

# KONSTRUKCIJSKE I FUNKCIONALNE ZNAČAJKE ELEMENATA KONSTRUKCIJA NA PRIMJERU SUSTAVA ZA SAVIJANJE OPŠIVNIH LIMOVA

---

**Kovačević, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Slavonski Brod / Sveučilište u Slavanskom Brodu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:262:041318>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-06**



*Repository / Repozitorij:*

[repository.unisb.hr](https://repository.unisb.hr) - [The digital repository is a digital collection of works by the University of Slavonski Brod.](#)



SVEUČILIŠTE U SLAVONSKOM BRODU  
STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

**ZAVRŠNI RAD**  
sveučilišnog preddiplomskog studija

**Ivan Kovačević**  
0035227135

Mentor završnog rada:  
**prof.dr.sc. Željko Ivandić**

Slavonski Brod, 2024.

## I. AUTOR

Ime i prezime: Ivan Kovačević  
Mjesto i datum rođenja: Zagreb, 11.12.2000.  
Adresa: Sisačka ulica 41, 10417, Buševac

**STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU**

## II. ZAVRŠNI RAD

Naslov: Konstrukcijske i funkcionalne značajke elemenata konstrukcija na primjeru sustava za savijanje opšavnih limova

Naslov na engleskom jeziku: Constructional and functional features of structural elements in the example of a system for bending sheet metal coverings

Ključne riječi: lim, opšavni lim

Ključne riječi na engleskom jeziku: tin, sheet metal

Broj stranica:52 slika: 39 tablica:6 priloga:1 bibliografskih izvora: 23

Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen: STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

Stečen akademski naziv: **Sveučilišni prvostupnik inženjer strojarstva**

Mentor rada: prof.dr.sc. Željko Ivandić

Obranjeno na **Strojarskom fakultetu** u Slavonskom Brodu

dana 26. rujna 2024.

Oznaka i redni broj rada: SFSB-PSS-82/2024

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 2023-2024

Pristupnik: **Ivan Kovačević (0035227135)**  
Studij: Strojarstvo

Zadatak: **KONSTRUKCIJSKE I FUNKCIONALNE ZNAČAJKE ELEMENATA  
KONSTRUKCIJA NA PRIMJERU SUSTAVA ZA SAVIJANJE OPŠIVNIH  
LIMOVA**

Opis zadatka:

1. UVOD
2. KONSTRUKCIJSKE, MATERIJALNE I FUNKCIONALNE ZNAČAJKE SUSTAVA ZA SAVIJANJE
3. GENERIRANJE KONCEPCIJSKOG RJEŠENJA SUSTAVA ZA SAVIJANJE OPŠIVNOG LIMA
4. PRORAČUN I OBLIKOVANJE KARAKTERISTIČNIH DETALJA
5. ZAKLJUČAK
6. LITERATURA

Zadatak uručen pristupniku: 10. siječnja 2024.

Rok za predaju rada: 10. srpnja 2024.

Mentor:



prof. dr. sc. Željko Ivandić



Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



prof. dr. sc. Ivica Kladarić

## IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, koristeći se vlastitim znanjem, literaturom i provedenim eksperimentima.

U radu mi je pomogao savjetima i uputama mentor završnog rada prof.dr.sc. Željko Ivandić te mu se iskreno zahvaljujem.

Ivan Kovačević

## SAŽETAK

U ovome završnom radu generirano je konceptno varijantno rješenje alata za valjanje, savijanje i rezanje opšavnih limova. Cilj rada je generirati što kompaktniju, lakšu i precizniju izvedbu alata.

U uvodnom dijelu je opisana tehnologija metala deformiranjem, posebno savijanje lima, gdje se koristi, koje strojeve i alate možemo koristiti za taj postupak obrade metala.

Drugo poglavlje detaljno opisuje postupke savijanja lima te navodi alate na tržištu koji služe kao podloga za generiranje koncepata.

U trećem poglavlju je razrađeno koncipiranje, odnosno funkcijska dekompozicija i morfološka matrica koja služi za generiranje koncepta za daljnju razradu.

Posljednje poglavlje pruža pregled tijeka oblikovanja i proračuna kritičnih dijelova alata koje dimenzioniramo te konačne dimenzije koje su prikazane u priloženoj tehničkoj dokumentaciji.

## **SUMMARY**

In this final thesis, a conceptual variant solution for a tool designed for rolling, bending, and cutting sheet metal coverings was generated. The aim of the thesis is to produce a compact, lightweight, and precise tool design.

The introductory section describes the technology of metal forming, particularly sheet metal bending, its applications, and the machines and tools that can be used for this metal processing method.

The second chapter provides a detailed description of the sheet metal bending processes and lists the tools available on the market that serve as a foundation for generating concepts.

The third chapter elaborates on the conceptualization, including functional decomposition and a morphological matrix used for generating the concept for further development.

The final chapter offers an overview of the design process and calculations of the critical parts of the tool, detailing their dimensions, which are presented in the attached technical documentation.

## PREGLED VELIČINA, OZNAKA I JEDINICA

D	- promjer cilindra [mm]
s	- debljina lima [mm]
Rp0,2 (Re)	- granica tečenja [N/mm <sup>2</sup> ]
Fa	- sila donjeg valjka [N],
F	- sila srednjeg valjka [N]
φ	- kut kružnog savijanja [°]
W <sub>y</sub>	- plastični moment otpora savijanju [mm <sup>3</sup> ]
M <sub>s</sub>	- moment za savijanje obratka [Nm]
φ	- kut kružnog savijanja [°]
lv	- udaljenost između gornjeg i srednjeg valjka [mm]
d	- promjer valjka [mm]
μ	- faktor trenja između valjka i obratka
r	- polumjer donjeg valjka [mm]
T <sub>v</sub>	- moment trenja [Nm]
T <sub>lmax</sub>	- moment pogonskog zupčanika [Nm]
i <sub>z</sub>	- prijenosni omjer zupčanog para
η <sub>KL</sub>	- iskoristivost kliznih ležajeva
η <sub>z</sub>	- iskoristivost zupčanog para
m	- modul [mm]
Z <sub>1</sub>	- broj zubi zupčanika
λ	- faktor odnosa širine zuba i modula za različite pogonske uvjete
σ <sub>FP</sub>	- dopušteno naprezanje korijena zuba [N/mm <sup>2</sup> ]
σ <sub>Flim</sub>	- Orijentacijska vrijednost dinamičke izdržljivosti [N/mm <sup>2</sup> ]
Y <sub>F</sub>	- faktor oblika
Y <sub>ε</sub>	- faktor učešća opterećenja,
K <sub>Fα</sub>	- faktor raspodjele opterećenja na pojedine zube pri proračunu opteretivosti korijena
S <sub>F</sub>	- potrebni faktor sigurnosti
GD <sub>z</sub>	- zagonski moment zupčanika [Nmm <sup>2</sup> ]
d	- diobeni promjer [mm]
d <sub>a</sub>	- tjemeni promjer [mm]
d <sub>w</sub>	- kinematski promjer [mm]
d <sub>f</sub>	- podnožni promjer [mm]
d <sub>b</sub>	- osnovni (temeljni) promjer [mm]
α <sub>w</sub>	- zahvatni kut [°]
ε <sub>α</sub>	- stupanj prekrivanja
c	- tjemena zračnost [mm]
j <sub>min</sub>	- minimalna kružna zračnost [μm]
j <sub>max</sub>	- maksimalna kružna zračnost [μm]
A <sub>w,d</sub>	- donja omjera odstupanja mjere preko nekoliko zubi [μm]
A <sub>w,g</sub>	- gornja omjera odstupanja mjere preko nekoliko zubi [μm]
F <sub>wt</sub>	- obodna sila [N]
q <sub>L</sub>	- korektivni faktor
σ <sub>F</sub>	- Naprezanje na savijanje u korijenu zuba [N/mm <sup>2</sup> ]
τ <sub>uDI</sub>	- Trajna dinamička čvrstoća za uvojno naizmjenično opterećenje [N/mm <sup>2</sup> ]
R <sub>m</sub>	- vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
σ <sub>sDN</sub>	- Trajna dinamička čvrstoća za čisto naizmjenično promjenljivo naprezanje pri savijanju [N/mm <sup>2</sup> ]
M <sub>ekv</sub>	- ekvivalentan moment vratila [Nmm]
C	- dinamička opterećenost ležaja [N]



$L_{10h}$	- nazivni vijek ležaja [h]
$n_1$	- brzina vrtnje vratila [ $s^{-1}$ ]
Pa	- dinamičko ekvivalentno opterećenje ležaja [N]
$\tau_a$	- naprezanje na odrez [ $N/mm^2$ ]
A	- površina presjeka zatika [ $mm^2$ ]
I	- aksijalni moment tromosti [ $mm^4$ ]

# SADRŽAJ

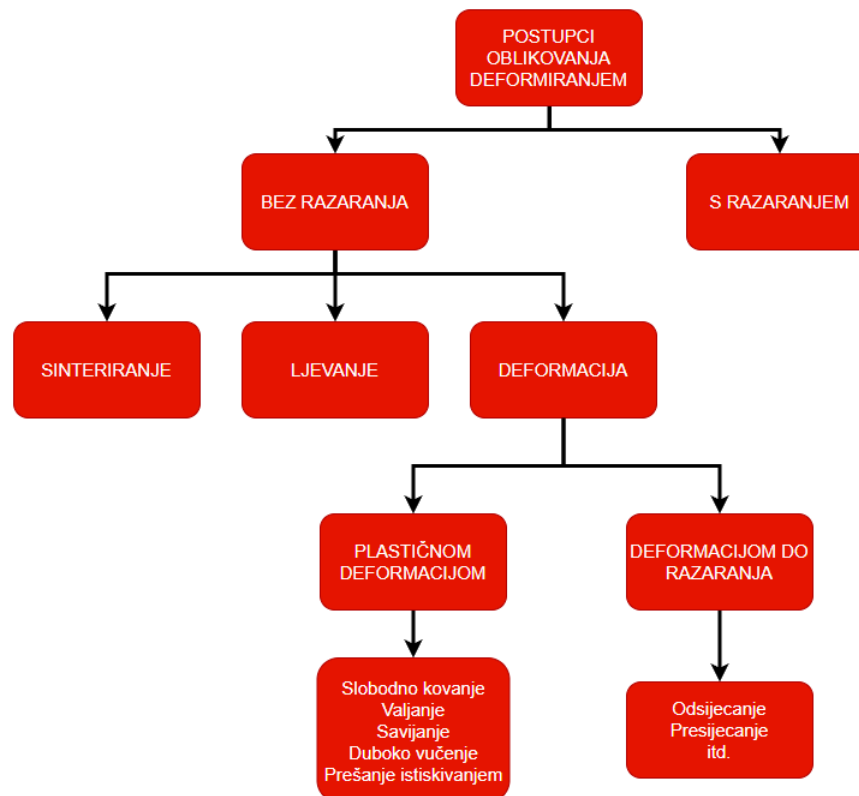
## PREGLED VELIČINA, OZNAKA I JEDINICA

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KONSTRUKCIJSKE, MATERIJALNE I FUNKCIONALNE ZNAČAJKE SUSTAVA ZA SAVIJANJE .....</b>	<b>3</b>
2.1. Postupci oblikovanja deformiranja savijanjem .....	3
2.1.1. Kružno savijanje lima.....	3
2.1.2. Kutno savijanje lima.....	4
2.1.3. Profilno savijanje lima.....	6
2.1.4. Proces obrade lima užljebljenjem .....	7
2.1.5. Postupak oblikovanja lima odsijecanjem .....	8
2.2. Analiza postojećih proizvoda .....	9
2.2.1. KAKA Industrial 3-in-1/40 .....	10
2.2.2. MATTHYS universal machine 3 in 1 - 1016 MM.....	11
2.2.3. Bernardo 3 in 1 - 1060 Profi.....	12
2.2.4. CLARKE SBR760 3 in 1 sheet metal machine .....	13
2.2.5 Usporedba proizvoda.....	14
2.3 Zaključak analize tržišta.....	14
<b>3.GENERIRANJE KONCEPCIJSKOG RJEŠENJA SUSTAVA ZA SAVIJANJE OPŠAVNOG LIMA.....</b>	<b>15</b>
3.1 Koncipiranje .....	15
3.1.1 Funkcijska dekompozicija .....	16
3.1.2 Morfološka matrica .....	18
3.2 Koncepti .....	20
3.2.1 Prvi koncept .....	20
3.2.2. Drugi koncept .....	21
3.3 Odabir koncepta.....	22
<b>4. PRORAČUN I OBLIKOVANJE KARAKTERISTIČNIH DETALJA .....</b>	<b>23</b>
4.1. Prvi dio proračuna.....	23
4.1.1. Proračun potrebne sile za savijanje lima u cilindre.....	23
4.1.2. Proračun zupčanika .....	26
4.1.3 Proračun vratila za valjanje .....	31
4.1.4. Proračun ležajeva .....	38
4.1.5. Proračun poprečnog zatika .....	39
4.2. Drugi dio proračuna .....	40
4.2.1. Proračun sile za kutno savijanje.....	40
4.2.2. Proračun sile za rezanje .....	42
4.2.3. Mehanizam ekscentra i kipa .....	43
4.2.4. Dimenzioniranje ulaznog vratila.....	44

4.2.5. Proračun ležajeva .....	47
4.2.6. Proračun pera na bočni tlak .....	48
4.3 Proračun ručice .....	48
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>50</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>51</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>52</b>

## 1. UVOD

Tehnologija oblikovanja metala deformiranjem ima značajnu ulogu u proizvodnoj industriji, kako u masovnoj tako i u maloserijskoj proizvodnji. Ovaj postupak omogućava promjenu oblika i dimenzija proizvoda, s ili bez nastanka odvojenih čestica. Različite metode postižu specifična fizička i mehanička svojstva. Podjela postupaka oblikovanja metala deformiranjem definirana je u normi DIN 8582.



Slika 1. Podjela postupaka DIN 8582

U ovom slučaju zanimljiv je postupak savijanja lima. Savijanje limova je postupak obrade metala bez stvaranja odvojenih čestica, kod kojeg se u poprečnom presjeku unutrašnji dio skraćuje i opterećen je na tlak, dok se vanjski dio produljuje i opterećen je na vlak. Savijanje limova se može podijeliti prema: 1.) Načinu savijanja, 2.) Obliku lima koji se formira, 3.) Vrsti lima. Kod načina savijanja razlikujemo ručno gdje koristimo ručne alate poput kliješta, hidrauličko gdje savijamo veće limove s većom preciznošću, električno gdje su većinom automatizirana postrojenja savijačica, te CNC gdje su moguća automatizirana ponavljanja identičnih savijanja s visokom preciznošću[8].



Slika 2. Ručni višefunkcionalni stroj za savijanje limova [5]

Oblici limova koji se formiraju mogu biti ravni, pod kutom ili u profilu. Vrste limova bi jednostavno mogli podijeliti na tanke i debele. Savijanje opšavnih limova je proces u kojim se savijeni limovi koriste za oblaganje ili zatvaranje raznih konstrukcija poput sobnih panela ili krovova te dimnjaka u cilju zaštite ili estetskog poboljšanja. Sustavi za savijanje opšavnih limova su strojevi kojima limove savijamo da bi dobili željeni oblik[8].



Slika 3. Opšavni lim na dimnjaku[6]

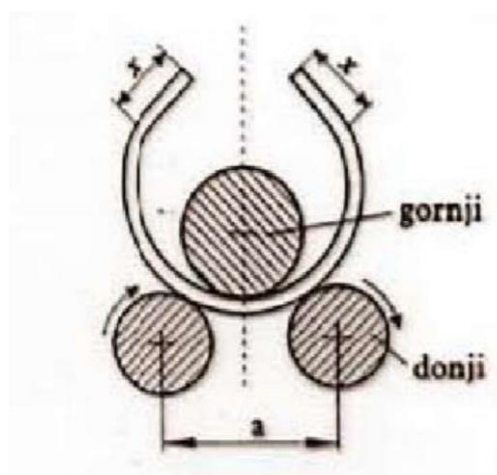
## 2. KONSTRUKCIJSKE, MATERIJALNE I FUNKCIONALNE ZNAČAJKE SUSTAVA ZA SAVIJANJE

### 2.1. Postupci oblikovanja deformiranja savijanjem

#### 2.1.1. Kružno savijanje lima

Cilj kružnog savijanja je postizanje potpuno ili djelomično zatvorenih oblika poput cilindra ili konusa. Ovi proizvodi nalaze široku primjenu u strojarstvu i drugim industrijama, gdje mogu imati i dekorativnu funkciju. Ovim postupkom se najčešće savijaju cijevi i profili, ali se također mogu saviti limovi i trake bez poteškoća.

