

ŠOLSKI CENTER LJUBLJANA

SREDNJA STROJNA ŠOLA
Aškerčeva cesta 1, 1000 Ljubljana

RAZISKOVALNA NALOGA

Stirlingov motor (Stirling Engine)

IZDELAL:
Martin FURLAN

MENTOR:
Martin KAVŠEK

Ljubljana, Marec 2024

KAZALO VSEBINE

1. POVZETEK	1
2. UVOD	2
2.1. HIPOTEZE IN CILJI.....	2
2.2. ZGODOVINA	2
2.3. POTENCIAL	3
3. TEORETIČNI DEL	3
3.1. DEFINICIJA.....	3
3.2. SESTAVA MOTORJA.....	3
3.2.1. TIP α	4
3.2.2. TIP β	4
3.2.3. TIP γ	5
3.2.4. NAPREDNI SISTEMI	6
3.2.5. KONCEPT VOTLEGA BATA.....	6
3.2.5.1. POTENCIALNI MATERIALI ZA VOTLI BAT	7
3.2.5.2. IZIVI INTEGRACIJE REGENERATORJA	7
3.3. RAZUMEVANJE DELOVANJA	7
3.3.1. PROCESI MED DELOVANJEM.....	8
3.3.1.1. TEORETIČNA ANALIZA PROCESOV	10
3.3.2. TOPLOTNA UČINKOVITOST	11
3.4. NAČRTOVANJE	11
3.4.1. IZBIRA TIPA.....	11
3.4.2. IZBIRA VIRA TOPLOTE	11
3.4.3. SKICA	12
3.4.3.1. POSTAVITEV CILINDROV	12
3.4.3.2. PODSTAVEK	13
3.4.3.3. CELOTNI SESTAV	13
3.4.3.4. SVEČA	14
3.4.4. IZDELAVA NAČRTOV	14
3.4.4.1. IZBIRA MATERIALOV	14
3.4.4.2. IZDELAVA 3D MODELOV	14
.....	22
3.4.5. IZRAČUNI PRED IZDELAVO	23
3.4.5.1. VOLUMEN IN VOLUMSKO RAZMERJE.....	23
3.4.5.2. ODDANA ENERGIJA SVEČE	24
3.4.5.3. ZAHTEVANA TOPLOTA	24

3.4.5.4. TLAK V MOTORJU	25
3.4.5.5. IZKORISTEK MOTORJA.....	26
3.4.5.6. TEORETIČNA PROIZVEDENA MOČ	26
3.4.6. POSTAVITEV MER.....	26
4. PRAKTIČNI DEL	26
4.1. MATERIALI IN ORODJA (TABELE).....	26
4.2. IZBIRA ORODJA	27
4.2.1. IZDELAVA SVOJEGA ORODJA	27
4.3. POSTOPKI OBDELAVE	28
4.4. UPORABLJENI STROJI	31
4.5. IZDELAVA	31
4.6. TEST	43
5. SKLEP	43
6. LITERATURA	44

KAZALO SLIK

Slika 1: Risba uporabljena na patentu Roberta Stirlinga.....	2
Slika 2: Sestava Dish-Stirlingovega sistema	3
Slika 3: Stirlingov motor tipa α	4
Slika 4: Primer z regeneratorjem	4
Slika 5: Stirlingov motor tipa β	4
Slika 6: Primer z regeneratorjem in rombičnim mehanizmom.....	5
Slika 7: Stirlingov motor tipa γ	5
Slika 8: Primer z regeneratorjem	5
Slika 9: Vrste tipa γ	6
Slika 10: Brezbatni Stirlingov motor	6
Slika 11: Vizualizacija koncepta.....	6
Slika 12: Delovni cikel	7
Slika 13: Tabela lastnosti (ang.).....	11
Slika 14: Lastnosti tipov	11
Slika 15: Plamen voščene sveče	12
Slika 16: Primer izgleda	12
Slika 17: Skica cilindrov	12
Slika 18: Skica podstavka.....	13
Slika 19: Osrednja skica sestave motorja	13
Slika 20: Skica sveče	14
Slika 21: 3D - povezovalni kos	14
Slika 22: 3D - hladni cilinder	15
Slika 23: 3D - greti cilinder s tesnilom in pokrovom	15
Slika 24: 3D - bat.....	15
Slika 25: 3D - batni vložek.....	16
Slika 26: 3D - ekspanzijski bat.....	16
Slika 27: 3D - polovica sestavljene ročične gredi	16

Slika 28: 3D - protiutež s prerezom.....	16
Slika 29: 3D - glavna gred.....	17
Slika 30: 3D - oba dela vztrajnika	17
Slika 31: 3D - oba dela sveče	17
Slika 32: 3D - podstavek	18
Slika 33: 3D - batnice	18
Slika 34: 3D - ojnica 1 in 2.....	18
Slika 35: 3D – ojnica 3	19
Slika 36: 3D - glavna ročica	19
Slika 37: 3D - podstavek	19
Slika 38: 3D - distančnik	20
Slika 39: 3D - steber glavne ročice z nosilcem	20
Slika 40: 3D - nosilec ročične gredi	20
Slika 41: 3D - nosilna plošča.....	21
Slika 42: 3D - os glavne ročice.....	21
Slika 43: 3D - pogled 1.....	22
Slika 44: 3D - pogled 2.....	22
Slika 45: Diskni rezalnik	28
Slika 46: Držalo in vpeto orodje.....	28
Slika 47: Namizna stružica.....	31
Slika 48: Rezkalni stroj	31
Slika 49: Nosilna plošča po izdelavi	32
Slika 50: Ojnice in glavna ročica po izdelavi.....	32
Slika 51: Povezovalni kos po izdelavi.....	33
Slika 52: Hladni cilinder po izdelavi	33
Slika 53: Hladni cilinder med izdelavo	33
Slika 54: Greti cilinder po izdelavi in združitvi delov.....	34
Slika 55: Ekspanzijski bat po izdelavi in združitvi delov.....	34
Slika 56: Batni vložek po izdelavi.....	34
Slika 57: Steber in nosilec po izdelavi	36
Slika 58: Varovalo	36
Slika 59: Os glavne ročice	36
Slika 60: Batnice že sestavljene e ojnicami.....	36
Slika 61: Bat	37
Slika 62: Protiuteži z vijakom in zatičem.....	37
Slika 63: Osi ročične gredi	37
Slika 64: Nosilec ročične gredi z ležaji	38
Slika 65: Sestavljen vztrajnik	38
Slika 66: Podstavek po izdelavi.....	39
Slika 67: Distančnik po izdelavi.....	39
Slika 68: Dno sveče	40
Slika 69: Pokrov sveče	40
Slika 70: Postopek sestavljanja 1	41
Slika 71: Postopek sestavljanja 2	42
Slika 72: Končani izdelek.....	43

KAZALO DIAGRAMOV

Diagram 1: Termodinamični diagram Stirlingovega motorja.....	8
--	---

Diagram 2: Idealni Stirlingov cikel, splošno	8
Diagram 3: Idealni Stirlingov cikel z navidezno shemo premikov	9
Diagram 4: Primerjava P-V in T-S diagrama Stirlingovega in Carnotovega cikla.....	9
Diagram 5	10
Diagram 6	10
Diagram 7	10
Diagram 8	10
Diagram 9	10
Diagram 10	10

KAZALO TABEL

Tabela 1: Lastnosti etanola	24
Tabela 2: Nabava materiala	26
Tabela 3: Nabava orodja	27

1. POVZETEK

V maturitetni nalogi sem se odločil raziskati Stirlingov motor, njegovo sestavo, delovanje, in procese, ki se med delovanjem pojavljajo. Pri samem Stirlingovem motorju je najbolj fascinantno ravno to, da za delovanje uporablja osnovne principe termodinamike in ne potrebuje zapletenih sestav komponent za delovanje. Pri nalogi se bom najbolj poglobil v principe delovanja ter izdelavo samega motorja.

Ključne besede: Stirlingov motor, delovanje, izdelava.

2. UVOD

Za to nalogo sem se odločil, saj me od nekdaj zanimajo stroji in naprave, ki so jih izumili v industrijski revoluciji do začetka 20. stoletja, imam pa tudi kar dobro znanje mehanske obdelave, kar pomeni da mi ta naloga ne bo predstavljala nekakšnih velikih težav pri sami izdelavi. Poleg tega me zanimajo vse vrste pogonov, še predvsem te, ki za delovanje uporabljajo preproste principe. Glavni problem naloge je pravilno dimenzioniranje samega Stirlingovega motorja, tako da bo deloval. Zelo pomembno je kakšne vrste materialov so uporabljene in kako masivne in težke so posamezne komponente, saj večina manjših Stirlingovih motorjev ne proizvedejo visokih tlakov za delovanje.

Naloga je strukturirana tako, da najprej predstavim sam motor, principe delovanja itd.; torej najprej teoretični del, drugi del naloge pa bo strukturiran tako, da to pridobljeno znanje iz teoretičnega dela apliciram na samo izdelavo modelov in načrtov ter kasneje izdelavo.

2.1. HIPOTEZE IN CILJI

Hipoteze, ki sem si jih postavil pred izdelavo te naloge:

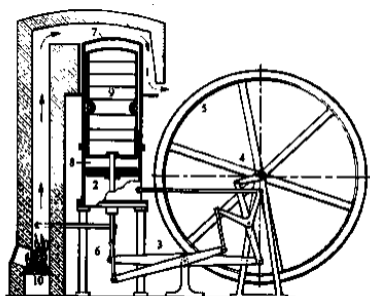
1. Delovanje je odvisno od temperature vira toplote
2. Hitrost delovanja je odvisna od teže gibljivih komponent

Cilji, ki sem si jih zadal:

1. Stirlingov motor bo delal na preprosto svečo
2. Izdelava bo potekala ekonomsko (brez zavrženih kosov)
3. Med izdelavo se bom držal zarisanih načrtov
4. Naučil se bom kaj novega
5. Izdelava stroja bo ceneno ugodna
6. Izdelava stroja bo potekala enostavno, brez zapletov
7. Za izdelavo imam vsa potrebna orodja
8. Obdelava površine bo kvalitetna
9. Estetsko privlačen

2.2. ZGODOVINA

Robert Stirling (1780-1878) je bil rojen leta na kmetiji blizu majhne vasi v Perthshiru. Študiral je na univerzi v Glasgowu in Edinburgu. Tam je študiral latinščino, grščino, matematiko, logiko ter metafiziko. Novembra leta 1816 je vložil patent za Stirlingov motor, še isto leto so mu ga odobrili. Stroj je izumil še preden je prišlo do večjih raziskav na področju termodinamike.



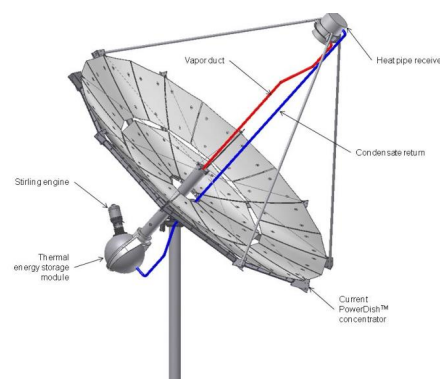
Slika 1: Risba uporabljena na patentu Roberta Stirlinga

2.3. POTENCIAL

Že zdaj se vedno bolj uveljavlja uporaba obnovljivih virov. Stirlingov motor pa se na to močno navezuje, saj lahko deluje na odpadno toploto (človek proizvede ogromno odpadne toplote pri različnih procesih), hkrati pa smo razvili sisteme s katerimi izkoriščamo Stirlingov motor za proizvodnjo električne energije s izkoriščanjem energije Sonca:

- **DISH-STIRLINGOV SISTEM**

Ta sistem izrablja energijo sonca, ki je skoncentrirana na eno točko s pomočjo parabolnega odsevnika. Ta energija segreje delovno sredstvo na temperaturo približno 600 stopinj Celzija. Delovno sredstvo je največkrat termično olje. To olje segreva greti cilinder Stirlingovega motorja, kar povzroči njegovo delovanje. Motor poganja generator, ki proizvaja električno energijo.



Slika 2: Sestava Dish-Stirlingovega sistema

3. TEORETIČNI DEL

V tem delu se bom dotaknil načrtovanja in izračunov motorja ter podatkov in informacij, ki sem jih pridobil iz literature.

3.1. DEFINICIJA

»Stirlingov motor je mehanska naprava, ki deluje na principu zaprtega termodinamičnega cikla s ciklično kompresijo in ekspanzijo delovnega fluida na različnih temperaturnih nivojih.« (Graham, 1980)

Ta definicija je generalna in poimenuje večjo družino strojev in naprav, ki pa imajo različne funkcije, karakteristike in konfiguracije. Le, da je pri Stirlingovem motorju tok fluida kontroliran s pomočjo volumskih sprememb.

Stirlingov motor bi lahko tudi poimenovali »regenerativna toplotna naprava«. Njegova največja omejitev pri izkoristku pa so materiali.

3.2. SESTAVA MOTORJA

Stirlingov motor je v osnovi sestavljen iz dveh cilindrov, ki sta med seboj povezana. Najpogosteje sta povezana preko cevi ali kanala. Pogosto se v cevi nahaja regenerator, ki služi kot izmenjevalec toplote, ta pa povzroči povišan izkoristek naprave. V osnovi je motor sestavljen iz dveh cilindrov (lahko tudi več), zaradi preprostega razloga: eden je namenjen segrevanju, to pomeni da se zrak v notranjosti cilindra razteza, medtem ko pa je drugi cilinder namenjen ohlajanju, torej se zrak v njem krči. Torej to pomeni, da ima zaradi dveh cilindrov tudi dva bata. Ta dva bata pa se zelo razlikujeta kot se tudi njuni funkciji.

Postavitve cilindrov v motorju se razlikujejo, zato poznamo 3 osnovne tipe oz. vrste Stirlingovega motorja, ki so poimenovani po grških črkah. To so:

1. Tip α
2. Tip β
3. Tip γ

Glavne (osnovne) komponente se v posameznih tipih bistveno ne razlikujejo, razlikuje se le njihova pozicija v sestavi.

Sestavni deli:

- Pogonski / kompresijski oziroma »delovni« bat
- ekspanzijski oziroma »izpodrivni« bat

- greti cilinder
- hladni cilinder
- regenerator (boljši izkoristek)
- vztrajnik
- ročična gred

Kasneje so se iz osnovnih tipov razvili še različne druge vrste motorja, ki pa jih bom obravnaval v nadaljevanju.

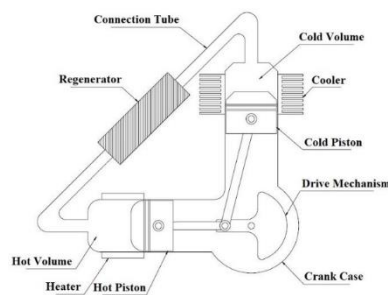
Povezava med ekspanzijskim in kompresijskim batom:

Namen ekspanzijskega bata je prenos ekspandiranega medija iz gretega na hladni predel. Tam medij opravi volumsko delo in se nato ohladi. Kompresijski bat potisne ohlajen medij na območje ekspanzijskega bata. Zaradi premika ekspanzijskega bata na hladnejši predel, se medij vrne nazaj na prvotno pozicijo, kjer se proces ponovi.

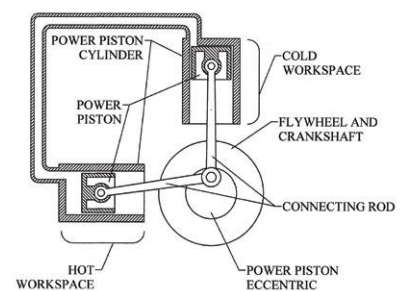
3.2.1. TIP α

Tip α je najpogostejši tip Stirlingovega motorja. Sestavljen je iz dveh cilindrov, ki sta med seboj povezana preko cevi ali kanala.

Stirlingovi motorji tipa Alfa imajo dva bata imenujemo ju kompresijski in ekspanzijski bat. Cilinder z ekspanzijskim batom lahko imenujemo vroči (greti) cilinder, cilinder z kompresijskim batom pa lahko imenujemo hladni



Slika 4: Primer z regeneracijem



Slika 3: Stirlingov motor tipa α

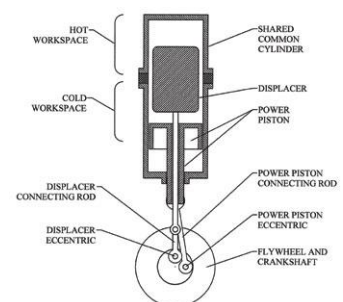
cilinder. Bati delujejo s fazno razliko 90 stopinj. Ta fazna razlika pomeni, da ko je en bat v spodnji ali zgornji mrtvi točki, bo drugi bat na polovici svojega giba. Premikanje batov s fazno razliko 90 stopinj zagotavlja kroženje delovnega fluida med vročim in hladnim cilindrom. To kroženje je najbolj učinkovito tako, da vroč in hladni cilinder postavimo v obliko črke V.

3.2.2. TIP β

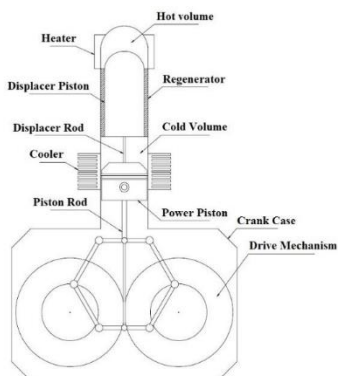
Tip β je izjema med Stirlingovimi motorji, ta je sestavljen le iz enega cilindra, ki pa je razdeljen na hladni in grelni del. V njem sta integrirana tako kompresijski kot pa tudi ekspanzijski bat.

