

Elastični povrat savijenih limova postupkom savijanja u tri točke

Soldo, Jelena

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:440490>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jelena Soldo

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ELASTIČNI POVRAT
SAVIJENIH LIMOVA
POSTUPKOM SAVIJANJA U
TRI TOČKE**

Mentor:

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

Student:

Jelena Soldo

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc. dr. sc. Zdenki Keran na ukazanom povjerenju, pristupačnosti i pruženoj pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i podršci tijekom dosadašnjeg studija.

Posebno hvala mojoj sestri Mariji koja je od početka moj veliki oslonac i potpora.

Jelena Soldo



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске 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 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jelena Soldo** JMBAG: **0035218316**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Elastični povrat savijenih limova postupkom savijanja u tri točke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Elastic springback of bended sheets in a three-point bending process**

Opis zadatka:

Jedna od temeljnih karakteristika svih postupaka savijanja limova jest elastični povrat materijala. Izračun elastičnog povrata i proračun potrebnih korekcija važan je dio u razvoju novog procesa oblikovanja lima savijanjem.

U radu je potrebno opisati utjecaj elastičnog povrata na geometrijsku točnost savijenog obratka, navesti faktore koji utječu na veličinu elastičnog povrata te objasniti njihov utjecaj. Nadalje, potrebno je proračunati elastični povrat za limove od više vrsta materijala te različitih debljina pri postupku savijanja u tri točke. Eksperimentalno ispitati veličinu elastičnog povrata za proračunate slučajeve savijanja. Napraviti numeričku simulaciju postupka savijanja u tri točke i varirati parametre postupka ispitane proračunom i eksperimentalno. Eksperimentalne rezultate usporediti sa rezultatima proračuna i numeričke simulacije te ih komentirati.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc.  Zdenka Keran

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. OBLIKOVANJE METALA DEFORMIRANJEM	2
2.1. Područje oblikovanja metala deformiranjem.....	2
2.2. Prednosti procesa oblikovanja metala deformiranjem	3
3. UTJECAJNI PARAMETRI NA OBLIKOVLJIVOST	5
3.1. Utjecaj temperature.....	5
3.2. Utjecaj kemijskog sastava	6
3.3. Utjecaj brzine deformacije	7
3.4. Utjecaj sheme napregnutog stanja	7
4. SAVIJANJE.....	9
4.1. Moment savijanja.....	9
4.2. Postupak savijanja u tri točke.....	11
5. ELASTIČNI POVRAT.....	14
5.1. Utjecajni faktori na elastični povrat.....	18
6. EKSPREIMENTALNA ANALIZA	20
7. PRORAČUNSKA ANALIZA	24
7.1. Proračun sile savijanja	24
7.2. Izračun kutova savijanja α	25
7.3. Usporedba rezultata dobivenih eksperimentalnim i analitičkim putem.....	27
8. NUMERIČKA ANALIZA.....	29
8.1. Numerička simulacija procesa savijanja čeličnog lima DC 01	29
8.2. Numerička simulacija procesa savijanja čeličnog lima 20Mn5	32
8.3. Numerička simulacija procesa savijanja aluminijskog lima AlMg3	34
9. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37
PRILOZI	39

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela oblikovanja metala deformiranjem [1]	1
Slika 2. Utjecaj temperature na deformabilnost ugljičnog čelika [3]	6
Slika 3. Ovisnost deformabilnosti i otpora deformacije od sheme napregnutog stanja [3]	8
Slika 4. Čistog plastično savijanje [1]	10
Slika 5. Tipovi dijagrama moment savijanja-progib a) žilavi materijal, b) krhki materijal, c) materijali s mješovitim prijelomom [8]	12
Slika 6. Proces savijanja u tri točke [9]	13
Slika 7. Prikaz pojave naprezanja prilikom savijanja [11]	14
Slika 8. Elastični povrat [13]	15
Slika 9. Faktor elastičnosti ispravljanja K u zavisnosti od odnosa r/s [1]	16
Slika 10. Test savijanja pomoću dva hidraulička aktuatora [15]	17
Slika 11. Uređaj za savijanje u Laboratoriju za oblikovanje deformiranjem	20
Slika 12. Alat od čelika na uređaju za savijanje	21
Slika 13. Čelik 20Mn5, debljine 2mm	22
Slika 14. Uređaj za očitavanje elastičnog povrata	22
Slika 15. Skica geometrije dijelova za izračun kuta α	25
Slika 16. Elementi sa podjelom na konačne elemente	29
Slika 17. Krivulja tečenja za čelični lim DC 01	30
Slika 18. Dijagram brzina-vrijeme za čelični lim DC 01	31
Slika 19. Raspored naprezanja za čelični lim DC 01	32
Slika 20. Krivulja tečenja za materijal 20Mn5	33
Slika 21. Raspored naprezanja za čelični lim 20Mn5	33
Slika 22. Krivulja tečenja za materijal lima AlMg3	34
Slika 23. Raspored naprezanja za aluminijski lim AlMg3	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati sile savijanja.....	21
Tablica 2. Rezultati elastičnog povrata.....	23
Tablica 3. Veličine potrebne za proračun	24
Tablica 4. Prikaz rezultata sile savijanja.....	27
Tablica 5. Rezultati eksperimentalne analize elastičnog povrata.....	28
Tablica 6. Rezultati proračunske analize elastičnog povrata	28

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
M_S, M	Nmm	Moment savijanja
R_{ms}	MPa	Savojna čvrstoća
f_u	mm	Progib
K_E	MPa	Krutost
K_S	-	Faktor savijanja
F_{ms}	N	Sila savijanja
L_S	mm	Udaljenost između oslonaca
W	mm ³	Moment otpora
d	mm	Promjer epruvete
F	N	Sila
$R_{eso,2}$	N/mm ²	Konvencionalna granica proporcionalnosti
F_{max}	N	Maksimalna sila
r	mm	Radijus savijanja
h	mm	Debljina trake
K	-	Faktor elastičnosti ispravljanja
F_b	N	Sila zadržavanja
v	m/s	Brzina
$\Delta\theta$	°	Kut elastičnog povrata
s	mm	Debljina
b	mm	Širina
l	mm	Razmak između centara zaobljenosti
r_k	mm	Radijus kalupa
r_z	mm	Radijus žiga
α	°	Kut između krakova profila
$\Delta\alpha$	°	Elastični povrat
σ_p	N/mm ²	Granica proporcionalnosti
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
ν	-	Poissonov faktor

SAŽETAK

U ovom radu opisana je tehnologija oblikovanja metala deformiranjem te neki od utjecajnih parametra pri oblikovanju. Jedan od najčešće korištenih postupaka pri obradi limova je postupak savijanja. Značajniji problem prilikom procesa savijanja lima predstavlja elastični povrat. Također su opisani neki od faktora koji djeluju na pojavu i iznos elastičnog povrata. U eksperimentalnom dijelu rada proveden je postupak savijanja u tri točke za tri različita materijala. Tijekom eksperimentalne analize očitane su sile i elastični povrati, te je nakon toga provedena proračunska analiza. Usporedbom eksperimentalne i proračunske analize izvedeni su zaključci koji materijal podnosi najveću silu i ima najveći elastični povrat. Numeričkom analizom u programskom paketu MSC Marc Mentant SE pomoću metode konačnih elemenata, prikazana je raspodjela naprezanja i položaj neutralne linije.

Ključne riječi: tehnologija oblikovanja metala deformiranjem, postupak savijanja, elastični povrat

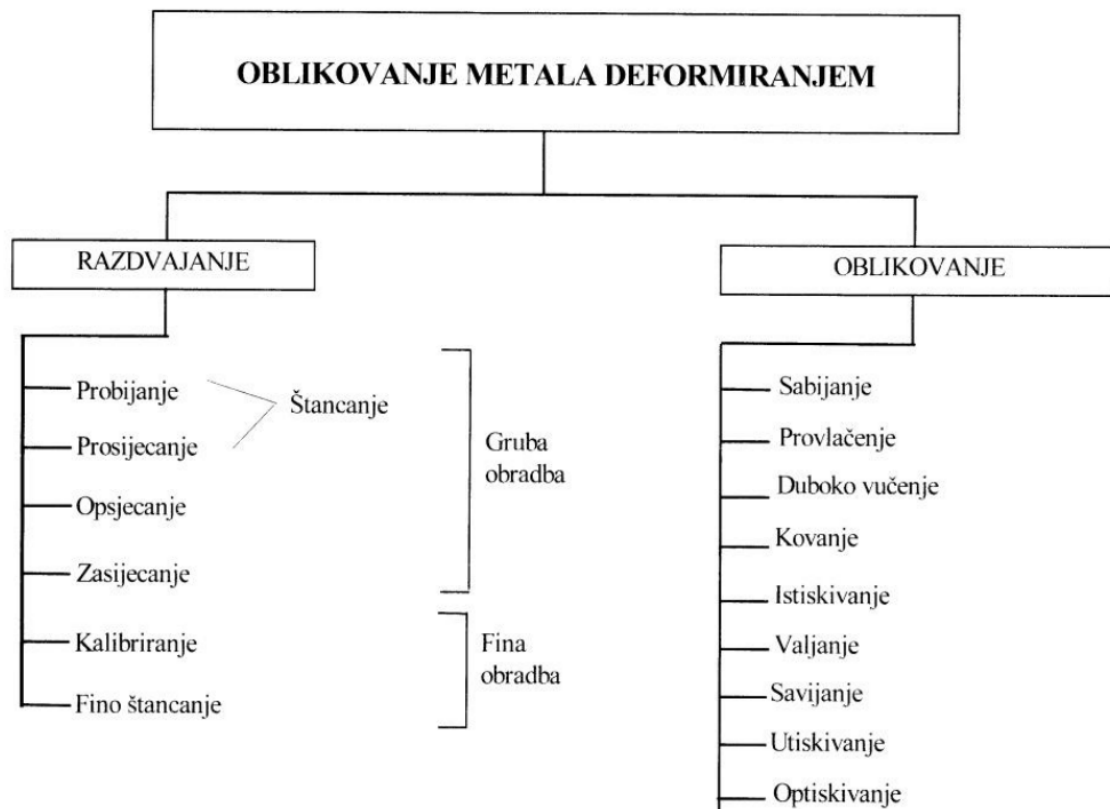
SUMMARY

In this thesis the deformation forming technology is described and some of the influential parameters in forming. One of the most commonly used processes in sheet metal processing is the bending process. A significant problem during the sheet metal bending process is the elastic springback. Some of the factors influencing the occurrence and amount of elastic springback are also described. In the experimental part of the thesis, a three - point bending procedure was performed for three different materials. During the experimental analysis, forces and elastic recovers were read, and a budget analysis was performed thereafter. By comparing experimental and computational analysis, conclusions were drawn as to which material withstands the greatest force and has the greatest elastic springback. Numerical analysis in the software package MSC Marc Mentant SE using the finite element method, shows the stress distribution and the position of the neutral line.