Postupak se odvija na posebno konstruiranim strojevima koje nazivamo savijačice koje su obično konstruirane s tri ili s četiri valjka, što je rjeđi slučaj. Kod konstrukcije stroja s tri valjka, dva donja valjka su pogonjena, dok je gornji valjak nije pogonjen te ima mogućnost pomicanja u vertikalnom smjeru u ovom slučaju (Slika 4). Savijanje je postupak koji se vrši u više prolaza i na taj način se završni promjer dobiva postupno. Nakon svakog takvog postupka gornji valjak se malo spusti. U tom slučaju krajevi lima ostaju nesavijeni i ravni na nekoj duljini te je zbog toga krajeve lima prije savijanja na valjcima potrebno pred saviti ili nakon nekoliko prolazaka krajeve spojiti postupkom zavarivanja te ponovno vratiti na savijačicu[2].



Slika 4. Savijačica s tri valjka[2]

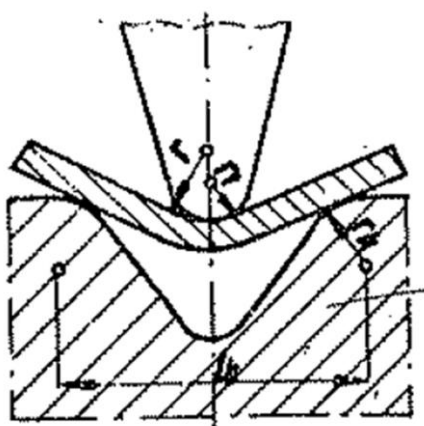
Na slici 5 je ručno pokretani alat za valjanje lima u cilindrični oblik s tri valjka.



Slika 5. Savijačica[7]

### 2.1.2. Kutno savijanje lima

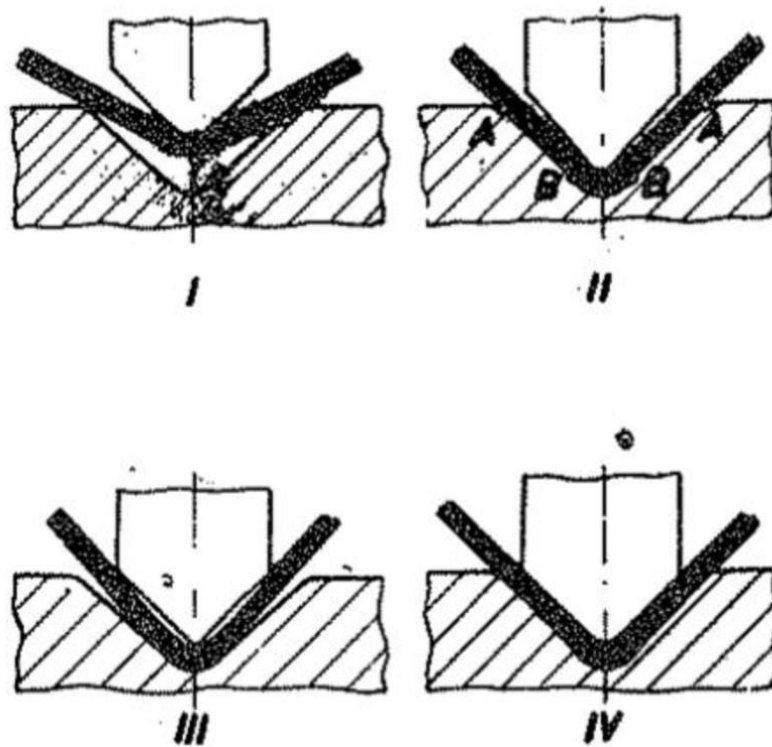
Lim se postavlja na alat i savija pod određenim kutom  $\alpha$ , koji je definiran oblikom matrice, dok ga žig tlači. Matrica, odnosno alat za savijanje, ima zaobljene prijelaze s polumjerom  $r_k$  i razmak između centara zaobljenja  $l_h$ . Profil matrice može biti izveden s pravim ili oštrim kutom. Kod slobodnog savijanja, polumjer žiga je uvijek manji ili jednak unutarnjem polumjeru savijenog komada.



Slika 6. Žig i matrica[2]

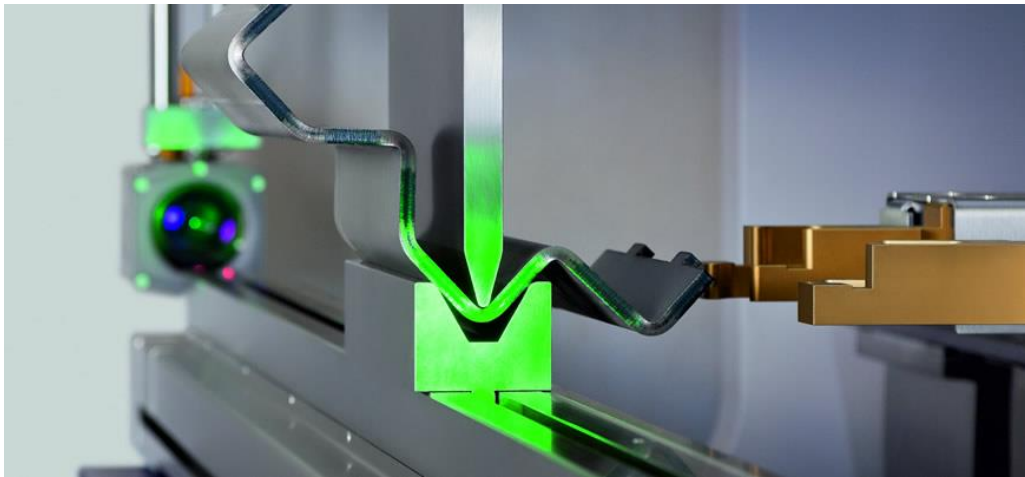
U procesu savijanja lima u oblik V-profila u alatu se mogu odrediti 4 faze (Slika 7).

U prvoj fazi (Slika 7,I) vrši se slobodno savijanje komada sve do trenutka kada ravni krakovi lima više nisu paralelni s bočnim stranama alata. Kada lim nalegne na alat počinje druga faza. Do tog trenutka razmak između oslonaca jednak je širini otvora alata, a polumjer savijanja veći je od polumjera žiga. U trenutku kada se ostvari kontakt između krakova lima i bočnih površina alata razmak između oslonaca se naglo smanjuje jer se mjesta dodira komada s alatom premještaju iz točaka A u točke B. Također se smanjuje unutrašnji polumjer komada od lima, kao i kut između krakova, te se krakovi zakreću sve dok se sa svojim krajevima ne oslone na bočne stranice žiga s čime je gotova treća faza. Nakon toga srednji dio plastično deformiranog komada produžava se savijanjem, a krakovi komada se ispravljaju te u tom periodu sila savijanja ponovno raste. U konačnom dijelu procesa, kada se ostvari kontakt između bočnih površina žiga, alata i kraka komada po cijeloj njihovoj dužini, srednji dio se oblikuje do polumjera žiga, a krakovi se ispravljaju sve dok potpuno ne nalegnu na bočne površine alata s čime završava četvrta faza[2].



Slika 7. Faze savijanja V-profila[2]

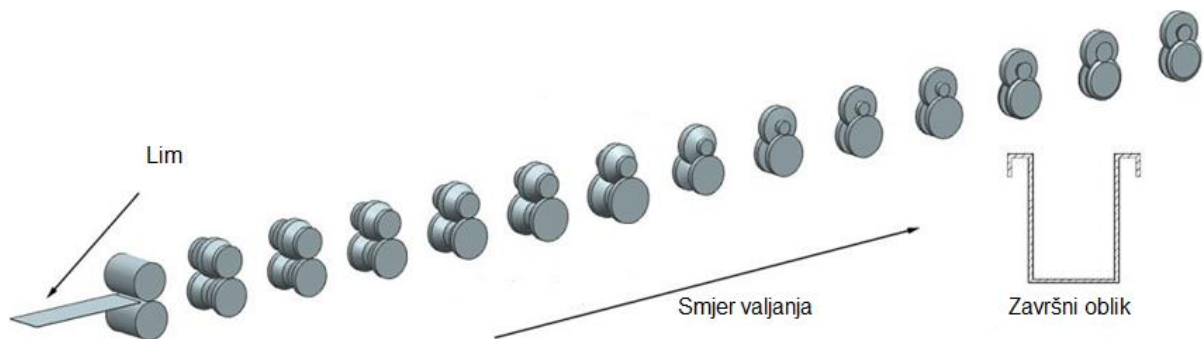




Slika 8. Stroj za savijanje lima pod kutom[8]

### 2.1.3. Profilno savijanje lima

Profilnim savijanjem limova izrađuju se proizvodi značajne dužine. Ovaj proces često uključuje višekutno savijanje. Lim prolazi kroz niz valjaka, pri čemu svaki valjak postepeno savija lim. Strojevi za profilno savijanje koriste potreban broj valjaka raspoređenih u seriju, koji se tijekom postupka rotiraju te su drugačije oblikovani, omogućujući kretanje profila i primjenu vanjske sile za oblikovanje materijala.



Slika 9. Valjci kod savijanja profila[9]

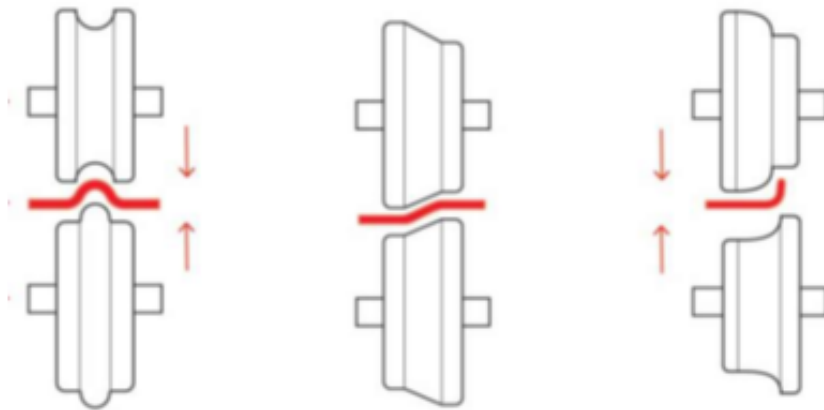
Profilno savijanje se također može izvesti savijanjem lima kroz niz koraka koristeći matricu i žig. Ova tehnika omogućuje postizanje željenog profila (Slika 10). Ovaj postupak se najčešće koristi u strojarstvu, brodogradnji i bravariji.



Slika 10. Žig kod profilnog savijanja[23]

#### 2.1.4. Proces obrade lima užljebljenjem

Užljebljenje lima je postupak oblikovanja metala kojim se profiliranim valjcima na metalnim pločama ili trakama stvaraju žljebovi ili utori. Ovaj postupak se primjenjuje kako bi se postigla željena funkcionalna i estetska svojstva, poput povećane čvrstoće, formiranje spojeva ili bolje prilagodbe dijelova u sklopovima.. Lim prolazi između profiliranih valjaka koji se rotiraju, formirajući tako utor u limu.



Slika 11. Mogući oblici matrica[10]

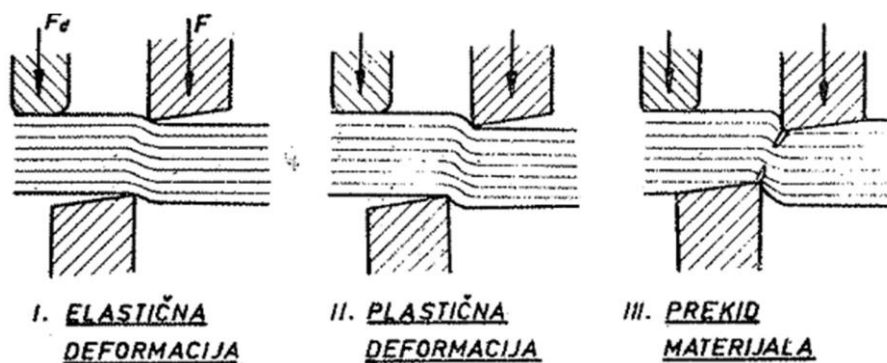


Slika 12. Ukasni žlijeb[10]

### **2.1.5. Postupak oblikovanja lima odsijecanjem**

Postupak oblikovanja lima odsijecanjem je mehanički postupak obrade materijala kojim se dio lima u potpunosti odvaja od ostatka. Odsijecanje se izvodi s pomoću noževa različitih oblika, specijaliziranih strojeva za odsijecanje, škarama ili alatom na prešama. Djelovanjem vanjskih sila koje generiraju mehanizmi škara, u materijalu se stvaraju naprezanja koja nadilaze njegovu čvrstoću, što rezultira odvajanjem materijala.

U toku procesa odsijecanja lima mogu se uočiti tri faze (Slika 13). U prvoj fazi, pod djelovanjem sile odsijecanja, naprezanje u materijalu ne prelazi granicu elastičnosti, te se zato ova faza naziva fazom elastičnih deformacija. Kako bi se spriječilo pomjeranje lima, on se pridržava držačem. Slijedi druga faza ili faza plastičnih deformacija, naprezanje u materijalu je veće od granice tečenja, ali manje od vlačne čvrstoće. U trećoj fazi naprezanje u materijalu dostiže vrijednost koja odgovara vlačnoj čvrstoći. Početak razdvajanja jednog dijela materijala od ostatka nastaje pri pojavi prve prskotine ispred rezne ivice noža. Ta faza naziva se faza prekida materijala i to je treća po redu faza. Početak prekida materijala zavisi od vrste i debljine materijala. Ako je materijal tvrdi i deblji, prije će doći do prekida jer nema veliku istežljivost[1].



Slika 13. Faze odsijecanja lima[2]



Slika 14. Nož za odsijecanje lima[12]

## 2.2. Analiza postojećih proizvoda

U ovoj analizi ćemo se fokusirati na postojeće proizvode za savijanje limova dostupne na tržištu. Pregledat ćemo njihove funkcionalne parametre i specifikacije istih te usporediti različite modele. Ključne specifikacije na kojima ćemo inzistirati uključuju mehanički prijenos, mogućnost višestrukih operacija oblikovanja lima te dovoljna veličina i masa stroja. S obzirom na to da će uređaj biti namijenjen maloj i srednjoj proizvodnji, težimo generiranju kompaktnog, jednostavnog konceptnog varijantnog rješenja. Analizirani su strojevi sljedećih tvrtki: KAKA Industrial, MATTHYS, Bernardo i Klutch.

### 2.2.1. KAKA Industrial 3-in-1/40

KAKA Industrial je tvrtka specijalizirana za proizvodnju visokokvalitetne opreme za oblikovanje metala. Smještena u Duluthu, Georgia. KAKA Industrial nudi širok spektar strojeva i alata kao što su strojevi za savijanje cijevi i profila, škare za lim, valjci za savijanje lima te univerzalne savijače. Fokus kod ove tvrtke je na alat koji kombinira funkcije škara, savijačice i valjka za obradu niskougličnog lima do debljine od 1 mm[13].



Slika 15. KAKA Industrial 3-IN-1/40[13]

Tablica 1. Tehničke karakteristike - KAKA Industrial 3-IN-1/40[13]

Funkcionalni parametar	Specifikacija
Efektivna širina	40" (1000 mm)
Maksimalna debljina rezanja	1 mm niskouglični lim
Maksimalna debljina savijanja	1 mm niskouglični lim
Maksimalna debljina valjanja	1 mm niskouglični lim
Minimalni unutrašnji promjer valjka	Φ43 mm
Dimenzije stroja (D×Š×V)	1200×715×550 mm <sup>2</sup>
Neto težina stroja	200 kg

### 2.2.2. MATTHYS universal machine 3 in 1 - 1016 MM

Matthys je belgijska tvrtka specijalizirana za proizvodnju i distribuciju visokokvalitetne opreme za obradu lima i metala. Sjedište tvrtke nalazi se u Vichte-u, Belgija. Matthys nudi širok spektar proizvoda, uključujući alate i strojeve za oblikovanje, rezanje, savijanje i obradu metala. Pažnja kod ove tvrtke je na alat universal machine 3 in 1 - 1016 MM koji također kombinira funkciju savijačice, škara i valjka za obradu limova[14].