V Stirlingovih motorjih tipa Beta delujeta kompresijski in ekspanzijski bat soosno znotraj istega cilindra. Pri tej strukturi so zapleti, ki jih povzročata batnica ekspanzijskega bata, ki poteka skozi središče pogonskega bata. Preprečiti je potrebno uhajanje fluida na tem območju. Medtem ko se z enega konca segreva, se iz drugega ohlaja. Območje med batoma imenujemo hladni volumen

(kompresijska komora) in območje nad ekspanzijskim batom pa vroči volumen (ekspanzijska komora). Med gibanjem delovni fluid prehaja skozi greti in hladni cilinder skozi ter regenerator. Ko je fluid v hladnem volumnu, pogonski bat opravi kompresijo. Ko pa fluid preide na območje vročega volumna cilindra, se ta razširi in potisne pogonski bat. Bat, ki ga potisne ekspanzija fluida premakne ročično gred. S tem se toplotna energija pretvori v mehansko. Delo, ki ga proizvede pogonski bat poganja ekspanzijski bat. Ena izmed slabosti tega tipa je dejstvo, da sta pogonski in ekspanzijski bat v ločenih cilindrih, kar pa poveča mrtve volumne v teh motorjih in tako zmanjša njihovo kompresijsko razmerje in učinkovitost.



Slika 5: Stirlingov motor tipa β

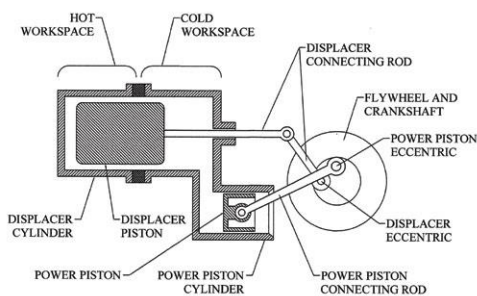


Slika 6: Primer z regeneratorjem in rombičnim mehanizmom

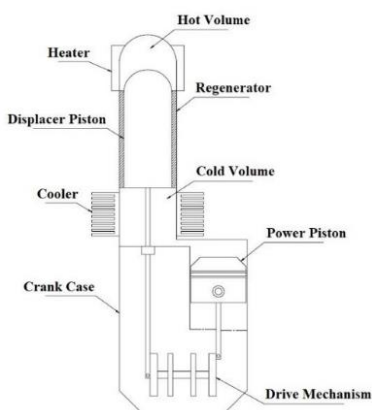
Številni Beta motorji nimajo vidne strukture regeneratorja, saj površina med ekspanzijskim in kompresijskim batom zagotavlja nekaj regeneracijskega učinka in s tem omogoča fluidu ciklično izmenjavo toplote. Tako kot pri motorjih tipa Alfa je fazna razlika med bati 90 stopinj. Ker pa so bati v istem cilindru, je ta fazna razlika navadno zagotovljena z rombičnim pogonskim mehanizmom (slika 6). Glavna prednost motorjev tipa Beta je dejstvo, da sta oba bata v skupnem cilindru, kar kritično zmanjša mrtve volumne in poveča učinkovitost motorja.

3.2.3. TIP γ

Tip γ pa je enak kot tip β le da ne deluje na principu enega cilindra, ampak je ta razdeljen na hladni cilindri ter greti cilindri. Ta sta integrirana skupaj, torej nista povezana preko cevi, vendar sta povezana direktno drug na drugega. To pomeni da plin potuje prosto med cilindroma. Motorji tipa Gama imajo pogonski bat in ekspanzijski bat, tako kot motor tipa Beta. Vendar pa pri tem tipu motorja ekspanzijski bat ni soosen s pogonskim batom, ampak je v različnih cilindri. Pri motorjih tipa Gama so lahko cilindri oblikovani vzporedno kot tudi z zamikom cilindrov 90 stopinj. Tako kot pri motorjih tipa Alfa in Beta je 90 stopinj fazne razlike med gibi batov. V gremem cilindru v motorju se dogaja raztezanje oziroma ekspanzija, v hladnem pa stiskanje oziroma kompresija fluida s pomočjo pogonskega bata. Regenerator je lahko nameščen znotraj ali zunaj cilindra, tako kot pri tipu Beta in Alfa. Ekspanzijski bat manipulira z vročim in hladnim volumnom. Gibanje tega bata prenaša fluid navzgor in navzdol po sistemu. Hladni volumen vsebuje cilindri s pogonskim batom in hladnejšo stran ekspanzijskega bata. Ciklično segrevanje in ohlajanje fluida povzroči ekspanzijo in kompresijo tako kot pri ostalih tipih. Motor tipa Gama, ima nekaj pomanjkljivosti čeprav ima preprosto mehansko strukturo. Glavna pomanjkljivost je enaka kot pri motorju tipa Alfa.



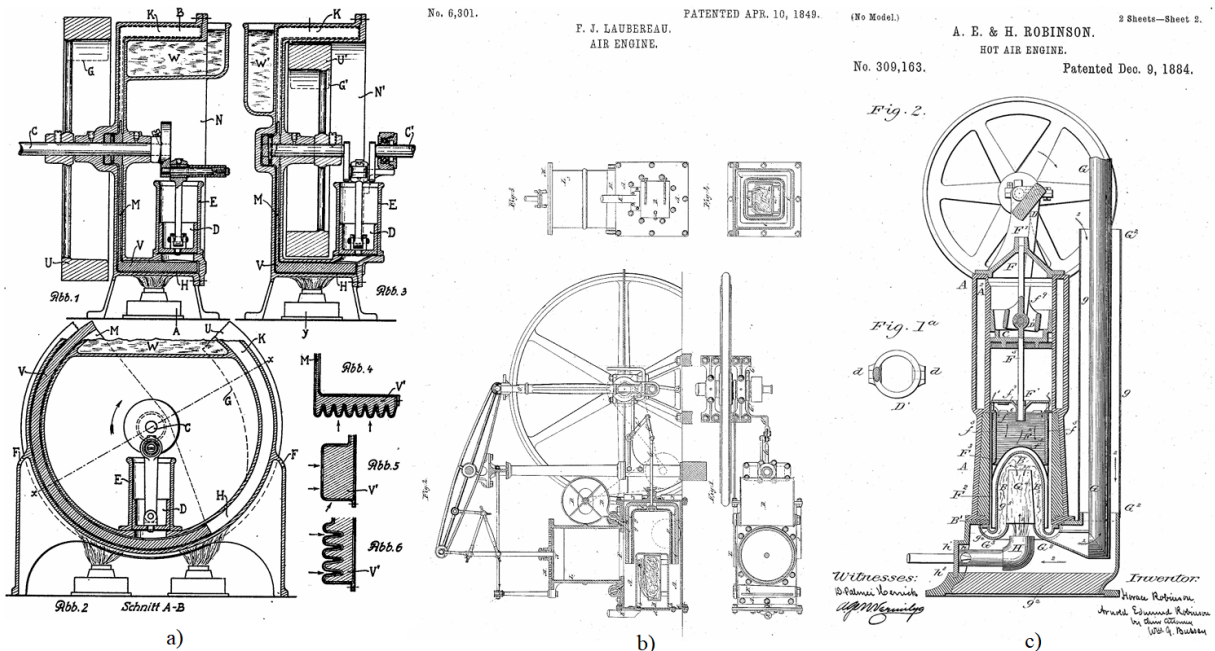
Slika 7: Stirlingov motor tipa γ



Slika 8: Primer z regeneratorjem

V glavnini Stirlingovi motorji tipa Gama sestavljajo štiri različne skupine, predstavil bom tri:

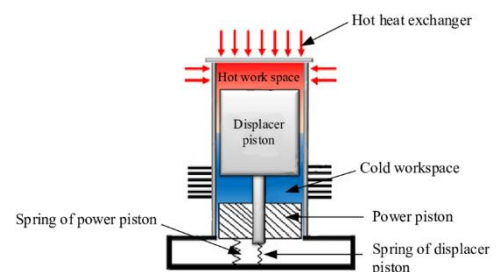
- **Lauberau-Schwartzkopff** (slika 9, primer b)
Regenerator se nahaja na območju ekspanzijskega bata. Bata sta postavljena pod kotom 90 stopinj. Bata lahko imata ali nimata fazne razlike 90 stopinj.
- **Heinrici** (slika 9, primer a)
Pogonski in ekspanzijski bat sta postavljena vzporedno z zunanjim regeneratorjem.
- **Robinson** (slika 9, primer c)
Bata imata fazno razliko 90 stopinj.



Slika 9: Vrste tipa γ

3.2.4. NAPREDNI SISTEMI

Sem spadajo predvsem brezbatni Stirlingovi motorji (ang. Free-piston Stirling Engine). To je naprava, ki za gibanje elementov uporablja fluidne sile, dinamično in fluidno interakcijo komponent. Za gibanje pogonskih in ekspanzijskih batov ne uporablja mehanskih povezav. Prednost teh naprav je predvsem preprostost, kompaktnost, nizka možnost uhajanja delovnega fluida → visok volumetrični izkoristek, cenovna ugodnost, možnost samodejnega zagona in dolga življenjska doba zaradi majhne obrabe komponent.



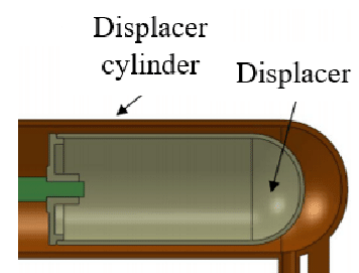
Slika 10: Brezbatni Stirlingov motor

3.2.5. KONCEPT VOTLEGA BATA

To je koncept uporabe votlega ekspanzijskega (ang. displacer) bata Stirlingovega motorja kot delni regenerator. Ta koncept se nanaša na uporabo bata, ki ima v notranjosti porozen material, največkrat je to material, katerega lastnost je shranjevanje toplote, lahko pa je samo votel (zahtevano 100% tesnjenje). Ta dizajn služi več funkcijam:

1. REGENERATOR

- Uporaba materiala, ki absorbira toploto (kovinska volna ali podoben porozen medij) → deluje kot kompakten regenerator. V tem primer, ko bi bat premikal delovni fluid med vročim in hladnim



Slika 11: Vizualizacija koncepta

območjem motorja, bi votla notranjost absorbirala toploto iz plina, ko gre skozi vročo stran in jo sprostila, ko bi se premaknila nazaj na hladno stran. Poleg tega bi potrebovali manj energije za segrevanje bata, s čim bi znižali zahtevano delovno temperaturo.

2. ZMANJŠANA MASA

- Voteli bat zmanjša skupno težo motorja. S tem bi zmanjšali trenje, kar bi lahko bilo koristno za aplikacijo pri majhnih Stirlingovih motorjih

3. TOPLOTNA UČINKOVITOST

- Material, ki absorbira toploto v notranjosti lahko pomaga stabilizirati temperaturo delovnega fluida in izboljša toplotno učinkovitost z zmanjšanjem toplotne izgube ali zmanjšanjem potrebe po dodatnem samostojnem regeneratorju.

3.2.5.1. POTENCIALNI MATERIALI ZA VOTLI BAT

Za integracijo funkcije absorpcije toplote v votli bat upoštevamo več vrst materialov:

▪ KOVINSKE VOLNE

Sem spada uporaba kovin, ki imajo nizko toplotno prevodnost. Primerne so zaradi majhne gostote in visoke poroznosti → velika površina → hitreje se segrejejo. Njihova površina povzroči učinkovit prenos toplote. Poleg tega pa toploto v sebi zadržijo dlje, saj imajo nizko toplotno prevodnost, kar pomeni, da ni velikih toplotnih izgub → nižja delovna temperatura.

▪ ZRAK

Če bat vsebuje zaprto zračno komoro, lahko tudi ta pomaga zmanjšati toplotne izgube (shranjuje toploto), čeprav ne shranjuje toplote na enak način kot porozen material.

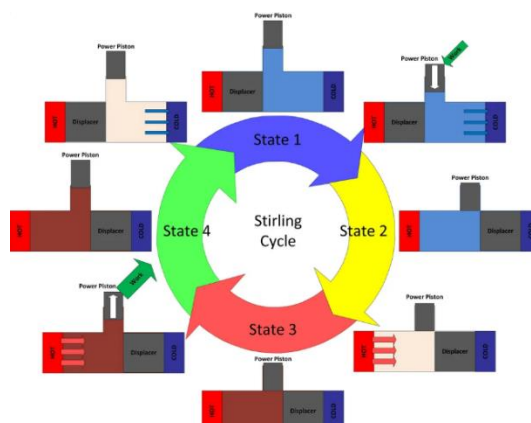
3.2.5.2. IZIVI INTEGRACIJE REGENERATORJA

Integracija regeneratorja v voteli bat predstavlja nekaj možnih slabosti:

- Znižana toplotna učinkovitost v primerjavi z regeneratorjem, saj prenos toplote ni tako učinkovit kot z samostojnim regeneratorjem.
- Konstrukcija mora biti kljub lahki zasnovi dovolj močna, da prenese tlake v motorju.
- Material bata mora biti sposoben prenesti stalno temperaturo spremembo med vročim in hladnim območjem.

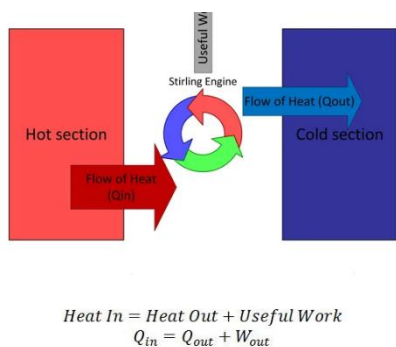
3.3. RAZUMEVANJE DELOVANJA

Osnovni princip cikla Stirlingovega motorja temelji na stiskanju hladnega, ohlajenega fluida in ekspanziji segretega fluida. Med tema procesoma se toplota pretvori v delo, saj je količina dela, ki je potrebna za stiskanje manjša od količine dela, ki je posledica ekspanzije.



Slika 12: Delovni cikel

Diagram 1: Termodinamični diagram Stirlingovega motorja



Bat, ki se nahaja v hladnem cilindru je tako imenovan pogonski bat, saj ta opravlja delo in poganja rotacijsko delovanje motorja. Medtem pa je v gretem cilindru bat, ki se imenuje ekspanzijski bat. Njegov namen je, da raztezke zraka prenese iz tople strani na hladno stran motorja. Zaradi tega se ta bat ne sme dotikati sten samega cilindra, saj bi bil prenos zraka in tople strani na hladno nemogoč. Ko ekspanzijski bat potisne segret zrak do hladnega cilindra le ta pogonski bat, zaradi raztezka potisne naprej. Medtem ko potiska bat se ta raztezek zraka začne ohlajati, to pa povzroči znižanje tlaka zraka, ki ga še dokončno stisne pogonski bat. To povzroči vrnitev v procesa v začetno pozicijo.

Pri delovanju sta uporabljena prva dva zakona termodinamike:

1. PRVI ZAKON TD

»Prvi zakon, ponovna navedba zakona o ohranjanju energije. zanika možnost obstoja motorja (ali neke termodinamične "črne skrinjice"), iz katere bi se lahko napajanje ali delo črpalo neprekinjeno, brez polnjenja. Prvi zakon zahteva, da se stroju dobavi vsaj toliko energije (v kakršni koli obliki), kolikor je odvzeto iz njega. Poglejmo zrak in bencin, ki se dovajata v motor na prisilni vžig. Prvič, združujejo se v procesu zgorevanja, vroči plini pa poganjajo motor. Od energije, dobavljene v gorivu, gre približno tretjina za uporabno delovno moč motorja, druga tretjina gre v hladilni sistem, preostala tretjina pa zapusti izpušne pline kot toplotno energijo nizke kakovosti. Če je dovod bencina prekinjen, se motor ustavi. To je neposredna uporaba prvega zakona termodinamike i n stvar splošnih izkušenj.« (Wallace & Linning, 1970)

2. DRUGI ZAKON TD

»Drugi zakon termodinamike je morda manj razumljen. Ena od trditev tega zakona je, da ni mogoče zgraditi sistema, ki bi deloval v ciklu, pridobival toploto iz rezervoarja i n opravljal enako količino dela na okolici. Prvi zakon pravi, da opravljeno delo ne more biti nikoli večje od dobavljene toplote, medtem ko gre drugi zakon dlje in pravi, da mora biti vedno manj. Pri motorju na prisilni vžig je drugi zakon tisti, ki zanika možno st pretvorbe vse energije v dobavljenem bencinu v koristno delo. Nekaj energije je treba "zapravi" v obliki toplote, ki se zavrže v hladilni sistem ali izpušne pline.« (Wallace & Linning, 1970)

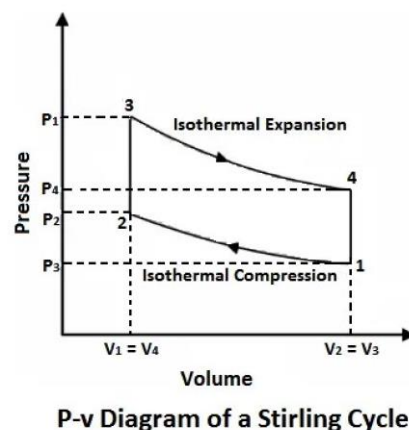
3.3.1. PROCESI MED DELOVANJEM

Na Stirlingov motor se nanašata prva dva zakona termodinamike. Kljub temu, da je to eden izmed preprostejših strojev, ga ni mogoče do potankosti natančno izračunati. Zato je uporabljen teoretičen model pri katerem so procesi idealizirani do te mere, da lahko naredimo analizo delovanja. Torej predvidevamo, da so procesi, ki se pojavljajo med delovanjem konstantno enaki (idealni).