Key words: deformation forming technology, bending process, elastic springback

1. UVOD

Tehnologija oblikovanja metala deformiranjem pripada skupini metoda izrade proizvoda ili poluproizvoda temeljenih na plastičnoj deformaciji. Ovakav način prerade metalnih obradaka ima niz tehničko-ekonomskih prednosti. Zahvaljujući njima, teško opterećeni dijelovi turbina, obradnih strojeva, vozila, oružja, ovim se metodama proizvode vrlo ekonomično. U masovnoj proizvodnji robe izrađuju se matice, vijci, alati i uređaji. Jedna od najzastupljenijih metoda oblikovanja metala deformiranjem je metoda savijanja. Oblikovanje savijanjem je zastupljeno u metaloprerađivačkoj industriji, kako u proizvodnji malih serija tako i u proizvodnji velikih serija. Trake i limovi se koriste kao poluproizvodi za obradu savijanjem. Jedna od podjela oblikovanja metala deformiranjem prikazana je na slici 1. [1]



Slika 1. Podjela oblikovanja metala deformiranjem [1]

2. OBLIKOVANJE METALA DEFORMIRANJEM

Pod oblikovanje metala deformiranjem pripadaju one metode pri kojima se plastičnim deformiranjem metalu daje konačan oblik. Mnogobrojne metode oblikovanja deformiranjem široku primjenu nalaze u metalnim industrijama kao što su metaloprerađivačka, automobilska, avionska, industrija poluproizvoda i isključivo su vezane za serijski tip proizvodnje. Ovakvom načinu prerade cilj je da se s najmanjim gubitkom materijala i s najmanjim brojem operacija dobije gotov radni komad. Obradivani materijal mora se opteretiti iznad granice elastičnosti tj. potrebno ga je dovesti u stanje plastičnog tečenja. Rad i silu ostvaraju strojevi za obradu deformiranjem kao što su preše, strojevi za savijanje, automati, škare, kovački batovi. Sila sa stroja prenosi se na radni komad preko alata, dok priključeni alat na stroju oblikuje radni proizvod. [2]

2.1. Područje oblikovanja metala deformiranjem

Opterećenjem materijala iznad granice tečenja on se trajno deformira i ovaj način obrade se smatra oblikovanjem metala plastičnim deformiranjem. Povećanjem opterećenja dolazi do postepenog razdvajanja čestica materijala. Tako se područje metala oblikovanja deformiranjem s obzirom na deformiranje može podijeliti na dva dijela:

- deformiranje do razaranja metala
- plastično deformiranje.

Razaranje metala se provodi kako bi se komad razdvojio na odgovarajuće dijelove. Razdvajanju prethodi velika plastična deformacija koja u konačnici rezultira odvajanjem dijelova materijala na predviđenim mjestima.

Plastično deformiranje metala se može odvijati u hladnom stanju pri sobnoj temperaturi ili u toplom stanju pri povišenoj temperaturi. Otpor u metalu kojim se metal suprotstavlja deformiranju opada porastom temperature te se uvjeti obrade olakšavaju. O faktorima kao što su oblik i kvaliteta materijala, dimenzije, način prerade, konstrukcija alata, vrsta i veličina

raspoloživog stroja ovisi je li proces obrade u toplom ili hladnom stanju. S obzirom na oblik početnog materijala, plastično deformiranje obuhvaća:

- oblikovanje limova
- volumensko ili masivno oblikovanje.

Limovi se oblikuju postupcima

- savijanja
- dubokog vučenja
- raznim plastičnim oblikovanjima.

U postupke volumenskog oblikovanja spadaju

- sabijanje
- provlačenje
- istiskivanje
- kovanje [2]

2.2. Prednosti procesa oblikovanja metala deformiranjem

Ovaj način prerade ima velike tehničko-ekonomske prednosti s obzirom na ostale procese prerade metala. Do porasta ovakvog načina prerade dolazi zbog ubrzanog razvoja strojeva za oblikovanje deformiranjem, novih materijala za alate i metala za preradu. Velik broj proizvoda koji se obrađuju obradom odvajanjem čestica mogu se obrađivati plastičnim deformiranjem u hladnom stanju. S obzirom da se oblikovanjem deformiranjem žele dobiti konačne dimenzije komada, a ako je nakon oblikovanja deformiranjem potrebna još i dorada na strojevima za odvajanje čestica onda to predstavlja poskupljenje proizvodnje zbog dodatne obrade i prekidanje kontinuiranog toka „vlakana“. Bolja mehanička svojstva imaju materijali dobiveni postupkom plastičnog deformiranja jer je tok materijala¹ neprekidan.

Proizvodno- tehničke prednosti su: velika točnost izrađenih dijelova, mogućnost postizanja vrlo uske izradne tolerancije, jednim jednostavnim hodom stroj za obradu deformiranjem proizvodi dijelove kompliciranog oblika, mogućost dobivanja proizvoda visokih mehaničkih kvaliteta sa malom masom. [2]

¹ Pod tokom materijala podrazumijeva se izduženost zrna u pravcu tečenja materijala. Promijenjena kristalna struktura, u smislu izduženosti zrna, reflektira se na mehanička svojstva materijala. Ovakva izduženost zrna uvijek se pojavljuje prilikom hladne plastične deformacije.

Ekonomске prednosti oblikovanja deformiranjem su: mali utrošak materijala prilikom obrade, visoka proizvodnost se postiže sa prikladnim alatima, opremom, i uređajima za automatizaciju tehnološkog postupka, strojevi su jednostavni za rukovanje što ne zahtijeva visokokvalificiranu radnu snagu, mogućnost proizvodnje velikih količina uz nisku cijenu koštanja. [2]

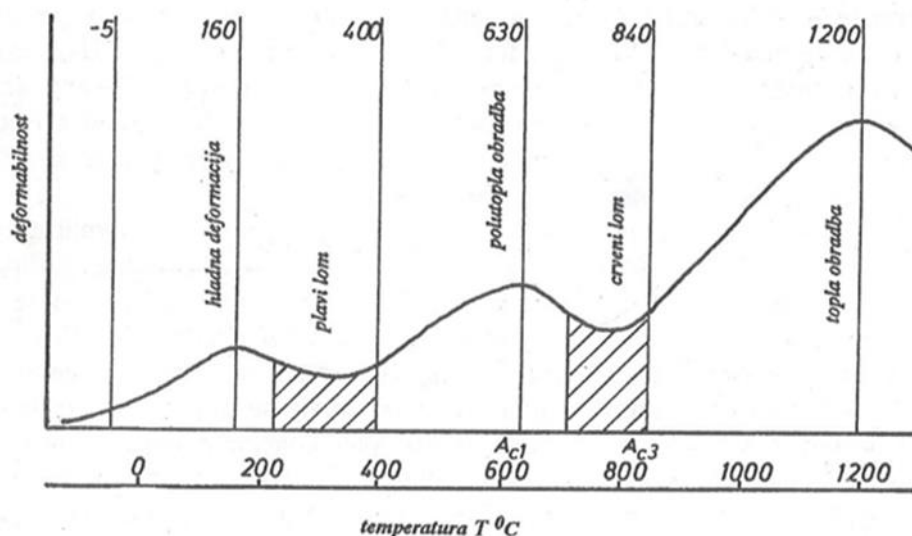
3. UTJECAJNI PARAMETRI NA OBLIKOVLJIVOST

Deformabilnost je sposobnost materijala da se deformira bez pojave loma, u točno definiranim tehnološkim uvjetima, kao što su temperatura, brzina deformacije i shema napregnutog stanja. Deformabilnost ovisi i o vrsti tehnologije, s obzirom da isti materijal u uvjetima jedne tehnologije može biti slabo deformabilan, a u uvjetima druge tehnologije može postići veliki stupanj deformacije. O tehnološkim uvjetima ovisi koliki se stupanj deformacije može postići. Što je veće prijelomno izduženje, kontrakcija presjeka i potreban rad loma to su plastična svojstva obrađivanog materijala povoljnija. Materijal je lakše oblikovljiv ako je potrebno manje naprezanje plastičnog tečenja i manji specifični rad deformacije. [3]

3.1. Utjecaj temperature

Tlačenje cilindričnih uzoraka je jedna od metoda za mjerenje u zavisnosti od temperature procesa i ustanovljavanje optimalne temperature kovanja. Valjkasti uzorci se zagrijevaju na različite temperature i tlače, sabijaju do pojave prve makropukotine. Kod krhkih materijala do pojave prve pukotine dolazi već kod male plastične deformacije. Najbolji način za ustanovljavanje deformabilnosti je torzijski postupak. Postupak je optimalan jer se obavlja u uvjetima troosnog napregnutog stanja kakav postoji u realnim postupcima oblikovanja deformiranjem. Metoda se obavlja na način da se ispituje metalni uzorak na torziju, istodobnim mjerenjem momenta torzije i broja zakreta do kojeg se javljaju prve makropukotine. Moguće je da materijal podnese preko 200 zakreta do pojave prve pukotine. Glavni nedostatak ove metode su skupi uređaji za ispitivanje. Iako je ustanovljeno postojanje optimalnog intervala oblikovanja kod utjecaja temperature na deformabilnost ipak nije tako jednostavna zavisnost. Deformabilnost kod običnog ugljičnog čelika pokazuje nekoliko značajnih područja. Na temperaturama ispod 5 °C deformabilnost je mala. Krhkost u hladnom stanju uobičajna je za ugljične čelike, te je razlog zašto se ugljični čelici ne smiju obrađivati na nižim temperaturama. Još jedan problem koji se pojavljuje je problem otvorenih skladišta sirovog materijala, gdje je temperatura zimi ispod -5 °C, te materijal treba ostaviti da se zagrije u zatvorenoj prostoriji da bi dosegno temperaturu pri kojoj je obrada moguća. Područje pada deformabilnosti u području temperatura od 150 °C pa do 300 °C -350 °C naziva se zonom plavog loma. Nakon tog područja deformabilnost raste i predstavlja područje

polutoplo prerade. Ovo područje je u upotrebi kod obojenih metala posebice mjedi, a kad je riječ o čeliku ovo područje se izbjegava. Područje od 600 °C – 800 °C je područje smanjenja deformabilnosti i predstavlja zonu crvenog loma. Nazivi plavi i crveni lom potječu od boje materijala na mjestu loma, gdje boja zavisi od spektra kojeg reflektira sloj oksida na tom mjestu. Iznad temperature 800° C deformabilnost se povećava i predstavlja područje tople obrade čelika, koja je najčešća u obradi ovog materijala. [3]



Slika 2. Utjecaj temperature na deformabilnost ugljičnog čelika [3]

3.2. Utjecaj kemijskog sastava

U čeličnim materijalima sadržaj ugljika ima velik utjecaj na oblikovljivost. Sposobnost oblikovanja je manja što je veći sadržaj ugljika. Legirni dodaci kao što su krom i molibden smanjuju oblikovljivost, dok utjecaj nikla i mangana povećava oblikovljivost. Svi legirni dodaci koji u čeliku stvaraju karbide smanjuju oblikovljivost. [4]

Krom kao alifagni element proširuje područje ferita, a veće prisustvo kroma daje tvrde kromne karbide pa se time povećava otpornost na habanje i prokaljivost. Krom daje visoku čvrstoću kod visokih temperatura te povećava antikoroziivnost zbog stvaranja oksidne prevlake. Zbog velikog afiniteta molibdena prema ugljiku legiranjem sa molibdenom stvaraju se stalni karbidi i povećava otpornost trošenju, a povećava se i čvrstoća kod povišenih temperatura i prokaljivost, što znači da se udjelom molibdena smanjuje deformabilnost čelika. [3]

Nikal u malim količinama djeluje antikorozivno. Dodatkom nikla povećava se žilavost te se deformabilnost čelika povećava. U legurama u kojima se nalazi krom dodaje se i nikal kako bi se ono što krom pokvari nikal popravio. [3]

Mangana ima u slitinama čelika, a dodaje se zbog deoksidacije i desumporizacije u količinama od 0.3% - 1.5%. Veće količine mangana povećavaju otpornost na udarno opterećenje i prokaljivost, ali se smanjuje deformabilnost. [3]

