



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Mailis Polma

FREESIMISE MÕJU MATERJALI PINNALE AISI 316L NÄITEL

THE EFFECT OF MILLING UPON MATERIAL SURFACE INTEGRITY BASED ON
AISI 316L

Magistritöö
Tootmistehnika õppekava

Juhendaja: teadur Tõnu Leemet, *PhD*

Tartu 2017

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Mailis Polma		Õppekava: Tootmistehnika	
Pealkiri: Freesimise mõju materjali pinnale AISI 316L näitel			
Lehekülgi: 79	Jooniseid: 47	Tabeleid: 15	Lisaid: 3
<p>Osakond: Põllundus- ja tootmistehnika</p> <p>Uurimisvaldkond (ja magistritöö puhul valdkonna kood):</p> <p>ETIS teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika</p> <p>ETIS teaduseriala: 4.14. Tootmistehnika ja tootmisjuhtimine</p> <p>CERCS teaduseriala: T130</p> <p>Juhendaja: Tõnu Leemet, <i>PhD</i></p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2017</p>			
<p>Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida freesimise mõju materjali pinnale AISI316L näitel. Selleks töötati välja katsetoodika lõikeparameetrite ning materjali pinnakvaliteedi näitajate vahelisi seoseid hindamiseks. Töös mõõdeti kolme pinna kvaliteeti kirjeldavat omadust: jääkpinged, pinnakaredus ja lõikejõud. Uurimustöös hinnati kahe tehtud katse peale kokku 42 katsekeha. Saadud andmete analüüsiks kasutati programmi Modde Pro, kus võrreldi eelnevalt koostatud mudeli abil ennustatud tulemusi leitud väärtustega. Katsetulemused näitasid, et enamasti mõjutas freesimisel pinnaomadusi ettenihke, seejärel lõikesügavuse muutmine. Kõige vähem avaldas mõju lõikekiirus. Lisaks uuriti jääkpingete analüüsis jääkpingete profiili, millega sooviti näidata töötluse käigus materjalis tekkinud plastseid deformatsioone ja nende ulatust. Tehtud analüüsist selgus, et jääkpinged esinevad ainult materjali pindmises kihis, kus lõiketöötluse tagajärel on toimunud materjali deformeerimine. Kuigi uurimustöös kasutati materjali AISI 316L, siis saadud järeldused kehtivad kõigi roostevaba teraste töötlemisel freesimise teel.</p>			
Märksõnad: AISI 316L, roostevaba teras, freesimine, Modde Pro, jääkpinge, pinna kvaliteet			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Mailis Polma		Specialty: Production Engineering	
Title: The effect of milling upon material surface integrity based on AISI 316L			
Pages: 79	Figures: 47	Tables: 15	Appendixes: 3
Department: Agricultural and Production Engineering Field of research (and for Master's Thesis add research field code): ETIS teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika ETIS teaduseriala: 4.14. Tootmistehnika ja tootmisjuhtimine CERCS teaduseriala: T130 Supervisor: Tõnu Leemet, <i>PhD</i> Place and date: Tartu, 2017			
<p>The aim of the Master's thesis was to investigate the effect of milling upon material surface integrity based on AISI 316L. The method of the experiment was developed to explain various relations between cutting parameters and material surface integrity. Residual stresses, surface roughness and cutting forces were measured to describe surface integrity. A total of 42 test pieces were processed and analysed. Data analysis was made with Modde Pro program where predicted results were compared with received values. Given results showed that mainly cutting feed effect surface integrity in milling. The other parameter that influenced surface integrity was cutting depth. The least impact gave cutting speed value. In addition the residual stress depth profile was measured to assess a value of the deformation and how deep in the material residual stresses was found. As a result there were discovered that residual stresses are mainly found in materials surface layer. Also material surface was slightly deformed causing residual stresses to lock into material. Though the used material in the study was AISI 316L all findings are valid in different types of stainless steel.</p>			
Keywords: AISI 316L, stainless steel, milling, Modde Pro, residual stress, surface integrity			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1 TEOREETILISED ALUSED	8
1.1 Pinna kvaliteeti kirjeldavad omadused	8
1.1.1 Jääkpinged	8
1.1.2 Pinge korrosioon pragunemine ja mikropraod	9
1.1.3 Pinnakaredus.....	10
1.2 Masinatöötlusviis – freesimine	10
1.2.1 Lõikejõud.....	11
1.3 Materjal AISI 316L.....	12
1.4 Projekt McScamp.....	13
2 LÄHTEANDMED	14
2.1 Katsetoodika	14
2.2 Riistvara valik	16
2.2.1 Katsekeha väljatöötamine.....	16
2.2.2 Lõiketööriistad ja masinad.....	16
2.2.3 Lõikejõudude mõõtmine.....	18
2.2.4 Jääkpingete mõõtmine	21
2.2.5 Pinnakareduse mõõtmine.....	22
3 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS	23
3.1 Katse protseduuri kirjeldus	23
3.2 Katse 1 tulemused.....	24
3.2.1 Lõikejõu mõju analüüs	27
3.2.2 Pinnakareduse mõju analüüs	33
3.2.3 Jääkpinge mõju analüüs.....	39

3.3	Katse 2 tulemused	45
3.3.1	Lõikejõu mõju analüüs	47
3.3.2	Pinnakareduse mõju analüüs	52
3.4	Katsete võrdlus	56
	KOKKUVÕTE	58
	KASUTATUD KIRJANDUS.....	60
	SUMMARY	63
	LISAD.....	65
	Lisa 1. Freeside katseandmed	66
	Lisa 2. Freesimise programm	68
	Lisa 3. Jääkpingete mõõtetulemused	69

SISSEJUHATUS

Uute ning arenevate energiatootmisviiside edendamine on saanud tänapäeval oluliseks uurimusvaldkonnaks. Vajaduse on tekitanud looduslike maavarade nagu põlevikivi, turba ja puidu ressursside vähenemine maailmas. Vältimaks olukorda, kus maavarad otsa saavad, tuleb asendada praegune energia tootmine, tuule- või vee- energia tootmisega. Selliste viisidega kaasnevad probleemid nagu kõrge müratase või ebasoodne asukoht. Sellest tulenevalt ei ole võimalik igale poole antud alternatiivseid tootmisjaamu rajada.

Aastakümneid on toodetud elektrienergiat, kasutades tuumaenergiat. Paljud riigid nagu USA, Prantsusmaa ja Venemaa toodavad aastas üle mitmesaja miljardi kWh tuumaenergiat, millega rahuldatakse riigi elektrienergia vajadus [1]. Selliste jaamade rajamise positiivseks küljeks on asukohapiirangute puudumine, ühtlasi ei häiri tootmise töö inimtegevust. Need tingimused seavad aga kõrged nõuded ehituskvaliteedile ja tootmistehhhide tööeale [2]. Ohtlikuks muudab energia saamise see, et reaktorite töökeskkond on radioaktiivne, happeline ning pideva surve all. Seetõttu on oluline, et reaktorites kasutatavad ehitusmaterjalid oleksid sealsele töökeskkonnale vastupidavad.

Tuumareaktorite ehitamiseks kasutatakse valdavalt roostevaba terast. Pidevas kontaktis happega ja radioaktiivsete ainetega vähendatakse materjali eeldatavat eluiga, seejuures vajades pidevat väljavahetamist. Põhjus, miks materjalid vastu ei pea, on lõiketötluse tagajärjel materjali pinnale tekkinud defektid, mis on omakorda tingitud halvast pinnakvaliteedist. Need ei pruugi olla silmaga nähtavad, mistõttu jäävad mõningatel juhtudel märkamatuks.

Käesoleva lõputöö raames uuritakse lõikeparameetrite – ettenihke, lõikesügavuse, lõikekiiruse ning materjali AISI 316L pinnakvaliteedi vahelisi seoseid. Selleks uuritakse, mis on aluseks materjalis tekkinud mikromõrdele lähtudes traditsioonilise lõikemeetodi kasutamisest. Lisaks otsitakse töös keskkonna ning tööriista vahelist mõju töödeldud materjali pinna kvaliteedile. Seega on antud magistritöö eesmärk uurida töötlemise mõju materjali AISI 316L töödeldud pinna kvaliteedi näitajatele. Vastava eesmärgi täitmiseks seati järgmised tegevused:

1. olemasolevate kirjanduslike materjalide läbitöötamine;
2. katsetoodika väljatöötamine, mille tulemusena valmib katseplaani konkreetsete ning püsivate parameetritega;
3. riistvaraliste komponentide kirjeldamine ja rakendamine eksperimentaalse osa läbiviimiseks;
4. katseplaani teostamine;
5. tulemuste analüüs.

Magistritöö esimeses põhijaotises käsitletakse pinna kvaliteedi teoreetilisi aluseid. Jaotises viiakse läbi kirjanduslik analüüs tuues välja pinnakvaliteeti kirjeldavad omadused, antakse ülevaade freesimisest ja selle käigus tekkivatest löikejõududest. Seejärel kirjeldatakse materjali AISI 316L karakteristiklike tunnuseid ning esitatakse magistritöö aluseks olnud projekti tutvustus.

Teises põhijaotises on kirjeldatud katsetoodika koostamist lähtudes projektis toodud tunnustest ning antakse ülevaade kasutatavatest tööriistadest, masinatest ning katsekehast. Lisaks tuuakse välja otsitavate parameetrite mõõtestamise kord.

Kolmandas põhijaotises uuritakse katsete läbiviimisi. Tehakse põhjalik analüüs materjali pinnakvaliteedile lähtuvalt löikejõudude, pinnakareduse ning jääkpingete tulemustest. Joonistel kujutatud graafikute abil antakse hinnang katsete kvaliteedile ning leitakse seoseid freesimiseks vajalike parameetritega. Iga muutuva mõju kohta on tehtud eraldi analüüs ning kokkuvõte.

Lisades on esitatud katseandmed, freesimiseks kasutatud programm ning jääkpingete mõõtetulemused.

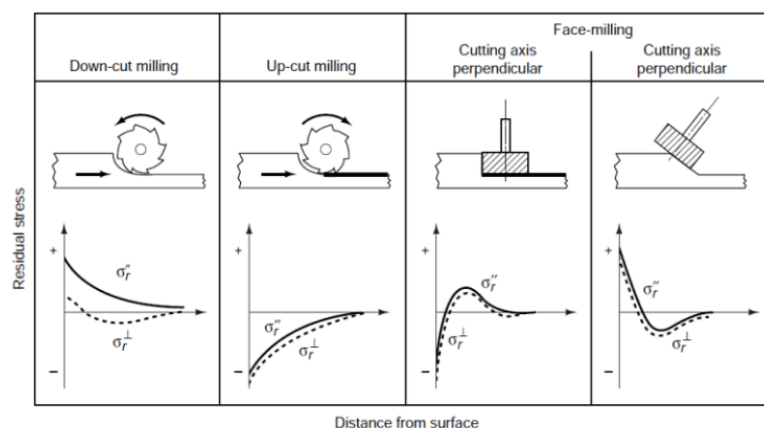
1 TEOREETILISED ALUSED

1.1 Pinna kvaliteeti kirjeldavad omadused

Pinna kvaliteet (*Surface integrity i.k*) on tulem pärast töötlusprotsesse ning see jaguneb kaheks haruks. Esimene on pinna profiil näitaja, mida iseloomustab pinnakaredus. Teiseks on pinna metallurgia, mida kirjeldab tööstusest tingitud jääkpinged, mikropraod ja materjali mehaaniliste omaduste muutumine [3]. Tulenevalt sellest käsitletakse magistritöö raames nende tunnuste üldist mõju.

1.1.1 Jääkpinged

Jääkpinged (*residual stresses i.k*) on mehaanilised pinged, mis tekivad detaili plastse deformeerimise tulemusena. Lõiketöötuse käigus surutakse materjal kokku, avaldades pinget lõikeriista ja materjali vahetule kontaktpinnale (Joonis 1). Nihkedeformatsiooni tagajärjel eemaldub materjal töödeldavalt pinnalt laastu kujul. Antud protsessi käigus tekivad materjali sees pinged lukustudes töödeldava materjali sisse [4]. Jääkpinge väärtus oleneb töötuse ulatusest ja kasutatavatest tööriistadest.



Joonis 1. Jääkpingete tekkimine süsinikterasest freesimise käigus [5]

Igasugune töötlusviis, näiteks freesimine, treimine, keevitamine, stantsimine jms põhjustab materjalis jääkpingete tekkimist. Seetõttu tulenevalt töötlusviisi keerukusest ja kasutatavast tehnoloogiast võib jääkpingete suurus varieeruda [6].

Erinevad uurimused on näidanud, et jääkpinge väärtus on suurim materjali pinnal. Seega pinge väärtus kahaneb sügavuse kasvades. Materjalides, kus mehaanilised näitajad on kõrgemad, esineb rohkem jääkpingeid, mis põhjustavad vabanemisel materjali enneaegset lõhenemist ning murdumist [7].

1.1.2 Pinge korrosioon pragunemine ja mikropraod

Mikropraod (Joonis 2) tekivad erinevate töötlusviiside käigus detaili töödeldud pinnale või pingekontsentraatori kohtadesse. Enamlevinumad tekkepiirkonnad on astmete ning õhukese seinaga kohad detailides. Sellistel juhtudel on töötamise tegemisel oluline arvestada detaili otstarbega. Vähendades valede töötlusviiside kasutamisest tingitud vigade tekkimist, on võimalik parandada detaili pinna kvaliteeti ning vastupidavust.



Joonis 2. Mikropraod roostevabas terases [8]

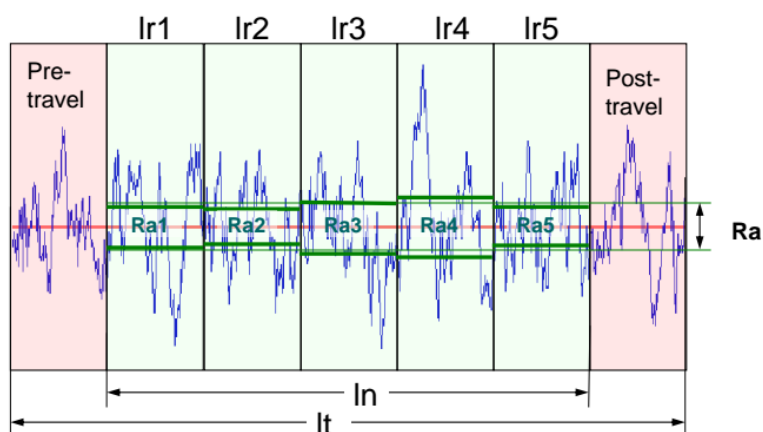
Pingekorrosioon pragunemine (SCC – *stress corrosion cracking i.k*) on kahe erineva olukorra, materjalis olevate jääkpingete ning korrosiooni koosmõju, tulem. See tekib, kui lõiketöötamise käigus on materjali sisse jäänud jääkpinged (*residual stresses i.k*). Pingete vabanemine võib esineda juba vähese korrodeerumise korral. Selle tulemusena tekivad detaili mikromõrad ja halvimal juhul lõpeb olukord detaili purunemisega [9].

