valjanja komada sa prevelikom odnosom stranica na glatkom dijelu valjaka, ili valjanja na kalibru znatno veće širine od širine valjanog komada. Valjanjem preširokog komada u kalibru dobije se blum sa brkom na obje strane, a pogrešnim uvođenjem komada u kalibar, ili zasijecanjem bluma s jedne strane vijencima valjaka stvara se brk s jedne strane bluma. Brkovi na profilu predstavljaju višak materijala koji izađe među valjke na otvore kalibra. Aksijalno pomaknuti valjci, ili uvođenje komada na vijence valjaka rezultirati će uvrtnjem blumova. Kada razmak među valjcima na obje strane nije isti dobije se blum nejednake visine po širini. Slično vrijedi i za gredice [14].



Slika 24. Nepravilni oblici izvaljanih blumova: a) blum romboičnog presjeka; b) blum sa brkom; c) uvrnuti blum; d) blum sa različitim stranicama [14]

3.1.2.2. Ekscentričnost

Ekscentričnost je greška oblika najčešće uzrokovana nedovoljnom progrijanošću materijala i nedovoljnom centričnom podešenosti pribora za bušenje na preši, slika 25., ili kosom stanju. Ekscentričnost se može poboljšati na kosom valjanju, no ostati će na gotovoj cijevi [15].



Slika 25. Ekscentričnost [15]

3.1.2.3. Raznostjenost

Raznostjenost nastaje zbog nejednolikog posmaka valjanja, dimenzijskog odstupanja trnova i valjaka, neispravnosti i loše podešenosti postrojenja, nepravilnosti rukovanja i nepravovremenih informacija o odstupanju stjenke, nesinkroniziranog odsijecanja krajeva sirovih i gotovih cijevi na toplom dijelu koje treba biti precizno obavljeno za sve dimenzije cijevi jer nepotrebno odsijecanje smanjuje izvadak. Dimenzijama krajeva smatraju se i zadebljani krajevi cijevi nastali prilikom velikih redukcija cijevi [15].

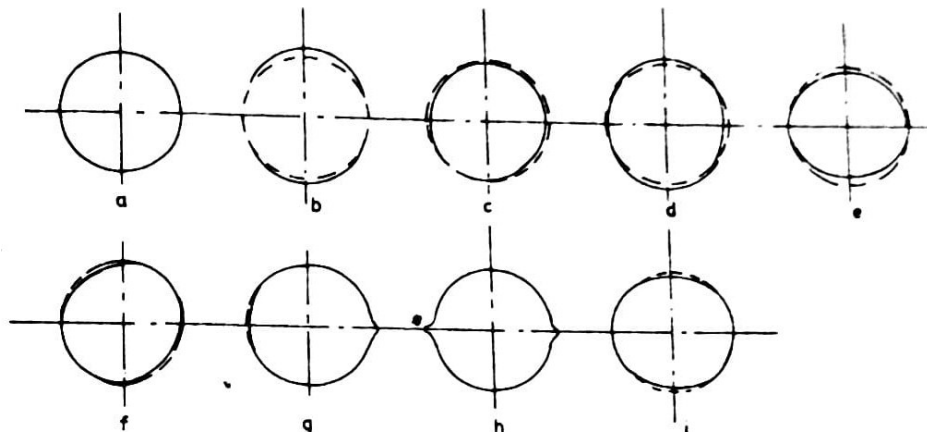
3.1.2.4. Greške na okruglim profilima

Na okruglim profilima moguće su različite greške, slika 26. Moguće je da dimenzije u jednom smjeru budu ispravne dok u drugom budu netočne. Primjerice, profil sa većim vertikalnim promjerom od željenog (slika 26-b) nastaje kada završni valjci imaju veći razmak nego što bi trebalo, ili ako valjani materijal ima prenisku temperaturu. Za dobivanje pravilnog profila potrebno je valjke malo zatvoriti ili bolje zagrijati materijal. Ako se nakon toga pokaže da je vertikalni promjer ispravan, a horizontalni prevelik, ili nastane prepunjenje ili brk na kalibru, nužno je i valjke sa prethodnim kalibrima zatvoriti. Ako je horizontalni promjer manji od zahtijevanog, a vertikalni je ispravan (slika 26-c) treba predzavršne valjke otvoriti. Ako je horizontalni promjer manji, a vertikalni veći (slika 26-d) od potrebnog potrebno je završne valjke zatvoriti. Ako tada nastanu praznine sa strane otvora završnog kalibra, odnosno, ako je horizontalni promjer i dalje manji od potrebnog, potrebno je predzavršne valjke otvoriti. U slučaju da je vertikalni promjer manji od potrebnog, a horizontalni ispravan (slika 26-e), potrebno je završne valjke otvoriti. Time se obično horizontalni promjer smanjuje pa je potrebno otvoriti i predzavršni ovalni kalibar.

Otvaranjem predzavršnog ovalnog kalibra na njemu se smanjuje redukcija zbog čega se komad pri prolazu kroz njega uvrće i izlazi iz valjaka nepravilnog ovalnog oblika. Nepravilan oval dobije se i kad dijagonale posljednjeg kvadrata nisu jednake, ili ako su valjci na kojima se nalazi ovalni kalibar aksijalno razmaknuti. Iz komada nepravilnog ovalnog presjeka dobije se završni profil nepravilnog kružnog profila (slika 26-f). Nepravilan presjek završnog profila dobije se i kada redukcija na završnom kalibru nije dovoljna, ili ako su upusne jezgre razmaknute više nego što je potrebno da ovalni komad prođe između njih. Profil sa većom ili manjom ovalnošću

dobije se i kad su završni valjci aksijalno pomaknuti. Tada obično nastaje i nesimetrično prepunjenje gornje i donje polovice kalibra.

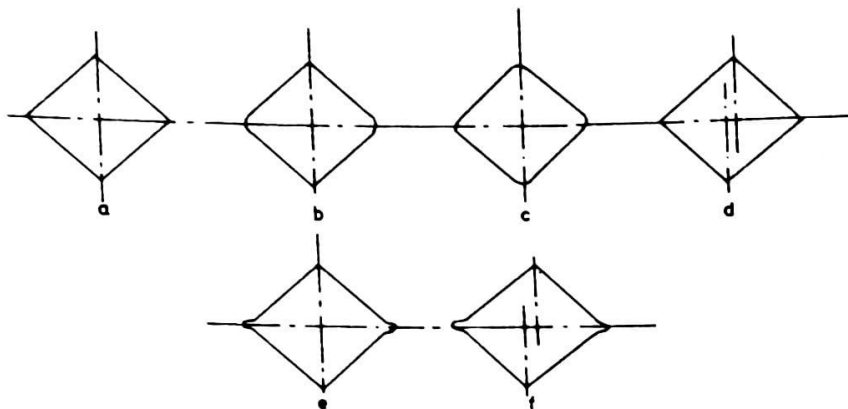
Brk s jedne profila nastaje zbog nesimetričnog postavljanja upusnih jezgri u odnosu na os kalibra. Ukoliko su jezgre nesimetrično postavljene u odnosu na središnjicu kalibra, a razmak između njih odgovara propisanom razmaku onda se na profilu pojavi brk s jedne strane, a s druge strane je praznina. Reguliranje otvora među jezgrama treba obavljati sa obje jezgre odnosno istovremeno ih približavati ili odmicati. Pojava brka na obje strane profila (slika 26-h) nastaje zbog predebelog ovala i tada je potrebno zatvoriti valjke na kojima se nalazi predzavršni ovalni kalibar. Kod okruglog profila moguća je i pojava nedovoljno obrađene gornje i donje površine (slika 26-i). Ona nastaje zbog pretupog ovala odnosno ovala sa nedovoljnom širinom, a takav oval je posljedica zatvorenog kvadratnog kalibra [14].



Slika 26. Oblici okruglih profila: a) pravilan oblik; b-i) nepravilni oblici [14]

3.1.2.5. Greške na kvadratnim profilima

Uobičajene greške na kvadratnim profilima su nepopunjeni (tupi) kutovi. Nepopunjeni kutovi nastaju, ili nepravilnom kalibracijom ako predzavršni romboidni kalibar nije propisno konstruiran, ili ako valjci nisu pravilno podešeni. Ukoliko je razmak između valjaka na koji se nalazi predzavršni kalibar manji od propisanog, onda se dobije završni kvadratni profil sa nepopunjenim horizontalnim kutovima (slika 27-b). Za otklanjanje greške nužno je povećati razmak između valjaka predzavršnog kalibra. Sva četiri neispunjena kuta na završnom profilu (slika 27-c) nastaju kada na komadu koji izlazi iz predzavršnog kalibra nisu kutovi popunjeni. Tada je potrebno povećati redukciju na predzavršnom kalibru otvaranjem valjaka na kojima se nalaze ostali kalibri ispred predzavršnog kalibra. Nadalje, preveliki otvor završnih valjaka dovodi do nepotpunih horizontalnih kutova kvadratnog profila. Kvadratni profili da nejednakim stranicama (slika 27-d) rezultat aksijalno pomaknutih valjaka. Nastanak brka na kvadratnom profilu (slika 27-e,f) posljedica je prevelike visine romboidnog kalibra i tada je potrebno smanjiti otvor valjaka na kojima se nalazi predzavršni kalibar, odnosno zatvoriti predzavršne valjke [14].

