

# Utjecaj promjene tehnoloških parametara na deformabilnost materijala pri oštrom kutnom savijanju lima CNC savijačicom

---

Sinković, Rok

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:449544>

Rights / Prava: [Attribution-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGEBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Rok Sinković**

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGEBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**UTJECAJ PROMJENE  
TEHNOLOŠKIH PARAMETARA NA  
DEFORMABILNOST MATERIJALA  
PRI OŠTROM KUTNOM SAVIJANJU  
LIMA CNC SAVIJAČICOM**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Zdenka Keran, dipl. ing.

Student:

Rok Sinković

Zagreb, 2025

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim tijekom studiranja, te uz navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se mentorici Zdenki Keran na strpljenju i pomoći tijekom izrade rada, također se zahvaljujem poduzeću „Hidraulika Kurelja“ na ustupljenim strojevima potrebnim za obradu teme završnog rada.*

Rok Sinković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske 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 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Rok Sinković** JMBAG: **0035234703**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj promjene tehnoloških parametara na deformabilnost materijala pri oštrom kutnom savijanju lima CNC savijačicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of technological parameter change on formability in angular bending of sheet metal with CNC bending machine**

Opis zadatka:

Tehnološki parametri, poput brzine savijanja, kuta savijanja, debljine i vrste materijala, temperature te sile savijanja, imaju izravni utjecaj na sposobnost materijala da se deformira u oblik zadane geometrije.

U radu je potrebno opisati postupak oštrougutnog savijanja lima na CNC savijačici. Pri tome je, na konkretnom primjeru savijanja, potrebno analizirati sve parametre koji utječu na deformabilnost materijala, posebno one parametre koje je moguće mijenjati i korigirati. Proračunati silu savijanja za prikazani primjer. Opisati pogreške koje se javljaju prilikom procesa savijanja ovakvog tipa.

U suradnji s tvrtkom Hidraulika Kurelja provesti savijanje različitih materijala varirajući silu savijanja, temperaturu savijanja i kut savijanja te prikazati rezultate utjecaja na ispravnost postignute geometrije, pojavu pukotine i elastični povrat materijala.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Zdenka Keran

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.  
 2. rok: 10. i 11. 7. 2025.  
 3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.  
 2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.  
 3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. OBLIKOVANJE DEFORMIRANJEM .....	2
2.1 Oblikovanje – DIN 8580 .....	2
2.2 Osnovni pojmovi oblikovanja deformiranjem.....	3
2.3 Logaritamski stupanj deformacije .....	4
3. SAVIJANJE .....	5
3.1 Proizvodna tehnologija savijanja.....	5
3.2 Vrste savijanja .....	6
3.2.1 Kružno savijanje .....	6
3.2.2 Profilno savijanje .....	7
3.2.3 Oštro kutno savijanje .....	8
4. TEHNOLOŠKI PARAMETRI PRI OŠTROM KUTNOM SAVIJANJU.....	9
4.1 Brzina savijanja .....	9
4.2 Temperatura.....	10
4.3 Debljina materijala .....	11
4.4 Vrsta materijala.....	12
4.5 Kut savijanja .....	13
4.6 Sila savijanja.....	13
5. GREŠKE KOD OŠTROG KUTNOG SAVIJANJA.....	14
5.1 Pukotine na vanjskom radijusu.....	14
5.2 Rubna izobličenja materijala .....	16
5.3 Rubne pukotine.....	17
5.4 Ogrebotine uzrokovane matricom .....	17
6. ELASTIČNI POVRAT MATERIJALA .....	18
6.1 K-faktor .....	19
7. PRORAČUN OŠTROG KUTNOG SAVIJANJA .....	20
7.1 Analiza proračuna.....	20
7.2 Određivanje sile savijanja na konkretnom primjeru.....	27
8. SAVIJANJE LIMOVA U PODUZEĆU „HIDRAULIKA KURELJA“.....	29
8.1 Opis poduzeća.....	29

8.2 Priprema komada za savijanje .....	29
8.3 Materijali i dimenzije pripremljenih pločica za savijanje .....	30
8.4 CNC savijačica „Bystronic Xpert 400/6200“ .....	31
8.5 Savijanje pripremljenih komada na CNC savijačici.....	32
8.5.1 1. savijanje .....	32
8.5.2 2. savijanje .....	33
8.5.3 3. savijanje .....	34
8.5.4 4. savijanje .....	35
8.5.5 5. savijanje .....	36
8.5.6 6. savijanje .....	37
8.6 Elastični povrat materijala savijenih komada .....	38
8.7 Najčešće pogreške savijenih komada .....	39
8.7.1 Pukotine na vanjskom radijusu .....	39
8.7.2 Rubna izobličenja.....	39
8.7.3 Ogrebotine uzrokovane matricom.....	40
8.8. Proračun sile savijanja savijenih komada lima.....	41
8.8.1 Tablični prikaz izračunatih sila savijanja savijenih komada.....	42
9. POBOLJŠANJE PROCESA OŠTROG KUTNOG SAVIJANJA .....	44
9.1 Toplinska obrada - žarenje .....	44
9.1.1 Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja .....	44
9.1.2 Rekristalizacijsko žarenje .....	45
10. ZAKLJUČAK .....	46
11. LITERATURA.....	47

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shema proizvodnih procesa prema DIN 8580 .....	2
Slika 2. Promjene na metalnoj epruveti tijekom statičkog vlačnog ispitivanja [3].....	3
Slika 3. Logaritamski stupanj deformacije.....	4
Slika 4. Cijevi i šipke [6].....	5
Slika 5. Limovi [6] .....	5
Slika 6. Savijačica sa tri valjka [7].....	6
Slika 7. Kružno savijanje sa četiri valjka [7] .....	6
Slika 8. Profilno savijanje lima [9].....	7
Slika 9. Savijačica za oštro kutno savijanje [10].....	8
Slika 10. Dijagram utjecaja brzine deformacije na naprezanje kod čelika P92, pri 600°C [11].....	9
Slika 11. Dijagram ovisnosti deformabilnosti o temperaturi kod ugljičnog čelika [2] .....	10
Slika 12. Kutno savijanje lima [12].....	11
Slika 13. Oštro kutno savijanje lima velike debljine [13] .....	11
Slika 14. Savijanje lima na kut manji od 90° [14] .....	13
Slika 15. Jednostavna shema sile savijanja [15] .....	13
Slika 16. Dijagram usporedbe duktilnih i krhkih materijala [17] .....	14
Slika 17. Utjecaj smjera valjanja na nastanak pukotine [19] .....	15
Slika 18. Struktura zrna prije i poslije valjanja [20] .....	15
Slika 19. Nastanak rubnih izobličenja [21] .....	16
Slika 20. Mogući oblici utora [22] .....	16
Slika 21. Rubne pukotine [23].....	17
Slika 22. Ogrebotina uzrokovana matricom [24] .....	17
Slika 23. Nastanak elastičnog povrata [26] .....	18
Slika 24. Promjena kuta kod savijanja [27].....	18
Slika 25. K-faktor kod savijanja [28] .....	19
Slika 26. Shema procesa savijanja [5].....	20
Slika 27. Faze savijanja u matrici.....	21
Slika 28. Tok sile savijanja [5].....	22
Slika 29. Analiza sila savijanja .....	23
Slika 30. Alat za oštro kutno savijanje [5] .....	25
Slika 31. Izrada složenih komada oštrim kutnim savijanjem [5] .....	26
Slika 32. Univerzalni alati za savijanje [5] .....	26
Slika 33. Poliranje početnog komada lima.....	29
Slika 34. Graviranje oznake materijala .....	30
Slika 35. CNC savijačica „Bystronic Xpert 400-6200“ .....	31
Slika 36. Laser za detekciju stranog tijela.....	31
Slika 37. Savijeni komadi - X5CrNi18-10_1 .....	32
Slika 38. Savijeni komadi - S235JR.....	33
Slika 39. Savijanje S235JR na CNC savijačici .....	33
Slika 40. Savijeni komadi - AlMgSi1 .....	34
Slika 41. Uzdužno savijanje aluminija - AlMgSi1.....	34
Slika 42. Savijeni komadi - X5CrNi18-10_10mm.....	35
Slika 43. Savijeni komadi - S235JR_10mm.....	36



Slika 44. Savijeni komadi - AlMgSi1_10mm .....	37
Slika 45. Mjerenje kuta savijanja bez korekcije i sa korekcijom .....	38
Slika 46. Unos kuta savijanja bez korekcije i sa korekcijom .....	38
Slika 47. Pukotine na vanjskom radijusu prilikom uzdužnog savijanja.....	39
Slika 48. Rubna izobličenja i ostale greške na S235JR.....	39
Slika 49. Ogrebotine uzrokovane matricom na savijenim komadima .....	40
Slika 50. Dijagram žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [31] .....	44
Slika 51. Dijagram rekristalizacijskog žarenja [31] .....	45
Slika 52. Prikaz promjene zrna nakon rekristalizacijskog žarenja [31] .....	45

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost K-faktora o materijalu [29] .....	19
Tablica 2. Specifični pritisak $p$ [ $N/mm^2$ ] za poravnavanje komada pri savijanju [5] .....	25
Tablica 3. Svojstva materijala .....	30
Tablica 4. Sile savijanja savijenih komada .....	42

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\varepsilon$	mm/mm	Istezanje
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje
$V_0$	mm <sup>3</sup>	Početni volumen
$V_1$	mm <sup>3</sup>	Konačni volumen
$a_0, b_0, h_0$	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
$T$	°C	Temperatura
$M$	Nmm	Moment savijanja
$F$	N	Sila savijanja
$F_a$	N	Reakcija u osloncu
$x$	mm	Krak sile
$l_k$	mm	Razmak između centara zaobljenja matrice
$r_t$	mm	Radijus žiga
$r_k$	mm	Radijus matrice
$\alpha$	°	Kut savijanja
$\varphi$	°	Pomoćni kut savijanja
$s$	mm	Debljina lima
$F_k$	N	Sila kalibriranja
$F_1$	N	Sila savijanja kod uređaja za držanje lima
$F_2$	N	Ukupna potrebna sila kalibriranja
$p$	N/mm <sup>2</sup>	Normalni specifični pritisak za kalibriranje
$c$	mm	Dužina ravnog dijela kraka
$b$	mm	Širina trake lima
$L$	mm	Dužina lima
$n$	/	Korekcijski faktor
$\sigma_m$	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća

## **SAŽETAK**

Oblikovanje deformiranjem obuhvaća promjenu oblika materijala u svrhu postizanja željene geometrije bez odvajanja materijala. Obrađena je tehnologija oštrog kutnog savijanja lima, kao i tehnološki parametri prilikom izvođenja navedene tehnologije. Uz mnogobrojne prednosti ovog postupka, razrađene su i greške koje se javljaju tijekom procesa deformacije, te ponuđena rješenja za poboljšanje procesa. Nadalje, prikazan je proračun oštrog kutnog savijanja kako bi se predočio utjecaj tehnoloških parametara na iznos sile savijanja. U suradnji sa tvrtkom „Hidraulika Kurelja“, savijeni su pripremljeni komadi lima različitih debljina i materijala na CNC savijačici. Nakon savijanja materijala u stvarnim tehnološkim uvjetima, dolazi do nepravilnosti i grešaka na proizvedenim komadima lima. Analizom rezultata ponuđene su mogućnosti uklanjanja navedenih grešaka te moguća rješenja za unaprjeđenja postupka oštrog kutnog savijanja.

Ključne riječi: oblikovanje deformiranjem, tehnološki parametri savijanja, oštro kutno savijanje, elastični povrat materijala, greške kod oštrog kutnog savijanja, sila savijanja

## **SUMMARY**

Deformation forming involves changing the shape of a material to achieve the desired geometry without separating the material. The technology of sharp-angle sheet bending has been addressed, along with the technological parameters involved in executing this technology. Along with the numerous advantages of this process, the errors occurring during the deformation process have been outlined, and solutions for process improvement have been proposed. Furthermore, a calculation of sharp-angle bending is presented to demonstrate the impact of technological parameters on the bending force. In collaboration with the company "Hidraulika Kurelja", prepared sheet pieces of different thicknesses and materials were bent on a CNC bending machine. After bending the material under real technological conditions, irregularities and errors appeared on the produced sheet parts. By analyzing the results, possible ways to eliminate these errors and potential solutions for improving the sharp-angle bending process were suggested.

Keywords: deformation forming, bending technological parameters, sharp angle bending, material elastic return, errors in sharp angle bending, bending force.

## 1. UVOD

Savijanje je tehnologija koja spada u područje obrade metala plastičnom deformacijom. Savijanje je pronašlo vrlo široku primjenu u proizvodnji najrazličitijih proizvoda i poluproizvoda. Polazni materijal za savijanje može biti lim, traka, profil, šipka ili cijev, stoga se, ovisno o polaznom materijalu, vrši odabir načina savijanja. Proizvodi izrađeni postupkom savijanja vrlo su često ekonomski isplativiji u usporedbi s nekim drugim tehnologijama, npr. lijevanjem, jer je postupak jednostavniji i brži. U okviru ovog završnog rada obrađuje se postupak oštrog kutnog savijanja lima na CNC savijačici. Uz mnogobrojne prednosti ovog postupka savijanja, utvrđeni su i nedostaci koji utječu na konačna svojstva proizvoda dobivenog tehnologijom oštrog kutnog savijanja.

Prednosti oštrog kutnog savijanja:

- brzina proizvodnje
- preciznost obrade
- smanjenje naknadne obrade
- manja težina proizvoda
- niska cijena kod maloserijske i srednje serijske proizvodnje
- jednostavna konstrukcija alata
- smanjenje složenosti proizvoda

Nedostaci oštrog kutnog savijanja:

- ograničenja debljine materijala
- visoka cijena kod velikoserijske proizvodnje
- kontrakcija debljine na mjestu savijanja
- greške prilikom savijanja limova

Važna pojava koja utječe na tehnološki postupak savijanja naziva se elastičan povrat materijala. Upravo je to tema mnogih istraživanja, pa će ovdje biti ispitan njegov utjecaj na tehnološki proces savijanja.

Različiti materijali određenih debljina drugačije će se ponašati tijekom postupka savijanja, stoga će se u nastavku obraditi savijanje spomenutih te usporediti dobiveni rezultati tako i pronaći moguća poboljšanja procesa.

## 2. OBLIKOVANJE DEFORMIRANJEM

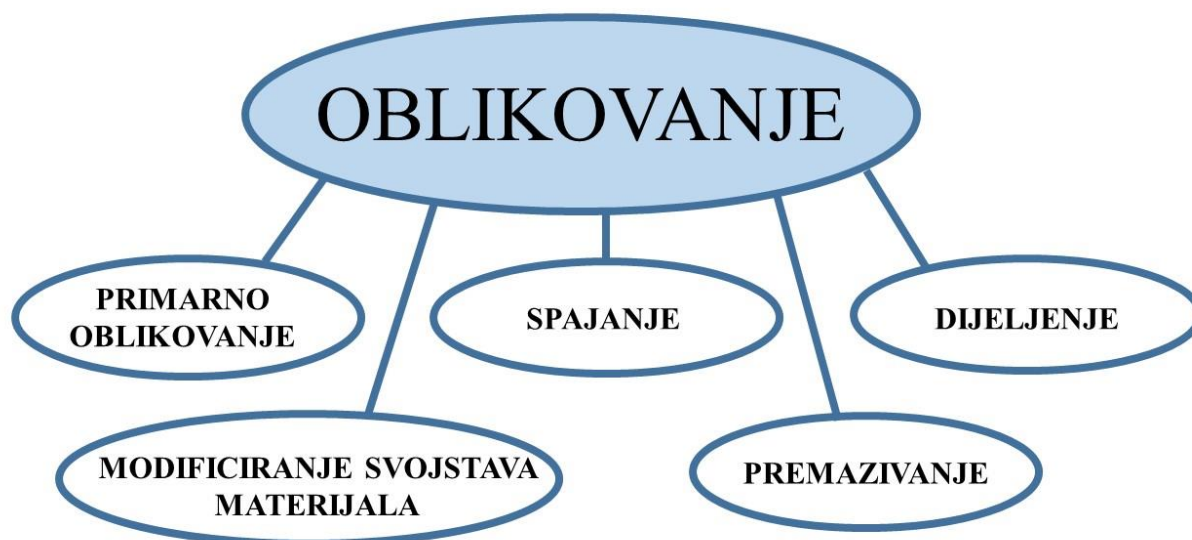
### 2.1 Oblikovanje – DIN 8580

Prema DIN 8580, procesi proizvodnje klasificirani su u šest glavnih skupina: primarno oblikovanje, oblikovanje materijala, dijeljenje, spajanje, modificiranje svojstava materijala i premazivanje. Primarno oblikovanje je stvaranje početnog oblika iz rastaljenog, plinovitog ili bezobličnog čvrstog stanja. Dijeljenje je lokalno odvajanje materijala. Spajanje je sastavljanje pojedinih radnih komada u podsklopove, a također uključuje punjenje i zasićivanje poroznih radnih komada. Premazivanje označava nanošenje tankih slojeva na komponente, primjerice galvanskom obradom ili omatanjem folijom. Cilj modificiranja svojstava materijala je promjena karakteristika materijala radnog komada kako bi se postigla određena korisna svojstva. Takvi procesi uključuju procese toplinske obrade poput kaljenja ili rekristalizacijskog žarenja.[1]

Oblikovanje je definirano prema DIN 8580 kao proizvodnja kroz trodimenzionalnu ili plastičnu modifikaciju oblika, uz zadržavanje mase. Za razliku od deformacije, oblikovanje je modifikacija oblika s kontroliranom geometrijom. Proces oblikovanja kategorizirani su kao procesi bez uklanjanja materijala.[1]

U kontekstu plastične deformacije, tehnike oblikovanja klasificirane su prema DIN 8582 ovisno o glavnom smjeru primijenjenog naprežanja:

- oblikovanje pod kompresijskim uvjetima,
- oblikovanje pod kombiniranim uvjetima rastezanja i kompresije,
- oblikovanje pod uvjetima rastezanja,
- oblikovanje savijanjem,
- oblikovanje pod uvjetima smicanja.[1]



Slika 1. Shema proizvodnih procesa prema DIN 8580

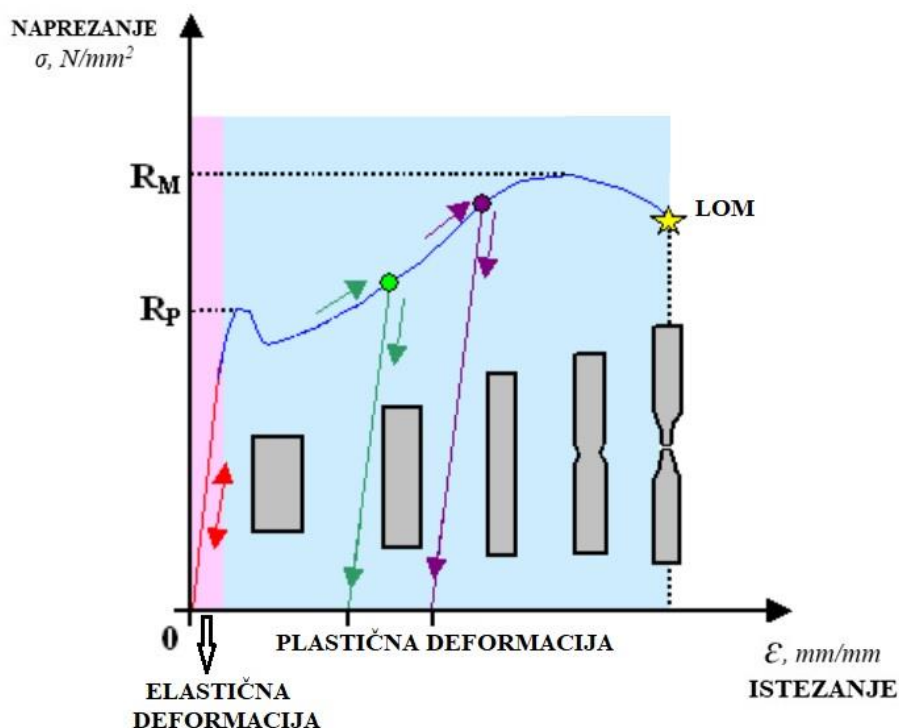
## 2.2 Osnovni pojmovi oblikovanja deformiranjem

Pri plastičnom oblikovanju izuzetno je važno razumjeti i izračunati koliku je deformaciju materijal sposoban podnijeti prije nego se pojavi pukotina ili lom materijala. Plastičnost, duktilnost i deformabilnost termini su koji povezuju svojstva materijala s tehnologijom oblikovanja deformiranjem. Bitno je poznavati svojstva materijala kako bi postupak deformiranja tekao bez pogrešaka te kako bi prema odabranom materijalu znali izabrati parametre koji izravno utječu na deformabilnost materijala.