Tuumareaktorite töökeskkond on karm – vastu tuleb pidada kõrgetel temperatuuridel, rõhu all ning happelises olustikus. Kuna erisugustel materjalidel on erinevad mehaanilised omadused, siis kasutatavate materjalide hulk reaktorites on suur. Töökeskkonnast tingituna on probleemiks detailide enneaegne kulumine ning materjalide, olenemate nende omadustest, vastuvõtlikkus pingekorrosioonile. Näiteks muutub roostevaba terase struktuur kiiritusest tulenevalt kõvemaks, mis omakorda mõjutab terase mikrostruktuuri[10].

1.1.3 Pinnakaredus

Materjali pinnakaredus, on pinna profiili näitaja. Lõiketöötuse ajal moodustavad kasutatavad terad töödeldud detaili pinnale mustri, mida nimetatakse pinnakareduse näitajaks [11].

Pinnakaredus on töödeldud pinna kuju näitaja, mida tavaliselt iseloomustatakse parameetritega Ra, Rz ja Rq. Ra on profiiliordinaatide aritmeetiline keskmine. Rz on materjali profiili kõrgeim mõõdetud tipp. Rq väärtus on umbkaudselt 10% suurem kui Ra näidates kõrgeimate tippude keskmist [11]. Standardi DIN EN ISO 4288 järgi jagatakse mõõdetav pinnavahemik viieks võrdseks osaks. Aparaadiga mõõdetakse pinnakaredus liikudes mööda materjali profiili. Seejärel võetakse igast mõõtevahemikust aritmeetiline keskmine. Vastavalt sellele on võimalik arvutada välja Ra. Joonisel 3 on toodud viis, kuidas Ra väärtus arvutatakse.



Joonis 3. Pinnakareduse näitaja Ra mõõtmise kirjeldus [Mitutoyo]

Ra on üldine parameeter, mis ei näita täielikku pinnakvaliteeti. Kuna antud lõputöö raames ei olnud vaja spetsiifilisemat hinnangut materjali profiilile, keskenduti töö käigus ainult selle mõõtmisele.

1.2 Masinatöötlusviis – freesimine

Freesimine on traditsiooniline lõiketöötlusviis, kus on võimalik valmistada erineva kujuga detaile, eemaldades töötlusprotsessi käigus tooriku pinnalt ja seest materjali [12]. Tavaliselt kasutatakse materjali töötamiseks erinevaid freese. Käesolevas töös kasutati katsete läbiviimiseks laupreesi.

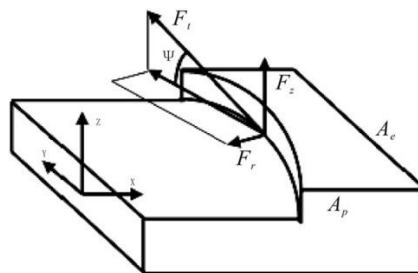
Laupfreesi kasutatakse tasapinnaliseks töötluks, kus korraga on eemaldatase suurem kogus materjali. Eemaldatava kihi paksus sõltub detaili keerukusest ja materjalist. Tavaliselt on standardfreesidel kataloogides etteantud optimaalne sügavus, millest lõiketöötluksel lähtuda.

Freesimisel määratakse lõikerežiimid kolme parameetritga: lõikesügavus, ettenihke ning lõikekiirus. Ettenihkega määratakse freesi liikumise kiirus. Lõikekiirus iseloomustab tööriista pöörlemise kiirust. Lõikesügavusega näidatakse kui sügavale freesiga lõigatakse, et eemaldada ebavajalik kogus materjali. Muutes parameetrite väärtuseid, on võimalik pinna kvaliteeti kas parandada või halvendada. Sellest tulenevalt tuleb hinnata freesimise parameetrite mõju pinna kvaliteedi näitajatele.

1.2.1 Lõikejõud

Lõikejõud on vastupanujõud, mis tekib lõiketöötlemise käigus lõikeinstrumendi sisenedes materjali kuni tööriista täieliku eemaldumiseni. Lõikejõud koosneb kolmest komponendist: tangentsiaal-, aksiaal- ja radiaaljõust. Vastavalt sellele nimetatakse freesimisel x- telje sihis mõjuvat jõudu tangentsiaaljõuks (F_x), y- telje sihis mõjuvad jõudu radiaaljõuks (F_y) ning z- telje sihis aksiaaljõuks (F_z) [13].

F_x kirjeldab lõikekiirusest tulenevat jõudu, F_y ettenihkest ning lõikesügavusest tulenevat jõudu ning F_z lõikesügavusest tulevat jõudu. Jõukomponente kirjeldatakse vektoritena, (Joonis 4). Kokku moodustavad need resultantjõu ehk lõikejõu.



Joonis 4. Lõikejõudude suunad freesimisel [13]

Resultantjõud (F_R) arvutatakse vektorite liitmise teel kasutades valemit 1.1 [14].

Resultantjõud arvutatakse valemiga

$$F_R = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)}, \quad (1.1)$$

kus F_x = tangentsiaaljõud,

F_y = radiaaljõud,

F_z = aksiaaljõud.

Lõikejõud mõjutab lõiketöötluks vajaminevat võimsust. Seetõttu on teada, millised lõikeparameetrid mõjutavad lõikejõudusid enim. Tinglikult on erinevad uurimustööd kinnitanud, et ettenihke või lõikesügavuse suurendamine mõjutavad resultantjõu väärtust [13].

1.3 Materjal AISI 316L

AISI 316L (DIN 1.4404) on austeniitse struktuuriga roostevaba teras. Materjali teeb eriliseks tema struktuur, milles on vähene kogus süsinikku [15]. Mida suurem on süsiniku sisaldus materjalis, seda hapram see on. Selle vähendamiseks lisatakse materjali erinevaid legerivaid elemente. Üheks lisatavaks elemendiks on molübteen. Molübteen on keemiline element, mille sulamistemperatuur on kõrgem (2610 °C) kui raual (1539 °C). Materjali lisades, tõstetakse kuumustugevust ning elastsust [16]. Korrosioonile vastupidavamaks muudavad materjali titaan ning niobium. Mõlemad keemilised elemendid on kõrgema sulamistemperatuuriga kui raud, vastavalt (4540 °C ja 8600 °C) [16]. Titaani ja selle sulameid loetakse ühtedeks vastupidavaimateks materjalideks pingekorrosioonile, mistõttu on need tuumareaktorite ehituses laialdaselt kasutus leidnud.

Tuumareaktorite ehituses kasutatakse laialdaselt AISI 316L. Materjali hinnatakse tema hea keevitatavuse tõttu ja lisaks on sellel hea vastupanuvõime korrosioonile. Seetõttu kasutatakse materjali kohtades, kus on suur korrosiooni tekkeoht: näiteks jahutusumpades, kütuste koostealades, peamistes tsirkulatsioonitorustikes, kolbides, generaatorites ja survemasinates [10, 17].

Materjalide mehaanilised- ja füüsikalised omadused vähenevad ajapikku. Seetõttu on oluline osata hinnata kuidas lõiketöötlus mõjutab materjali omadusi. Antud töös uuritakse lapufreesimise võimalikku mõju materjali AISI 316L pinna kvaliteedile. Lähtuvalt sellest

on võimalik hinnata materjali sobivust tingimusteks kui tekib korrosioon pideva surve all olevas keskkonnas.

1.4 Projekt McScamp

Euroopa Liidu teaduse 7. raamprogrammi projekt McScamp on akronüüm mis on saadud järgmisest inglise keelsest pealkirjast: *Minimising nuclear component stress corrosion through advanced machining parameters*. Projekti juhtpartneriks oli Sheffieldi Ülikool Inglismaalt koos selle juures tegutseva teaduskeskusega Nuclear AMRC (*Advanced Manufacturing Research Centre*). Teisteks partneriteks olid Prantsuse päritolu tööstusettevõtte Areva ning Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut.

Projekti raames uuriti erinevate lõiketötlusmeetodite nagu *cyrogenic cutting*, *minimum quantity lubrication* (MQL) ja traditsiooniliste töötlusviisi, freesimise teel valmistatud detailide pinnakvaliteeti pärast lõiketötlust. Uuringus kasutati austeniitse struktuuriga roostevabu teraseid [17], kuna nendest on valmistatud ulatuslikult tuumareaktorites kasutatavaid komponente.

Teadustöö peamiseks eesmärgiks oli anda hinnang, mis on need lõiketötluse parameetrid, mis mõjutavad pinna kvaliteeti enim ning milline on seos jääkpingete ja pinnakvaliteedi vahel. Samuti uuriti kuidas on need seotud mikromõrade tekkimisega. Uuringu läbiviimiseks jagati koostööpartnerite vahel ülesanded, mis varieerusid vastavalt töötlusviisile ning katsetingimustele. Eesti Maaülikooli osa projektis oli kasutada traditsioonilist lõiketötlusmeetodit ehk freesimist. Projekti eestvedaja Sheffield'i Ülikooli osa oli projekti juhtimine ning katsete tegemine kasutades *cyrogenic cutting* meetodit. Kolmanda partneri ehk ettevõtte AREVA analüüsida jäi MQL meetod. Lisaks jagati ära materjalid, millega tuli katsed läbi viia. Projekti raames tehti põhjalik lõiketötlusanalüüs, kus mõõdeti lõikejõude, pinnakaredust ja jääkpingeid.

2 LÄHTEANDMED

2.1 Katsetoodika

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli lõikeparameetrite ning pinnakvaliteedi vahelise seose hindamine. Selleks oli paika pandud katsetoodika, millest lähtuvalt katsed läbi viidi. Seejärel oli võimalik hinnata tööstusest tingitud mõju materjali pinnale. Järgnevalt on kirjeldatud magistratööks vajalike katseandmete väljatöötamise kord. Selleks on koostatud skeem (Joonis 5).

Projekti eestvedaja poolt oli Eesti Maaülikoolile määratud traditsiooniline lõiketöötlusviis. – freesimine. Vastavalt sellele valiti vajaminev tööriist. Otsustati, et kasutatakse laupfreesi, kuna see võimaldab eemaldada tasapinnas suurema koguse. Lisaks on tööriista tööosast tulenevalt pinged hajutatud, kuna korraga lõikab suurem pind ja rohkem lõikeservi. Lõplikus valikus lähtuti eelkõige kahest aspektist: kas tegemist on standardse freesiga ja kas pingis on võimalik tööriista kasutada. Sellest tulenevalt pandi paika, et lõiketöötlus viiakse läbi freesidega, mille diameetrid on 32 mm ning 63 mm.

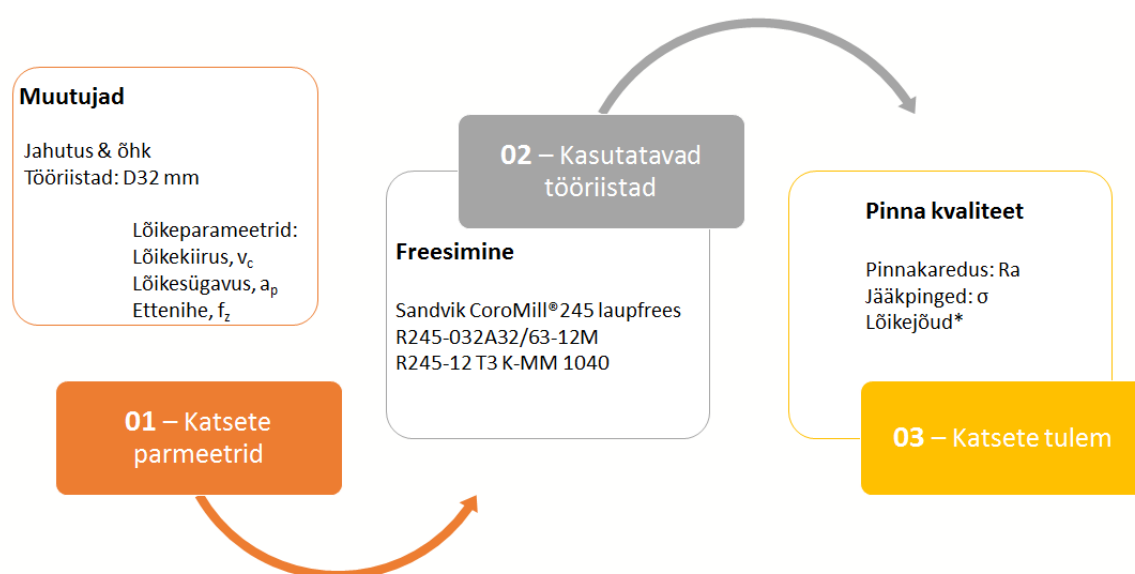
Katsete läbiviimiseks otustati vajalik jahutuse olemasolu ning laasuteemaldamise viis. Kuna jahutus mõjutab erinevaid lõiketöötlemise tulemusi, valiti katsete läbiviimiseks kaks jahutusviisi: suruõhk ning emulsioon. Suruõhuga lõikamiseks arendati moodus kuidas õhk kanalisse saada, sest katsekäigus kasutatud freespingil puudus õhkjahutus.

Freesimiseks on vaja kolme muutujat. Katsete läbiviimiseks oli tarvilik leida väärtused nendele parameetritele. Kuna konkreetseid numbreid ette ei antud (keskkonnast lähtuvalt mõlemil juhul ainult minimaalne ja maksimaalne väärtus), tehti valik juhusliku meetodi abil. Selleks kasutati vabavara programmi Modde Pro [18], kuhu sisestati muutujate minimaalne ning maksimaalne väärtus. Seejärel sai valitud mudel, mille järgi arvutada katseparameetrid. Kokku tuli 11 läbimit emulsiooniga ning 11 suruõhuga. Mudeli põhjal toimus hilisemas staadiumis ka katsetulemuste analüüsimine.

Esimeses katses kasutatud freesil oli 3 lõikeserva, millele kinnitati nelja lõikeservaga lõikeplaat. Teises katses kasutati sama tüüpi freesil nagu esimeses, kuid millel oli 4 lõikeserva. Et uurida materjali pinnakvaliteedi sõltuvust lõikeparameetritest, tuli välistada

tööriista kulumise mõju pinnale. Seetõttu otsustati iga kahe katse järel pöörata lõikeplaatidel uus serv, tagamaks tööriista vastupidavus. Sellega välditi nüri lõikeservaga lõikamisest tingitud pinnadefektid.

Katse analüüsimiseks tuli paika panna otsitavad väärtused. Esmalt oli vaja mõõta lõiketöötuse käigus tekkinud lõikejõudusid. Seejärel teostati pinnakareduse mõõtmine Tehnikainstituudi mõõtelaboris. Viimaks saadeti katsekehad jääkpingete analüüsimisse. Lõikejõude mõõdeti selleks, et hinnata milline freesmise parameeter mõjutab enim lõiketöötlust, kuid pinnakaredust ja jääkpingeid iseloomustamaks töödeldud pinna pinnakvaliteeti.