Slika 16. MATTHYS universal machine 3 in 1 - 1016 MM[14]

Tablica 2. Tehničke karakteristike MATTHYS universal machine 3 in 1 - 1016 MM[14]

Specifikacija	Detalji
Maks. Radna Širina	1016 mm
Maks. Kapacitet	1.0 mm (kapacitet rezanja 0.8 mm)
Promjer Valjaka	43 mm
Maks. Kut Savijanja	90°
Segmenti za Savijanje	10/15/15/20/30/40/80/160/320/320 mm
Težina	200 kg
Dimenzije Pakiranja	135 x 45 x 68 cm
Funkcije	Valjanje, Savijanje, Rezanje
Sustav Podrške	Podrška za lim sprijeda, podesivi vodič straga
Zahtjevi za Montažu	Potrebno je pričvrstiti na radni stol ili opcionalno postolje
Automatsko Stezanje	Da, tijekom rezanja

### 2.2.3. Bernardo 3 in 1 - 1060 Profi

Bernardo je tvrtka specijalizirana za proizvodnju i distribuciju visokokvalitetnih strojeva za obradu metala i drva. Osnovana je 1979. godine u Linzu, Austrija, kao maloprodajna tvrtka, a kasnije se proširila na veleprodaju. Od ove tvrtke uređaj koji sam odabrao je Bernardo 3 in 1 - 1060 Profi koji je malo teži nego ostali alati u razmatranju[15].



Slika 17. Bernardo 3 in 1 - 1060 Profi[15]

Tablica 3. Tehničke karakteristike Bernardo 3 in 1 - 1060 Profi[15]

Specifikacija	Detalji
Radna dužina	1060 mm
Maks. debljina lima (400 N/mm <sup>2</sup> )	1,0 mm
Kut savijanja	90°
Promjer valjka	42 mm
Radna visina s postoljem	770 mm
Širina	1450 mm
Dubina	760 mm
Visina	690 mm (bez postolja)
Težina cca	320 kg



#### 2.2.4. CLARKE SBR760 3 in 1 sheet metal machine

Clarke International je britanska tvrtka osnovana 1969. godine koja se specijalizirala za proizvodnju i distribuciju ručnih i električnih alata te opreme za radionice, vrtove i garaže. Tvrtka nudi ručne alate, električne alate, kompresore, generatore, opremu za zavarivanje, pumpe za vodu. Proizvod koji nas interesira je CLARKE SBR760 jer također ima 3 funkcije ali je malo manji u dimenzijama[16].



Slika 18. CLARKE SBR760 3 in 1 sheet metal machine[16]

Tablica 4. Tehničke karakteristike CLARKE SBR760 3 in 1 sheet metal machine[16]

Specifikacija	Detalji
Težina	126 kg
Širina/Dubina/Visina	905 x 390 x 565 mm
Kapaciteti	
Maks. širina radnog komada	760 mm
Maks. debljina radnog komada	1 mm
Minimalni povratni zavoj (Pan/Box Brake)	9 mm
Maks. visina strane pri 90° (Pan/Box Brake)	105 mm
Minimalni promjer cilindra (Slip Roll)	39 mm
Veličine žice (s lijeva na desno) (Slip Roll)	3.97 mm, 4.37 mm, 5.56 mm



## 2.2.5 Usporedba proizvoda

Specifikacije u tablicama prikazuju da se alati ne razlikuju puno, razlika je u dimenzijama što i utječe na težinu, sukladno tome bi mogli zaključiti da bi alat 1 bio najstabilniji i pogodan za velike radne komade, alati 2 i 3 za srednje velike komade, a alat 4 ima prednost u tome što bi mogao biti prenosiv, ali s ograničenjem u veličini radnog komada.

Tablica 5. Analizirani proizvodi

Specifikacija	Alat 1 (Matthys)	Alat 2 (Bernardo)	Alat 3 (KAKA)	Alat 4 (Clarke)
Težina	320 kg	200 kg	200 kg	126 kg
Širina	1450 mm	1016 mm	1016 mm	905 mm
Dubina	760 mm	715 mm	715 mm	390 mm
Visina	770 mm	550 mm	550 mm	565 mm
Maks. radna širina	1060 mm	1016 mm	1016 mm	760 mm
Maks. debljina radnog komada	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
Minimalni povratni zavoj	-	-	-	9 mm
Maks. visina strane pri 90°	-	-	-	105 mm
Promjer valjaka	43 mm	43 mm	43 mm	39 mm

## 2.3 Zaključak analize tržišta

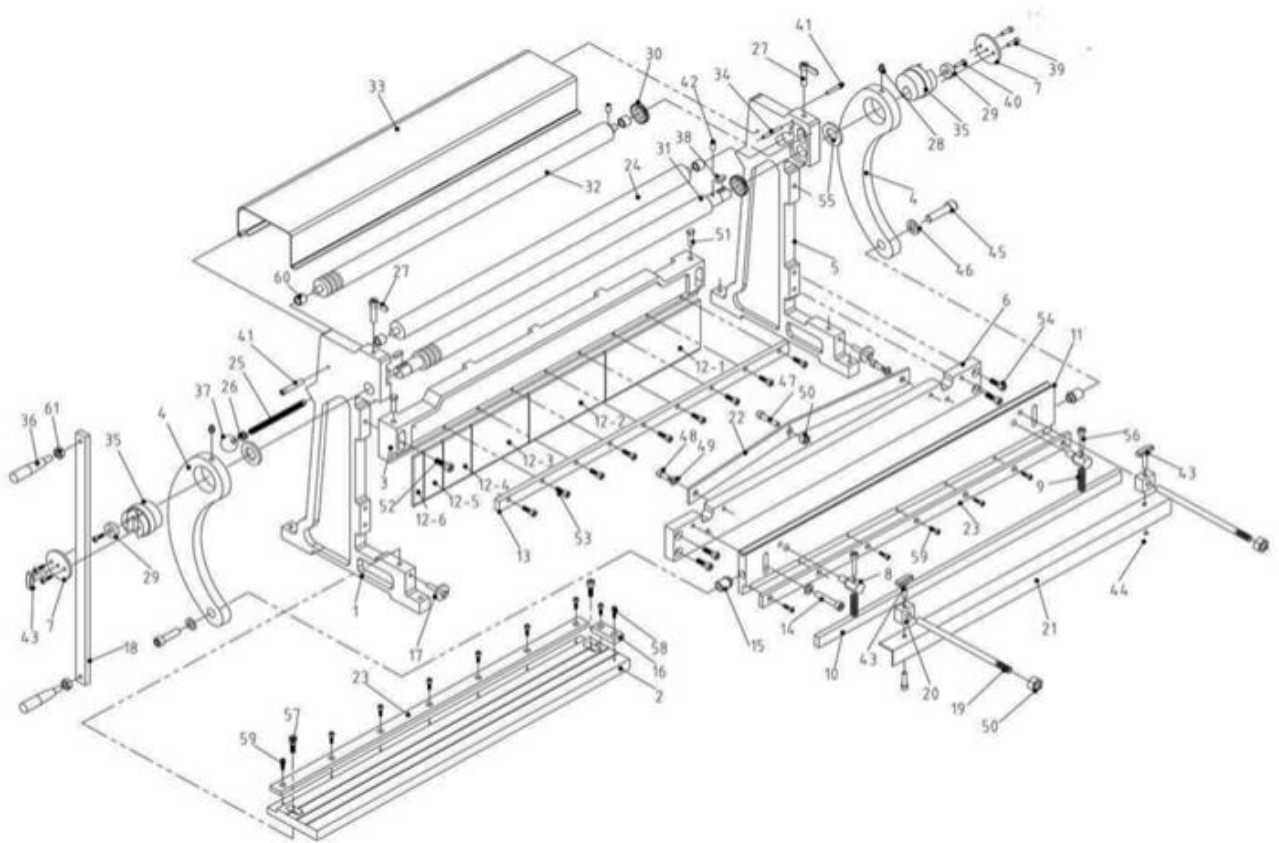
Analiza tržišta alata za obradu metala otkriva različite specifikacije koje utječu na njihovu prikladnost za različite industrijske primjene. S obzirom na to da većina alata ima tri funkcije i slična konstrukcijska rješenja, naglasak će biti na te tri funkcije (valjanje, kutno savijanje i rezanje). Također ćemo raditi na smanjenju mase uređaja kako bi se olakšala manipulacija, posebno za upotrebu u maloj i srednjoj proizvodnji.

### 3.GENERIRANJE KONCEPCIJSKOG RJEŠENJA SUSTAVA ZA SAVIJANJE OPŠAVNOG LIMA

#### 3.1 Koncipiranje

U fazi koncipiranja prikupljamo što više podataka o proizvodu kojeg razvijamo, uključujući njegove specifikacije, ideje kojima bi mogli poboljšati proizvod. S tim prikupljenim podacima i znanjem generiramo konceptno varijantno rješenje proizvoda, te na kraju i konačan proizvod. Početne specifikacije za daljnju razradu uređaja su:

1. mogućnost valjanja
2. mogućnost savijanja
3. mogućnost rezanja
4. što manja masa



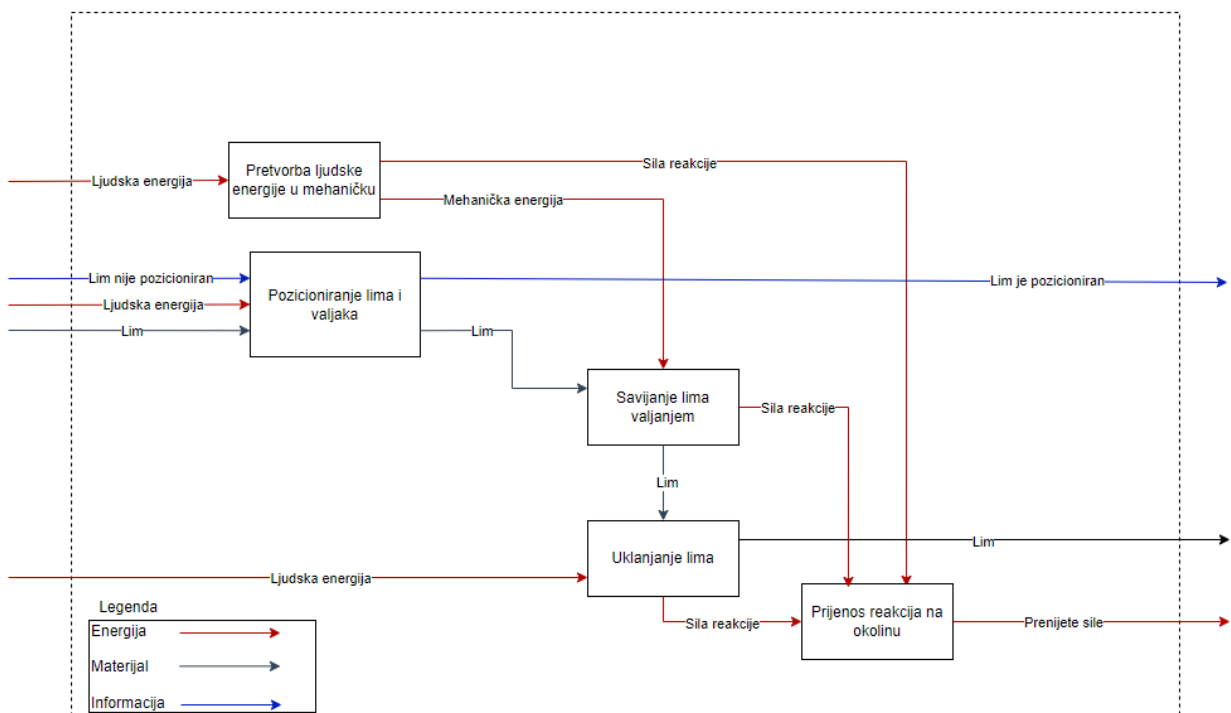
Slika 19. Eksplozirani prikaz sklopnog crteža[13]

Ovim eksploziranim prikazom sklopnog crteža je prikazan položaj i raspored svih elemenata alata odvojenih jedan od drugog, što omogućuje detaljan pregled svake komponente i načina na koji se one međusobno povezuju, ali u primjeru ovog alata neće se svi prikazati. Bitni dijelovi alata su

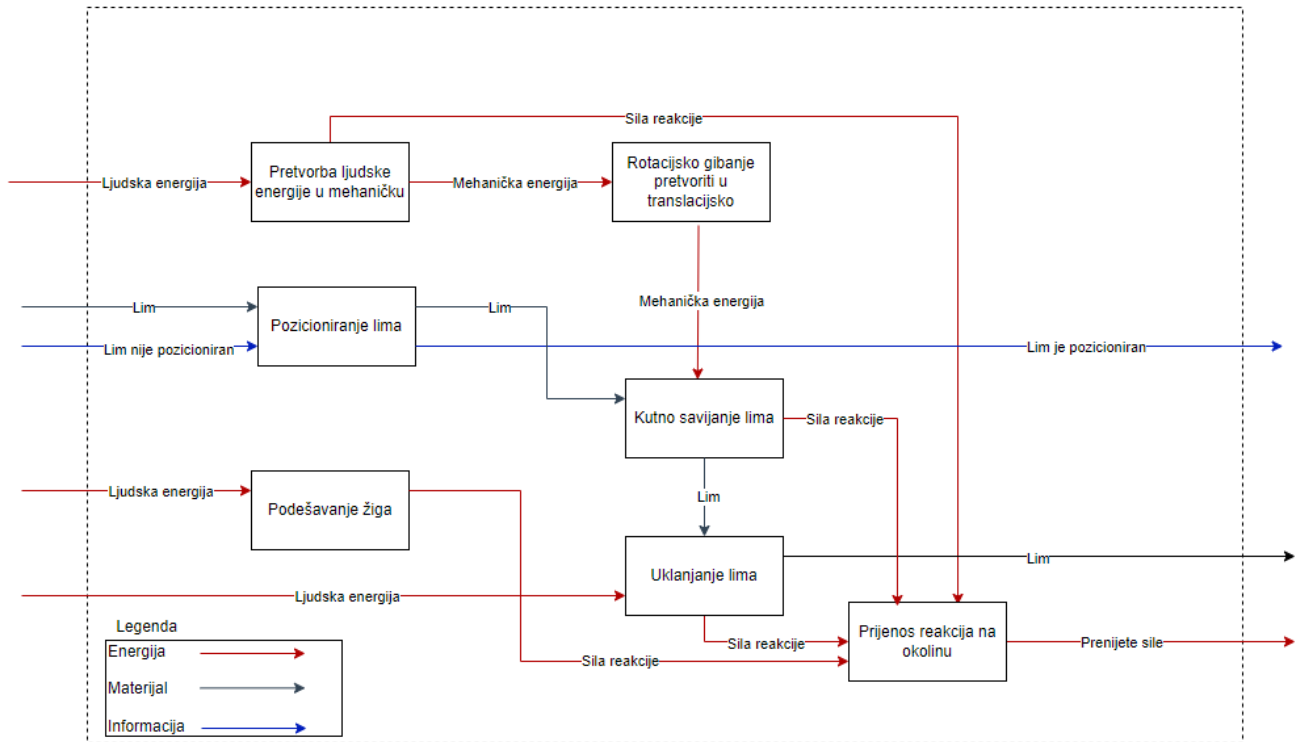
ručke i poluge koje se koriste za upravljanje uređajem i primjenu sile potrebne za savijanje ili rezanje metala. Gornji i donji valjci koji omogućuju valjanje limova te su sa nosačem povezani i podržani valjkastim ležajevima. Promjenjivi žig i matrica koji omogućuju njegovo savijanje pod određenim kutom te oštrice za precizno rezanje metalnih limova.