**Plastičnost** je fizikalni pojam sposobnosti deformacije materijala, a ne mjeri se ni na koji način. Na primjer, za olovo ili čisti aluminij može se reći da su plastični, dobro se deformiraju, ali se plastičnost ne može izmjeriti nego je zaključak donesen iskustveno.

**Duktilnost** je sposobnost materijala da se plastično deformira bez pojave loma, a može se mjeriti testovima, posrednim i neposrednim. Posredno ispitivanje duktilnosti provodi se statičkim vlačnim i tlačnim pokusom, te se na temelju rezultata posredno zaključuje o duktilnosti materijala. Neposredni načini ispitivanja duktilnosti imitiraju shemu napregnutog stanja u nekom postupku oblikovanja deformiranjem. Neki od neposrednih načina ispitivanja duktilnosti su: ispitivanje uvijanjem, ispitivanje savijanjem, ispitivanje s trnom, ispitivanje prodora kuglom.

**Deformabilnost** je sposobnost materijala da se deformira u konkretnim tehnološkim uvjetima bez pojave loma materijala. Deformabilnost je kompleksan pojam koji ovisi o mnogobrojnim parametrima tijekom postupka deformiranja, stoga je ključno biti na oprezu prilikom biranja istih. [2]

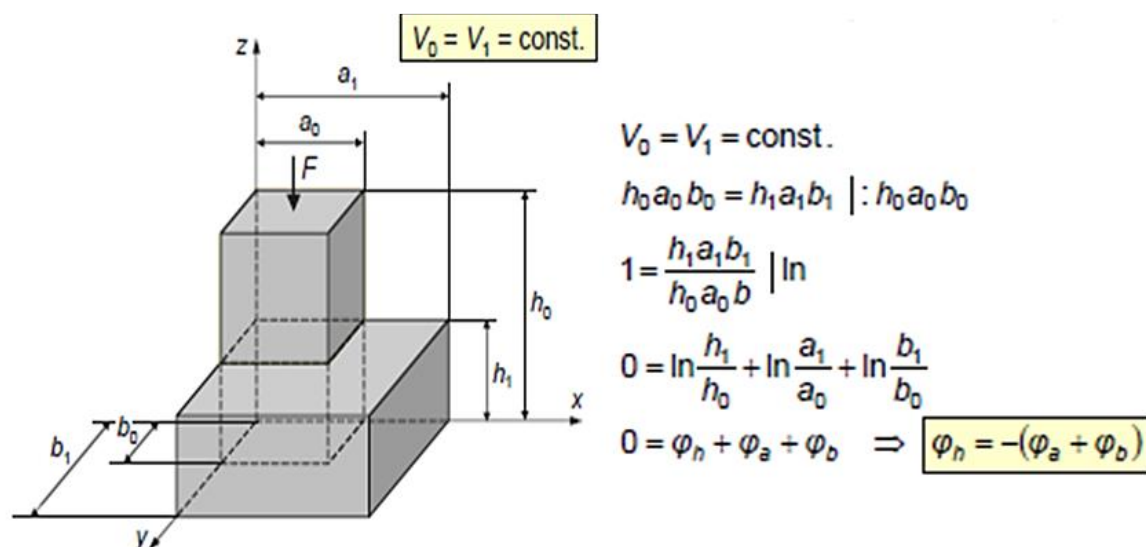


Slika 2. Promjene na metalnoj epruveti tijekom statičkog vlačnog ispitivanja [3]



### 2.3 Logaritamski stupanj deformacije

Logaritamski stupanj deformacije je matematički alat kojim se izračunavaju dimenzije deformiranog materijala. Temelji se na pretpostavki konstantnog volumena. Kada se na neku prizmu djeluje silom  $F$ , prizma će se povećavati u preostale dvije osi, dok će se dimenzija u smjeru djelovanja sile smanjiti. Konačni oblik materijala uvjetovan je načinom vođenja procesa. Konstrukcijom alata definiramo smjerove tečenja materijala. Matematičkim putem vrlo lako se izračuna traženi stupanj deformacije obrađivanog materijala.[4]



Slika 3. Logaritamski stupanj deformacije

Iz prikazanih jednadžbi zaključuje se da je pri plastičnoj deformaciji zbroj logaritamskih deformacija u tri međusobno okomita smjera jednak nuli. Deformacija u jednom smjeru suprotnog je predznaka u odnosu na druge dvije, a po iznosu je jednaka njihovom zbroju. Iz toga proizlazi da se volumen ne mijenja, već se mijenja oblik i dimenzije deformiranog tijela. Zaključujemo da logaritamski stupanj deformacije izražava promjene duljina, presjeka i volumena nekog tijela zbog djelovanja vanjske sile.[4]

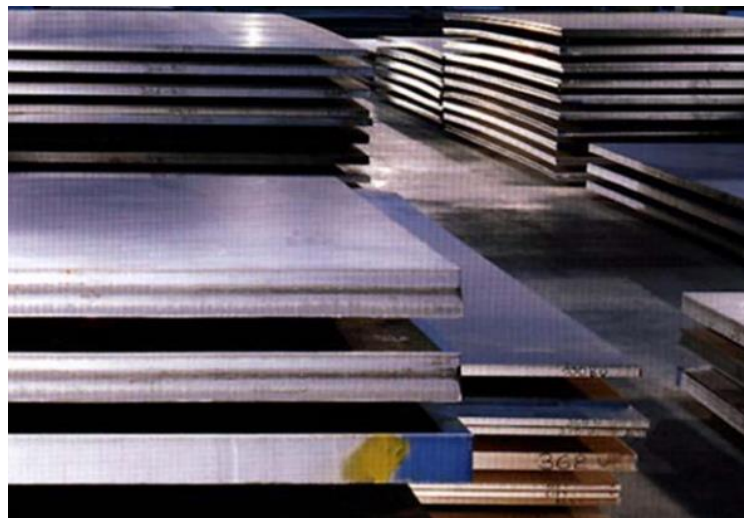
### 3. SAVIJANJE

#### 3.1 Proizvodna tehnologija savijanja

Savijanje je postupak oblikovanja materijala plastičnom deformacijom. Postupak savijanja vrlo je zastupljena grana tehnologije u metalnoj industriji. Unazad nekoliko desetljeća, pa sve do danas, razvoj tehnologije je vrlo primjetan u svim granama industrije, tako i kod obrade metala savijanjem. Moderni strojevi omogućili su vrlo brzu i preciznu izradu proizvoda, stoga je tehnologija savijanja zauzela visoku poziciju u velikoserijskoj tako i u maloserijskoj proizvodnji zbog prisutnosti visoko fleksibilnih proizvodnih sustava. Najčešći poluproizvodi koji se obrađuju savijanjem su limovi i trake, a tako ih slijede i šipke, cijevi, vučeni i valjani profili.[5]



Slika 4. Cijevi i šipke [6]



Slika 5. Limovi [6]

### 3.2 Vrste savijanja

Razlikujemo tri načina savijanja:

- kružno savijanje
- profilno savijanje
- oštro kutno savijanje

#### 3.2.1 Kružno savijanje

Kružno savijanje je tehnologija kojom se savijaju limovi i trake za izradu kotlova, rezervoara, cisterni i sličnih proizvoda.

Kružno savijanje izvodi se na savičicama. Postoje savijačice sa tri valjka kod kojih su donja dva valjka pogonjena, a gornji nema pogona te se može pomicati u vertikalnom smjeru. Uz savijačice sa tri valjka postoje i savijačice sa četiri valjka, gdje je pogonjen samo gornji, veći valjak, a ostala tri valjka mogu se premještati tako da je moguće istovremeno obaviti i postupak predsavijanja.



Slika 6. Savijačica sa tri valjka [7]



Slika 7. Kružno savijanje sa četiri valjka [7]

### 3.2.2 Profilno savijanje

Profilnim savijanjem limova dobivaju se proizvodi relativno velike duljine. Prilikom ovakvog savijanja najčešće se radi o višekutnom savijanju. Kod profilnog savijanja limova valjci vode lim, odnosno, metal prolazi kroz seriju valjaka gdje se na svakom valjku obavlja postupno savijanje. Strojevi koji obavljaju profilno savijanje mogu saviti čak do 200 metara limova, odnosno, metala po minuti. Prednost profilnog savijanja je izuzetno visoka produktivnost, dok je fleksibilnost takvih strojeva vrlo niska, jer valjci koji su montirani na sami stroj proizvode samo jednu geometriju. [8]



**Slika 8. Profilno savijanje lima [9]**

Na slici je prikazan postupak savijanja limenog pokrova. Jedna od najvećih prednosti takve izrade je mogućnost proizvodnje željene duljine određenog komada lima. Prilikom montaže limenog pokrova potrebno je bušiti rupe na limu kako bi se pričvrstio za krovnu konstrukciju, a uz smanjenje komada limenih ploča smanjuje se i rizik od prodiranja vode, upravo je zato profilno savijanje vrlo učinkovit i koristan postupak savijanja lima.

### 3.2.3 Oštro kutno savijanje

Oštro kutno savijanje postupak je plastične deformacije kod kojeg je omjer radijusa alata i debljine lima vrlo mali, a nekada iznosi i samo 1. Oštro kutno savijanje tema je ovog rada te će se vrlo detaljno analizirati cjelokupan tijek procesa oštrog kutnog savijanja. Deformiranje se izvodi na savijačicama, odnosno na hidrauličnim prešama na koje se postavlja žig (alat za savijanje određenog radijusa koji djeluje silom deformiranja na materijal koji se oblikuje) i matrica (donji dio alata odgovarajućeg profila, na koji se materijal oslanja). Materijal se po čitavom presjeku deformira plastično te nastaje promjena poprečnog presjeka i debljine stjenke, pa se i neutralna linija premješta bliže unutarnjem radijusu.[2]



Slika 9. Savijačica za oštro kutno savijanje [10]

## 4. TEHNOLOŠKI PARAMETRI PRI OŠTROM KUTNOM SAVIJANJU

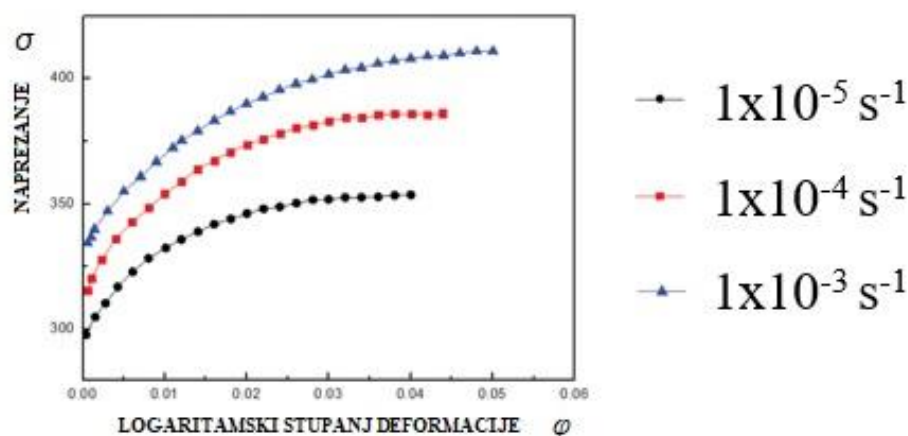
Tehnološki parametri imaju izravan utjecaj na sposobnost materijala da se deformira u oblik zadane geometrije. Zavisno od postupka deformacije i materijala obrade, izabire se skupina tehnoloških parametara koji će rezultirati pravilnim izvođenjem procesa.[2]

Tehnološki parametri kod oštrog kutnog savijanja: - brzina savijanja

- temperatura
- debljina materijala
- vrsta materijala
- kut savijanja
- sila savijanja

### 4.1 Brzina savijanja

Općenito vrijedi da s povećanjem brzine deformacije deformabilnost materijala opada, pa shodno tome, može se zaključiti da se pri sporim savijanjem materijala postižu veći stupnjevi deformacije bez nastanka loma materijala. Brzina deformiranja jedan je od ključnih parametara kod oštrog kutnog savijanja zato što su deformacije izrazito velike. Pravilnim se odabirom brzine savijanja mogu postići značajna poboljšanja procesa, odnosno može se postići savijanje vrlo oštarih kutova bez pogrešaka. Utjecaj brzine deformacije veći je kod toplog oblikovanja. [11]

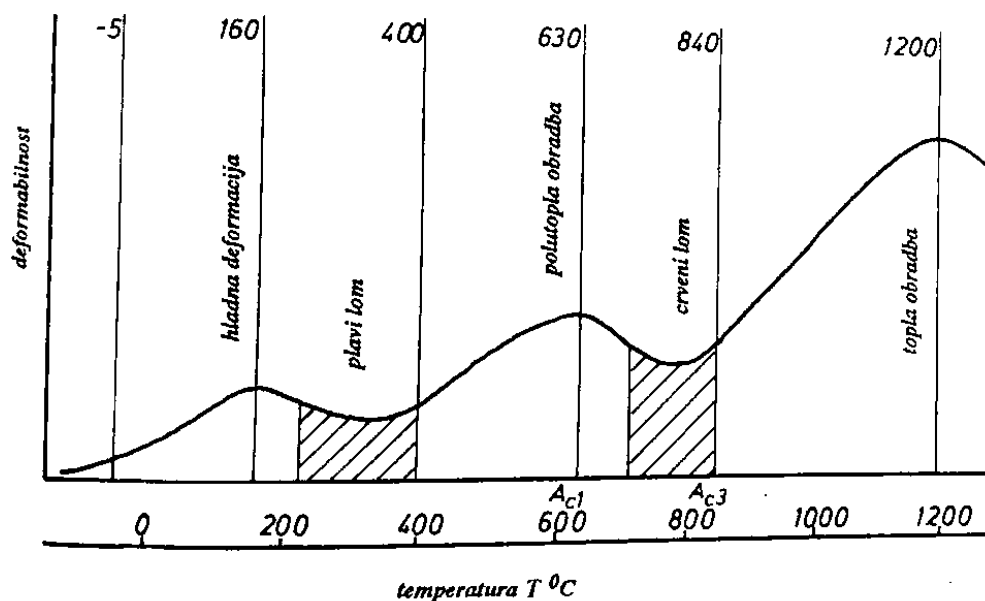


Slika 10. Dijagram utjecaja brzine deformacije na naprežanje kod čelika P92, pri 600°C [11]

Iz dijagrama je vidljivo da s povećanjem brzine deformacije raste naprežanje, što rezultira smanjenjem deformabilnosti. Što je viši iznos naprežanja, materijal je opterećeniji te je skloniji lomu. Pokus se izvodi na temperaturi od 600°C kako bi se lakše predočio utjecaj brzine deformacije koji je izraženiji pri toplom deformiranju materijala.

## 4.2 Temperatura

Porastom temperature deformabilnost materijala raste. Postupak deformiranja materijala provodi se u toplom i hladnom stanju. Temperatura znatno utječe na svojstva materijala, stoga čelični materijali zagrijani iznad temperature rekristalizacije značajno omekšavaju. Kod toplog oblikovanja moguće je postići znatno veće stupnjeve deformacije nego u hladnom stanju. Kod oštrog kutnog savijanja mogu se postići mnogo oštriji kutovi savijanja ukoliko se postupak provodi u toplom stanju, materijal će biti deformabilniji te će do pukotina doći mnogo kasnije nego kod deformacije u hladnom stanju.[11]

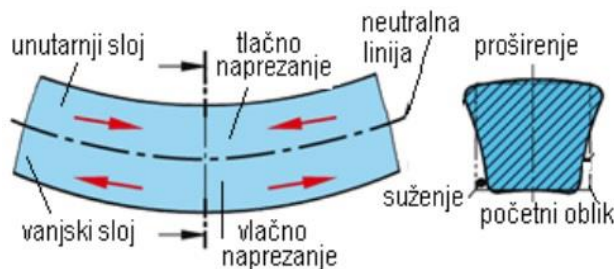


Slika 11. Dijagram ovisnosti deformabilnosti o temperaturi kod ugljičnog čelika [2]

Iz dijagrama je vidljivo da temperatura značajno mijenja deformabilnost običnog ugljičnog čelika. Različiti materijali pokazuju različita svojstva na povišenim temperaturama, tako i kod ugljičnog čelika vidimo dvije anomalije koje se pojavljuju kod toplog oblikovanja. Plavi i crveni lom područja su smanjene deformabilnosti, a imena su karakteristična za boju materijala na određenim temperaturama. Treba izbjegavati deformaciju u područjima smanjene deformabilnosti te obradu provoditi pri temperaturama oko 1200 °C gdje je deformabilnost najveća, kako se vidi u dijagramu.[11]

### 4.3 Debljina materijala

Vrlo značajan parametar kod oštrog kutnog savijanja je debljina materijala. Najviše grešaka u obliku pukotina i rubnih izobličenja događa se upravo kod materijala većih debljina. Omjer radijusa alata i debljine materijala je vrlo mali kod velikih debljina materijala, što znači da će vanjski radijus biti veći od unutarnjeg radijusa nakon procesa savijanja. Na vanjskom se dijelu javljaju velika vlačna naprezanja, što može rezultirati pojavom pukotina. Na unutarnjem radijusu prisutna su tlačna naprezanja, a zbog konstantnosti volumena materijal teče u stranu što za posljedicu daje rubna izobličenja. Kod tankih limova ovakve greške neće biti prisutne jer je razlika u unutarnjem i vanjskom radijusu mala, stoga su i iznosi vlačnih i tlačnih naprezanja manji.