Joonis 5. Katsete meetodika skeem

Katsete meetodikast lähtuvalt on valitud masinad, millega teostati katsemõõtmised. Peatükis 2.2 on toodud kõik eksperimendi läbi viimiseks kasutatud riistvarakomponendid.

2.2 Riistvara valik

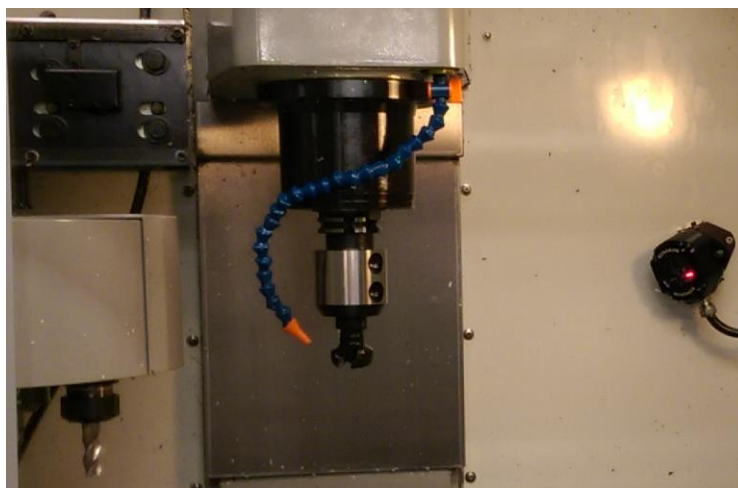
2.2.1 Katsekeha väljatöötamine

Toorikute väljatöötamise esimeseks kriteeriumiks sai katsete ideaalne korratavus. Seetõttu pidid kõik katsekehad olema ühesuguste mõõtudega. Toorikute valimisel oli oluline lõikamise lihtsus ning materjali kättesaadavus. Uurimustöö tulemusena selgus, et igasugune materjali töötlusviis tekitab detailis jääkpingeid [6]. Sellest tulenevalt otsustati, et katsekehad lõigatakse vesilõikuses. Nimetatud meetodiga välditakse termoeefekti ning materjali keemilist töötlemist, mis võivad mõjutada jääkpingete suurust. See oli oluline, sest üheks mõõdetavaks tulemuseks oli jääkpinge.

Materjali paksuseks valiti 20 mm. See on optimaalne vahemik tagamaks erinevate kinnitusviiside võimalikkus pingis. Kuna freesi diameeter oli paika pandud, siis sellest lähtuvalt valiti materjali laius ja pikkus. Lõiketöötuse käigus oli soov, et frees läbiks esimesel katsel materjali kaks korda. Sellest tulenevalt määrati detaili pikkuseks ning laiuseks 50 mm. Vastavalt sellele osteti detailid gabariitmõõtmetega 50 x 50 x 20 mm. Lõigatavaks materjaliks oli AISI 316L [15].

2.2.2 Lõiketööriistad ja masinad

Lisaks toorikutele sai ostetud lõiketerad ja -freesid. Kuigi freesi tüüp oli valitud, siis konkreetset tööriista ei olnud. Üheks koostööpartneriks oli Sandvik Coromant, kelle toodete seast valiti välja vajaminev frees. Esimese katse tööriistaks sai laupfrees R245-032A32-12M [19: J57], mille juurde valiti hoidik A1B20-40 32 100 [19; O105]. Teises katses sai kasutatud sama hoidikut, kuid tööriistaks valiti R245-063A32-12M. Joonisel on toodud valmis seatud tööriista lahendus pinki asetatuna (Joonis 6).



Joonis 6. Laupfrees R245-032A32-12M freespinki asetatuna [erakogu]

Laupfreesile tuli juurde leida lõiketerad, mille valimisel lähtuti eemaldatava pinna paksusest, materjali kõvadusest ning töötamise tüübist (kooriv töötus). Vastavalt sellele valiti välja terikud R245-12 T3 K-MM 1040 [19: J51].

Esimese katse läbiviimiseks kasutati freespinki HAAS SMM-HE Super MiniMill (Joonis 7) [20], asub Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi lõiketöötamise laboris. Teise katse puhul tekkis kahtlus, et pingi võimsusest jääb väheks (masina juhendis kirjas maksimaalne võimsus 12,5 kW). Seetõttu tekkis vajadus teise pingi järele, mis peaks vastu teise katse karmimad katsetingimused. Kuna ülikoolis ei olnud teist pinki, tehti koostööd firmaga I&T metall OÜ, sest antud ettevõttes töötatakse firma HAAS freespinkidega. Seeläbi säilis võimalus võrrelda kahe erineva katse tulemusi omavahel. Katse läbiviimiseks sai valitud freespink HAAS VM-3 (joonis 7), mille maksimaalne võimsus on 22,4 kW [24].

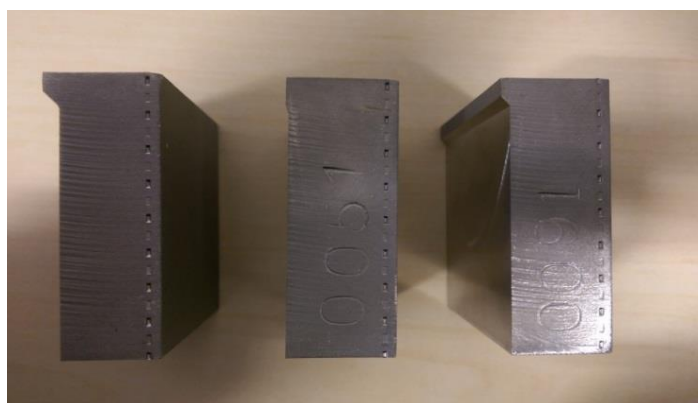


Joonis 7. Vasakul HAAS SMM-HE Super Mini Mill freespink, paremal HAAS VM-3 freespink [20, 24]

Esimeses katses pooled katsekehad tuli lõigata kasutades jahutusvedelikku. Selleks valiti emulsioon *BLASOCUT 2000 UNIVERSAL* [21]. Ülejäänud katsed viidi läbi suruõhuga. Väiksema jõudlusega pingil ei olnud juures võimalust õhuga lõikamiseks. Selleks arentati kompressori ja kraanide abil süsteem, kus kraani lahti keerates oli võimalik suruõhk juhtida läbi sama torustiku nagu jahutusvedelik. Katse 2 esimese osa läbimiseks kasutati jahutusvedelikuna *Blaser Swissslube B-Cool 755* [26]. Teise osa katsest kasutati jahutuseks suruõhku.

2.2.3 Lõikejõudude mõõtmine

Detaili lõiketötluse käigus mõõdeti lõikejõudusid, milleks kasutati dünamomeetrit Kistler 9257B [22]. Aparaaadi paigutamisel pinki lähtuti Taavi Kasepuu lõputööst [23], kus dünamomeetri peale on asetatud LANG'i kruustangid, mille vahele oli lihtne detaili paigaldada [24]. Selleks, et kruustangide vahele installeerimine lihtsam oleks, stantsiti toorikute peale täkked (Joonis 8). Muster kattus kruustangide kinnitusplaatidega, tagades paigalduse, mis ei lasknud toorikul töötamise käigus nihkuda.



Joonis 8. Stantsitud täkked toorikutel [erakogu]

Kinstleri dünamomeeter 9257B on seade, mis installeeritakse freespinkki lõikejõudude mõõtmiseks (Joonis 9). Sellega mõõdetakse lõiketötluse käigus tekkivaid dünaamilisi jõudusid. Masina mõõtevahemik x- ja y- telje suunas on -5 kuni 5 kN ning z- telje suunas -5 kuni 10 kN [Kasepuu, 2015:16]. Eeldatavad lõikejõud katse käigus lubatud piiri ei ületa.

Seade töötab korpuse sees olevate piesokristallidest mõõteplaatide ning alusplaadi vahelise liikumisulatuse mõõtmise teel. Plaatide vahele tekib vähene võnkumine, mis registreeritakse ning edastatakse saatjasse. Seal teisendatakse saadud tulemused elektriliseks signaaliks, mida on võimalik andmetöötluse teel graafiliselt kuvada. Korpuse sees on igas nurgas sensor. See koosneb kolmest kvartskristalliplaadist, mille esimese on mõeldud löikejõudude mõõtmiseks vastavalt x-, y- ja z- telje sihis [Kasepuu, 2015:17].

Antud töös oli seadmel suur tähtsus, sest materjali AISI 316L täieliku pinnatöötamise hindamiseks oli vajalik mõõta löikejõudusid. Seadme jaoks projekteeriti varasemalt ühe lõputöö käigus vaheplaat, mis sobitas omavahel LANG'i kruustangide kinnitusplaadi ning dünamomeetri [Kasepuu, 2015: Lisa 1].



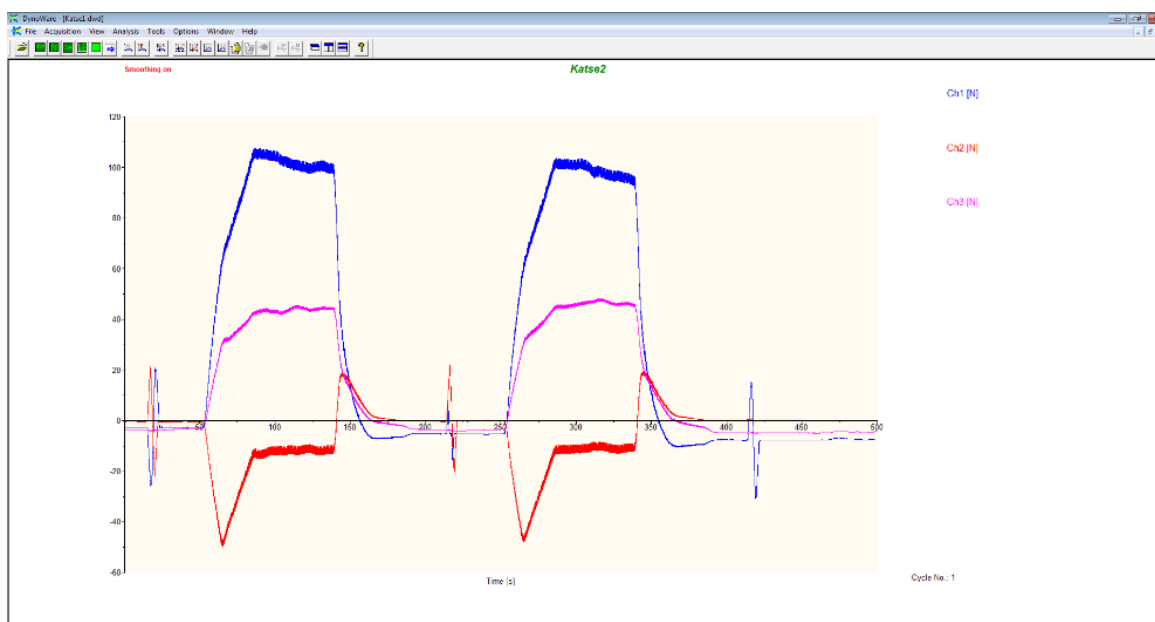
Joonis 9. Lõikejõudude mõõtmiseks mõeldud dünamomeeter Kistler 9257B [erakogu]

Lõikejõudude poolt tekitatud elektrilise laengu mõõtmiseks kasutati *Kistler Multichannel Charge Amplifier* (Joonis 10) [25]. Antud seade teisendab freesimisel tekkivad jõud arvuti pool registreeritavaks elektrilaenguks. Dünamomeetril mõõdetav pinge jääb vahemikku -10 – 10V [Kasepuu, 2015: 20]. Seejärel saadetakse saadud informatsioon arvutisse vastavasse programmi.



Joonis 10. Kistleri dünamomeetri võimendi [erakogu]

DynoWare on andmetöötlusprogramm, mida kasutati Kistleri dünamomeetri 9257B mõõdetud andmete analüüsimiseks [26]. Vastavalt seadistustele tähistati x-telg sinisega, y-telg punasega ning z-telg roosaga (Joonis 11).



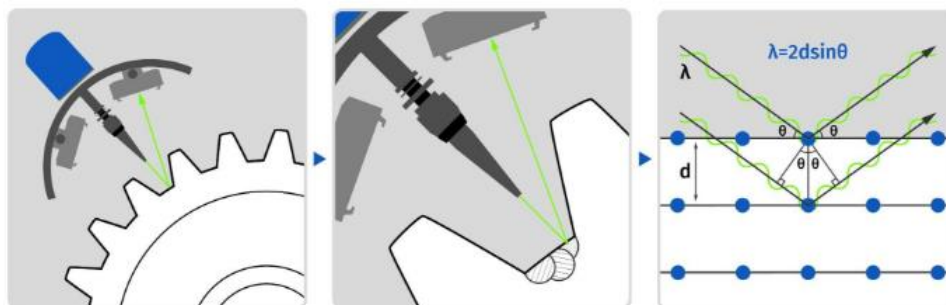
Joonis 11. Dynoware programm. Katsetulemused [erakogu]

Programmiga oli võimalik analüüsida löiketöötuse käigus tekkinud löikejõudusid. Lisaks leiti keskmised, minimaalsed – ning maksimaalsed jõud.

2.2.4 Jääkpingete mõõtmine

Jääkpingete mõõtmiseks kasutati röntgenmeetodit (*x-ray diffraction i.k*) [28]. Analüüsimiseks saadeti detailid Soome firmasse StressTech Oy, kus tegeletakse igapäevaselt jääkpingete analüüsimisega materjalides [29].

X-ray diffraction on röntgen meetod, kus elektromagneetiline kiirgus peegeldub mõõdetavalt pinnalt ja sellele lähedastest kihtidest tagasi, andes informatsiooni detailis olevate jääkpingete kohta (Joonis 12). Mõõtmisi tehakse kolme erineva nurga juures: 0° , 45° ja 90° , seejuures liigutades mõõtepead ühe nurgani ja tagasi ning korratakse protsessi uue nurgaga. Tavaliselt kestavad mõõtmised minutist kuni ühe tunnini [29].

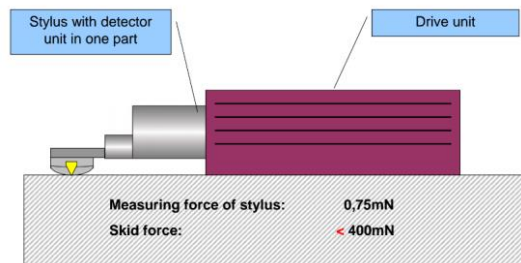


Joonis 12. Röntgen meetod materjalis olevate jääkpingete tuvastamiseks [29]

Lisaks pinnapealsele mõõtmisele võimaldati pingeid mõõta ka jääkpingete profiili kaudu (*depth profile determination i.k*). Katsekeha mõõtmestamiseks tuli pind iga kihi mõõtmise järel elektropoleerida. Sellega näidati kui sügavale ulatuvad erinevas suurusjärgus jääkpinged [29].