### 3.1.1 Funkcijska dekompozicija

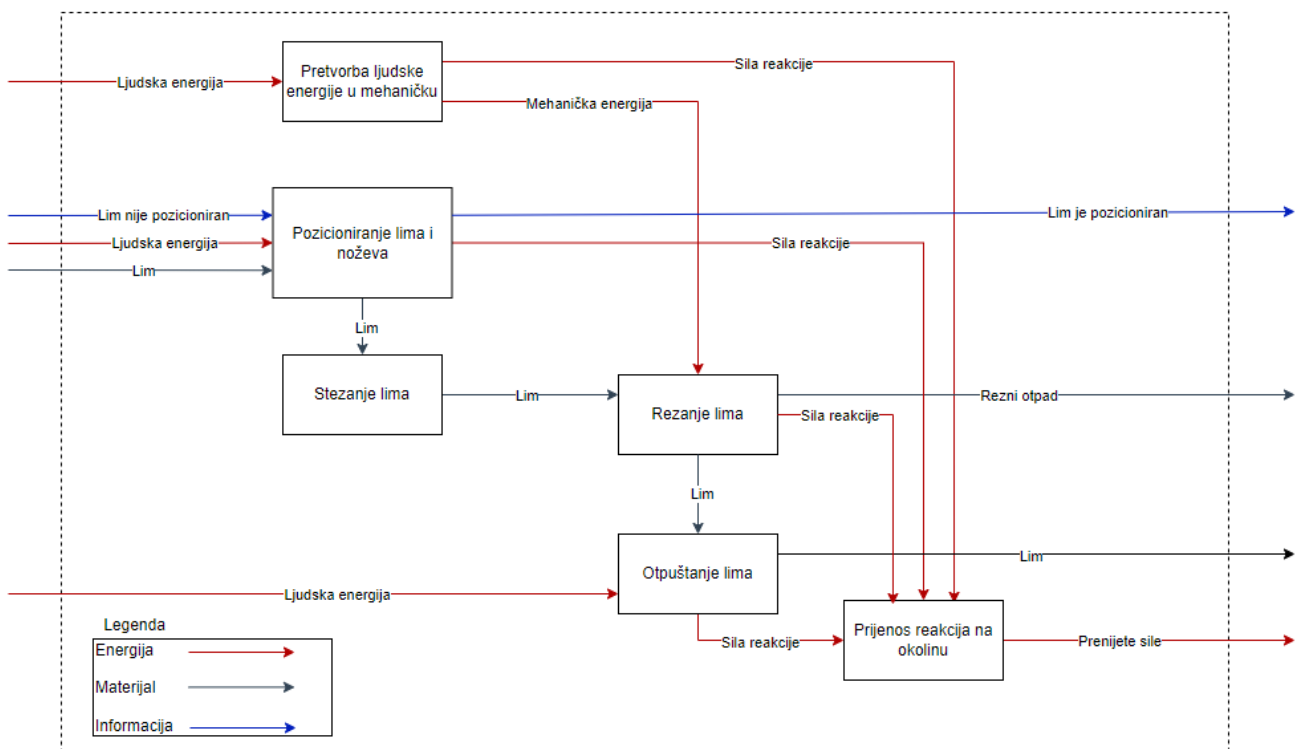
Funkcijska dekompozicija je postupak kojim sustav rastavimo na jednostavne funkcije kako bi svakom podsustavu, sklopu ili komponenti definirali svrhu u sustavu. Korištenjem "black box" modela svakom pojedinačnom podsustavu se precizno opisuju promjene stanja materijala, signala i energije. Za ovaj alat funkcijsku dekompoziciju prikazujemo u tri različita podsustava: podsustav za valjanje, podsustav za kutno savijanje i podsustav za rezanje. Svaki od tih podsustava koristi zajedničke dijelove alata na specifičan način kako bi obavljala različite zadatke. Pretpostavlja se da korisnik nikada neće koristiti više od jednog podsustava istovremeno, što znači da se funkcije svake tehnologije moraju razdvojiti kako bi se izbjegle komplikacije i osigurala optimalna upotreba uređaja.



Slika 20. Funkcijska dekompozicija valjanja lima








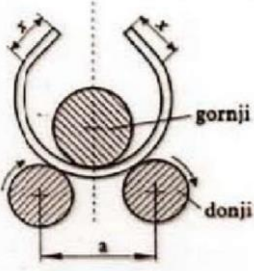
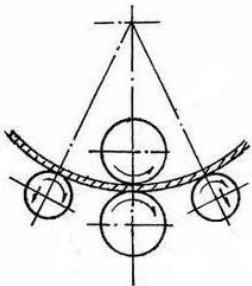

Slika 21. Funkcijska dekompozicija kutnog savijanja lima

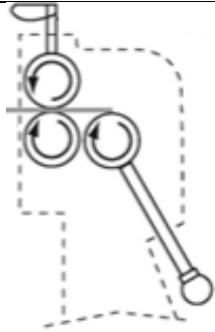
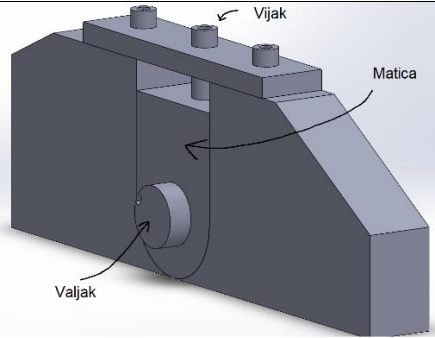

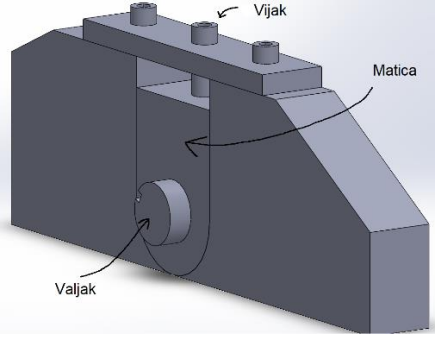
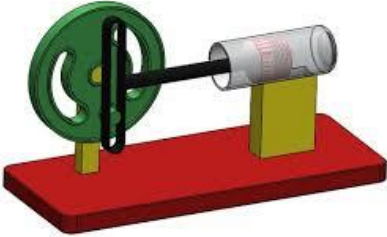
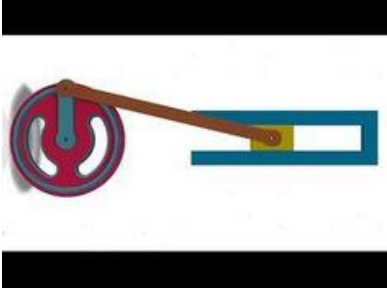
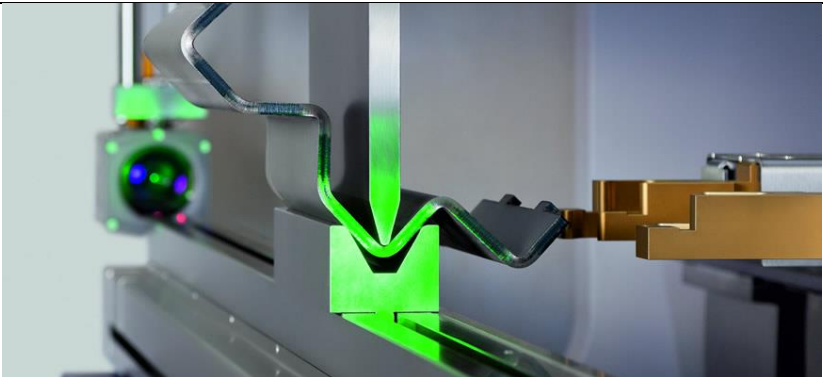


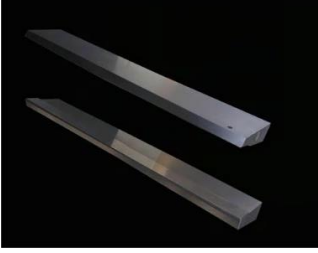
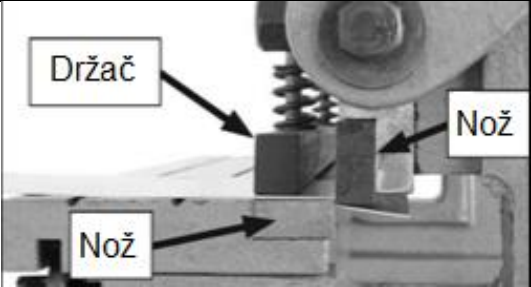
Slika 22. Funkcijska dekompozicija rezanja lima

### 3.1.2 Morfološka matrica

Na temelju funkcijske dekompozicije izrađena je morfološka matrica koja prikazuje moguće opcije za ostvarenje pojedinih funkcija.

1. Pogon alata ostvariti	Ručica	Kolo s ručicom	
			
2. Mehaničku energiju prenijeti	Remenski prijenos	Lančani prijenos	Zupčani prijenos
			
3. Savijanje lima omogućiti	S tri valjka	S četiri valjka	
			
4. Kontrolu vodoravnosti omogućiti	Libela		
			

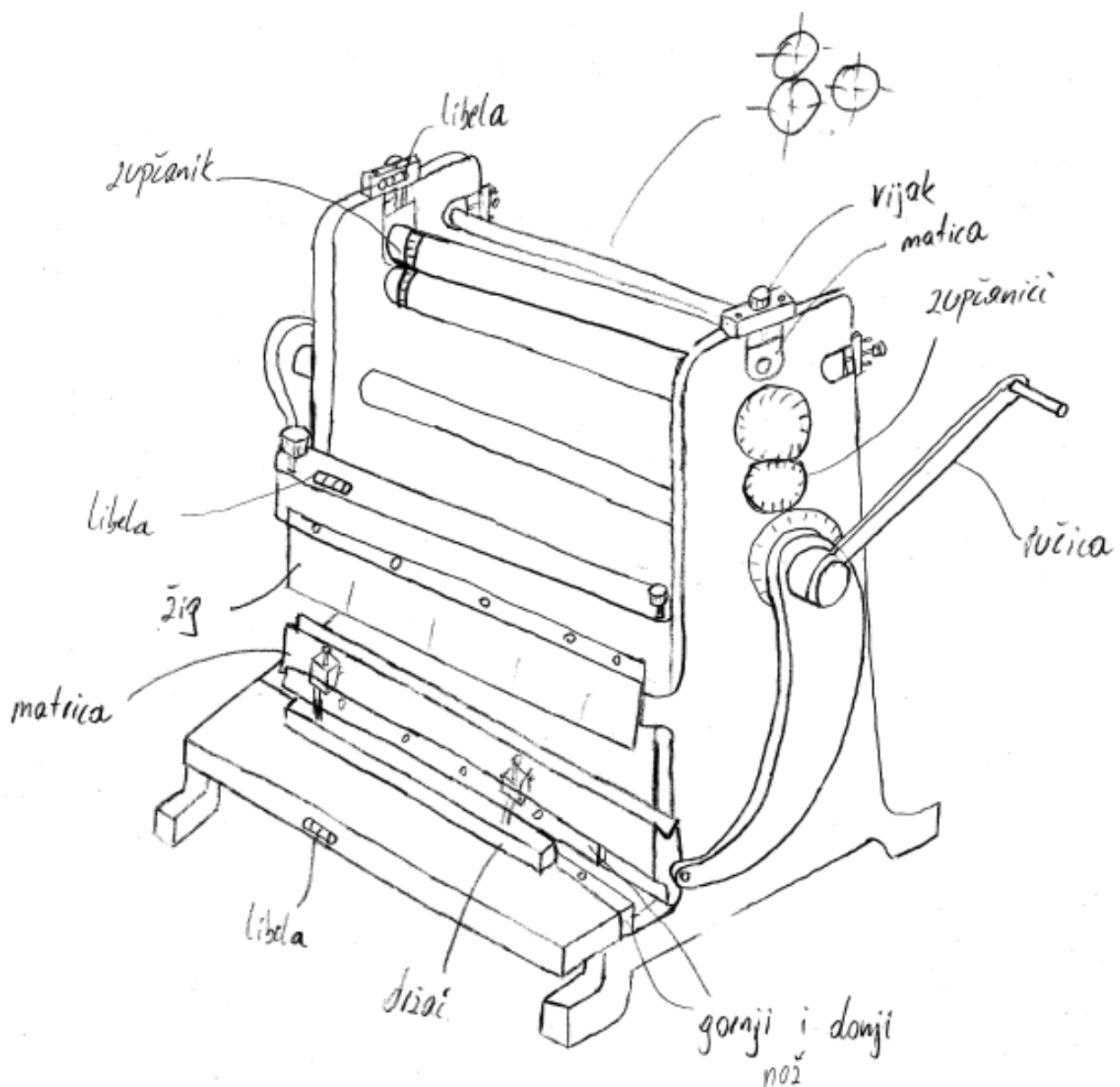
<p>5. Podešavanje omogućiti</p>	<p>Poluga</p> 	<p>Vijak i matica</p> 
<p>6. Vađenje izratka omogućiti</p>	<p>Kanala za vađenje valjka</p> 	<p>Vijak i matica</p> 
<p>7. Pretvorbu rotacijskog gibanja u translacijsko omogućiti</p>	<p>Scotch yoke mehanizam</p> 	<p>Ekscentar i klip</p> 
<p>8. Kutno savijanje lima omogućiti</p>	<p>Žig i matrica za kutno savijanje</p> 	

<p>9. Rezanje lima omogućiti</p>	<p style="text-align: center;">Nož ravni i kosi</p> 
<p>10. Stežanje lima omogućiti</p>	<p style="text-align: center;">Sustav za stežanje</p> 

### 3.2 Koncepti

#### 3.2.1 Prvi koncept

Energiju u sustav unosi čovjek preko ručice koja je spojena na ulazno vratilo, prenoseći snagu putem zupčanog prijenosa do donjeg valjaka za savijanje lima u cilindre, a putem vodilica i ekscentra vertikalno translacija matricu za kutno savijanje i nož pričvršćen za nju. Za postupak kutnog savijanja žig je fiksiran, ali se može rastaviti na manje dijelove radi lakšeg manipuliranja. Na stolu se dodatno nalazi kosi nož koji olakšava rezanje uz nož na matrici. Za postupak valjanja se koriste tri valjka, pri čemu se donji valjak pokreće zupčanim prijenosom, a uz prisustvo lima se pokreće i gornji valjak. Mehanizam vijka i matrice omogućuje vertikalno pomicanje gornjeg i srednjeg valjka, a ravnosti osi valjaka se kontroliraju libelom.

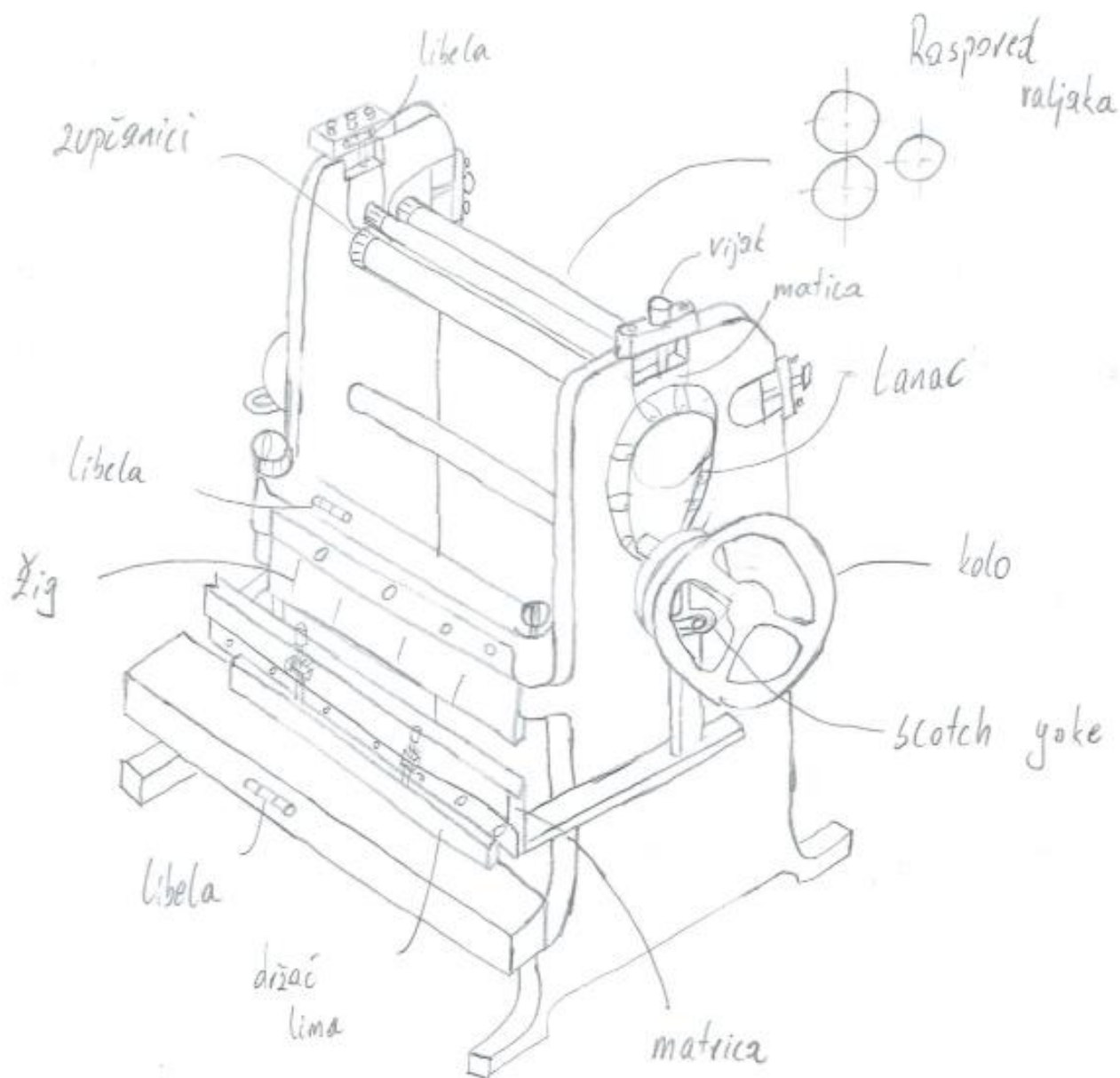


Slika 23. Prvi koncept

### 3.2.2. Drugi koncept

Energiju u sustav unosi čovjek okrećući kolo koje je spojeno na ulazno vratilo, a snaga se s pomoću lančanog prijenosa prenosi do donjeg valjka za savijanje lima u cilindre. Putem scotch yoke mehanizma koji je povezan s matricom za kutno savijanje ostvaruje se vertikalna translacija matrice i noža koji je na nju spojen. Žig je fiksni i rastavljivi na manje dijelove radi lakše manipulacije, a na stolu se nalazi kosi nož škara koji olakšava odsijecanje. Tri valjka se koriste za proces valjanja lima, pri čemu se donji valjak pokreće lančanim prijenosom, prenoseći snagu na gornji valjak uz prisustvo lima. Vertikalno pomicanje gornjeg i srednjeg valjka omogućeno je mehanizmom vijka i matice, dok se ravnost osi valjaka kontrolira libelom





Slika 24. Drugi koncept

### 3.3 Odabir koncepta

Dva predložena koncepta ocijenjena su prema kriterijima utvrđenim analizom tržišta. Proizvod je dobio ocjenu 1 ako je potpuno ispunio zahtjeve, 0,5 za djelomično ispunjenje zahtjeva i 0 ako zahtjevi nisu bili ispunjeni.

