

Markus Normak

VÕISTLUSMOOTORRATTA KÄIGUKASTI ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

**Tehnikainstituut
Masinaehituse õppekava**

Juhendaja: lektor Madis Moor

Tallinn 2021

AUTORI DEKLARATSIOON JA LIHTLITSENTS

Mina, Markus Normak

sünnikuupäev: 02.10.1998

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Võistlusmootorratta käigukasti analüüs

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas 12.05.2023

(kuupäev) (autori allkiri)

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. ETTEVÕTTEST JA TEMA TOODANGUST	6
2. HAMMASRATTAD.....	7
2.1 Hammasrataste materjalid ja töötlemine	7
2.1.1 Pindkarastusega hammasrattad	7
2.1.2 Läbikarastatud hammasrattad.....	8
2.2 Hammasrataste tootmine	8
2.2.1 Hammasrataste vormimine.....	9
2.2.2 Hammasrataste töötlemine	9
3. HAMMASRATASTE ANALÜÜS	10
3.1 Mootori andmed ja ajalugu	10
3.2 Hammasrataste kõvaduse määramine	11
3.3 Hammasrataste materjali määramine	17
3.4 Hammasrataste arvutused.....	19
4. HAMMASRATASTE ANALÜÜS	22
4.1 Uute hammasrataste esimene variant	24
4.3 Uute hammasrataste teine variant.....	26
4.3.1 Udeholm Bure kuumtöötlus	26
4.3.2 Udeholm Bure mehaanilised omadused.....	27
5. MAJANDUSLIKUD ARVUTUSED	28
KOKKUVÕTE.....	30
RESÜMEE	31
KASUTATUD KIRJANDUS	33
LISAD	34
LISA 1.....	35

LISA 2.....	36
LISA 3.....	37
LISA 4.....	38
LISA 5.....	39
LISA 6.....	40
LISA 7.....	41
LISA 8.....	42
LISA 9.....	43
LISA 10.....	44
LISA 11.....	45
LISA 12.....	46

SISSEJUHATUS

Antud lõputöö teemaks on „Võistlusmootorratta käigukasti analüüs“. Teema sai valitud autori enda probleemist Zabel mootori kasutamisega. Ajavahemikus 2015-2021 tegeles autor motokrossiga, täpsemalt külgorviga krossimootorrattaga võistlemisega. Selles ajavahemikus purunesid käigukasti hammasrattad väga tihti. Hooaja jooksul, mis kestsid maist septembrini, pidi hammasrattaid vahetama viis kuni kuus korda. Ühes hooajas tehakse 18-22 võistlust, pluss hooaja eelsed ning hooaja sisesed treeningud. Kokku sõidetakse 80-100 tundi. Peamiseks mureks oli kolmanda käigu hammasrattad. See käik on enim kasutusel ning sellepärast ka nende purunemine kõige sagedasem.

Hammasrattad ei kulu ära, ei hakka üle käima ega juhtu muud sarnast. Hambad murduvad terves tükis ära. 9 korda 10-st on murdunud hammas pärit kolmanda käigu hammasrattalt. Hammasrataste kasutus aeg on väga erinev. Autoril on õnnestunud sõita ühe hammasratta paariga pool võistlus hooaega. See on umbes 10 võistlus või 20 tundi. Vähim kasutuses olnud hammasratas oli kasutusel ühe võistlussõidu, mis kestis 20min pluss kaks ringi. Seega ei ole võimalik ennustada kaua ühte hammasratta paari kasutada saab. Selle tulemusena ei ole võimalik ennetada purunemist. Purunenud hammasrattaga ei ole võimalik sõitu lõpetada mis tähendab katkestamist.

Ühe kolmanda käigu hammasratta paari maksumus on 300€. Hooaja peale teeb see 1500 kuni 1800€. See on väga suur kulu, mida arvestada eelarvesse. Purunemise põhjuseks ei ole autori jõuline sõidustiil või jõuga vahetatud käigud. Samuti ei muuda purunemise sagedust kasutatav käigukastiõli.

Tehase toe puudumiseta tahaks teada saada rohkem hammasrataste materjalidest, töötlemisest ning vajalikust kvaliteedist. Lõputöö eesmärgiks on teada saada millist materjali on kasutatud hammasrataste valmistamiseks. Milliseid termotöötlus protsesse on kasutatud. Mõista miks hammasrattad purunevad. Pakkuda välja oma poolseid lahendusi muutusteks.

1. ETTEVÕTTEST JA TEMA TOODANGUST

Zabeli hammasrattaid toodab Saksa ettevõtte nimega VerZahnungs-Service. VZ-Service tegeleb metallitöötlemisega ning on spetsialiseerunud hammasrataste tootmisele. Ettevõtte asutati 1994. aastal ja esialgu oli tootmine Hussenhofenis. Mõne aastaga ettevõtte arenes jõudsalt ning 1998. aastal koliti Mögglingeni uude tootmishoonesse (Pilt 1). Seal tegutseb ettevõtte tänasepäevani. Ettevõtte tegevdirektor on Lothar Blanasch. (VerZahnungs-Service, 2022)



Pilt 1. VerZahnungs-Service tootmishoone

Ettevõtte toodab ükskuid detaile, samuti tegeleb seeria tootmisega ning terviktoodete valmistamisega. Samuti valmistatakse seadmeid alates tootmisest kuni komplekteerimiseni.

Peamised tootmis valdkonnad on: ülekannetega seotud osade tootmine (veovõllid, sirged ning spiraalkaldega hammasrattad, ketirattad jne), freesimine (siduripumba korpus), treimine (väiksemaid treitavad detailid mille läbimõõt on kuni 350 mm ning pikkus 1250 mm) ning keevitamine (konstruktsioonid mõõtmetega kuni 2000 mm x 1500 mm x 2000 mm ning massini kuni 2 t) (Pilt 2. VerZahnungs-Service tooted). (VerZahnungs-Service, 2022)



Pilt 2. VerZahnungs-Service tooted

2. HAMMASRATTAD

Hammasratas on pöörlev silindriline masinaosa, mis haakub teise samasuguse masinaosaga. Selle abil on võimalik edastada jõudu ühelt völli teisele. Seda kasutatakse peamiselt erinevate pöördemomendi ja kiiruse suhete saamiseks või veo- ja veovölli suuna muutmiseks. Hammasrattad on masinates üks enim kasutatavaid mehaanilise jõuülekande meetodeid. Selline ülekanne on kõige efektiivseim ülekande meetod. Hammasülekande ei teki libisemist nagu rihmülekande puhul võib juhtuda. Seda ülekannet kasutatakse peamiselt siis kui on kahe völli vahel kaugus on väike nt mootorratta käigukast. Hammasrataste tüübid on näiteks: sisemise ülekandega hammasrattad, silinderhammasrattad, kaldus hammastega hammasrattad.

2.1 Hammasrataste materjalid ja töötlemine

Hammasrattaid saab toota ükskõik mis materjalist, kuid peamiselt kasutatakse hammasrataste valmistamiseks malmi, terast, messingut, pronksi ja plasti. Täpne materjal valitakse vastavalt vajadusele. Hammasratta tootmiseks on vajalik leida tasakaal vastupidavuse, tugevuse ja kulude vahel. Mootorrataste käigukasti hammasrataste tootmiseks kasutatakse enim terast. Peamiselt kasutatakse süsinik- või legeeritud terast. Süsinikteras on teras, millele on lisatud süsinikku, legeeritud teras sisaldab ka muid metalli omadusi muutvaid lisandeid. See ei tähenda, et süsinikteras on puhas teras ja süsinik. Mõlemat hammasratta tootmiseks kasutatavat terast võib töötluste järgi jaotada veel pindkarastatud terasteks ja läbikarastatud terasteks.