2.2.5 Pinnakareduse mõõtmine

Antud töös on pinnakareduse mõõtmiseks kasutatud Mitutoyo surftest SJ – 210 [30]. Süsteemi, millega mõõdeti pinnakaredust nimetatakse *skid system* (Joonis 13).



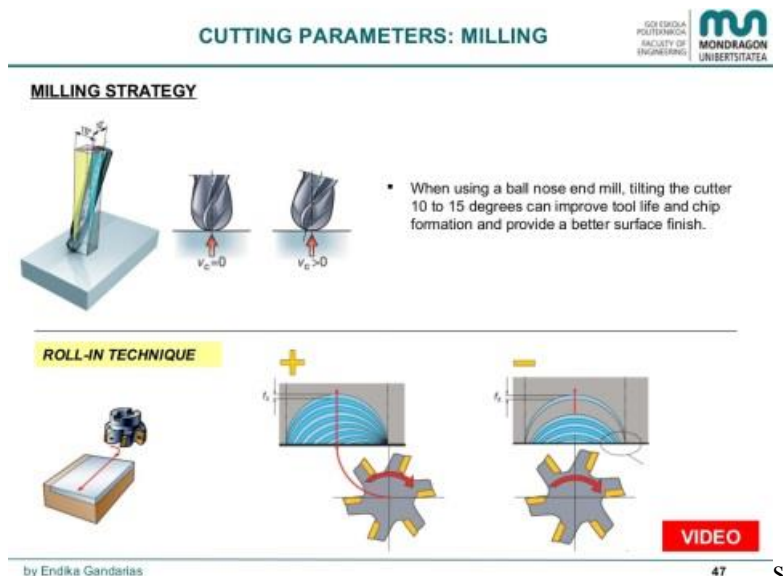
Joonis 13. *Skid system* – detaili pinnakareduse mõõtmine [Mitutoyo: erakogu]

Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi mõõtelaboris seati üles tööala, mille peal mõõdeti kirjeldatud seadmega tasapinnas pinnakaredust. Töölauda sai liigutada vastavalt vajadusele üle ning alla, tehes kontrollitavate detailide vahetuse lihtsamaks.

3 KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Katse protseduuri kirjeldus

Katsekehade lõiketöötlemisel kasutati *Roll-in (i.k)* meetodit, kus freesi sisenemine materjali toimus järk-järgult. Sellisel viisil vähendati tööriista sisenemisel materjali toimuvaid lööke ning sellest tulenevalt pinnakvaliteedi halvenemist (Joonis 14).



Joonis 14. *Roll-in* tehnoloogia [32]

Katset alustati emulsiooniga lõigatavatest toorikutest. Lisaks teostati samal ajal lõikejõudude mõõtmine. Seejärel korraldati protseduuri kasutades lõikamisel suruõhku. Pärast katset kontrolliti detailide pinnadefekte ning teostati pinnakareduse mõõtmine. Hiljem saadeti katsekehad jääkpingete analüüsiks firmasse Stresstech OY.

Katsete analüüsimisel kasutati vabavara programmi Modde Pro, millega leiti katsete meetodika väljatöötamise käigus vajaminevad lõikeparameetrite väärtused. Eksperimendi tulemused ja analüüs on välja toodud peatükkides 3.2 ning 3.3.

3.2 Katse 1 tulemused

Esimene katse viidi läbi freesiga D32. Eksperimentaalset osa alustati katsekehast, kus kasutati lõiketötluse käigus jahutuseks emulsiooni ning seejärel teostati toorikute lõikamine suruõhu abil. Mõlemas töökeskkonnas olid ettenähtud erinevad lõikeparameetrid (Lisa 1). Näitajatele nagu ettenihe ja lõikekiirus arvutati väärtused, mida eksperimendis kasutatav freespink oli võimeline lugema. Vastavalt valitud mudelile tehti katses kolm kordust, mis hilisemas analüüsimise staadiumis olid olulisteks referentsväärtusteks.

Katset alustati pingi ülessoojendamisest, mille järel kinnitati dünamomeeter koos kruustangidega töölauale. Toorik asetati kruustangide vahele nii, et sälgud (Joonis 16) jäid paralleelselt kruustangi plaatidega. Peale seda teostati katsekeha kabariitmõõtmete kontroll. Kuna tegemist oli standardse toorikuga, siis piisas ühest mõõtmete võtmisest. Pingi seadistamine lõpetati tööriista pinki asetamise ja pikkuse kontrollimisega (Joonis 15).



Joonis 15. Eksperimentaalse osa läbiviimine Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi freesimise ruumis, seadistatud pink [erakogu]

Enne freesimise algust tähistati detailid identifitseerimise eesmärgil. Markeerimisel lähtuti töökeskkonnast (kas laastu eemaldus suruõhu abil või emulsiooniga), detaili järjekorra numbrist ning jääkpingete analüüsimise meetodit.



Joonis 16. Katse teostamisel kasutatud toorikute tähistusviis [erakogu]

Viimaks arvutati lõikekiiruse ning ettenihke väärtused. Selleks kasutati kahte valemit. Kuna lõikekiirus on ettenihkega sõltuvuses, tuli esmalt välja arvutada lõikekiirus. Selleks kasutati valemit 3.1. Vastavalt saadud tulemustele leiti ettenihke väärtused, valemiga 3.2. Arvutatud tulemused on välja toodud koos algsete parameetritega, tabelites 1 ja 2.

Freesi pöörlemissageduse leidmiseks on kasutatud valemit

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi}, \quad (3.1)$$

kus v_c = etteantud lõikekiirus,

D = laupreesi läbimõõt.

Freesi ettenihke kiiruse arvutamiseks on kasutatud valemit

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n, \quad (3.2)$$

kus f_z = ettenihe hamba kohta, mm

z = freesi hammaste arv,

n = freesi pöörlemissagedus p/min.

Freesimiseks sai koostatud programm (Lisa 2), kus iga katse läbimise järel asetati uued lõikeparameetrite väärtused. Ettenähtud kohtadesse lisati arvutatud ettenihe ja lõikekiirus ning muutmata kujul lõikesügavus.

Tabel 1. Emulsiooniga tehtud katsete andmed koos arvatud pöörlemissageduse ja ettenihkega

Eksp. Tähis	Jrk nr.	p/min	Lõikekiirus	Lõikesügavus	vf	Ettenihe hamba kohta
N8	1	1989	200	3.0	2089	0.35
N10	2	1741	175	2.0	1306	0.25
N3	3	1492	150	3.0	671	0.15
N6	4	1989	200	1.0	2089	0.35
N2	5	1989	200	1.0	895	0.15
N11	6	1741	175	2.0	1305	0.25
N7	7	1492	150	3.0	1567	0.35
N4	8	1989	200	3.0	895	0.15
N9	9	1741	175	2.0	1306	0.25
N5	10	1492	150	1.0	1567	0.35
N1	11	1492	150	1.0	671	0.15

Tabel 2. Suruõhuga tehtud katsete andmed koos arvatud pöörlemissageduse ja ettenihkega

Eksp. Tähis	Jrk nr.	p/min	Lõikekiirus	Lõikesügavus	vf	Ettenihe hamba kohta
N7	1	1243	125	2.5	1044	0.28
N8	2	1691	170	2.5	1420	0.28
N3	3	1243	125	2.5	373	0.1
N1	4	1243	125	0.5	373	0.1
N9	5	1467	147.5	1.5	836	0.19
N10	6	1467	147.5	1.5	836	0.19
N6	7	1691	170	0.5	1420	0.28
N5	8	1243	125	0.5	1044	0.28
N11	9	1467	147.5	1.5	836	0.19
N4	10	1691	170	2.5	507	0.1
N2	11	1691	170	0.5	507	0.1

Detailide lõikusele järgnes tulemuste analüüs, mille käigus hinnati lõikejõudude, pinnakareduse ning jääkpingete mõju materjali pinnakvaliteedile. Katsetulemuste käsitlemisel kasutati programmi Modde Pro, kus analüüsiti saadud tulemusi kasutades mudelit *full factorial (i.k)*[31]. See koosneb kahest faktoriaalsest tasandist, millega oli võimalik hinnata iga uuritava komponendi mõju tagajärge eraldiseisvana kui ka kõikide näitajate omavahelist seost. Oluliseks teeb selle see, et antud mudeliga saai näha, mis parameetrit muutes on võimalik parendada detaili pinnakvaliteeti. Järgnevates peatükkides on ära toodud nende komponentide mõju analüüs.

3.2.1 Lõikejõu mõju analüüs

Pinnakvaliteedi uurimisel mõõdeti lõiketöötlemise ajal detailile mõjuvat vastupanu- ehk lõikejõudu. Eeldades, et jahutusega lõigates on lõikejõud väiksemad, määrati emulsiooniga lõikamisel parameetrite väärtusete vahemik suurem kui suruõhuga. Analüüsimiseks koostati Excelis tabel, kus on toodud detailis lõiketöötamise hetkel tekkinud resultantjõu komponendid ning vastavalt nendele arvutatud summaarjõud (Tabel 3, 4).

Tabel 3. Mõõdetud lõikejõudude väärtused suruõhuga lõigates

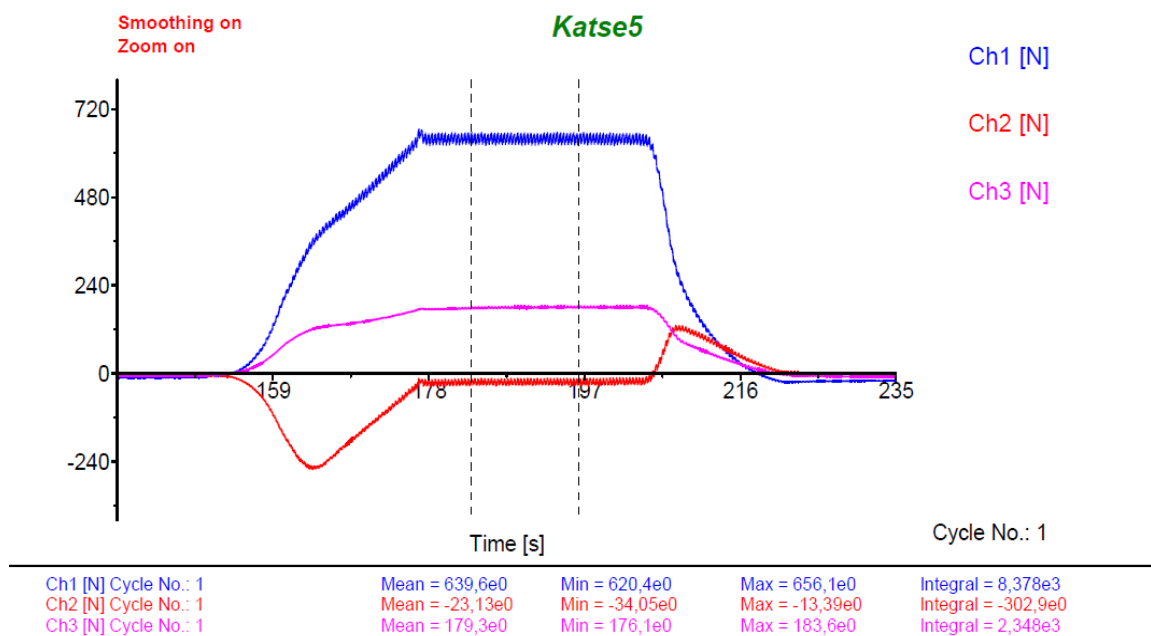
Exp Tähi s	Lõikekiirus	Lõikesügavus	Ettenihe hamba kohta	Jõud X	Jõud Y	Jõud Z	Resultantjõud
N3	125	2.5	0.1	410.15	154	-77.38	445
N1	125	0.5	0.1	96.8	49.21	-17.38	110
N4	170	2.5	0.1	407.58	147.88	-48.03	436
N2	170	0.5	0.1	65.99	38.99	-0.39	77
N9	147.5	1.5	0.19	378.95	98.45	-37.89	393
N10	147.5	1.5	0.19	370.92	93.23	-30.41	384
N11	147.5	1.5	0.19	437.15	124.34	-19.67	455
N7	125	2.5	0.28	851.27	152.01	-1.94	865
N8	170	2.5	0.28	792.14	134.18	-28.15	804
N6	170	0.5	0.28	166.19	42.69	1.13	172
N5	125	0.5	0.28	204.85	68.59	3.87	216

Tabel 4. Mõõdetud lõikejõudude väärtused lähtuvalt emulsiooniga lõigates

Exp Tähis	Lõikekiirus	Lõikesügavus	Ettenihe hamba kohta	Jõud X	Jõud Y	Jõud Z	Resultantjõud
N3	150	3.0	0.15	665.13	195.94	-72.68	697
N2	200	1.0	0.15	237.75	65.25	-17.93	247
N4	200	3.0	0.15	645.46	170.44	-40.71	669
N1	150	1.0	0.15	222.47	71.46	-17.22	234
N10	175	2.0	0.25	624.2	110.22	4.44	634
N11	175	2.0	0.25	603.88	107.31	-13.78	613
N9	175	2.0	0.25	647.83	123.71	-3.27	660
N8	200	3.0	0.35	1128.97	126.18	22.22	1136
N6	200	1.0	0.35	442.03	52.16	13.11	445
N7	150	3.0	0.35	1145.24	134.73	61.02	1155
N5	150	1.0	0.35	412.26	66.47	17.94	418

Jõukomponentide väärtused saadi mõõdetulemuste keskmisest kasutades programmi *Dynoware*. Selleks märgiti vahemik, vertikaalsete joonte vaheline ala, mille järgi

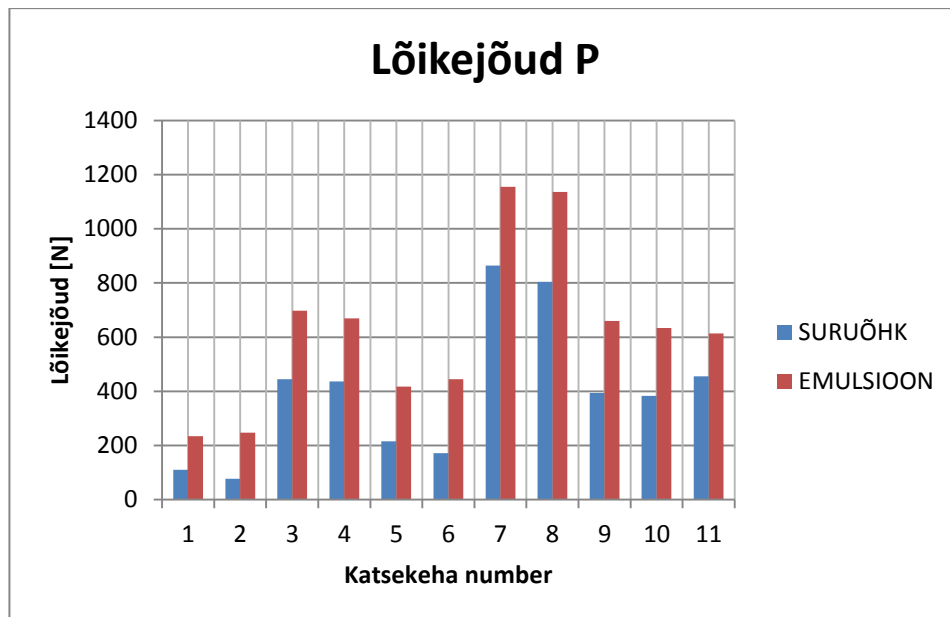
arvutatati vahemikus olevate väärtuste keskmine (Joonis 17). Valitud piirkond ei olnud määratletud ajalise konstandiga, seetõttu polnud võimalik graafiku peal märkida täpset ajavahemikku kus kohast mõõt võtta, küll aga tehti seda kokkuleppeliselt stabiilseima intervalli juurest. X- telje peal kuvati katsekestvus ning y- telje peal saadud resultantjõu komponentide väärtused.