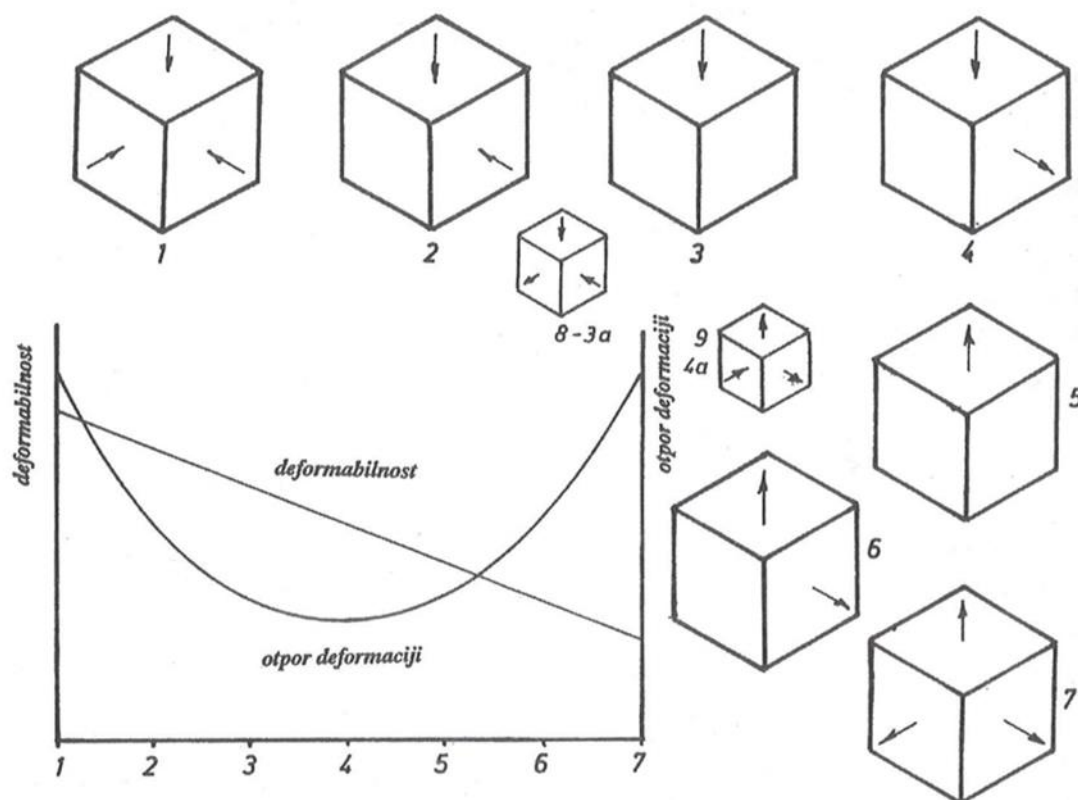
Elementi koji se u čeliku nalaze u tragovima, te koji nisu određeni kontrolom kemijskog sastava mogu imati loše posljedice po oblikovljivosti. Do znatnog gubitka oblikovljivosti čelika u toplom stanju dolazi zbog tragova bakra, kisika, arsena i kositra. Njihovo prisustvo u čeliku je zbog sve većeg udjela recikliranog čelika u talini i načinu na koji se tali. [4]

3.3. Utjecaj brzine deformacije

Povećanjem brzine deformiranja snižava se deformabilnost. Ova pojava naročito je izražena prilikom oblikovanja u toplom stanju, dok su razlike prilikom oblikovanja u hladnom stanju značajno manje. Naprezanje plastičnog tečenja raste povećanjem brzine deformiranja, dok istodobno deformabilnost opada. Postupkom sporog tlačenja postiže se veći stupanj deformacije, ali postupak koji se provodi brzo ima za posljedicu veću čvrstoću i bolja mehanička svojstva. Kod magnezijjskih slitina brzina deformacije ima velik utjecaj na deformabilnost. Pri sporom sabijanju mogu se postići veliki stupnjevi deformacija bez pojave pukotina dok pri kovanju na batovima magnezijjske slitine pucaju kod male deformacije. [3]

3.4. Utjecaj sheme napregnutog stanja

Pod djelovanjem tlačnog napreznja sulfidi i fosfidi se usitnjuju kako se usitnjuju i kristalna zrna, a ako je naprezanje vlačno onda je mjesto ovih diskontinuiteta mjesto inicijalne mikropukotine koja se pod djelovanjem vlačnog napreznja počinje širiti i dolazi do loma. Materijal postaje deformabilnij kada je napregnut tlačnim napreznjima i može podnijeti veći stupanj deformacije, što pokazuje kako materijal bolje podnosi tlačna napreznja nego vlačna. [3]



Slika 3. Ovisnost deformabilnosti i otpora deformacije od sheme napregnutog stanja [3]

Na slici 3. je vidljivo da se udjelom vlačnih naprezanja defomabilnost smanjuje, te je prikazan način na koji se ponaša otpor deformaciji za pojedine sheme napregnutog stanja. Energija deformiranja ovisi o deformabilnosti. Shema pod brojem jedan daje maksimalnu deformabilnost, ali je otpor deformaciji velik, velika deoformabilnost zahtijeva veću uloženu energiju. [3]

4. SAVIJANJE

Postupak savijanja predstavlja vitalni proces kod proizvodnog inženjerstva. Savijanje limova je plastična deformacija koja stvara promjenu oblika geometrije radnog komada. Slično ostalim procesima oblikovanja, savijanje mijenja oblik radnog komada dok volumen ostaje isti. U posebnim slučajevima savijanje može uzrokovati male promjene debljine lima. Uz stvaranje željenog oblika, savijanje se koristi za davanje čvrstoće i krutosti limu, za promjenu momenta inercije limenog proizvoda, za poboljšanje estetike dijelova nekog proizvoda i za uklanjanje oštrih rubova. [5] Postupci savijanja obavljaju se u hladnom stanju, dok se debeli limovi i cijevi velikih promjera savijaju u toplom stanju. Tijekom procesa savijanja materijal je pod djelovanjem elastičnih i plastičnih naprezanja, a prestankom djelovanja vanjskog opterećenja, savijeni obradak se zbog postojanja elastičnih naprezanja, malo povrti i otvori. [3] Savijanje je ujedno i postupak oblikovanja deformiranjem kod kojeg pojava elastičnog povrata najviše dolazi do izražaja, a budući da utječe na geometriju konačnog proizvoda, zahtijeva najviše pažnje.

Sila potrebna za savijanje ovisi o procesu savijanja jer se mehanika svakog procesa može znatno razlikovati. Važni čimbenici koji utječu na mehaniku savijanja su materijal, debljina lima, radijus preko kojeg dolazi do savijanja, polumjer savijanja, kut savijanja, strojevi, alati i specifični proces savijanja metala. [5] S obzirom na dimenzije i oblik komada, profil poluproizvoda i karakter proizvodnje, proces savijanja se provodi alatima na prešama, valjcima na rotacijskim strojevima, posebnim uređajima na specijalnim strojevima za savijanje. [1].

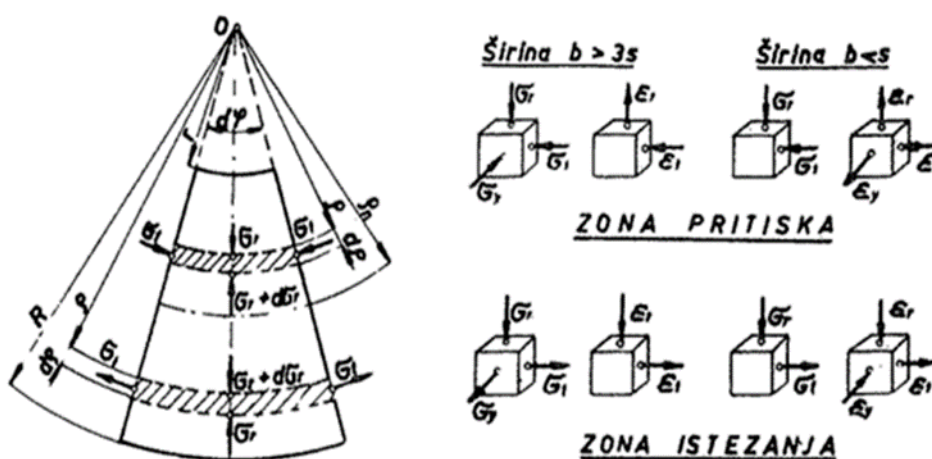
4.1. Moment savijanja

Opterećenje lima vanjskim momentom M on se savija te se stvara progib. Veličina progiba ovisi o rastojanju promatranog mjesta. Pod utjecajem momenta M lim se izdužuje, a negdje između njih leže neutralna vlakna koja se pri opterećenju ne mijenjaju. Ta vlakna stvaraju neutralnu površinu, a njen presjek daje neutralnu ili elastičnu liniju. Najveću deformaciju pretrpjet će ona vlakna koja su najudaljenija od neutralne linije. Ovisno o vrsti i veličini naprezanja koja se javljaju pri savijanju lima problem savijanja se proučava na dva načina: savijanje u elastično-plastičnom području i čisto plastično savijanje. [2]

Savijanje u elastično-plastičnom području je problem linearnog naprezanja. Kod savijanja u elastično-plastičnom području postoje dvije vrste deformacija. Elastična deformacija gdje se jezgra lima do određene visine deformira elastično, dok se vanjski slojevi radnog komada deformiraju plastično.

Najveća deformacija kod čistog plastičnog savijanja javlja se u tangencijalnom pravcu, tako da su u elementu savijenog komada vlakna ispod neutralne linije opterećena vlačnim naprezanjima dok su vlakna iznad neutralne linije opterećena tangencijalnim naprezanjima.

Neutralna os se pomiče ka centru zakrivljenja i ne prolazi kroz središte presjeka. Ako je manji omjer unutrašnjeg polumjera savijanja i debljine materijala time se više pomiče ka centru zakrivljenosti. Kod čistog plastičnog savijanja prostorno stanje naprezanja utječe na oblik deformacije savijenog komada. Kod plastičnog savijanja se povećava dužina savijenog komada, smanjuje se njegova debljina, mijenja se položaj neutralne linije te oblik poprečnog presejka, za razliku od savijanja u elastičnom području. [2]



Slika 4. Čisto plastično savijanje [1]

4.2. Postupak savijanja u tri točke

Jedna od metoda postupaka savijanja limova je postupak savijanja u tri točke. Određivanje vlačne čvrstoće ojačanih polimera, uključujući kompozite sa visokim modulom elastičnosti u obliku pravokutnih šipki, također se određuje metodom savijanja u tri točke. Metoda je primjenjiva za krute i polukrute materijale. Vlačna čvrstoća se ne može odrediti za materijale koji se ne lome ili se ne lome na vanjskoj površini ispitnog uzorka.

Ispitivanje savijanjem u tri točke provodi se za određivanje savojne čvrstoće i to najčešće za krhke materijale kao što je sivi lijev, gdje sila djeluje na polovini udaljenosti između oslonaca epruvete. Pri malim kutovima savijanja lome se krhki materijali, a deformacija se mjeri preko veličine progiba te se mjeri i sila. Čelici kao žilavi materijali ne lome se pri savijanju te se kod njih određuje naprezanje pri kojem nastaju trajne deformacije. Ispitivanje savijanja žilavih materijala se provodi kao tehnološko ispitivanje, zbog njegove sposobnosti deformiranja, a očituje se na temelju propisanog kuta savijanja. [8]

Savojna čvrstoća se računa kao omjer maksimalnog momenta savijanja M_S , utvrđenog pri lomu epruvete i momenta otpora presjeka. Kod procesa savijanja ispitivani uzorci epruvete su u neobrađenom stanju, a mjeri se savojna čvrstoća R_{ms} , progib pri prijelomu f_u , krutost K_E i faktor savijanja K_S . [8]

$$\text{Savojna čvrstoća} \quad R_{ms} = \frac{M_S}{W}, \text{ MPa}$$

$$\text{Moment savijanja} \quad M_S = \frac{F_{ms} \cdot L_S}{4}, \text{ Nmm}$$

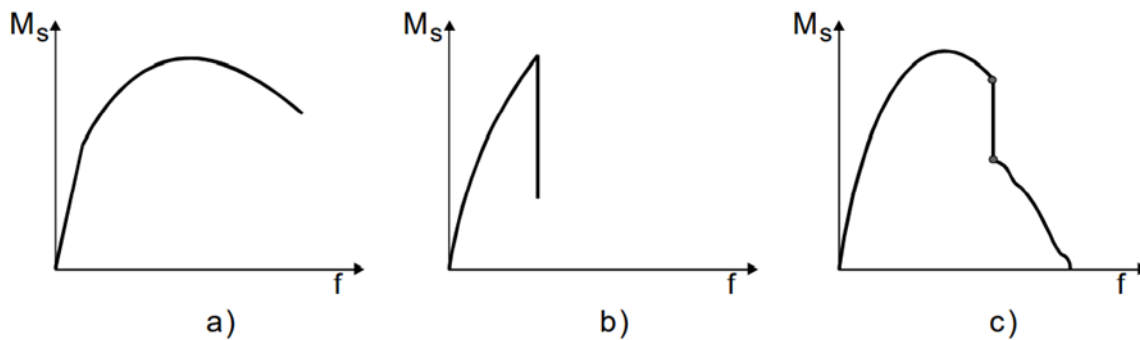
F_{ms} – sila savijanja

L_S – raspon između oslonaca

$$\text{Moment otpora presjeka} \quad W = \frac{\pi \cdot d^3}{32}, \text{ mm}^3$$

d – promjer epruvete

Progib pri prijelomu predstavlja najveći progib postignut pri ispitivanju. Mjeri se komparatorskim uređajem koji je oslonjen na epruvetu tijekom procesa ispitivanja. Konvencionalna granica savijanja $R_{es0,2}$ određuje se kod ispitivanja žilavih materijala savijanjem na temelju usvojene trajne deformacije od 0,2%. [8]



Slika 5. Tipovi dijagrama moment savijanja-progib a) žilavi materijal, b) krhki materijal, c) materijali s mješovitim prijelomom [8]

Pored progiba kao mjera deformacije može se izračunati i savitljivost tj. jedinični progib.