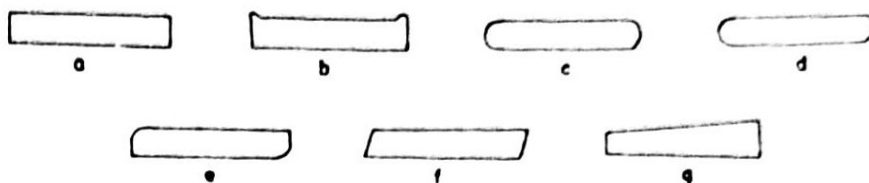


Slika 27. Oblici kvadratnih profila: a) pravilan oblik; b-f) nepravilni oblici [14]

3.1.2.6. Greške na plosnatim profilima

Plosnati profili mogu poprimiti različite oblike, slika 28. Najčešći zahtjev za plosnate profile je da imaju ravne stranice sa oštrim rubovima (slika 28-a). Prilikom valjanja plosnatih profila u zatvorenim kalibrima može se javiti brk na mjestima otvora kalibra (slika 28-b). Razlog tome jest velika redukcija na završnom kalibru. Treba smanjiti razmak među valjcima na kojima se nalazi predzavršni kalibar. Ukoliko to ne pomogne, i ako se tada pojavi brk na predzavršnom kalibru, potrebno je napraviti korekciju na kalibraciji. Kada se plosnati profili valjaju na glatkim, ili stepenastim, valjcima mogu nastati nepravilni oblici. Zaobljeni rubovi (slika 28-c) pojavljuju se zbog dva razloga. Jedan je istrošenost rebrastog kalibra, a drugi je mala redukcija u rebrastom kalibru. Kako bi se dobio profil sa oštrim rubovima treba povećati redukciju na rebrastom kalibru, odnosno treba povećati početni kvadrat povećanjem razmaka valjaka na kojima se nalazi kvadratni kalibar ili uzeti poluproizvod većeg presjeka.

Ispupčene stanice profila (slika 28-d) nastaju iz istih uzroka. Dodatni uzrok može biti prevelika redukcija na završnoj provlaci, ili predzavršnoj, ako se valjanje radi sa dvije plosnate provlake nakon rebrastog kalibra. Ako je to slučaj, potrebno je izraditi rebraste kalibre sa većim ispupčenjem. Ravnije stranice i oštrije rubovi mogu se dobiti valjanjem sa dvije rebraste provlake. Profili sa dva zaobljena suprotna ruba (slika 28-e) nastaju kod valjanja istrošenim kvadratnim kalibrom. Profil sa kosim stranicama (slika 28-f) ima nekoliko razloga nastanka. Prvi jest valjanje iz kvadrata nejednakih stranica, drugi je valjanje rebrastom kalibru puno veće širine od debljine profila koji prolaz kroz njega, treći je kada je razmak upusnih jezgri na rebrastom kalibru prevelik i tada se komad pri prolaz kroz rebrasti kalibar ukosi zato što ga upusne jezgre ne mogu držati u uspravnom položaju, posljednji je razlog kada je razmak upusnih jezgri ispravan, no noseća greda koja nosi kutiju sa jezgrama nije ravna i onda iz rebrastog kalibra izlazi profil kosih stranica. Klinasti oblik profila (slika 28-g) nastaje kada završni valjci nisu međusobno paralelni [14].

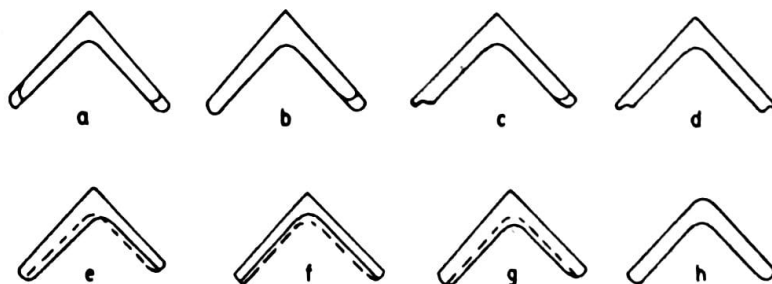


Slika 28. Oblici plosnatih profila: a) pravilan oblik; b-g) nepravilni oblici [14]

3.1.2.7. Greške na kutnim profilima

Postoji nekoliko mogućih grešaka koje se mogu dogoditi na kutnim profilima, slika 29. Ako su krakovi profila kraći nego što bi trebali biti (slika 29-a), razlog može biti da su završni valjci bili previše otvoreni, da je premala redukcija na završnom kalibru ili je moguće da širina predzavršnog kalibra nije dovoljna. Kutni profili sa različitom duljinom krakova (slika 29-b) nastaju kada se početni komad kvadratnog, ili pravokutnog, presjeka uvodi nesimetrično u prvi oblikovni kalibar. Ovisno o nesimetričnosti uvođenja, može se pojaviti brk na jednom kraku ili drugi može biti kraći (slika 29-c). Nastanak brka na oba kraka (slika 29-d) događa se u suprotnim uvjetima od onih u kojima nastaju kratki krakovi. Različita debljina krakova (slika 29-e) rezultat je aksijalnog pomaka valjaka. Profil koji ima tanke ili debele krakove (slika 29-f,g) nastaje kada je otvor završnih valjaka premali, ili prevelik. Uobičajeno je da se dobiju profili sa nepopunjenim vrhom kuta (slika 29-h), a postoji više uzroka [14]:

- Visina komada koji se uvodi u prvi oblikovni kalibar nedovoljna je pa vrh kuta ostaje neispunjen kako na prvom tako i na svim ostalim kalibrima, potrebno je otvoriti pripremljene kalibre
- Valjanje profila sa debljim profilom nego za što je kalibar namijenjen
- Radijus na spoju krakova na predzavršnom kalibru je malen pa se na završnom kalibru događa manja redukcija na spoju krajeva nego na njihovim krajevima
- Kratka i niska ispusna dlijeta mogu uzrokovati nepopunjena leđa na kutnim profilima



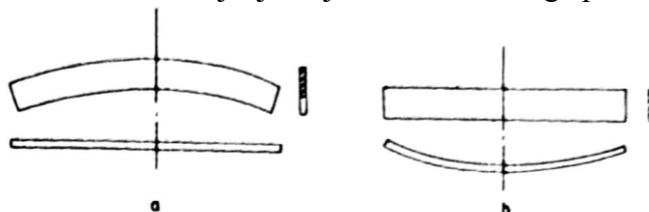
Slika 29. Nepravilni kutni profili [14]

3.1.2.8. Greške na U i I profilima, i tračnicama

Učestale greške na U i I profilima su: kratke stope, brk na otvorenim stopama, valovitost profila, nedovoljno obrađene stope i druge. Osnovni uvjet za dobivanje ispravnog profila je da valjci budu na propisanom razmaku i da kroz svaki kalibar komad prolazi ravno. Isto tako je važno pravilno postavljanje valjačke armature. Sljedeći uvjet za dobivanje ispravnog profila je pridržavanje propisane veličine presjeka komada (poluproizvoda) koji ulazi u prvi oblikovni kalibar. Smanjivanje početnog presjeka može uzrokovati slabu obradu krajeva stopa i kratke stope. Simetrično zasijecanje početnog komada u početnoj fazi valjanja uvjet je za dobivanje profila sa jednakom dužinom stopa. Ako se koristi početni komad veće visine, a manje širine, dobije se profil sa boljim stopama, ali se komad sa upusnom armaturom mora tijesno uvoditi u prvi kalibar kako bi se izbjeglo njegovi nesimetrično zasijecanje što bi rezultiralo nejednakom dužinom stopa. Prilikom valjanja tračnica potrebno je imati početni komad manje širine, ali maksimalne visine koju dopušta zahvata komada valjcima. Tada komad prodire duboko u kalibar i ostvaruje se dobra obrada materijala po glavi tračnice čime se dobivaju dobra mehanička svojstva [14].

3.1.2.9. Iskrivljenje i srpovitost profila

Komad se može iskriviti po širini ili po visini, samo na jednom mjestu ili jednomjerno po dužini. Nerijetko je krivljenje u horizontalnom smjeru po cijeloj dužini nalik na luk. Takvo iskrivljenje naziva se srpovitost. Uz taj način iskrivljenja, postoji i krivljenje po dužini što se zove uvrtnje te komad nazivamo uvrnutim. Iskrivljen komad na nekom međukalibru teško ulazi u sljedeći kalibar, a i ako uspije ući često se dobije škart. Obično se iskrivljen, a pogotovo uvrnut profil, ne može popraviti nego se mora odbaciti. Na slici 30. može se vidjeti srpovito i nesrpovito iskrivljen plosnati profil. Slična iskrivljenja vrijede za razne druge profile.