Implementacija idealnih pogojev pri Stirlingovem ciklu oziroma predpostavke pri idealnih pogojih:

- A) Delovni fluid je idealen plin.
- B) Prevodnost in upor elementov proti toku sta zanemarljena
- C) Izgube zaradi trenja so zanemarljene

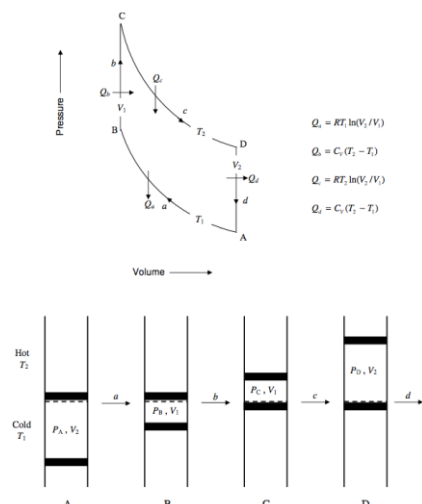
Diagram 2: Idealni Stirlingov cikel, splošno



D) Potek izotermne ekspanzije in kompresije je upoštevan

Osnovno Stirlingov motor opiše Stirlingov termodinamični cikel, ki je podobna verzija Carnotovega cikla, pri katerem sta dva procesa s dvema izotropnima procesoma zamenjana s konstantnim volumnom. Ker je cikel zaprt pomeni, da je delovno sredstvo (fluid) za vedno zaprt v sistemu. To pomeni, da morajo biti spoji med dinamičnimi elementi na motorju čim bolj tesni. S tem ukrepom povečamo izkoristek v praksi.

Diagram 3: Idealni Stirlingov cikel z navidezno shemo premikov



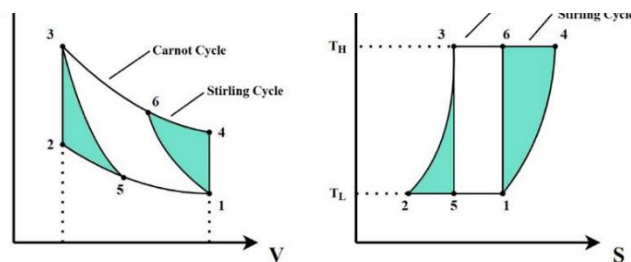
Zaradi zapletenosti Stirlingovega cikla bom obravnaval le idealni Stirlingov cikel, ki pa je podoben Carnotovemu ciklu (diagram 4).

Približek realističnega Stirlingovega cikla je Rallisov cikel, ki pa je nekoliko bolj zapleten, saj ima več točk med procesom od osnovnih 4, s tem pa se poveča tudi kompleksnost samih enačb. Zaradi tega pa je Rallisov cikel nekoliko bolj natančen pri opisu delovanja Stirlingovega motorja.

»Procesi, ki se pojavljajo v najpreprostejšem toplotnem stroju, so še vedno tako zapleteni, da ni mogoče natančno izračunati, kaj se dogaja. Namesto tega se predpostavlja teoretični model, v katerem so različni dogodki idealizirani v obsegu, ki je potreben za analizo njihovega delovanja. Na ta način se lahko delovanje večine vrst strojev simulira s predpostavko ponavljajočega se zaporedja termodinamičnih procesov, imenovanih cikel. Običajno se domneva, da je vsak proces tisti, v katerem se spremembe v termodinamičnih funkcijah pojavljajo, ko se tekočin ali premika iz enega stanja v drugega, vendar ena od funkcij ostane konstantna. Pomembne termodinamične funkcije so tlak (P), prostornina (V), temperatura (T), notranja energija (U), entalpija (W) in entropija (S).

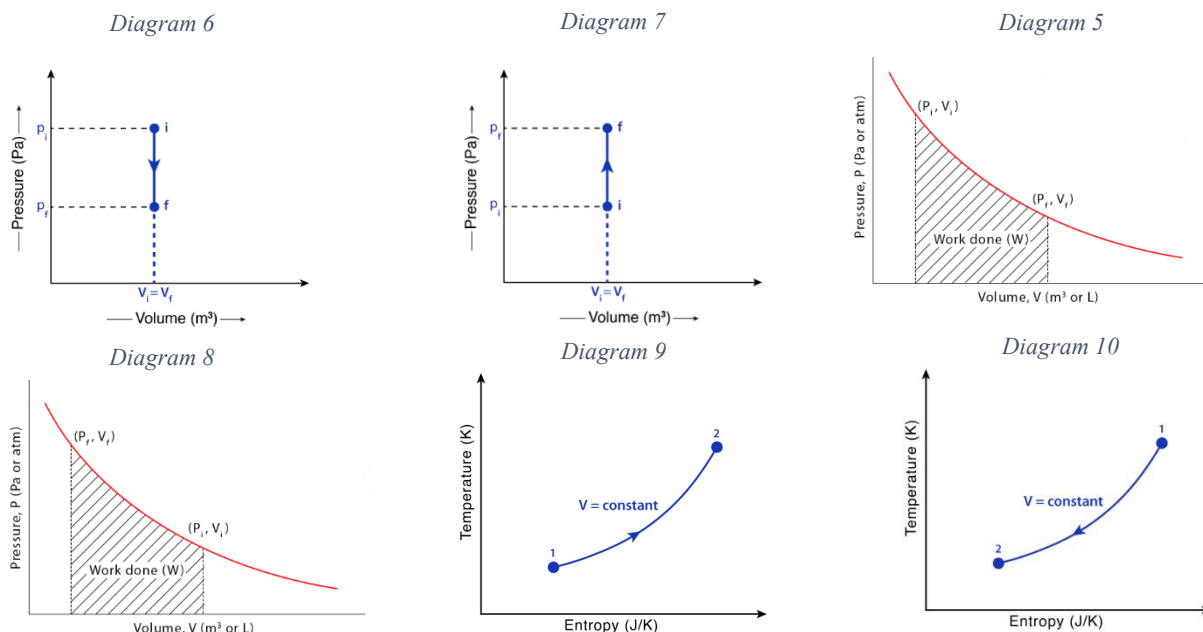
Cikel, ki je sestavljen iz zaporedja procesov, v katerih ena od termodinamičnih funkcij ohranja konstantno, medtem ko se druge spreminjajo, je mogoče grafično predstaviti na različne načine. Dva od teh sta pomembna pri analizi delovanja toplotnih strojev.« (Graham, 1980)

Diagram 4: Primerjava P-V in T-S diagrama Stirlingovega in Carnotovega cikla



3.3.1.1. TEORETIČNA ANALIZA PROCESOV

Cikel delovanja je sestavljen iz štirih termodinamičnih procesov, ki pa se med procesom izmenjujejo. To so izotermna kompresija, izotermna ekspanzija, izohorna kompresija in izohorna ekspanzija. Delovanje cikla je ponazorjeno na diagramu 1 (stran 7).



IZOTERMNA KOMPRESIJA (1-2); diagram 9

Pri tem procesu je toplota iz delovnega fluida izvzeta in pri najnižji temperaturi v ciklu izvršena iz cikla. Delo nato poteka na delovni tekočini v količini izvršene toplote iz cikla. Pri tem ne pride do spremembe notranje energije temveč do zmanjšanja entropije.

Enačba 1

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{V_1}{V_2}; \quad T_1 = T_2 = T_{min}$$

IZOHORNI REGENERATIVNI PROCES (2-3); diagram 7, 8

Izohorni proces je proces pri katerem je volumen konstanten. Pri tem procesu je toplota prenesena iz regenerotorja v delovni fluid, temperatura se poveča iz najnižje (T_{min}) v najvišjo (T_{max}). Nič dela ni opravljenega, entropija in notranja energija delovnega fluida se poveča (diagram 6).

Enačba 2

$$p_3 = p_2 \cdot \frac{V_2}{V_3}; \quad V_2 = V_3$$

IZOTERMNA EKSPANZIJA (3-4); diagram 5

Pri tem procesu je dovedena toplota ciklu pod visoko temperaturo (T_{max}) med ekspanzijo plina. Opravljeno delo, delovnega fluida, je enako količini dodane toplote. Pri tem pri fluidu ne pride do spremembe notranje energije, temveč gre za spremembo entropije, ki se poveča.

Enačba 3

$$p_4 = p_3 \cdot \frac{V_3}{V_4}; \quad T_4 = T_3 = T_{max}$$

IZOHORNI REGENERATIVNI PROCES (4-1); diagram 6, 10

Pri tem procesu je toplota prenesena iz delovnega fluida na regenerator, s tem se temperatura delovnega fluida zmanjša z najvišje (T_{max}) na najnižjo (T_{min}). Nič dela ni opravljenega, zato se zmanjša notranja energija ter entropija delovnega fluida (diagram 5).

Enačba 4

$$p_1 = p_4 \cdot \frac{T_1}{T_4}; V_1 = V_4$$

3.3.2. TOPLOTNA UČINKOVITOST

Razmerje med proizvedenim delom (ΔW) ter dovedeno energijo (ΔQ) se imenuje toplotna učinkovitost.

Enačba 5

$$\eta = \frac{\Delta W}{\Delta Q}$$

Zelo pomembna je višina toplotne učinkovitosti, saj ta predstavlja le delček uporabnega dela, ki ga bomo na koncu pridobili. Največja možna teoretična učinkovitost je odvisna od Carnotovega toplotnega izkoristka. To je razmerje med najvišjo in najnižjo temperaturo v sistemu. Njegova velikost je odvisna od teoretično najvišje možne temperaturne razlike v ciklu.

Enačba 6

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

3.4. NAČRTOVANJE

3.4.1. IZBIRA TIPA

Pred samo izdelavo skice sem se mogel odločiti kateri tip motorja bom izbral, kakšna bo postavitev komponent.

Kljub temu da so vsi tipi preprosti na izgled ima vsak svoje probleme, ki jih je potrebno rešiti. Po raziskavi katerih vrste tipov je mogoče izdelati, sem se na podlagi slik ter skic, ki sem jih zasledil na internetu in v literaturi odločil za izdelavo tipa Gama.

Odločil sem se za tip Gama, predvsem zaradi preproste mehanske zgradbe in nižje temperature razlike, ki je potrebna za delovanje. Poleg tega pa, da si nalogo nekoliko otežim sem namesto vzporedno postavljenih cilindrov odločil za izdelavo Lauberau-Schwartzkopffega Gama tipa. Ta ima postavitev cilindrov pod kotom 90 stopinj le, da se bo moj nekoliko razlikoval, saj se hladni cilinder ne bo nahajal na polovici območja ekspanzijskega bata, ampak na koncu. Pa tudi sam ročni mehanizem bo bolj preprost. S tem si bom olajšal izdelavo.

	Advantages	Disadvantages
Alpha	-High power to volume ratio. -Simplest mechanical structure [53]. -It has a compact structure and high specific power, with the double-acting piston design [3,23].	-Both power pistons operating in different cylinders must be sealed [54]. -For high engine volumes, system weight is a problem.
Beta	-It has a more compact structure. The system weight is low [54]. -Only one power piston and displacer piston rod must be sealed. -The amount of dead volume is low and can be designed at high compression ratio.	-It has a more complex mechanical structure. -Its design and production is quite laborious.
Gamma	-It has a simpler mechanical structure. It is more effortless to design and manufacture [23,55]. -It is quite suitable for operation at low temperature differences. -It is the best cylinder configuration for sealing.	-The high amount of dead volume reduces efficiency and power. It also works at low compression ratios [3,55].

Slika 13: Tabela lastnosti (ang.)

Za te spremembe od osnovnega tipa Gama sem se odločil zaradi estetskega izgleda, ki ga bo motor imel na koncu, pa tudi zaradi olajšane izdelave.

3.4.2. IZBIRA VIRA TOPLOTE

Na izbiro sem imel 4 vire toplote za uporabo:

1. Ročni plinski gorilnik (butan)
2. Voščena sveča (parafin)

3. Sveča na petrolej (prečiščen)
4. Sveča na alkohol (etanol)

Po pregledu možnosti sem ugotovil, da voščena sveča ne bi zagotavljala zadostne temperature, če bi bil njen plamen odmaknjen od gretega cilindra, da se ne bi dotikal stene cilindra.

Če bi želel, doseči višjo temperaturo, pa bi se plamen sveče moral dotikati stene cilindra → saje na površini.

Izbral sem svečo na alkohol zaradi naslednjih razlogov:

- Cenovna ugodnost (poceni, velika količina)
- Čisto izogorevanje (pri izogorevanju ni prisotnosti saj in ogljikovega monoksida)
- Med izogorevanjem odda dovolj toplote za želeno temperaturo (min. 260°C)
- Na voljo v bližnjih trgovinah
- Dober izkoristek (izkoristek podoben plinskim gorilnikom)

Zaradi potrebe po čistem izogorevanju sem potreboval čisti alkohol (99 % etanol).

3.4.3. SKICA

Ko sem imel osnovne parametre sestave, izbire tipa ter oblike postavljene sem lahko začel s skiciranjem.

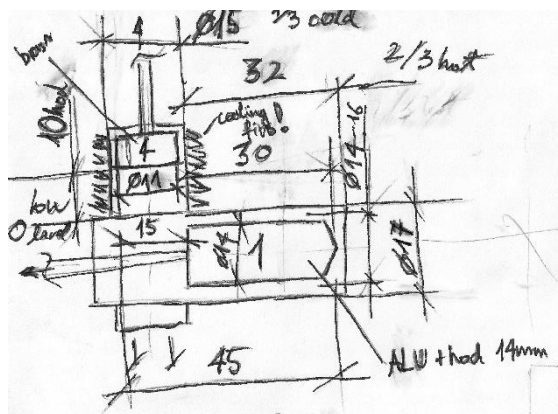
Na podlagi skic sem naredil 3D modele, katerim sem mere nato nekoliko prilagodil, da je bil model funkcionalen (pravilna razmerja komponent) in da ne pride do kolizij komponent pri gibanju. Na koncu sem iz modelov naredil delavniške risbe. Na skicah so okvirne mere.



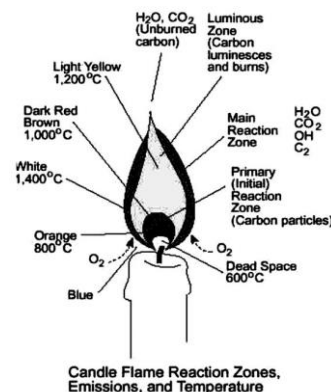
Slika 16: Primer izgleda

3.4.3.1 POSTAVITEV CILINDROV

Skiciral sem si kako naj bi končna postavitev približno zgledala z približnimi merami, ki sem jih želel. Tako sem dobil približno idejo, kakšno velikost material potrebujem za projekt. Odločil sem se da se bom držal ustaljenih smernic pri takem tipu in postavitvi, kar je pomenilo da je pogonski bat obrnjen navzgor, medtem ko je ekspanzijski bat postavljen vodoravno. Določil sem še da bo motor zračno hlajen predvsem zaradi zmanjšanja kompleksnosti izdelave.



Slika 17: Skica cilindrov

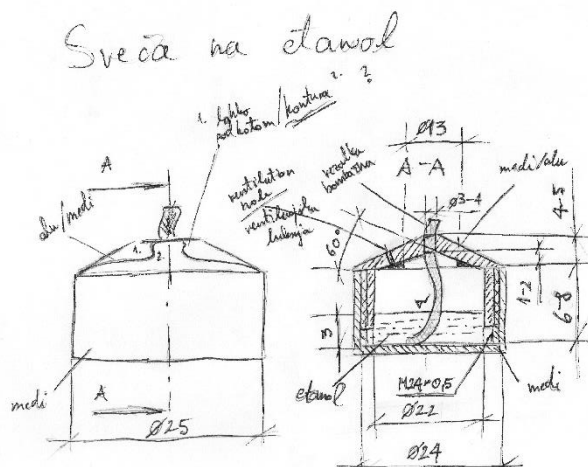


Slika 15: Plamen voščene sveče

dolžine, naj bi bila namenjena hladnemu delu, medtem ko pa bi bili ostali dve tretjini namenjeni gretemu delu motorja.

3.4.3.4. SVEČA

Skiciral sem obliko sveče in določil okvirne mere. Določil sem tudi način polnjenja sveče z gorilno tekočino (odviješ zgornji del sveče in spodnji del napolniš). Za stenj (gorilna vrstica) pa sem določil da bom uporabil bele bombažne vezalke (bombaž dobro vpija → konstanten pretok etanola → enakomerno gorenje hlapov etanola). Dodal sem tudi ventilacijsko luknjo (čim manjša), ki je namenjena temu, da se etanol ne razlije iz stenja. To pa se zgodi, ko stenj vpija etanol, pri tem pa nastaja vakuum, ki povzroči prekomerno sesanje etanola. Višek etanola, ki pa ne more zgoreti na izstopu iz notranjosti sveče pa se razlije iz stenja, po površini, ta pa se nato vname. To ni varno, saj predstavlja požarno nevarnost.



Slika 20: Skica sveče

3.4.4 IZDELAVA NAČRTOV

Vse delavniške in sestavne risbe so priložene ob maturitetni nalogi.

3.4.4.1. IZBIRA MATERIALOV

V praksi je najceneje, če bi večino motorja naredil iz aluminija ali iz jekla. Vendar sem hotel izboljšati mehanske lastnosti in povečati izkoristek ter odpornost na vplive okolja sem poleg aluminija uporabil tudi medenino, nerjaveče jeklo in manjšo količino bronca ter plastike. S tem zmanjšal uporabo predvsem jekla, s tem pa povečal izkoristek in zmanjšal težo komponent → povečana življenjska doba motorja.