Slika 12. Kutno savijanje lima [12]



Slika 13. Oštro kutno savijanje lima velike debljine [13]

Iz prethodne slike može se vidjeti kontrakcija poprečnog presjeka lima velike debljine prilikom oštrog kutnog savijanja. Vanjski radijus izložen je visokim iznosima vlačnih naprezanja koja su čest uzrok pukotina. Kod oblikovanja tako debelih limova uglavnom se vrši oblikovanje u toplom stanju.



#### 4.4 Vrsta materijala

Različiti materijali imaju različita svojstva deformabilnosti. Neki materijali, poput olova i čelika pri sobnoj temperaturi znatno su deformabilniji od aluminijskih i njegovih legura. Kako bi se dobila željena svojstva materijala, osnovni se materijal legira sa različitim elementima s ciljem postizanja traženih karakteristika deformabilnosti. Ako je riječ o čeliku sa kojim se najčešće susrećemo, onda je potrebno naglasiti da postoje tzv. redoviti pratioči, a to su: ugljik (C), silicij (Si), mangan (Mn), sumpor (S) i fosfor (P). Ostali najčešći legirni elementi su: krom (Cr), nikal (Ni), molibden (Mo), vanadij (V) i volfram (W).[2]

Utjecaj legirnih elemenata:

- Ugljik (C) – glavni legirni dodatak željezu, povećani sadržaj ugljika izaziva kod pojedinih vrsta čelika povećanu količinu karbida čime se povećava tvrdoća i čvrstoća na račun rastezljivosti, time se općenito može reći da povećanjem sadržaja ugljika deformabilnost čelika opada
- Silicij (Si) – u većim količinama povećava prokaljivost i otpornost oksidaciji, ali ujedno i pojačava tendenciju razugljičenja površine pri toplinskim obradama, značajno smanjuje deformabilnost ako se u leguri nalazi više od 5% silicija
- Mangan (Mn) – veće količine mangana povećavaju prokaljivost i otpornost na udarno trošenje, ali se deformabilnost time smanjuje
- Krom (Cr) – prisustvo kroma daje tvrde kromne karbide pa se time povećava prokaljivost i otpor na habanje, krom povećava antikoroziivnost, no deformabilnost opada povećanjem udjela kroma
- Nikal (Ni) – povećava otpornost udarnom opterećenju kod niskih temperatura, a u manjim količinama djeluje antikoroziivno, povećanjem udjela nikla, povećava se deformabilnost čelika
- Molibden (Mo) – stvara karbide i povećava otpornost na trošenje, povećava tvrdoću i čvrstoću, povećanjem udjela molibdena deformabilnost čelika se smanjuje
- Vanadij (V) – dodaje se čeliku u cilju usitnjenja zrna i nema direktni učinak na deformabilnost, povećava čvrstoću nehrđajućih čelika pri povišenim temperaturama
- Volfram (W) – daje vrlo tvrde karbide otporne na visokim temperaturama, povećanjem udjela volframa deformabilnost čelika se smanjuje
- Sumpor (S) i fosfor (P) – općenito se smatraju nečistoćama i formiraju sulfide i fosfate koji se smještaju na granicama kristalnih zrna i otežavaju deformaciju, kod toga sumpor izaziva krhkost kod povišenih temperatura a fosfor krhkost u hladnom stanju, to je temeljni razlog što količina jednog i drugog elementa ne smije zajedno biti veća od 0,07%. [2]

#### 4.5 Kut savijanja

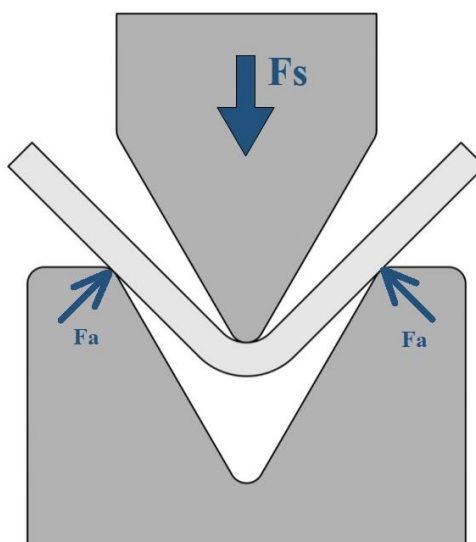
Kod oštrog kutnog savijanja vrlo je čest slučaj da se materijal savija i na kut manji od  $90^\circ$ . To predstavlja izazov u oblikovanju deformiranjem jer kada se materijal podvrgava toliko velikim stupnjevima deformacije najčešće dolazi do pucanja odnosno loma materijala. Kod povišenih temperatura materijal je deformabilniji te je moguće savijati i na kutove mnogo manje od  $90^\circ$  bez pojave pukotina. Limovi manjih debljina mogu se savijati na oštrije kutove nego deblji limovi zbog manjih vlačnih naprezanja na vanjskom radijusu.



Slika 14. Savijanje lima na kut manji od  $90^\circ$  [14]

#### 4.6 Sila savijanja

Sila savijanja  $F_s$  promjenjiva je tijekom trajanja procesa savijanja. Na početku je najmanja zbog velikog kraka savijanja, a zatim se povećava zbog elastične i plastične deformacije, nakon toga ponovno se smanjuje zbog klizanja materijala po rubovima matrice i konačno se na kraju povećava na najveću vrijednost zbog ispravljanja krakova lima. Analiza sila svodi se na analizu nosača na dva oslonca opterećenog u sredini koncentriranom silom. Detaljan proračun sile savijanja proveden je u sljedećim poglavljima ovog rada.[12]



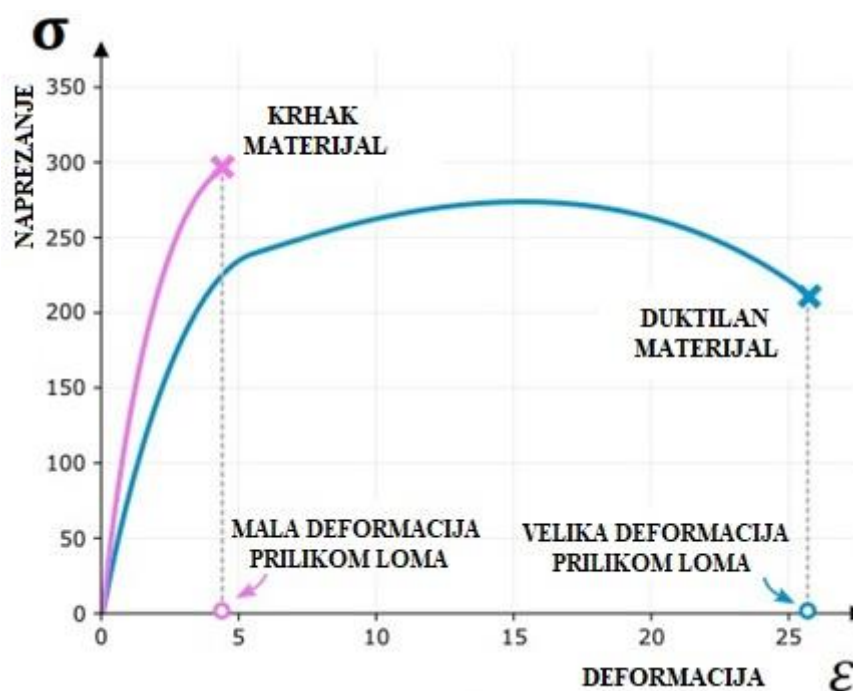
Slika 15. Jednostavna shema sile savijanja [15]

## 5. GREŠKE KOD OŠTROG KUTNOG SAVIJANJA

Oštro kutno savijanje podrazumijeva savijanje limova na kutove i manje od  $90^\circ$ . Kada se lim savija na takve kutove dolazi do velike deformacije materijala što rezultira pogreškama u tijeku procesa. Najčešće pogreške koje se javljaju su pukotine na vanjskom radijusu, rubna izobličenja materijala, rubne pukotine te ogrebotine uzrokovane matricom.

### 5.1 Pukotine na vanjskom radijusu

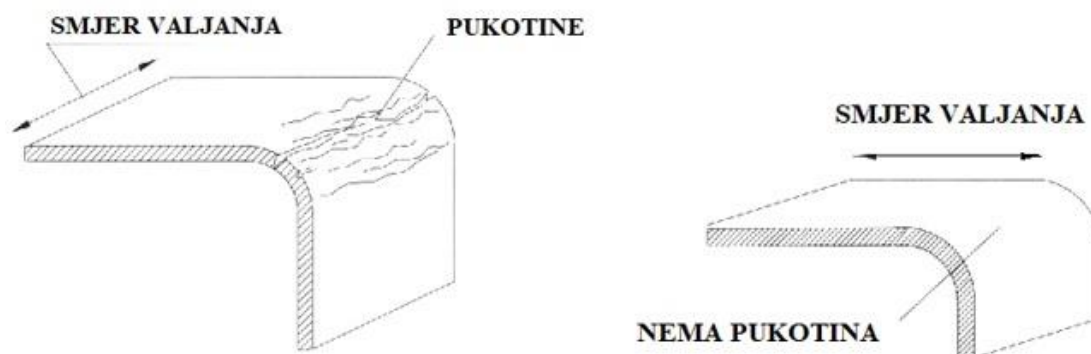
Kada se materijal savija pod ostrim kutom, naprezanje u materijalu nije ravnomjerno raspoređeno. Na unutarnjoj strani materijal je opterećen tlačno, dok je na vanjskom radijusu prisutno vlačno naprezanje. Kod oštrog kutnog savijanja vanjska strana mnogo je više vlačno opterećena kada se savija na oštre kutove nego kod savijanja s blagim kutom, tako da mora podnijeti i mnogo veće istežanje. Ukoliko naprezanje dostigne iznos vlačne čvrstoće, na vanjskoj strani će doći do pucanja materijala. Duktilnost materijala značajno utječe na pojavu pukotine, stoga će se materijali s visokom duktilnosti češće savijati bez pojave pukotina, dok će se kod manje duktilnih materijala, obično s većom tvrdoćom, pojavljivati pukotine tijekom oštrog kutnog savijanja.[16]



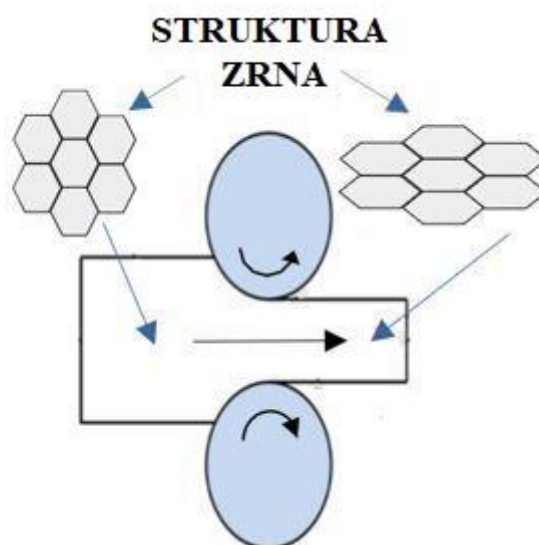
Slika 16. Dijagram usporedbe duktilnih i krhkih materijala [17]

Iz dijagrama je vidljivo da duktilni materijali (poput bakra, olova i zlata) mogu pretrpjeti mnogo veće iznose deformacija nego što je to slučaj kod krhkih materijala. Materijali niže duktilnosti najčešće su materijali visoke čvrstoće i tvrdoće poput visoko ugljičnog čelika, čelika u hladnom stanju te volframa. Kod takvih materijala lom nastupa već kod malih deformacija, stoga je potrebno mijenjati parametre obrade kako bi se postigli što veći stupnjevi deformacije. Primjerice, obradom u toplom stanju te sporijom deformacijom moguće je postići veće deformacije materijala niže duktilnosti.

Smjer valjanja materijala također utječe na nastanak pukotine tijekom procesa savijanja. Valjanje uzrokuje anizotropna svojstva materijala jer dolazi do izduženja zrna prilikom valjanja. To znači da se uzdužna i poprečna svojstva čelika razlikuju, odnosno da će se postići različiti rezultati nakon obrade materijala savijanjem. Pojava pukotine nastupiti će prije ako je linija savijanja paralelna sa smjerom valjanja (vidjeti sliku). Svojstva savijanja su bolja kada je linija savijanja okomita na smjer valjanja.[18]



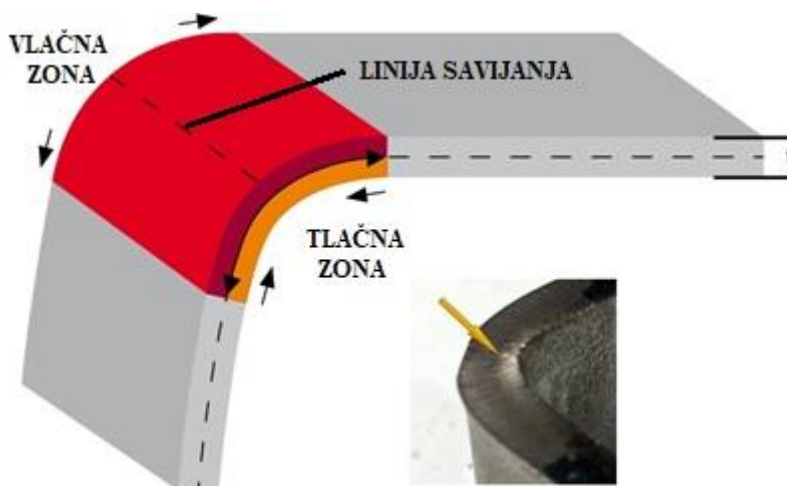
Slika 17. Utjecaj smjera valjanja na nastanak pukotine [19]



Slika 18. Struktura zrna prije i poslije valjanja [20]

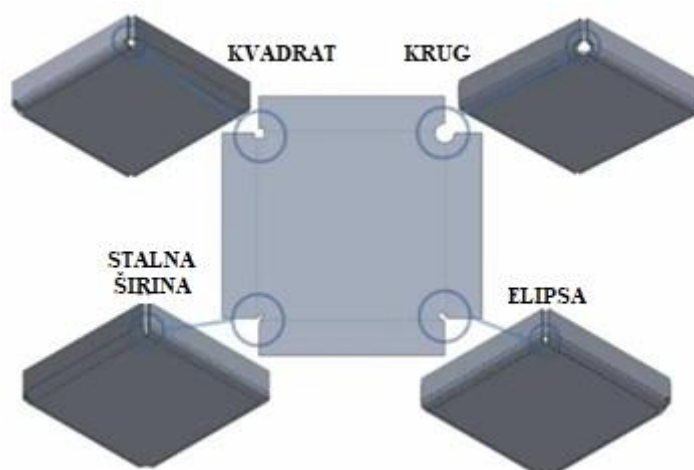
## 5.2 Rubna izobličenja materijala

Kod oštrog kutnog savijanja naprezanja su nejednako raspoređena na unutarnjoj i vanjskoj strani. Na vanjskoj je strani prisutno istezanje materijala, dok su na unutarnjoj strani materijala prisutna tlačna naprezanja. Prilikom savijanja na oštre kutove, unutarnja strana toliko je opterećena tlačno da materijal počne teći u smjeru najmanjeg otpora, odnosno prema rubovima. Tako se materijal nepoželjno deformira stvarajući rubna izobličenja u obliku trbuha na unutarnjem radijusu. Nadalje, oštri kutovi nepoželjni su kod oštrog kutnog savijanja jer su veliki koncentratori naprezanja što znači da pospješuju pojavu rubnih izobličenja. Ova će pogreška biti uočljivija kod debljih limova jer je istisnuta količina materijala mnogo veća nego kod tankih limova.



Slika 19. Nastanak rubnih izobličenja [21]

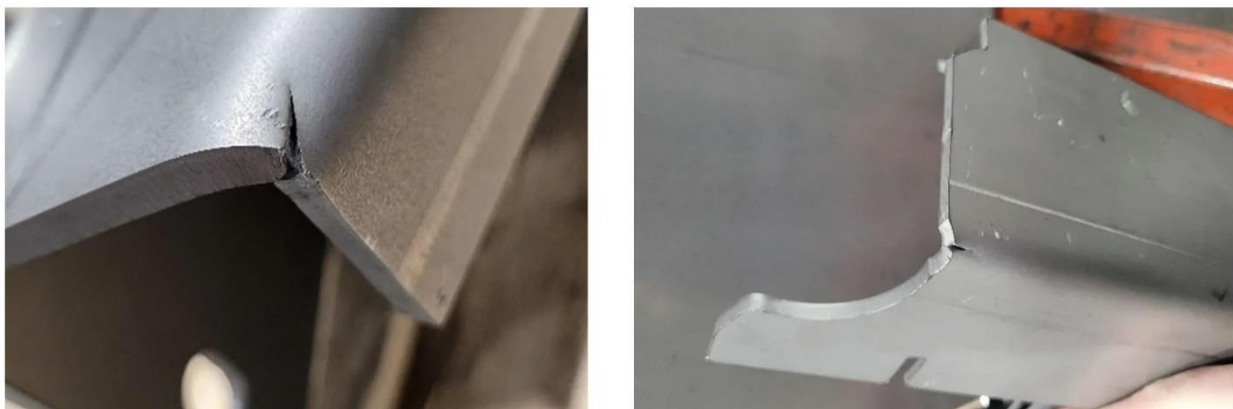
Nastanak rubnih izobličenja kod debelih limova teško se može izbjeći, ali veličina nabora ili trbuha može se smanjiti ukoliko se smanji brzina deformacije. Poboljšanje procesa postiže se različitom pripremom ruba na liniji savijanja. Izradom utora na mjestu savijanja omogućuje se materijalu tečenje u željenom smjeru i postizanje točne geometrije savijenog lima.