Slika 30. Iskrivljeni profili: a) srpovit; b) nesrpovit [14]

Postoji nekoliko uzroka srpovitom iskrivljenju komada [14]:

- Neravnomjerno zagrijan blok ili poluproizvod, ako je jedna strana bloka ili poluproizvoda više zagrijana od druge onda će se pri valjanju kriviti na onu stranu koja je manje zagrijana jer se vruća strana lakše i više deformira
- Nejednaka redukcija visine po širini komada, ako se na jednoj strani širine komada ostvaruje veća redukcija u usporedbi sa drugom stranom onda će se komad kriviti prema strani na kojoj se ostvaruje manja redukcija jer se strana podvrgnuta većoj redukciji više izdužuje
- Ispusni bokovi postavljeni koso prema osi valjaka iskrivljuju komad za vrijeme njegovog izlaska iz valjka, nužno je da ispusni bokovi stoje normalno na os valjaka i da budu dobro učvršćeni na noseću gredu
- Iskrivljenje nesimetričnih profila pri hlađenju

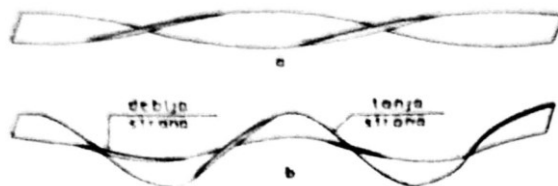
Nejednolikost redukcije po širini komada nastupa kada valjci nisu u paralelnom položaju. Kod valjanja nesimetričnih profila do iskrivljenja komada dolazi ako kalibracijom nije predviđen isti stupanj visinske redukcije po cijeloj širini profila. Iskrivljenje komada dok prolazi kroz kalibar sprječava se tada sa ispusnim bokovima ili korigiranjem kalibracije.

Do iskrivljenja komada u vertikalnom smjeru dolazi kada komad nije jednomjerno zagrijan, ili ako ispusna dlijeta ne stoje ravno na valjcima. U slučaju da valjci imaju nadpritisak, a ispusno dlijeto stoji nisko na valjku jer nije dugo ili je stražnjim krajem oboreno prema dolje zbog noseće grede, tada se prednji kraj komada krivi prema dolje i učestalo udara o radne kotrljače pri izlasku iz valjaka. Kako bi se postigli ravni komadi potrebno je podići noseću gredu ili staviti jednu podlošku između noseće grede i stražnjeg kraja dlijeta. Može se i dlijeto zamijeniti dužim. Ukoliko ispusno dlijeto ne stoji vodoravno nego mu zadnji kraj podignut, zbog visoke noseće grede, onda se pri izlasku komada njegov prednji kraj savija prema gore, a zadnji prema dolje ako je komad dug. U ovom slučaju potrebno je spustiti noseću gredu. Krivljenje komada tijekom izlaska iz valjaka događa se kada radni pod pruge nije ravan odnosno ako podne ploče nisu ravne ili su oštećene pa komad zapinje za njih tijekom izlaska. Do iskrivljenja može doći i kada se prevlače sa stana na stan ako opirući palci ne stoje ravno [14].

3.1.2.10. Uvrnutost profila

Ponekad valjani profil bude uvrnut oko svoje uzdužne osi nakon izlaska iz valjaka, slika 31. Moguće je da uvrnutost bude manje ili veća, ovisno o uzrocima. Glavni uzroci nastanka uvrnutosti su [14]:

- Nepravilan položaj valjaka, ukoliko su valjci aksijalno međusobno zamaknuti i ujedno nisu paralelni, doći će do uvrtnja komada
- Nepravilan presjek i mala redukcija na kalibru dovest će do uvrtnja tijekom prolaska kroz kalibar
- Često se komad uvrće zbog nepravilno postavljene valjačke armature



Slika 31. Uvrnuti plosnati profil: a) jednaka debljina po širina; b) različita debljina po širina [14]

Ispusna dljetka koja nemaju ravnu kliznu površinu, nego iskošenu, uzrokuju uvrtnje valjanih komada. Kod teško oblikovnih profila na neke elemente kalibra stavljaju se posebna ispusna dljetka. Svako dljetko mora imati kliznu ravnu površinu i mora ležati za istu veličinu ispod dna konkretnog dljetka kalibra. Konkretno, na tračnim kalibrima postavljaju se dljetka na dijelove kalibra od glave i stope. Ukoliko visina između klizne površine dljetka i dna kalibra na glavi i stopi nije jednaka onda se tračnica pri izlasku uvrće. Razmak između ispunih bokova mora biti malo veći od širine kalibra. Ukoliko nije, doći će do paranja komada o stranice bokova i posljedično do ukošavanja komada između bokova što naposljetku uzrokuje uvrtnje [14].

3.1.3. Površinske greške

3.1.3.1. Povećana reljefnost nastala utiskivanjem naljepaka valjaka

Kada se na radnu površinu valjka naljepi materijal cijevnice nastaju izbočine koje se onda tijekom valjanja utiskuju u cijev koju se oblikuje te tako nastaju plića ili dublja udubljenja, krateri, po čitavoj dužini cijevi. Nekada su ta udubljenja manja od najmanje dozvoljene dubine stijenke cijevi pa se ta cijev baca u škart. Također, moguće je da samo nastane nepovoljan izgled zbog čega cijev može biti nedovoljne kvalitete. Najčešće naljepci nastaju u početnoj fazi procesa valjanja cijevnice, a pogotovo ako je čelik skloniji naljepljivanju zbog izlučivanja lakše topivih metala u oksidativnoj atmosferi i više temperature, slika 32. Ako dođe do intenzivnog naljepljivanja valjaka, osim brušenja istih, moguća rješenja su [15]:

- Sniženje temperature i oksidativne atmosfere pri zagrijavanju poluproizvoda
- Smanjenje promjera cijevnice i pravilno oblikovanje prednjeg dijela cijevnice radi smanjenja vremena ulaska
- Intenzivno hlađenje valjaka
- Dovoljno podmazivanje trnova
- Ispravna podešenost i dobra ispravnost postrojenja i pribora

Do utiskivanja naljepaka na cijevi može doći na koturačama dogrijevne peći gdje ne pomaže loše hlađenje koturača, zadržavanje zagrijane cijevi na izlaznim koturačama i neodgovarajuća površina koturača [15].



Slika 32. Reljefnost uzrokovana utiskivanjem naljepaka [15]

3.1.3.2. Nanešene ljuske

Pojavljuju se na prednjem dijelu sirove cijevi kada valjci otkinu male komade cijevnice i uvaljaju te komade na sirovu cijev, slika 33. Uzroci nastajanja su [15]:

- Valjanje cijevnice većeg promjera od nominalnog zbog čega dolazi do otkidanja i odljepljivanja komada cijevnice
- Visoka temperatura cijevnice
- Povećani tlak zrak u potisnom stroju i neodgovarajuća sinkronizacija sa brojem okretaja valjaka
- Loša podešenost postrojenja za valjanje u osi, za ispravnu rotaciju i rad s ravnim trnovima



Slika 33. Nanešena ljuska [15]

3.1.3.3. Prevaljanost

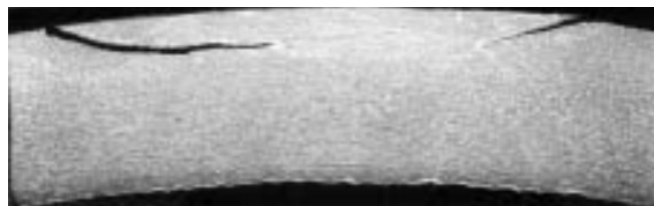
Gledano izvana, ovaj tip greške ima izgled poput pukotina jednakih duljina i međusobnog razmaka koji odgovara posmaku. Gledano u poprečnom presjeku, vidi se preklap koji može biti jednostruki, slika 34., ili dvostruki, slika 34., te podsjeća na izgled lastinog repa. Na nižoj temperaturi valjanja brkovi i ispupčenja na površini valjanog komada se brže hlade, što uz slabiji pritisak i prisustvo kovarine potpuno onemogućuje zavarivanje utisnutog ispupčenja na osnovnu masu čelika. Ovaj tip greške najčešće nastaje na Pilger valjcima, a na nastajanje greške imaju utjecaj [15]:

- Valjanje iznad kalibra na način da se dio valjanja može odvijati u prostoru razmaka valjaka čime nastaje velika mogućnost preklopa u sljedećem posmičnom koraku
- Nepravilna rotacija cijevnice
- Preveliki posmak cijevnice pa radni dio valjaka ne stiže pravilno prevaljati povećani volumen iz prijašnjeg zahvata
- Deformirani profil valjaka, istrošeni ili nepravilno obrađen
- Loša podešenost valjaka

Općenito, prevaljanost se može pojaviti uvijek kada se na površini komada valja oblikuje ispupčenje. Ovisno o ispupčenju mijenja se i izgled prevaljanosti [15].



Slika 34. Jednostruka prevaljanost [15]



Slika 35. Dvostruka prevaljanost [15]

3.1.3.4. Poprečno oštećenje cijevi; rupe, preklopi

Greške ovog tipa su vanjska poprečna udubljenja u cijev lučnog izgleda sa cjelovitim ili parcijalnim presijecanjem stjenke cijevi na valjku, slika 36. Obično greške nastaju na sirovim cijevima sa minimalnom stjenkom na većim kalibrima. Oštećenje stjenke pojavljuje se tijekom razvaljivanja materijala između valjaka i trna, kada najmanji presjek materijala ne može podnijeti kombinirana naprezanja zbog drugačijih brzina po kontaktnoj površini valjaka, tlačenja ulazne i razvlačenja izlazne strane valjane cijevi zbog čega dolazi do trganja materijala. Dodatni čimbenici nastajanje ovih grešaka su [15]:

- Veliki promjer cijevnice
- Visoka temperatura materijala
- Premala koničnost trnova
- Premalo podmazivanje trnova
- Potrošeni ulazni dio Pilger valjaka
- Velik i nejednolik posmak



Slika 36. Poprečno oštećenje cijevi [15]

3.1.3.5. Prskotine

Prskotine nastaju nepravilnim postavljanjem armature ili pri radu sa narezanim valjcima, slika 37. Ako će se komad dalje valjati prskotine mogu uzrokovati druge greške ili škart. Pojava greške sprječava se primjenom armature sa glatkim unutarnjim površinama i zaobljenjima na ulazu. Pri valjanju legiranih i kvalitetnih čelika nije dozvoljena upotreba narezanih valjaka za

povećanje zahvata. Ako se radi sa narezanim ili navarenim valjcima, ili se na površini jave prskotine od armature, treba ih ukloniti prije daljnjeg valjanja [16].