3.4.4.2. IZDELAVA 3D MODELOV

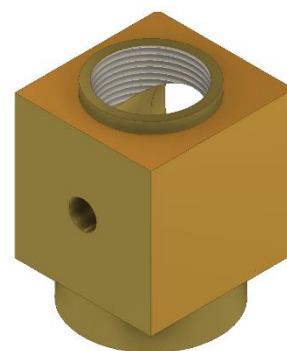
Za izdelavo načrtov sem uporabil Autodesk Inventor. Najprej sem na podlagi skic izdelal 3D modele. Nato sem zmodeliral posamezne dele in jih nato sestavil v celoto. Na podlagi celotnega modela sem nato prilagajal nekatere mere posameznih komponent, da pri gibanju ni prišlo do kolizij in, da sem dosegel boljša razmerja komponent. S tem sem zagotovil delovanje motorja (nepravilno gibanje/kolizije → onemogočeno/slabo gibanje → zastoj motorja).

1. POVEZOVALNI KOS CILINDROV

- Material: CuZn36Pb3

Izbral sem da bo narejen iz medenine, zaradi manjšega toplotnega raztezka in dobrih mehanskih lastnosti (nizek koeficient trenja) → po njem se giblje batnica kompresijskega bata.

Poleg tega bom na mestu hladnega cilindra vrezal navoj tako, da bom lahko hladni cylinder privil na povezovalni kos.

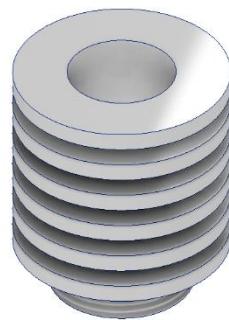


Slika 21: 3D - povezovalni kos

2. HLADNI CILINDER:

- Material: AlMg1SiCu

Material, ki ga želim uporabiti je aluminij, predvsem zaradi njegove odlične toplotne prevodnosti, ki je pri hladnem cilindru zelo pomembna. Poleg tega pa ima aluminij visoko toplotno razteznost, ki je večja od medenine, kar bi pomenilo, da bom ob namestitvi na povezovalni kos dosegel tesnost in s tem zmanjšal volumetrične izgube (ko se sistem segreje). Dizajnu sem še dodal hladilna rebra, kar bo pomagalo hitreje odvajati toploto.



Slika 22: 3D - hladni cilindri

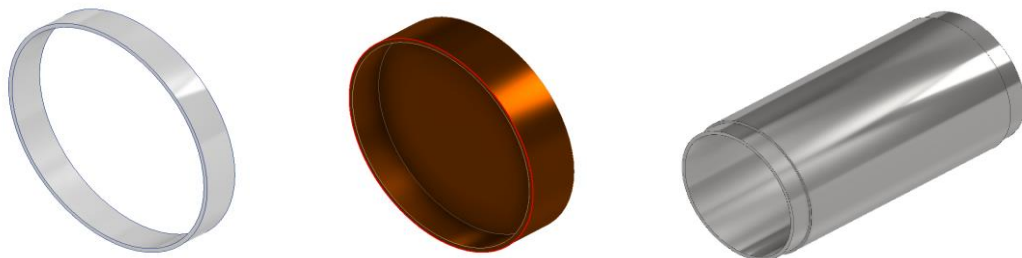
Ker nameravam narediti bat iz medenine zaradi manjšega koeficienta trenja sem se odločil da bom hladnemu cilindru dodal še vložek iz jekla (bolje bi bilo uporabiti lito železo, zaradi večje vsebnosti grafita, a ga ni bilo na voljo). Zaradi tega, ker pa je ena od zahtev hladnega cilindra da odvaja toploto, sem moral narediti vložek čim tanjši (debelina stene 0,5 – 0,8mm). Odločil sem se za debelino 0,5 mm saj bom s tem dosegel boljše odvajanje toplote, hkrati pa bi bilo bolj tanjšo steno od tega težko narediti.

3. GRETI CILINDER

- Material: X5CrNi18-12, AlMg1SiCu, CuSn8

Določil sem uporabo nerjavečega jekla, saj ima nizko toplotno prevodnost, kar je tudi zahteva tega kosa. Poleg tega pa je material korozijsko odporen.

Na koncu, kjer se cilindri priključijo v povezovalni kos sem se odločil da bom dodal tanjšo steno aluminija, saj ima material visok toplotni raztezek, kar pa pomeni, da bo ob segretju material raztezal in zagotovil tesen spoj, saj bo greti cilindri ob sobni temperaturi le pritisnjen s tesnim ujemom v povezovalni kos. Na koncu gretga cilindra sem dodal pokrov iz bron, saj se bo s tem cilindri hitreje segrel.



Slika 23: 3D - greti cilindri s tesnilom in pokrovom

4. POGONSKI BAT

- Material: CuZn36Pb3

Izdelan bo iz medenine zaradi njenih odličnih mehanskih lastnosti (odpornost proti koroziji, nizek koeficient trenja). Na izbiro sem imel tudi aluminij, saj je ena od njegovih prednosti, da je izredno lahek, kar je zelo pomembno pri Stirlingovem motorju, saj je volumski raztezki na manjših motorjih ne zagotavljajo visokih tlakov. Razlog zaradi katerega pa sem se odločil za medenino je predvsem nizek koeficient trenja, ta pa je pri aluminiju zelo visok (sila trenja > sila teže).



Slika 24: 3D - bat

Na bat sem dodal 2 utora. Namenjeni so, da se v njih ujame olje, ki pa podmazuje stene batnega vložka in s tem še dodatno zmanjšamo trenje in povečujemo tesnost.

5. BATNI VLOŽEK

- Material: Jeklo 12.9

Odločil sem se za uporabo vložka zato, da se stene hladnega cilindra ob stiku z batom ne bo obrabljala saj je iz aluminija, ki je mehkejši od medenine. Vložek bom naredil iz jekla, ker pa ta material slabo odvaja toploto, mora biti njegova stena tanka, da se bo toplota hitro prenesla na hladni cylinder. Njegov zunanji premer bo 10mm, notranji pa 9mm. Ujem med cilindrom in vložkom mora biti tesen, saj se bo ob segretju aluminij raztegnil in zagotovil tesen spoj med cilindrom in vložkom. Njegova površina bo spolirana, v notranjosti pa honana. Površina bo barvno brunirana zaradi korozijske zaščite in estetskega izgleda.



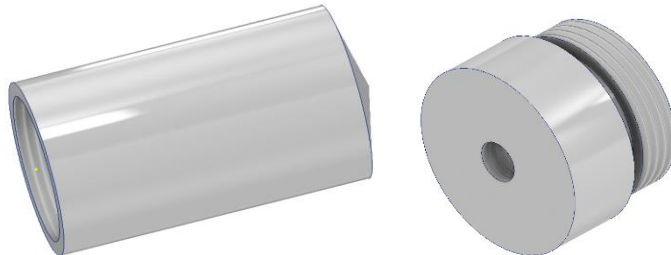
Slika 25: 3D - batni vložek

6. EKSPANZIJSKI BAT

- Material: AlMg1SiCu

Zahteva tega dela je lahkost, saj ne prispeva k povečanju moč, ampak k zmanjšanju moči, saj je breme pogonskemu batu. Odločil sem se, da bo v notranjosti votel, s tem bom še bolj zmanjšal težo, poleg tega pa bo ta votlost delovala kot delni regeneratorski, saj ni prostora za namestitev drugje..

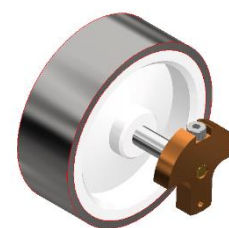
Na koncu bata sem še dodal obliko stožca, s tem bom zmanjšal zračni upor bata in s tem povečal izkoristek motorja.



Slika 26: 3D - ekspanzijski bat

7. ROČIČNA GRED

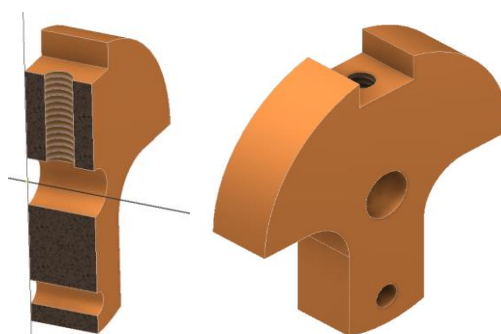
Glavni namen ročične osi je, da potisno gibanje bata pretvori v rotacijsko gibanje. Ta gred je povezana preko ročičnega mehanizma z batom. Glavna lastnost gredi pa je, da je ročični mehanizem povezan z njo izven njenega centra.



Slika 27: 3D - polovica sestavljene ročične gredi

- PROTIUTEŽ
 - Material: CuSn8

Odločil sem se uporabiti bron, ki pa je dražji, vendar ga za izdelavo potrebujem le majhno količino. Poleg tega je nekoliko trši od ostalih barvnih kovin (medenina), kar pomeni da se površina protiuteži ob stiku z distančnikom, ki je med ojnico in protiutežjo manj obrablja. Bron ima tudi dobre mehanske lastnosti (zmanjšano trenje) → stik z ročičnim mehanizmom. S tem bom povišal izkoristek



Slika 28: 3D - protiutež s prerezom

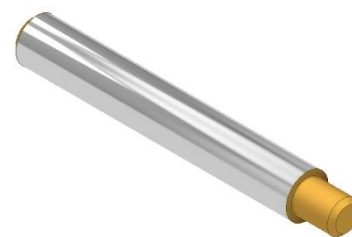
prenosa dela iz bata na gred. Ena izmed zahtev protiuteži je razpored njene teže. Protiutež ne sme biti okrogla, vendar mora imeti več mase na eni strani. Dodal sem navoj, kjer bo vijak stisnil protiutež z glavno gredjo.

▪ GLAVNA GRED

- Material: CuZn36Pb3, kromirana

Za os bom uporabil medenino premera 4mm, ki je kromirana → trša površina → boljše gibanje na stiku z ležajem.

Zaradi velikosti protiuteži sem premer osi na stiku s protiutežjo zmanjšati na premer 3mm.



Slika 29: 3D - glavna gred

▪ ZATIČ ROČIČNE GREDI

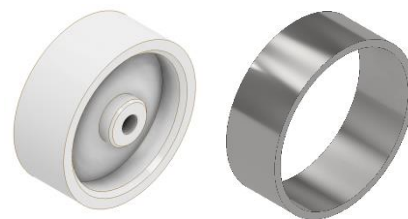
- Material: CuZn36Pb3

Za zatič, ki povezuje ročični mehanizem z protiutežjo, bom uporabil palico medenine premera 1,5mm. Medenino sem uporabil zaradi njenih mehanskih lastnosti (nizek koeficient trenja). Poleg tega pa je medenina mehkejša, kar pomeni, da se bo zatič bolj obrabljal kot ročični mehanizem (lažje zamenjati zatič kot ročični mehanizem).

8. VZTRAJNIK

- Material: X2CrNiMo17-12-2, HDPE

Glavna lastnost vztrajnika je, da ima težo skoncentrirano na obodu oz. krožnici vztrajnika. Zato bo sredinski del narejen iz plastike, saj je lahka. Izbral sem si belo barvo, ker se estetsko prilega ostalim komponentam. Krožnica pa bo narejena iz nerjaveče brezšivne cevi. Brezšivno sem izbral zato,



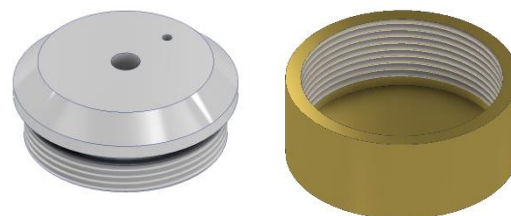
Slika 30: 3D - oba dela vztrajnika

ker mi cevi ne bo potrebno obdelati v notranjosti. Ker je cev težja, bo masa skoncentrirana na obodu vztrajnika. To pomeni, da bo imel vztrajnik večji masni moment, ta pa bo vzdrževal rotirajoče gibanje ročične gredi.

9. SVEČA

- Material: CuZn36Pb3, AlMg1SiCu

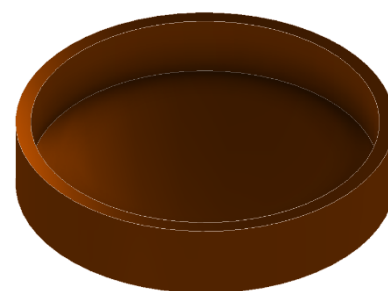
Sveča je sestavljena iz dveh delov, ki ju združimo tako, da ju skupaj privijemo. Sveča potrebuje ventilacijsko luknjo, saj se brez nje v sveči ustvari vakuum, ki povleče velike količine etanola nenadzorovano, kar povzroči razlitje etanola. Ventilacijsko luknjo sem naredil čim manjšo, saj ne želim,



Slika 31: 3D - oba dela sveče

da se hlapi tekočine v notranjosti sveče vnamejo. Luknja bo velika 1mm (najmanjši sveder, ki ga imam na voljo). Odločil sem se da bo zgornji del iz aluminija, ker se segreje hitro, to pa bo povzročilo, da se etanol v stenju hitreje upari in ustvarja močnejši plamen.

Poleg sveče bo na aluminijastem podstavku še narejen podstavek za svečo iz bronu zaradi estetskega izgleda.



Slika 32: 3D - podstavek

10. BATNICE

- Material: CuZn36Pb3, kromirana

Batnice morajo biti nekoliko trše, zato sem se odločil za uporabo kromirane medenine premera 4mm. S tem bom zmanjšal obrabo batnice, predvsem batnice ekspanzijskega bata, ki se giblje po površini povezovalnega kosa. Poleg tega pa sem isti material uporabil že pri ročični gredi. Obe batnici sta enaki, razlikujeta se le po celotni dolžini in dolžini navoja. Na enem koncu je navoj M4, na drugem pa zareza za nerjaveče ojnice katere bodo pritrjene z medeninastim zatičem.

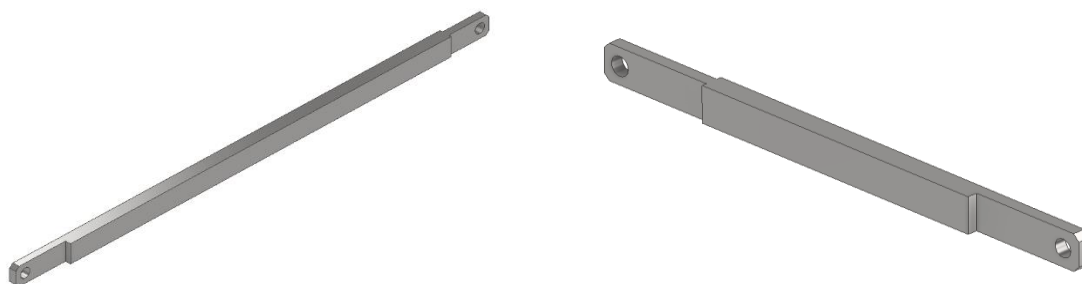


Slika 33: 3D - batnice

11. ROČIČNI MEHANIZEM

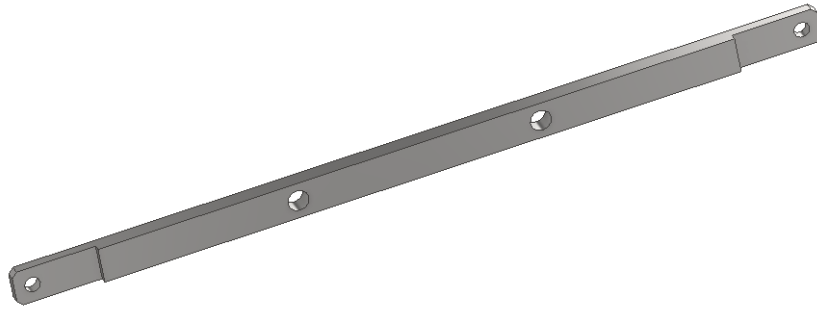
- Material: X5CrNiMo17-12-2, pločevina

Ena izmed najpomembnejših lastnosti ročic in ojníc pri Stirlingovem motorju je njihova lahkost, saj motor nima velike moči. Uporabil bom pločevino zaradi njene lahкости. Da pa se ne bo upogibala sem se odločil za nekoliko debelejšo (2mm). Zaradi odpornosti na korozijo bo pločevina nerjaveča. Ojnice so si podobne, razlikujejo se le po celotni dolžini. Na obeh straneh imajo luknje za medeninaste zatiče.



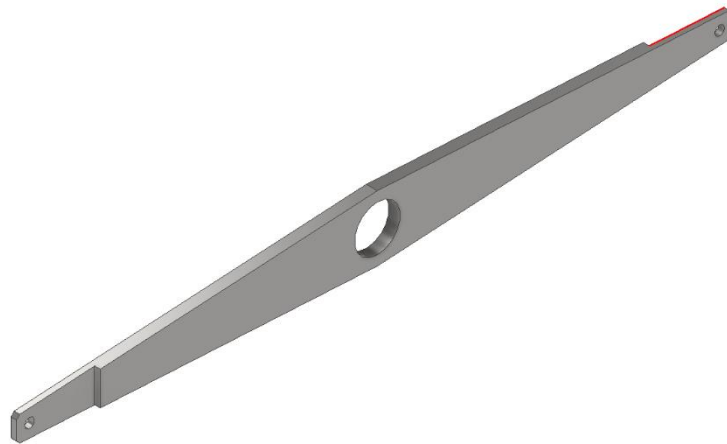
Slika 34: 3D - ojnica 1 in 2

Ena izmed ojníc ima še po dolžini dve dodatni luknji. Ta ročica je neposredno povezana na ročično gred. Luknji sta namenjeni balansiranju, tako da lahko na njiju privijem ploščico za dodatno maso in s tem izboljšam delovanje bata, če je potrebno.



Slika 35: 3D – ojnica 3

Glavna ročica je najpomembnejša pri ročičnem mehanizmu, ker je na njo uprta največja sila, sem na njeno glavno os, kjer bo pritrjena na nosilni stolp, odločil za uporabo ležaja, s tem bom drastično zmanjšal trenje in s tem povečal izkoristek stroja.