Joonis 17. Saadud lõikejõudude keskmine, stabiilseimast kohast keskmise võtmine

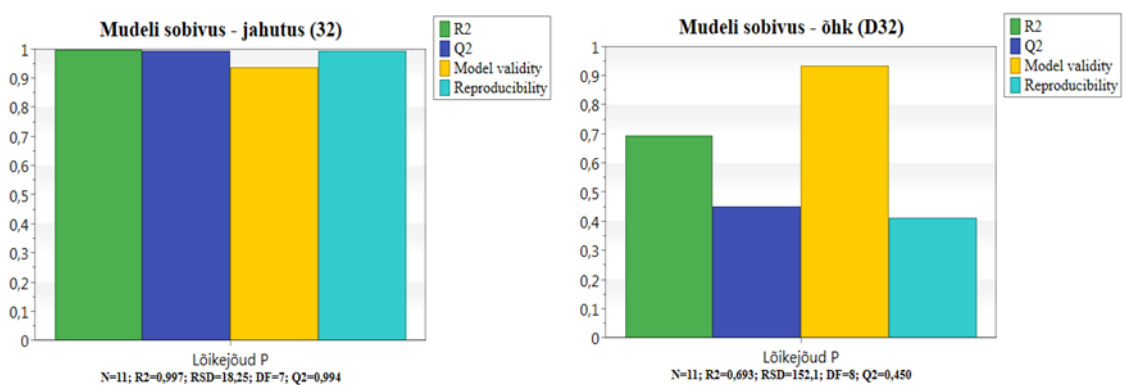
Esimeseks mõõdetud väärtuseks oli lõikejõud. Lõikejõud tekivad materjali töötlusprotsessi käigus, mille tõttu on uuritud pinnakvaliteedi hindamisel selle üldist mõju. Vastavalt eeltoodule oli katsete meetodika koostamise käigus valitud mudel, mis kirjeldaks kõige paremini saadud tulemuste vahelist seost. Mudeli eesmärk oli näidata freesimiseks vajalike parameetrite sõltuvust ja mittesõltuvust mõõdetud tulemustega. Seega sooviti analüüsi käigus näha märgatavat lõikejõu mõju pinna kvaliteedile.

Katsetulemuste analüüsi alguses koostati graafik, kus toodi välja saadud tulemused lähtudes detaili jahutamise viisist (Joonis 18). Sellest graafikust on näha, et emulsiooniga lõigates olid lõikejõud suuremad. Kuna parameetrite väärtused olid pandud jahutusvedelikuga lõikamisel karmimad, siis saadud tulemus on ootuspärane.



Joonis 18. Katsekehade lõikejõu väärtused freesiga D32 lähtuvalt jahutusmeetodile

Enne saadud tulemuste edasist analüüsimist hinnati nende kvaliteeti. Selleks koostati mudeli abil tulemitest tulpdiaagramm, milles võrreldakse, nelja erineva näitajaga, saadud ning mõõdetud väärtuste vahelisi seoseid (Joonis 19). Joonisel on toodud kaks diagrammi, millest vasakpoolne on emulsiooniga ning parempoolne suruõhuga lõigatud tulemuste õigsuse hinnang. Kõikide toodud parameetrite sobivusskaala on vahemikus 0 kuni 1. Kui saadud tulemuseks on 1, siis on tegemist ideaalse ehk 100 % toimiva mudeliga.



Joonis 19. Mudeli sobivus lähtuvalt saadud tulemustest

R2 (*model fit i.k*) on väärtus, mis on toodud rohelises tulbas ning näitas prognoositava ning tegeliku mudeli omavahelist sobivust. Selleks, et hinnata tulemus arvestatavaks, oli vaja saada väärtuseks minimaalselt 0,5. Kuna emulsiooniga tuli R2 väärtuseks 0,997 ning õhuga 0,693 on võimalik järeldada, et emulsiooniga teostatud katseosa tulemused sobisid

mudeliga paremini kui need kus lõikamisel kasutati suruõhku. Sellegipoolest on mõlema katseosa vahemikud piisavad edasiseks analüüsiks.

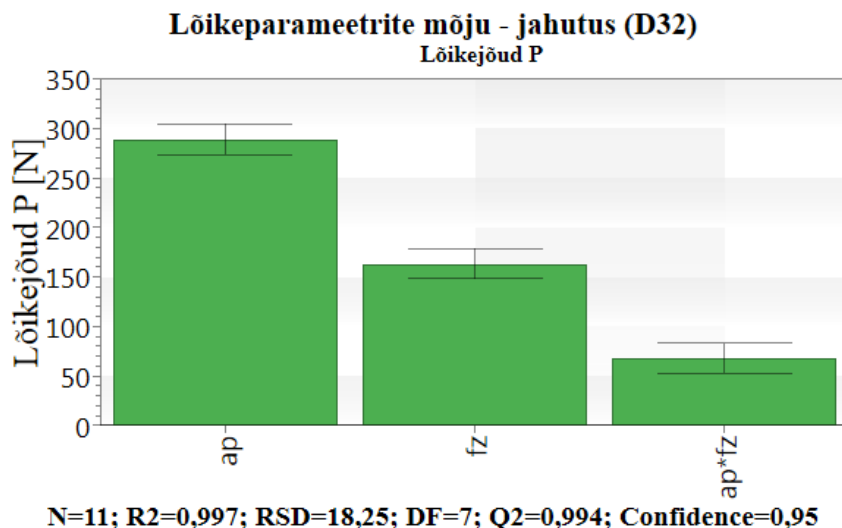
Q2 (*future prediction precision i.k*) on väärtus toodud tumesinisega näitamaks mudeli ennustuse täpsust. Saadud tulemused pidid olema suuremad kui 0,1. Seega on jahutusega tulnud 0,994 ning õhuga 0,45 piisavad edasiseks katsetulemuste analüüsiks.

Kaks järgnevat näitajat on mudeli õigsus (*model validity i.k*) ning katsete korratavus (*reproducibility i.k*), kus esimene on tähistatud kollase ning teine helesinise värviga. Esimesel juhul kui väärtus jäi alla 0,25, oli tegemist vigase mudeliga. Parameeter võis jääda alla 0,25 juhul kui Q2 väärtus tuli suurem kui 0,9. Teisel juhul oli tegemist eelkõige parameetriga, kus oli toodud kordustena tehtud katsekehade tulemuste sarnasus võttes aluseks algupärase läbimi. Lubatud oli tulem, mis ületab väärtust 0,5. Vastavalt sellele on jahutusega katseosa mudeli õigsus 0,901 ning õhuga 0,898. Külla aga oli katseandmete korratavus emulsiooniga lõigates üle 0,5 ning suruõhuga alla lubatud väärtuse.

Kõik eeltoodud näitajad moodustasid tervikpildi mudeli ning saadud tulemuste omavahelistest seostest. Seega oli iga väärtus oluline lävend, mida analüüsimiseks oli vaja läbida, kuna anti hinnang mudeli kvaliteedile. Seetõttu on edaspidi toodud ainult emulsiooniga lõigatud katseosa analüüs, sest suruõhuga lõigatud tulemused ei olnud piisavad tulemusliku hinnangu andmiseks.

Katsest lähtuvalt oli kolm muutuvat parameetrit: ettenihke, lõikekiirus ja lõikesügavus. Nende kaudu saadud lõikejõu väärtuste mõju materjali pinnale oli võimalik hinnata kui saadud tulemused paigutati koos parameetritega ühele graafikule (Joonis 20). Graafikul on toodi need parameetrid, mis mõjutasid otseselt materjali lõiketöötluse käigus saadud lõikejõude. Ülejäänud tegurid tuli graafikult eemaldada. Kuna parameetrite mõju ei ole lineaarne, lisati mudeli täpsuse tõstmiseks lisafunktsioon. Lähtuvalt R2 ning Q2 väärtustest oli mudelisse juurde pandud tegur $ap \cdot fz$. Joonisel on kuvatud sõltuvusgraafik (*correlation coefficient plot i.k*), millega näidati erinevate parameetrite osakaalu lõikejõu suuruse kujunemisel. Oluliseks loeti tegur siis kui selle väärtus jäi kaugemale y- telje nullist, olenemata sellest kas see oli positiivne või negatiivne. Lisaks ei tohtinud määramatuse vahemik ületada ordinaattelje nulli. Vastavalt sellele saab järeldada, et lõikejõu suurust on mõjutanud enim lõikesügavus. Samas on näha, et ka ettenihke väärtuse muutmine on avaldanud mõju. Küll aga ei saa olla kummagi teguri mõju

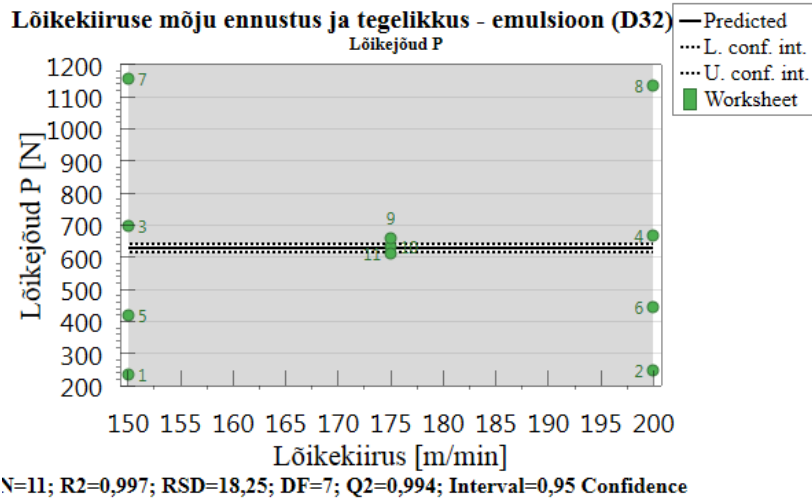
lineaarne, kuna R2 ja Q2 näitarvud on ligilähedased 1-le. Seetõttu toodi välja ka kahe parameetri korrutis illustreerimaks nende omavahelist sõltuvust löikejõu kujunemisel. Graafikult puudub löikekiiruse mõju, kuna see oli katsetulemustest lähtuvalt olematu.



Joonis 20. Löikeparameetrite mõju löikejõu väärtusele

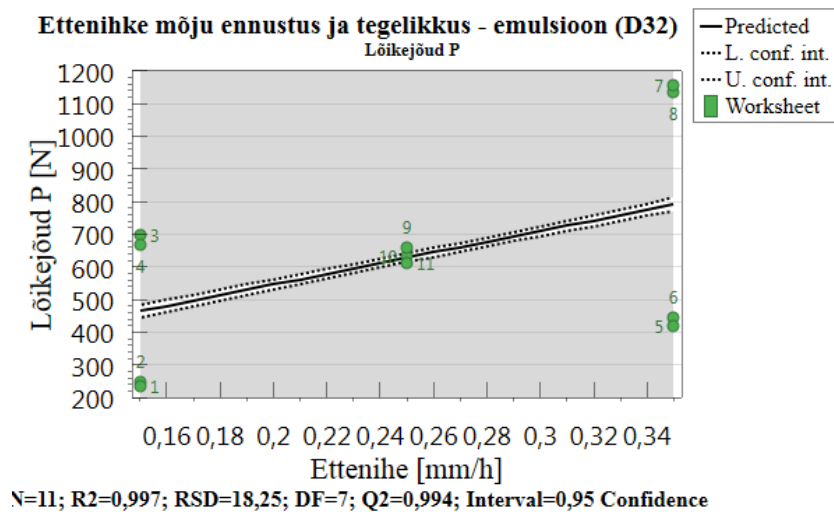
Järgnevalt on toodud freesimise parameetrite individuaalse mõju hajuvusdiagrammid (*factor effect plot i.k*), kus on näidatud esialgse ennustuse järgi prognoositud väärtused joonena ning saadud tulemused punktidenä. Punktiirina tähistatud jooned näitavad mudeli ennustuse täpsust võrrelduna tegelike tulemustega. Vastavalt sellele, mida väiksem mõõdetäpsus, seda suurem tuli punktiirjoonte vaheline ala ning mida väiksem on ala, seda usaldusväärsem tuli saadud tulemus.

Graafikul on kuvatud löikekiiruse ennustatav ning tegelik mõõdetud efekt löikejõule (Joonis 21). Prognoositav mõju on olematu. Katsetulemused näitavad, et nii kiiruse kasvades kui ka kahanedes, ei ole kujunenud selget mustrit mille järgi saaks väita kiiruse võimalikku mõju löikejõule. Seega saadud tulemustest lähtuvalt on võimalik välistada löikekiiruse efekt.



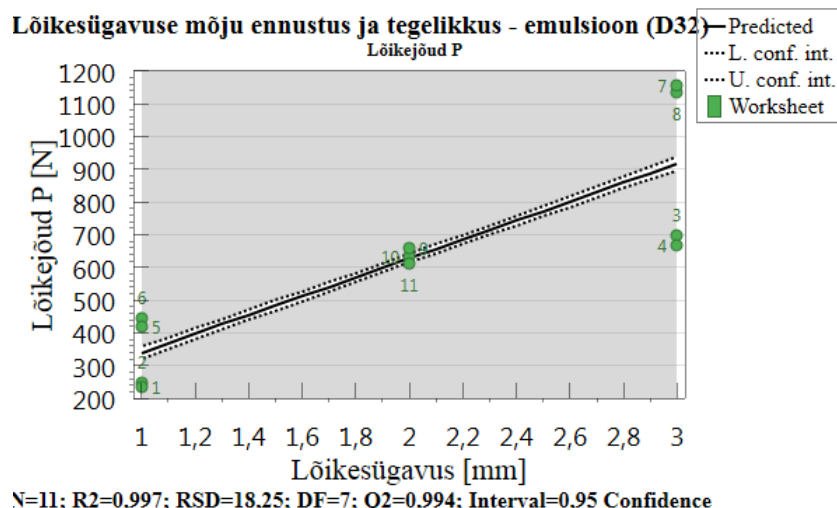
Joonis 21. Lõikekiiruse ennustatav ja tegelik mõju lõikejõu väärtusele

Järgnevalt on toodud ettenihke mõju lõikejõule (Joonis 22). Vastavalt ennustusele, kasvades ettenihke väärtust, suurenes ka lõikejõud. Kuna graafikul joonistatud mõõtetäpsus on suur, võib järeldada ettenihke otsest mõju lõikejõu kujunemisel.