Slika 37. Greške nastale valjanjem na nasjećenim i navarenim valjcima [16]

3.1.3.6. Crte pri valjanju

Nastaju na površini tankih limova, a mogu biti manje ili veće širine. Crte nastaju zbog neravnomjerne deformacije lima po širini, slika 38. Na oblikovanje crta pri valjanju, osim profila površine valjaka utječe i neravnomjerno zagrijavanje lima po širini, nepoklapanje profila komada sa profilom površine valjaka kao i neravnomjerno podmazivanje krajeva i sredine lima. Crte se sprečavaju ravnomjernim zagrijavanjem metala, kontrolom površine valjaka, valjanjem komada čiji se profil poklapa sa profilom valjaka i ravnomjernim podmazivanjem [16].



Slika 38. Crta nastala tijekom valjanja [16]

3.1.3.7. Uvaljana kovarina i šamot

Ova greška nastaje ako se nedovoljno očiste površine bloka ili toplo valjanog poluproizvoda, slika 39. Greška se može ukloniti brušenjem u toku valjanja ili sa gotovih proizvoda [16].



Slika 39. Uvaljana kovarina i šamot [16]

3.1.4. Unutarnje greške nastale valjanjem

3.1.4.1. Unutarnja oštećenja cijevi

Cijevi od visoko ugljičnih i legiranih čelika prilikom bržeg hlađenja imaju tendenciju puknuti po nepravilnom lučnom ili približno uzdužnom smjeru, slika 40. Razlog pucanju je unutarnje naprezanje kod brzog hlađenja. Pucanje se može izbjeći ako se cijevi po završetku valjanja sporo i ujednačeno hlade. Takve cijevi bi se trebale popustiti prije naknadne obrade, uključujući ravnanje [15].



Slika 40. Pukotine uzrokovane unutarnjim naprežanjima [15]

3.1.4.2. Krupnozrnatost strukture čelika

Krupnozrnatost nastaje nakon toplog valjanja uslijed visoke temperature valjanja i malih stupnjeva deformacije u završnim provlakama. Krupna struktura može se izbjeći povećanjem stupnja deformacije u završnim provlakama, a kod čelika sa faznom promjenom normalizacijom nakon valjanja. Kod čelika bez fazne promjene nužno je valjanje do tanjih dimenzija [16].

3.1.4.3. Karbidna mreža kod čelika

Visoka temperatura pri završnom valjanju čelika i sporo hlađenje ispod točke perlitne pretvorbe može uzrokovati izdvajanje karbida i stvaranje karbidne mreže po granicama zrna. Izdvajanje karbida sprečava se završnim valjanjem blizu točke perlitne pretvorbe. Već nastala karbidna mreža uklanja se naknadnom normalizacijom [16].

3.1.4.4. Unutarnje poprečne prskotine u poluproizvodima od čelika

Unutarnja uzdužna naprezanja mogu biti uzrok pojavi poprečnih pukotina. Na oblikovanje pukotina povoljno utječe valjanje sa povišenom ili niskom temperaturom, kao i sa malim stupnjem deformacije. Nastanak pukotina može se spriječiti valjanjem na propisanoj temperaturi povećanim stupnjem deformacije. Nastale pukotine mogu se ukloniti valjanjem na tanju dimenziju [16].

3.1.4.5. Crni lom kod čelika

Ovaj tip greške javlja se kod čelika kao posljedica grafitizacije i često se na nju nailazi u visoko ugljičnim čelicima sa velikom količinom silicija. Uz kemijski sastav, na pojavu grafitizacije utječe niska temperatura završnog valjanja i dugo vrijeme rekristalizacije nakon hladne deformacije. Ta pojava se može izbjeći smanjenjem sadržaja silicija i temperaturom valjanja iznad propisane granice u završnoj provlaci [16].

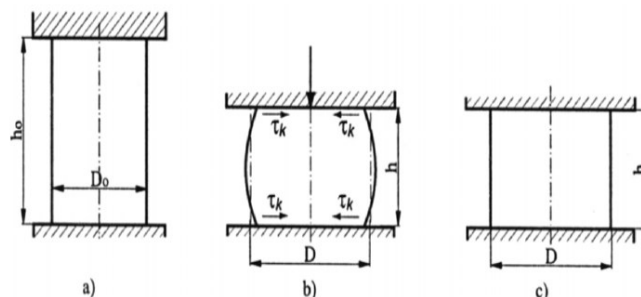
3.2. Kovanje

3.2.1. Tehnologija kovanja

Kovanje je postupak oblikovanja deformiranjem koji se vrlo često radi u toplom stanju zbog povećane deformabilnosti materijala na višim temperaturama, što za posljedicu ima manje deformacijske sile i manji utrošak rada. Kovanje je najstariji način oblikovanja metala, a i prvi strojevi za obradu metala su bili kovački strojevi. Moguće je oblikovanje kovanjem i u hladnom stanju, no samo kod manjih obradaka. Postupak kovanja može se podijeliti na dva načina, slobodno kovanje i kovanje u ukovnjima. Za oba dva načina vrijedi da se od sirovca do gotovog otkovka dolazi postupno. U pravilu, sirovac je valjani profil kada se radi o otkovcima manjih masa (do 0.5t), a ako su otkovci velikih masa obično se provodi kovanje iz ingota. Primarni ciljevi kovanju su postizanje određenog oblika i određene kvalitete proizvoda, koju ne bi bilo moguće postići drugim tehnologijama.

Slobodno kovanje najstariji je oblik postupaka oblikovanja, a provodi se bez korištenja kalupa. Koristi se prilikom oblikovanja vrlo sitnih, ali i vrlo krupnih otkovaka. Potonji se u pravilu isključivo izrađuju slobodnim kovanje zbog malobrojnosti. Iako načelno jednostavan postupak, i dan danas ima važnu ulogu.

Kovanje u ukovnju je postupak u kojemu metal, pod utjecajem udarca malja kovačkog bata ili pod pritiskom preše, ispunjava profilirani prostor izrađen u kovačkom alatu, odnosno ukovnju. Materijal ne može teći slobodno nego samo popunjavati prostor gravure ukovnja. Moderna masovna i serijska proizvodnja otkovaka bazirana je na ovom postupku kojim se postiže odgovarajuća kvaliteta i ujednačene dimenzije i oblik. Kod ove vrste kovanja možemo razlikovati pripremno kovanje, svrha mu je preraspodjela masa, i završno kovanje kada se stvara vijenac [2].

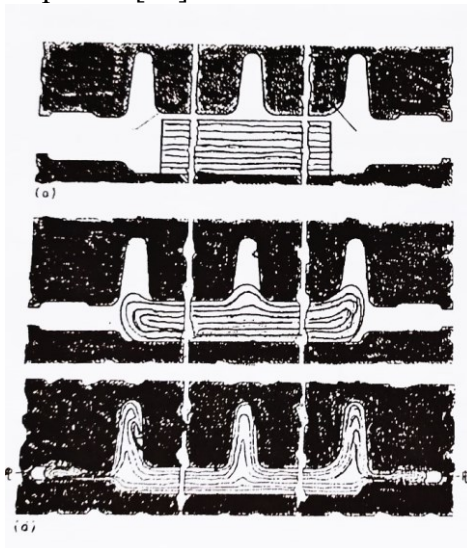


Slika 41. Slobodno sabijanje valjka: a) početni oblik; b) stvarni oblik; c) idealni oblik [1]

3.2.2. Geometrijske greške prilikom kovanja

3.2.2.1. Loše ispunjavanje ukovnja

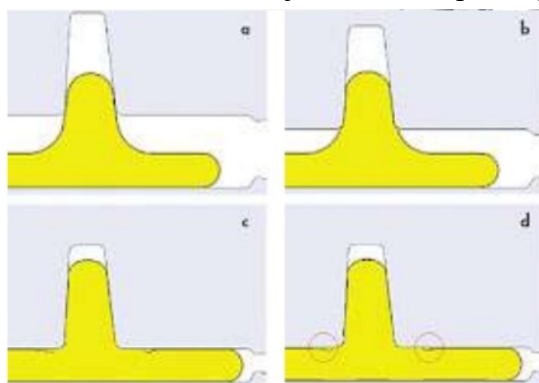
Ova greška nastaje zbog lošeg dizajna ukovnja, primjerice preoštri radijusi ili prevelika visina sirovca, odabirom nedovoljno oblikovljivog materijala, nedovoljno zagrijavanje, premali sirovac, preslab udarac malja ili zbog začepljene rupe za odzračivanje. Kako bi se osiguralo potpuno popunjavanje ukovnja nužno je ispravno dizajnirati isti, odabrati prikladan materijal dovoljne mase i pravilno voditi proces [17].