**Tablica 6. Vrednovanje koncepata**

Kriterij	Koncept 1	Koncept 2
Izvedba	1	0.5
Kompaktnost	1	1
Montaža	1	0.5
Cijena	0.5	1
Masa	0.5	1
Sigurnost	0.5	0.5
Održavanje	1	0.5
Kvaliteta obratka	1	0.5
$\Sigma$	6.5	5.5

Iz Tablice 6 se može zaključiti da će se za razradu odabrati koncept 1.

#### 4. PRORAČUN I OBLIKOVANJE KARAKTERISTIČNIH DETALJA

Proračun će biti podijeljen u dva dijela, slično kao i tok snage u alatu. Prvi dio proračuna obuhvaća proračun potrebne sile za postupak savijanja lima u cilindre valjanjem. Drugi dio proračuna se fokusira na proračun potrebne sile za kutno savijanje lima i za njegovo rezanje. U proračunu je odabran materijal opšavnog limova koji je najbolje opisan u normi DIN EN 10346[17]. Radi se o pocinčanom limu, a odabrani materijal je S350GD zbog najveće granice tečenja i najviše mogućih premaza.

##### 4.1. Prvi dio proračuna

###### 4.1.1. Proračun potrebne sile za savijanje lima u cilindre

Prvo provjeravamo zadovoljava li lim slijedeći uvjet[2]:

$$\frac{D}{s} < \frac{E}{Rp\ 0,2} + 1, \quad (1)$$

$$39 < 601$$

Uvjet je zadovoljen.

gdje je:

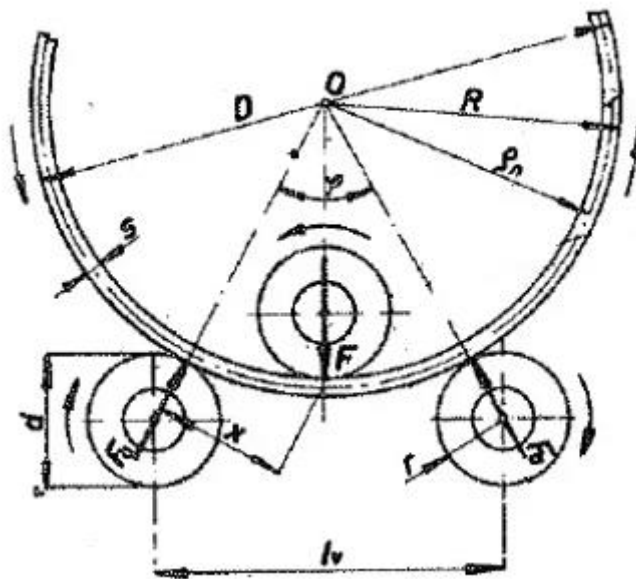
$D$  – promjer cilindra,  $D = 39$  mm – minimalni traženi promjer cilindra,

$s$  – debljina lima,  $s = 1$  mm – maksimalna tražena debljina lima,

$E$  – modul elastičnosti, za čelike,  $E = 210\,000$  N/mm<sup>2</sup>,

$R_{p0,2}$  – granica tečenja,  $R_{p0,2} = 350$  N/mm<sup>2</sup> za S350GD[17].

Navedeni uvjet potrebno je zadovoljiti zbog toga što bi pri izlasku lima s valjaka došlo do njegovog ispravljanja, jer se u tom slučaju deformacije nalaze u elastičnom području[2].



Slika 25. Savijanje lima – raspored sila[2]

Sile savijanja određujemo pomoću formula[2]:

$$F_a = \frac{M}{\left(R + \frac{s}{2}\right) \cdot \sin \varphi}, \quad (2)$$

$$F = \frac{M}{\left(R + \frac{s}{2}\right) \cdot \sin \varphi} = 2 \cdot F_a \cdot \cos \frac{\varphi}{2}, \quad (3)$$

gdje je:

$F_a$  – sila donjeg valjka[2], N,

$F$  – sila srednjeg valjka[2], N,

$\varphi$  – kut kružnog savijanja[2], °.

Vrlo važnu ulogu kod proračuna potrebnih sila ima plastični moment otpora savijanju  $W_y$ . Alat može poprimiti maksimalne dimenziju lima  $b = 1000$  mm,  $s = 1$  mm pa će to biti granična dimenzija koju uzimamo u proračun[2]:

$$W_y = \frac{b \cdot s^2}{4} = \frac{1000 \cdot 1^2}{4} = 250 \text{ mm}^3. \quad (4)$$

Kako bismo izračunali potrebne sile koje djeluju na valjke, prvo moramo odrediti moment koji je potrebno primijeniti za savijanje obratka s pomoću jednadžbe[2]:

$$M = R_{p\ 0,2} \cdot W_y = 350 \cdot 250 = 43750 \text{ Nm}, \quad (5)$$

Kut kružnog savijanja dobiva se iz geometrijskih odnosa[2]:

$$\varphi = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{l_v}{D+d}\right), \quad (6)$$

gdje je:

$l_v$  – udaljenost između gornjeg i srednjeg valjka[2], mm,

$d$  – promjer valjka [2], mm.

Za  $l_v = 41$  mm,  $D = 39$  mm i  $d = 40$  mm,

kut savijanja iznosi[2]:

$$\varphi = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{42}{39+40}\right) = 64,24^\circ. \quad (7)$$

Sada kada imamo izračunati moment i kut uvrštavamo te vrijednosti u izraz (2) kako bi dobili silu  $F_a$  na donjem valjku[2]:

$$F_a = \frac{43750}{\left(19,5 + \frac{1}{2}\right) \cdot \sin 64,24} = 2428,88 \text{ N}, \quad (8)$$

iz izraza (3) dobivamo silu  $F$ [2]:

$$F = 2 \cdot 2428,88 \cdot \cos \frac{64,24}{2} = 4114,21 \text{ N.} \quad (9)$$

#### 4.1.2. Proračun zupčanika

Da bi valjci počeli s radom, potrebno je prevladati trenje između obratka i valjka. Moment potreban za prevladavanje ovog trenja iznosi[18]:

$$T_V = \mu \cdot r \cdot F_a, \quad (10)$$

$\mu$  – faktor trenja između valjka i obratka ,  $\mu = 0.15$

Potrebni moment iznosi[18]:

$$T_V = 0.15 \cdot 20 \cdot 2428,88 = 7286,64 \text{ Nmm}, \quad (11)$$

Pogonski zupčanik treba dovoditi donjem valjku[18]:

$$T_{1max} = T_{V1} = \frac{T_V}{i_z \eta_{KL}^2 \eta_z} = \frac{7286,64}{1 \cdot 0,98^2 \cdot 0,985} = 7702,63 \text{ Nmm}, \quad (12)$$

gdje je:

$i_z$  – prijenosni omjer zupčanog para,  $i_z = 1$ ,

$\eta_{KL}$  – iskoristivost kliznih ležajeva[18],  $\eta_{KL} = 0,98$ ,

$\eta_z$  – iskoristivost zupčanog para[18],  $\eta_z = 0,985$

Budući da su zupčanici izrađeni od materijala 20MnCr5, za izračun orijentacijskog modula koristi se nosivost korijena prema [18]:

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 \cdot T_{1max}}{z_1 \cdot \lambda \cdot \sigma_{FP}} \cdot Y_F \cdot Y_\varepsilon \cdot K_{F\alpha}}, \quad (13)$$

gdje je:

$z_1$  – broj zubi zupčanika,  $z_1 = 20$ ,

$\lambda$  – faktor odnosa širine zuba i modula za različite pogonske uvjete[18],

$\sigma_{FP}$  – dopušteno naprezanje korijena zuba[18],

$Y_F$  – faktor oblika[18],

$Y_\varepsilon$  – faktor učešća opterećenja[18],

$K_{F\alpha}$  – faktor raspodjele opterećenja (sile) na pojedine zube pri proračunu opteretivosti korijena[18].

Za 20MnCr5,  $\sigma_{Flim}$  iznosi 480 N/mm<sup>2</sup>. Budući da postoji naizmjenično opterećenje, ovisno o smjeru u kojem korisnik odluči okretati ručicu,  $\sigma_{FP}$  se izračunava prema sljedećoj formuli[18]:

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} \cdot 0,7}{S_f} = \frac{480 \cdot 0,7}{2} = 168 \frac{N}{mm^2}, \quad (14)$$

gdje je:

$S_F$  – potrebni faktor sigurnosti protiv loma zuba, za intermitirajući pogon  $S_F = 2$ [18].

Za  $z_1 = 20$  orijentacijski modul iznosi[18]:

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 7702,63}{20 \cdot 15 \cdot 168} \cdot 2,2 \cdot 1 \cdot 1} = 0,87 \text{ mm}. \quad (15)$$

Odobran je modul prvog reda prednosti  $m = 2$  mm. Sada je moguće izračunati dimenzije zupčanika i utvrditi je li dobiveni modul konačan. Izračunati broj zubi zupčanika  $z_2$  je[18]:

$$z_2 = i_z \cdot z_1 = 1 \cdot 20 = 20. \quad (16)$$

Dimenzije zupčanika su[18]:

$$d_2 = d_1 = m \cdot z = 2 \cdot 20 = 40 \text{ mm}, \quad (17)$$

$$b = 20 \text{ mm},$$

Zagonski moment iznosi[18]:

$$GD_{Z1}^2 = GD_{Z2}^2 = 3 \cdot 10^3 \cdot b \cdot d_1^4 = 3 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 0,04^4 = 1,54 \text{ Nmm}^2, \quad (18)$$

Budući da je pri osnom razmaku  $a=35$  mm diobena kružnica jednaka kinematskoj kružnici, može se zaključiti da neće biti moguće spregnuti zupčanike pri toj udaljenosti osi. Stoga će se zupčanici izvesti bez pomaka profila, odnosno kao NUL-par. Konačne dimenzije zupčanika nakon ovog zaključka iznose[18]:

$$d_1 = d_2 = m \cdot z = 2 \cdot 20 = 40 \text{ mm}, \quad (19)$$

$$d_{a1} = d_{a2} = d_1 + 2 \cdot m = 40 + 2 \cdot 2 = 44 \text{ mm}, \quad (20)$$

$$d_{w1} = d_{w2} = d_1 \cdot \frac{\cos\alpha_t}{\cos\alpha_{wt}} = 40 \cdot 1 = 40 \text{ mm}, \quad (21)$$

$$d_{f1} = d_{f2} = d_1 - 2,5 \cdot m = 40 - 2,5 \cdot 2 = 35 \text{ mm}, \quad (22)$$

$$d_{b1} = d_{b2} = d_{w1} \cdot \cos \alpha = 40 \cdot \cos 20^\circ = 37,59 \text{ mm}, \quad (23)$$

Za izračun kinematskog promjera pri maksimalnom osnom razmaku, prvo je potrebno izračunati veličinu zahvatnog kuta u toj situaciji. Zahvatni kut se izračunava prema [19]:

$$\alpha_w = \arccos\left(a \cdot \frac{\cos \alpha}{a_w}\right) = \arccos\left(40 \cdot \frac{\cos 20^\circ}{40,7}\right) = 22,55^\circ, \quad (24)$$

Zatim kinematski promjer za  $a_w = 40,7$  iznosi[19]:

$$d'_w = d_1 \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = 40 \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos 22,55^\circ} = 40,7. \quad (25)$$

Ostale dimenzije su nepromijenjene.

Za minimalan osni razmak stupanj prekrivanja prema [19]:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} - a \cdot \sin \alpha}{m \cdot \pi \cdot \cos \alpha} = \frac{\sqrt{44^2 - 37,59^2} - 40 \cdot \sin 20^\circ}{2 \cdot \pi \cdot \cos 20^\circ} = 1,56, \quad (26)$$

dok za maksimalni osni razmak stupanj prekrivanja iznosi[19]:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} - a_w \cdot \sin \alpha_w}{m \cdot \pi \cdot \cos \alpha} = \frac{\sqrt{44^2 - 37,59^2} - 40,7 \cdot \sin 22,55^\circ}{2 \cdot \pi \cdot \cos 20^\circ} = 1,23. \quad (26)$$

Zaključujemo da zupčanici imaju zadovoljavajući stupanj prekrivanja.

Kontrola tjemene zračnosti[18]:

$$c = a - \frac{d_{a1} + d_{f2}}{2} = 40 - \frac{44 + 35}{2} = 0,5 \text{ mm} > c_{min} = 0,12 \cdot m = 0,24 \text{ mm}. \quad (27)$$

Uvjet je zadovoljen time je kraćenje tjemena nepotrebno.

Tolerancijsko polje ozubljenja biramo po normi HRN M.C1.031. Za kvalitetu ozubljenja 8, kvalitetu razmaka osi vratila 4 i osni razmak iznosa 35 mm dopušteno odstupanje od  $A_a = \pm 20 \mu\text{m}$ . Za modul  $m=2$  mm, prema normi kružne zračnosti iznose[18]:

$$j_{min} = 80 \mu\text{m}, \quad (28)$$

$$j_{\max} = 150 \mu\text{m}. \quad (29)$$

Granična odstupanja debljine zuba[18]:

$$\begin{aligned} -(A_{w1d} + A_{w2d}) &= j_{\max} \cdot \cos \alpha - 2A_{ag} \cdot \sin \alpha_w \\ &= 150 \cdot \cos 20^\circ - 2 \cdot 20 \cdot \sin 22,55^\circ = 126 \mu\text{m}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} -(A_{w1g} + A_{w2g}) &= j_{\min} \cdot \cos \alpha - 2 \cdot A_{ad} \cdot \sin \alpha_w \\ &= 80 \cdot \cos 20^\circ - 2 \cdot 20 \cdot \sin 22,55^\circ = 60 \mu\text{m}, \end{aligned} \quad (31)$$

Odabrana tolerancijska polja[18]:

$$A_{w1g} = A_{w2g} = -108 \mu\text{m} (f), \quad (32)$$

$$A_{w1d} = A_{w2d} = -54 \mu\text{m} (g), \quad (33)$$

Da bi se spriječilo zaglavljivanje zuba, potrebno je zadovoljiti sljedeći uvjet[18]:

$$j_{\min} > 2 \cdot (T_{i1}'' + T_{i2}'') \cdot \tan \alpha_w = 2 \cdot (111 + 111) \cdot \tan 22,55 = 184 \mu\text{m}. \quad (34)$$

Kontrola tolerancijskog polja[18]:

$$j_{\min} = -\frac{A_{w1g} + A_{w2g}}{\cos \alpha} + 2A_{ad} \cdot \tan \alpha_w = 198 \mu\text{m}, \quad (35)$$

$$j_{\max} = -\frac{A_{w1d} + A_{w2d}}{\cos \alpha} + 2A_{ag} \cdot \tan \alpha_w = 242 \mu\text{m}. \quad (36)$$

Tolerancije oba zupčanika su jednake i glase: kvaliteta 9 fg.

Srednja zračnost iznosi[18]:

$$j = \frac{j_{\min} + j_{\max}}{2} = \frac{198 + 242}{2} = 220 \mu\text{m}, \quad (37)$$

za ostvarenje ove zračnosti alat se pri obradi zupčanika mora primaknuti za radijalnu veličinu kružne zračnosti[18]:

$$j_r' = \frac{j}{4 \cdot \tan \alpha_w} = \frac{220}{4 \cdot \tan 22,55^\circ} = 132 \mu\text{m}, \quad (38)$$



preko razmaka osi vratila  $a_w \pm A_{ad,g}$  i graničnih odstupanja  $A_{w1d,g}$  i  $A_{w2d,g}$  bit će ostvarena srednja kružna zračnost[18]:

$$j_r = 2 \cdot j'_r = 2 \cdot 132 = 264 \mu\text{m}, \quad (39)$$

Kontrola s obzirom na dopuštenu opteretivost korijena zuba ( koja je određena dopuštenim naprežanjem u korijenu zuba koji je savojno opterećen ) provodi se pomoću izraza[18]:

$$\sigma_F = \frac{F_{wt}}{b \cdot m} \cdot Y_F \cdot (Y_\varepsilon \cdot Y_\beta) \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \leq \sigma_{Fp}, \quad (40)$$

gdje je:

$F_{wt}$  - nazivna obodna sila na kinematičkoj kružnici, N.