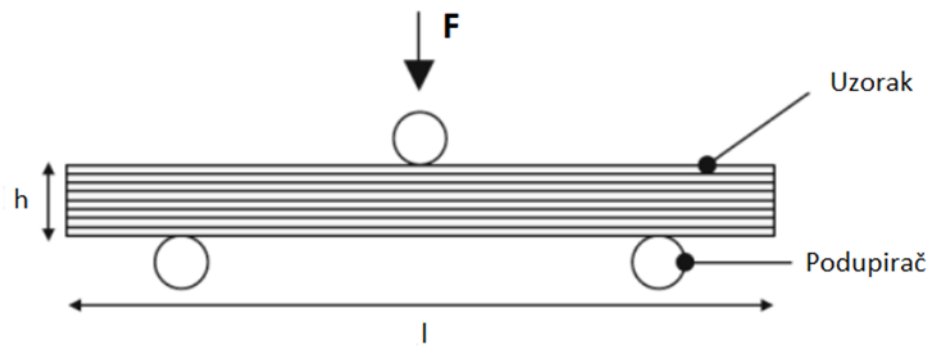
$$\text{Savitljivost} = \frac{f_u}{L_s} \cdot 100, \%$$

L_s - udaljenost između oslonaca

f_u – progib

Kod ispitivanja materijala savijanjem gornji slojevi epruvete su tlačno opterećeni, a donji vlačno. Unutar područja elastične deformacije je linearna promjena naprezanja po presjeku dok iznad granice elastičnosti materijala nije linearna. Zbog uspostavljanja ravnoteže rezultante sila vlaka i tlaka, te ako materijal nema ista svojstva naprezanje-deformacije za vlak i tlak, onda se neutralna os premješta ka tvrđoj strani epruvete. Prilikom savijanja mogu se pojaviti nejednolika naprezanja jednoosnog vlačjenja do jednoosnog tlačjenja što je bitno jer su strojni dijelovi opterećeni na savijanje. [8]

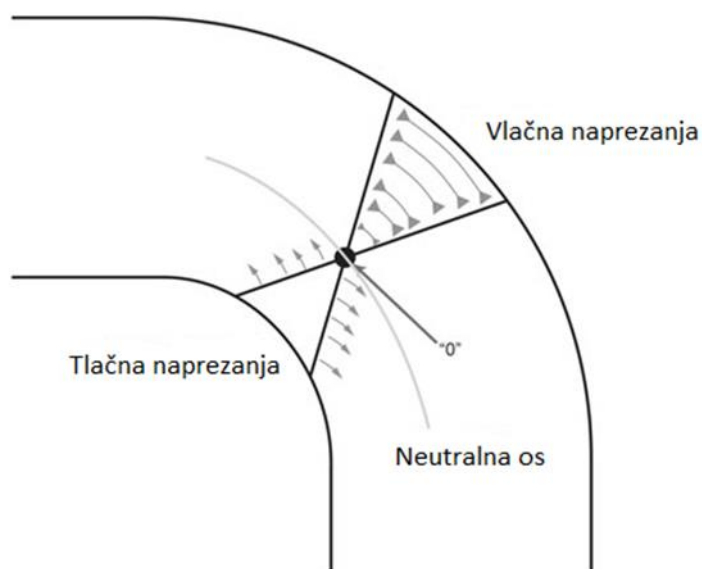
Na prikazanoj slici 6., uzorak duljine l , visine h i dubine d postavlja se na dvije potporne osi, za ispitivanje savijanja u tri točke. Između dvije osi u sredini na uzorak djeluje sila F dok se uzorak ne slomi pod silom F_{\max} . [9]



Slika 6. Proces savijanja u tri točke [9]

5. ELASTIČNI POVRAT

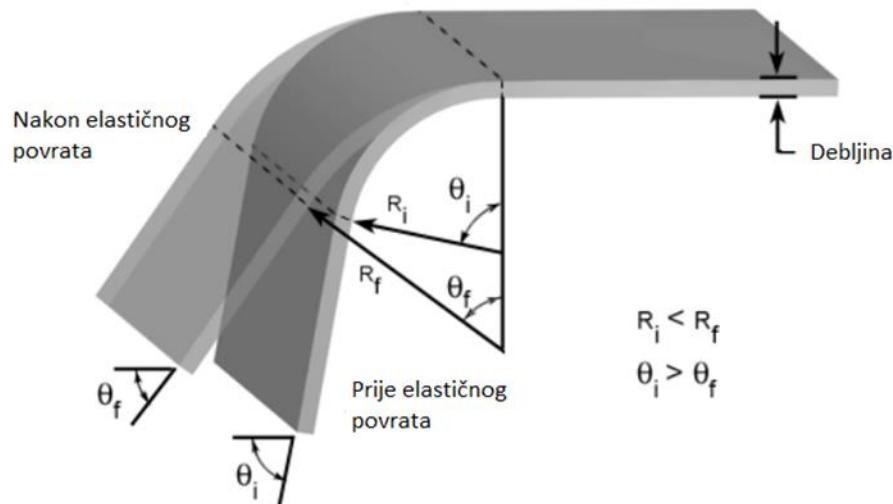
Elastični povrat je način na koji se lim pokušava vratiti u prvobitni oblik nakon što je savijen. Oblikovanje lima zahtijeva elastično-plastično savijanje i rastezanje metala što doprinosi elastičnom povratu. Elastični povrat osim što se javlja u limovima pojavljuje se i u žicama, šipkama, trakama i drugim tankim oblicima. Svi metalni materijali imaju određeni stupanj elastičnosti. Nakon plastične deformacije koja nastaje zbog savijanja lima, uslijedit će elastični povrat nakon što je uklonjeno opterećenje te se metal pokušava vratiti na staro mjesto. Kada se metalni lim savija doživljava velike količine naprezanja, na rastegnutoj strani metala vlačne sile su veće od tlačnih sila što pridonosi sposobnostima elastičnog povrata metala. [10]



Slika 7. Prikaz pojave naprezanja prilikom savijanja [11]

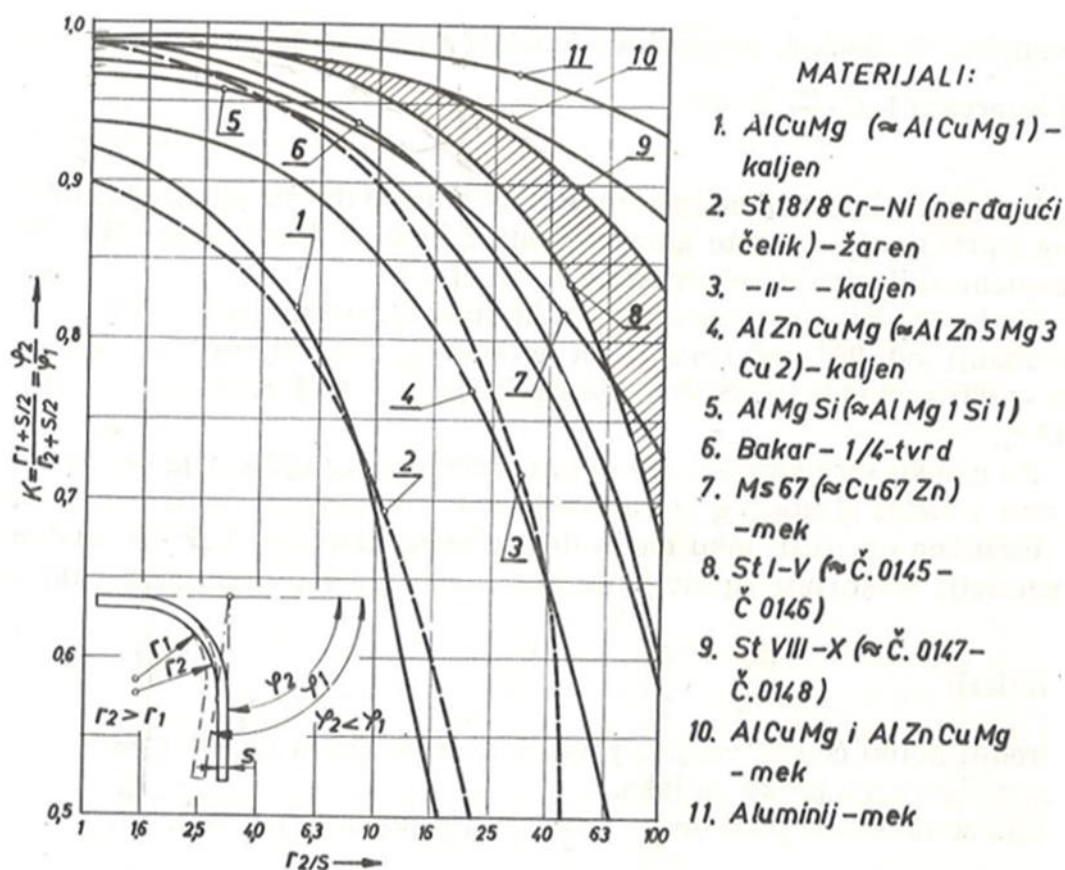
U duktilnim materijalima elastični povrat je puno manji nego u tvrdim materijalima, ovisno o modulu elastičnosti određenog materijala. Elastični povrat raste sa većom granicom tečenja, sklonošću materijala ka očvršćavanju. Hladno oblikovanje povećava količinu elastičnog povrata u materijalu. Elastični povrat kod čeličnog materijala niske čvrstoće manji je od povrata čelika visoke čvrstoće dok je povrat kod aluminija dva do tri puta veći. Povrat se

pojavljuje u svim oblikovanim i savijenim dijelovima nakon otpuštanja pritiska i povlačenja udarca alata. Neki od glavnih parametara koji utječu na povrat su oblik i dimenzija alata, kontaktno trenje, svojstva materijala i debljina lima. [12]



Slika 8. Elastični povrat [13]

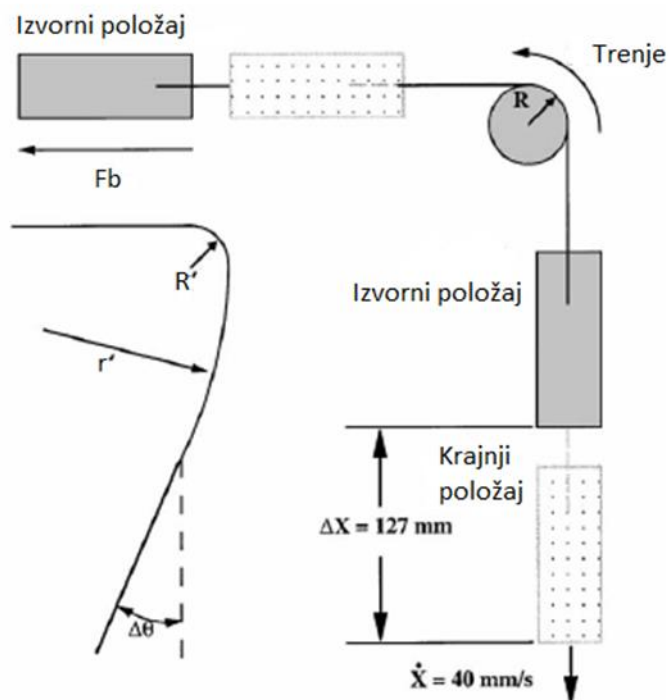
Elastični povrat iskazuje se u promjeni kuta nakon što se savijeni radni komad izvadi iz alata. Pojava elastičnog povrata je izraženija što je šire područje elastično deformiranog presjeka. Kut povrata ovisi o radijusu savijanja r i njegovog odnosa prema debljini trake h , od elastičnih svojstava deformirajućeg materijala i o veličini deformacije. Pri konstruiranju elastični povrat se mora uzeti u obzir, a približno se može odrediti iz dijagrama na slici 9. na kojem je prikazan faktor elastičnog ispravljanja K u ovisnosti od odnosa unutrašnjeg i vanjskog radijusa, debljine lima i vrste materijala. [3]