Slika 42. Loše ispunjavanje kalupa zbog prevelike visina sirovca i preoštrih radijusa ukovnja [2]

3.2.2.2. Pregibanja i preklopi

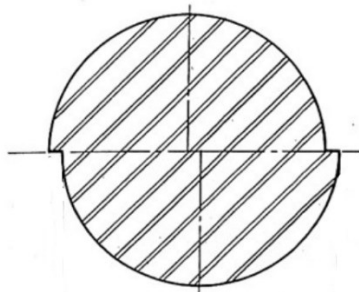
Pregibanja i preklopi najčešći su tip greške koji se događaju kod kovanja. Do pregibanja dolazi zbog neispravne konstrukcije ukovnja ili neodgovarajućeg udarca. Do preklopa dolazi kada dođe do guljenja, odnosno kada ukovanj ošteti sirovac na malom lokalnom dijelu zbog premalog radijusa ukovnja te se komadić materijala odlomi i preklopi, slika 43.[18].



Slika 43. Prikaz nastajanja preklopa [19]

3.2.2.3. Pomak ukovnja

Postoje razni razlozi zbog kojih može doći do ove greške, a neki od njih su nepravilno podešavanje od strane operatera, loša centriranost malja, nedovoljna učvršćenost donje polovice ukovnja, loš dizajna bočnog centrirača, prekomjerni materijal [17].



Slika 44. Ilustracija pomaka ukovnja [20]

3.2.3. Površinske i strukturne greške

3.2.3.1. Pukotine

Pukotine mogu biti površinske i unutarnje. Površinske greške pojavljuju se kod materijala koji se teško oblikuju kovanjem. Za njih je potrebno optimalno voditi proces što znači pažljivo određivanje temperature, brzine deformacije i stupnja deformacije. Unutarnje pukotine proučavaju se desetljećima, a i dalje nije moguće odrediti egzaktne uvjete nastanka [18].



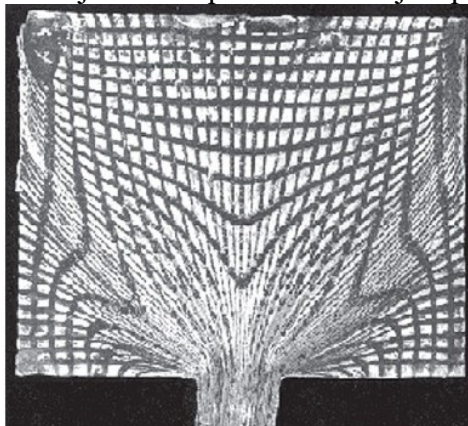
Slika 45. Površinska pukotina nastala tijekom hladnog kovanja [21]



Slika 46. Unutarnje pukotine [22]

3.2.3.2. Mrtve zone

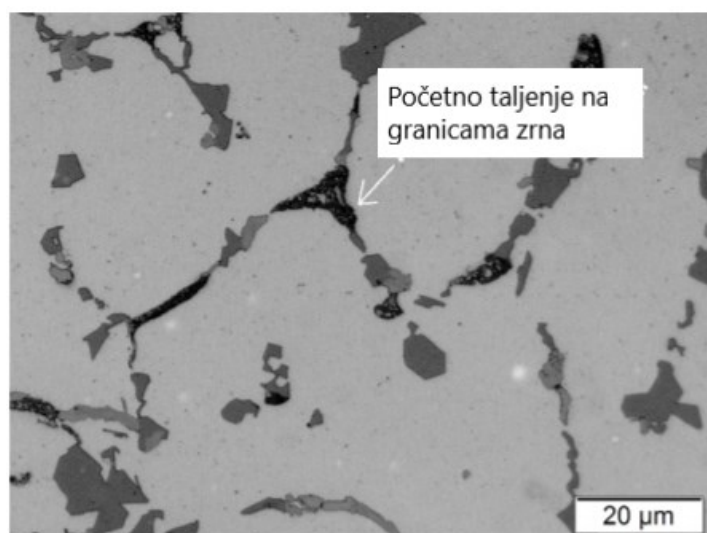
Mrtve zone su regije u kojima je kovanje uzrokovala nikakvu ili vrlo malu deformaciju. Primjerice, prilikom ekstruzije sa ravnim dnom kalupa materijal u kutovima je vrlo malo deformiran, slika 47. Posljedica toga je da izradak neće imati željenu mikrostrukturu i svojstva na tim područjima. Pravilnom dizajnom kalupa može se izbjeći pojava ove greške [22].



Slika 47. Prikaz mrtvih zona u kutovima kalupa [22]

3.2.3.3. Spaljenost

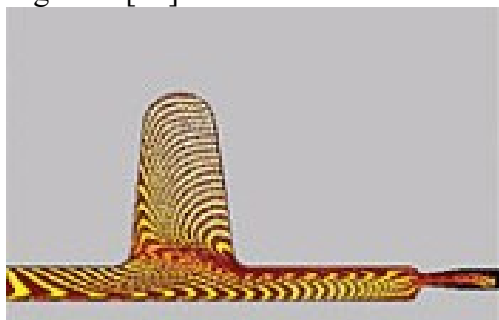
Prilikom oblikovanja deformacijska energija pretvara se u toplinu, ta pretvorba naziva se adijabatsko zagrijavanje. Prilikom kovanja na visokim temperaturama ili iznimno visokom lokalnom tečenju materijala, velike količine napreznja mogu uzrokovati vrlo visoke lokalne temperature. U ekstremnim slučajevima, može doći do taljenja na granicama zrna, slika 48. Obično se to taljenje naziva spaljenost. Čak i ako nije moguće uočiti lokalno taljenje, može do njega doći u mikrostrukturi te negativno utjecati na svojstva, primjerice smanjiti tvrdoću ili otpornost na zamor materijala. Kako bi se spriječila pojava ove greške potrebno je pažljivo regulirati temperaturu [22].



Slika 48. Početno taljenje na granicama zrna [23]

3.2.3.4. Lokalizacija tečenja

Tijekom deformacije materijal teče u smjeru najmanjeg otpora i podložan je adijabatskom zagrijavanju. Lokalizacija tečenja može se pojaviti zbog geometrijskih ili termalnih ograničenja okolnog materijala. Rezultat toga je pojava preklopa, pukotina, spaljenosti, materijala sa lošim mehaničkim svojstvima ili neželjena mikrostruktura. Pravilnim dizajnom priprema i kalupa moguće je izbjeći pojavu ove greške [22].



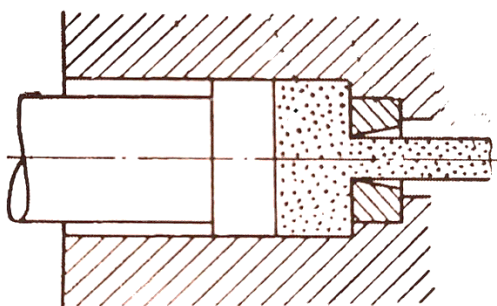
Slika 49. Prikaz lokalizacije tečenja [22]

3.3. Istiskivanje (ekstruzija)

3.3.1. Tehnologija istiskivanja

Postupak istiskivanja provodi u hladnom i toplom stanju, a njime se mogu proizvoditi razne okrugle, četvrtaste i profilirane šipke i cijevi, uglavnom iz obojenih i lakih metala i legura. Obrada čelika nije učestala ovom postupkom iako postoji u posebnim slučajevima. Za ekstruziju je potreban vrlo čisti materijal, bez lunquera, pukotina ili nakupina troske. Također je važno da struktura cijelog materijala jednolika. Radi toga ne upotrebljava se materijal lijevan u kokile nego se lijeva u bezdani ili kontinuirani lijev. Dodatna mjera za osiguravanje jednolikih svojstava po cijelom materijalu je tzv. homogenizacija.

Načelno postoje tri vrste istiskivanja: istosmjerno, protusmjerno i kombinirano istiskivanje. Kod istosmjernog smjer istiskivanja, slika 50, jednak je smjeru klipa, kod protusmjernog su obrnutog smjera, a kod kombiniranog materijal teče u obje strane [2].



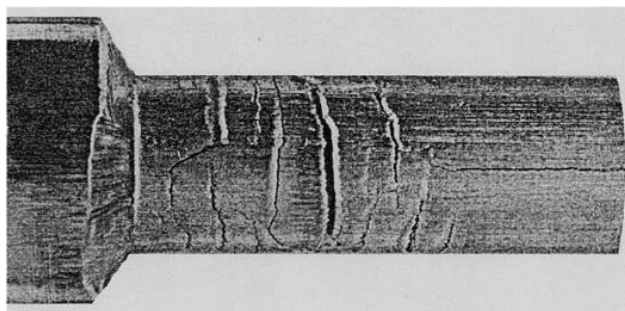
Slika 50. Istosmjerno istiskivanje [2]

3.3.2. Površinske greške

3.3.2.1. Površinske pukotine

U slučaju da su temperatura, trenje ili brzina previsoki tijekom ekstrudiranja, površinska temperatura može znatno porasti što uzrokuje pukotine duž granica zrna. To se može izbjeći nižom temperaturom sirovca ili manjom brzinom ekstruzije. No, pukotine se mogu pojaviti i na nižim temperaturama što se pripisuje periodičkom lijepljenju ekstrudiranog materijala na

matricu. S obzirom da je izgled ove greške sličan izgledu bambusovoj kori, naziva se bambusova kora [24].