Obodna sila  $F_{wt}$  iznosi[18]:

$$F_{wt} = \frac{2 \cdot T_{1\max} \cdot K_A \cdot K_V}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 7702,63 \cdot 1 \cdot 1,026}{40} = 395 \text{ N}, \quad (41)$$

Faktor oblika za nulto ozubljenje i  $z_1=20$  i  $\beta = 0^\circ$  iznosi[18]:

$$Y_F = f(z_1, x_1, \beta) = 2,9. \quad (42)$$

Faktor stupnja prekrivanja[18]:

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_\alpha} = \frac{1}{1,23} = 0,81, \quad (43)$$

Vrijednosti korektivnog faktora  $q_L$  i faktora razdiobe naprežanja po zubu iznose[18]:

$$q_L = 1, \quad (44)$$

$$K_{F\alpha} = q_L \cdot \varepsilon_\alpha = 1 \cdot 1,23 = 1,23, \quad (45)$$

Naprežanje u korijenu zuba je:

$$\sigma_F = \frac{371}{20 \cdot 2} \cdot 2,9 \cdot 0,81 \cdot 1,23 \cdot 1 = 26,8 \text{ MPa}, \quad (46)$$

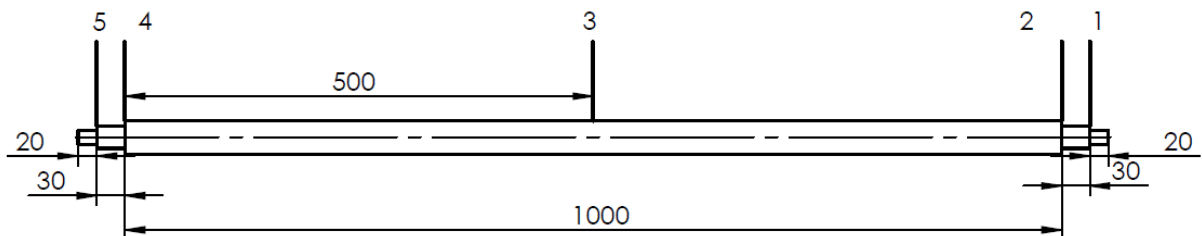
$$\sigma_F = 26,8 < 103,6 = \sigma_{FP}. \quad (47)$$

Uvjet zadovoljen.

### 4.1.3 Proračun vratila za valjanje

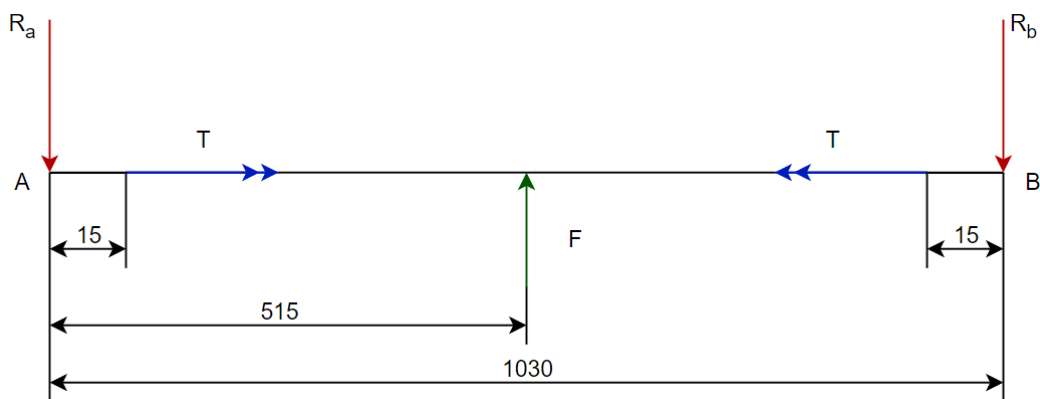
#### 4.1.3.1 Proračun srednjeg vratila

Pri izračunu vratila uzimamo u obzir srednje vratilo jer je izloženo najvećoj sili od 4114,21 N, dok donja vratila trpe silu od 2428,88 N. Zbog jednostavnosti i kompaktnosti izrade, sva vratila će imati jednake dimenzije, čime će donja vratila imati dodatnu sigurnost, budući da na njih djeluje gotovo dvostruko manja sila nego na gornje.



Slika 26. Srednji valjak

Iz jednadžbe (9) vidimo da je sila za savijanje lima od materijala S350GD iznosa 4114,21 N, a moment je 7702,63 Nmm. Sila savijanja se nalazi u istoj ravnini kao reakcijske sile, stoga je dovoljan prikaz u jednoj ravnini.



Slika 27. Sile na srednjem vratilu

proizlazi[18]:

$$\sum M_A = 0; \quad R_b = \frac{515 \cdot F}{1030} = \frac{515 \cdot 4114,21}{1030} = 2057,1 \text{ N} \quad (48)$$

$$\sum F = 0; \quad R_a = F - R_b = 4114,21 - 2057,11 = 2057,1 \text{ N} \quad (49)$$

Da bi se mogli izračunati idealni promjeri, potrebno je odabrati referentne vrijednosti dopuštenog napreznja. Za materijal 20MnCr5 prema [4]:

$$\sigma_{sDN} = 0.4 \cdot Rm = 0.4 \cdot 900 = 360 \text{ N/mm}^2, \quad (50)$$

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_{sDN}}{S} = \frac{360}{2} = 180 \text{ N/mm}^2, \quad (51)$$

zatim računamo faktor čvrstoće materijala pri naizmjeničnom torzijskom napreznju[4]:

$$\tau_{uDI} = 0.3 \cdot Rm = 0.3 \cdot 900 = 270 \text{ N/mm}^2, \quad (52)$$

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{sDN}}{1,73 \cdot \tau_{uDI}} = \frac{360}{1,73 \cdot 270} = 0,77, \quad (53)$$

Rm – vlačna čvrstoća za 20MnCr5 prema [4], Rm = 900 N/mm<sup>2</sup>

Re – granica tečenja za 20MnCr5 prema [4], Re = 680 N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_{sDN}$  - trajna dinamička čvrstoća za čisto naizmjenično promjenljivo naprezanje pri savijanju[18]

$\tau_{uDI}$  – trajna dinamička čvrstoća za uvojno naizmjenično opterećenje[18]

Iznosi momenta savijanja u odabranim presjecima[18]:

$$M_{s1} = R_B \cdot 10 = 2057,1 \cdot 10 = 20571 \text{ Nmm}, \quad (54)$$

$$M_{s2} = R_B \cdot 40 = 2057,1 \cdot 40 = 82284 \text{ Nmm}, \quad (55)$$

$$M_{s3} = R_B \cdot 540 = 2057,1 \cdot 540 = 1110834 \text{ Nmm}, \quad (56)$$

$$M_{s4} = R_A \cdot 40 = 2057,1 \cdot 40 = 82284 \text{ Nmm}, \quad (57)$$

$$M_{s5} = R_A \cdot 10 = 2057,1 \cdot 10 = 20571 \text{ Nmm}, \quad (58)$$

Izraz za ekvivalentni moment na dijelovima vratila koji su izloženi uvijanju i savijanju[18]:

$$M_{ekv} = \sqrt{M_S^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2}, \quad (59)$$

$$M_{ekv1} = M_{s1} = 20571 \text{ Nmm}, \quad (60)$$

$$\begin{aligned} M_{ekv2} &= \sqrt{M_{s2}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{82284^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 7702,63)^2} \\ &= 82444,16 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} M_{ekv3} &= \sqrt{M_{s3}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{1110834^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 7702,63)^2} \\ &= 1110845,86 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (62)$$

$$\begin{aligned} M_{ekv4} &= \sqrt{M_{s4}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{82284^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 7702,63)^2} \\ &= 82444,16 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (63)$$

$$M_{ekv5} = M_5 = 20571 \text{ Nmm}, \quad (64)$$

Dopuštene vrijednosti trajnih dinamičkih čvrstoća pri uvijanju i savijanju postavili smo na 60 % ukupne trajne dinamičke čvrstoće koja iznosi 360 N/mm<sup>2</sup>. Idealni promjer računamo prema sljedećem izrazu[18]:

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{ekv1}}{\sigma_{sdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 20571}{216}} = 9,84 \text{ mm, odabrano } d_1 = 15 \text{ mm} \quad (65)$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{ekv2}}{\sigma_{sdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 82444,16}{216}} = 15,62 \text{ mm, odabrano } d_2 = 20 \text{ mm} \quad (66)$$

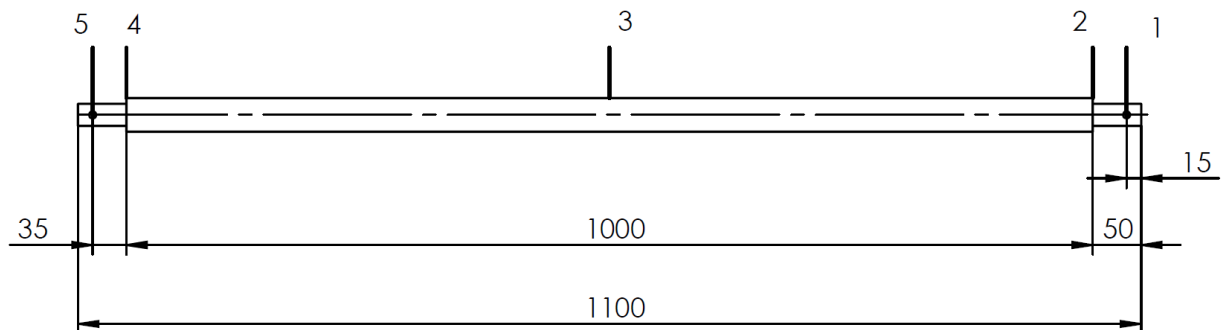
$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{ekv3}}{\sigma_{sdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 1110845,86}{216}} = 37,19 \text{ mm, odabrano } d_3 = 40 \text{ mm} \quad (67)$$

$$d_4 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{ekv4}}{\sigma_{sdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 82444,16}{216}} = 15,62 \text{ mm, odabrano } d_4 = 20 \text{ mm} \quad (68)$$

$$d_5 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{ekv5}}{\sigma_{sdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 20571}{216}} = 9,84 \text{ mm, odabrano } d_5 = 15 \text{ mm} \quad (69)$$

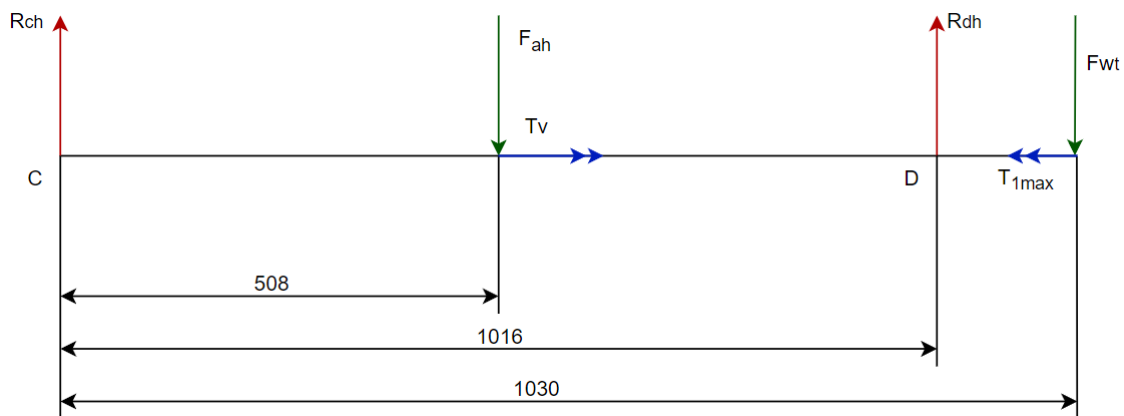
#### 4.1.3.2 Proračun donjeg vratila

Donji valjak je potrebno proračunati radi rupa za zatic koje su prikazane na slici 28.

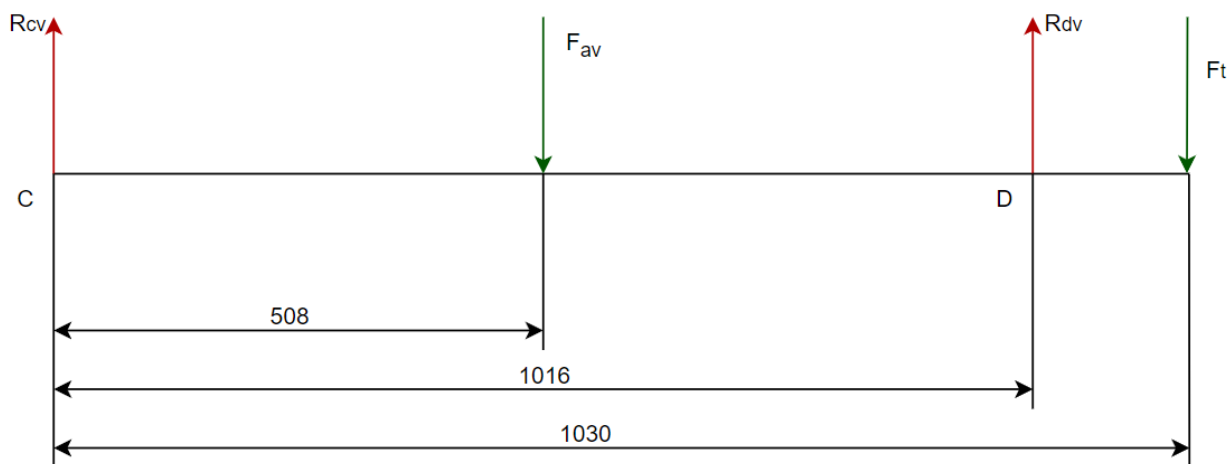


Slika 28. Donji valjak

U ovom slučaju imamo opterećenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Prilikom prikaza sila i proračuna zanemarena je težina zupčanika.