Slika 9. Faktor elastičnosti ispravljanja K u zavisnosti od odnosa r/s [1]

Područje oko neutralne ravnine prolazi plastičnu i elastičnu deformaciju tijekom procesa oblikovanja lima kao što su duboko vučenje i utiskivanje gdje prevladava savijanje. Dosezanjem konačne dubine i uklanjanjem tiskača, elastična deformacija u materijalu se obnavlja te se stvara elastični povrat zbog neujednačene raspodjele naprezanja. Neusklađenost oblika između proizvoda dubokog vučenja i projektiranog proizvoda zbog povrata mora se nadoknaditi u fazi projektiranja kako bi se osigurala njegova funkcija i montaža sa drugim dijelovima. Zbog teškoće predviđanja i procjenjivanja iznosa kompenzacije za elastični povrat, modifikacija alata se oslanja na iskustvo ili postupak pokušaja i pogrešaka. Ovakav postupak kompenzacije zahtijeva dodatno vrijeme za isprobavanje, što povećava troškove alata i vrijeme razvoja proizvoda. Problem povećanog elastičnog povrata pogoršava upotreba materijala visoke čvrstoće kao što su dvofazni čelici u mnogim proizvodnim procesima. Na povrat utječe složena kombinacija savijanja i rastezanja opterećenih dijelova tijekom procesa savijanja. Stoga je važno razumijevanje učinaka parametara procesa kao i svojstva materijala na elastični povrat. O momentu savijanja, koji

ovisi o raspodjeli naprezanja kroz debljinu u svakoj točki u ravni lima ovisi veličina elastičnog povrata. [14]



Slika 10. Test savijanja pomoću dva hidraulička aktuatora [15]

Jedan od eksperimentalnih testova za prikazivanje elastičnog povrata je test savijanja kao što je prikazano na slici 10. Sastoji se od dva hidraulička aktuatora orijentirana pod kutom od 90° i fiksnog ili kotrljajućeg cilindra za simuliranje polumjer alata preko kojeg se savija uzorak trake širine 50 mm. Gornji aktuator osigurava stalnu silu zadržavanja, F_b . Donji aktuator se pomiče konstantnom brzinom, v , te se uzorak povlači, savija, odmotava i rasteže preko cilindra. Traka od lima podvrgava se savijanju i odmotavanju pod stalnim naprežanjem, te dolazi do preokreta opterećenja u materijalu. Na kraju ispitivanja, uzorku se dopusti da se vrati unatrag i izmjeri se kut elastičnog povrata $\Delta\theta$. Proces je primjeren za brojne operacije oblikovanja lima, a njegova prednost je jednostavnost. Opterećenje limom može se kontrolirati izravno i točno, jer se u stvarnim operacijama oblikovanja, opterećenje limom ovisi o složenoj interakciji između ponašanja materijala, kontakta, trenja i sile. [14]

5.1. Utjecajni faktori na elastični povrat

Brojni faktori utječu na veličinu elastičnog povrata koji se javlja nakon prestanka djelovanja opterećenja tijekom procesa oblikovanja. Razna eksperimentalna, numerička i analitička istraživanja tijekom godina dala su rezultate o djelovanju pojedinih faktora na veličinu elastičnog povrata. Većina istraživanja provedena je na ispitivanju savijanja V-profila.

Jedan od utjecajnih faktora na povrat je omjer polumjera matrice i debljine lima R/t , povećanjem omjera raste i kut elastičnog povrata.

Visina tiskača ima utjecaj na raspodjelu naprezanja u izratku pri procesu savijanja što za posljedicu ima pojavu elastičnog povrata. Zona dopuštenog savijanja predstavlja tlačno naprezanje na strani tiskača, a vlačno naprezanje na strani matrice. Vlačna i tlačna naprezanja se smanjuju duž tiskača i matrice do ruba obratka djelujući sa različitim visinama tiskača. Povećanjem hoda savijanja povećavaju se vlačna i tlačna naprezanja, te karakteristika protoka materijala rezultira obrnutom zonom savijanja gdje je vlačno naprezanje na strani tiskača, a tlačno naprezanje na strani matrice čime dolazi do pojave elastičnog povrata. Smanjenjem visine tiskača smanjuje se zona obrnutog savijanja. [16]

Procesne varijable kod procesa savijanja čeličnog lima su polumjer tiskača, radijus matrice, širina tiskača, brzina tiskača, koeficijent trenja, eksponent očvršćavanja deformacijom i normalna anizotropija. Opterećenje tiskača povećava se kada se jedna varijabla procesa, tj. podmazivanje, radijus tiskača ili brzina tiskača, povećava ili se eksponent očvršćavanja deformacijom smanjuje. Kada se radijus matrice poveća, opterećenje tiskača raste u ranoj fazi savijanja dok se u završnoj fazi savijanja smanjuje. Opterećenje tiskača je konstantno, kada širina tiskača varira. Kada se normalna anizotropija poveća, opterećenje tiskača se smanjuje. Kut elastičnog povrata veći je kod alata s većim radijusom matrice.

Kut elastičnog povrata u području udubljenja smanjuje se s povećanjem polumjera i kuta tiskača. Debljina materijala i kut savijanja imaju velik utjecaj na povrat. Održavanje ostalih parametara istim, a povećanjem radijusa kuta tiskača povrat se povećava, a povećanjem debljine lima smanjuje se povrat. Kompenzacija elastičnog povrata lokaliziranim tlačnim naprezanjem daje zanemariv elastični povrat. Kut tiskača vrlo je važan parametar koji utječe na elastični povrat. Niži kut tiskača stvara nižu plastičnu zonu koja teži većem elastičnom povratu u usporedbi s većim kutom tiskača. Limu s različitim smjerom zrna povezana je

različita vrijednost granice popuštanja. Granica popuštanja materijala također igra vrlo važnu ulogu u povratu. Postoji postupna promjena u povratu s obzirom na smjer zrna.

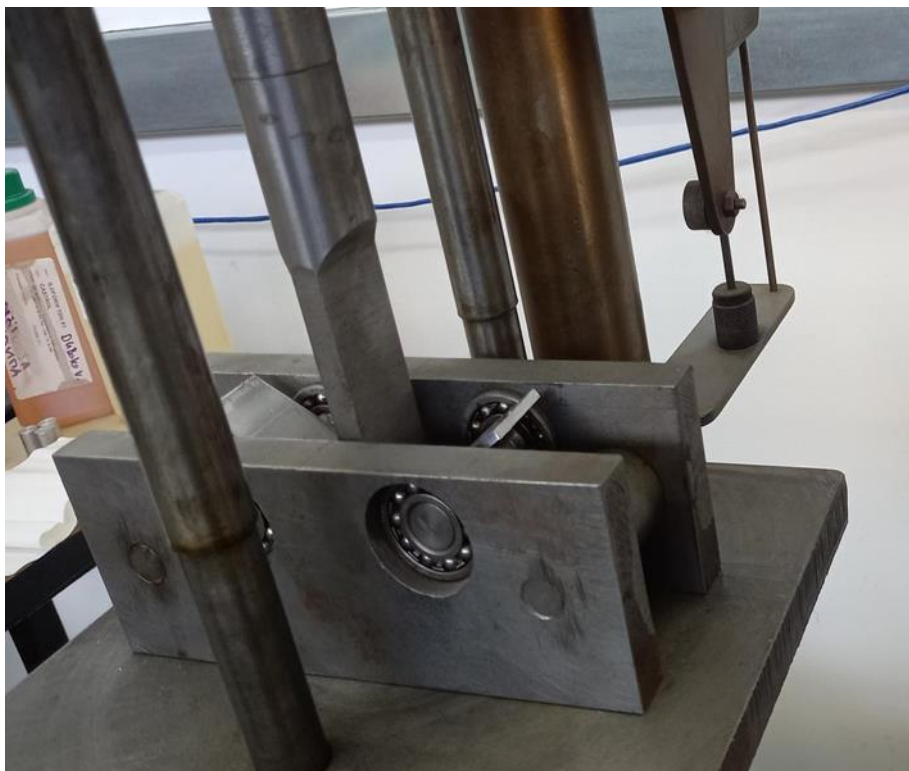
Stanje prije savijanja također je jedan od glavnih čimbenika koji utječe na povrat. Elastični povrat je manji za ravne ploče. [17]

6. EKSPREIMENTALNA ANALIZA

Eksperimentalna analiza završnog rada obavljena je u Laboratoriju za oblikovanje deformiranjem na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Na uređaju za savijanje svaki se materijal ispitivao tri puta, slika 11. Sila potrebna za savijanje postiže se okretanjem ručke koja putem hidraulike pomiče žig. Ukupni pomak alata kod ispitivanja svih materijala je 20 mm. Tijekom eksperimenta za svaki uzorak očitavala se maksimalna sila tj. sila kod ukupnog pomaka alata i elastični povrat.



Slika 11. Uređaj za savijanje u Laboratoriju za oblikovanje deformiranjem



Slika 12. Alat od čelika na uređaju za savijanje

Rezultati savijanja predstavljeni su u tablici:

Tablica 1. Rezultati sile savijanja

Materijal	Sila savijanja, N			
	Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	Artimetička sredina
Čelik DC01	300	305	310	305
Čelik 20Mn5	430	450	460	447
Aluminij AlMg3	330	340	310	327



Slika 13. Čelik 20Mn5, debljine 2mm



Slika 14. Uređaj za očitavanje elastičnog povrata

Rezultati elastičnog povrata predstavljani su u tablici 2.:

Tablica 2. Rezultati elastičnog povrata

Materijal	Elastični povrat, mm			
	Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	Arifmetička sredina
DC01	1	1	1	1
20Mn5	2	2	2	2
AlMg3	1,5	1,5	1,5	1,5

Iznos sile savijanja za postizanje jednake deformacije kod svih uzoraka očekivani je najveći kod najčvršćeg materijala. Također, iznos elastičnog povrata najveći je kod najčvršćeg materijala, što je očekivano i sukladno promjenama koje se događaju u materijalu, a opisane su u teorijskom dijelu.

7. PRORAČUNSKA ANALIZA

Podaci potrebni za proračun prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 3. Veličine potrebne za proračun

Veličine	Materijal		
	Čelik DC01	Čelik 20Mn5	Aluminij AlMg3
s , debljina [mm]	3	2	2
b , širina [mm]	25	25	25
l , razmak između centara zaobljenosti [mm]	70	70	70
r_k , radijus kalupa [mm]	5	5	5
r_z , radijus žiga [mm]	5	5	5
α , kut između krakova [°]	112,6°	112,6°	112,6°
σ_p , granica proporcionalnosti [N/mm ²] [18], [19], [20]	140	350	330

7.1. Proračun sile savijanja

Za proračun sile savijanja korištene su formule za savijanje limova V-profila, Plastična obrada metala, Josip Hribar, 1975.