Slika 20. Mogući oblici utora [22]

### 5.3 Rubne pukotine

Rubne pukotine javljaju se na rubu vanjskog radijusa, a više faktora utječe na njihov nastanak. Materijali više tvrdoće imaju veću sklonost pucanju pri plastičnoj deformaciji, stoga će se kod njih javljati najviše problema s rubnim pukotinama. Kod svih materijala, ukoliko su konačne dimenzije lima proizvedene rezanjem na laseru, na rubovima dolazi do povećanja čvrstoće i tvrdoće zbog zone utjecaja topline. Upravo je to jedan od razloga nastanka rubnih pukotina jer se povećanjem tvrdoće i čvrstoće smanjuje duktilnost materijala. Kod limova velikih debljina prije će se pojaviti rubne pukotine u odnosu na tanke limove, jer je deformacija na vanjskom i unutarnjem radijusu mnogo neravnomjerna nego što je to slučaj kod tankih limova. [23]



Slika 21. Rubne pukotine [23]

### 5.4 Ogrobotine uzrokovane matricom

Ogrobotine mogu narušiti kvalitetu proizvoda te povećati koncentraciju naprezanja na mjestu nastanka istih. Nečistoće između lima i matrice mogu imati abrazivna svojstva te tako pospješiti nastanak ogrebotina. Nužno je imati čiste i dobro podmazane dijelove lima i matrice koji su u zahvatu kako bi se spriječio nastanak ogrebotina. Najčešći i najlakši način za sprječavanje nastanka ogrebotina su polimerne trake koje se lijepe na mjesta savijanja te sprječavaju izravni kontakt matrice i lima. Ovisno koji se materijal savija odabire se polimerna traka izrađena od odgovarajućeg polimera. [24]



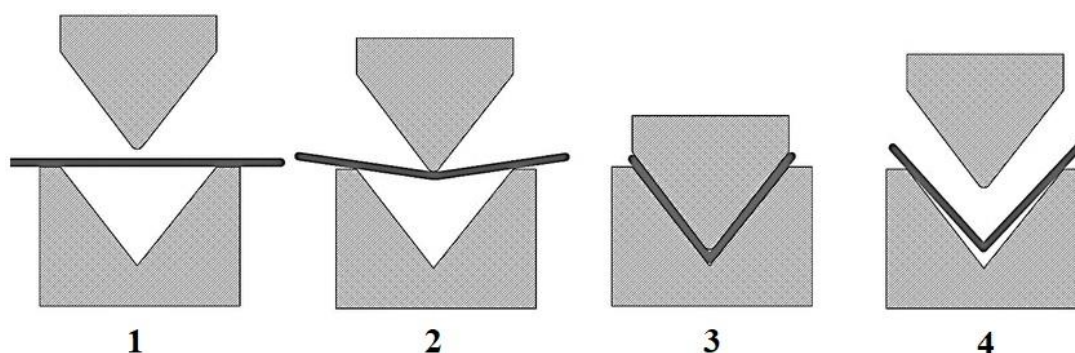
Slika 22. Ogrobotina uzrokovana matricom [24]

## 6. ELASTIČNI POVRAT MATERIJALA

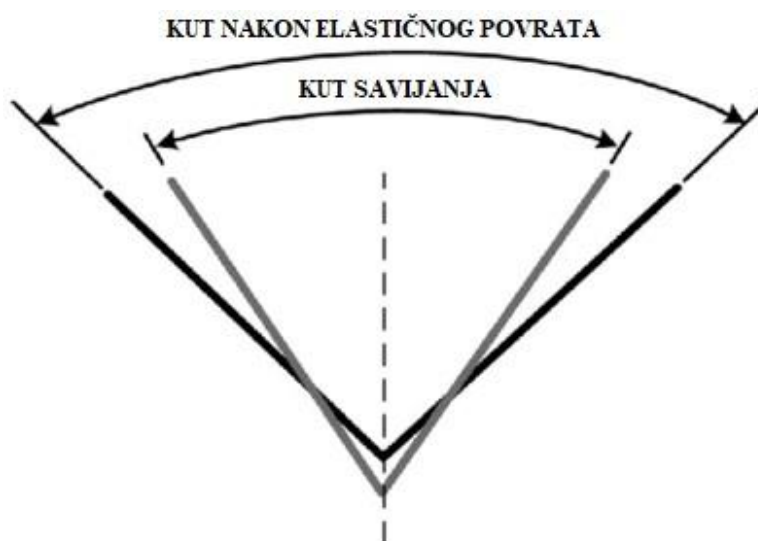
Metali imaju elastičnost i nakon savijanja imaju tendenciju vraćanja u svoj prvobitni položaj. Taj efekt naziva se elastični povrat materijala ili opružno vraćanje. Točan proces povezan je s tlačnom i vlačnom čvrstoćom metala. Nakon savijanja, lim je stisnut na unutrašnjoj strani, gdje je prisutno tlačno naprezanje, a rastegnut na vanjskoj strani, odnosno opterećen vlačno. Budući da materijal ima veću tlačnu čvrstoću od vlačne čvrstoće, vraća se prema svom izvornom obliku. U praksi, elastični povrat obično iznosi samo 1-2°. To se često može kompenzirati na hidrauličnim prešama jer mnogi dijelovi od limova ne zahtijevaju visoku razinu preciznosti. Najnoviji CNC strojevi za savijanje uključuju ugrađene senzore koji automatski kompenziraju povrat materijala kako bi se osigurala dosljedna izvedba. Gdje je potrebna visoka preciznost, elastični povrat može biti izazov jer je ponekad teško precizno izračunati koliko će iznositi. [25]

Na elastični povrat utječu sljedeći faktori:

- materijali s većom vlačnom čvrstoćom imaju veći povrat
- oštar radijus savijanja rezultira manjim povratom
- širi oslonci matrice uzrokuju veći povrat
- što je veći radijus savijanja u odnosu na debljinu materijala, to je veći povrat [25]



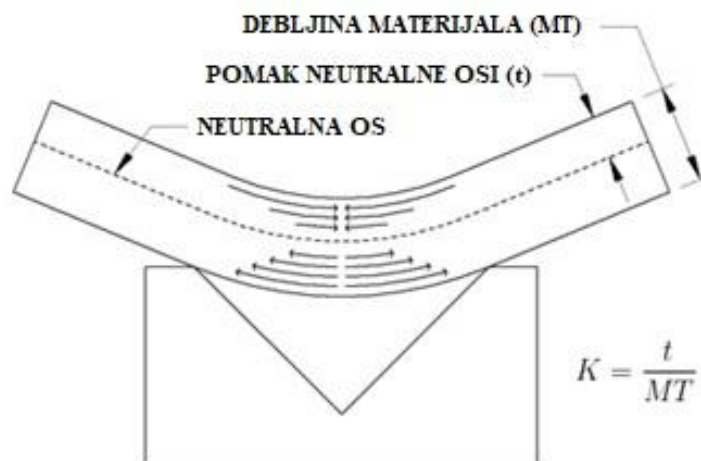
Slika 23. Nastanak elastičnog povrata [26]



Slika 24. Promjena kuta kod savijanja [27]

## 6.1 K-faktor

Proizvođači često koriste K-faktor za izračunavanje elastičnog povrata s ciljem postizanja preciznijih dimenzija i smanjenja odstupanja gdje je potrebna točnost. K-faktor u obradi limova je omjer neutralne osi i debljine materijala. Kada se metal savija, gornji dio se tlači, a donji dio se rasteže. Linija na kojoj dolazi do prijelaza između kompresije i rastezanja naziva se neutralna os. Položaj neutralne osi (linije) varira i temelji se na fizikalnim svojstvima materijala i njegovoj debljini. K-faktor je omjer pomaka neutralne osi ( $t$ ) i debljine materijala ( $MT$ ). Na slici ispod prikazano je kako se gornji dio tlači, a donji dio rasteže, te kako se pomiče neutralna linija s obzirom na postignutu deformaciju.[28]



Slika 25. K-faktor kod savijanja [28]

Tablica 1. Ovisnost K-faktora o materijalu [29]

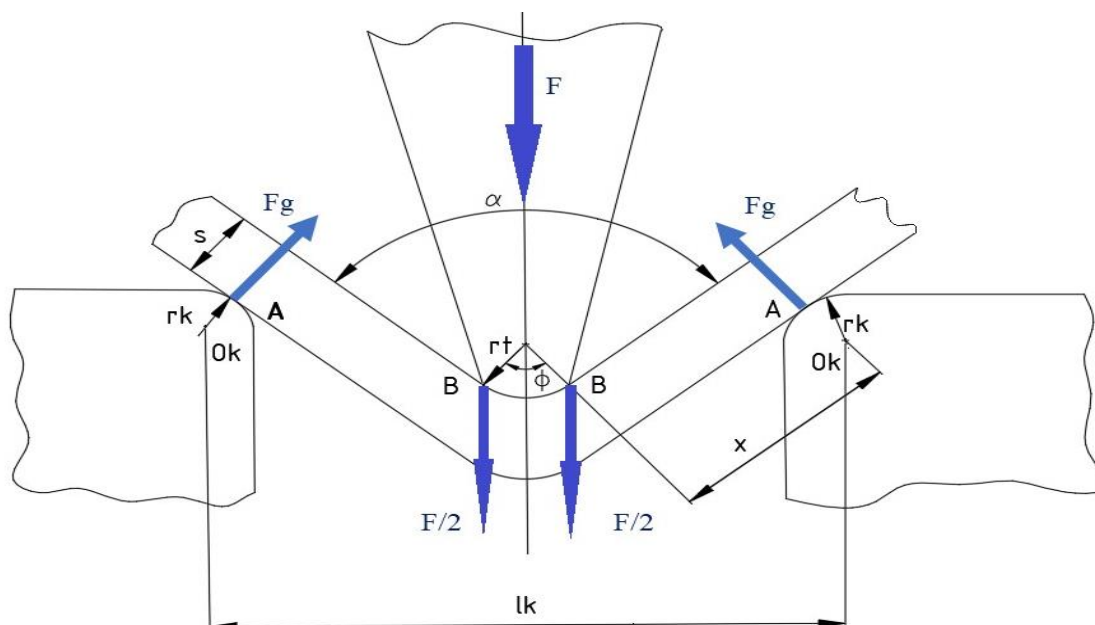
K-FAKTOR	ALUMINIJ		MEKI ČELIK
	Niska čvrstoća	Srednja čvrstoća	Visoka čvrstoća
<b>Savijanje bez kontakta s podlogom</b>			
0 – debljina materijala	0,33	0,38	0,40
Debljina m. – 3 x Debljina m.	0,40	0,43	0,45
Više od 3 x Debljina m.	0,50	0,50	0,50
<b>Savijanje uz kontaktom s podlogom</b>			
0 – debljina materijala	0,42	0,44	0,46
Debljina m. – 3 x Debljina m.	0,46	0,47	0,48
Više od 3 x Debljina m.	0,50	0,50	0,50



## 7. PRORAČUN OŠTROG KUTNOG SAVIJANJA

### 7.1 Analiza proračuna

Ovisno o konstrukciji radnih dijelova alata (žiga i matrice), oštro kutno savijanje može se tretirati kao problem slobodnog savijanja ili savijanja u kalupu. Lim se postavlja na matricu i savija na željeni kut  $\alpha$  pod pritiskom žiga. Analiza se svodi na poznatu analizu nosača na dva oslonca opterećenog u sredini koncentriranom silom.



Slika 26. Shema procesa savijanja [5]

U početnoj fazi savijanja razmak između oslonaca je  $(l_k - 2 r_k)$ , a sila žiga djeluje u sredini između oslonaca. Matrica za savijanje izvodi se tako da ima zaobljene prijelaze kako bi se spriječio nastanak ogrebotina koje uzrokuju koncentraciju naprezanja na savijenom limu. Profil matrice kod oštrog kutnog savijanja najčešće se izvodi s oštrim kutom. Karakteristika alata za savijanje je da je radijus žiga ( $r_t$ ) uvijek manji, ili u krajnjem slučaju jednak unutarnjem radijusu komada ( $r$ ). Prema tome, za slobodno savijanje vrijedi relacija:  $r \geq r_t$ . U starijoj se literaturi vrlo često matrica naziva kalup, zbog čega se u oznakama pojavljuje indeks „k“, dok se žig naziva tiskač te se upotrebljava indeks „t“.

Moment slobodnog savijanja u položaju  $r = r_t$ , prema slici 26. je: [5]

$$M = F_a * x \quad (1)$$

Iz slike se vidi da se krak savijanja može izračunati prema:

$$\frac{l_k}{2} = r_t * \sin \frac{\varphi}{2} + s * \sin \frac{\varphi}{2} + x * \cos \frac{\varphi}{2} + r_k * \sin \frac{\varphi}{2}$$

$$\frac{l_k}{2} = (r_t + r_t + s) * \sin \frac{\varphi}{2} + x * \cos \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

Odakle je:

$$x = \frac{\frac{l_k - l \cdot \sin \frac{\varphi}{2}}{2}}{\cos \frac{\varphi}{2}} \quad (3)$$

Gdje je:  $l_k$  – razmak između centara zaobljenja matrice (kalupa)

$$l = r_t + r_t + s \quad (4)$$

$\varphi$  – kut savijanja ( $\varphi = 180^\circ - \alpha$ )

Nadalje iz odnosa:

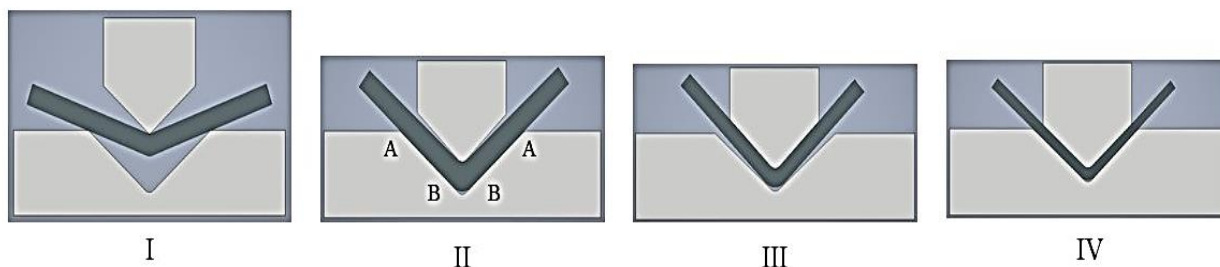
$$F_a = \frac{F}{2 \cdot \cos \frac{\varphi}{2}} \quad (5)$$

$$M = F_a \cdot x = \frac{F}{2 \cdot \cos \frac{\varphi}{2}} \cdot \frac{\frac{l_k - l \cdot \sin \frac{\varphi}{2}}{2}}{\cos \frac{\varphi}{2}} \quad (6)$$

Dobiva se sila slobodnog savijanja u obliku:

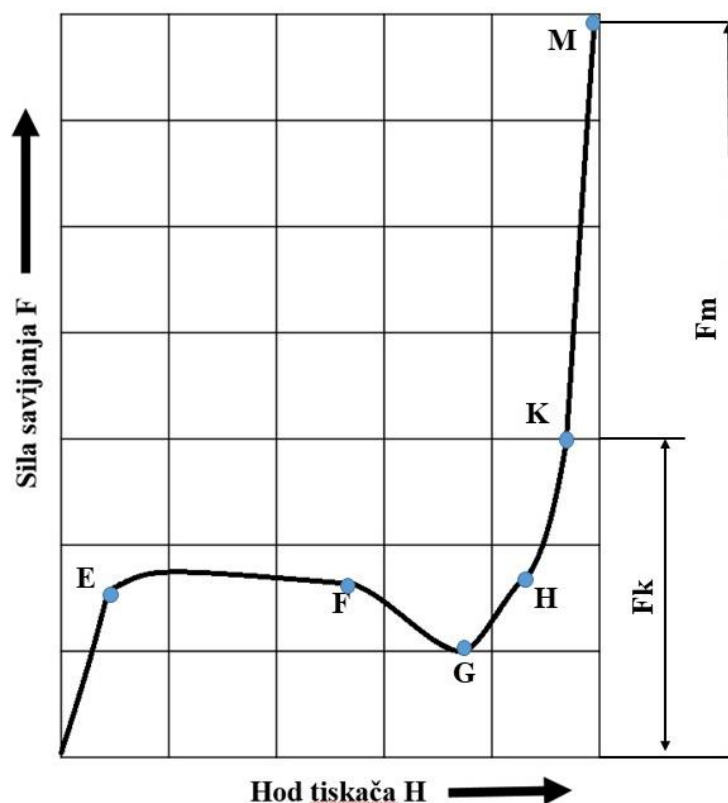
$$F = \frac{4 \cdot M}{l_k - 2 \cdot l \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \quad (7)$$

Žigovi se kod oštrog kutnog savijanja izvode sa oštrim konusnim oblikom da bi se mogli savijati komadi i pod kutom  $\alpha < 90^\circ$ . Kod savijanja preko malih radijusa treba težiti da se trenje između komada lima i radnih površina matrice svede na što je moguće manju mjeru. Prednost slobodnog savijanja je u tome što su alati univerzalnog karaktera. Na jednom alatu mogu se savijati komadi pod raznim kutovima, sa različitim mehaničkim svojstvima materijala i sa raznim debljinama. Oštro kutno savijanje u matrici vrši se alatom čije radne površine odgovaraju profilu matrice. Bočne površine žiga i matrice izvedene su pod kutom koji odgovara kutu savijenog komada, korigiranim za iznos kuta elastičnog povrata. Radijus žiga, koji odgovara unutarnjem radijusu komada, također se korigira zbog elastičnog povrata.