2.1.1 Pindkarastusega hammasrattad

Pinnakarastamine on materjali töötlemise meetod, mida kasutatakse metalli välispinna kõvaduse suurendamiseks. Pinnakarastamise tulemuseks on väga õhuke pinnakiht, mis on tunduvalt kõvem kui ülejäänud detail. Pindkarastamine annab kõva ja kulumiskinda pinnakihi, aga säilitab samal ajal sisemuse plastsuse. Kuumutamise kaudu muutub metalli kristallstruktuur, mis põhjustab kõvastumist pealispinnal. Kuna karastamisprotsessid vähendavad vormitavust ja töödeldavust, tehakse pinna karastamine tavaliselt siis, kui enamik teisi tootmisprotsesse on lõpule viidud. (Metal Supermarkets, 2022)

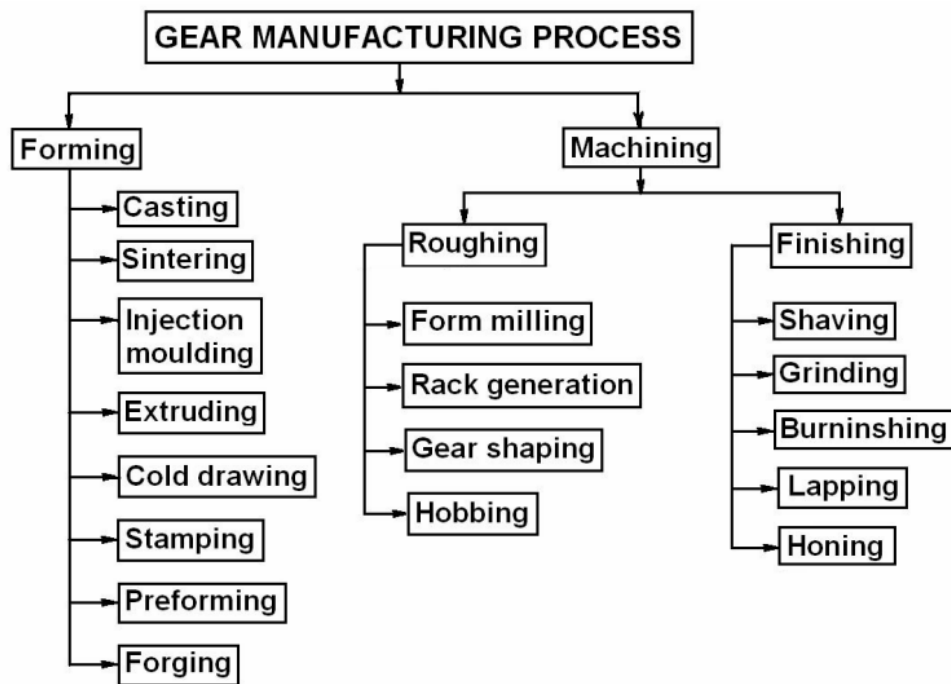
Materjali pinna karastamiseks on mitu põhjust. Üks põhjus on tõhusus. Metalli välimise pinna soojendamiseks kulub vähem energiat ja vähem aega, kui kogu materjali soojendamiseks. Need tõhusused võivad suuremahulistes tootmistoimingutes kaasa tuua tohutu kulude kokkuhoiu. Teine põhjus, miks pinna karastamist laialdaselt kasutatakse, on jõudlus. Kasuks võib osutuda kõva pealispind ja plastiline sisu. Näiteks on olukord, kus metall peab vastu pidama hõõrdumusele, kuid samas peab vastu võtma lööke ilma purunemata. (Metal Supermarkets, 2022)

2.1.2 Läbikarastatud hammasrattad

Läbi karastamine on protsess, mida kasutatakse metallisulami kõvaduse ja tõmbetugevuse suurendamiseks. Vastupidiselt pind karastamisele, mis tugevdab ainult materjali välimist kihti, tugevdab läbi karastamine sulami kogu ristlõiget. Kuumutamise abil muudetakse kogu materjali pind kõvemaks. Läbi karastamine ei tähenda et materjal on igast punktist sama kõva. Kuna servad jahtuvad kiiremini tekib gradiendi kõvadus. Saavutatav kõvadus põhineb süsiniku hulga kohta terases. Läbi karastamine on kasulik detailidele, kus on olulisel kohal tugevus, kõvadus ja kulumiskindlus. Seda on protsess kasutatakse paljude detailide tootmisel. (Gear Hardness Technology , 2022)

2.2 Hammasrataste tootmine

Inimkond on kasutanud ja valmistanud hammasrattaid pikka aega. Need on üsna lihtsad detailid, mida kasutatakse liikumise ja jõu edastamiseks. Hammasrattaid kasutatakse jalgratastes, kellades, autodes ning peaaegu kõikidel tööstuslikel masinatel on hammasrattad. Hammasrataste tootmine on keeruline oma täpsuse tõttu. Ebatäpsed hammasrattad hakkavad üksteise lõhkuma, mille tagajärjel toimub purunemine. Hammasrataste valmistamise võib jagada kahte suurde kategooriasse: vormimine ja töötlemine (Pilt 3).



Pilt 3. Hammasrataste tootmisprotsessid (*GEAR MANUFACTURING*, 2022)

2.2.1 Hammasrataste vormimine

Vormimisprotsess on sobilik suurte koguste tootmiseks, sest antud meetod on kulukas tootmisprotsess. Selle protsessi puhul valmistatakse kõik hammasratta hambad korraga. Hammasratta kvaliteet sõltub vormi kvaliteedist, kuid seda on võimalik hiljem töödelda ja viimistleda. Hammasrataste vormimisele on mitmeid protsesse: valamine, paagutamine, ekstrusioon (termotöötluste protsess, mille puhul materjal muudetakse plastseks, surutakse läbi mingi kindla suurusega ava ja jahutatakse) ja sepistamine.

2.2.2 Hammasrataste töötlemine

Hammasrataste tootmise käigus valmistatakse hammasratas kasutades näiteks CNC pinki. Hammasratas valmistatakse silindrilisest toorikust masina abil. Tavaliselt kasutatakse freespinki kuid saab ka valmistada muid viise. Veel on võimalik hammasrattast toota lõikuri abil. Selleks liigub soovitud hammaste kujuga lõikur materjali sisse mis teeb toorikust soovitud kuju ja hammastega hammasratta.

3. HAMMASRATASTE ANALÜÜS

3.1 Mootori andmed ja ajalugu

Uuritavaks objektiks on motokrossis kasutusel oleva korviga mootorratta Zabel ZM29 GPTR mootor. Zabel on mõeldud just selleks otstarbeks. Temaga on tulnud maailmameistriks 17. korral. Esimene kord oli aastal 1998. Maailmameistriks tulid tol aastal Kristers Sergis/Artis Rasmanis. Viimati tuldi maailmameistriks selle mootoriga 2021. Võitjateks Etienne Bax/Nicolas Musset. (Sidecarcross, 2022) Korvikrossis on tegemist enim kasutusel oleva mootoriga. Seda kasutavad nii professionaalid kui ka amatöörid tänu tema suurele kubatuurile ning võimalusega sõita tehase mootoriga. Veel on olemas MEGA engines, mis on samuti valmis mootor aga kasutajate hulk on kordades väiksem. Samuti kasutatakse soolo pealt võetud doonor mootoreid, mida peab hakkama tuunima, et konkurents püsida.

Tänapäeval on kasutusel ZM30 mootor. Kõik muu on sama nagu ZM29 GPTR, ainult karterid on suuremad. Kolvi läbimõõt on 100 mm, kolvikäigu pikkus on 89 mm. Antud mootori võimsus on 64,3 kW, väändemoment on 68,2 nm. Mootoril on nelja-käiguline käigukast, kus probleeme valmistab kolmas käik, mis on enim kasutusel. Kuni ZM29 oli saadaval ainult 700 cc mootor siis tänapäeval on valikuid rohkem. Võimalik on saada 630 cc, mille kolviläbimõõt on 96 mm, kolvikäik on samaks jäetud. Selline mootor on rohkem kasutusel amatööridel, kelle jaoks on 700 cc mootor liiga võimas. Samuti on saadaval 750 cc mootor. Seal on kolvikäik 104 mm ja kolvikäik sama nagu standardil. See mootor on väga vähe kasutusel.

Tabel 1. Käigukasti andmed

Käigu nr	Hammastearv	Ülekande arv
1.	26/17	1,529
2.	24/19	1,263
3.	22/21	1,047
4.	20/23	0,869

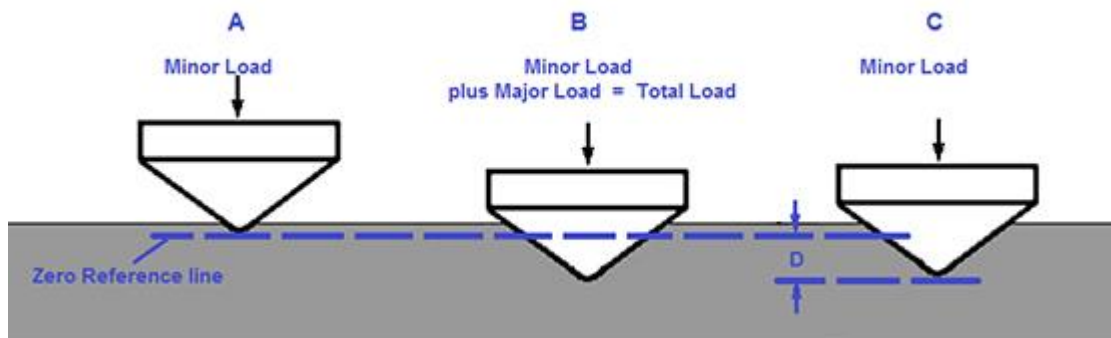
ESIMESES TABELIS ON NÄHA KÄIGUKASTI ANDMED (TABEL 1). VASTAVALT KÄIGULE ON ÄRA TOODUD HAMMASTE ARV NING VASTAVA KÄIGU ÜLEKANDE ARV. LISADES ON LEITAV EKSISTEERIVATE HAMMASRATASTE VAATED KÜLJELT (LISA 7.