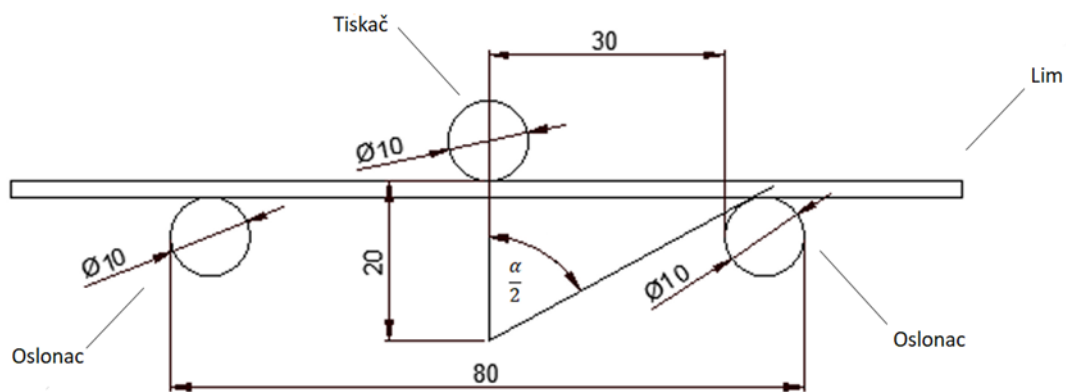
$$F = \frac{b \times s^2 \times \left(\sin \frac{\alpha}{2}\right)^2}{l - 2 \times (r_k + r_z + s) \times \cos \frac{\alpha}{2}} \times \sigma_p$$

Uzorak 1- Čelik DC01 $F = 392 \text{ N}$

Uzorak 2 – Čelik 20Mn5 $F = 427 \text{ N}$

Uzorak 3 – AlMg3 $F = 403 \text{ N}$

7.2. Izračun kutova savijanja α



Slika 15. Skica geometrije dijelova za izračun kuta α

Kut α kod maksimalnog pomaka alata 20 mm.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{30}{20}$$

$$\frac{\alpha}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{30}{20} \right)$$

$$\frac{\alpha}{2} = 56,3^\circ$$

$$\alpha_1 = 112,6^\circ$$

Uzorak 1- Čelik DC01

Kut α kod pomaka alata 20-1=19 mm.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{30}{19}$$

$$\frac{\alpha}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{30}{19} \right)$$

$$\frac{\alpha}{2} = 57,65^\circ$$

$$\alpha_2 = 115,3^\circ$$

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$$

$$\Delta\alpha = 115,3^\circ - 112,6^\circ = 2,7^\circ$$

Uzorak 2- Čelik 20Mn5

Kut α kod pomaka alata 20-2=18 mm.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{30}{18}$$

$$\frac{\alpha}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{30}{18} \right)$$

$$\frac{\alpha}{2} = 59,03^\circ$$

$$\alpha_2 = 118,07^\circ$$

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$$

$$\Delta\alpha = 118,07^\circ - 112,6^\circ = 5,47^\circ$$

Uzorak 3- Aluminij AlMg3

Kut α kod pomaka alata 20-1,5= 18,5 mm.

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{30}{18,5}$$

$$\frac{\alpha}{2} = \tan^{-1} \left(\frac{30}{18,5} \right)$$

$$\frac{\alpha}{2} = 58,33^\circ$$

$$\alpha_2 = 116,67^\circ$$

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$$

$$\Delta\alpha = 116,67^\circ - 112,6^\circ = 4,07^\circ$$

Iznos elastičnog povrata kod proračunske analize najveći je kod čelika 20Mn5 koji je ujedno i najčvršći materijal i materijal sa najvećim iznosom granice popuštanja.

7.3. Usporedba rezultata dobivenih eksperimentalnim i analitičkim putem

U tablici 4. prikazani su rezultati ispitivanja sile savijanja kod eksperimentlane i proračunske analize.

Tablica 4. Prikaz rezultata sile savijanja

Materijal	Sila savijanja, N	
	Eksperiment	Proračun
Čelik DC01	305	392
Čelik 20Mn5	447	427
Aluminij AlMg3	327	403

Sila savijanja za čelični lim DC01 dobivena proračunom za 28,5 % je veća nego sila dobivena eksperimentom, dok je sila za čelik 20Mn5 za 4,5 % manja nego sila dobivena eksperimentom. Proračunska sila aluminijskog lima 23,2 % je veća od sile dobivene eksperimentom. Eksperimentalni podaci ovise i o načinu postavljanja lima na oslonce. Dobiveni rezultati pokazuju kako debljina lima i svojstva materijala kao što je granica popuštanja imaju velik utjecaj na silu savijanja. Materijal sa najmanjom granicom popuštanja zahtijeva najmanju silu za savijanje lima.

Tablica 5. Rezultati eksperimentalne analize elastičnog povrata

	Elastični povrat, mm
Materijal	Eksperiment
Čelik DC01	1
Čelik 20Mn5	2
Aluminij AlMg3	1,5

Tablica 6. Rezultati proračunske analize elastičnog povrata

	Elastični povrat, °
Materijal	Proračun
Čelik DC01	2,7°
Čelik 20Mn5	5,47°
Aluminij AlMg3	4,07°

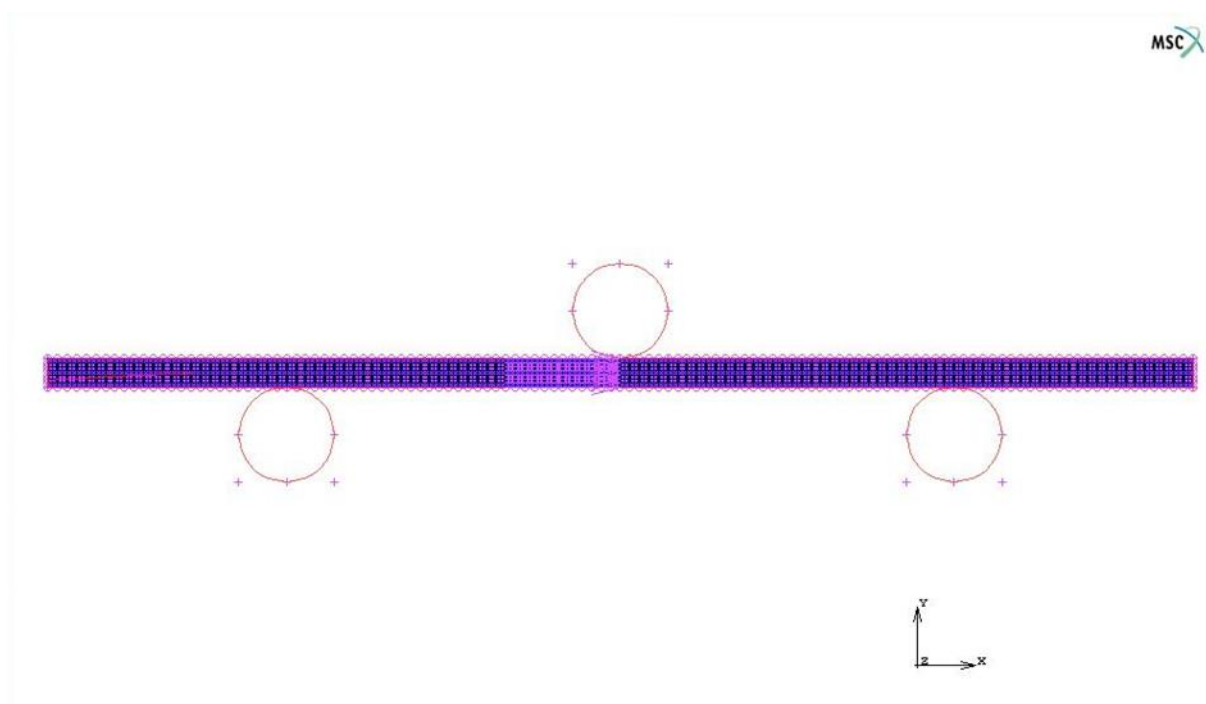
Pri usporedbi eksperimentalnih i proračunskih rezultata elastičnog povrata, najmanji elastični povrat ima lim sa najvećom debljinom i najmanjim iznosom granice popuštanja. Iz rezultata je vidljivo kako je elastični povrat kod tanjeg materijala duplo veći nego kod debljeg. Iako bi kod aluminijskog elastični povrat trebao biti najveći jer je aluminij dosta mekan materijal, s obzirom da se radi o polutvrdom aluminiju on pokazuje za 25% manji elastični povrat od čelika iste debljine.

8. NUMERIČKA ANALIZA

Simulacije limova provedene su u programskom paketu MSC Marc Mentat SE. Cilj provedene simulacije bio je odrediti raspored naprezanja i vizualno prikazati položaj neutralne linije u procesu savijanja u tri točke, korištenjem metode konačnih elemenata.

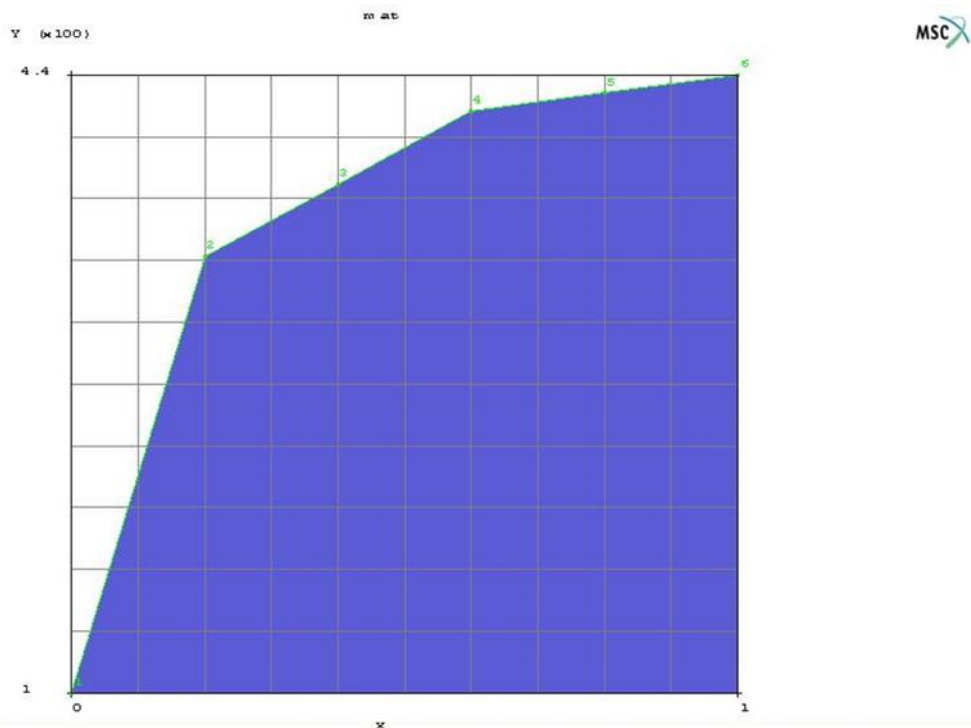
8.1. Numerička simulacija procesa savijanja čeličnog lima DC 01

Čelični lim DC01 je dimenzija 120 mm x 25 mm x 3 mm. U obzir je uzet utjecaj faktora trenja sa iznosom 0.2. Računalni model postupka sastoji se od lima, žiga i dva oslonca. Žig i dva oslonca se tijekom procesa ne deformiraju, a lim se deformira. Radni dio se kreira povezivanjem točaka u pravokutnik. Radijus žiga je 5 mm, a promjeri oslonaca iznose 10 mm. Za ostvarivanje mreže konačnih elemenata, pomoću naredbe za konvertiranje geometrijske značajke se pretvaraju u konačne elemente. Čelični lim se dijeli na 7 dijelova po debljini i 120 dijelova po dužini. Rubni uvjet za prikazani proces savijanja je ograničavanje gibanja točaka koje se nalaze ispod žiga. Ograničavanjem pomaka točaka ispod žiga po osi x mreža konačnih elemenata ostaje učvršćena.