Slika 27. Faze savijanja u matrici

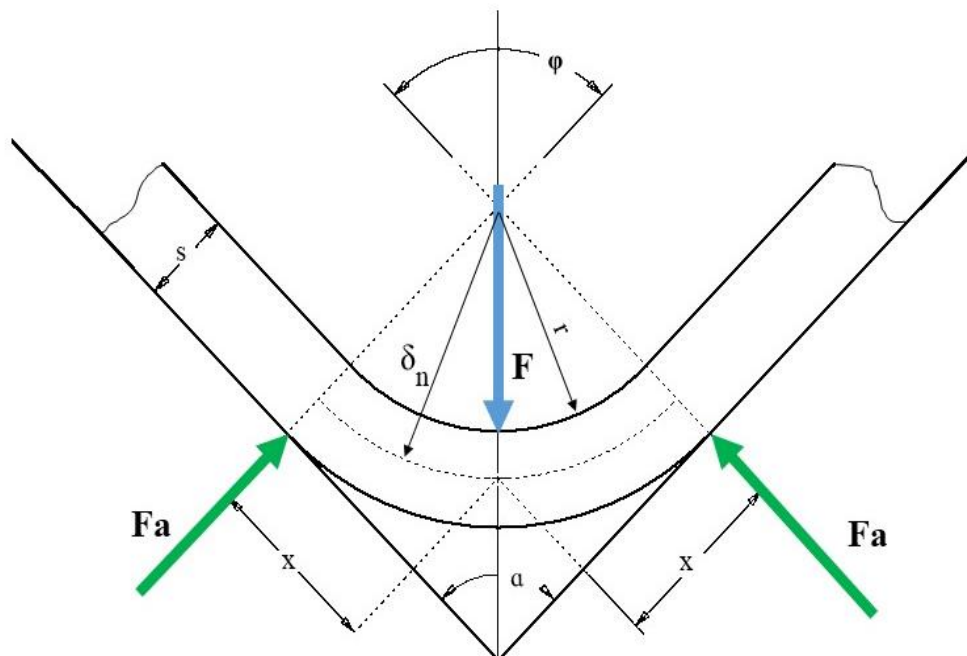
U toku procesa oštrog kutnog savijanja u matrici se mogu uočiti četiri faze savijanja (Slika 27.). U prvoj fazi (I) vrši se slobodno savijanje komada sve do trenutka dok ravni krakovi lima ne postanu paralelni sa bočnim stranicama matrice i ne nalegnu na matricu (faza – II). Do tog je trenutka razmak između oslonaca jednak širini otvora matrice, a radijus savijanja je veći od radijusa žiga ( $r > r_t$ ). U trenutku kada se ostvari kontakt između krakova komada i bočnih površina matrice, shema procesa se mijenja i razmak između oslonaca se naglo smanjuje, jer se mjesta dodira komada sa matricom premještaju iz točaka A u točke B. Savijanje komada do njegovog nalijeganja na bočne stranice matrice tretira se kao slobodno savijanje.



Slika 28. Tok sile savijanja [5]

Tok promjene sile savijanja u ovisnosti od hoda žiga odgovara fazama savijanja. Slobodno savijanje (interval OG) se sastoji iz dijela koji odgovara elastičnoj deformaciji (OE), zatim perioda u kojem je sila savijanja približno konstantna (interval EF, koji odgovara plastičnoj deformaciji slobodnog savijanja) i dijela kod kojeg dolazi do blagog pada toka sile savijanja uslijed klizanja komada po bočnim stranicama matrice (interval FG). Kod daljnjeg savijanja, razmak između oslonaca kao i unutarnji radijus komada se smanjuju. Istovremeno se smanjuje i kut između krakova komada, te se krakovi zakreću sve dok se sa svojim krajevima ne oslone na bočne stranice žiga (faza –III). Nakon toga srednji dio plastično deformiranog komada produžuje se savijanjem, a krakovi komada se ispravljaju. U tom periodu sila savijanja ponovno raste (interval GH). U konačnom trenutku deformacije, kada se ostvari kontakt između bočnih površina žiga, matrice i krakova komada po cijeloj njihovoj dužini, srednji dio plastično deformiranog komada se konačno oblikuje po radijusu žiga, a krakovi komada se ispravljaju sve do njihovog nalijeganja na bočne površine matrice (faza – IV). Iz ovog prikaza se može uočiti da u toku savijanja kut između krakova komada dva puta prima vrijednost kuta kalupa.

Prema navedenom, savijanje komada u matrici je završeno ako se realizira četvrta faza. Ukoliko se istovremeno vrši i kalibriranje komada, tada sila naglo raste (interval HM) tako da njena konačna vrijednost nekoliko puta premašuje vrijednost sile za čisto savijanje. Određivanje sile kod oštrog kutnog savijanja u matrici analitičkim putem vrlo je teško, s obzirom na to da se sila mijenja po fazama savijanja, uslijed toga što se mijenja krak savijanja.



Slika 29. Analiza sila savijanja

Moment savijanja prema slici 29:

$$M = F_a * x \quad (8)$$

Sila potrebna za deformaciju:

$$F = 2 * F_a * \cos \frac{\varphi}{2} \quad (9)$$

Odakle je vrijednost reakcije:

$$F_a = \frac{F}{2 * \cos \frac{\varphi}{2}} \quad (10)$$

Krak savijanja po A. Gelejiu:

$$x = \rho_n * \sin \frac{\varphi}{2} \quad (11)$$

Pa uvršteno slijedi:

$$M = \frac{F}{2 * \cos \frac{\varphi}{2}} * \rho_n * \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{F * \rho_n}{2} * \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (12)$$

Odakle je:

$$F = \frac{2 \cdot M}{\rho_n} * ctg \frac{\varphi}{2} \quad (13)$$

Za polumjer zakrivljenosti može se uzeti približna vrijednost (sa dovoljnom točnošću):

$$\rho_n \approx r_t + 0,5 * s \quad (14)$$

Dobiva se konačni izraz za silu kod oštrog kutnog savijanja:

$$F = \frac{2 \cdot M}{r_t + 0,5 * s} * ctg \frac{\varphi}{2} \quad (15)$$

Sila savijanja se kod primjene uređaja za držanje lima povećava na vrijednost:  $F_1 = 1,3 * F$ .

U četvrtoj fazi savijanja dolazi do potpunog nalijeganja krakova komada na matricu, tako da se vrši poravnavanje krakova i kalibriranje radijusa. Ovo kalibriranje ima za cilj da se smanji utjecaj elastičnog povrata materijala, što znači da fiksira kut i radijus savijanja. Sila u ovoj fazi procesa znatno raste. Krajnji donji položaj žiga ne smije prijeći silu  $F_k$  (Slika 28.), koja prema H. Makeltu iznosi:

$$F_k \leq F$$

Gdje je:  $F_k$  – sila kalibriranja krakova i radijusa komada

$F$  – sila čistog savijanja

Međutim, za kalibriranje, odnosno poravnavanje plastičnim sabijanjem materijala, potrebna je znatno veća sila. Ovisno o debljini materijala i kvaliteti komada, deformacija sabijanja kreće se u granicama 0,5 – 10%, ( $\varepsilon = 0,005 - 0,1$ ), tako da je debljina lima kalibriranog komada:

$$s_1 = s_0 * (1 - \varepsilon) \quad (16)$$

Gdje je:  $s_0$  – početna debljina lima

Kalibriranje plastičnim sabijanjem može se izvesti istovremeno sa operacijom savijanja, ili kao posebna operacija. Komadi manjih širina od tanjih limova ( $s_0 < 2-3$  mm) se kalibriraju istovremeno sa savijanjem, dok se deblji limovi ( $s_0 > 2-3$  mm) kalibriraju posebnim alatima, jer su za kalibriranje potrebne znatno veće sile (i jače preše) nego za savijanje. Kod kalibriranja sa plastičnim sabijanjem materijala, po debljini dolazi do znatnog hladnog očvršćivanja, čime se znatno smanjuju plastična svojstva materijala na savijenom dijelu. Efekt hladnog očvršćivanja raste sa povećanjem stupnja sabijanja, tako da može doći do loma komada pri montaži ili u njegovoj eksploataciji. Zbog toga nije preporučljivo operaciju kalibriranja izvoditi oštro profiliranim žigom, kojim bi se kalibrirao srednji dio savijenog, odnosno plastično deformiranog komada.

Sila žiga potrebna za kalibriranje krakova komada prema slici 29. iznosi:

$$F_2 = 2 * F_a * \cos \frac{\varphi}{2} \quad (17)$$

Gdje je:  $F_a$  – sila kalibriranja ravnog dijela kraka savijenog komada

Ako se označi sa:  $p \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$  – normalni specifični pritisak potreban za kalibriranje (tab. 3.)

$b [mm]$  – širina komada

$c [mm]$  – dužina ravnog dijela kraka, koja prema slici 30. iznosi:

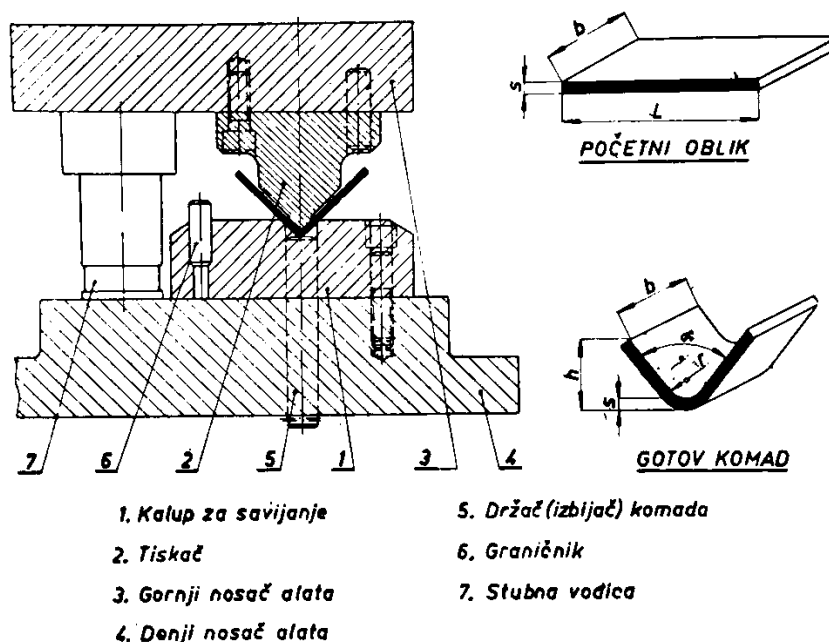
$$c = \frac{h-s-r*(1-\cos\frac{\varphi}{2})}{\sin\frac{\varphi}{2}} \quad (18)$$

Tada je:

$$F_a = p * b * c \quad (19)$$

Te je ukupno potrebna sila kalibriranja jednaka:

$$F_2 = 2 * p * b * c * \cos\frac{\varphi}{2} \quad (20)$$

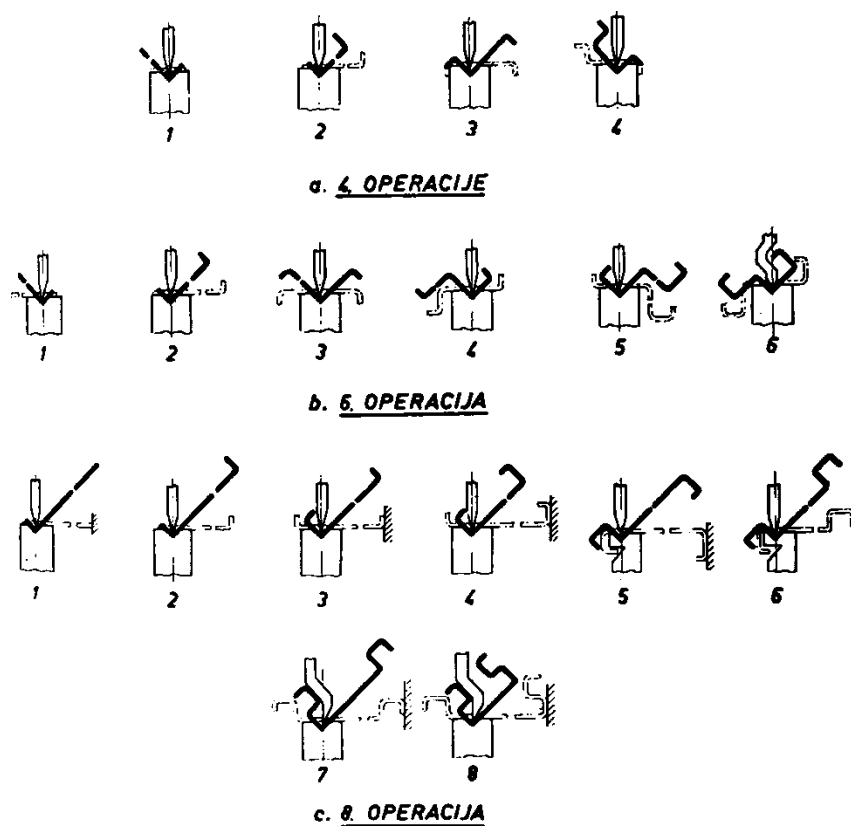


Slika 30. Alat za oštro kutno savijanje [5]

Tablica 2. Specifični pritisak  $p [N/mm^2]$  za poravnavanje komada pri savijanju [5]

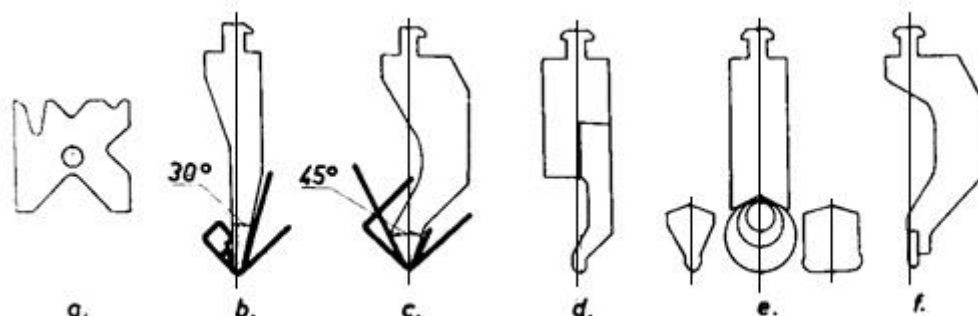
DEBLJINA LIMA $s [mm]$	MATERIJAL			
	ALUMINIJ	MESING	ČELIK SA (0,1-0,2)% C	ČELIK SA (0,25-0,35)% C
do 3	30 do 40	60 do 80	80 do 100	100 do 120
3 do 10	50 do 60	80 do 100	100 do 120	120 do 150

S obzirom da je za kalibriranje potrebna nekoliko puta veća sila nego za savijanje, operacija kalibriranja sa plastičnim sabijanjem primjenjuje se u posebnim slučajevima, kada se zahtjeva izuzetna točnost komada. Preporučljivo je operaciju kalibriranja izvoditi na hidrauličnim prešama, jer se kod njih razvija sila koja ne ovisi o promjenjivoj debljini materijala.



Slika 31. Izrada složenih komada oštrim kutnim savijanjem [5]

Postupnim operacijama na alatima za oštro kutno savijanje mogu se obrađivati i relativno složeni komadi. Veliki značaj ima pravilan izbor tehnološkog redoslijeda pojedinih faza savijanja. U maloserijskoj proizvodnji primjenjuju se univerzalni alati za savijanje. Tipična konstrukcija četverostrane univerzalne matrice prikazana je na slici 32. Na svakoj strani matrice izrađena je jedna ili više gravura prema obliku radnog komada. Profili žiga također se biraju u zavisnosti od oblika obrađivanog komada.[5]



Slika 32. Univerzalni alati za savijanje [5]

## 7.2 Određivanje sile savijanja na konkretnom primjeru

Zadatak 1:

Odrediti silu savijanja komada prema slici 30., ako je zadano:

$$b = 400 \text{ mm}$$

$$s = 2 \text{ mm}$$

$$\alpha = 120^\circ$$

$$h = 25 \text{ mm}$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

$$r_t = 4 \text{ mm}$$

$$n = 1,8$$

$$\text{Materijal: Al 99,5} - \sigma_m = 70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Sila savijanja iznosi:

$$F = \frac{2 * M}{r_t + 0,5 * s} * \text{ctg} \frac{\varphi}{2}$$

$$M = n * \sigma_m * \frac{b * s^2}{4} = 1,8 * 70 * \frac{400 * 2^2}{4} = 50\,400 \text{ Nmm}$$

$$\varphi = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$$

$$F = \frac{2 * 50\,400}{4 + 0,5 * 2} * 1,732 = 35\,000 \text{ N} = 35 \text{ kN}$$

$$F_k \approx 2 * F = 2 * 35 = 70 \text{ kN}$$

Sila savijanja i izbacivanja:

$$F_1 = 1,3 * F = 1,3 * 35 = 45,5 \text{ kN}$$

Sila potrebna za kalibriranje sa plastičnim sabijanjem materijala:

$$F_2 = 2 * p * b * c * \cos \frac{\varphi}{2}$$

$$c = \frac{h - s - r * (1 - \cos \frac{\varphi}{2})}{\sin \frac{\varphi}{2}} = \frac{25 - 2 - 4 * (1 - 0,866)}{0,5} = 49,9 \text{ mm}$$

$$F_2 = 2 * 30 * 400 * 49,9 * 0,866 = 935\,000 \text{ N} = 935 \text{ kN}$$



Zadatak 2:

Određiti silu savijanja komada prema slici 30., ako je zadano:

$$b = 400 \text{ mm}$$

$$s = 2 \text{ mm}$$

$$\alpha = 120^\circ$$

$$h = 25 \text{ mm}$$

$$r = 4 \text{ mm}$$

$$r_t = 4 \text{ mm}$$

$$n = 1,8$$

$$\text{Materijal: S235 JR (}\check{\text{C. 0361)} - \sigma_m = 370 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Sila savijanja iznosi:

$$F = \frac{2 * M}{r_t + 0,5 * s} * \text{ctg} \frac{\varphi}{2}$$

$$M = n * \sigma_m * \frac{b * s^2}{4} = 1,8 * 370 * \frac{400 * 2^2}{4} = 270\,000 \text{ Nmm}$$

$$\varphi = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$$

$$F = \frac{2 * 270\,000}{4 + 0,5 * 2} * 1,732 = 190\,000 \text{ N} = 190 \text{ kN}$$

$$F_k \approx 2 * F = 2 * 190 = 380 \text{ kN}$$

Sila savijanja i izbacivanja:

$$F_1 = 1,3 * F = 1,3 * 190 = 247 \text{ kN}$$

Sila potrebna za kalibriranje sa plastičnim sabijanjem materijala:

$$F_2 = 2 * p * b * c * \cos \frac{\varphi}{2}$$

$$c = \frac{h - s - r * (1 - \cos \frac{\varphi}{2})}{\sin \frac{\varphi}{2}} = \frac{25 - 2 - 4 * (1 - 0,866)}{0,5} = 49,9 \text{ mm}$$

$$F_2 = 2 * 80 * 400 * 49,9 * 0,866 = 2\,500\,000 \text{ N} = 2\,500 \text{ kN}$$

Iz priloženih proračuna savijanja može se primijetiti značajan utjecaj vlačne čvrstoće materijala na konačan iznos sile savijanja. Materijali sa visokim iznosima vlačne čvrstoće zahtijevaju i veće sile savijanja prilikom obrade. Nakon obrade, na mjestima savijanja dolazi do očvršćivanja materijala. Na tim je mjestima materijal skloniji pucanju u eksploatacijskim uvjetima.