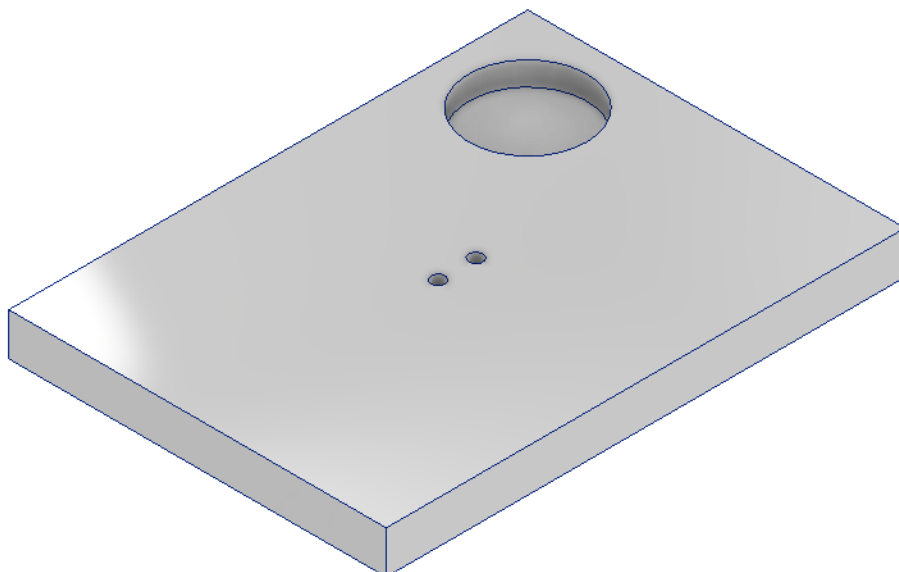


Slika 36: 3D - glavna ročica

12. PODSTAVEK

- Material: AlMg1SiCu

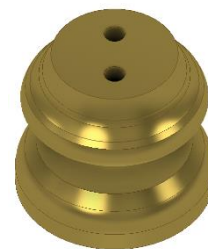
Sledil sem skici. Torej, podstavek je iz plošče aluminija, v katero je narejena luknja, v katero bom spravil svečo po uporabi. Narejeni sta tudi dve luknji skozi kateri gresta dve navojni palici, ki skupaj pritrđita celotni sestav.



Slika 37: 3D - podstavek

- DISTANČNIK
 - Material: CuZn36Pb3

Distančnik služi temu namenu, da zgornji sestav loči od podstavka na določeno višino. Zmodeliral sem ga kot paličast kos medenine. Pri obdelavi pa mu bom dodal konturo po lastni želji. Skozi njega sta izvrtani dve luknji za navojni palici M3.

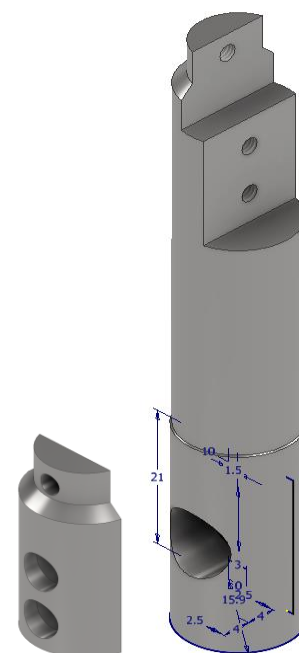


Slika 38: 3D - distančnik

13. STEBER GLAVNE ROČICE

- Material: X4CrNi18-12

Najpomembneje je, da je stolp dovolj visok. More biti nekoliko višji od sestava cilindrov. Stolp ima na dnu dve luknji, v katerih je vrezan navoj M3. Tukaj se stolp pritrdi na podstavek s pomočjo navojnih palic, ki so stisnjene z maticami na podstavku.. Prvi je nosilni stolp, ki ima na vrhu luknjo z navojem M3. Drugi pa je košček, ki se pritrdi na stolp s pomočjo vijakov, ta pa ima izvrtano luknjo premera 3mm. Skozi to luknjo se vstavi medeninasti zatič, ki se privije na luknjo na nosilnem stolpu s pomočjo navoja M3. Ko sta dela sestavljena ima steber na vrhu zarezo v katero je vstavljena glavna ročica ročičnega mehanizma

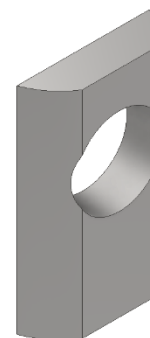


Slika 39: 3D - steber glavne ročice z nosilcem

14. NOSILEC ROČIČNE GREDI

- Material: X4CrNi18-12

To je eden izmed pomembnejših delov, saj zagotavlja vzporednost osi ročične gredi z osmi ročičnega mehanizma. Na dnu ima dve luknji z navojem M2, ki pritrđita del na nosilno ploščo. Izvrtano pa ima tudi luknjo premera 10mm za ležaj ročične gredi. Narejen bo iz nerjavečega jekla zaradi njegove korozijske odpornosti.



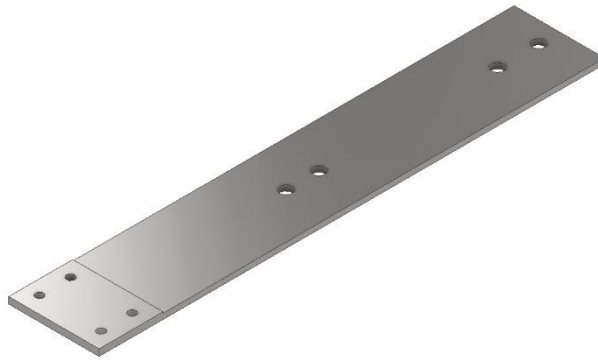
Slika 40: 3D - nosilec ročične gredi

15. NOSILNA PLOŠČA

- Material: X5CrNiMo17-12-2, pločevina

To je plošča, ki bo nosila celotni zgornji sestav. Odločil sem se za uporabo pločevine, saj je dovolj trdna za uporabo in tudi ni težka. Na podstavek bo pritrjena preko

nosilnega stebra → skozi njo gresta navojni palici → sila privitja med stebrom in distančnikom jo drži na mestu.



Slika 41: 3D - nosilna plošča

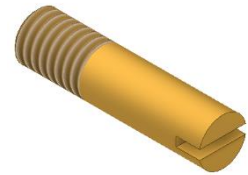
16. OSTALO

- MALI ZATIČI
 - Material: CuZn36Pb3

Narejen iz medenine, zaradi dobrih mehanskih lastnosti. To so zatiči, ki skupaj povezujejo ojnice, glavno ročico in batnice. Zatiči so premera 1,5mm.

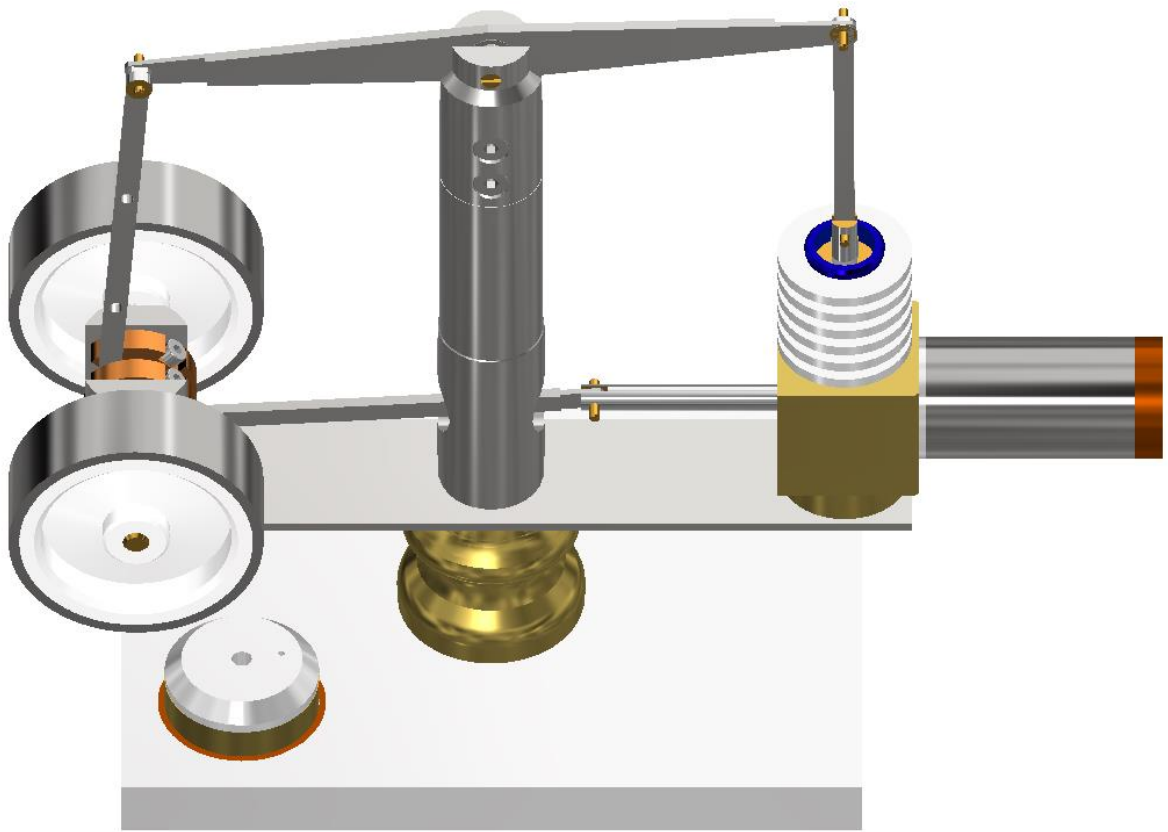
- OS GLAVNE ROČICE
 - Material: CuZn36Pb3

Narejena je iz medenine, zaradi dobrih mehanskih lastnosti. Skupaj povezuje steber in glavno ročico ročičnega mehanizma. Na eni strani ima navoj M3 za privitje, na drugi pa zarezo, za privitje s pomočjo izvijača.

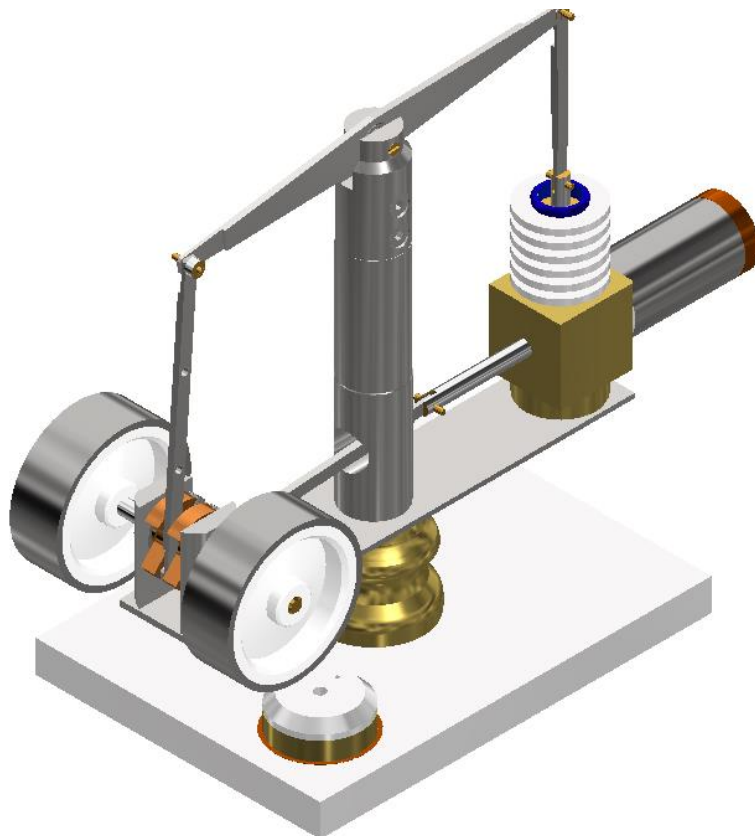


Slika 42: 3D - os glavne ročice

17. SESTAVLJEN MOTOR



Slika 43: 3D - pogled 1



Slika 44: 3D - pogled 2

3.4.5. IZRAČUNI PRED IZDELAVO

Računi so narejeni na podlagi skic ter predvidevanj in podatkov iz literature.

- Želena temperatura izgorevanja sveče: $T_S \approx 500 - 800^\circ\text{C}$
- Predviden izkoristek toplote plamena (neposredna bližina): $\eta_{SV} = 40 - 42\% \approx 41\%$
- Predviden izkoristek toplote plamena (1-2cm oddaljenost): $\eta_{SV} = 30 - 40\% \approx 36\%$
- Predviden izkoristek prenosa toplote na fluid: $\eta_{Pth} \approx 45\%$
- Notranji premer hladnega cilindra: $d_H = 9\text{mm}$
- Notranji premer gretega cilindra: $d_G = 15\text{mm}$
- Predvidena delovna temperatura gretega cilindra: $T_{max} = 280^\circ\text{C}$
- Predvidena delovna temperatura hladnega cilindra: $T_{min} = 140 - 150^\circ\text{C}$
- Predviden čas gorenja sveče: $t_S = 1 - 3\text{min} \approx 150\text{s}$ (aritmetična sr.)

3.4.5.1. VOLUMEN IN VOLUMSKO RAZMERJE

Pot, ki jo posamezna bata cilindrov prepotujeta je enaka, saj imata oba enako oprijemno točko na rolični gredi.

- Hod batov: $s_H = s_G = 14,20\text{mm}$

Hladni cilinder:

- $d_H = 9\text{mm}$

Enačba 7

$$V_H = A_H \cdot s_H = \frac{\pi \cdot d_H^2}{4} \cdot s_H = \frac{\pi \cdot 9^2}{4} \cdot 14,20 = 903,36\text{mm}^3$$

Greti cilinder:

Upošteval bom premer ekspanzijskega bata zaradi poenostavljenega izračuna.

- $d_G = 15\text{mm}$

Enačba 8

$$V_G = A_G \cdot s_G = \frac{\pi \cdot d_G^2}{4} \cdot s_G = \frac{\pi \cdot 15^2}{4} \cdot 14,20 = 2509,35\text{mm}^3$$

Volumsko oziroma kompresijsko razmerje:

Enačba 9

$$\varepsilon = \frac{V_G}{V_H} = \frac{2509,35}{903,36} = 1,86 \Rightarrow 2,78$$

3.4.5.2. ODDANA ENERGIJA SVEČE

Razberemo podatke iz tabele:

- $\rho_{EP} (\text{plin}) = 0,145 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $q_{IZGOREVANJE} (\text{plin}) = 29017 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- $\rho_{ET} (\text{tekočina}) = 785,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Predvidevan volumen tekočega etanola:

- $d_{SV} = 22\text{mm}$
- $h_E = 3\text{mm}$

Enačba 10

$$V_E = \frac{\pi \cdot d_{SV}^2}{4} \cdot h_E = \frac{\pi \cdot 22^2}{4} \cdot 3 = 1140,4\text{mm}^3$$

Izračun oddane toplote sveče:

Enačba 11

$$Q_E = q_{IZG.} \cdot V_E \cdot \rho_E$$

$$Q_E = 29017 \cdot 1140,4 \cdot 10^{-9} \cdot 785,3 = 25,99\text{kJ}$$

3.4.5.3. ZAHTEVANA TOPLOTA

Potrebna toplota za segretje gretega cilindra:

- $D_G = 17\text{mm}$
- $d_G = 16\text{mm}$
- $L_G = 30\text{mm}$
- $\rho_{316L} = 8000\text{kg/m}^3$
- $c_{p-316L} = 0,5\text{kJ/kgK}$
- $T_2 = 280^\circ\text{C} = 553\text{K}$
- $T_1 = 18^\circ\text{C} = 255\text{K}$
- $\rho_{Bron} = 8800\text{kg/m}^3$
- $c_{p-B} = 0,435\text{kJ/kgK}$
- $t_{stene} = 2\text{mm}$

Sprememba temperature:

Enačba 12

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 553 - 255 = 298\text{K}$$

Prostornina materialov cilindra:

Enačba 13

$$V_{316L} = \frac{\pi \cdot (D_G^2 - d_G^2)}{4} \cdot L = \frac{\pi \cdot (17^2 - 16^2)}{4} \cdot 30 = 777,54\text{mm}^3$$

Enačba 14

$$V_{Bron} = \frac{\pi \cdot D_G^2}{4} \cdot t_{stene} = \frac{\pi \cdot 17^2}{4} \cdot 2 = 453,96\text{mm}^3$$

Tabela 1: Lastnosti etanola

Property	Value	Unit	Value	Unit
Acidity (pKa ₁)	15.9			
Autoignition temperature	636	K	363	°C
Boiling Point	351.39	K	78.2	°C
Critical density	5.91	mol/dm ³	272	kg/m ³
Critical Pressure	6.25	MPa=MN/m ²	62.5	bara
Critical temperature	513.9	K	240.8	°C
Critical Volume	169	cm ³ /mol	0.00367	m ³ /kg
Density (gas) at 0.08 bar	3.15	mol/m ³	0.145	kg/m ³
Density (liquid)	17046	mol/m ³	785.3	kg/m ³
Flammable (gas and liquid)	yes			
Flash point	286	K	13	°C
Gas constant (individual) - R	180.5	J/kg K	0.05013	Wh/(kg K)
Gibbs free energy of formation (gas)	-168	kJ/mol	-3647	kJ/kg
Specific heat capacity, Cp (isobaric) (gas)	74	J/mol K	1.60	kJ/kg K
Specific heat capacity, Cp (liquid)	118	J/mol K	2.57	kJ/kg K
Specific heat capacity, Cv (isochoric) (gas)	65	J/mol K	1.42	kJ/kg K
Specific heat capacity, Cv (liquid)	100	J/mol K	2.18	kJ/kg K
Heat (enthalpy) of combustion (gas)	1336.8	kJ/mol	29017	kJ/kg
Heat (enthalpy) of formation (gas)	-234	kJ/mol	-5079	kJ/kg
Heat (enthalpy) of fusion at -173°F/-114°C	4.9	kJ/mol	106	kJ/kg
Heat (enthalpy) of evaporation	42.32	kJ/mol	919	kJ/kg
Ionization potential	10.47	eV		
log K _{OW} (Octanol/Water Partition Coefficient)	-0.31			
Melting point	159.01	K	-114.1	°C
Molecular Weight	46.069	g/mol		

The Engineering ToolBox (2018). Ethanol - Thermophysical properties. Pridobljeno s: https://www.engineeringtoolbox.com/ethanol-ethyl-alcohol-properties-C2H6O-d_2027.html [17.9.2024]

Potrebna toplota za segretje:

Enačba 15

$$Q_{316L} = V_{316L} \cdot \rho_{316L} \cdot c_{p-316L} \cdot \Delta T = 777,54 \cdot 10^{-9} \cdot 8000 \cdot 0,500 \cdot 298 = \mathbf{0,927kJ}$$

Enačba 16

$$Q_{Bron} = V_{Bron} \cdot \rho_{Bron} \cdot c_{p-B} \cdot \Delta T = 453,96 \cdot 10^{-9} \cdot 8800 \cdot 0,435 \cdot 298 = \mathbf{0,518kJ}$$

Učinkovitost prenosa toplote cilindra na delovni fluid:

- $\eta_{Pth} \approx 45\%$ (približek izkoristka prenosa plinskega gorilnika)

Potrebna toplota z upoštevanjem izkoristka:

Enačba 17

$$Q_{G+\eta_{Pth}} = \frac{Q_G}{\eta_{Pth}} = \frac{Q_{316L} + Q_{Bron}}{0,45} = \frac{0,927 + 0,518}{0,45} = \mathbf{3,21kJ}$$

Toplota dovedena delovnem fluidu v cilindru:

Enačba 18

$$P_G = \frac{Q_{G+\eta}}{t_s} = \frac{3,21 \cdot 10^3}{150} = \mathbf{21,4W}$$

3.4.5.4. TLAK V MOTORJU

Tlak upoštevamo iz absolutne ničle.