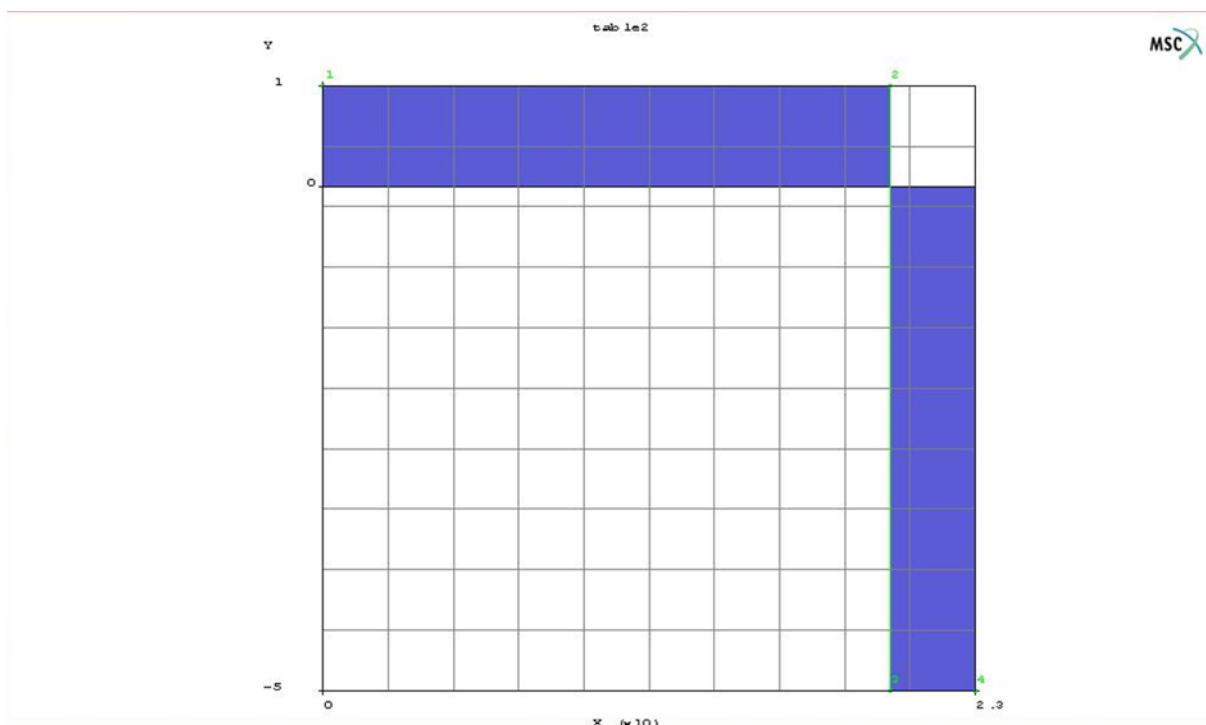
Slika 16. Elementi sa podjelom na konačne elemente

Krivulja tečenja materijala unosi se kako bi se omogućilo modeliranje deformiranja materijala u plastičnom području. Na osi x nalazi se iznos stupnja deformacije, a na osi y naprezanje plastičnog tečenja, slika 17. Svojstva materijala se stavljaju kao elasto-plastična i izotropna. Modul elastičnosti za čelik iznosi $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$, a Poissonovo faktora $\nu = 0.3$. Tijelu koje se deformira mora se pridružiti krivulja tečenja.



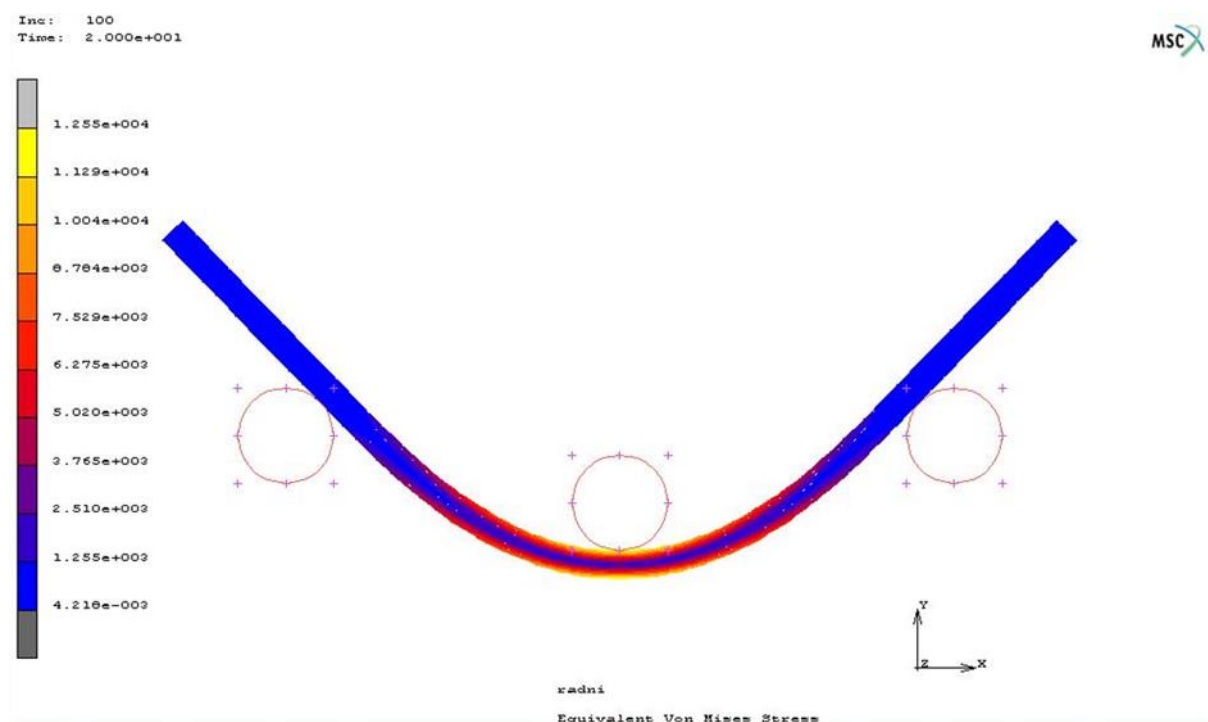
Slika 17. Krivulja tečenja za čelični lim DC01

Žig i dva oslonca se modeliraju kao kruta tijela, a lim kao deformabilno tijelo. Gibanjem žiga u negativnom smjeru osi y dolazi do deformiranja lima. Putanja žiga u negativnom smjeru osi y i njegov povrat u pozitivnom smjeru osi y se definira pridruživanjem dijagrama brzina-vrijeme, slika 18.



Slika 18. Dijagram brzina-vrijeme za čelični lim DC01

Radni hod pri kojem se događa savijanje lima i povratni hod pri kojem se alat vraća u početni položaj su koraci koji se odvijaju tijekom simulacije. Opcijom Loadcases se definira broj inkremenata u kojima se provodi proračun te kriterij konvergencije. Kreiranjem radnje za obavljanje procesa simulacije predstavlja kraj modeliranja. Metodom konačnih elemenata simulacija počinje numerički izračun. Na slici 19. prikazan je raspored napreznja za čelični lim DC01.

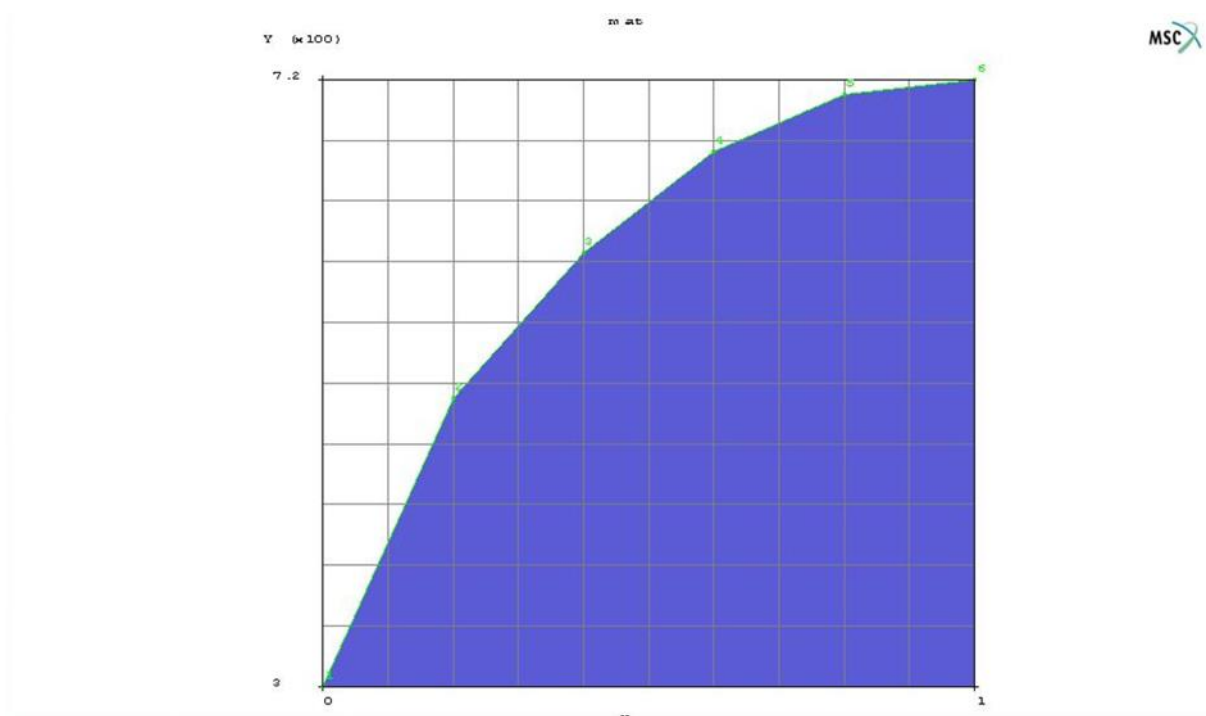


Slika 19. Raspored naprezanja za čelični lim DC01

Vidljive su zone najvećeg vlačnog i najmanjeg tlačnog naprezanja kao i položaj neutralne linije

8.2. Numerička simulacija procesa savijanja čeličnog lima 20Mn5

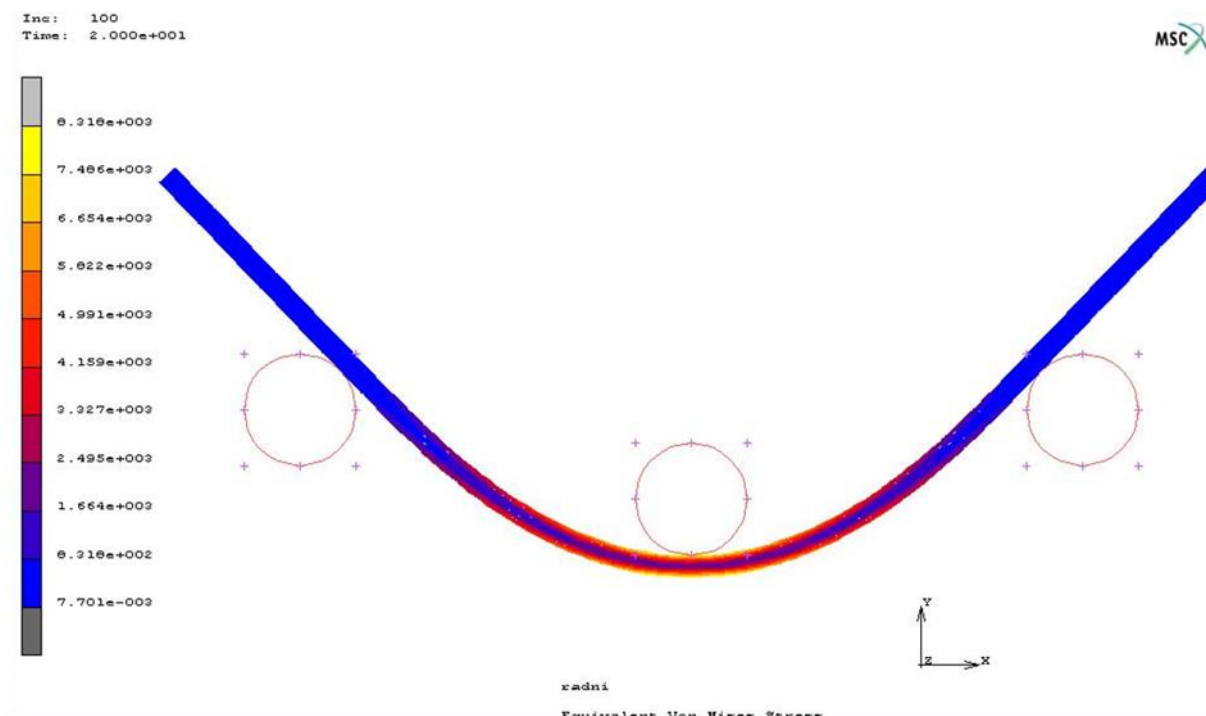
Početni komad čeličnog lima 20Mn5 je dimenzija 120 mm x 25 mm x 2 mm. Procedura ostaje slična jer je isti postupak savijanja sa drugom vrstom materijala. Za modul elastičnosti uvrštava se $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ i Poissonov faktor $\nu = 0.3$. Krivulja tečenja je drugačija s obzirom da se radi o drugoj vrsti čelika, slika 20. U ovom primjeru čelični lim se dijeli na 5 dijelova po debljini i 120 dijelova po dužini. Rubni uvjeti ostaju isti.