Joonis 22. Ettenihke ennustatav ja tegelik mõju lõikejõu väärtusele

Kolmandaks uuriti lõikesügavuse mõju lõikejõule (Joonis 23). Hajuvusdiagrammil saab lugeda, et lõikesügavuse kasvades on sellest tugevasti mõjutatud lõikejõud. Kui toorikult oli korraga eemaldatud suurem hulk materjali, siis kasvas ka lõikejõu väärtus. Mudeli ennustus oli sarnane oletatule ning seetõttu katsetulemused loetakse täpseks.

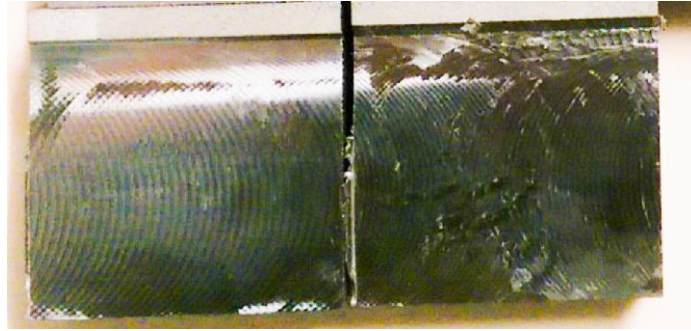


Joonis 23. Lõikejõud ennustatav ja tegelik mõju lõikejõu väärtusele

Lõikejõudude mõõtmisel emulsiooniga keskkonnas sai järeldada lõikesügavuse ning ettenihke mõju lõikejõule, seejuures mõjutas lõikesügavus kõige rohkem saadud tulemusi. Olgugi, et ettenihe on sõltuvuses lõikekiirusest, selgus andmete analüüsimisel, et selle tegelik efekt on marginaalne. Seega on lõikejõu analüüsimisel leitud, et materjali pinnakvaliteedi näitajale avaldas traditsioonilise freesimise käigus enim toimet lõikesügavuse muutmine. Suruõhuga tehtud katsetulemuste analüüsi ei teostatud, kuna mudeli sobitavuse hindamisel välistati see.

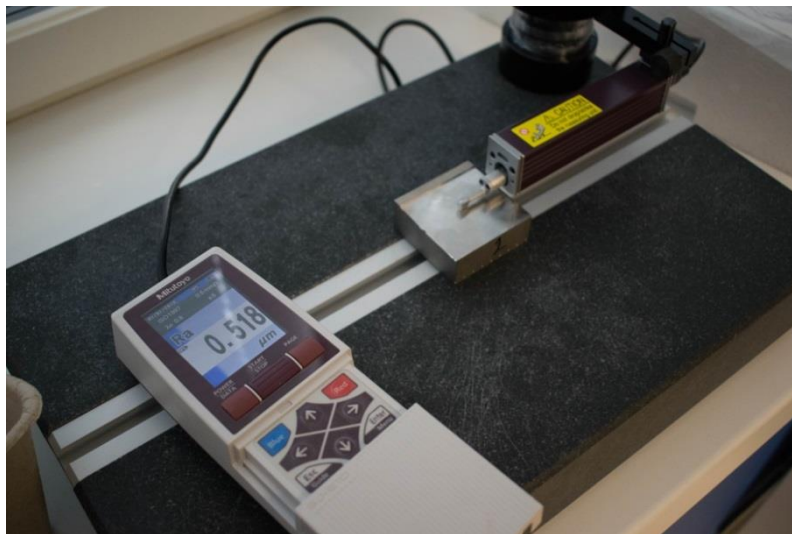
3.2.2 Pinnakareduse mõju analüüs

Pärast detailide pingist eemaldamist, teostati lõigatud pinnale kontroll, et veenduda laastu poolt tekitatud pinnakahjustuste puudumise. Vastavalt sellele eristus milliste detailidega oli kasutatud emulsiooniga jahutust, millistega suruõhku. Mõne katse ajal ei olnud suruõhk tooriku pinna ja tööriista vahele suunatud, mille tõttu ei juhitud laastu pinnast eemale enne kui oli töödeldud pinnaga saavutatud uue kontakti. Kuna laast ei eemaldunud, kiskus frees selle endaga kaasa tekitades pinnale kahjustusi. Kahjustustega katsekehadele tehti sellegipoolest analüüs, kuna toorikute arv oli piiratud. Näitena on toodud kaks töödeldud katsekeha, kus mõlemil juhul on kasutatud laastu eemaldamiseks suruõhku (Joonisel).



Joonis 24. Õigesti eemale juhitud laastuga detail vasakul, valesti eemale juhitud laastuga detail paremal [erakogu]

Pinnakareduse mõõtmisel hinnati katsekehade pinna sobivust hea kareduse saamiseks ning uuriti selle võimaliku mõju pingekorrosiooni tekkimisse. Vastavalt projektile oli kokku lepitud, et mõõtmisel hinnatakse parameetri Ra väärtust. Detail asetati tasasele marmorlauale nii, et lõigatav pind jäi ülespoole ning risti mõõteaparaadi mõõteotsikuga. Seejärel viidi detail ning *skid* omavahel kontakti katsekehalt pinnakareduse mõõtmiseks. Saadud tulemus kuvati pinnakaredusaparaadi ekraanil (Joonis 25).



Joonis 25. Pinnakareduse mõõtmine detaililt pärast lõiketöötlust [erakogu]

Ühe katsekeha kohta tehti kolm mõõtmist. Seejuures võeti tulemit iga kord pinnal erinevast kohast, vähendades sellega mõõteviga. Vastavalt sellele kanti tulemused tabelisse ning seejärel leiti aritmeetiline keskmine (Tabel 5, 6). Pärast saadud mõõtmistulemusi teostati pinnakareduse analüüs. Esimesena koostati diagramm, kus on toodud mõõtetulemused lähtuvalt detaili jahutamise viisist (Joonis 26).

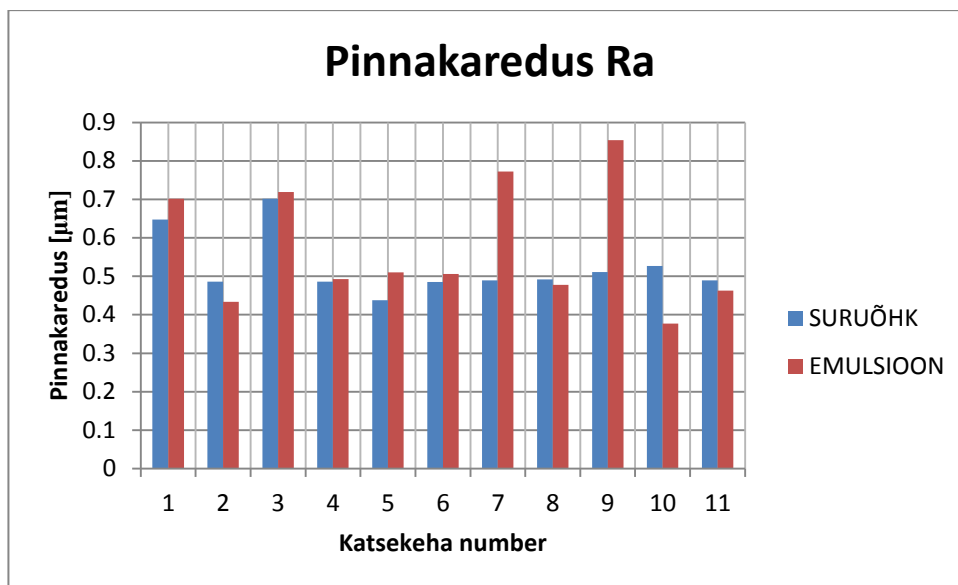
Tabel 5. Mõõdetud Ra väärtused emulsiooniga freesimisel

Jrk nr.	Tähistus	Ra pinnakaredus [μm]
8	018	0.879
10	0110	0.377
3	013	0.719
6	016	0.506
2	012	0.433
11	0111	0.463
7	017	0.772
4	014	0.493
9	019	0.854
5	015	0.510
1	011	0.702

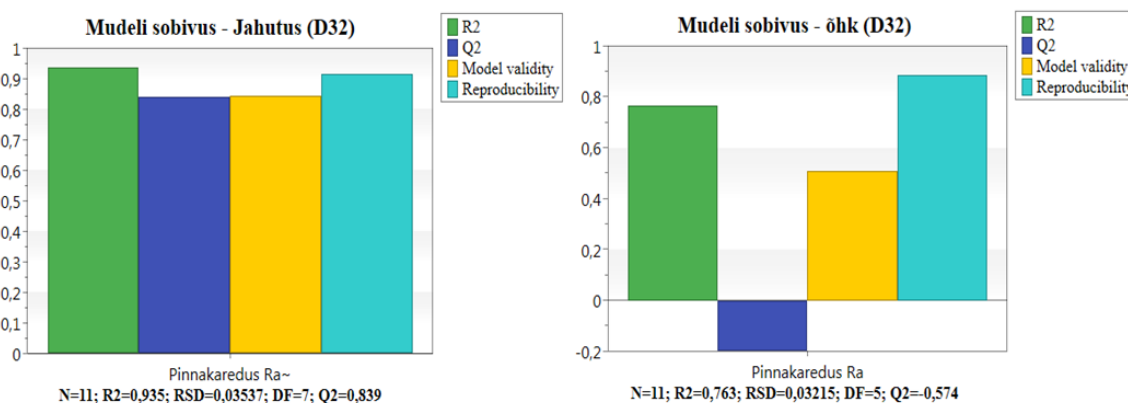
Tabel 6. Mõõdetud Ra väärtused suruõhuga freesimisel

Jrk nr.	Tähistus	Ra pinnakaredus [μm]
7	117	0.490
8	118	0.492
3	113	0.702
1	111	0.648
9	119	0.511
10	1110	0.527
6	116	0.485
5	115	0.438
11	1111	0.490
4	114	0.486
2	112	0.486

Keskmine pinnakaredus saadi emulsiooniga freesides 0,573 μm ning suruõhuga 0,523 μm , millest saab järeldada, et pinnakaredus on mõlemas jahutuskeskkonnas lõigatud detailidel sarnane. Seega keskkond ei mõjutanud saadud tulemusi. Kuid selleks, et saaks põhjalikumalt käsitleda millised parameetrid ning kuidas mõjutavad pinnakaredust tuli koostada sobivuse ja sõltuvuse graafikud.



Joonis 26. Saadud pinnakareduse tulemused freesiga D32 lähtuvalt jahutusmeetodile. Katsetulemuste kvaliteeti hindamiseks koostati mudeli sobivuse diagrammid (Joonis 27). Nendes toodi neli näitajat, mis hindavad mudeli pädevust. Nende tähendused on toodud peatükis 3.2.1.

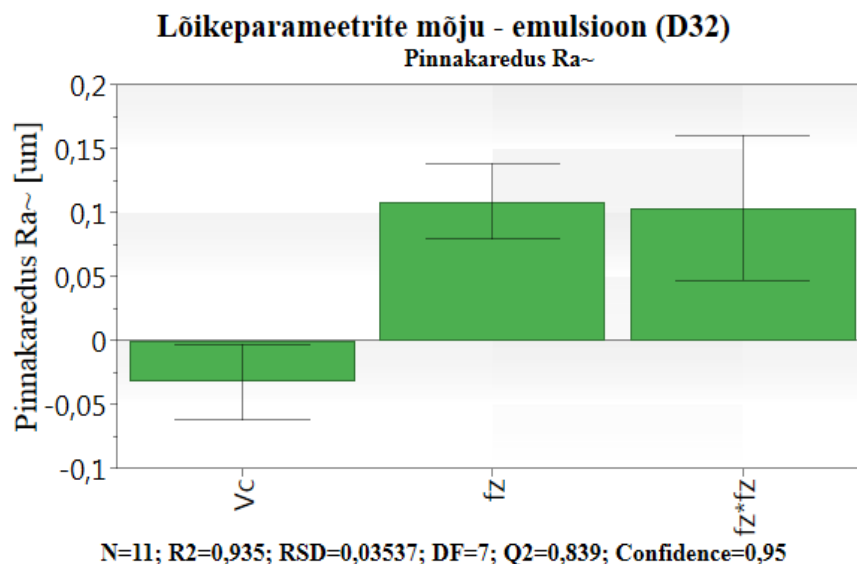


Joonis 27. Mudeli sobivus mõõdetud tulemustega

R2 ehk mudeli sobivuse näitaja, peab olema minimaalselt 0,5. Vastavalt emulsiooniga tuli väärtuseks 0,935 ning õhuga 0,763. Q2 täpsus oli vaja saada rohkem kui 0,1. Pinnakareduse mudelis saadi tulemusteks emulsiooniga 0,839 ning suruõhuga -0,2. Nendest väärtustest on võimalik järeldada, et analüüsi on võimalik teostada ainult jahutusega lõigatud detailidele, kuna suruõhuga saadud Q2 väärtus tuli alla nulli. Q2 võis jääda alla lubatud piiri tingimusel, et katsete korratavuse näitaja tuli suurem kui 0,9. Antud juhul on korratavus küll 0,887, kuid Q2 väärtus on negatiivne. Seega tingimus ei kehti ning pole võimalik suruõhuga tehtud katseosa edaspidi analüüsida.

Mudeli õigsus ning katseandmete korratavus, on näitajad mis näitavad tegelikke tulemusi katsetulemuste ja mudeli vahel. Esimesel juhul kui tulemus on alla 0,25, on tegemist vigase mudeliga. Küll aga võis see jääda alla 0,25 eeldusel, et Q2 väärtus tuli suurem kui 0,9. Teisel juhul oli lubatud tulemus, mis on üle 0,5. Emulsiooniga lõigatud katseosa mudeli õigsuse väärtuseks saadi 0,914 ning katsete korratavus üle 0,5. Sellest saab järeldada, et jahutusvedelikuga tehtud katseosa on korda läinud ning saadud tulemuste järeldused on arvestatavad.