- $p_1 = 101,325 \text{ kPa} = 1,01\text{bar}$
- $T_{max} = T_3 = T_4 = 673\text{K}$
- $T_{min} = T_1 = T_2 = 418\text{K}$
- $V_1 = V_4$
- $V_2 = V_3$

Stanje 1:

$$V_1 = 2509,35\text{mm}^3 \quad T_1 = 418\text{K}$$

$$p_1 = \mathbf{1,01bar}$$

Stanje 2:

$$V_2 = 903,36\text{mm}^3 \quad T_2 = 418\text{K}$$

Enačba 19

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{V_1}{V_2} = 101,325 \cdot \frac{2509,35}{903,36} = 281,46\text{kPa} = \mathbf{2,81bar} \rightarrow \text{rel. tlak} = \mathbf{1,8bar}$$

Stanje 3:

$$V_3 = 903,36\text{mm}^3 \quad T_3 = 673\text{K}$$

$$\text{Izohora} \rightarrow p_2 = p_3 = \mathbf{2,81bar} \rightarrow \text{rel. tlak} = \mathbf{1,8bar}$$

Stanje 4:

$$V_4 = 2509,35\text{mm}^3 \quad T_4 = 673\text{K}$$

$$\text{Izohora} \rightarrow p_1 = p_4 = 1,01 \text{ bar}$$

3.4.5.5. IZKORISTEK MOTORJA

Za izračun toplotnega izkoristka uporabimo Carnotovo enačbo (najvišji možni izkoristek):

Enačba 20

$$\eta_{thc} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

$$\eta_{thc} = 1 - \frac{418}{673} = 0,38$$

3.4.5.6. TEORETIČNA PROIZVEDENA MOČ

- $\eta_s = 0,38$
- $P_G = 21,4W$

Enačba 21

$$P_s = P_z \cdot \eta_s$$

$$P_s = 21,4 \cdot 0,38 = 8,132W$$

3.4.6. POSTAVITEV MER

Mere sem postavil na skicah tako, da med izdelavo ni prišlo do nepotrebnih preračunavanj, zato se mere včasih ponovljene.

Pri večini predmetov je bila potrebna natančnost v stotinkah, odstopanja so bila lahko le majhna. Da sem lahko natančno izmeril obdelane dele sem uporabil elektronsko pomično merilo.

4. PRAKTIČNI DEL

V tem poglavju bom predstavil potek izdelave od materiala do končnega kosa, postopke izdelave izdelka ter končani izdelek.

4.1. MATERIALI IN ORODJA (TABELE)

Nabava materiala:

Tabela 2: Nabava materiala

Št. materiala	Naziv	Material	Št. kosov	Standard	Cena
1	Imbus vijak M3 x 6 A2	X5CrNi18-10	10	DIN 912	0,69€
2	Podložka M3	X5CrNi18-10	30	ISO 7089	0,47€
3	Podložka M2 A2	X5CrNi18-10	100	ISO 7089	1,01€
4	Imbus vijak M2 x 6 A2	X5CrNi18-10	10	DIN 912	0,49€
5	Imbus vijak M2 x 4 A2	X5CrNi18-10	4	DIN 912	0,29€
6	Ležaj Japan MR104ZZ	Legirano jeklo	3	/	18,30€
7	Ležaj Japan 683	Legirano jeklo	1	/	4,83€
8	Navojna palica M3 x 1000 A2	X5CrNi18-10	1	/	2,63€
9	Matica M3 A2	X5CrNi18-10	30	DIN 934	0,47€
10	Podložka M3	CuSn33	10	DIN 125-1	0,51€
11	Imbus vijak M3 x 5 A2	X5CrNi18-10	8	DIN 7984	0,27€
12	O-ring 15 x 1,5	NBR70	3	/	1,46€
13	Palica Ø30 x 70	CuZn36Pb3	1	/	15,01€

14	Palica Ø25 x 50	CuSn8	1	/	35,21€
15	Palica Ø30 x 100	AlMg1SiCu	1	/	21,50€
16	Palica Ø18 x 100	X4CrNi18-12	1	/	17,82€
17	Cev Ø40 x 2 x 150	X2CrNiMo17-12-2	1	/	19,87€
18	Palica Ø1,5 x 200	CuZn36Pb3	1		1,55€
19	Palica Ø16 x 80	Jeklo 12.9	1	ISO 898-1	13,45€
20	Radijska antena Ø4 x 150	CuZn36Pb3 - kromirano	1	/	8,00€
21	Plošča 500 x 500 x 2	X5CrNiMo17-12-2	1	/	22,34€
22	Plošča 150 x 250 x 15	AlMg1SiCu	1	/	18,65€
SKUPAJ			220		204,82€

Pri nabavi materiala sem vzel nekaj rezerve.

Nabava orodja:

Tabela 3: Nabava orodja

Orodja	Material	Lokacija nabave	Količina	Cena
Rezkar Ø3 – 4T (60Hrc)	Karbidna trdina	MSD GROUP d.o.o. Pivka	2	14,15€
Rezkar Ø4 R0.5 – 4T (50Hrc)	Karbidna trdina	MSD GROUP d.o.o. Pivka	1	8,54€
Rezkar Ø6 R0.5 – 4T (50Hrc)	Karbidna trdina	MSD GROUP d.o.o. Pivka	1	11,10€
Rezkar Ø4 R0.5 L100 – 4T (50Hrc)	Karbidna trdina	MSD GROUP d.o.o. Pivka	1	14,57€
Rezkar Ø8 R0.5 – 4T (50Hrc)	Karbidna trdina	MSD GROUP d.o.o. Pivka	1	18,54€
Rezkar Ø12 R0.5 – 4T (50Hrc)	Karbidna trdina	MSD GROUP d.o.o. Pivka	1	37,82€
Rezkar Ø25 M2 2T	HSS	GBR Engineering Services Ltd. Anglija	1	49,66€
Navojni svedri M2	HSS	Kamm d.o.o. Ljubljana	1	18,72€
Loctite 648		Nemčija	1	11,37€
Rezalni disk 1mm	HSS	Kitajska	6	26,02€
Rezalni disk 2mm	HSS	Kitajska	2	14,19€
Rezalni disk 4mm	HSS	Kitajska	1	16,15€
Iskalec roba Starrett 827MA	Visokoogljlično jeklo	Nemčija	1	33,88€
SKUPAJ			20	274,71€

4.2. IZBIRA ORODJA

Nekaj orodja mi je manjkalo, zato sem ga nekaj kupil, nekaj pa sem ga naredil tudi sam.

4.2.1. IZDELAVA SVOJEGA ORODJA

Za nekatere operacije potreboval narediti svoje orodje. S tem sem pridobil na času izdelave ter natančnosti.

1. DISKNI REZALEC

To orodje sem potreboval za izdelavo vzdolžnih zarez na batnicah. Zareze so morale biti točno na sredini ter natančno debeline 1mm. Potreboval sem ponovljivost procesa in pravokotnost reza. To orodje mi je omogočalo natančne vodoravne reze v centru batnice, točne debeline. To je pomembno, da ni vzdolžnega gibanja po osi med batnico in ojnico.



Slika 45: Diskni rezalnik

2. NOŽ ZA VREZAVANJE NAVOJEV

To orodje in držalo sem potreboval za izdelavo notranjih in zunanjih navojev po meri (nestandardni). Z navadnim navojnim nožem je nemogoče priti čisto blizu postruženega roba obdelovanca z navojem s majhnim korakom. Zato sem izdelal držalo v katerega lahko vpnem različne navojne svedre, ki imajo premer stebila 6mm. Za orodje sem uporabil zlomljen navojni sveder M5 in ga pobrusil tako da je rezal le 1 zob od celotnega svedra Nato sem orodje vpel v držalo tako, da sem stisnil dva medeninasta vijaka. Držalo sem tudi bruniral.



Slika 46: Držalo in vpeto orodje

4.3. POSTOPKI OBDELAVE

Postopki, ki sem jih med izdelavo uporabil so mi bili večinoma znani, razen vrezovanje navojev na stružnici. To sem delal prvič. Pomagal sem si tudi z orodjem, ki sem ga naredil sam. Postopki med izdelavo:

- **ROČNO ŽAGANJE**
Žaganje je mehanski postopek odstranitve materiala na obdelovancu po vnaprej določeni poti ali zarezi. Žaganje je vsestranska in široko uporabljena metoda za rezanje različnih materialov, vključno z lesom, kovino, plastiko in kompoziti.
- **PILJENJE**
Piljenje je postopek ročne strojne obdelave pri katerem odstranjujemo spremenljive prereze delcev obdelovanca. Postopek se uporablja kot eden izmed končnih obdelav, s katerim se obdelovanec obdela do pravilnih dimenzij ali pa za odstranitve igel obdelovanca. Orodje je pila. Glavno gibanje orodja je premočrtno z obdelovano površino in se izvaja, ko se pila premika naprej. Povratno gibanje pa je prosto.
- **BRUŠENJE**
Brušenje je natančen obdelovalni postopek, ki uporablja abrazivni material za odstranjevanje materiala in oblikovanje obdelovanca.
- **POLIRANJE**
Poliranje je postopek končne obdelave, pri katerem se fina ohlapna zrnca, medtem ko so razpršena v tekočini ali pasti, podrgnejo ob obdelovanec z uporabo mehkega blaga, da se gladi površina obdelovanca, ne da bi se spremenila njegova dimenzija ali oblika.
- **VRTANJE**
Vrtanje je postopek obdelave, pri katerem se s svedrom izvrti luknja s krožnim prerezom v trdnih materialih. Sveder je vrtljivo spiralno rezalno orodje, večtočkovno.

Rezalni rob je pritisnjen na obdelovanec in se vrti. To prisili rezalni rob, da začne rezati. Odrezki se iz luknje odstranjujejo zaradi spiralne oblike.

- **POVRTAVANJE**
Postopek odstranjevanja materiala, ki vključuje natančnejše povečanje že obstoječih premerov lukenj in izboljšanje površinske obdelave sten luknje. Orodje, ki se uporablja za operacijo povrtavanja, se imenuje povrtalo. Ta postopek je končna operacija.
- **VREZOVANJE NAVOJEV (ročno)**
Rezanje navojev je postopek ustvarjanja spiralnih utorov v že obstoječi luknji. Navojni sveder vstopa navpično v okroglo izvrtino z določenim številom vrtljajev in z določeno silo.
- **STRUŽENJE**
Struženje je postopek oblikovanja izdelka, pri katerem se s procesom odstranjevanja odvečnega materiala ustvarja valjaste oblike. Vrste struženja:
 - Vzdolžno struženje
Strojna operacija za odstranjevanja materiala vzdolžno iz obdelovanca, da se ustvari ravna cilindrična oblika.
 - Čelno struženje
Strojna operacija, ki vključuje odstranjevanje materiala s čelne strani obdelovanca, da se ustvari ravna in pravokotna površina. Postopek se pogosto uporablja za zagotovitev, da je čelna ploskev obdelovanca pravokotna z osjo vrtenja.
 - Notranje struženje
Postopek obdelave, ki se uporablja za povečanje ali izboljšanje notranjega premera že obstoječe luknje v obdelovancu. Gre za uporabo eno-točkovnega rezalnega orodja, nameščenega na konjičku ali pa na naslonu za orodje.
 - Konturno struženje
Tehnika obdelave, ki se uporablja za oblikovanje obdelovancev z zapletenimi okroglimi cilindričnimi profili. Vključuje natančno manipulacijo poti rezalnega orodja za ustvarjanje kompleksnih krivulj, kotov in kontur vzdolž dolžine obdelovanca. Ta tehnika omogoča izdelavo zapletenih geometrij.
 - Odrezovanje
Strojna operacija na stružnici, ki se uporablja za odrezovanje obdelovanca iz večjega osnovnega materiala. Primarni namen odrezovanja je ločiti dokončan ali polizdelek od preostalega materiala, tako da se ustvarijo posamezni kosi z določeno dolžino.
 - Notranje vrezovanje navojev
Postopek obdelave, ki vključuje ustvarjanje navojev v vnaprej izdelani izvrtini v obdelovancu. Vreteno stružnice vrti obdelovanec, medtem ko se orodje za navoje podaja v luknjo z določenim korakom, da postopoma oblikuje notranje navoje. Geometrija orodja mora ustrezati želenemu profilu navoja, kar zagotavlja natančno poravnavo in pravilno ujemanje z zunanji navoji.
 - Narebričenje

Operacija, ki se uporablja za ustvarjanje teksturnih vzorcev na površini obdelovanca. Ta postopek vključuje uporabo orodij za rebranje, ki pritiskajo na vrteči se obdelovanec, da na njegovo površino vtisnejo rombaste ali ravne črte. Rezultat je vizualna izboljšava, ki izboljša oprijem in dodaja estetsko privlačnost.

- Zunanje vrezovanje navojev

Strojna operacija, ki se uporablja za ustvarjanje navojev na zunanji površini obdelovanca. Z uporabo rezalnega orodja se obdelovanec vrti z vretenom stružnice, medtem ko se rezalno orodje podaja po dolžini obdelovanca z vnaprej določenim korakom. Ko se rezalno orodje ujame s površino obdelovanca, odstranjuje material in postopoma oblikuje zunanje navoje.

- Struženje utorov

Strojna operacija, ki se izvaja na stružnici in vključuje ustvarjanje utora ali vdolbine vzdolž dolžine obdelovanca. Ta postopek se uporablja za doseganje odsekov z zmanjšanim premerom znotraj večjega obdelovanca.

- Vrtanje na stružnici

Obdelovalni postopek, ki vključuje ustvarjanje natančnih lukenj v centru obdelovanca z uporabo ne vrtljivega rezalnega orodja. Ko se obdelovanec vrti, se nepremični sveder pomakne v material, da ustvari luknjo.

- **REZKANJE**

Rezkanje je postopek strojne obdelave z uporabo vrtljivih rezil (rezkarjev) za odstranjevanje materiala s premikanjem rezilnega roba po obdelovancu. Rezkanje zajema različne vrste operacij. Je eden izmed najpogosteje uporabljenih postopkov strojne obdelave delov z natančnimi tolerancami.

- **POBIRANJE IGLE**

Ročni postopek obdelave pri katerem s pilo odstranimo ostre robove na obdelovancu, ki so posledica obdelave površine materiala.

- **SREDIŠČNO VRTANJE**

Središčno vrtanje je strojna operacija, ki se pogosto izvaja na stružnici. Postopek vključuje ustvarjanje stožčaste luknje, znane kot sredinska luknja s pomočjo središčnega svedra na središčni točki obdelovanca. Primarni namen središčnega vrtanja je zagotoviti natančno in stabilno referenčno ali oporno točko za nadaljnje obdelave, kot so struženje, rezkanje in vrtanje.

4.4. UPORABLJENI STROJI

Za izdelavo sem uporabil namizno stružnico in rezkalni stroj z digitalnim zaslonom.



Slika 47: Namizna stružnica



Slika 48: Rezkalni stroj

4.5. IZDELAVA

1. DELI IZ PLOČEVINE

Sem spadajo: ojnice, glavna ročica in nosilna plošča.

Najprej sem razrezal velik kos pločevine, nato pa sem iz nje izrezal posamezne dele, ki so imeli približno 1mm več materiala na robu. Nato sem kos vpel v primež na rezkarju, kateremu sem prej določil referenčno točko in izvrtal luknje kot je bilo narisano na načrtu. Nato sem obdelal površini ploščic. Na koncu sem skozi luknje dal 1,5mm debelo palico medenine in vpel ploščico v primež tako, da so palice medenine ležale na zgornjem robu primeža. Potem sem odstranil material do začrtanih mer.