Slika 20. Krivulja tečenja za materijal 20Mn5

Kretanje žiga je isto kao i kod čeličnog lima DC01.

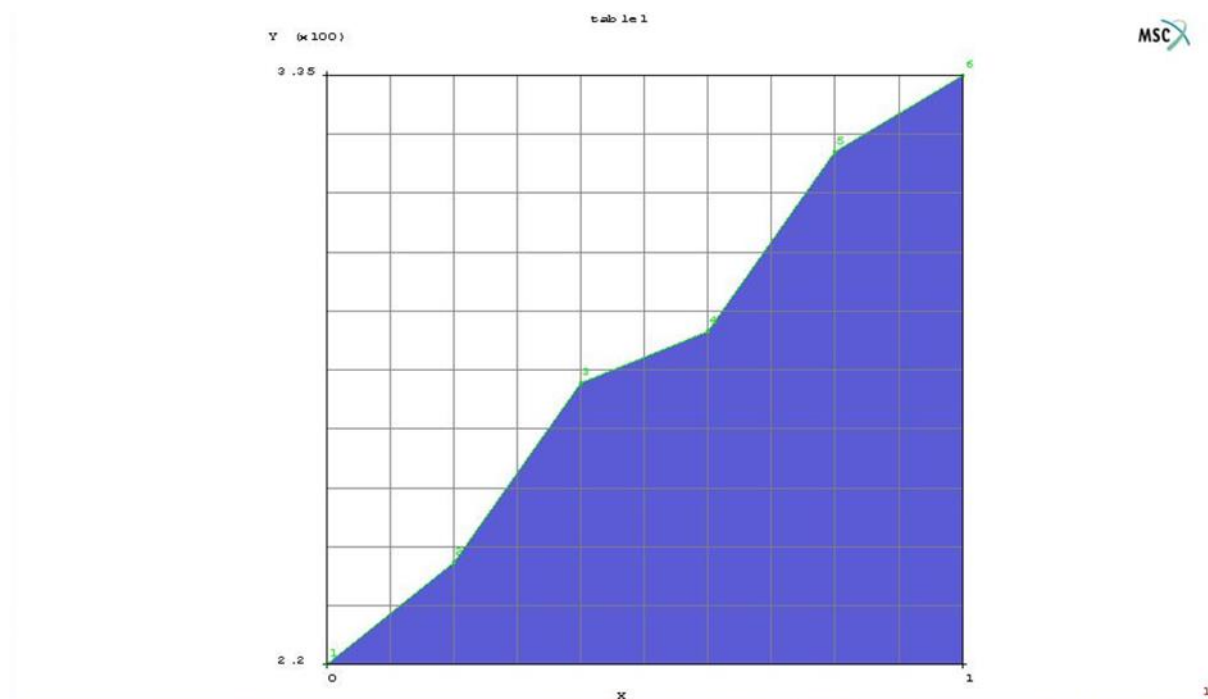
Na slici 21. prikazani su rezultati savijanja čeličnog lima 20Mn5.



Slika 21. Raspored naprezanja za čelični lim 20Mn5

8.3. Numerička simulacija procesa savijanja aluminijskog lima AlMg3

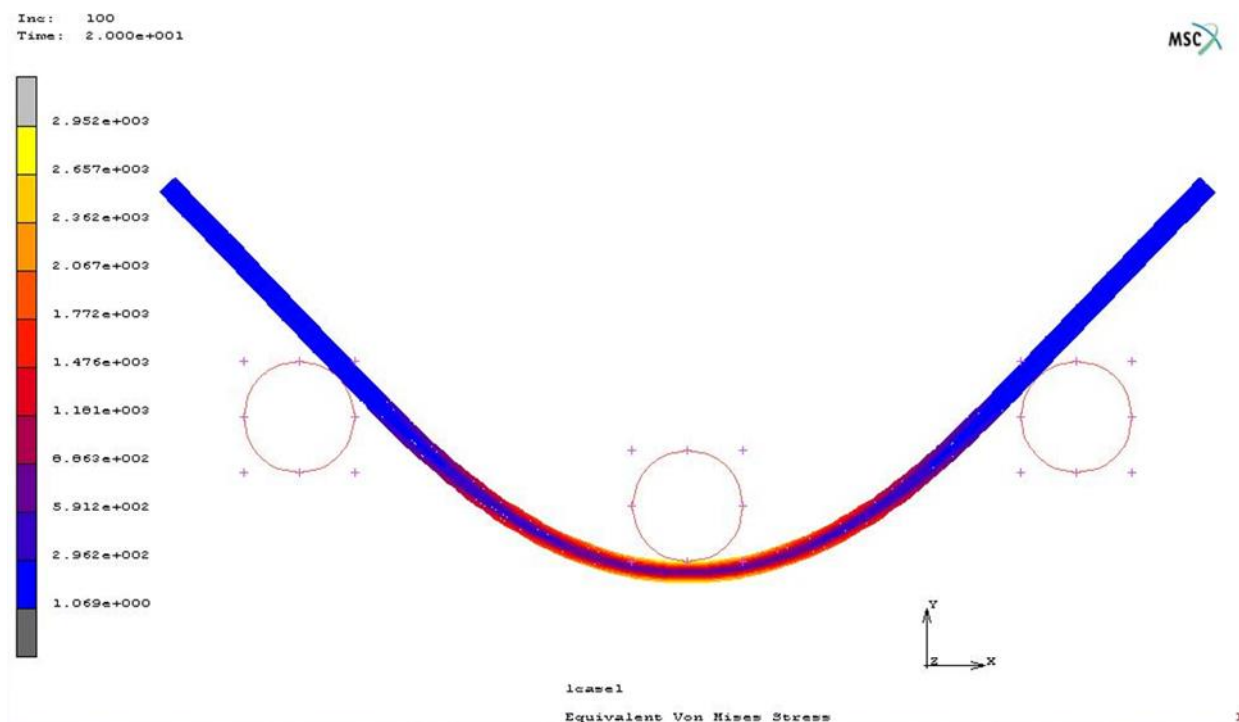
Početni komad aluminijskog lima AlMg3 je dimenzija 120 mm x 25 mm x 2 mm. Procedura ostaje slična kao i kod prethodna dva primjera samo je u ovom slučaju riječ o aluminijskom limu AlMg3. Za modul elastičnosti uvrštava se $E = 75\,000\text{ N/mm}^2$, te je krivulja tečenja materijala drugačija, slika 22.



Slika 22. Krivulja tečenja za materijal lima AlMg3

Kretanje žiga odvija se u istom vremenskom razdoblju kao i kod čeličnih limova DC01 i 20Mn5.

Na slici 23. prikazan je raspored naprežanja za aluminijski lim AlMg3.



Slika 23. Raspored naprezanja za aluminijski lim AlMg3

Rezultati dijagrama naprezanja za sve tri vrste materijala pokazuju zone minimalnih i maksimalnih naprezanja. Deformacija je najmanja na rubovima lima koji su ujedno i najudaljeniji od kontakta žiga i matrice, a najveći iznos je na njihovom kontaktu. Neutralna linija također je vidljiva na slikama, na tom mjestu naprezanja su jednaka nuli.

9. ZAKLJUČAK

Tehnologijom oblikovanja metala deformiranjem ekonomično se proizvode masivni i teško opterećeni dijelovi. Pravilnom primjenom različitih tehnoloških uvjeta može se utjecati na tijek deformacije metala. Savijanje kao jedan od najčešćih postupaka oblikovanja metala deformiranjem osim što se koristi kao samostalna metoda ima mogućnost i kombiniranja sa drugim procesima oblikovanja. Pojava koja se javlja tijekom procesa savijanja tj. nakon prestanka djelovanja opterećenja je elastični povrat. Elastični povrat predstavlja jedan od značajnih problema prilikom procesa savijanja. Brojni faktori kao što su debljina materijala, svojstva materijala, kut tiskača, radijus tiskača, brzina tiskača, normalna anizotropija utječu na pojavu i iznos elastičnog povrata. Provedbom eksperimentalne i proračunske analize utvrđeno je da je najveći iznos sile kod najčvršćeg materijala, te je najveći elastični povrat postigao također najčvršći materijal. Mehanička svojstva materijala kao što je granica popuštanja i debljina materijala imaju velik utjecaj na veličinu elastičnog povrata. Numerička simulacija koja predstavlja idealno stanje materijala pomoću metode konačnih elemenata daje raspored naprezanja tj. područja minimalnih i maksimalnih naprezanja te položaj neutralne linije što uvelike olakšava sam tijek procesa oblikovanja.

LITERATURA

- [1] Musafia, B.: Obrada metala plastičnom deformacijom, Svjetlost, Sarajevo, 1970.
- [2] Grizelj, B.: Oblikovanje metala deformiranjem, Slavonski Brod, 2002.
- [3] Math, M.: Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1999.
- [4] Povrzanović, A.: Obrade metala deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [5] https://www.thelibraryofmanufacturing.com/sheetmetal_bending.html pristup :siječanj 2022.
- [6] https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2018000300333 pristup: siječanj 2022.
- [8] Vitez, I., Oruč, M., Sunulahpašić, R.: Ispitivanje metalnih materijala, Zenica, 2006.
- [9] Rana, S., Fanguero, R.: Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, Singapur, 2016.
- https://books.google.hr/books?id=wNByCwAAQBAJ&pg=PA60&lpg=PA60&dq=en+i+so+14130+1997+3+points+bending&source=bl&ots=k2T_WYhrqJ&sig=ACfU3U1SAN8j8m4nVnZ96QPkvMtAVOIMPA&hl=hr&sa=X&ved=2ahUKEwiqitjG6tf1AhXSQEDHYC_AVoQ6AF6BAgPEAM#v=onepage&q&f=false pristup: siječanj 2022.
- [10] <https://blog.blackadvtech.com/accounting-for-springback-in-sheet-metal-bending> pristup: veljača 2022.
- [11] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/bending-basics-the-hows-and-whys-of-springback-and-springforward> pristup: veljača 2022.
- [12] <https://www.ijert.org/analysis-of-springback-variation-in-v-bending> pristup: veljača 2022.
- [13] <https://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming> pristup: veljača 2022.
- [14] <https://www.ijert.org/a-review-on-springback-in-metal-forming> pristup: veljača 2022.
- [15] https://www.researchgate.net/figure/Draw-bend-test-geometry-a-specimen-shape-after-unloading-and-b-original-and-final_fig2_262143065 pristup: veljača 2022
- [16] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909005044> pristup: veljača 2022.

-
- [17] https://www.researchgate.net/publication/332291075_Factors_Affecting_on_Springback_in_Sheet_Metal_Bending_A_Review pristup: veljača 2022
- [18] <https://www.theworldmaterial.com/din-en-10130-dc01-steel-1-0330-material-datasheet/> pristup: veljača 2022.
- [19] <https://steelgr.com/Steel-Grades/Carbon-Steel/din-1-1133.html> pristup: veljača 2022.
- [20] <http://referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/142/cr-1-1-0-18-almg3-5754-o-h111?lang=en> pristup: veljača 2022.

PRILOZI

I. CD-R disc