VEDAV HAMMASRATAS) JA (LISA 8.

Veetav hammasrattas).

3.2 Hammasrataste kõvaduse määramine

Esimeseks etapiks tehti hammasratastele kõvaduse määramine. Seda viidi läbi Tallinna Tehnikakõrgkooli ruumides. Kõvaduse määramiseks kasutati Rockwelli katsemeetodit. Masinaks oli Innovatest Fenix 300 U. "Rockwelli kõvaduse katsemeetod, nagu on määratletud ASTM E-18, on kõige sagedamini kasutatav kõvaduse testimise meetod. Seda testi on üldiselt lihtsam läbi viia ja see on täpsem kui muud tüüpi kõvaduse testimise meetodid. Rockwelli katsemeetodit kasutatakse kõigi metallide puhul, välja arvatud juhul, kui testitav metalli struktuur või pinnatingimused toovad kaasa liiga suuri erinevusi. Antud meetod mõõdab süvendi püsivat sügavust, mis on põhjustatud indikaatori koormusest. Esiteks rakendatakse proovile esialgne katsejõud, kasutades teemantkoonust või kuuli. See eelkoormus murrab pinnast läbi, et vähendada pinnaviimistluse mõju. Pärast esialgse katsejõu hoidmist kindlaksmääratud viivitusaja jooksul mõõdetakse taande algtaseme sügavus." (Hardnesstester, 2022) Kasutatud masinal oli indikaatoriks 120° tipunurgaga teemant koonus. Eelkoormuseks oli 10 kilogrammi mida hoiti materjali sees 3 sekundit. Seejärel tuli päris koormus milleks oli 150 kilogrammi ning mida hoiti materjali sees 10 sekundit. Lõpuks on veel järel koormus, mis on ajaliselt ja jõult võrdne eelkoormusega. Koonuse tööd on võimalik näha teisel joonisel. (Joonis 1. Rockwelli kõvaduse määramine



Joonis 1. Rockwelli kõvaduse määramine (Hardnesstester, 2022)

KÕVADUSI MÕÕDETI HAMMASTE TIPUST (PILT 4), HAMMASRATTA KÜLJELT (PILT 5TÕRGE! EI LEIA VIITEALLIKAT.) NING HAMMASRATTA SEEST. TULEMUSED ON KANTUD TABELITESSE, KUS ON NÄHA HAMMASRATASTE KÕVADUS EELPOOL MAINUTUD POSITSIOONIDELT. KATSED VÕETI KOLMELT ERINEVALT KATSEKEHALT. ESIMESE KATSEKEHA TULEMUSED ON NÄHA ESIMESEL KAHEL TABELIL. TEISES LISAS (LISA 2.

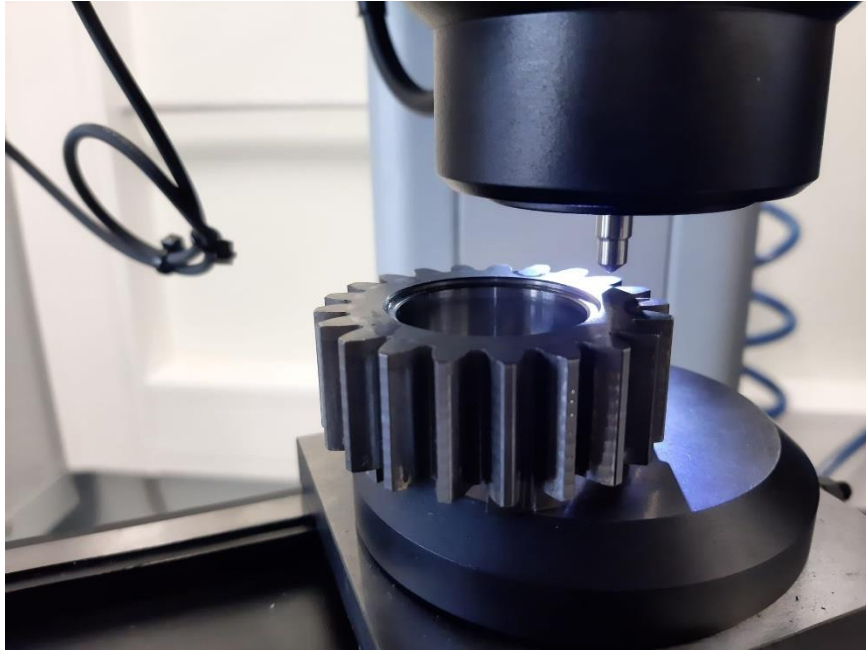
Hammasratta kõvadus hambalt (katsekeha 1)) on näha hammasrataste kõvadused hammaste tipust. Kõvadusi mõõdeti kolmelt erinevalt hambalt, viiest erinevast punktist. Esimese ja teise hamba keskmine kõvadus oli 55HRC ning kolmanda hamba keskmine kõvadus oli 56 HRC. ASM Internationali andmetel on hammasratta sobilik keskmine kõvadus 32...48 HRC. (ASM International, 2022)



Pilt 4. Hammasratta kõvaduse mõõtmine hambalt

ESIMESE KATSEKEHA KÕVADUSELT KÜLJELT (LISA 3.

Hammasratta kõvadus küljelt (katsekeha 1)) on veel suuremad kui hamba tipust. Sealne keskmine kõvadus on 58 HRC. Kuigi probleem ei ole üldse seal siis sealsed kõvadused võivad mõjutada ka ülejäänud hammasrataste vastupidavust.



Pilt 5. Hammasratta kõvaduse mõõtmine küljelt

TEISE KATSEKEHA TULEMUSED OLID ERINEVAD KUI ESIMESEL KATSEKEHAL. HAMMASTE TIPPUDE KÕVADUSED (LISA 4.

HAMMASRATTA KÕVADUS HAMBALT (KATSEKEHA 2)) ON PEHMEMAD KUI ESIMESEL KATSEKEHAL. SIIN TEKIVAD JUBA TEISTSUGUSED PROBLEEMID. KÕIKIDE MÕÕDETUD HAMMASTE KÕVADUSED ON VÄGA ERINEVAD. ESIMESE HAMBA KESKMINE KÕVADUS ON 49 HRC. KÕIGE KÕVEMA JA KÕIGE PEHMEMA KÕVADUSE VAHE OLI ÜLE 10 ÜHIKU. ÜHE HAMBA PEALE ON SEE KÕIKUMINE PÄRIS SUUR. TEISE MÕÕDETUD HAMBA KESKMINE KÕVADUS OLI VEELGI PEHMEM, 41 HRC. SEALNE KÕIKUMINE ON SAMUTI KÜLLALTKI SUUR. KÕIGE PEHMEM KOHT OLI 28 HRC. NENDEL HAMMASTEL ON NÄHA DEFEKTSEID KOHTI NING MADALAMAD NÄIDUD ON PÄRIT JUST NENDEST PIIRKONDADEST, KUS NEED DEFEKTSED KOHAD ON (PILT 6). VÕRRELDES ESIMESE KATSEKEHAGA ON TEISE HAMMASRATTA KESKMINE HAMBA KÕVADUS 7 ÜHIKUT MADALAM. TEISE KATSEKEHA HAMBA KESKMINESEKS KÕVADUSEKS TULI 48 HRC, MIS ON ASM INTERNATIONALI ANDMETE PÕHJAL NORMIPIIRES. KÕVADUSED KÜLJELT (LISA 5.

Hammasratta kõvadus küljelt (katsekeha 2)) on enam vähem samad esimesel ja teisel katsekehal. Seega on ainus erinevus hammaste kõvadusel. Erinevus tuleb defektsetelt kohtadelt hammasratastelt.



Pilt 6. Hammasratta defektne koht

VIIMASENA MÕÕDETI KÕVADUST KESKELT (LISA 6.

Hammasratta kõvadus seest). Sealsed kõvadused on selgelt pehmemad kui välised kõvadused. Sisemine keskmine kõvadus on 39 HRC. Nende andmete põhjal võib öelda, et hammasrattas ei ole läbinisti karastatud. Sisemist kõvadust mõõdeti ühel hammasrattal mitmest erinevast punktist. Hammasratta pehme sisu viitab sellele, et hammasratas on tsementiiditud mitte karastatud.

3.3 Hammasrataste materjali määramine

MATERJALI MÄÄRAMISEKS PROOVITI KOOSTÖÖD TEHA MOOTORI TOOTJA TEHASEGA. TEHAS EI NÕUSTUNUD ÄRISALADUSI TÕTTU MATERJALIMARKI JAGAMA. SEEGA TULI MATERJAL MÄÄRATA KEEMILISE KOOSTISE PÕHJAL. SELLEGA ABISTAS TALTECH, KUS OLİ SEADE MIS SUUTIS MÄÄRATA KEEMILIST KOOSTIS. SELLE PÕHJAL OLİ VÕIMALIK LEIDA ÕIGE MATERJAL. MATERJALI KEEMILISE KOOSTISE TABEL ON LISATUD LISASSE (LISA 1.