Slika 29. Opterećenja u horizontalnoj ravnini



Slika 30. Opterećenja u vertikalnoj ravnini

Iz slike 26 se vidi:

$$T_V = T_{1max}, \quad (70)$$

Kako bi izračunali nepoznate sile moramo izračunati silu kojom obradak djeluje na valjak, silu smo već izračunali prema (8):

$$F_a = 2428,88 \text{ N},$$

$T_V$  se izračuna prema (11):

$$T_V = 7286,64 \text{ Nmm},$$

$T_{1max}$  se izračuna prema (12):

$$T_{1\max} = 7702,63 \text{ Nmm},$$

Kada smo izračunali torzijske momente trebamo izračunati sila, horizontalna komponenta sile koja se javlja prilikom djelovanja obratka na valjak se dobiva iz sljedećeg izraza[18]:

$$F_{ah} = F_a \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot (1 + \mu) = 2428,88 \cdot \sin \frac{64,24}{2} (1 + 0,15) = 1485,13 \text{ N}, \quad (71)$$

obodna sila zupčanika se računa prema (41):

$$F_{wt} = 395 \text{ N},$$

horizontalne reakcije u osloncima[18]:

$$\sum M_{ch} = 0; \quad R_{dh} = \frac{F_{wt} \cdot 1043 + F_{ah} \cdot 508}{1016} = \frac{395 \cdot 1043 + 1485,13 \cdot 508}{1016} = 1148,06 \text{ N}, \quad (72)$$

$$\sum F_h = 0; \quad R_{ch} = F_{wt} + F_{ah} - R_{dh} = 395 + 1485,13 - 1148,06 = 732,07 \text{ N}, \quad (73)$$

Vertikalna komponenta sile koja se javlja prilikom djelovanja obratka na valjak se dobiva iz sljedećeg izraza[18]:

$$F_{av} = F_a \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot (1 - \mu) = 2428,88 \cdot \cos \frac{64,24}{2} (1 - 0,15) = 1748,54 \text{ N}, \quad (71)$$

Radijalna komponenta sile zupčanog prijenosa[18]:

$$F_r = F_{wt} \cdot \tan \alpha = 395 \cdot \tan 20^\circ = 143,77 \text{ N}, \quad (72)$$

horizontalne reakcije u osloncima[18]:

$$\sum M_{cv} = 0; \quad R_{dv} = \frac{F_r \cdot 1043 + F_{av} \cdot 508}{1016} = \frac{143,77 \cdot 1043 + 1748,54 \cdot 508}{1016} = 1021,86 \text{ N}, \quad (73)$$

$$\sum F_v = 0; \quad R_{cv} = F_r + F_{av} - R_{dv} = 143,77 + 1748,54 - 1021,86 = 732,07 \text{ N}, \quad (74)$$

Vratilo će biti od istog materijala pa su nam podatci[4]:

$$\sigma_{sDN} = 360 \text{ N/mm}^2,$$

$$\sigma_{dop} = 180 \text{ N/mm}^2,$$

$$\tau_{uDI} = 270 \text{ N/mm}^2,$$

$$\alpha_0 = 0,77.$$

Presjek 1[18]:

$$M_{1h} = 0 \text{ Nmm},$$

$$M_{1v} = 0 \text{ Nmm},$$

$$M_1 = 0 \text{ Nmm}, \quad (75)$$

Presjek 2[18]:

$$M_{2h} = -R_{dh} \cdot 8 + F_{wt} \cdot 22 = -1148,06 \cdot 8 + 395 \cdot 22 = -494,48 \text{ Nmm},$$

$$M_{2v} = -R_{dv} \cdot 8 + F_r \cdot 22 = -1021,86 \cdot 8 + 143,77 \cdot 22 = -5011,94 \text{ Nmm},$$

$$M_2 = \sqrt{M_{2h}^2 + M_{2v}^2} = \sqrt{494,48^2 + 5011,94^2} = 5036,27 \text{ Nmm}, \quad (76)$$

$$M_{ekv2} = \sqrt{M_2^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{5036,27^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 7286,64)^2} = 6998,15 \text{ Nmm},$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{ekv2}}{\sigma_{sdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 6026,76}{180}} = 7,3 \text{ mm, odabrano } d_1 = 20 \text{ mm}.$$

Presjek 3[18]:

$$M_{3h} = R_{ch} \cdot 550 = 1148,06 \cdot 550 = 631433 \text{ Nmm},$$

$$M_{3v} = R_{cv} \cdot 550 = 732,07 \cdot 550 = 402638,5 \text{ Nmm},$$

$$M_3 = \sqrt{M_{3h}^2 + M_{3v}^2} = \sqrt{631433^2 + 402638,5^2} = 748882,76 \text{ Nmm}, \quad (77)$$

$$M_{ekv3} = \sqrt{M_3^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{748882,76^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 7286,64)^2} = 748898 \text{ Nmm},$$



$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{ekv3}}{\sigma_{sdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 748898}{180}} = 34 \text{ mm, odabrano } d_1 = 40 \text{ mm.}$$

Presjek 4[18]:

$$M_{4h} = R_{ch} \cdot 8 = 1148,06 \cdot 8 = 9184,48 \text{ Nmm,}$$

$$M_{4v} = R_{cv} \cdot 8 = 732,07 \cdot 8 = 5856,56 \text{ Nmm,}$$

$$M_4 = \sqrt{M_{4h}^2 + M_{4v}^2} = \sqrt{5856,56^2 + 9184,48^2} = 10892,84 \text{ Nmm,} \quad (78)$$

$$M_{ekv4} = \sqrt{M_4^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{10892,84^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 7286,64)^2} = 11927,45 \text{ Nmm,}$$

$$d_4 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{ekv4}}{\sigma_{sdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 11927,45}{180}} = 8,72 \text{ mm, odabrano } d_1 = 20 \text{ mm.}$$

Presjek 5[18]:

$$M_{5h} = 0 \text{ Nmm,}$$

$$M_{5v} = 0 \text{ Nmm,} \quad (79)$$

$$M_5 = 0 \text{ Nmm,}$$

#### 4.1.4. Proračun ležajeva

Prilikom proračuna vratila, izračunate su sve komponente sila potrebne za dimenzioniranje ležajeva. Za sva ležajna mjesta odgovarajući valjni ležajevi odabrani su koristeći pomoć programa za izbor ležaja koji pruža tvrtka SKF[20].

Ekvivalentno dinamičko opterećenje ležaja u osloncu A[18]:

$$P_a = R_a = 2057,1 \text{ N,} \quad (80)$$

dinamička opterećenost ležaja u osloncu A računa se prema[18]:

$$C_A = 0,15326 \cdot P_a \cdot (n_1 \cdot L_{10h})^{0,333} = 0,15326 \cdot 2057,1 \cdot (1 \cdot 17500)^{0,333} = 8158,6 \text{ N,} \quad (81)$$

gdje je:

$L_{10h}$  - nazivni vijek ležaja[18], h

$n_1$  - brzina vrtnje vratila[18], s-1

$P_a$  - dinamičko ekvivalentno opterećenje ležaja[18], N

Na temelju dinamičke opterećenosti ležaja i promjera rukavca za oslonac A, izvršen je odabir ležaja. Odabran je igličasti valjkasti ležaj NK 20/16. Isti ležaj će se koristiti za ležajna mjesta B, C i D tako da dodatni proračun nije potreban.



Dimenzija	Mjera
Unutarnji promjer	20 mm
Vanjski promjer	28 mm
Širina	16 mm
Dinamička nosivost	13.2 kN
Statička nosivost	19.3 kN

Slika 31. Igličasti valjkasti ležaj NK 20/16[20]

#### 4.1.5. Proračun poprečnog zatika

Naprežanje uzrokovano odreznim opterećenjem prema [21]:

$$\tau_a = \frac{F_t}{2 \cdot A}, \quad (82)$$

gdje je:

$\tau_a$  – naprežanje na odrez u presjeku zatika [N/mm<sup>2</sup>],

$F_t$  – obodna sila na vratilu [N],

$A$  – površina presjeka zatika [mm<sup>2</sup>].

Svi zatici koje koristimo su isti, njihova površina je:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_1 + 2 \cdot h)^2 - d_1^2] = \frac{\pi}{4} \cdot [(7 + 2 \cdot 0.5)^2 - 7^2] = 11,78 \text{ mm}^2, \quad (83)$$

Zarezni zatic izrađen je od nehrđajućeg čelika X17CrNi16-2 s vlačnom čvrstoćom materijala  $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ . Stoga, prema dopušteno naprežanje na odrezno opterećenje iznosi[21]:

$$\tau_{\text{dop}} = 60 \text{ N/mm}^2, \quad (84)$$

Obodna sila zupčanika na donjem vratilu iznosi[21]:

$$F_t = \frac{2 \cdot T_v}{d} = \frac{2 \cdot 7286,64}{20} = 728,66 \text{ N}, \quad (85)$$

pa naprezanje na odrezno opterećenje iznosi:

$$\tau_a = \frac{728,66}{2 \cdot 11,78} = 30,93 \text{ N/mm}^2, \quad (86)$$

Može se zaključiti da zatik zadovoljava uvjet[21]:

$$\begin{aligned} \tau_a &\leq \tau_{dop}, \\ 30,93 \text{ N/mm}^2 &\leq 60 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (87)$$

## 4.2. Drugi dio proračuna

### 4.2.1. Proračun sile za kutno savijanje

Savijanje lima odvija se u plastičnom području. Moment savijanja lima u plastičnom području izračunava se prema izrazu[2]:

$$M = n \cdot R_m \cdot \frac{b \cdot s^2}{4}, \quad (88)$$

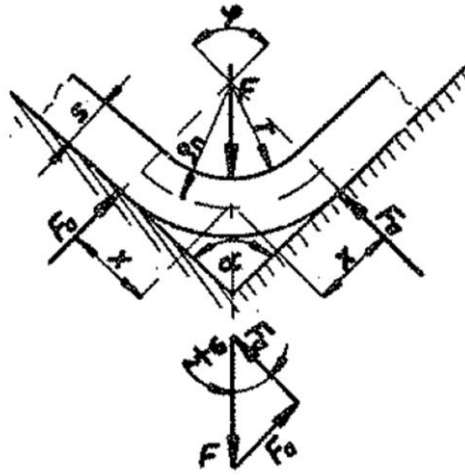
gdje je:

$n$  – korekcijski faktor očvršćivanja koji se kreće u granicama[2],  $n = 1,6 - 1,7$ ,

$R_m$  – vlačna čvrstoća materijala [ $\text{N/mm}^2$ ],

Izraz je pojednostavljeni način izračuna momenta savijanja lima, pri čemu se faktorom  $n$  uzima u obzir učinak očvršćenja tijekom hladne deformacije materijala. Materijal koji koristimo je S350GD, iz [17] dobivamo  $R_m = 420 \text{ N/mm}^2$ .

$$M = n \cdot R_m \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} = 1,7 \cdot 420 \cdot \frac{70 \cdot 0,8^2}{4} = 7996,8 \text{ Nmm}, \quad (89)$$



Slika 32. Sile kod savijanja V- profila [2],

slika i izraz za proračun potrebne sile kod savijanja lima u V – profile[2]:

$$F_V = \frac{2 \cdot M}{r + 0.5 \cdot s} = \frac{2 \cdot 7996,8}{1 + 0.5 \cdot 0.8} = 11424 N \quad (90)$$

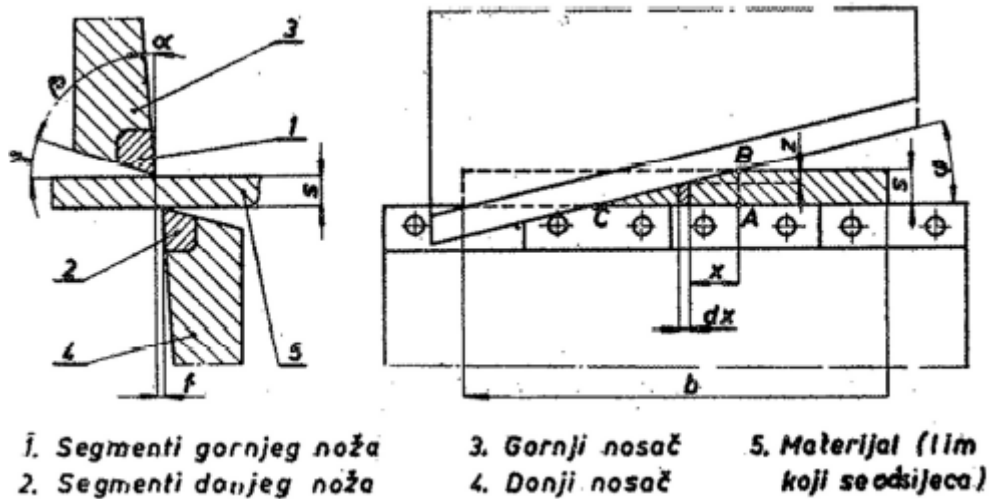
gdje je:

r – polumjer savijanja, prema [22] za  $R_m < 420 \text{ N/mm}^2$ , i debljine  $s < 1 \text{ mm}$ ,  $r = 1 \text{ mm}$ ,

$\varphi$  – kut savijanja kutnog savijanja,  $\varphi = 90^\circ$ .

#### 4.2.2. Proračun sile za rezanje

Lim je lakše rezati s nagnutim ravnim noževima jer se lim reže segmentno što znači da je opterećenje koncentrirano u točki umjesto da odjednom cijela oštrica noža ide presijecati lim (Slika 33.)



Slika 33. Rezanje lima [2]

Izraz za računanje sile rezanja s nagnutim noževima glasi[2]:

$$F_R = R_m \cdot \varepsilon_{ot} \cdot \frac{s^2}{\tan \varphi} \cdot 0.6 = 2771.1 \text{ N}, \quad (91)$$

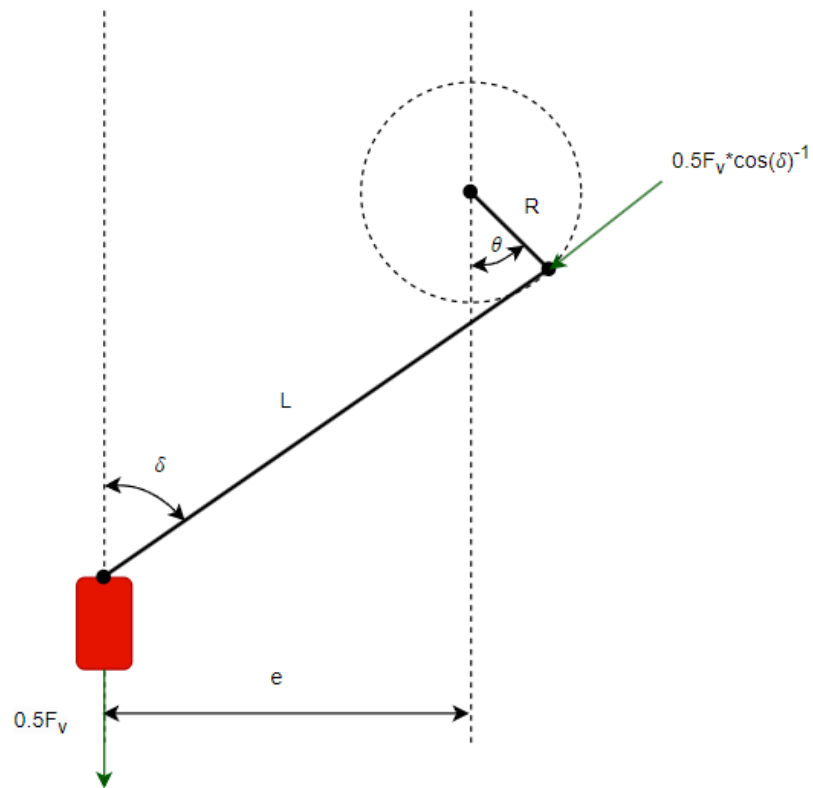
gdje je:

$\varepsilon_{ot}$  – faktor zavisnosti najveće relativne dubine prodiranja noža, za čelike srednje čvrstoće[2],

$$\varepsilon_{ot} = 0.6.$$

### 4.2.3. Mehanizam ekscentra i kipa

Za omogućavanje translacijskog pomicanja matrice i noža odabran je mehanizam stapnog mehanizma s ekscentrom.



Slika 34. Stapni mehanizam s ekscentrom

Kako bi se mogao utvrditi odnos sila, prvo treba odrediti veličinu ekscentra  $e$ . Kroz iterativni proces dizajniranja pokazalo se da je veličina ekscentra od 20,4 mm optimalna za postizanje željenog hoda matrice i noža[22].