Slika 51. Površinske pukotine nastale ekstrudiranjem [25]

3.3.2.2. *Ogrebotine*

Ogrebotine obično nastaju kada sirovac sadrži određene nečistoće, kada nije pravilno provedena homogenizacija materijala, kada se matrica deformira ili zbog nesavršenosti na površini matrice. Temperatura može utjecati na nastanak ove greške, iako je moguća pojava mikro ogrebotina i kada je temperatura ekstruzije pravilna i matrica ispravno dizajnirana [26].



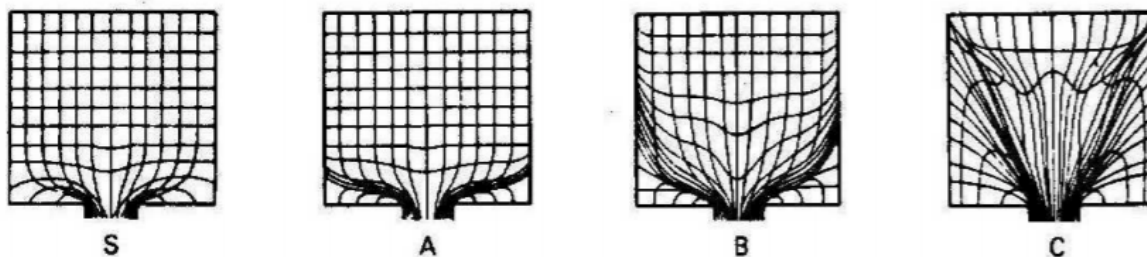
Slika 52. Ogrobotina na ekstrudiranom profilu [26]

3.3.3. *Strukturne greške*

3.3.3.1. *Neppravilno tečenje materijala*

Ekstrudiranje se obično izvodi kao nekontinuirani proces, moguće je staviti samo jedan sirovac u cilindar. Nejednako tečenje je tako uzrokovano razlikama u temperaturi sirovca i njegovom konačnom duljinom, kao i trenjem između sirovca i cilindra, i sirovca i klipa za istiskivanje. Postoji nekoliko vrsta nepravilnog tečenja, a može se reći da postoje dva glavna faktora koji utječu na tečenje materijala, trenje sirovca i cilindra, i temperaturni gradijent. Postoje četiri karakteristična uzorka tečenja u direktnom istiskivanju koristeći četvrtastu matricu, slika 53. Prvi od njih, uzorak S, karakterizira najveća moguća uniformnost tečenje u cilindru. Ovako uniformno i homogeno tečenje može jedino nastati kada nema trenja između sirovca i dijelova ekstrudera. Uzorak tečenja A pojavljuje se kada je trenje iznimno malo između cilindra i sirovca, no značajno između sirovca i matrice. Rezultat je pojava nešto veće mrtve zone i nešto veće deformacijske zone. Uzorak tečenja B pojavljuje se kada postoji trenje i između sirovca i cilindra, i između sirovca i matrice. Mrtva zona je veća, ali nije potpuno čvrsto pa može utjecati na tečenje materijala. Uzorak tečenja C događa se tijekom tople ekstruzije kada je trenje veliko

(kao uzorak B) i kada je naprezanje puno veće u hladnijim područjima sirovca. Konična mrtva zona je zbog toga puno veća i proteže se cijelom dužinom sirovca [26].



Slika 53. Nepravilno tečenje materijala [26]

3.3.3.2. Formiranje lijevka

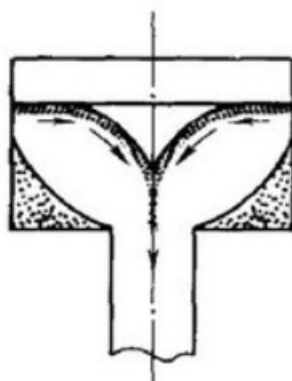
Kretanje perifernih zona sirovca bližih matrice, neovisno o neuniformnom tečenju zbog trenja, uzrokuje razdiranje. Materijal u sredini istiskuje se brže nego onaj na rubovima. Tako nastaje šupljina u obliku lijevka na stražnjem kraju sirovca, slika 54. [26].



Slika 54. Ljevak nastao ekstrudiranjem [26]

3.3.3.3. Formiranje cijevi

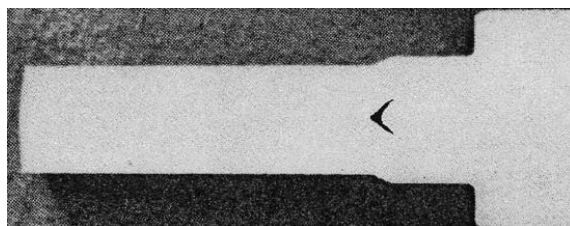
Ovo je najčešća pogreška koja se pojavljuje tijekom ekstrudiranja aluminija, kružna separacija u poprečnom presjeku u zadnjoj trećini ekstrudata, slika 55. Trenje između sirovca i cilindra rezultira da površinski slojevi sirovca ostaju nepokretni uz stjenku cilindra dok se unutrašnjost sirovca kreće prema matrici. Područje mrtve zone koja postoji u središtu usmjerava tečenje time omogućavajući nastanak greške [26].



Slika 55. Cijevna greška [27]

3.3.3.4. Unutarnje pukotine

Nastanak ove greške pripisuju se hidrostatskom vlačnom naprezanju u središtu poprečnog presjeka ekstrudiranog proizvoda. Eksperimenti su pokazali da za istu redukciju, kako kut matrice postaje veći, deformacija u proizvodu postaje nehomogenija. Također duljina kontaktne površine matrice igra ulogu, s manjim kutom matrice povećava se duljina kontaktne površine. Veličina i dubina deformacijske zone povećava se s porastom kontaktne duljine. Odnos visine i duljine je isto značajan, što je on veći, deformacija je homogenija. Prema tome, središte sirovca ne ulazi u plastičnu deformaciju jer deformacijske zone s obje strane ne dosežu jedna drugu [26].

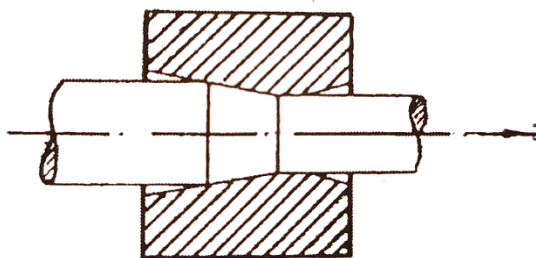


Slika 56. Unutarnja pukotina nastala ekstrudiranjem [25]

3.4. Provlačenje

3.4.1. Tehnologija provlačenja

Provlačenjem se u proizvodnji izrađuju šipke, trake, cijevi, boce, žice, konkretno obično se promjenjuje promjer i debljina stjenki, a ponekad za promjenu oblika presjeka. Upotrebljava se kada se žele postići točne dimenzije i glatka površina, promjena veličine presjeka, očvršćenje, kalibriranje ili ako je presjek izratka vrlo malen pa je izrada ostalim postupcima neekonomična. Obično se radi o hladnom postupku, a samo se bešavne cijevi i čahure rade u toplom stanju. Provlačenjem u hladnom stanju povećava se čvrstoća i smanjuje istezljivost. Prilikom izrade proizvoda najvažnije okolnosti na koje treba obratiti pažnju su: sile provlačenja, optimalni oblik provlačnog alata, materijal i vijek trajanja alata, najveće dopuštene pojedine i grupne redukcije presjeka, optimalne brzine provlačenja i utjecaj maziva. Može se reći da je provlačenje radi smanjenja presjeka najvažnija primjena ovog postupka, slika 57. [11].



Slika 57. Redukcija presjeka provlačenjem [2]

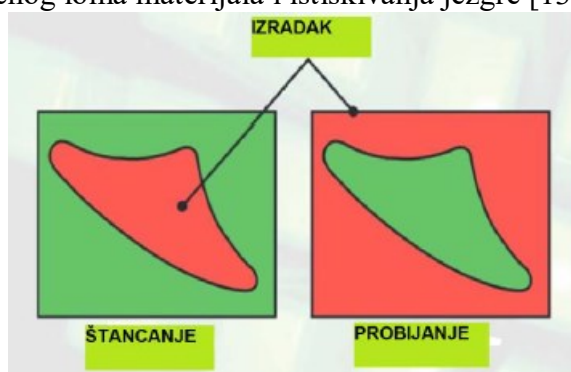
3.4.2. Greške kod provlačenja

Generalno govoreći, zbog sličnosti postupka sa postupkom istiskivanja (ekstruzije), sve greške koje se pojavljuju kod istiskivanja pojavljuju se i kod provlačenja.

3.5. Štancanje i probijanje

3.5.1. Tehnologija štancanja i probijanja

Operacije štancanja i probijanja načelno su iste, samo je razliku u tome što je radni komad, a što otpad. Kod štancanja radni komad je prosječna jezgra, a kod probijanja jezgra je otpad, slika 58. Kod procesa štancanja i probijanja mogu se uočiti tri faze. U početku je materijal podvrgnut djelovanju pritiska zbog čega je zapravo izložen djelovanju elastičnog savijanja koje u jednom trenutku prerasta u plastično savijanje zajedno sa istežanjem vlakana. Pri daljnjem prodiranju probijača u materijal nastaju znatnije deformacije, odnosno, u ovoj se materijal savija i utiskuje u otvor prstena za prosijecanje tako da se sila koju prenosi probijač koncentrira na granični prstenasti sloj materijala između reznih rubova probijača i prstena za prosijecanje. Ta koncentracija vanjskih sila dovodi prstenasti sloj do plastične deformacije. Vlakna u ovoj fazi još nisu prekinuta, iako je započelo istiskivanje jezgre. Kako se probijač giba dalje, razina deformacije materijala znatno prelazi dopuštenu granicu. Time dolazi do prvih pukotina ispod reznih rubova i do konačnog loma materijala i istiskivanja jezgre [13].