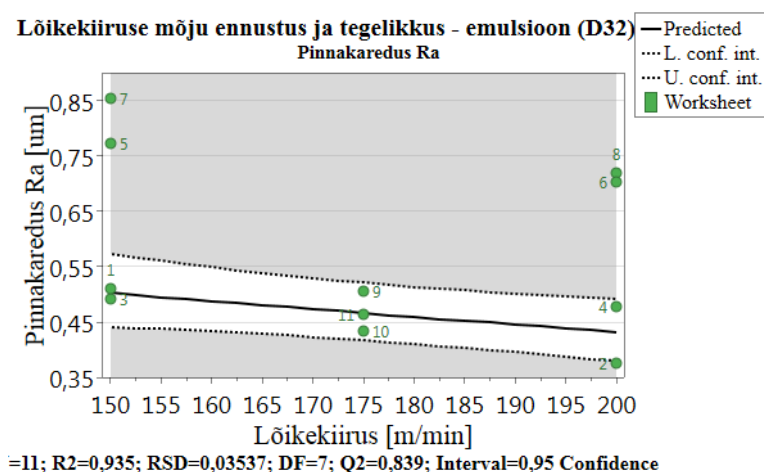
Järgnevalt hinnati hinnatud kolme löikeparameetri – ettenihke, löikekiirus ja löikesügavus, mõju pinnakaredusele. Selleks koostati sõltuvusgraafik, kus kuvati need parameetrid, mis mõjutasid otseselt materjali pinnakaredust (Joonis 28). Need väärtused, mis ei olnud olulised, eemaldati. Lähtudes R2 ja Q2 kõrgetest väärtustest eeldati, et parameetrid ei ole lineaarses seoses mõõdetud pinnakareduse väärtustega, mistõttu on lisatud joonisele juurde funktsioon fz^2 . Saadud tulemustest on võimalik järeldada ettenihke ulatuslikku mõju pinnakaredusele. Kuna löikekiiruse tegur on suurem kui $y=0$ ning mõõtemääramatus ei ületa $y=0$, siis ka löikekiirus mõjutab pinnakaredust, kuigi oluliselt vähem kui ettenihke. Löikesügavuse mõju puudub.



Joonis 28. Löikeparameetrite mõju detaili pinnakaredusele

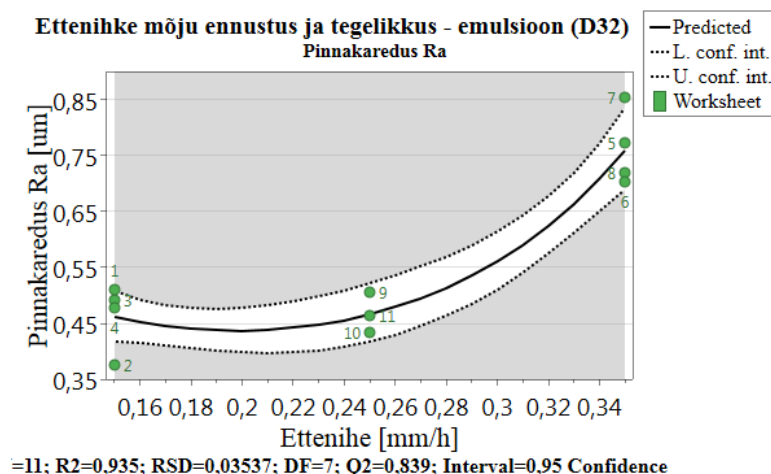
Lähtudes sõltuvusgraafikust, koostati hajuvusdiagrammid löikekiirusele ning ettenihkele. Löikesügavust ei hinnatud kuna selle mõju pinnakaredusele lähtuvalt tulemustest, oli olematu.

Järgnevalt on toodud emulsiooniga freesimisel lõikekiiruse mõju pinnakaredusele (Joonis 29). Kuvatud on prognoos, mis näitab oodatavat pinnakareduse paranemist lõikekiiruse kasvades. Analüüsides saadud tegelikke tulemusi, on näha sarnast trendi, mida omakorda saab kinnitada punktiirjoontega piiritletud mudeli ennustustäpsuse järgi. See-eest on ka näha, et katse mõõtetäpsus ei ole nii konkreetne kui seda oli lõikejõu graafikutel, kuigi piisavalt, et hinnata tulemusi heaks. Mõõtetäpsus on kõigil hajuvusdiagrammidel sama.



Joonis 29. Lõikekiiruse mõju detaili pinnakaredusele

Edasi on toodud ettenihke mõju pinnakaredusele ning sellelt on näha, et loodud mudel on ennustanud ettenihke järsku ekponentsiaalselt kasvutrendi kui parameetri väärtus on suurem kui 0,25 mm/h (Joonis 30). Saadud mõõtmistulemused kinnitavad seda prognoosi.



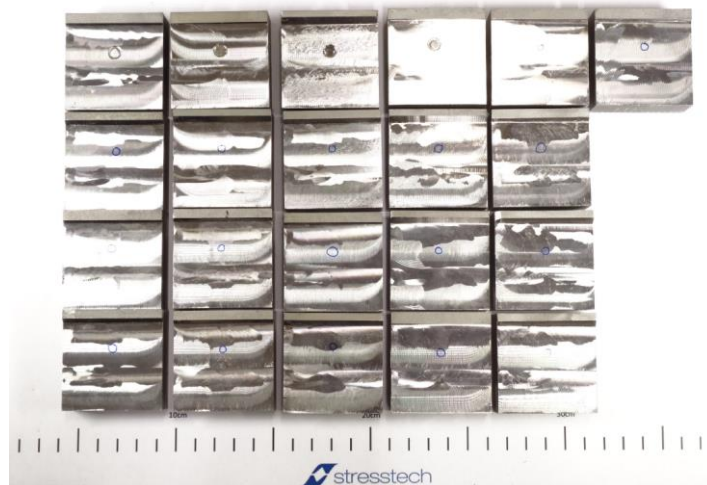
Joonis 30. Lõikekiiruse mõju detaili pinnakaredusele

Freesiga, mille diameeter oli 32 mm, teostati katsetulemuste analüüs ainult emulsiooniga lõigatud detailidele, kuna suruõhuga saadud mudel ei olnud piisavalt täpne järelduste

tegemiseks. Vastavalt, et keskmine mõõtmistulemus emulsiooniga lõigatud katsekehadel saadi 0,573 μm , mis on võrdväärne puhastöötuse käigus saadavale pinnakaredusele. Enim mõjutas saadud tulemusi detaili lõiketöötuse ajal määratud ettenihke ning vähesel määral ka lõikekiiruse väärtused. Mudeli mõõtetäpsus tuli 84%, mis on piisav kasvutrendide osas hinnaguliste järelduste tegemiseks. Teatud piirist alates suurendades ettenihet, suurenes Ra väärtus. Samas lõikekiiruse suurenedes, pinnakaredus vähenes. Kolmanda parameetri ehk lõikesügavuse mõju antud katse läbiviimisel ei leitud.

3.2.3 Jääkpinge mõju analüüs

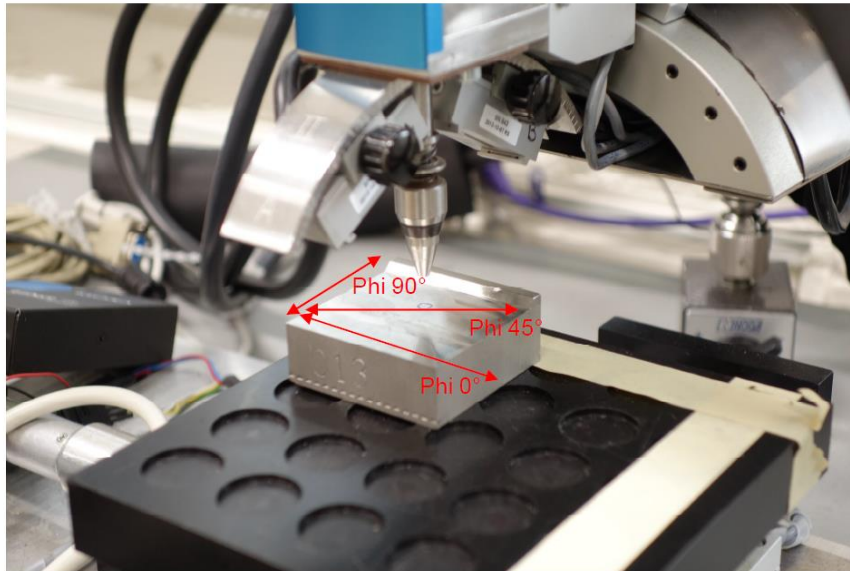
Viimasen mõõdeti pinnakvaliteedi hindamisel detaili lukustunud jääkpinged. Seda oli võimalik teha pärast detaili eemaldamist pingist, kuid mitte Eestis, vaid Soomes ettevõttes nimega Stresstech Oy. Antud teenus osteti sisse kuna teadaolevalt ei ole Eesti turul ühtegi firmat, kes tegeleks *x-ray diffraction* meetodi rakendamisega. Seetõttu leiti ettevõtte, mille igapäeva töö on nende mõõtmine. Jääkpingete analüüs tuli jätta viimaseks, kuna katsekehad oli vaja saata mõõtmisele välismaale ning kokkuleppeliselt katsekehasid enam tagasi ei saadetud.



Joonis 31. Jääkpingete mõõtmiseks määratud piirkondadega katsekehad [Stresstech Oy]

Katsekehade saatmiseks tuli need märgistada. Vahetult enne lõiketöötuse algust löödi detailide peale number. Nende järgi tähistati hilisemas mõõtmisfaasi töödeldud detailide jääkpingete väärtused (Lisa 3). Seejärel märgiti koht, kus jääkpingeid tuli mõõta (Joonis 31). Kokku mõõdeti jääkpingeid 17 katsekehal ning neljal neist on lisaks teostatud jääkpingete profiili analüüs. Mõõtmise teostamisel kasutati aparati difraktomeeter

XSTRESS3000 (Joonis 32) [32]. Jääkpingete profiili analüüsiks teostati katsekehadel elektropoleerimine ning sügavuse mõõtmiseks kasutati indikaatorotsa. Saadud mõõtetulemused on toodud lisas 3.



Joonis 32. Jääkpingete mõõtmisruunad [Stresstech Oy]

Põhjalikumaks tulemuste hindamiseks koostati tabelid 7 ja 8. Esimeses toodi jääkpingete väärtused freesides emulsiooniga ning teises suruõhuga. Nende põhjal koostati hilisemas faasis programmis Modde Pro mudel, et hinnata parameetrite ja jääkpingete omavaheliste mõjude suurust.

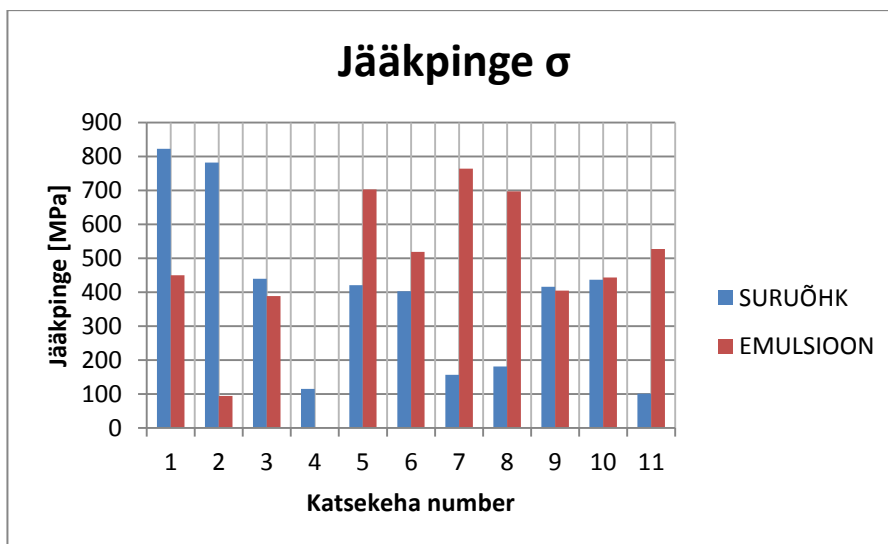
Tabel 7. Jääkpingete katsetulemused õhuga lõigates

Exp no	Exp Tähis	Lõikekiirus	Lõikesügavus	Ettenihe hamba kohta	Jääkpinge
3	N3	125	2.5	0.1	191
1	N1	125	0.5	0.1	262
4	N4	170	2.5	0.1	303
2	N2	170	0.5	0.1	211
9	N9	147.5	1.5	0.19	458
10	N10	147.5	1.5	0.19	592
11	N11	147.5	1.5	0.19	496
7	N7	125	2.5	0.28	603
8	N8	170	2.5	0.28	673
6	N6	170	0.5	0.28	460
5	N5	125	0.5	0.28	403

Tabel 8. Jääkpingete katsetulemused jahtusega lõigates

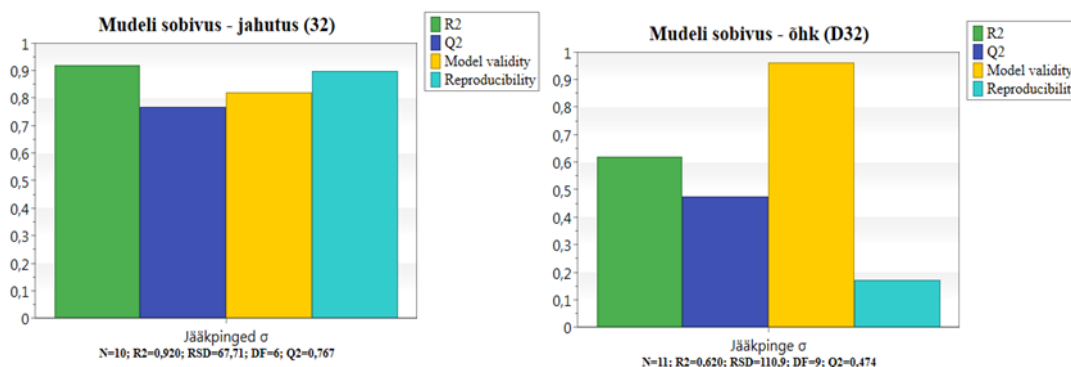
Exp no	Exp Tähis	Lõikekiirus	Lõikesügavus	Ettenihe hamba kohta	Jääkpinge
3.0	N8	200.0	3.0	0,35	697
2.0	N10	175.0	2.0	0,25	443
4.0	N3	150.0	3.0	0,15	389
1.0	N6	200.0	1.0	0,35	519
10.0	N2	200.0	1.0	0,15	95
11.0	N11	175.0	2.0	0,25	528
9.0	N7	150.0	3.0	0,35	765
8.0	N4	200.0	3.0	0,15	
6.0	N9	175.0	2.0	0,25	406
7.0	N5	150.0	1.0	0,35	703
5.0	N1	150.0	1.0	0,15	451

Vastavalt tulemuste keskmisele anti hinnang lõikamise keskkonna olulisusele lõiketöötlusprotsessi käigus. Sellest lähtuvalt koostati graafik (Joonis 33). Katsekehadel, kus jahutusena kasutati suruõhku, saadi tulemite keskmine 389 MPa, seevastu emulsiooniga 454 MPa. Saadud tulemus oli ootuspärane, sest emulsiooniga lõigates pandi lõikeparameetrite väärtused rangemad.