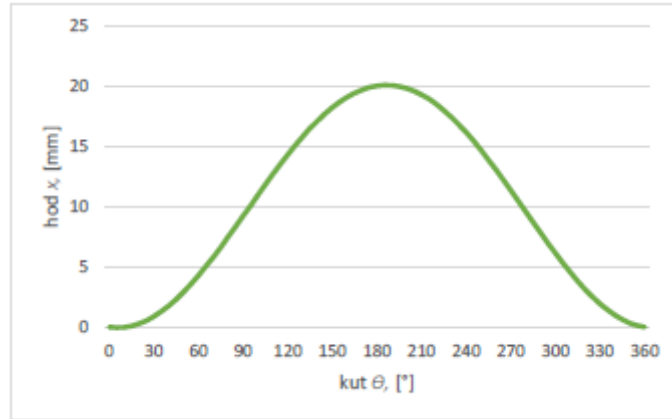
Za određivanje hoda matrice i gornjeg noža, prvo je potrebno utvrditi odnos između kutova  $\delta$  i  $\Theta$ , što se radi na sljedeći način[22]:

$$\delta = \arcsin \frac{e + R \cdot \sin \Theta}{L}, \quad (92)$$

$$x = \sqrt{(R + L)^2 - e^2} - (R \cdot \cos \Theta - L \cdot \cos \delta), \quad (93)$$

Uvrštavanjem (91) u (92) dobiva se konačni izraz[22]:

$$x = \sqrt{(R + L)^2 - e^2} - \left( R \cdot \cos \vartheta - L \cdot \cos \left( \arcsin \frac{e + R \cdot \sin \vartheta}{L} \right) \right), \quad (94)$$



Slika 35. Ovisnost hoda x o kutu  $\Theta$ ,

Iz slike se može iščitati da za kut od  $195^\circ$  postizemo najveći hod koji je 20,11mm. Potrebno nam je naći moment torzije na vratilu koji se stvara pri kutnom savijanju. Iz slike 28 možemo postaviti jednadžbu[22]:

$$T = -\frac{1}{2} F_V \cdot R \cdot \frac{\sin \vartheta \cdot \cos \delta + \cos \vartheta \cdot \sin \delta}{\cos \delta} = -\frac{1}{2} F_V \cdot R \cdot (\sin \vartheta + \tan \delta) \quad (95)$$

Lim se obrađuje kada matrica postiže najviši položaj što nam daje:

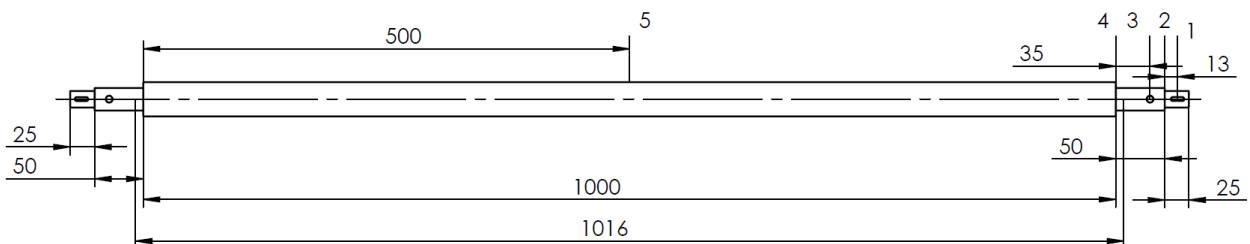
$$\theta = 195^\circ,$$

$$\delta = 5,16^\circ,$$

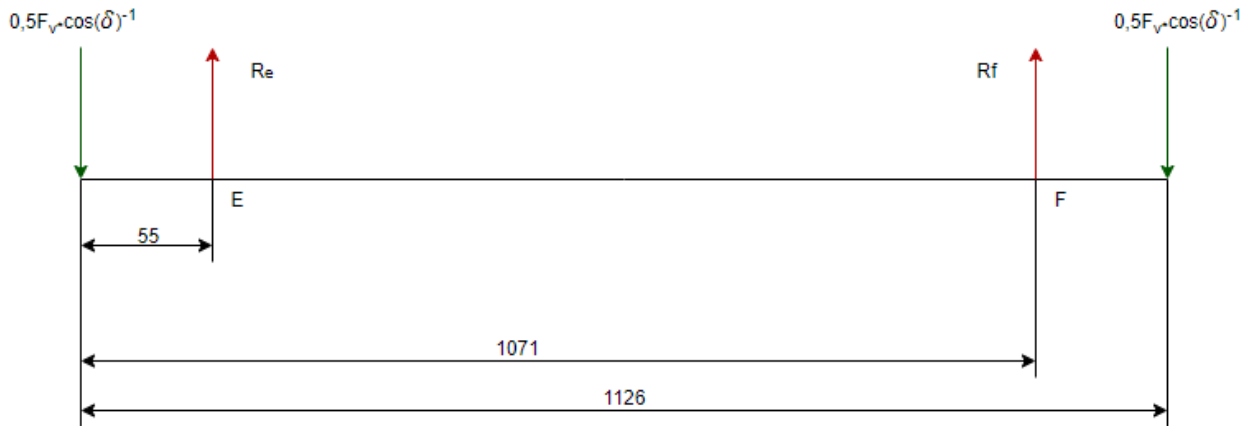
za određene kutove, promjenjiva sila može se smatrati statičkom, a vrijednost momenta torzije potrebnog za savijanje lima od S350GD, širine 70 mm i debljine 0,8 mm u V-profil, može se ostvariti ljudskom energijom[22]:

$$T = -\frac{1}{2} 11424 \cdot 6 \cdot (\sin 195 + \tan 5,16) = 5775.37 \text{ Nmm}, \quad (96)$$

#### 4.2.4. Dimenzioniranje ulaznog vratila



Slika 36. Ulazno vratilo



Slika 37. Opterećenje ulaznog vratila

Postavljanje jednadžbi ravnoteže[18]:

$$\sum M_E = 0; R_f = \frac{-\frac{1}{2}F_V \cdot \cos \delta \cdot 1063 + \frac{1}{2}F_V \cdot \cos \delta \cdot 63}{1071} = \frac{-\frac{1}{2} \cdot 11424 \cdot \cos(5,16)^{-1} \cdot 1063 + \frac{1}{2} \cdot 11424 \cdot \cos(5,16)^{-1} \cdot 63}{1071} = -5311,72N, \quad (97)$$

$$\sum F = 0; R_e = -\frac{F_V}{2 \cdot \cos \delta} + \frac{F_V}{2 \cdot \cos \delta} + R_f = -5735,24 + 5735,24 - 5311,72 = 5311,72N, \quad (98)$$

Momenti savijanja na presjecima 2 – 5 iznose[18]:

$$M_2 = \frac{F_V}{2 \cdot \cos \delta} \cdot 13 = \frac{11424}{2 \cdot \cos 5,16} \cdot 13 = 74558,15 \text{ Nmm}, \quad (99)$$

$$M_3 = \frac{F_V}{2 \cdot \cos \delta} \cdot 28 = \frac{11424}{2 \cdot \cos 5,16} \cdot 28 = 160586,15 \text{ Nmm}, \quad (100)$$

$$M_4 = \frac{F_V}{2 \cdot \cos \delta} \cdot 63 - R_f \cdot 8 = \frac{11424}{2 \cdot \cos 5,16} \cdot 63 - 5311,72 \cdot 8 = 318826,51 \text{ Nmm}, \quad (101)$$

$$M_5 = \frac{F_V}{2 \cdot \cos \delta} \cdot 563 - R_f \cdot 508 = \frac{11424}{2 \cdot \cos 5,16} \cdot 56 - 5311,72 \cdot 508 = 530587,75 \text{ Nmm}. \quad (102)$$



Uvrštavajući u proračun torzijsko opterećenje izračunato u (95) ekvivalentni momenti na dijelovima vratila koji su izloženi uvijanju i savijanju[18]:

$$\begin{aligned} M_{\text{ekv2}} &= \sqrt{M_{S2}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{74558,15^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 5775,37)^2} \\ &= 74657,55 \text{ Nmm}, \end{aligned} \quad (103)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{ekv3}} &= \sqrt{M_{S3}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{160586,15^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 5775,37)^2} \\ &= 160632,32 \text{ Nmm}, \end{aligned} \quad (104)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{ekv4}} &= \sqrt{M_{S4}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{318826,51^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 5775,37)^2} \\ &= 318849,77 \text{ Nmm}, \end{aligned} \quad (105)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{ekv5}} &= \sqrt{M_{S5}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{530587,75^2 + 0,75 \cdot (0,77 \cdot 5775,37)^2} \\ &= 530601,73 \text{ Nmm}. \end{aligned} \quad (106)$$

Budući da su vratila izrađena od istih materijala, vrijednost  $\alpha_0$  je ista kao u jednadžbi (53). Na kraju, moguće je izračunati idealne promjere vratila i potom odabrati konačne promjere. Idealni promjer se izračunava s pomoću (65) s vrijednošću  $\sigma_{\text{dop}}$  kao u (55), pri čemu se dobivaju sljedeće vrijednosti[18]:

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 74657,55}{216}} = 15,11 \text{ mm}, \text{ odabrano } d_2 = 18 \text{ mm}, \quad (107)$$

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 160632,32}{216}} = 19,52 \text{ mm}, \text{ odabrano } d_3 = 25 \text{ mm}, \quad (108)$$

$$d_4 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 318849,77}{216}} = 24,53 \text{ mm}, \text{ odabrano } d_4 = 25 \text{ mm}, \quad (109)$$

$$d_5 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 530601,73}{216}} = 29,07 \text{ mm}, \text{ odabrano } d_5 = 30 \text{ mm}, \quad (110)$$

presjek 1 je opterećen samo na uvijanje pa izračun glasi[18]:

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot T}{\tau_{dop}}} = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 5775,37}{27}} = 10,23 \text{ mm}, \text{ odabrano } d_1 = 18 \text{ mm}, \quad (111)$$

$$\tau_{dop} = \frac{\tau_{uDN}}{10} = \frac{270}{10} = 27 \text{ N/mm}^2, \quad (112)$$

za materijal 20MnCr5  $\tau_{uDN} = 270 \text{ N/mm}^2$ , za  $d_1 = 18 \text{ mm}$  dubina utora za pero iznosi  $t = 3,5 \text{ mm}$  prema [4].

#### 4.2.5. Proračun ležajeva

Prilikom proračuna vratila, izračunate su sve komponente sila potrebne za dimenzioniranje ležajeva. Za sva ležajna mjesta odgovarajući valjni ležajevi odabrani su koristeći pomoć programa za izbor ležaja koji pruža tvrtka SKF[20].

Ekvivalentno dinamičko opterećenje ležaja u osloncu E[18]:

$$P_e = R_e = 5311,72 \text{ N}, \quad (113)$$

dinamička opterećenost ležaja u osloncu A računa se prema[18]:

$$C_E = 0,15326 \cdot P_e \cdot (n_1 \cdot L_{10h})^{0,333} = 0,15326 \cdot 5311,72 \cdot (1 \cdot 17500)^{0,333} = 21066 \text{ N}, \quad (114)$$

gdje je:

$L_{10h}$  - nazivni vijek ležaja[18], h

$n_1$  - brzina vrtnje vratila[18], s<sup>-1</sup>

$P_a$  - dinamičko ekvivalentno opterećenje ležaja[18], N

Na temelju dinamičke opterećenosti ležaja i promjera rukavca za oslonac E, izvršen je odabir ležaja. Odabran je cilindrični valjkasti ležaj NN 3005/SP. Isti ležaj će se koristiti za ležajno mjesto F tako da dodatni proračun nije potreban.



Dimenzija	Mjera
Unutarnji promjer	25 mm
Vanjski promjer	47 mm
Širina	16 mm
Dinamička nosivost	26 kN
Statička nosivost	30 kN

Slika 38. Cilindrični valjkasti ležaj NN 3005/SP[20]

#### 4.2.6. Proračun pera na bočni tlak

Dimenzije pera su odabrane uz pomoć [4] te iznose 16x6x6 uz dubinu  $t = 3,5$  mm.

Pero proračunavamo po sljedećoj jednadžbi iz [21]:

$$p = \frac{4 \cdot T}{d_1 \cdot h \cdot l_t \cdot i} = \frac{4 \cdot 5775,37}{18 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 1} = 21,39 \text{ N/mm}^2, \quad (115)$$

gdje je:

$h$  – visina pera[21],  $h = 6$  mm,

$l_t$  – nosiva duljina pera[21],

$i$  – broj pera po obodu[21].

Potrebno je još pronaći  $p_{dop}$  za materijal 20MnCr5 ako nam je  $R_e = 680 \text{ N/mm}^2$  iz [4]:

$$p_{dop} = \frac{R_e}{\sqrt{3} \cdot S} = \frac{680}{\sqrt{3} \cdot 2} = 202 \text{ MPa}, \quad (116)$$

#### 4.3 Proračun ručice

Ručici koja ima ulogu poluge u prijenosu snage trebamo izračunati dužinu i opterećenje na savijanje. Iz (89) vidimo da je najveće opterećenje pri procesu savijanja V-profila gdje  $T = 7996,8$  Nmm. Torzija na ulaznom vratilu iznosi[4]:

$$T_R = \frac{T}{\eta^2_{KL}} = \frac{7996,8}{0,98^2} = 8326,53 \text{ Nmm}. \quad (117)$$

Recimo da prosječna ručna sila koju čovjek proizvede iznosi  $F_R = 200 \text{ N}$ , duljina ručice će biti[4]:

$$L = \frac{T_R}{F_R} = \frac{8326,53}{200} = 42 \text{ mm}, \quad (118)$$

Provjeravamo zadovoljava li ručica na opterećenje savijanjem[4]:

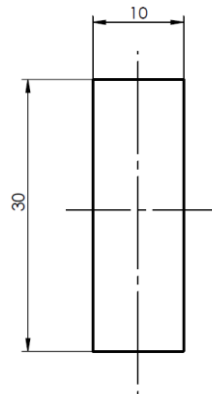
$$\sigma_{smax} = \frac{F_R \cdot L}{I} \cdot z_{max} = \frac{200 \cdot 42}{9216} \cdot 15 = 13,67 \text{ N/mm}^2, \quad (119)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{10 \cdot 30^3}{12} = 9216 \text{ mm}^4, \quad (120)$$

gdje je:

$I$  – aksijalni moment tromosti[4]

$z_{max}$  – najveća udaljenost od ruba presjeka do osi[4]



Slika 39. Poprečni presjek ručice,

ručica je napravljena od S235JR, dopušteno naprezanje na savijanje iznosi[4]:

$$\sigma_{dop} = 84 \text{ N/mm}^2, \quad (121)$$

$$13,67 \text{ N/mm}^2 < 84 \text{ N/mm}^2. \quad (122)$$

Ručica zadovoljava na savijanje.

## 5. ZAKLJUČAK

Tijekom izrade ovog rada generirano je konceptno varijantno rješenje alata za valjanje, savijanje i rezanje opšavnih limova na osnovu analize tržišta i kroz razradu funkcijske dekompozicije te morfološke matrice kako je predstavljeno u prethodnim poglavljima. Alat je namijenjen za malu i srednju proizvodnju i odrađuje svoj posao vrlo efikasno i precizno zbog svojih kombiniranih funkcija.

Alat se pokreće okretanjem ručice u bilo koju stranu, sustav za savijanje limova se sastoji od tri valjka koji mogu obraditi lima do jednog mm debljine. Gornji i srednji valjak imaju mogućnost vađenja kako bi mogli lakše izvaditi obradak u slučaju neke greške, zbog toga imamo i sustav kontrole ravnosti koji postižemo malim libelama postavljajući ih na pomične dijelove. Što se tiče sustava za savijanje žig se također može pomicati i obrađivati limove do jednog mm debljine. Žig ima mogućnost rastavljanja na manje dijelove ovisno o širini lima koju obrađujemo kako ne bi smetali ako traženi oblik lima ima kompliciranu geometriju. Gornji nož sustava za rezanje je koso izrađen kako bi olakšao rezanje, u alatu je integriran držač lima kako bi osigurali preciznost i sigurnost.

Prostora za optimizaciju i nadogradnju naravno ima, integracijom naprednih tehnologija poput CNC sustava i automatiziranih procesa poboljšala bi se preciznost obrade i smanjila mogućnost grešaka.

## 6. LITERATURA

- [1] Branko Grizelj: Oblikovanje lima deformiranjem, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2009.
- [2] Binko Musafija: Obrada metala plastičnom deformacijom, Sarajevo, 1979.
- [3] Povrzanović, A.: Obrade metala deformiranjem, FSB Zagreb, 1996.
- [4] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 2009.
- [5] <https://www.trgovina-ekstra.hr/hr/3-u-1-stroj-ubm1400-holzmann-maschinen>
- [6] <https://www.huk.hr/listings/limarija-sabljak/>.
- [7] <https://www.machineseeker.hr/knuth+werkzeugmaschinen-kr+10%2F1%2C0/i-12369089>
- [8] <https://www.laser-ing.hr/blog/principi-savijanja-limova/>.
- [9] [https://www.researchgate.net/figure/Roll-process-of-bow-shaped-sheet-metal-parts-in-the-forming-roller-bending-unit\\_fig1\\_350080936](https://www.researchgate.net/figure/Roll-process-of-bow-shaped-sheet-metal-parts-in-the-forming-roller-bending-unit_fig1_350080936) posjećeno 4.5.2024.
- [10] <https://www.azahner.com/labs/beadroll>
- [11] <https://www.azahner.com/labs/beadroll>
- [12] <https://www.njuskalo.hr/stroj-obrada-metala/rucne-skare-rezanje-lima-oglas-19316545>
- [13] <https://www.kakaindustrial.com/products/kaka-3-in-1-40-in-sheet-metal-brake-3-in-1-shear-brake-roll-combinations>
- [14] <https://www.matthys.net/en/universal-machine-3-in-1-1016-mm-1205876>
- [15] <https://www.bernardo.at/en/3-in-1-1060-profi.html>
- [16] <https://www.machinemart.co.uk/p/clarke-sbr760-3-in-1-sheet-metal-machine-760mm/>
- [17] <https://www.esb-group.com/en/products-din-en/hot-dip-galvanised-steel/>
- [18] Kljajin, Milan ; Ivandić, Željko ; Karakašić, Mirko: Elementi strojeva zbirka projektno-konstruktivskih zadataka. Slavonski Brod: Strojarski fakultet Sveučilišta u Slavonskom Brodu, 2018
- [19] Oberšmit E.: Ozubljenja i zupčanici, SNL, Zagreb 1982.
- [20] <https://productselect.skf.com/#/bearing-selection-start>
- [21] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [22] Karla Radić: Više funkcijski uređaj za obradu lima, 2023  
<https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:9620>
- [23] [https://www.alibaba.com/product-detail/CNC-Machine-Sheet-Metal-Forming-Segmented\\_607889965.html?spm=a2700.7724857.0.0.827840b9OvjwJ2](https://www.alibaba.com/product-detail/CNC-Machine-Sheet-Metal-Forming-Segmented_607889965.html?spm=a2700.7724857.0.0.827840b9OvjwJ2)

## **PRILOZI**

### **I. Tehnička dokumentacija**