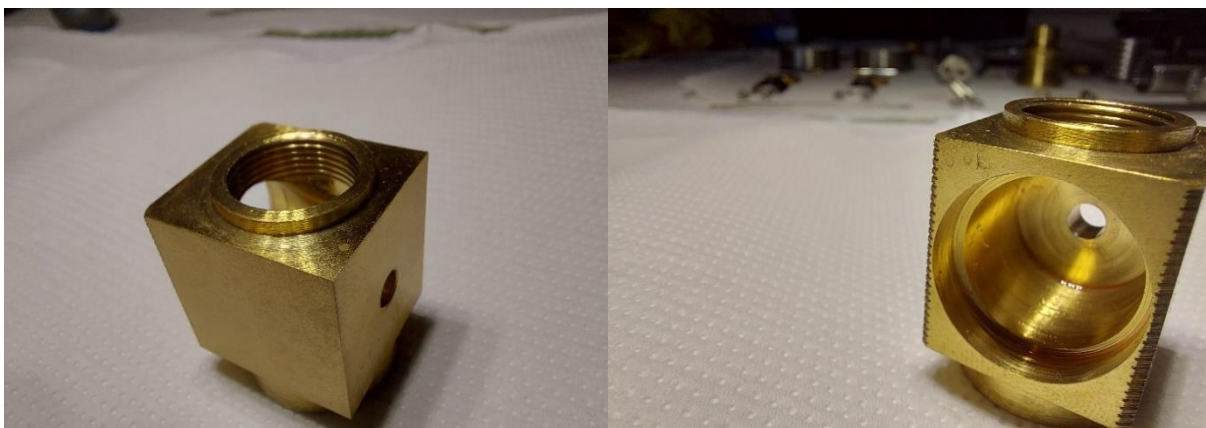
Slika 50: Ojnice in glavna ročica po izdelavi



Slika 49: Nosilna plošča po izdelavi

2. POVEZOVALNI KOS IN CILINDRI

Najprej sem odrezani material vpel v stružnico ter ga čelno poravnal. Nato sem obdelal enega izmed robov vzdolžno do pravilnega premera in potem izvrtal luknjo najprej s središčnim svedrom nato s spiralnim svedrom. Na koncu sem še luknjo obdelal z notranjim stružnim nožem. Ko sem luknjo spravil na premer 12,6mm sem na stružnici zamenjal zobnike po tabeli, da sem dobil na vodilnem vijaku z avtomatskim pomikom korak 0,5mm. Nato sem z orodjem, ki sem ga naredil za vrezovanje navojev vrezal notranji navoj. Nato sem z nožem za odrezovanje vzdolžno obdelal še drugi rob na pravilno dolžino in premer. Nato sem obdelovanec vpel v primež na rezkalnem stroju in z rezkalno glavo obdelal vse štiri robove do pravilnih mer. Potem sem na rezkalnem stroju izvrtal še luknjo za grelni cilinder in batnico ekspanzijskega bata. Najprej sem naredil izvrtino s središčnim svedrom, nato svedrom 12mm, na koncu pa sem uporabil rezkar 16mm in 18mm. Luknja za batnico pa je rabila biti natančna, zato sem jo najprej izvrtal z svedrom 3mm nato pa z rezkarjem 4mm. Na koncu sem na dnu dela izvrtal še dve luknji na rezkalnem stroju in jima ročno vrezal navoje.



Slika 51: Povezovalni kos po izdelavi



Slika 52: Hladni cilinder po izdelavi



Slika 53: Hladni cilinder med izdelavo



Slika 55: Ekspanzijski bat po izdelavi in združitvi delov



Slika 54: Greti cilinder po izdelavi in združitvi delov

3. VLOŽKI

▪ BATNI VLOŽEK

Jekleno palico premera 16mm sem vpel v stružno glavo in jo čelno poravnal ter s središčnim svedrom izvrtal luknjo. Nato sem izvrtal luknjo s svedrom 8,5mm na koncu pa sem šel v luknjo z povrtalom 9mm, da sem dobil natančno luknjo. Notranjo površino sem na koncu s jekleno volno pohonal, tako da se bo olje šlo v praske in med delovanjem mazalo dodatno bat.

Na koncu sem obdelani kos postavil na ostružke medenine ter ga segrel z butanskim gorilnikom do temnomodre barve. S tem sem kosu dodal korozijsko zaščito in ga estetsko polepšal. Kos sem še premazal z dvotaktnim oljem.



Slika 56: Batni vložek po izdelavi

4. STEBER GLAVNE ROČICE IN OS

Odrezani kos palice sem vpel v stružno glavo in ga na obeh straneh čelno poravnal. Nato sem ga vpel v primež na rezkalnem stroju. Primežu sem prej določil še referenčno točko. Potem sem v rezkalni stroj dal stročnico z središčnim svedrom ter izvrtal center namenjene luknje, nato sem šel s svedrom 9mm in izvrtati luknjo. Na koncu sem luknjo povrtal z rezkarjem 10mm zaradi boljše končne površine luknje. Nato sem kos obrnil za 90 stopinj ter z ročno žago za kovino po srednici kosa naredil zarezo. Nato sem vpel v stroj stročnico z središčnim svedrom ter izvrtal luknjo. Nato sem sem luknjo nadaljno izvrtal s svedrom 2,5mm do začrtane globine. Nato sem luknjam na zgornjemu delu, ki bo nosilec s svedrom povečal premer na 4mm do začrtane globine in kos pravokotno na srednjico palice, ki bo steber odrezal. Nato sem z rezkarjem obdelal površino že vpetega kosa po načrtu in mu nato v luknje premera 2,5mm vrezal navoj M3. Potem sem ta kos obrnil na drugo stran in mu na čelno poravnanim delu izvrtal dve luknji in jima vrezal navoja M3. Nato sem kos izpel in vpel na rezkalni stroj odrezani kos ter mu obdelal površino na odrezanih predelih. Nato sem kosa stisnil skupaj z dvema M3 vijakoma in sestavljeni kos vpel v stružno glavo. Potem sem ta kos vzdolžno obdelal na dane premere do začrtanim mer na risbi. Na koncu sem površini še z brusnim papirjem zbrusil in spoliral.





Slika 58: Varovalo



Slika 59: Os glavne ročice

5. BATNICE IN BAT

Radijski anteni sem odrezal kos s premerom 4mm. Ta kos sem vpel v stružnico in s odrezovalnim nožem odrezal dva kosa na pravilni dolžini. Nato sem obema kosoma vrezal navoj M4 do pravilne dolžine. Potem sem kosa vpel v primež rezkalnega stroja in z orodjem z rezalnimi diski, ki sem ga naredil vrezal zareze za ojnice batnic. Uporabil sem disk debeline 1mm. Najprej sem disku določil referenčno točko po Z osi, tako da sem se dotaknil zgornje površine kosa in točko shranil na zaslonu rezkalnega stroja. Potem sem orodje odmaknil od obdelovanca ter stroj prižgal in šel na globino srednjice kosa ter se z diskom dotaknil čelno poravnane površine. Takoj ko sem se dotaknil površine sem točko shranil na zaslonu in z diskom odstranil material do primerne globine. Na koncu sem rezalni disk zamenja s svedrom 1,5mm in po srednjici izvrtal luknjo.



Slika 60: Batnice že sestavljene e ojnicami



Slika 61: Bat

6. ROČIČNA GRED IN NOSILEC

Ročična gred je sestavljena iz več posameznih komponent.

▪ PROTIUTEŽ

Najprej sem odrezano palico bronu čelno poravnal in jo vzdolžno postružil na začrtani premer. Potem sem mu na stružnici izvrtal v centru luknjo premera 3mm in ga nato vpel v primež rezkalnega stroja, ki sem mu prej na določenem robu določil referenčno točko. Nato sem vpel v stroj rezkar premera 3mm in naredil utor vzdolž palice, kjer bo vijak. V centru utora sem izvrtal luknjo 1,6mm do središča obdelovanca. Nato sem palico obrnil za 90 stopinj in jo na obeh straneh obdelal z rezkarjem premera 6mm do mer na risbi. Nato sem palico vpel nazaj v stružnico ter z odrezovalnim stružnim nožem odrezal dva kosa enakih debelin.



Slika 62: Protiuteži z vijakom in zatičem

▪ OS ROČIČNE GREDI

Palico kromirane medenine premera 4mm sem vpel v stružno glavo in jo čelno poravnal. Nato sem del palice še vzdolžno postružil na premer 3mm in z robov pobral iglo s pilo. Nato sem na določeni dolžini z odrezovalnim stružnim nožem kos odrezal na pravilni dolžini. Na koncu sem mu še na odrezanem robu pobral iglo pod kotom 45 stopinj. Tako sem naredil dva identična kosa.



Slika 63: Osi ročične gredi



Slika 64: Nosilec ročične gredi z ležaji

7. VZTRAJNIK

Najprej sem odrezal dva kosa bele HPDE plastike, ki sta bila nekoliko daljša od končnih mer. Nato sem ju na stružnici najprej spravil na pravilni premer tako da sta se tesno prilegala nerjaveči nešivni cevi. Potem sem kos na stružnici najprej na obeh straneh čelno poravnal, nato pa ne obeh straneh naredil enako konturo. Na koncu sem izvrtal luknjo s središčnim svedrom, nato še s svedrom 4mm tako da sem prišel z luknjo skozi kos. To sem ponovil na drugem kosu.

Potem sem odrezal še dva kosa nerjaveče nešivne cevi ter ju na obeh straneh čelno poravnal in vzdolžno postružil na začrtane mere. Odpadno palico HDPE plastike sem nato vzdolžno postružil na premer, da se je odrezani kos cevi tesno prilegal ter ga namestil na palico. Površino cevi sem nato spoliral.

Na koncu sem oba kosa plastike in cevi skupaj združil tako, da sem na notranjost cevi dal kavčukovo lepilo ter pritisnil cev na obdelano plastiko.



Slika 65: Sestavljen vztrajnik

8. PODSTAVEK

Kos aluminija sem odrezal na malo večji dolžini kot na načrtu in ga vpel v primež na rezkalnem stroju. Z rezkarjem sem ga na obeh straneh čelno poravnal. Nato sem z rezkalno glavo obdelal še površino, da je estetsko privlačna. Na koncu sem v stročnico vpel rezkar 23mm in z rezkarjem počasi izvrtal luknjo do primerne globine, kjer bo nameščena sveča. Nato sem na primežu rezkalnega stroja določil referenčno točko in obdelovanec obrnil ter v stroj vpel sveder premera 3mm. Izvrtal sem dve luknji po načrtu za navojni palici, nato pa zamenjal stročnico in vpel v njo rezkar premera 8mm in z njim naredil žep.



Slika 66: Podstavek po izdelavi

▪ DISTANČNIK

Palico medenine sem vpel v stružno glavo in jo na obeh straneh čelno poravnal, tako da sem dobil ravni in pravokotni površini. Potem sem palico vpel v primež na rezkalnem stroju, ki sem mu prej določil na robu referenčno točko. Nato sem izračunal središče kosa iz njegovega premera, nato pa izvrtal dve luknji premera 3mm izmaknjeni iz centra kot je bilo začrtano na delavniški risbi. Nato sem kos spet vpel v stružno glavo in mu vzdolžno naredil poljubno konturo s stružnim nožem, ki sem jo s pilo zaoblil in spilil, nato pa sem površino še zbrusil. Na koncu sem z odrezovalnim stružnim nožem odrezal kos na začrtani dolžini.



Slika 67: Distančnik po izdelavi

▪ PODSTAVEK SVEČE

Nahaja se v podstavku, kjer ima slepo luknjo premera 25mm. Med izdelavo sem se odločil, da ga ne bom naredil, ker ni potreben in naredil le slepo luknjo premera 23mm, tako, da se dno sveče prilega. Lahko ga vedno dodam.

9. SVEČA

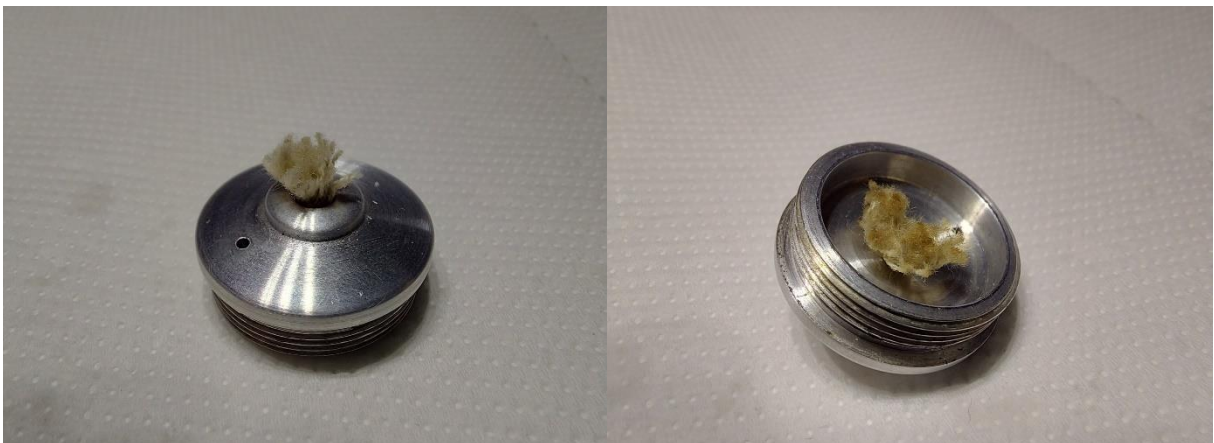
Sveča je sestavljena iz dveh delov:

- Prvi del je skodelica v katerem se nahaja etanol.
Palico medenine za skodelico, sem vpel v stružno glavo, jo čelno poravnal in vzdolžno postružil na začrtan premer. Potem sem v kos zvrtil luknjo najprej s središčnim svedrom, potem pa s svedrom 8mm na koncu pa še s svedrom 13mm do začrtane globine. Nato sem kos notranje postružil na pravilni premer in z mojim orodjem, ki sem ga naredil za vrezovanje navojev, vrezal navoj s korakom 0,5mm. Kos sem nato z odrezovalnim stružnim nožem na pravilni dolžni odrezal. Kos sem, nato vpel v primež rezkalnega stroja in mu površino, kjer sem kos odrezal z rezkarjem pobral toliko, da je bila ravna.



Slika 68: Dno sveče

- Drugi del pa je pokrov, ki se privije na skodelico.
Palico aluminija sem vpel v stružno glavo in jo čelno poravnal. Nato sem ji izvrtal luknjo. Najprej sem uporabil središčni sveder, nato sveder premera 3mm. Nato sem kos vzdolžno postružil na pravilni premer. Potem sem kos še vzdolžno postružil na premer navoja in z mojim orodjem vrezal navoj enak kot na prvem kosu. Po izdelavi sem drugi kos privil na skodelico, ki sem jo stisnil v stružno glavo. Nato sem drugi kos še na drugi strani čelno poravnal in ga vzdolžno postružil do navoja tako, da sem mu oblikoval konturo po želji. Pri navoju sem z odrezovalnim stružnim nožem, še naredil zarezo za o-ring, da bo tesnil oba kosa skupaj. Potem sem konturo zbrusil s brusnim papirjem in jo s jekleno volno spoliral. Na koncu sem še z ročnim vrtalnikom v drugi kos pod kotom zvrtil ventilacijsko luknjo s svedrom premera 1mm.