Keemilise koostise tabel).

Keemilise koostise tabelist on näha madal süsiniku sisaldus ning kõrged kroomi ja nikli sisaldused. Selle kolme näitaja põhjal hakati otsima sobilikku materjali ning ülejäänud keemilised koostised pidid sobima selle materjaliga. Välja sai valitud materjal 18 CrNiMo 7-6. Selle materjali näitajad ja hammasratta keemiline koostis sobisid kõige paremini omavahel kokku.

„Tegemist on madal leger terasega. Materjali kasutatakse mitmeks erinevaks otstarbeks. Madala südamiku stabiilsusega konstruktsiooni- ja masinakomponendid. Väikesed masinakomponendid, hoovad, lingid, puksid, poldid, tihvtid. Madala stabiilsusega konstruktsiooni- ja masinakomponendid Väikesed masina komponendid, hoovad, lingid, puksid, poldid, tihvtid. Masinaehitus igasugust liiki ülekandekomponentide valmistamiseks: hammasrataste, juhtimisosade, nukkvõllide, hammasrattad, kardaanide. Karastatud suurte mõõtmete ja suure sitkusega osad näiteks väntvõllid ning hammasrattad. Autoehituseks kasutatakse seda materjal veohammasrataste ja suure pingega hammasrataste valmistamiseks. Igat tüüpi hammasrattad ja nukkvõllid. Seoses kulumisega suure pingega väntvõllid ja hammasrattad. Samuti on kasutusel materjal käigukasti komponendid valmistamiseks.“ (C.Wegst/M.Wegst, 2016)

Selle materjali töötlemist kirjeldab raamat järgmiselt. „Karboniseerimine võib toimuda tahkete (pulbriliste), vedelate või gaasiliste ühenditega. Põhimõtteliselt eristatakse kahte protseduuri; ühekordne karastamine ja otsene karastamine pärast eelnevat karboniseerimist. Ühekordse kõvenemise korral jahutatakse materjal kas ümbritseva keskkonna temperatuurini või vähemalt 600

°C-ni ja alles seejärel tõstetakse uuesti kõvenemistemperatuurile, mis tavaliselt ületab Ac-3-punkti. Temperatuur ühekordsel kõvenemisel on alati 50 - 100 °C kõrgem kõvenemistemperatuurist. Otsene karastamine säästab materjali mahajahutamise ja kõvenemistemperatuurini soojendamise etapi. Siin toimub otsene kustutus. Otsekarastamiseks võib kasutada ainult teatud sulamitest peeneteralist terast, kuna tuleb vältida liigset austeniidi moodustumist.“ (C.Wegst/M.Wegst, 2016)

Tabel 2. 18 CrNiMo 7-6 füüsikalised omadused (*Steelexpress, 2022*)

Tihedus, g/cm ³	7.85				
Erisoojusvõimsus J/(kg.K)	460				
Elektri takistus Ohm.mm ² /m	0.18				
Elektrijuhtivus Siemens.m/mm ²	5.55				
Elstusmoodul, Gpa	210				
Soojuspaisumine 10 ⁻⁶ m/(m.K)	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
	11.1	12.1	12.9	13.5	13.9

Tabel 3. 18 CrNiMo 7-6 mehaanilised omadused (*C.Wegst/M.Wegst, 2016*)

Läbimõõt, mm	≤ 11	12-30	31-63
Tõmbetugevus, R, Mpa	1180-1420	1080-1320	980-1270
Voolepiir, Rp, Mpa	≥ 835	≥ 785	≥ 685

Venitatavus, A, %	≥ 7	≥ 8	≥ 8
Pindala vähendamine, Z, %	≥ 30	≥ 35	≥ 35
Kokkupõrke väärtus, J	≥ 41	≥ 41	
Kõvadus, HRC	38...43	35...41	31...40

Tabelites (

Tabel 2) ja (Tabel 3) on näha 18 CrNiMo 7-6 füüsikalised ning mehaanilised omadused. Neid andmeid on kasutatud ka algandmeteks et analüüsida hammasrataste projektsioone.

3.4 Hammasrataste arvutused

Esimeseks arvutuseks tehti hammasrataste mooduli arvutamine:

$$m = \frac{d}{z}$$

(1)

m – hammasratta moodul;

d – hammasratta sammu läbimõõt (mm);

z – hammaste arv hammasrattal.

$$m_1 = \frac{48,5}{21} = 2,31$$

$$m_2 = \frac{50,8}{22} = 2,31.$$

Hammasratta paari moodulid peavad olema samad, et hammasrattad omavahel hambumuses saaks olla. Antud hammasrataste moodulid on 2,31. See tähendab et hammasrattad ei ole standardised vaid spetsiaalselt Zabeli mootorile tehtud,

Järgmisena arvutati tsentrite vahekaugus:

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

(2)

a – tsentrite vahe (mm);

d – hammasratta samm läbimõõt (mm);

$$a = \frac{48,5 + 50,8}{2} = 49,65 \text{ (mm)}.$$

Mõõdetuna on tsentrite vahe 49,97 millimeetrit.

Ülekande arvutamiseks kasutati järgmist valemit:

$$i = \frac{z_2}{z_1}$$

(3)

i – ülekandearv;

d – hammaste arv;

$$i = \frac{22}{21} = 1,047.$$

Samad tulemused annab ka tehas.

4. HAMMASRATASTE ANALÜÜS

Hammasrataste analüüsimine algas visuaalsest vaatlusest. See toimus kahes etapis. Esimene etapp oli enne kui hammasrattad võllidelt maha võeti ning koost laiali lammutati. Selle käigus teostati uuringud mis on näha silmale. Vaadati üle hammasrataste kulumine ning seisukord. Märgiti ära ajaliselt kaua on olnud hammasrattad kasutusel. Kõik defektid märgiti üles. Tehti kindlaks, kas on mõni väline kahju, kas mõni hammas on puudu. Järgmisena võeti hammasrattad võllidelt lahti ning vaadeldi kõik üks haaval üle.

Järgmiseks etapiks oli hammasrataste analüüsi teostamine Solid Edge 2019 programmis. Analüüsiti kolmanda käigu hammasratta paari. (**Tõrge! Ei leia viiteallikat.**) See valiti sest see käik on enim k asutusel ning selle käigu hammasrattad purunevad kõige tihedamini. Algandmeteks võeti peatükis 3.4 Hammasrataste arvutused arvutatud andmed ning mootori enda andmeid peatükist 3.1 Mootori andmed ja ajalugu. Samuti arvutati juurde puudu olevad mõõtmised ning moodulid. Need on leitavad peatükis 3.4 Hammasrataste arvutused.

Tabel 4. Hammasrataste andmed

	Vedav hammasratas	Veetav hammasratas
Hammaste arv	22	21
Väli diameeter (mm)	55,42	53,13
Hamba laius	16,76	18,94
Moodul (arvutuslik)	2,31	2,31
Ohutustegur paindele	1,95	0,95

Tabel 5. Vajalikud andmed hammasrataste arvutamiseks

Hammasrataste kaugus (mm)	49,165
Ülekande arv	1,047
Võimsus (kW)	64,3
Pöördemoment (Nm)	68,2
Maksimaalne pöörete arv minutis (RPM)	9000

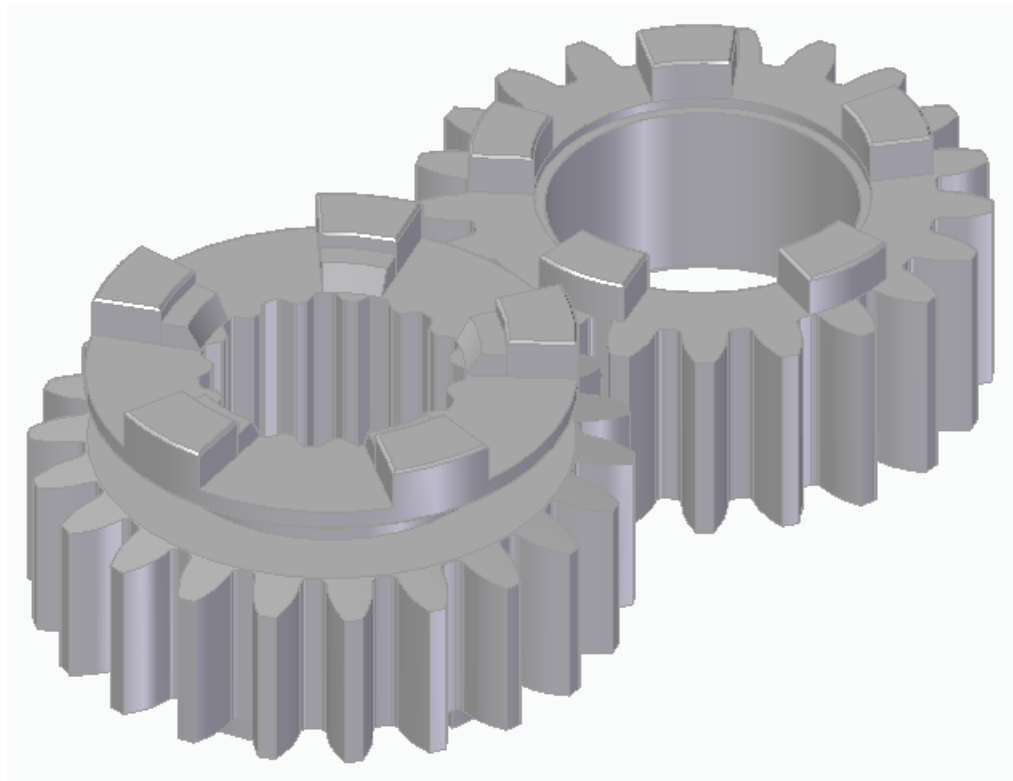
Solid Edge arvutab välja tabelite neli (Tabel 4) ja viis (Tabel 4) andmete põhjal kõik vajalikud andmed ning ütleb kas selline hammasratta paar peab nendele pingetele vastu. Diagnoosiks andis Solid Edge:

1. Hammasratta materjali tugevus ei ole piisav, et vältida võimsuse rakendumisel tekkinud tõrkeid.

Arvutused näitavad et sellises suuruses hammasrattad sellise materjaliga ei ole piisavalt tugevad et vastu panna koormusele, mis mootorist tuleb. Lisaks tuleb arvestada et arvutusmoodul arvestab ainult staatilist koormust. Otselülitusega käigukastis rakenduvad dünaamilised löökkkoormused käikude lülitamisel, mis võivad lülitusel olla väga suured.

HAMMASRATASTEL PEAKS OHUTUSTEGUR PAINDELE OLEMA VÄHEMALT 1,2 ÜHIKUT. VEDAVAL HAMMASRATTAL OLI SEE 1,39 ÜHIKUT. SEE TEGUR ON ARVUTUSLIKULT SOBILIK, KUID SIISKI ON PROBLEEME HAMMASTE MURDUMISEGA. VEETAVAL HAMMASRATTAL OLI OHUTUSTEGURIKS 0,95 ÜHIKUT. SEE ON ILMSELGELT LIIGA MADAL NING SEE EI SAAGI VASTU PIDADA. SOLID EDGE ANALÜÜS ON LEITAV LISADEST (LISA 9.

Hammasrataste andmed).



Pilt 7. Hammasratta paar

4.1 Uute hammasrataste esimene variant

Projekteerimise eesmärgiks on leida arvutuslikult hammasrattad, mis läbiksid Solid Edge arvutusmooduli ning ohutusteguri paindele viimine vähemalt 2,0 ühikuni. Muuta ei saa hammasrataste ülekande arvu ning hammasrataste tsentrite vahelist kaugust. Kõik muu on võimalik muuta ning leida sobilikud hammasrattad. Kõige paremaks muutuvaks suuruseks on hammasrataste hammaste laius. Neid on võimalik muuta lõpmatuseni. Valmis mootoril tekib vaid ruumi puudus karteris kuhu hammasrattad ära ei mahu. Sellisel juhul tuleb ka muutma hakata kartereid et hammasrattad ära mahuks.

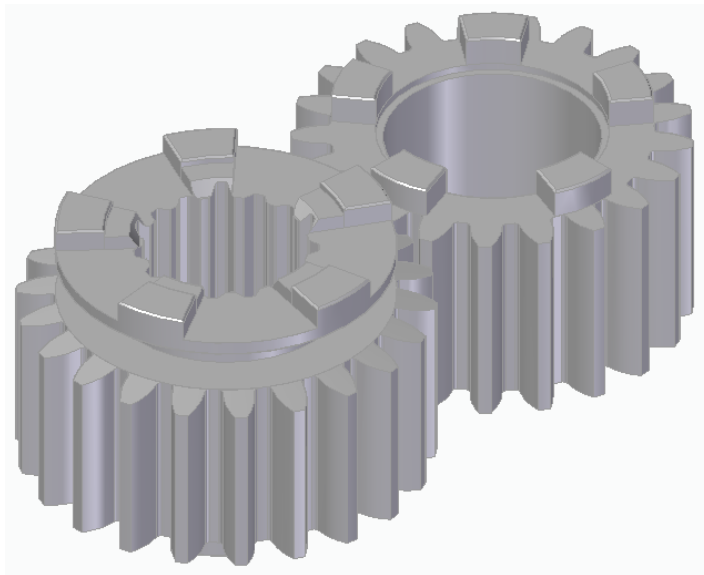
Uutele hammasratastele jäeti samad hammaste arvud, et ei muutuks ülekande arv. Muudeti hammasrataste laiust 8 mm võrra. Selle tulemusena läbisid hammasrattad Solid Edge arvutusmooduli

ning ohutegur paindele on mõlema hammasratta puhul üle 2,0 ühiku. Uute hammasrataste andmed on kantud tabelisse.

Tabel 6. Uute hammasrataste andmed (variant 1)

	Vedav hammasratas	Veetav hammasratas
Hammaste arv	22	21
Väli diameeter (mm)	55,42	53,13
Hamba laius	27,76	26,94
Moodul (arvutatud)	2,31	2,31
Ohutustegur paindele	2,02	2,19

Võrreldes vanaga ei ole palju muutusi tehtud. Muudeti ainult hammasrataste hammaste laiusi. Prooviti muuta ka hammasrataste moodulit, et saada need standardsemaks, aga selle tegevuse tagajärjel muutusid hammasrataste tsentrite kaugused, mis ei sobinud tingimustega. Tehtud muudatused olid piisavad et muuta hammasrattad arvutuslikult vastupidavaks. Samuti viidi ohutustegur paindele kõrgemale, mis on piisavalt nüüd kõrged, et vältida edaspidiseid purunemisi. Uute hammasrataste analüüs on leitav lisadest. Uued hammasrattad on 8 mm laiemad. Seega ei mahu need enam karterite sisse ära. Selleks tuleks teha uued ja laiemad karterid mis mahutaks need hammasrattad ära. Uute hammasrataste andmed on leitavad tabelist kuus (Tabel 6).



Pilt 8. Uus hammasratta paar

4.3 Uute hammasrataste teine variant

Teise variandina prooviti leida materjal, mis sobib olemas olevale disainile. Sellise lahenduse puhul ei ole tarvis muuta kartereid ega muid detaile mootoris. Muutub ainult materjali mark. Sobilik materjal leiti Uddeholmi kataloogist. Sobivaimaks materjaliks sai Uddeholm Bure. Selle materjali mehaanilised omadused olid piisavalt head, et pidada vastu mootori poolt tekitatud jõududele käigukastis.

Uddeholm Bure on ülitugev eriteras, mis on mõeldud kasutamiseks suurte nõudlustega keskkondades ning, kus on oluline materjali hea töödeldavus. Materjali peamiseks omadusteks ongi hea töödeldavus, suurepärane väsimus ja tugevus kindlus, hea kulumiskindlus nii madalatel kui ka kõrgetel temperatuuridel ning hea sitkus ja elastsus. Materjali kasutatakse erinevate puuride ja freeside tootmiseks, padrunite ja tööriistahoidikute valmistamiseks. (Uddeholm, 2023)

4.3.1 Uddeholm Bure kuumtöötlus

Pehmelöömutuse abil kaitsakse materjali liigse süsiniku eest. Protsessi käigus kuumutatakse materjal temperatuurini 850°C . Seejärel jahutatakse materjali ahjus kiirusega 10°C tunnis kuni materjali temperatuur langeb 650°C . Pärast 650°C jõudmist jahtub materjal õhu käes. (Uddeholm, 2023)

Pärast materjali töötlemist on soovitatav teha pingete maandamist. Selleks on vaja materjal läbinisti kuumutada 650°C ning hoida teda sellel temperatuuril kaks tundi. Seejärel jahutada aeglaselt 500°C peale ning pärast seda toimib jahtumine õhu käes. (Uddeholm, 2023)

Karastamiseks tuleb valida temperatuur vastavalt sellele kui kõrge kõvadusega materjali vaja on. Materjali tuleks kaks korda karastada ning jahutada keskmise kiirusega kuni toatemperatuurini. Minimaalne karastamistemperatuur on 180° C. Parimaks karastuseks tuleks materjali hoida valitud kuumusel vähemalt kaks tundi. (Uddeholm, 2023)

4.3.2 Udeholm Bure mehaanilised omadused

Ligilähedased tõmbetugevused tootemperatuuril 52 HRC juures on 1820 Mpa, 45 HRC juures 1420 Mpa ning 39 HRC juures 1230 Mpa. Voolepiirid samade kõvaduste juures on järgmised: 1520 Mpa, 1280 Mpa ning 1050 Mpa.