## 8. SAVIJANJE LIMOVA U PODUZEĆU „HIDRAULIKA KURELJA“

### 8.1 Opis poduzeća

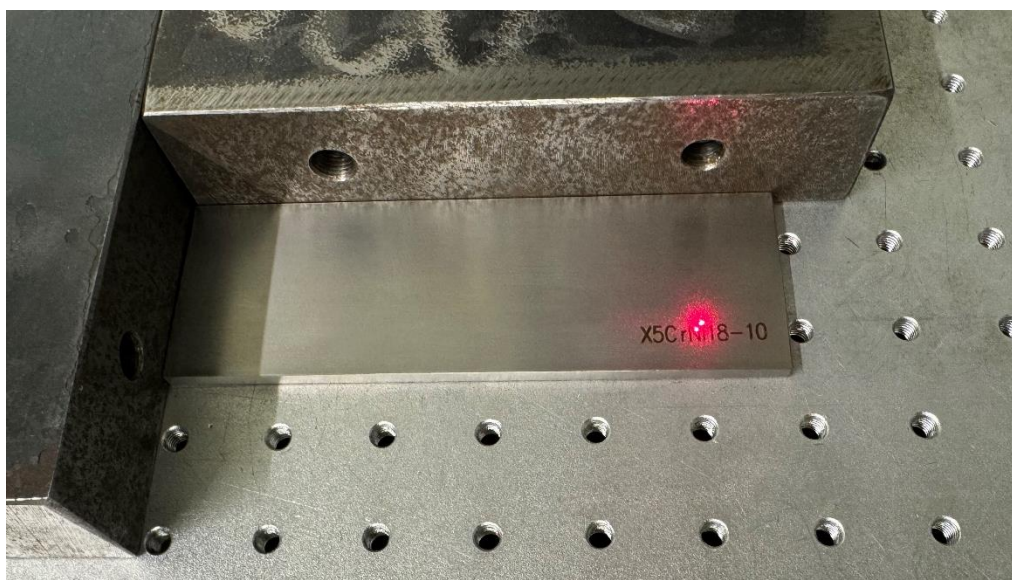
Poduzeće Hidraulika Kurelja d.o.o. bavi se proizvodnjom i servisiranjem hidrauličnih konstrukcija i opreme. Poduzeće se bavi razvojem i konstrukcijom širokog programa proizvoda, koji služe za rad u elektroprivredi, gradnji i održavanju cesta, željeznici, vodoprivredi, šumarstvu, naftnoj industriji i prijevozu. Tvrtka posjeduje CNC stroj za kutno savijanje limova „Bystronic Xpert 400/6200“. Na spomenutom stroju savijati će se pripremljeni komadi lima različitih debljina i različitih materijala kako bi se prikazao utjecaj parametara obrade na dobivene rezultate oštrog kutnog savijanja limova.[30]

### 8.2 Priprema komada za savijanje

Prije samog savijanja materijala na CNC savijačici, metalne pločice različitih materijala i debljina prvo su ispolirane te prema materijalu označene gravurom na CNC laseru.



Slika 33. Poliranje početnog komada lima



Slika 34. Graviranje oznake materijala

### 8.3 Materijali i dimenzije pripremljenih pločica za savijanje

Kako bi se zornije prikazale razlike u svojstvima deformabilnosti materijala, obrađivat će se tri različita materijala različitih debljina. Odabrani materijali za oštro kutno savijanje na CNC savijačici su konstrukcijski čelik, aluminij i nehrđajući čelik, a njihove oznake i svojstva bit će prikazani u tablici 4.

Tablica 3. Svojstva materijala

MATERIJAL	DULJINA [mm]	ŠIRINA [mm]	DEBLJINA[mm]	$\sigma_m N/mm^2$
S235JR	150	50	5	370
	150	50	10	
X5CrNi18-10	150	50	5	600
	150	50	10	
AlMgSi1	150	50	6	70
	150	50	10	

Navedeni materijali različitih svojstava pokazivat će svojstvene deformacije tijekom procesa oblikovanja. Vlačna čvrstoća znatno će mijenjati silu savijanja navedenih materijala. Materijali veće vlačne čvrstoće zahtijevat će veću silu tijekom savijanja.

#### 8.4 CNC savijačica „Bystronic Xpert 400/6200“

„Bystronic Xpert 400/6200“ je visoko precizan stroj za savijanje metala koji se koristi u industriji obrade limova. Bystronic je renomirani proizvođač opreme za obradu metala, a njihov Xpert 400/6200 model je specijaliziran za visokokvalitetno savijanje metalnih limova i nudi mnoge napredne funkcije koje poboljšavaju produktivnost, preciznost i fleksibilnost u radu. Navedeni je stroj idealan za primjenu u industrijama kao što su automobilska, zrakoplovna, građevinska, i proizvodnja metalnih komponenti, jer nudi visokokvalitetne rezultate uz minimalno vrijeme postavljanja i maksimalnu fleksibilnost. Xpert 400/6200 odnosi se na stroj s kapacitetom savijanja od 400 tona i maksimalnom dužinom stola od 6200 mm. To znači da navedeni stroj može savijati limove velike debljine i širine, što ga čini pogodnim za različite industrijske zahtjeve.



**Slika 35. CNC savijačica „Bystronic Xpert 400-6200“**

Navedeni stroj opremljen je sigurnosnim laserima. Ukoliko laseri detektiraju strano tijelo u radnom prostoru stroja, na primjer ruku operatera, posmak alata automatski se zaustavlja.



**Slika 36. Laser za detekciju stranog tijela**

## 8.5 Savijanje pripremljenih komada na CNC savijačici

U poduzeću Hidraulika Kurelja savijaju se pripremljeni komadi koji će pokazati različite karakteristike deformacije u stvarnim tehnološkim uvjetima. Savijanje će se provoditi za već navedene materijale dimenzija danih u tablici 4. Svaki materijal savijati će se četiri puta te će se usporediti dobiveni rezultati. Savijanje će se provoditi redom od materijala manje debljine, konstrukcijski i nehrđajući čelik debljine 5 mm, te aluminij debljine 6 mm. Nakon toga, provesti će se savijanje istih materijala debljine 10 mm.

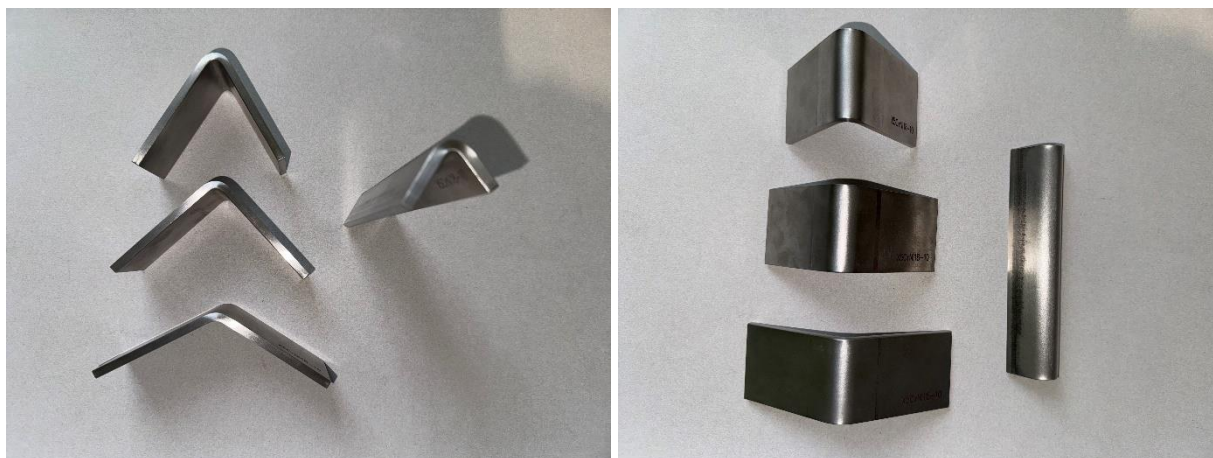
Savijanje materijala biti će obrađeno na način da će biti navedeni materijali i njihove debljine, te sile i brzine obrade. Sila savijanja ovisi o materijalu, stoga će različiti materijali zahtijevati različite sile obrade. Silu savijanja, kao i brzinu žiga, računa CNC savijačica ovisno o unesenom materijalu i zadanim parametrima. Iznos sile savijanja biti će maksimalno potreban za deformaciju zadanog materijala neovisno o kutu savijanja. Shodno tome, računalo također određuje brzinu žiga koja iznosi 10 mm/s za sve obrade. Sveukupno je provedeno savijanje 24 komada lima, a u nastavku će se prikazati 6 vrsta savijanja ovisno o debljini i vrsti materijala.

### 8.5.1 1. savijanje

Materijal: X5CrNi18-10 (5 mm) – nehrđajući čelik (inox)

Kut savijanja (poprečno):  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$  – F = 28 kN

Kut savijanja (uzdužno):  $\alpha = 60^\circ$  – F = 84 kN



Slika 37. Savijeni komadi - X5CrNi18-10\_1

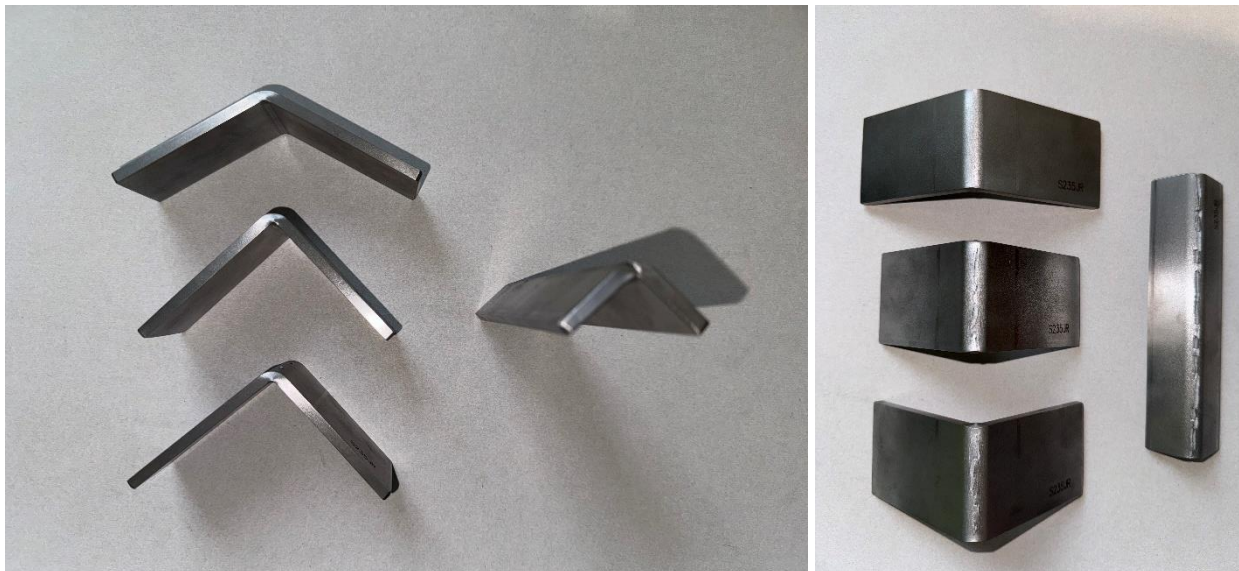
Nehrđajući čelik odnosno „inox“ vrlo je žilav materijal, te na njemu nema naznaka pukotinama pri većim stupnjevima deformacije. Greške koje se mogu primijetiti nakon oblikovanja su ogrebotine uzrokovane matricom, te minimalna rubna izobličenja materijala.

### 8.5.2 2. savijanje

Materijal: S235JR (5 mm) – konstrukcijski čelik

Kut savijanja (poprečno):  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ + korekcija - F = 18 \text{ kN}$

Kut savijanja (uzdužno):  $\alpha = 90^\circ - F = 54 \text{ kN}$



**Slika 38. Savijeni komadi - S235JR**

Konstrukcijski čelik manje je žilav materijal od inox-a, stoga neće moći pretrpjeti jednake stupnjeve deformacije. Greške koje se javljaju tijekom postupka savijanja su pukotine na vanjskom radijusu. Kod kutova većih od  $120^\circ$  nema nastanka pukotina, dok se pri oštrijim kutovima pukotine pojavljuju.



**Slika 39. Savijanje S235JR na CNC savijačici**

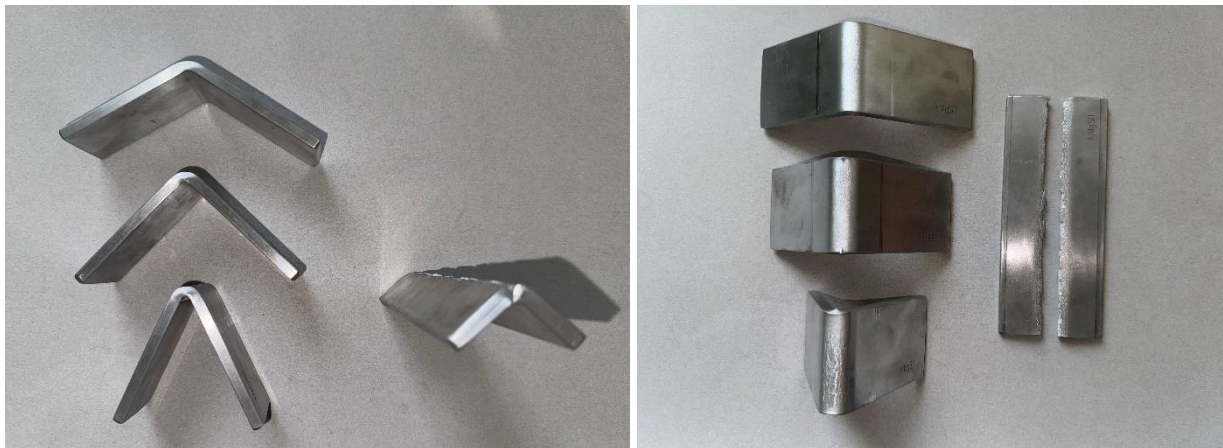
Slika 39. prikazuje obradu materijala S235JR na CNC savijačici, s lijeve strane prikazan je komad lima prije zahvata, dok je na desnoj slici komad u zahvatu, odnosno u toku oblikovanja savijanjem.

### 8.5.3 3. savijanje

Materijal: AlMgSi1 (6 mm) – aluminij

Kut savijanja (poprečno):  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$  – F = 18 kN

Kut savijanja (uzdužno):  $\alpha = 90^\circ$  – F = 55 kN



**Slika 40. Savijeni komadi - AlMgSi1**

Materijal AlMgSi1 je aluminijska legura povišene čvrstoće, te kao takav nije duktilan kao čisti aluminij. Navedeni materijal, pri većim debljinama sklon je pucanju, odnosno nastanku pukotine kod oštrog kutnog savijanja. Već i kod manjih stupnjeva deformacije pojavljuju se pukotine na vanjskom radijusu, a pri oštrijim kutovima te su pukotine vrlo izražene. Kod poprečnog savijanja navedenog materijala na kut od  $90^\circ$ , nastaju pukotine ali nisu vrlo duboke. Kod uzdužnog savijanja istog materijala na isti kut, dolazi do loma materijala te se može zaključiti u kojem je smjeru valjan materijal s obzirom da u jednom smjeru pukotina gotovo pa i nema, a u drugom smjeru nastaje lom materijala. Od ostalih grešaka primjećuju se ogrebotine nastale na matrici te u manjoj mjeri rubna izobličenja.