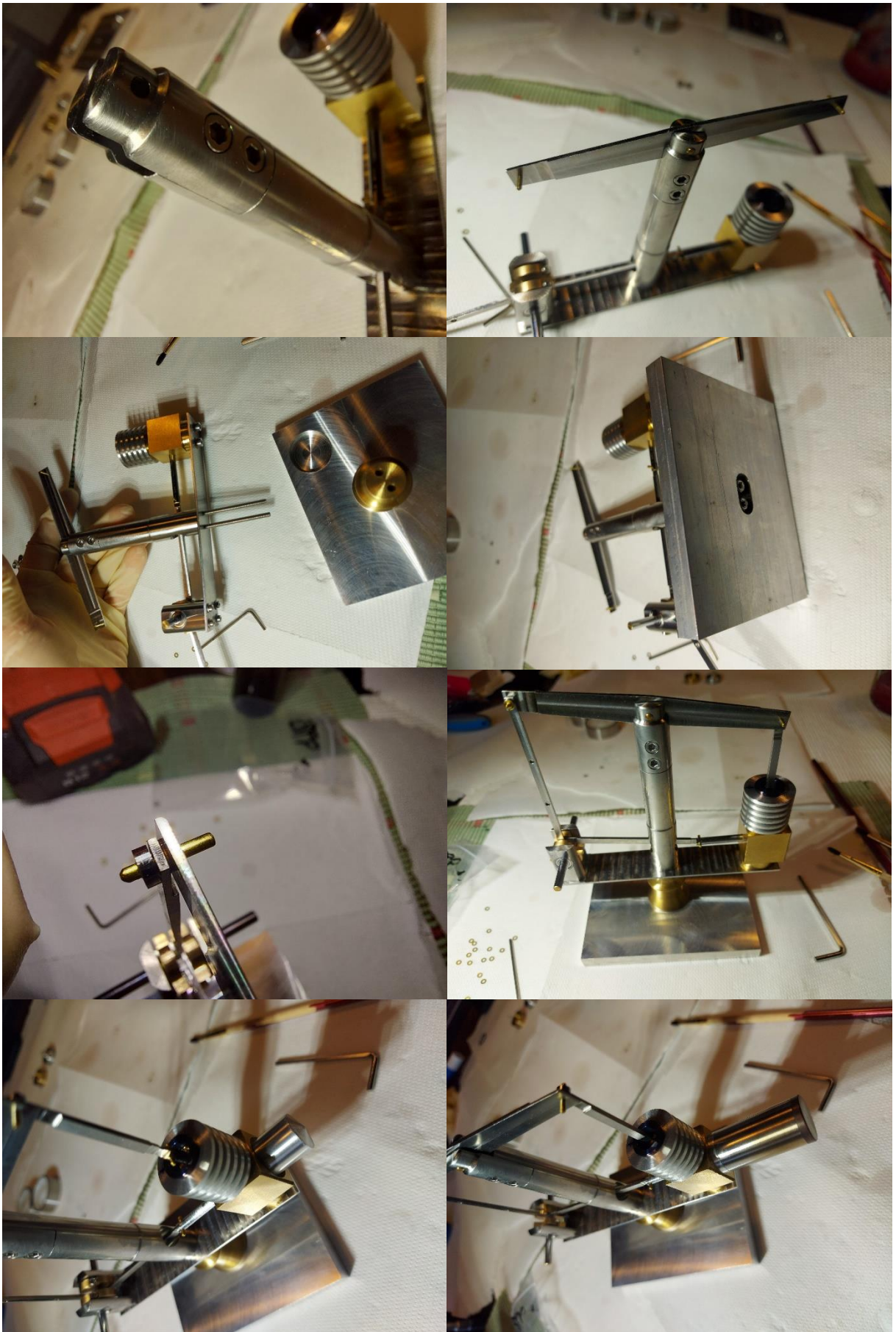
Slika 69: Pokrov sveče

10. SESTAVLJANJE

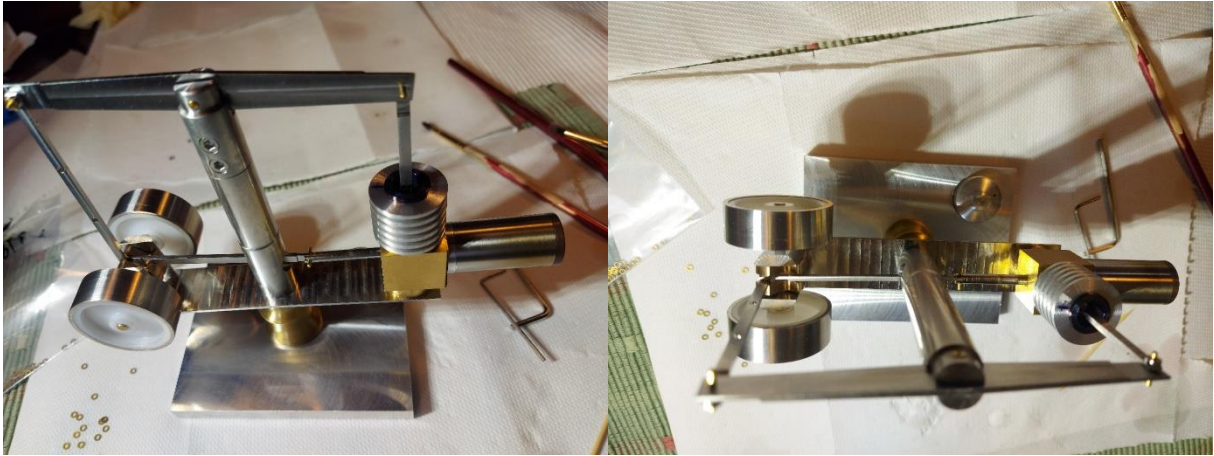
Vse kose sem nato z etanolom očistil in gibljive dele namazal z dvotaktnim oljem ter vse sestavlil v celoto. Na slikah je proces sestavljanja po vrsti.



Slika 70: Postopek sestavljanja 1



Slika 71: Postopek sestavljanja 2



Slika 72: Končani izdelek

4.6. TEST

Po izdelavi sem opravil nekaj testov, tako da so bili podatki bolj primerljivi (aritmetična sredina). Pri vsakem testu sem izmeril temperature na hladnem in gretim cilindru.

Temperaturo sem pridobil s pomočjo laserskega merilca.

- TEST 1
Rezultati:
 $T_{max} = 93,7^{\circ}\text{C}$
 $T_{min} = 29,4^{\circ}\text{C}$
- TEST 2
Rezultati:
 $T_{max} = 106,8^{\circ}\text{C}$
 $T_{min} = 43,2^{\circ}\text{C}$
- TEST 3
Rezultati:
 $T_{max} = 99,4^{\circ}\text{C}$
 $T_{min} = 35,8^{\circ}\text{C}$

5. SKLEP

Menim, da sem nalogo deloma opravil dobro, lahko bi bilo še kaj izboljšav s katerimi bi lahko poboljšal delovanje, izgled in izkoristek samega motorja. Najprej se bom dotaknil ciljev:

1. Stirlingov motor bo delal na preprosto svečo
 2. Izdelava bo potekala ekonomsko brez zavrženih kosov
 3. Med izdelavo se bom držal zarisanih načrtov
 4. Naučil se bom kaj novega
 5. Izdelava stroja bo ceneno ugodna
 6. Izdelava stroja bo potekala enostavno, brez zapletov
 7. Za izdelavo imam vsa potrebna orodja
 8. Obdelava površine bo kvalitetna
 9. Estetsko privlačen
1. Prvi cilj mi ni uspel, saj sem to možnost ovrigel že na začetku načrtovanja.

2. Drugi cilj sem uspel deloma izpolniti, saj je med izdelavo prišlo do manjše količine zavrženih kosov (4).
3. Tretjega cilja sem se strogo držal, s tem sem zagotovil, da je izdelek uporaben (deluje).
4. Med samo izdelavo pa sem ugotovil, da poznam veliko količino obdelovalnih postopkov, kljub temu pa sem se naučil temperaturnega barvanja ter vrezovanja navojev na stružnici, kar pokaže, da se z vsakim projektom naučimo kaj novega.
5. Tega cilja nisem dosegel saj so stroški znašali skoraj 500€.
6. Ta cilj mi je uspel, sicer pa je bil kar zahteven zaradi visokih toleranc.
7. Tega mi ni uspelo doseči, saj sem potreboval veliko manjših preciznih orodji, ki pa jih nisem imel na razpolago, zato je bil potreben nakup.
8. Površine samega izdelka so izredno lepe in privlačne, motor deluje zelo tekoče, zato menim, da mi je ta cilj uspel.
9. Med načrtovanjem sem se trudil, da bo motor izgledal čim lepše. Moje subjektivno mnenje je, da mi je ta cilj uspel.

Zdaj pa se bom dotaknil še hipotez:

1. Delovanje je odvisno od temperature vira toplote
 2. Hitrost delovanja je odvisna od teže ročičnega mehanizma
1. Prvo hipotezo lahko potrdimo, saj smo že pri izračunih videli kako veliko vlogo igra temperaturna razlika pri nastankih tlakov med procesom. To nam pove, da je izbira vrste vira toplote ključna za delovanje motorja.
 2. To hipotezo lahko potrdimo, tako da povečam težo ojnici, ki je vezana na ročično gred. Po testu sem dokazal, da motor ne deluje s težjo ojnico.

6. LITERATURA

- Graham, W. (1980): *Stirling Engines*, New York, Oxford University Press
- Kraut, B. in sodelavci (2021): *Krautov strojniški priročnik*, Ljubljana, Univerza v Ljubljani
- The Engineering ToolBox (2018). *Ethanol - Thermophysical properties*. Pridobljeno s: https://www.engineeringtoolbox.com/ethanol-ethyl-alcohol-properties-C2H6O-d_2027.html [18.9.2024]
- The Engineering ToolBox (2004). *Universal and Individual Gas Constants*. Pridobljeno s: https://www.engineeringtoolbox.com/individual-universal-gas-constant-d_588.html [18.9.2024]
- The Engineering ToolBox (2009). *Air - Specific Heat vs. Pressure at Constant Temperature*. Pridobljeno s: https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-various-pressures-d_1535.html [25.9.2024]
- The Engineering ToolBox (2004). *Air - Specific Heat vs. Temperature at Constant Pressure*. Pridobljeno s: https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-capacity-d_705.html [25.9.2024]
- The Engineering ToolBox (2003). *Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure*. Pridobljeno s: https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html [25.9.2024]
- World Material (2024) *Weight & Density of Stainless Steel 304, 316, 316L & 303 in lb/in³, g/cm³, lb/ft³, kg/m³*. Pridobljeno s: <https://www.theworldmaterial.com/weight-density-of-stainless-steel/> [28.9.2024]
- The Engineering ToolBox (2023). *Stainless Steel - Specific Heat and Thermal Conductivities vs. Temperatures*. Pridobljeno s:

- https://www.engineeringtoolbox.com/stainless-steel-specific-heat-thermal-conductivity-vs-temperature-d_2225.html [28.9.2024]
- Oxford University Press (2016). Investigation of the effect of design parameters on power output and thermal efficiency of a Stirling engine by thermodynamic analysis. Pridobljeno s: <https://academic.oup.com/ijlct/article/11/2/141/2198425> [5.10.2024]
 - The Engineering ToolBox (2018). *Ethanol - Thermophysical properties*. Pridobljeno s: https://www.engineeringtoolbox.com/ethanol-ethyl-alcohol-properties-C2H6O-d_2027.html [17.9.2024]
 - Engineers Edge. *Specific Heat Capacity of Metals Table Chart*. Pridobljeno s: https://www.engineersedge.com/materials/specific_heat_capacity_of_metals_13259.htm [27.9.2024]
 - Saindon, L. (2019). *Thermodynamic Theory of the Ideal Stirling Engine*. Pridobljeno s: <https://blog.mide.com/thermodynamic-theory-of-the-ideal-stirling-engine> [5.9.2024]
 - Mide Technology Corp. (2019). *Ideal Stirling Cycle Calculator*. Pridobljeno s: <https://www.mide.com/ideal-stirling-cycle-calculator> [18.9.2024]
 - Songgang, Q. (2013). *Dish-Mounted TES/Stirling System Concept*. Pridobljeno s: https://www.researchgate.net/figure/Dish-Mounted-TES-Stirling-System-Concept_fig5_267493125 [6.10.2024]
 - Ghraham, W. (1980): *Stirling Engines*. Pridobljeno s: <https://archive.org/details/stirlingengines0000walk/page/n7/mode/2up> [6.10.2024]
 - F. J. Wallace, W. A. Linning (1970): *Basic Engineering Thermodynamics*, London, Pitman Publishing 6/10
 - Woodford, C. (2022). *Cranks and cams: How they work*. Pridobljeno s: <https://www.explainthatstuff.com/cranks-and-cams.html> [12.10.2024]
 - Chemistry Learner (2024). *Isochoric Process – Formula, Work Done, and Diagram*. Pridobljeno s: <https://www.chemistrylearner.com/isochoric-process.html> (slike) [13.10.2024]
 - Chemistry Learner (2024). *Isothermal Process: Definition, Formula, and Examples*. Pridobljeno s: <https://www.chemistrylearner.com/isothermal-process.html> (slike) [13.10.2024]
 - Stirling engine forum (2009). *Cylinder ratios*. Pridobljeno s: <https://www.stirlingengineforum.com/viewtopic.php?t=48> [15.10.2024]
 - Stirling engine forum (2011). *Compression ratio/displacement ratio*. Pridobljeno s: <https://www.stirlingengineforum.com/viewtopic.php?t=966> [15.10.2024]
 - Stirling engine forum (2004). *The volume ratio between displacer cylinder and power cylinder* Pridobljeno s: <https://www.stirlingengineforum.com/viewtopic.php?t=2323> [15.10.2024]
 - Physics Stack Exchange (2017). *Thermodynamics - Efficiency of Stirling engine and Carnot's theorem*. Pridobljeno s: <https://physics.stackexchange.com/questions/78915/efficiency-of-stirling-engine-and-carnots-theorem> [15.10.2024]
 - Huda, Z. (2020). *Machining Processes and Machines: Fundamentals, Analysis, and Calculations*. Pridobljeno s: https://www.researchgate.net/publication/347527876_Machining_Processes_and_Machines_Fundamentals_Analysis_and_Calculations [25.10.2024]
 - Mech Daily (2024). *What Is Honing?- Definition, Process, and Tools*. Pridobljeno s: <https://www.mechdaily.com/what-is-honing/> [25.10.2024]
 - Engineering Technology (2024). *Center Drilling*. Pridobljeno s: <https://engineeringtechnology.org/manufacturing/separating-processes/machining-processes/lathes-and-turning-operations/lathe-operations/drilling-on-a-lathe/center-drilling/> [25.10.2024]

- WayKen (2022). *What is Reaming & How To Ream A Hole*. Pridobljeno s: <https://waykenrm.com/blogs/what-is-reaming/> [25.10.2024]
- BOYI Technology (2024). *What is Grinding: Definition, Types, Uses, and Working Process*. Pridobljeno s: <https://www.boyiprototyping.com/cnc-machining-guide/what-is-grinding-definition-types-uses-and-working-process/> [25.10.2024]
- Sabhadiya, S. (2024). *What is Milling? - Definition, Process, and Operations*. Pridobljeno s: <https://www.theengineeringchoice.com/what-is-milling/> [25.10.2024]
- Engineering Technology (2024). *Lathe Operations*. Pridobljeno s: <https://engineeringtechnology.org/manufacturing/separating-processes/machining-processes/lathes-and-turning-operations/lathe-operations/> [25.10.2024]
- Kant Ranjan, R. (PDF) *Thermodynamic Analysis and Analytical Simulation of the Rallis Modified Stirling Cycle*” *Journal of archives of thermodynamics*. Pridobljeno s: https://www.researchgate.net/publication/349138276_Thermodynamic_Analysis_and_Analytical_Simulation_of_the_Rallis_Modified_Stirling_Cycle_Journal_of_archives_of_thermodynamics [4.11.2024]
- Physics LibreTexts (2024). *4.6: The Carnot Cycle - Physics LibreTexts*. Pridobljeno s: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_\(OpenStax\)/University_Physics_II_-_Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism_\(OpenStax\)/04%3A_The_Second_Law_of_Thermodynamics/4.06%3A_The_Carnot_Cycle](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_II_-_Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism_(OpenStax)/04%3A_The_Second_Law_of_Thermodynamics/4.06%3A_The_Carnot_Cycle) [4.11.2024]
- Physics LibreTexts (2024). *11.3: The Stirling Cycle - Physics LibreTexts*. Pridobljeno s: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics/Heat_and_Thermodynamics_\(Tatum\)/11%3A_Heat_Engines/11.03%3A_The_Stirling_Cycle](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics/Heat_and_Thermodynamics_(Tatum)/11%3A_Heat_Engines/11.03%3A_The_Stirling_Cycle) [4.11.2024]
- Physics LibreTexts (2024). *11.2: The Carnot Cycle - Physics LibreTexts*. Pridobljeno s: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics/Heat_and_Thermodynamics_\(Tatum\)/11%3A_Heat_Engines/11.02%3A_The_Carnot_Cycle](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics/Heat_and_Thermodynamics_(Tatum)/11%3A_Heat_Engines/11.02%3A_The_Carnot_Cycle) [4.11.2024]
- Arslan T.A., Kocakulak T., (2023). *A Comprehensive Review on Stirling Engines. Engineering Perspective*, 42-56. Pridobljeno s: <http://dx.doi.org/10.29228/eng.pers.66847> [5.11.2024]
- Woerlen, I. (2024). *Hot Air Engines*. Pridobljeno s: <https://hotairengines.org/> [5.11.2024]
- Sier, R. (2020). *Robert Stirling*. Pridobljeno s: <https://www.stirlingengines.org.uk/pioneers/pion2.html> [8.11.2024]
- Wikipedia (2022). *Free-Piston Configurations*. Pridobljeno s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Free-Piston_Configurations.jpg [8.11.2024]
- MathWorks (2024). *Gamma Stirling Engine*. Pridobljeno s: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/gamma-stirling-engine.html> [8.11.2024]
- Stirling Engine Forum (2008). *Displacer piston material*. Pridobljeno s: <https://www.stirlingengineforum.com/lander?t=66> [8.11.2024]
- Narayan, S. (2015). *A Review of Design of Stirling Engines*. Pridobljeno s: https://www.researchgate.net/publication/305681114_A_Review_of_Design_of_Stirling_Engines [8.11.2024]
- Ergin, T. (2024). *Experimental optimization of displacer working gap in a gamma-type Stirling engine*. Pridobljeno s: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098624000636> [8.11.2024]
- Farid Zainudin, M. (2020). *Kinematic and thermodynamic operational analysis of rhombic-drive*. Pridobljeno s:

- https://www.researchgate.net/publication/341979317_Kinematic_and_thermodynamic_operational_analysis_of_rhombic-drive_Stirling_engine_prototype#pf9 [8.11.2024]
- Blog Spot (2012). *Motor Stirling*. Pridobljeno s: <https://proyecto-stirling.blogspot.com/> [11.1.2025]
 - Stirling Engine Forum (2025). *Animated Stirling Engine*. Pridobljeno s: <https://www.stirlingengineforum.com/viewtopic.php?t=1694> [12.1.2025]
 - European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database (2024). *CuSn8 (CW453K)*. Pridobljeno s: https://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1310 [15.2.2025]
 - The Engineering ToolBox (2003). *Metal Alloys - Specific Heats*. Pridobljeno s: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metal-alloys-d_153.html [17.2.2025]
 - Euro Inox (2007). *Stainless Steel: Table of Technical Properties*. Pridobljeno s: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf [17.2.2025]
 - Gaur Blogs (2025). *Candle Science*. Pridobljeno s: <https://gaurblogs.com/candle-science-candle-warmer/> [26.2.2025]