5. MAJANDUSLIKUD ARVUTUSED

Antud peatükis kajastatakse tunnid mis kulusid töö tegemiseks ning hinnad eurodes. Tunnihinnaks võeti 25 eurot. See hind on autori tunnitasu, mille eest tööd tehakse. Tunnid on pandud täpselt kulunud aja järgi. Sisse ostetud teenuseid on kaks. Selle käigus teostati materjali keemilise koostise määramine TalTechi ülikoolis ning Oldbac OÜ tegi hammasratastele 3D skaneerimise. Kõik andmed on koondatud tabelisse (Tabel 7).

Kõvaduse määramine toimus Tallinna Tehnikakõrgkoolis kahel erineval ajal. Selle käigus mõõdeti materjalide kõvadusi hambalt, küljelt ning seest. Lisaks on selle aja sisse arvestatud ka Excelisse andmete kandmine ning nende analüüsimine. Kokku võttis see protsess aega kolm tundi. Sellise töö maksumuseks oli 75€.

Hammasrataste analüüsimine võttis aega viis tundi. Analüüs teostati Solid Edge programmis. Analüüsi käigus saadi teada, kas hammasrattad taluvad sellise materjali juures mootorilt tulenevat koormust. Selle osa hinnaks tuli 125€.

Samuti tehti hammasratastele arvutused. Selle käigus arvutati välja hammasrataste moodul, kahe hammasratta omavaheline kaugus, ning ülekande arv. Nendest arvutustest piisas et teha hammasratastele analüüs. Arvutused võtsid aega kaks tundi ning hinnaks 50€.

Materjali määramise aluseks võeti keemilise koostise tabel. Sealsete andmete põhjal otsiti internetist ning raamatutest sobilikke materjale. Kõige sobivamaks materjaliks oli 18CrNiMo 7-6, millega jätkati töö tegemist. Kokku otsiti sobilikku materjali kolm ja pool tundi. Sellise operatsiooni hinnaks tuli 87,5€.

Hammasrataste projekteerimine võttis aega neli ja pool tundi ning selle maksumus oli 112,5€.

Üheks sisse ostetud teenuseks oli materjali keemilise koostise määramine. See töö teostati TalTechi ülikoolis. Töö maksumuseks oli 100€. Selle käigus lõigati hammasratas pooleks, lihviti pinnad masina jaoks sobilikuks ning teostati uuring. Selleks kasutati Spectro Spark Analyzerit.

Teiseks sisse ostetud teenuseks oli Oldbac OÜ teostatud 3D skaneerimine. See töö tehti et oleks täpselt näidata millise kujuga on lõputöös käsitletavad objektid.

Tabel 7. Töö koostamise kulu

	Tunnid (h)	Hind (€)
Kõvaduste määramine	3	75
Hammasrataste analüüs	5	125
Hammasrataste arvutused	2	50
Materjali määramine	3,5	87,5
Projekteerimine	4,5	112,5
Keemilise koostise analüüs		100
3D skaneerimine		216
Kokku:	18	766

Kõikide tööde peale kulus kokku 18 tundi tööaega ning selle maksumuseks tuleks 550€. Selle aja ja summa sisse kuuluvad vaid analüüsimine ja teoreetiline osa. Tootmise hindasid, materjali hinda ning töötlemist selles tabelis ei kajastata. Ühe hammasratta paari ostuhind on 300€. Veetava hammasratta hind on 120€ ning vedava hammasratta hind on 180€.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli teada saada millist materjali on kasutatud hammasrataste valmistamiseks. Milliseid termotöötlus protsesse on kasutatud. Mõista miks hammasrattad purunevad. Mida peaks hammasrataste juures muutma et neid edaspidi usaldada saaks ning need ei puruneks nii tihedalt.

Kõik need küsimused leidsid vastused. Materjaliks on 18 CrNiMo 7-6. See leiti tänu materjali keemilise koostise määramisele. Sealt saadud andmete põhjal otsiti sobivaim materjal. Teades et seda materjali kasutatakse tihedalt Saksamaal hammasrataste valmistamiseks ning uuritavad hammasrattad on valmistatud samuti Saksamaal võib kindlalt väita et materjal on õigesti leitud.

Teiseks eesmärgiks oli teada saada millist termotöötlus protsessi on kasutatud. Tehase toe puudumisele tuli see leida töö käigus. Madala süsiniku sisalduse tõttu ei ole materjal karastatav. Sellepärast on tehtud sellele tsementiitimine. Selle käigus on pind rikastatud süsinikuga ning seejärel tehtud pind karastamine. Sellele viitavad ka materjali kõvadused pinnalt ning seest. Hammasrataste sisu on pehme ning väliselt kõvad. Sisemine kõvadus on 39 HRCd ning pinnalt 55 HRCd.

Kolmandaks eesmärgiks oli teada saada miks hammasrattad purunevad. Sellele vastuseks on liiga kõvad kõvadused hammasratta pinnale. Soovituslik maksimaalne kõvadus pindkarastusel on 50 HRCd aga mõõdetud tulemused näitavad keskmiseks tulemuseks 55 HRCd. Maksimaalne kõvadus mõõtmisel tuli 57 HRCd. See on seitse ühikut üle soovitatud normi. Materjali kõrgemal kõvadusel on materjal hapram ning murdub lihtsamini.

Samuti tekitas probleeme hammasratastele rakenduv jõud. Hammasrattad ei pidanud sellele jõule vastu. Seda kinnitas hammasratastele tehtud analüüs Solid Edges. Sellele leiti kaks lahendust. Esimese variandina muudeti hammasrattaid 8 mm laiemaks. Selle muutuse tulemusena peavad hammasrattad sellele pingele vastu. Teise variandina muudeti hammasratta materjali. Kasutati 18 CrNiMo 7-6, aga pakutav materjal mis arvutuste kohaselt peab vastu on Uddeholm Bure. Kokkuvõtteks võib öelda et kõik eesmärgid, mis püstitati ka lahendati. Töö arendas autori nägemust kuidas hammasrattad ning käigukast toimib.

RESÜMEE

The topic of this research is "Analysis of the Gearbox of a Competition Motorcycle." The thesis became the author's problem while using the Zabel engine. During the period 2015-2021, the author was engaged in motocross, more precisely in a motorcycle with a sidecar. During this period, the gears of the gearbox broke very often. During the season, which lasted from May to September, the gearwheels had to be changed five to six times. There are 18 to 22 races per season plus pre-season and in-season training. During that duration, you get 80 to 100 hours of driving. The main concern was the third gear. This gear is the most used and because of that, it broke the most.

The gears do not wear out, do not overrun, or anything like that. The whole tooth breaks off from the gearwheel. 99% of the time the broken tooth comes from the third gear. There have been instances where other gears have broken, but these are very rare. The service life of gears varies greatly. The author has managed to drive half of the season with one pair of gears. It's about 10 races or 20 hours. The least used gear was used for one race, which lasted 20 minutes plus two laps. Thus, it is not possible to predict how long a pair of gears can be used. As a result, breakage cannot be prevented. Usually, it is not possible to finish the race with broken gear. This means you do not finish the race and won't score any points.

The cost of one third gear pair is 300 €. It takes 1500 to 1800 € per season. This is a bargain for a budget. The author's strong driving style or gear changes are not the cause of the breakage. Also, the frequency of breakage is not changed by changing the gearbox oil brand. In an interview, four-time world champion Etienne Bax said he changes third gear gears after each race. In the World Championship stage, one race lasts 30 minutes plus two laps. So he exchanges them more than the author.

Without the support of the factory, I would like to know more about the materials, processing, and required quality of the gears. The thesis aims to find out what material has been used to make the gears. What heat treatment processes have been used. Understand why gears break. What should be changed about the gears so that they can be trusted in the future and they will not break so easily. Suggest solutions for changes.

During the research, all these questions were answered. The material is 18 CrNiMo 7-6. This was due to the chemical composition of the material. Based on the data obtained there, the most suitable material was searched. Knowing that this material is widely used in Germany for the production of

gears and that the gears under investigation are also manufactured in Germany, it can be stated with certainty that the material has been correctly found.

The second goal was to find out what heat treatment process was used. The lack of factory support meant that this had to be found during the work. Due to its low carbon content, the material is not hardenable. That is why it has been cemented. In the process, the surface is enriched with carbon and then the case is hardened. This is also indicated by the hardness of the material on the surface and inside. The gears are softer inside and hard on the outside. The internal hardness is 39 HRC and the surface is 55 HRC.

The third goal was to find out why the gears break. The answer is too hard hardness on the surface of the gear. The recommended maximum hardness for case hardening is 50 HRCd, but the measured results show an average result of 55 HRC. The maximum hardness measured was 57 HRC. This is seven units above the recommended standard. With higher material hardness, the material is more fragile and breaks more easily.

The force applied to the gears also caused problems. The gears could not withstand this force. This was confirmed by the analysis of the gears in Solid Edge. To this problem, two solutions were found. The first solution was found to make the gears 8 mm wider to withstand this tension. The second solution is to change the material. Originally they are made of 18 CrNiMo 7-6 but the author thinks that Uddeholm Bure would be a much more better choice. In conclusion, all the goals that were set were solved. The work developed the author's vision of how gears and gearboxes work.