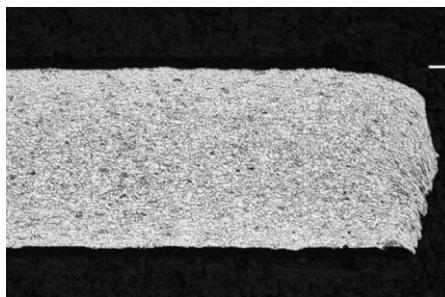


Slika 58. Razlika između štancanja i probijanja [28]

3.5.2. Greške kod štancanja i probijanja

3.5.2.1. Neravan rub

Nastaje kada je zračnost između alata i rupe za prosijecanje premala ili prevelika. Generalno govoreći, što je veća debljina lima potrebna je i veća zračnost, tipične vrijednosti su između 3 i 8 posto. Ako se radi o štancanju, rupa za prosijecanje treba biti točnih dimenzija, a alat smanjen, dok kod probijanja alat treba biti točnih dimenzija, a rupa za prosijecanje uvećana za određeni postotak [29].



Slika 59. Neravan rub [30]

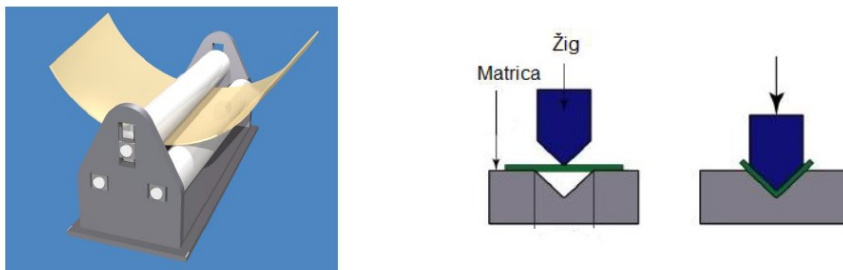
3.5.2.2. Pukotine

Pukotine nastaju zbog udara alata prevelikom brzinom o obradak [28].

3.6. Savijanje

3.6.1. Tehnologija savijanja

Savijanjem se u proizvodnji izrađuju razni limeni proizvodi, od vrlo sitnih i tankih predmeta do plašteva teških kotlova, bojlera, spremnika i dr. Ovim postupkom također se mogu oblikovati razni profili i cijevi. Savijanje je vrlo često u metaloprerađivačkoj industriji bilo da se radi o malim serijama ili masovnoj proizvodnji. U suvremeno doba tehnologije zavarivanja značajno su napredovale često se istiskuje ostale način proizvodnje u teškoj strojogradnji. Savijanje se obično izvodi u hladnom stanju, ali moguća je obrada i u toplom ako se radi o teškim profilima ili debelim cijevima. Kada se materijal savija on biva pod utjecajem elastičnih i plastičnih naprezanja tako da se nakon prestanka djelovanje vanjskih sila uslijed postojanja elastičnih naprezanja, savijeni proizvod povraća i otvori. Mogu se razlikovati dvije vrste savijanja: kružno i oštro ili profilno kutno savijanje. Kružnim savijanjem oblikuju se limovi, trake, cijevi i razni profili na strojevima za savijanje tzv. savijalicama. Oštro kutno savijanje koristi se kod masovne proizvodnje limenih odrezaka i profiliranih traka, a razlikuje se od oštrog jer mu je polumjer zakrivljenosti savijanja vrlo malen [2].

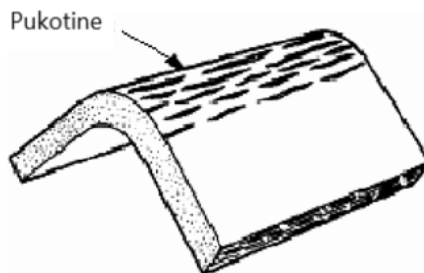


Slika 60. Kružno savijanje (lijevo) i oštro kutno savijanje (desno) [28]

3.6.2. Greške kod savijanja

3.6.2.1. Pukotine

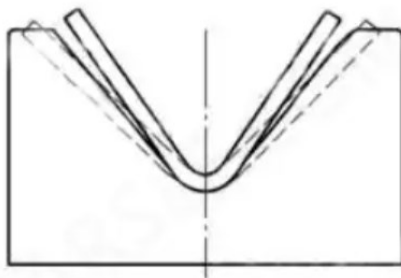
Pukotine, slika 61., nastaju kada je unutarnji radijus premali u odnosu na debljinu lima. Na pojavu pukotina utječe dopušteno vlačno naprezanje, smjer valjanja i savijanja i stanje ruba površine. Moguće je poduzeti određene mjere kako bi se spriječile pojave pukotina. Prva je da su rezovi lima ravni i glatki, druga mjera je obratiti pažnju na smjer u kojem je lim valjan, pukotine imaju tendenciju nastati kada se savija paralelno sa smjerom u kojem je materijal bio valjan. Treća mjera bi bila obratiti pažnju na alat, odnosno, radijus vrha alata trebao bi biti veći od debljine lima. Četvrta je koristiti materijal velike istezljivosti, te peta mjera bila bi upotrebljavati malu brzinu savijanja [31].



Slika 61. Pukotine nastale savijanjem [32]

3.6.2.2. *Elastičan povrat*

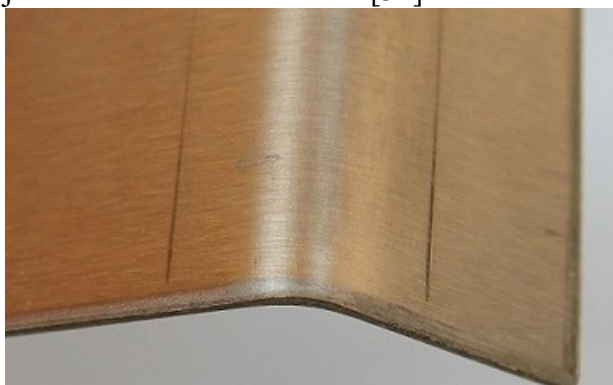
Tijekom savijanja metalnog lima događaju se plastična i elastična deformacija istovremeno. Nakon završetka postupka savijanja, događa se oporavak elastične deformacije, slika 62., što direktno utječe na dimenzijsku točnost savijanog proizvoda. Mjere za korekciju ove grešku su prilagođavanje kuta alata tako da se proizvod elastično povratu u željenu dimenziju, ili zadržavanje alata na obratku kako bi se povećao stupanj plastične deformacije time smanjujući elastični povrat [33].



Slika 62. **Elastični povrat** [33]

3.6.2.3. *Ogrebotine*

Grebanje obratka može se dogoditi klizanjem ili grebanjem alata ili matrice tijekom postupka savijanja. Ova greška vrlo je ozbiljan problem kod limova od nehrđajućeg čelika, aluminija i obojenog čelika jer ogrebotine lako nastaju. Obično se ovi materijali prevlače slojem vinila prije savijanja, međutim taj sloj ponekad puca ostavljajući oštećenja po predmetu. Radijus matrice blisko je vezan uz klizanje. Ne uzimajući u obzir ostale faktore, može se reći da se klizanje smanjuje povećanjem radijusa matrice te se preporuča upotreba takvih matrica. Ukoliko nije moguće koristiti matricu sa velikim radijusom preporuča se korištenje uretanske prevlake. Nakon odabira pravilne debljine ona se postavi na matricu i ima istu ulogu kao i prevlaka od vinila, spriječiti kontakt alata i obratka [31].



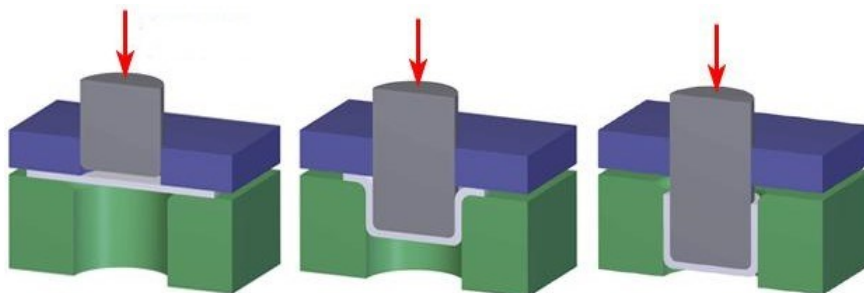
Slika 63. **Ogrebotine nastale savijanjem** [34]

3.7. **Duboko vučenje**

3.7.1. *Tehnologija dubokog vučenja*

Duboko vučenje uobičajen je postupak oblikovanja u hladnom stanju, ali može se izvoditi i u toplom stanju u posebnim slučajevima. Ovim postupkom u masovnoj proizvodnji proizvode se razne posude, kutije, čahure, automobilski dijelovi, sudoperi i drugo. Dakle, postupak dubokog vučenja postupak je prerade lima, od vrlo tankih do debelih. Ipak, obično se radi o limu debljine približno 1 milimetar. Topla obrada primjenjuje se kod debljih limova jer su sile deformiranja

manje, a i dalje postoji ekonomska isplativost. Obično se postupak izvodi u nekoliko koraka i nekoliko alata, a rjeđe se gotovi izradak dobije jednim korakom. Pretpostavlja se da je debljina lima tijekom procesa konstantna, a proces se promatra kao dvoosno deformacijsko stanje. No, u stvarnom svijetu doći će do stanjenja stjenke kod dna posude dok na rubu nastaje zadebljanje lima [2].