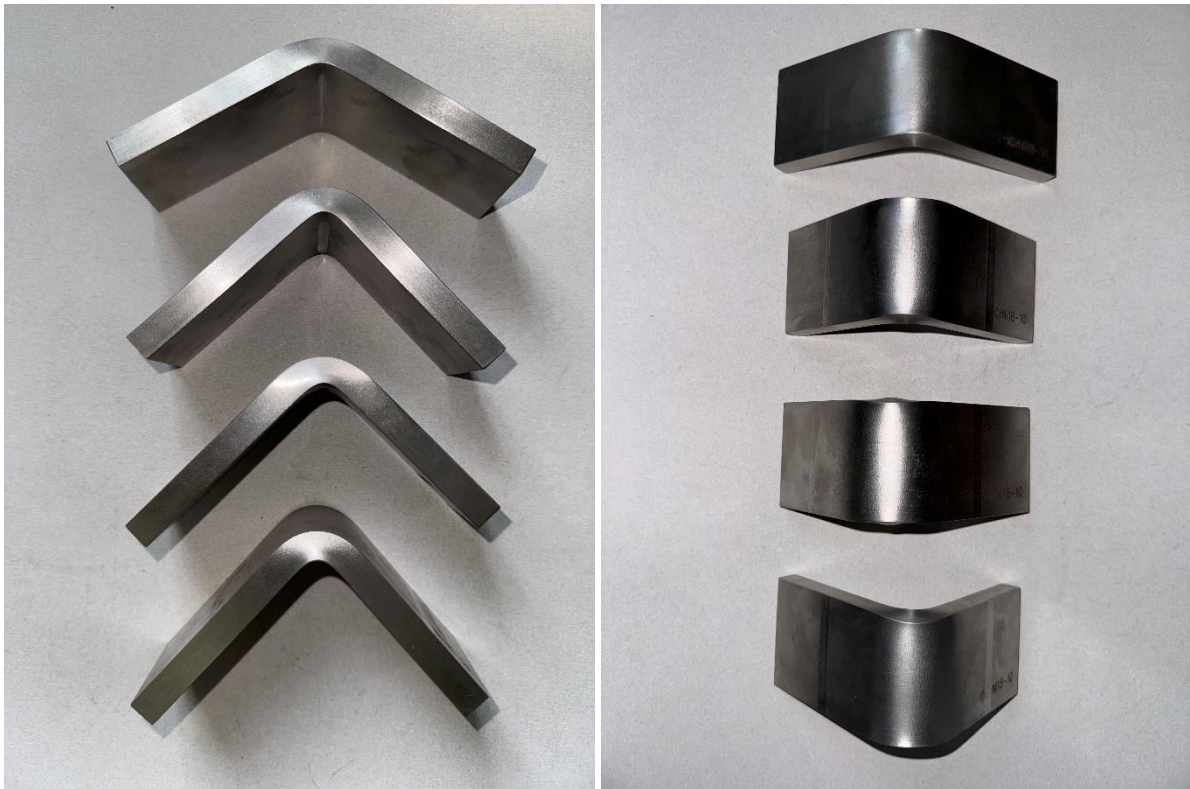


**Slika 41. Uzdužno savijanje aluminija - AlMgSi1**

#### 8.5.4 4. savijanje

Materijal: X5CrNi18-10 (10 mm) – nehrđajući čelik (inox)

Kut savijanja (poprečno):  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ + \text{korekcija}$ ,  $\alpha = 80^\circ - \underline{F = 56 \text{ kN}}$



**Slika 42. Savijeni komadi - X5CrNi18-10\_10mm**

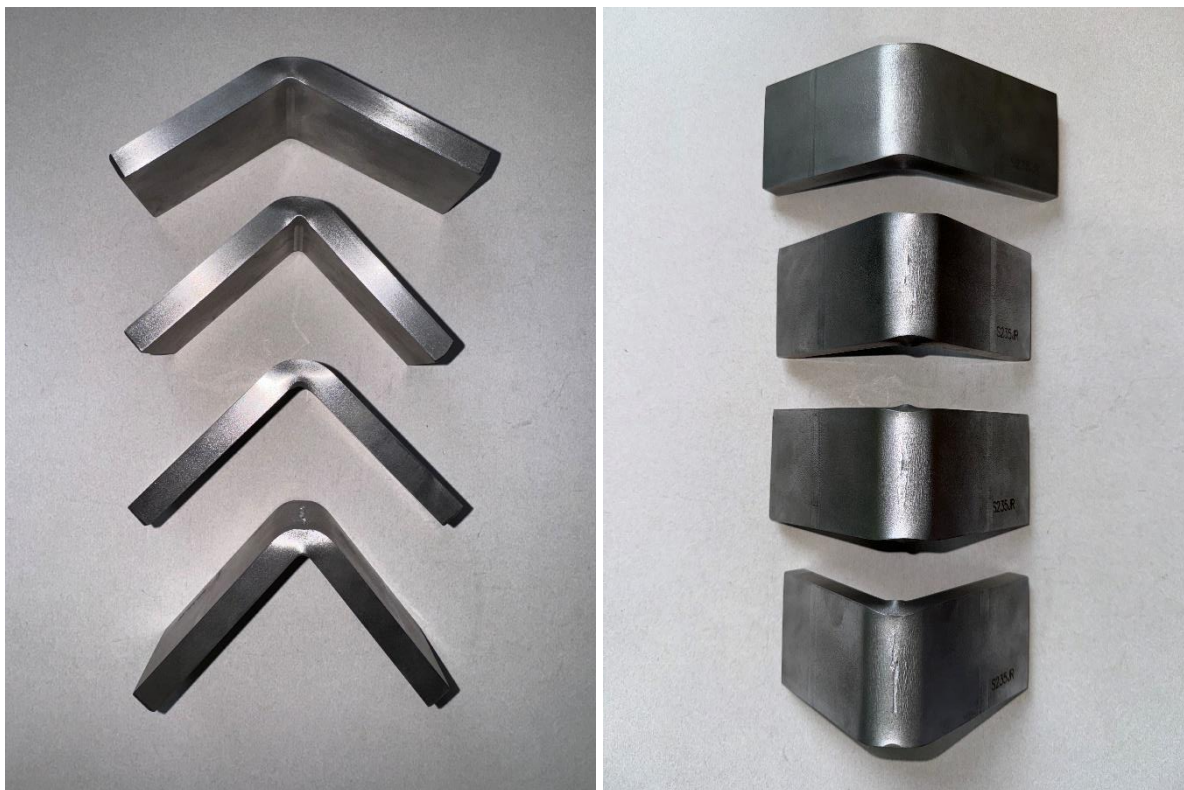
Kako je već spomenuto da je navedeni nehrđajući čelik izrazito velike žilavosti i čvrstoće, deformacije nisu uzrokovale velike greške na savijenom komadu. Mogu se primijetiti manja bočna izobličenja, dok pukotina nema niti kod savijanja na kut od  $80^\circ$ . Zbog veće sile djelovanja žiga te zbog veće debljine materijala, javljaju se izraženije ogrebotine na materijalu kao posljedica klizanja i utiskivanja materijala o matricu.



### 8.5.5 5. savijanje

Materijal: S235JR (10 mm) – konstrukcijski čelik

Kut savijanja (poprečno):  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ + \text{korekcija}$ ,  $\alpha = 80^\circ - \underline{F = 36 \text{ kN}}$



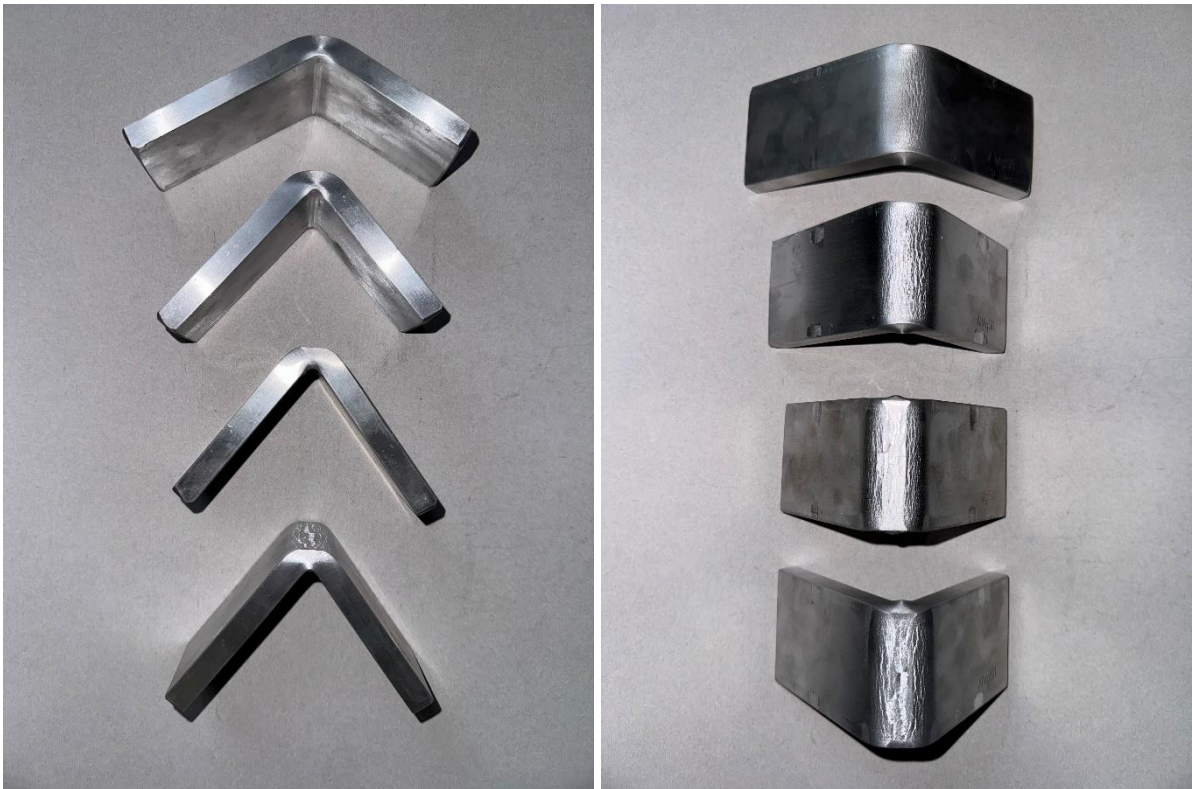
Slika 43. Savijeni komadi - S235JR\_10mm

Konstrukcijski čelik S235JR manje je žilavosti i čvrstoće od prethodno deformiranog nehrđajućeg čelika. Shodno tome pri jednakim deformacijama pojaviti će se greške koje na nehrđajućem čeliku nisu bile pojava. Pri kutu od  $120^\circ$  nema vidljivih pukotina na vanjskom radijusu, ali se na dodir može osjetiti različita tekstura materijala u odnosu na ostala područja. Pri oštrijim kutovima dolazi do pukotina na vanjskom radijusu. Rubna izobličenja najizrazitija su upravo kod deformiranja konstrukcijskog čelika.

### 8.5.6 6. savijanje

Materijal: AlMgSi1 (10 mm) – aluminij

Kut savijanja (poprečno):  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\alpha = 80^\circ$ ,  $\alpha = 77,5^\circ$ ,  $\alpha = 75^\circ$  –  $F = 26 \text{ KN}$



Slika 44. Savijeni komadi - AlMgSi1\_10mm

Već spomenuta, relativno loša svojstva duktilnosti materijala AlMgSi1 rezultirati će vrlo brzo pojavom pukotina kod debljih komada pri manjim stupnjevima deformacije. Pukotine se mogu vidjeti već i kod kutova savijanja oko  $120^\circ$ . Kod oštrijih kutova dolazi do vrlo velikih i dubokih pukotina što nam govori da navedeni materijal nije pogodan za velike deformacije, jer će vrlo brzo biti prisutne neželjene greške i nepravilnosti. Navedeni se materijal zbog svoje visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju često koristi u građevinskoj i automobilskoj industriji, dok će savijanje bolje podnositi čisti aluminij. Ogrebotine koje nastaju pri oslanjanju na matricu najizraženije su upravo kod materijala AlMgSi1 jer je najmekši od svih ispitanih materijala. Kod oslanjanja na matricu, zbog djelovanja sile velikog iznosa, ne nastaju samo ogrebotine, već nastaju vrlo primjetna udubljenja na savijenom komadu.

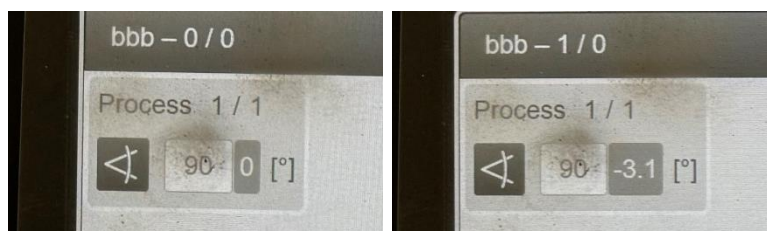
## 8.6 Elastični povrat materijala savijenih komada

Najveći elastični povrat materijala pojavljuje se kod savijanja nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10 debljine 5 mm. Naime, najprije je u računalu CNC stroja unesena vrijednost kuta savijanja od  $90^\circ$ . Nakon provedenog savijanja izmjeren je kut u iznosu od  $93,1^\circ$ . Zatim je u računalu CNC stroja unesena korekcija kuta savijanja u iznosu od  $3,1^\circ$ . U računalnom programu za obradu savijanjem, u bazi podataka pohranjene su vrijednosti K-faktora za mnogobrojne materijale. Nadalje se K-faktori koriste za izračun potrebnog hoda žiga kako bi se uz navedenu korekciju dobio zadani kut savijanja.



Slika 45. Mjerenje kuta savijanja bez korekcije i sa korekcijom

Nakon unosa korekcije kuta u računalni program CNC savijačice, sljedećim savijanjem dobiva se kut identičan zadanom kutu savijanja. Elastičan povrat nije isti za sve materijale. Kod savijanja različitih debljina istog materijala dobivaju se različiti iznosi elastičnog povrata, stoga je potrebno unositi korekcije nakon bilo kakve promjene ulaznih parametara materijala.



Slika 46. Unos kuta savijanja bez korekcije i sa korekcijom

Slika 46. prikazuje unos kuta savijanja u računalnom programu prvo bez korekcije kuta savijanja, a zatim i sa korekcijom. Bitno je unositi korekcije kuta makar i za mala odstupanja kako bi se osigurala točnost dimenzija konstrukcije zadane tehničkim crtežom.

## 8.7 Najčešće pogreške savijenih komada

### 8.7.1 Pukotine na vanjskom radijusu

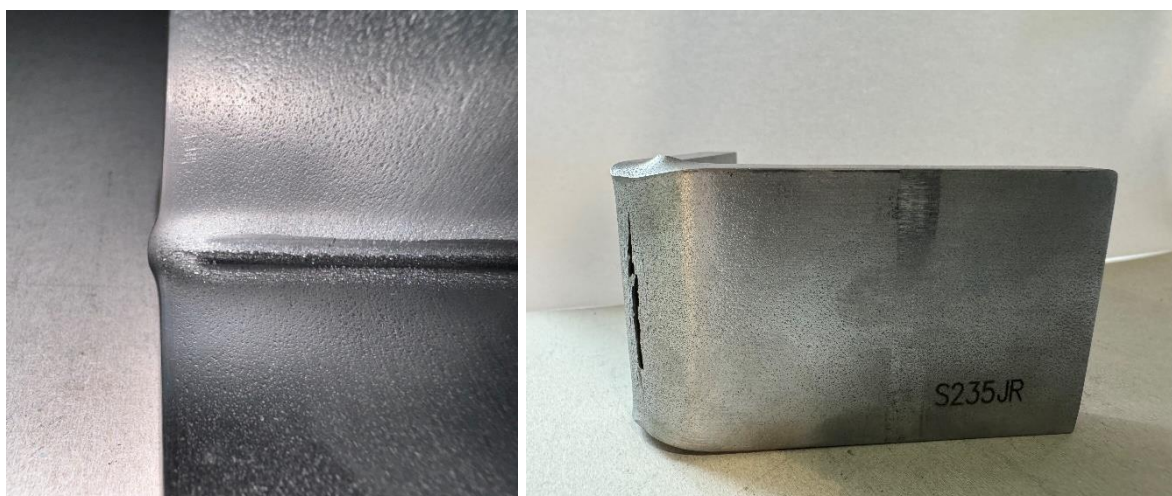
Pukotine na vanjskom radijusu pojavljuju se kod svih ispitanih materijala osim u slučajevima deformacije nehrđajućeg čelika. Aluminijska legura AlMgSi1 pokazuje najlošije rezultate po pitanju pukotina na vanjskom radijusu, a u nekim slučajevima dolazi i do potpunog loma materijala. Kod konstrukcijskog čelika također su prisutne pukotine, ali u manjoj mjeri nego je to slučaj kod aluminija.



Slika 47. Pukotine na vanjskom radijusu prilikom uzdužnog savijanja

### 8.7.2 Rubna izobličenja

Rubna su izobličenja prisutna kod svakog materijala, ali ne u istoj mjeri. Najizrazitija rubna izobličenja pojavljuju se kod savijanja konstrukcijskog čelika. Najviše se grešaka na navedenom materijalu pojavljuje pri debljini od 10 mm na kutu savijanja od 80°. Na slici ispod moguće je primijetiti rubna izobličenja, pukotinu na vanjskom radijusu te ogrebotine od matrice.



Slika 48. Rubna izobličenja i ostale greške na S235JR

### 8.7.3 Ogrebotine uzrokovane matricom

Ogrebotine uzrokovane matricom, pojavljuju se bez iznimke kod savijanja svih ispitanih materijala. Ogrebotine se najmanje primjećuju kod nehrđajućeg čelika pa slijedi konstrukcijski čelik, te se najviše mogu primijetiti kod savijanja aluminija. Kako je već spomenuto, ogrebotine su koncentratori naprezanja te je poželjno primjenjivati načine za sprječavanje njihova nastanka. Ukoliko je materijal nedovoljne duljine, odnosno ako je samo malim dijelom oslonjen na matricu, može se dogoditi klizanje materijala te tako dobiti neželjena geometrija savijenog komada.



Slika 49. Ogrebotine uzrokovane matricom na savijenim komadima

### 8.8. Proračun sile savijanja savijenih komada lima

Određivanje sile savijanja savijenih komada:

$$b = 50 \text{ mm}$$

$$s = 6 \text{ mm}$$

$$\alpha = 120^\circ$$

$$h = 70 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm}$$

$$r_t = 3 \text{ mm}$$

$$n = 1,8$$

$$\text{Materijal: AlMgSi1} - \sigma_m = 70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Sila savijanja iznosi:

$$F = \frac{2 * M}{r_t + 0,5 * s} * \text{ctg} \frac{\varphi}{2}$$

$$M = n * \sigma_m * \frac{b * s^2}{4} = 1,8 * 70 * \frac{50 * 6^2}{4} = 56\,700 \text{ Nmm}$$

$$\varphi = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$$

$$F = \frac{2 * 56\,700}{3 + 0,5 * 6} * 1,732 = 18\,900 \text{ N} = 33 \text{ kN}$$

$$F_k \approx 2 * F = 2 * 33 = 66 \text{ kN}$$

Sila savijanja i izbacivanja:

$$F_1 = 1,3 * F = 1,3 * 33 = 42,9 \text{ kN}$$

Sila potrebna za kalibriranje sa plastičnim sabijanjem materijala:

$$F_2 = 2 * p * b * c * \cos \frac{\varphi}{2}$$

$$c = \frac{h - s - r * (1 - \cos \frac{\varphi}{2})}{\sin \frac{\varphi}{2}} = \frac{70 - 6 - 5 * (1 - 0,866)}{0,5} = 126,66 \text{ mm}$$

$$F_2 = 2 * 30 * 50 * 126,66 * 0,866 = 330\,000 \text{ N} = 330 \text{ kN}$$

### 8.8.1 Tablični prikaz izračunatih sila savijanja savijenih komada

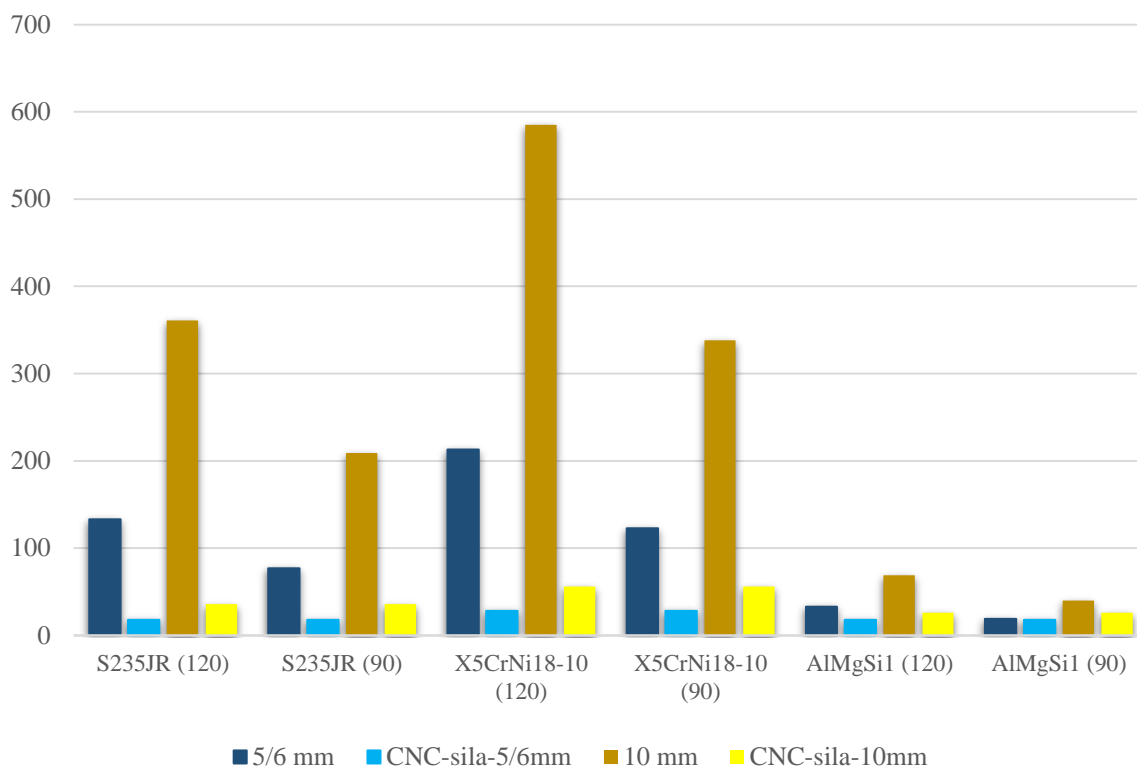
Izračun sile savijanja vrši se analogno prikazanim postupkom, a izračunate vrijednosti sila savijanja, u ovisnosti o materijalu i njegovim dimenzijama prikazani su u sljedećoj tablici.