KASUTATUD KIRJANDUS

ASM International. (12. aprill 2022. a.). Allikas:
https://www.asminternational.org/documents/10192/3475016/06732G_Chapter_4.pdf/4cdd7fa4-97c0-40c3-a427-8b543ae9efe5

C.Wegst/M.Wegst. (2016). *Key to steel*. Marbach: Verlag Stahlschlüssel Wegst GMBH.

Gear Hardness Technology . (17. 9 2022. a.). Allikas:
<https://www.geartechnology.com/ext/resources/issues/0392x/brogie.pdf>

GEAR MANUFACTURING. (25. oktoober 2022. a.). Allikas:
<http://www.gpmanesar.ac.in/GPContent/GEAR%20MFG..pdf>

Hardnesstester. (12. aprill 2022. a.). Allikas: <https://www.hardnesstesters.com/test-types/rockwell-hardness-testing>

Metal Supermarkets. (17. 10 2022. a.). Allikas: <https://www.metalsupermarkets.com/what-is-case-hardening/>

Shaanxi Shewe Iron & Steel Co., LTD. (3. mai 2022. a.). Allikas: <https://www.sheweesteelpipe.com/news/the-material-selection-of-gear-steel-28242602.html>

Sidecarcross. (12. aprill 2022. a.). Allikas: <https://sidecarcross.com/2015/01/history/>

Steelexpress. (8. mai 2022. a.). Allikas: <https://www.steelexpress.co.uk/steel-hardness-conversion.html>

Uddeholm. (10. mai 2023. a.). Allikas: https://www.ramada.pt/ficheiros_upload/ft-uddeholm_bure220601112447.pdf

VerZahnungs-Service. (15. 9 2022. a.). Allikas: <https://www.vz-service.de/firma/firma.htm>

LISAD

1. Keemilise koostise tabel
2. Hammasratta kõvadus hambalt (katsekeha 1)
3. Hammasratta kõvadus küljelt (katsekeha 1)
4. Hammasratta kõvadus hambalt (katsekeha 2)
5. Hammasratta kõvadus küljelt (katsekeha 2)
6. Hammasratta kõvadus seest
7. Vedav hammasratas
8. Veetav hammasratas
9. Hammasrataste andmed
10. Uute hammasrataste andmed (variant 1)
11. Uute hammasrataste andmed (variant 2)
12. Hammasrataste kasutusvaldkonnad vastavalt materjalile

LISA 1.

Keemilise koostise tabel

Program: FE-10
Comment: Low alloy steel
Average and RSD (n=4)

03/25/2022 10:33:36 AM
12858/00
Elements: Concentration

Sample ID: Hammasratas
Operator: M. Saarna
procedure

Equipment: SpectroLabM
Test method: Spectrolab

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
—	%	%	%	%	%	%	%
x	0.25	0.29	0.84	0.012	0.024	1.71	0.28
s	0.02	0.00	0.01	0.002	0.004	0.00	0.00
sr	7.120	1.011	1.100	20.499	15.779	0.240	0.973
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
—	%	%	%	%	%	%	%
x	1.53	0.0340	0.02	0.05	0.01	0.0042	0.02
s	0.01	0.0001	0.00	0.00	0.00	0.0002	0.00
sr	0.967	0.207	1.998	1.598	7.622	5.039	2.294
	W	Pb	Sn	As	Ca	Ce	Sb
—	%	%	%	%	%	%	%
x	<0.01	<0.002	0.003	0.007	<0.0001	<0.002	<0.001
s	0.00	0.000	0.000	0.000	0.0002	0.000	0.000
sr	4.415	5.093	3.827	5.758	160.949	22.846	24.318
	Se	Te	B	Zn	Fe		
—	%	%	%	%	%		
x	0.0021	0.004	<0.0003	<0.0010	>94.90		
s	0.0005	0.000	0.0000	0.0002	0.03		
sr	22.043	10.283	15.949	15.457	0.033		

LISA 2.

Hammasratta kõvadus hambalt (katsekeha 1)

Katsekeha number	Katsetatava hamba number	Kõvadus, HRC
1	1	56
1	1	53
1	1	55
1	1	55
1	1	55
	Esimese hamba keskmine kõvadus	55
1	2	55
1	2	55
1	2	55
1	2	55
1	2	55
	Teise hamba keskmine kõvadus	55
1	3	56
1	3	57
1	3	56
1	3	56
1	3	55
	Kolmanda hamba keskmine kõvadus	56
	Üldine keskmine hamba kõvadus esimesel katsekehal:	55

LISA 3.

Hammasratta kõvadus küljelt (katsekeha 1)

Katsekeha number	Kõvadus, HRC
1	59
1	59
1	55
1	57
1	59
1	58
1	58
1	58
1	58
1	57
Keskmine kõvadus:	58

LISA 4.

Hammasratta kõvadus hambalt (katsekeha 2)

Katsekeha number	Katse number	Tulemus, HRC:
2	1	42
2	1	52
2	1	51
2	1	54
2	1	47
	Esimese hamba keskmine kõvadus	49
2	2	28
2	2	36
2	2	50
2	2	42
2	2	48
	Teise hamba keskmine kõvadus	41
2	3	47
2	3	54
2	3	55
2	3	54
2	3	53
	Kolmanda hamba keskmine kõvadus	53
	Üldine keskmine kõvadus esimesel katsekehal	48

LISA 5.

Hammasratta kõvadus küljelt (katsekeha 2)

Katsekeha number	Tulemus, HRC
2	57
2	57
2	61
2	57
2	58
2	53
2	54
2	54
2	51
2	50
Keskmine kõvadus:	55

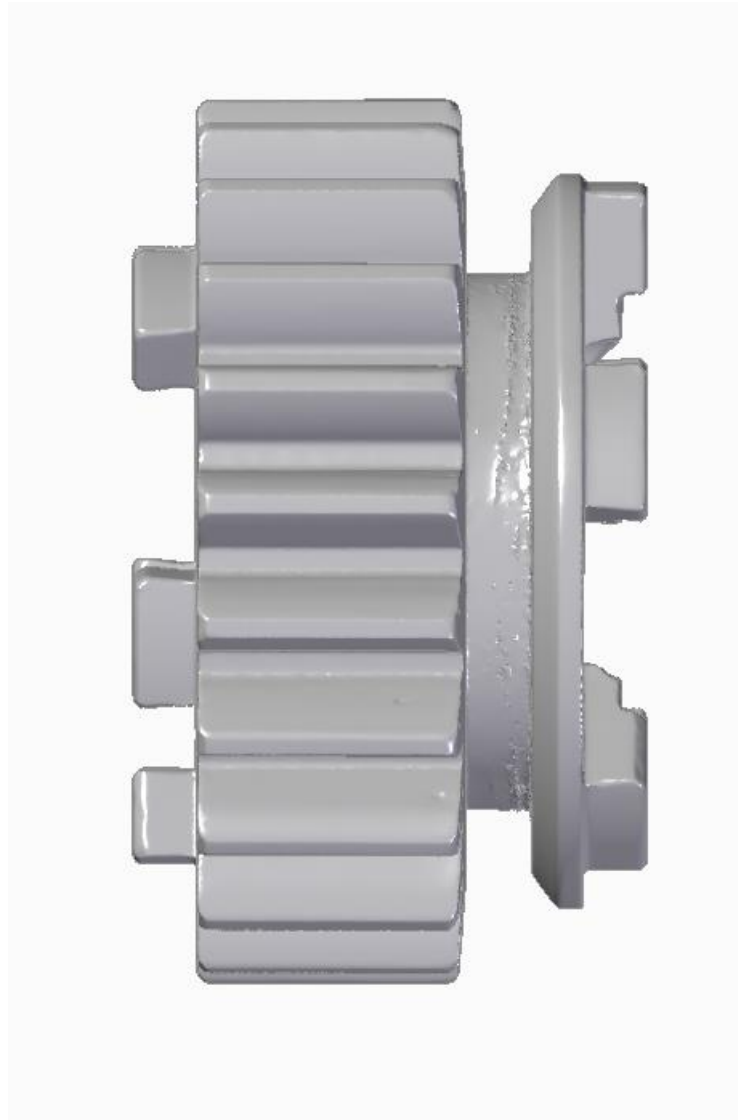
LISA 6.