Slika 64. Postupak dubokog vučenja [35]

3.7.2. Greške kod dubokog vučenja

3.7.2.1. Pucanje dna posude

Pucanje dna događa se zbog velikog odnosa vučenja ili zbog prevelike sile tlačnog prstena, slika 65., na dnu posude su ujedno i najveća naprezanja [2].



Slika 65. Puknuto dno posude [35]

3.7.2.2. Stvaranje uški

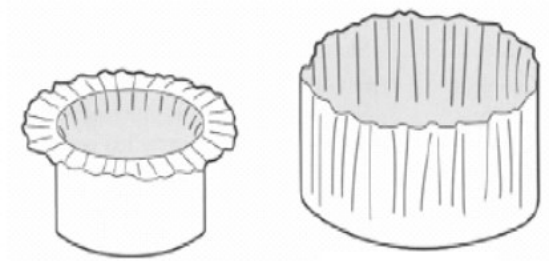
Do stvaranja uški dolazi zbog anizotropije materijala, kad anizotropije nema, uške se ne stvaraju. Pojavljuju se na vrhu posude, slika 66., obično su pod kutom od 45 stupnjeva, a kako bi se uklonile nastale uške, materijal se odrezuje [36].



Slika 66. Uške na posudi [37]

3.7.2.3. Nabori

Moguća je pojava nabora na prirubnici posude ili duž stijenke posude, slika 67. Osnovni razlozi za nastajanje ove greške su nedovoljan pritisak tlačnog prstena, preveliko trenje između obratka i alata, nepravilna zračnost i nepravilna brzina alata [38].



Slika 67. Nabori na prirubnici (lijevo) i na stijenci (desno) [39]

4. ZAKLJUČAK

Pojava greški na proizvodu sastavni je dio proizvodnje tehnologijom oblikovanja deformiranjem. Kako bi spriječili pojavu greški potrebno je poznavati mehanizam deformacije metala što je objašnjeno na modelu monokristala i polikristala. Također, potrebno je poznavati faktore koji utječu na pojavu greški, odnosno, kakav utjecaj pojedini faktor ima na tijek oblikovanja deformiranjem. Temperatura na kojoj se odvija postupak deformacije uvelike određuje svojstva proizvoda, glavna odlika hladne deformacije jest očvršćivanje metala, a kod tople obrade moguće je izvršiti veći stupanj deformacije bez pojave pucanja. Pravilno podmazivanje alata i obratka tijekom procesa od iznimne je važnosti jer nedovoljno podmazivanje će neminovno dovesti do pojavi greški uslijed velikog trenja na sučelju alat – obradak. Utjecaj stupnja deformacije utoliko je važan jer o njemu ovise mehanička svojstva proizvoda, generalno povećanjem stupnja deformacije raste čvrstoća, ali opada deformabilnost. Mehanička svojstva materijala kojeg se obrađuje određuju u kojoj mjeri će biti moguća deformacija bez pojave pucanja, obično materijali sa većom čvrstoćom imaju manju deformabilnost, no postoje iznimke. Nadalje, tijekom provedbe procesa deformacije potrebno je u obzir uzeti brzinu deformacije čijim rastom opada deformabilnost i shemu napregnutog stanja jer materijala ne podnosi jednako vlačna i tlačna naprezanja.

Kod pregleda grešaka koje se pojavljuju kod pojedinog postupka može se reći da postoje tri vrste grešaka, greške oblika i dimenzija, površinske greške i strukturne greške. Neke greške uzrokovane su loše dizajniranim alatom, neke vođenjem procesa na nepravilnoj temperaturi ili nepravilnim odabirom jednog ili više ostalih faktora koji utječu na tijek obrade deformiranjem. Pravilnim odabirom parametara obrade, alata i kalibracije postrojenja moguće je pojavu greški svesti na minimum.

LITERATURA

- [1] S. Rešković Teorija oblikovanja deformiranjem, 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> pristupljeno: siječanj 2021.
- [2] M. Math: Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [3] <https://www.tec-science.com/material-science/structure-of-metals/important-types-of-lattice-structures/> pristupljeno: siječanj 2021.
- [4] <http://metal-forming.org/images/for-books/Danchenko/danchenko-omd-engl.pdf> pristupljeno: siječanj 2021.
- [5] B. Grizelj, Volumensko oblikovanje deformiranjem, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavosnki Brod, 2012.
- [6] <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~atonejc/3%20NNDefekti%20kristalne%20resetke.pdf> pristupljeno: siječanj 2021.
- [7] A. Povrzanović: Odabrana poglavlja obrade metala deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [8] <https://mm.ethz.ch/research-overview/computational-mechanics/microstructure-evolution.html> pristupljeno: siječanj 2021.
- [9] https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf pristupljeno: siječanj 2021.
- [10] <https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/112107144/Metal%20Forming%20&%20Poder%20metallurgy/lecture1/lecture1.htm> pristupljeno: siječanj 2021.
- [11] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/plasticna_obradba_metala.pdf pristupljeno: siječanj 2021.
- [12] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Čurković, Materijal I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [13] B. Mustafija, Obrada metala plastičnom deformacijom, IGKRO svjetlost OOUR zavod za udžbenike, Sarajevo, 1979.
- [14] M. Čaušević, Obrada metala valjanjem, Veselin Masleša, Sarajevo, 1983.

- [15] N. Devčić, I. Mamuzić, K. Terzić, Greške na bešavnim cijevima, *Metalurgija* (0543-5846) 44 (2005), 1; 53-58
- [16] M. Pešić, V. Milenković, Valjanje čeličnih limova i traka, NIP Tehnička knjiga, Beograd, 1965.
- [17] <http://www.ijsrp.org/research-paper-0614/ijsrp-p3024.pdf> pristupljeno: siječanj 2021.
- [18] <https://www.forgemag.com/articles/83737-understanding-geometrical-forging-defects> pristupljeno: siječanj 2021.
- [19] <https://www.slideshare.net/NiazAhmed49/niaz-presentation1> pristupljeno: siječanj 2021.
- [20] <https://slideplayer.com/slide/4955553/> pristupljeno: siječanj 2021.
- [21] <https://www.forgemag.com/articles/84701-predicting-material-fracture-in-cold-forging> pristupljeno: siječanj 2021.
- [22] <https://www.forgemag.com/articles/83740-understanding-material-forging-defects> pristupljeno: siječanj 2021.
- [23] <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-017-1061-2> pristupljeno: siječanj 2021.
- [24] <http://www.uoh.edu.sa/facultymembers/en/B.AYADI/PublishingImages/Pages/Teaching-Activity/ch15%20%20Metal%20Extrusion%20and%20Drawing.pdf> pristupljeno: siječanj 2021.
- [25] https://www.researchgate.net/figure/Defects-during-the-extrusion-processes-a-Internal-crack-chevron-b-External_fig2_225458656 pristupljeno: siječanj 2021.
- [26] https://www.researchgate.net/profile/Abul_Fazal_Arif/publication/281905425_PRODUCT_DEFECTS_IN_ALUMINUM_EXTRUSION_AND_ITS_IMPACT_ON_OPERATIONAL_COST/links/55fdc16908ae07629e2fla1f/PRODUCT-DEFECTS-IN-ALUMINUM-EXTRUSION-AND-ITS-IMPACT-ON-OPERATIONAL-COST.pdf pristupljeno: siječanj 2021.
- [27] <https://www.linkedin.com/pulse/ways-reduce-aluminum-extrusion-pipingfunnel-defect-adam-zhu/> pristupljeno: siječanj 2021.
- [28] Z. Keran, Predavanja iz kolegija Oblikovanje deformiranjem, Zagreb
- [29] https://thelibraryofmanufacturing.com/sheetmetal_cutting.html pristupljeno: siječanj 2021.
- [30] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/cuttingweldprep/determining-sharpness-of-sheet-metal-edges> pristupljeno: siječanj 2021.
- [31] <http://www.amada.com/products/tooling/techinfo/rg/abcsec6.htm> pristupljeno: siječanj 2021.

-
- [32] https://www.researchgate.net/figure/Crack-formation-in-the-bending-zone_fig1_3996722 pristupljeno: siječanj 2021.
- [33] <https://www.harsle.com/What-are-the-common-defects-of-bent-parts-id8952244.html> pristupljeno: siječanj 2021.
- [34] <https://metalmaq.shop/blog/en/how-to-avoid-bending-marks-on-the-metal-sheet/> pristupljeno: siječanj 2021.
- [35] <https://metallurgyfordummies.com/deep-drawing.html> pristupljeno: siječanj 2021.
- [36] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/146/1/012009/pdf> pristupljeno: siječanj 2021.
- [37] <http://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV3I8048.pdf> pristupljeno: siječanj 2021.
- [38] <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/wrinkling-during-deep-drawing/> pristupljeno: siječanj 2021.
- [39] https://nanopdf.com/download/effect-of-various-parameters-on-the-wrinkling-in-deep-drawing-cylindrical-cups_pdf pristupljeno: siječanj 2021.