**Tablica 4. Sile savijanja savijenih komada**

MATERIJAL	DULJINA [mm]	ŠIRINA [mm]	DEBLJINA [mm]	$\sigma_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	KUT SAVIJANJA [°]	IZRAČUNATA SILA SAVIJANJA [kN]	SILA SAVIJANJA STROJA [kN]
S235JR	150	50	5	370	120	133	18
					90	77	
	150	50	10		120	361	36
					90	209	
X5CrNi18-10	150	50	5	600	120	213	28
					90	123	
	150	50	10		120	585	56
					90	338	
AlMgSi1	150	50	6	70	120	33	18
					90	19	
	150	50	10		120	69	26
					90	40	

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da vlačna čvrstoća igra veliku ulogu kod računanja sile savijanja. Materijali sa višom vlačnom čvrstoćom zahtijevaju i mnogo veće sile za oštro kutno savijanje. U tablici je dan prikaz izračunatih sila savijanja te iznos očitanih sila savijanja s CNC savijačice.

## SILE SAVIJANJA [kN]



Grafičkim dijagramom prikazani su iznosi sila u ovisnosti o debljini materijala i kutu savijanja. Uz prikazane iznose računski dobivenih sila, dani su i iznosi sila očitanih na CNC savijačici. Uvidom u dijagram može se zaključiti da izračunate sile znatno odstupaju od vrijednosti očitanih sila sa stroja. Najmanje odstupanje očitane sile od izračunate može se primijetiti kod aluminija (AlMgSi1), dok su najveća odstupanja primjetna kod nehrđajućeg čelika (X5CrNi18-10).



## 9. POBOLJŠANJE PROCESA OŠTROG KUTNOG SAVIJANJA

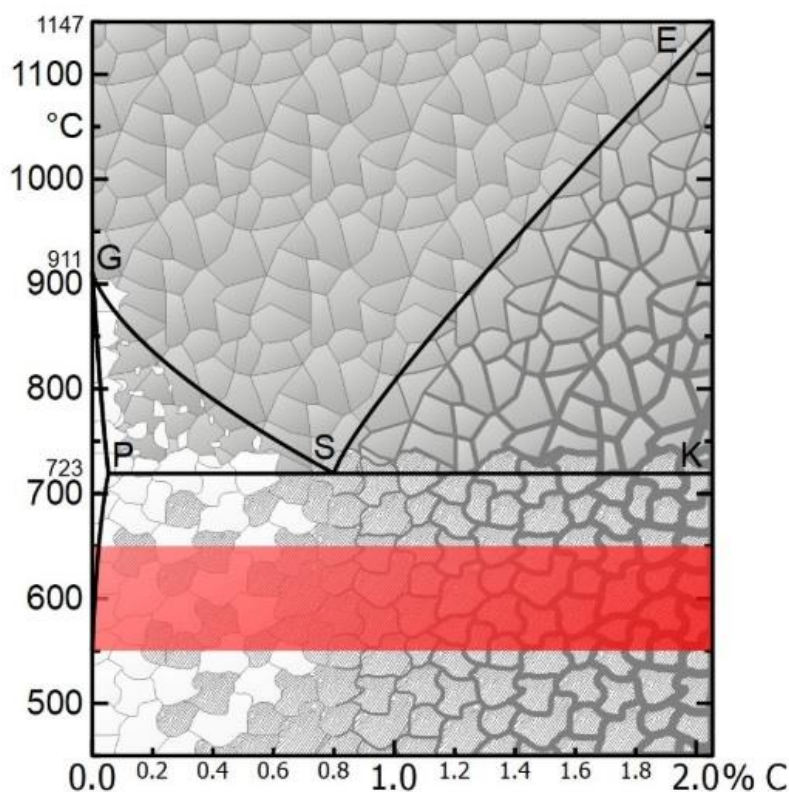
Nakon plastične deformacije uzrokovane oštrim kutnim savijanjem, materijal je na mjestu savijanja postigao visoke vrijednosti očvršćivanja. Na tim je mjestima uvelike smanjena žilavost te se povećala krhkost materijala. Kako bi materijal izdržao bez pojave loma u eksploatacijskim uvjetima, nužno je materijalu vratiti svojstva otpornosti prema lomu.

### 9.1 Toplinska obrada - žarenje

U postupke žarenja podrazumijevamo sve postupke toplinske obrade koji se sastoje od grijanja komada na odgovarajuću temperaturu (žarenja), kratkog ili duljeg držanja na toj temperaturi te naknadnog sporog hlađenja. Pojedini postupci žarenja razlikuju se bitno prema temperaturi i trajanju žarenja. Postupci žarenja koji će se provoditi nakon deformiranja imaju glavni cilj smanjiti zaostala naprezanja u materijalu, kao i postizanje sitnozrnate mikrostrukture kako bi se materijalu vratila žilavost.

#### 9.1.1 Žarenje za redukciju zaostalih napreznja

Grijanje pri dovoljno visokoj temperaturi s naknadnim polaganim hlađenjem u cilju sniženja zaostalih napreznja, bez znatnih promjena ostalih svojstava.

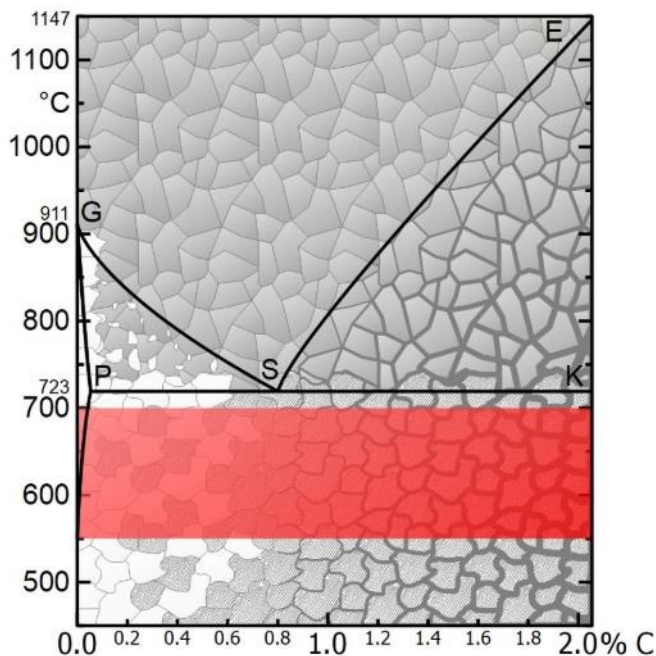


Slika 50. Dijagram žarenja za redukciju zaostalih napreznja [31]

Bitno je napomenuti da kod ove vrste žarenja nema bitnih promjena mehaničkih svojstava kao ni mikrostrukturnih promjena, nego je glavni cilj redukcija zaostalih napreznja. Za daljnje poboljšanje materijala provoditi će se rekristalizacijsko žarenje koje je opisano u nastavku.

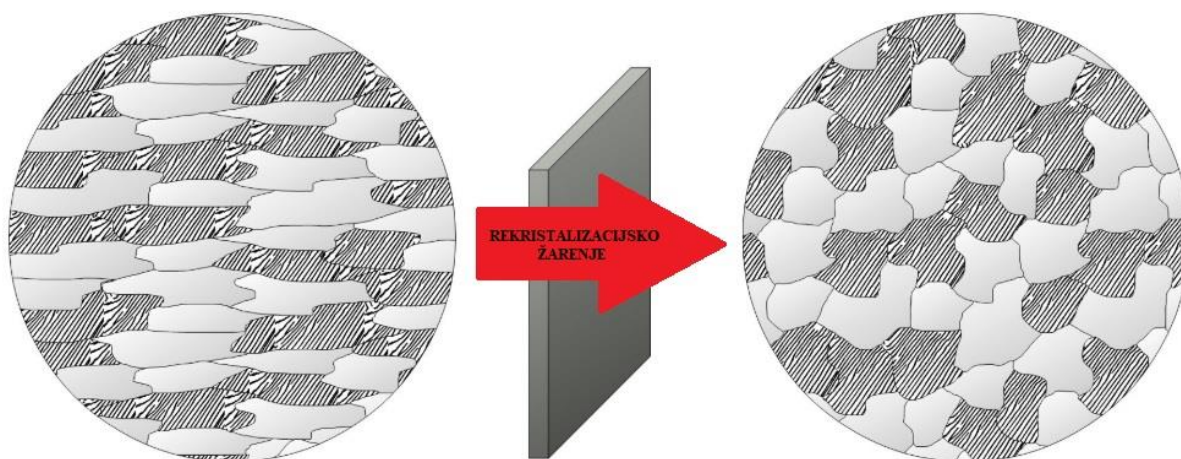
### 9.1.2 Rekristalizacijsko žarenje

Rekristalizacijsko žarenje provodi se nakon hladnog deformiranja tijekom kojeg se promijenila tekstura materijala i nastupilo očvršćenje. Glavna svrha je postizanje poligonalnog zrna čime se materijalu vraća duktilnost i deformabilnost. Temperatura rekristalizacije, kod koje dolazi do kompletne rekristalizacije u određenom periodu funkcija je stupnja deformacije i vrste materijala.



Slika 51. Dijagram rekristalizacijskog žarenja [31]

Primjena rekristalizacijskog žarenja izuzetno je bitna kod materijala kao što su čelici, Cu i Cu-legure (mjed, bronca), Al i Al-legure te Ti i Ti-legure. Prikaz promjene vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) i žilavosti (KV) te teksture hladnooblikovanog metala deformiranjem ovisno o visini temperature žarenja može se iščitati iz slike ispod teksta.



Slika 52. Prikaz promjene zrna nakon rekristalizacijskog žarenja [31]

## 10. ZAKLJUČAK

Tehnologija savijanja primjenjuje se u proizvodnji najrazličitijih metalnih proizvoda od najsitnijih predmeta izrađenih od tankih limova pa sve do vrlo teških i velikih proizvoda. Polazni materijal najčešće su limovi i trake dok se rjeđe koriste profili, šipke i cijevi. Pretežno se savija u hladnom stanju, a savijanje u toplom stanju primjenjuje se jedino za teške profile i cijevi te debele plaštevne. Za vrijeme savijanja materijal je napregnut elastično-plastično pa se upravo zbog elastične deformacije, nakon prestanka djelovanja sile, pojavljuje pojava elastičnog povrata materijala ili opružnog vraćanja. U velikom broju slučajeva elastični se povrat ne može izbjeći, stoga su tijekom godina napravljene brojne studije i istraživanja kako bi se savijanjem postigli što precizniji rezultati deformacije. Kod oštrog kutnog savijanja pojavljuju se greške tijekom postupka deformiranja. Izravni utjecaj na smanjenje grešaka tijekom oblikovanja imaju ulazni parametri obrade koje je moguće mijenjati. Ispravan odabir parametara rezultirati će proizvodima ispravnih svojstava i ispravne geometrije. Proizvodima izrađenim plastičnom deformacijom povisuje se čvrstoća i krhkost na mjestima većih stupnjeva deformacija. Toplinskom obradom povećava se deformabilnost i žilavost materijala kako bi se proizvodima poboljšala eksploatacijska svojstva. Iako se trodimenzionalni postupci oblikovanja na prvi pogled doimaju zanimljiviji, osim toga imaju i veće mogućnosti oblikovanja nepravilnih dijelova, savijanje se ipak mnogo češće primjenjuje od nekih drugih tehnologija obrade deformiranjem.

## 11. LITERATURA

- [1] [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-58857-0\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-58857-0_2)  
(pristupljeno: 12.12.2024.)
- [2] Math, M.: Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [3] <https://www.educationalstuffs.in/strength-of-materials-tensile-test/>  
(pristupljeno: 12.12.2024.)
- [4] [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/plasticna\\_obradba\\_metala.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/plasticna_obradba_metala.pdf)  
(pristupljeno: 12.12.2024.)
- [5] Musafija, B.: Obrada metala plastičnom deformacijom, Svjetlost, OOUR Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Sarajevo, 1988.
- [6] <https://titan.fsb.hr/~dzezelj/StudijDizajna/2023-24/1-Nazivlje.pdf>  
(pristupljeno: 12.12.2024.)
- [7] <https://www.lorsel.com/detalji-proizvoda/faccin-hav-strojevi/> (pristupljeno: 12.12.2024.)
- [8] <https://www.laser-ing.hr/blog/principi-savijanja-limova/> (pristupljeno: 12.12.2024.)
- [9] <https://www.coeffortmachinery.com/roll-forming-machine-working-principle/>  
(pristupljeno: 17.12.2024.)
- [10] <https://wmtmetal.com/working-principle-of-hydraulic-system-of-bending-machine/>  
(pristupljeno: 17.12.2024.)
- [11] <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/htmp-2016-0065/html>
- [12] <http://www.ss-industrijska-strojarska-zg.skole.hr/upload/ss-industrijska-strojarska-zg/multistatic/49/8.%20Alati%20za%20preoblikovanje.pdf> (pristupljeno: 18.12.2024.)
- [13] <https://www.accurl.com/blog/sheet-metal-bending/> (pristupljeno: 18.12.2024.)
- [14] <https://www.krrass.com/the-complete-guide-to-sheet-metal-bending/>  
(pristupljeno: 18.12.2024.)
- [15] <https://www.prontuarionline.it/piegatura-lamiere/> (pristupljeno: 18.12.2024.)
- [16] [https://ftp.idu.ac.id/wpcontent/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Metal%20forming%20cadell\\_20160129\\_120241.pdf](https://ftp.idu.ac.id/wpcontent/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Metal%20forming%20cadell_20160129_120241.pdf)  
(pristupljeno: 29.12.2024.)
- [17] <https://efficientengineer.com/material-strength-ductility-toughness/>  
(pristupljeno: 29.12.2024.)
- [18] <https://www.machinemfg.com/steel-bending-and-cracking/> (pristupljeno: 29.12.2024.)
- [19] <https://www.semanticscholar.org/paper/Sheet-Metal-Forming-Processes-and-Die-Design-Boljanovic/6a4fd5d932b371568a3bf5636060e0fdf92455fd> (pristupljeno: 18.12.2024.)

- [20] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/metalsmaterials/the-problem-of-anisotropy-in-metal-forming> (pristupljeno: 29.12.2024.)
- [21] <https://ahssinsights.org/forming/forming-modes/bending/> (pristupljeno: 30.12.2024.)
- [22] <https://sendcutsend.com/faq/what-are-your-bend-relief-requirements/>  
(pristupljeno: 30.12.2024.)
- [23] <https://www.krrass.com/prevent-edge-cracking-in-sheet-metalbending/?srsltid=AfmBOoqdcXC4PCzNqD4PNPaSv9uT318BtUTrpbHBcJLDTxx5YTy5ogKt>  
(pristupljeno: 29.12.2024.)
- [24] <https://metalmaq.shop/blog/en/how-to-avoid-bending-marks-on-the-metal-sheet/>  
(pristupljeno: 30.12.2024.)
- [25] <https://www.komaspec.com/about-us/blog/guide-to-sheet-metal-bending/>  
(pristupljeno: 30.12.2024.)
- [26] [https://www.researchgate.net/figure/llustration-of-V-bending-a-die-set-and-blank-arrangement-b-initiation-of-V-bending\\_fig1\\_353389011](https://www.researchgate.net/figure/llustration-of-V-bending-a-die-set-and-blank-arrangement-b-initiation-of-V-bending_fig1_353389011) (pristupljeno: 2.1.2025.)
- [27] [https://www.researchgate.net/figure/Types-of-Springback-a-positive-springback-b-negative-springback\\_fig7\\_353389011](https://www.researchgate.net/figure/Types-of-Springback-a-positive-springback-b-negative-springback_fig7_353389011) (pristupljeno: 2.1.2025.)
- [28] <https://sheetmetal.me/formulas-and-functions/k-factor/> (pristupljeno: 2.1.2025.)
- [29] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/k-factors-y-factors-and-press-brake-bending-precision> (pristupljeno: 2.1.2025.)
- [30] <https://www.hidraulika-kurelja.hr/o-nama/> (pristupljeno: 8.1.2025.)
- [31] <https://www.tec-science.com/material-science/heat-treatment-steel/annealing-process-of-steel-stress-relief-annealing/> (pristupljeno: 8.1.2025.)