Hammasratta kõvadus seest

Katsekeha number	Tulemus, HRC
3	36
3	40
3	38
3	40
3	39
3	39
3	36
3	38
3	41
3	40
3	42
Keskmine kõvadus:	39

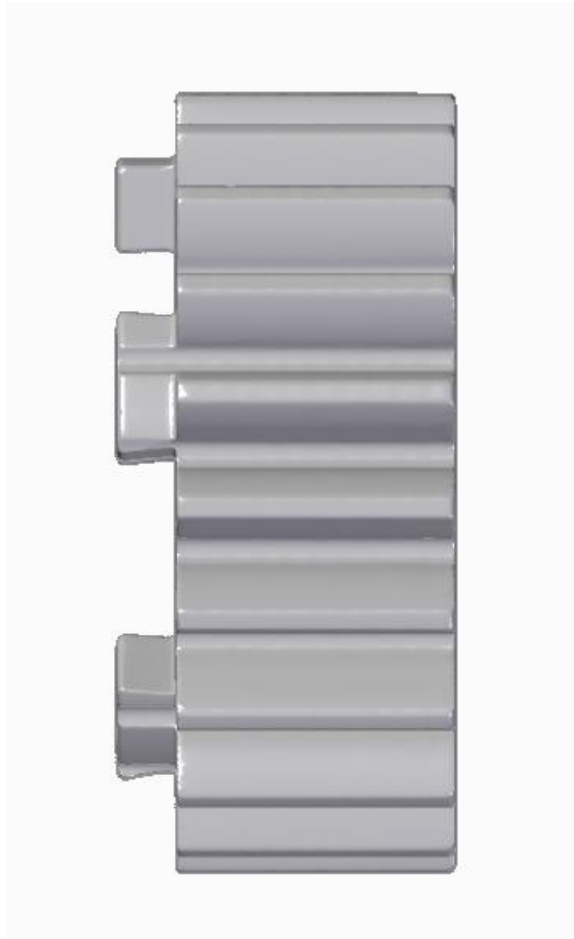
LISA 7.

Vedav hammasratas



LISA 8.

Veetav hammasrattas



LISA 9.

Hammasrataste andmed

GEAR PARAMETERS

Desired Gear Ratio: 1,047

(a) Pressure Angle: 20,00 °

(CD) Center Distance: 49,66 mm

Pinion:

(DM) Mounting Hole Diameter: 23,55 mm

(b) Face Width: 16,76 mm

Power: 64300,000 W

Speed: 54000,000 deg/s

Gear:

(DM) Mounting Hole Diameter: 28,97 mm

(b) Face Width: 18,94 mm

CALCULATE RESULTS

GENERAL RESULTS

Actual Gear Ratio: 0,9545

Module: 2,31 mm

Product Center Distance: 49,67 mm

Pinion:

No. of Teeth: 22

Face Width Ratio: 0,3333

Power: 64300,000 W

Speed: 54000,000 deg/s

Torque: 68,224 N-m

Gear:

No. of Teeth: 21

Face Width Ratio: 0,3945

Power: 59156,000 W

Speed: 56571,428 deg/s

Torque: 65,123 N-m

STRENGTH VALIDATION

Pinion:

Allowable Bending Stress: 558,700 MegaPa

Safety Factor in Bending: 1,39

Allowable Pitting Stress: 1230,930 MegaPa

Safety Factor in Pitting: 0,95

Gear:

Allowable Bending Stress: 557,730 MegaPa

Safety Factor in Bending: 1,56

Allowable Pitting Stress: 1230,930 MegaPa

Safety Factor in Pitting: 1,07

FORCES

Tangential Force: 2713132,066 mN

Radial Force: 987499,314 mN

Normal Force: 2887254,839 mN

Circumferential Velocity: 23,7 m/s

Resonance Speed: 184191,694 deg/s

BASIC DIMENSIONS

Pinion:

(db) Base Diameter: 47,76 mm

(da) Outside Diameter: 55,44 mm

(d) Pitch Diameter: 50,82 mm

Gear:

(db) Base Diameter: 45,58 mm

(da) Outside Diameter: 53,13 mm

(d) Pitch Diameter: 48,51 mm

LISA 10.

Uute hammasrataste andmed

GEAR PARAMETERS

Desired Gear Ratio: 1,047

(a) Pressure Angle: 20,00 °

(CD) Center Distance: 49,66 mm

Pinion:

(DM) Mounting Hole Diameter: 23,55 mm

(b) Face Width: 24,76 mm

Power: 64300,000 W

Speed: 54000,000 deg/s

Gear:

(DM) Mounting Hole Diameter: 28,97 mm

(b) Face Width: 26,94 mm

CALCULATE RESULTS

GENERAL RESULTS

Actual Gear Ratio: 0,9545

Module: 2,31 mm

Product Center Distance: 49,67 mm

Pinion:

No. of Teeth: 22

Face Width Ratio: 0,4872

Power: 64300,000 W

Speed: 54000,000 deg/s

Torque: 68,224 N-m

Gear:

No. of Teeth: 21

Face Width Ratio: 0,5553

Power: 59156,000 W

Speed: 56571,428 deg/s

Torque: 65,123 N-m

STRENGTH VALIDATION

Pinion:

Allowable Bending Stress: 558,970 MegaPa

Safety Factor in Bending: 2,02

Allowable Pitting Stress: 1231,300 MegaPa

Safety Factor in Pitting: 1,15

Gear:

Allowable Bending Stress: 558,010 MegaPa

Safety Factor in Bending: 2,19

Allowable Pitting Stress: 1231,300 MegaPa

Safety Factor in Pitting: 1,27

FORCES

Tangential Force: 2684943,681 mN

Radial Force: 977239,581 mN

Normal Force: 2857257,386 mN

Circumferential Velocity: 23,9 m/s

Resonance Speed: 181115,784 deg/s

BASIC DIMENSIONS

Pinion:

(db) Base Diameter: 47,76 mm

(da) Outside Diameter: 55,44 mm

(d) Pitch Diameter: 50,82 mm

Gear:

(db) Base Diameter: 45,58 mm

(da) Outside Diameter: 53,13 mm

(d) Pitch Diameter: 48,51 mm

LISA 11.

Uute hammasrataste andmed (variant 2)

GEAR PARAMETERS

Desired Gear Ratio: 1,047

(a) Pressure Angle: 20,00 °

(CD) Center Distance: 49,66 mm

Pinion:

(DM) Mounting Hole Diameter: 23,55 mm

(b) Face Width: 16,76 mm

Power: 64300,000 W

Speed: 54000,000 deg/s

Gear:

(DM) Mounting Hole Diameter: 28,97 mm

(b) Face Width: 18,94 mm

CALCULATE RESULTS

GENERAL RESULTS

Actual Gear Ratio: 0,9545

Module: 2,31 mm

Product Center Distance: 49,67 mm

Pinion:

No. of Teeth: 22

Face Width Ratio: 0,3298

Power: 64300,000 W

Speed: 54000,000 deg/s

Torque: 68,224 N-m

Gear:

No. of Teeth: 21

Face Width Ratio: 0,3904

Power: 59156,000 W

Speed: 56571,428 deg/s

Torque: 65,123 N-m

STRENGTH VALIDATION

Pinion:

Allowable Bending Stress: 1240,350 MegaPa

Safety Factor in Bending: 3,11

Allowable Pitting Stress: 1764,540 MegaPa

Safety Factor in Pitting: 1,37

Gear:

Allowable Bending Stress: 1238,210 MegaPa

Safety Factor in Bending: 3,5

Allowable Pitting Stress: 1764,540 MegaPa

Safety Factor in Pitting: 1,54

FORCES

Tangential Force: 2684943,681 mN

Radial Force: 977239,581 mN

Normal Force: 2857257,386 mN

Circumferential Velocity: 23,9 m/s

Resonance Speed: 181115,784 deg/s

BASIC DIMENSIONS

Pinion:

(db) Base Diameter: 47,76 mm

(da) Outside Diameter: 55,44 mm

(d) Pitch Diameter: 50,82 mm

Gear:

(db) Base Diameter: 45,58 mm

(da) Outside Diameter: 53,13 mm

(d) Pitch Diameter: 48,51 mm

LISA 12.

Hammasrataste kasutusvaldkonnad vastavalt materjalile (Shaanxi Shewe Iron & Steel Co., LTD, 2022)

HAMMASRATTA TÜÜP	MATERIAL
Hammasrattad käigukasti, starterile ja veoteljele.	20CrMnTi 20CrMnMo
Traktori käigukasti hammasrattad.	20CrMo 22CrMo
Masinaülekanne, veski mootor ning muud mehaanilised käigud.	
Väikesed hammasrattad tõstukite, transpordivahendite, kaevandusmasinate, keemiatööstuse vedurite ja muude masinate käigukastis.	12CrNi3 12Cr2Ni4 20CrNi3
Kiire käiguliste turbiinmootorite, tööstuslike auruturbiinide, gaasiturbiinide ja turbiinkompressorite ülekannetes keemiatööstuses, metallurgias, elektrijaamaseadmetes, raudteevedurites, lennunduses, kosmose- ja meresõidukites.	20CrNi2Mo 17CrNiMo6
Suured valtsimismasina reduktorid, kalasaba hammasrattad, suurte lintkonveierite ülekande võllid, koonusülekanned, ekskavaatori käigukastid, puuraugu löikuri käigukast, tangi käigukastid jne.	20CrNi2Mo 17Cr2Ni2Mo 20Cr2Ni4 18Cr2Ni4W 20Cr2Mn2Mo