Joonis 33. Saadud jääkpinge tulemused freesiga D32 lähtuvalt jahutuskeskonnale

Saadud tulemuste põhjal koostati analüüs, seejuures eristades neid erineva jahutusviisi kasutamise alusel. Vastavalt loodud mudelile ning tegelike tulemitele tehti järeldusi katsetulemustes. Analüüsi käigus uuriti täpsemalt kuidas löikeparameetrid mõjutavad jääkpingeid. Selleks koostati kaks tulpdiaagrammi, kus vasakpoolses on jahutusega ning paremas suruõhuga lõigatud mudeli sobivuse tulemused (Joonis 34). Kõikide toodud parameetrite sobivuskaala jäi vahemikku 0 kuni 1. Maksimaalne väärtus 1 tähendab, et tegemist on ideaalse mudeliga, mis ühtib täielikult katsetulemustega. Erinevate komponentide tähendused toodi peatükis 3.2.1.

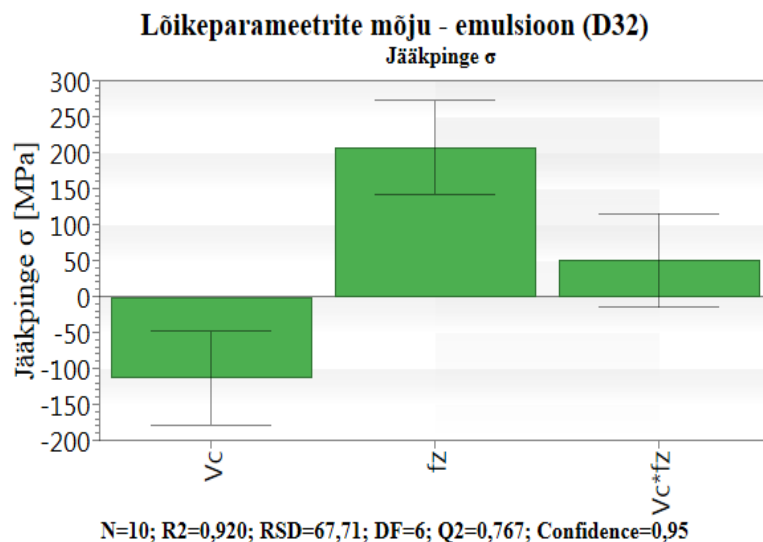


Joonis 34. Jääkpinge mudeli sobivus lähtuvalt saadud tulemustele

R2 väärtuseks saadi emulsiooniga lõigates 0,920 ning suruõhuga 0,620. Seejärel tuli Q2 vastavalt 0,767 ja 0,474. Mudeli õigsuse ning katseandmete korratavuse tulemused saadi järgmised: mudeli õigsus emulsiooniga 0,819 ning suruõhuga 0,963, katseandmete

korratavus saadi vastavalt 0,897 ning 0,173. Mudeli sobivuse järgi jõuti järeldusele, et ei ole võimalik analüüsida surõhuga saadud jääkpinge väärtusi, seega edasist analüüsi sellele ei teostatud.

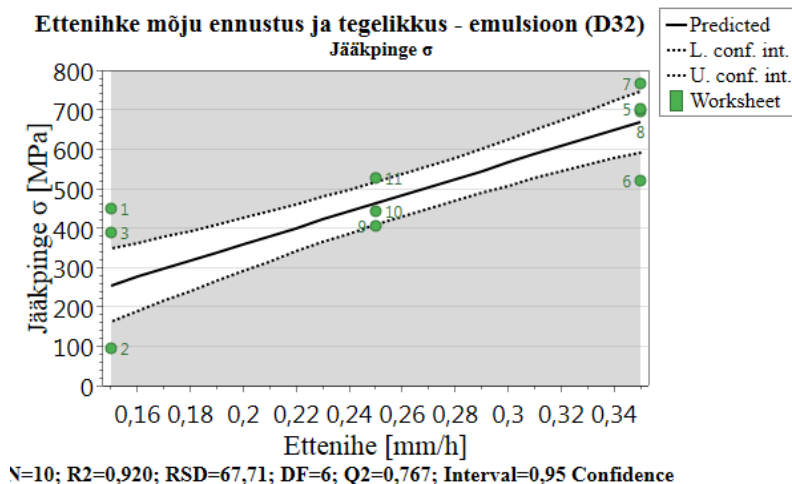
Järgnevalt toodi sõltuvusgraafikul parameetrid, mis mõjutasid materjalis olevaid jääkpingeid lähtuvalt jahtuskeskkonnale (Joonis 35). Sellelt on välja jäetud parameetrid, mis tuginedes mudelile, ei mõjuta jääkpingete suurust. Graafiku näitajate tähendus on toodud peatükis 3.2.1.



Joonis 35. Lõikeparameetrite mõju jääkpingete tekkimisel lähutvalt jahutuskeskkonnast

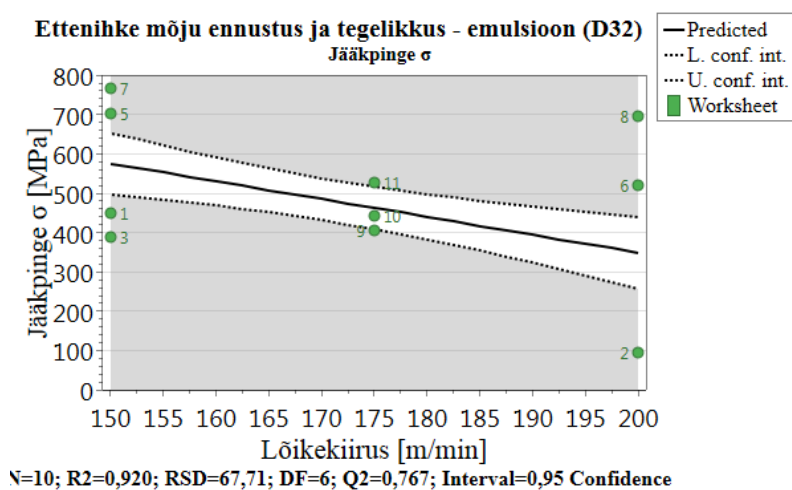
Jääkpinge suurust emulsiooniga lõikamisel on mõjutanud freesimise parameetrid ettenihe ning lõikekiirus. Graafikult on näha, et ettenihke muutmine on enim suurendanud jääkpinge väärtust. Samas mõjutas ka lõikekiirus saadud tulemust. Mudeli järgi parameetrite omavaheline seos puudub. Et näha näitajate tegelikku mõju jääkpinge väärtusele, tuli vaadelda neid eraldiseisvana. Selleks koostati järgnevad hajuvusdiagrammid

Joonisel on toodud parameetri ettenihe mõju ulatus lähtuvalt ennustusele ning tegelikule tulemusele (Joonis 36). Mudeli põhjal prognoositi näitajale kasvutrend. Seda ennustust kinnitasid ka saadud väärtused. Parameetri mõõtetäpsus on väiksem kui 95%.



Joonis 36. Ettenihke mõju detaili jäävate jääkpingete väärtuse suurusele

Lisaks ettenihke suurusele on jääkpinge mõjutatud löikekiirusest. Selle illustreerimiseks koostati hajuvusdiagramm (Joonis 37). Toodud katsetulemuste ning trendijoone järgi on näha löikekiiruse suurenedes jääkpinge tulemite langemist nii ennustatavas kui reaalses väärtustes.



Joonis 37. Löikekiiruse mõju detaili jäävate jääkpingete väärtuse suurusele

Lisaks jääkpingetele mõõdeti neljal katsekehal jääkpinge profiili. See tähendas seda, et kontrolliti kui sügavale ja kui tugevasti jääkpinge mõju ulatus, arvestatuna detaili pinnast. Lisas 3 on ära toodud nende (õhuga lõigatud katsekehad 012, 015 ning jahutusega lõigatud katsekehad 111, 118) detailide mõõtetulemused. Kõikidel katsekehadel mõõdeti protsessi käigus ka FWHM väärtust, millega on kirjeldatud materjalis olevaid mikropingeid ja töötluse käigus tekkinud plastset deformatsiooni. Mõõtevahemikuks oli 0

– 500 μm . Katsekäik viidi läbi kolme nurga all – 0° , 45° ja 90° . Vastavalt sellele saadi lisa toodud graafikud 5, 6, 7 ja 8. Analüüsi tulemusena selgus, et jääkpinge suurus on seda suurem, mida pinnale lähemalt on mõõtnud. Lisaks saab järeldada, et jääkpinge püsib pindmise materjali kihi peal, mistõttu sügavamal olevad materjalikihid on selle mõjust puutumatud. FWHM tulemused näitasid, et katsekehades toimus materjali pindmine deformatsioon, mille käigus tekkis detaili vähesel määral mikropingeid. Antud mõõtmised ei tuvastanud suuri kõrvalekaldeid, mida võib seletada liiga väikeste parameetrite väärtustega. Küll aga saadi teada, et olenemata seatud tingimustest salvestub materjali alati pinged. Siinkohal nimetatakse neid jääkpingeteks kuna tekivad tööluse käigus ning jäävad alles ka pärast tööluse lõppu.

Katse tulemusena järeldati, et jääkpinge püsib ainult materjali pindmise kihi juures, mistõttu suurendab, tööluse käigus tekkinud mikorpragude kaudu, nende vabanemisel detaili katki minemist. Loodeti näha, et materjali sisse jääv pinged väärtused katses võimalikult väikesed jääks. Katse 1 keskmine jääkpinge väärtus emulsiooniga lõigatud toorikutes tuli 454 MPa ning suruõhuga 389 MPa. Selle suurus on mõjutanud freesimise parameetrid ettenihke ja löikekiirus. Ettenihke väärtuse kasvades suurenes jääkpinge, seevastu löikekiiruse kasvades hoopiski vähenes. Muutes mõlemat näitajat sobilikus suunas, on võimalik vähendada tööluse käigus tekkivate jääkpingete väärtusi. Lõikesügavuse muutmine saadud mudeli põhjal tulemit ei mõjuta.

3.3 Katse 2 tulemused

Katse 2 käigus hinnati laupfreesiga, diameeter 63 mm, lõigatud detailide mõõtmistulemusi. Eksperimentaalse osa alguses otsustati löiketööluse läbiviimiseks kasutada samu parameetrite väärtusi nagu katse 1 puhul, sooviga võrrelda tööriistast tingitud erinevusi (Lisa 1). Tulenevalt freesi diameetri muutusele, arvutati uued ettenihke ning löikekiiruse väärtused. Selleks rakendati peatükis 3.2 väljatoodud valemeid 3.1 ja 3.2. Saadud tulemused esitati tabeli kujuna. Katse viidi läbi I & T Metall OÜ's.

Pink sätiti paika vastavalt peatükis 3.2 kirjeldatud seadistusele. Eksperimendi läbiviimiseks koostati programm, kus iga katse läbimise järel asetati uued löikeparameetrite väärtused (Lisa 2). Ettenähtud kohtadesse pandi arvutatud ettenihke ja löikekiirus ning muutmata kujul lõikesügavus.

Tabel 9. Jahutuse katseandmed koos arvatud pöörlemissageduse ja ettenihkega

Eksp. No	Eksp. Tähis	Jrk nr.	Incl	p/min	Lõikekiirus	Lõikesügavus	vf	Ettenihke hamba kohta
8	N8	1	Incl	758	200	3.0	379	0.35
10	N10	2	Incl	1011	175	2.0	960	0.25
3	N3	3	Incl	758	150	3.0	379	0.15
6	N6	4	Incl	1011	200	1.0	1415	0.35
2	N2	5	Incl	758	200	1.0	379	0.15
11	N11	6	Incl	1011	175	2.0	505	0.25
7	N7	7	Incl	758	150	3.0	1061	0.35
4	N4	8	Incl	1011	200	3.0	1415	0.15
9	N9	9	Incl	884	175	2.0	840	0.25
5	N5	10	Incl	884	150	1.0	1238	0.35
1	N1	11	Incl	884	150	1.0	840	0.15

Tabel 10. Öhu katseandmed koos arvatud pöörlemissageduse ja ettenihkega

Eksp. No	Eksp. Tähis	Jrk nr.	Incl	p/min	Lõikekiirus	Lõikesügavus	vf	Ettenihke hamba kohta
7	N7	1	Incl	796	125	2.5	891	0.28
8	N8	2	Incl	1082	170	2.5	1212	0.28
3	N3	3	Incl	796	125	2.5	318	0.1
1	N1	4	Incl	796	125	0.5	318	0.1
9	N9	5	Incl	939	147.5	1.5	714	0.19
10	N10	6	Incl	939	147.5	1.5	714	0.19
6	N6	7	Incl	1082	170	0.5	1212	0.28
5	N5	8	Incl	796	125	0.5	891	0.28
11	N11	9	Incl	939	147.5	1.5	714	0.19
4	N4	10	Incl	1082	170	2.5	433	0.1
2	N2	11	Incl	1082	170	0.5	433	0.1

Järgnevalt viidi läbi eksperimentaalne osa, mille käigus mõõdeti tekkinud lõikejõudusid ning pärast töötlust katsekehade pinnakaredust. Antud katse juures ei mõõdetud jääkpingeid, kuna projektis ei leitud täiendavaid vahendeid selle teostamiseks. Katsed viidi läbi keskkonnas, kus esimesel juhul kasutati jahutamiseks emulsiooni ning teisel suruõhku. Saadud tulemuste põhjal koostati näitajate mõju analüüs.

3.3.1 Lõikejõu mõju analüüs

Katset alustati lõikejõudude mõõtmisega. Kuna diameeter ning lõikeservade arv olid suuremad kui esimese katse juures, eeldati lõiketöötuse käigus lõikejõu suuruse vähenemist. Analüüsimiseks vajaminevad resultantjõu väärtused toodi allolevates tabelites 11 ja 12. Mõlema keskkonna parameetritest on puudu katsekeha 10 tulemused, sest samade parameetritega tehti juba kaks töötlust. Tulemuste analüüsimise käigus on seda arvesse võetud. Mudeli õigsuses mingeid erinevusi ei tekkinud kui arvestada katsetulemusteks 0 või jätta väli üldse tühjaks.

Tabel 11. Mõõdetud lõikejõudude väärtused suruõhuga lõigates

Exp no	Exp Tähis	Lõikekiirus	Lõikesügavus	Ettenihe hamba kohta	Jõud X	Jõud Y	Jõud Z	Jõud
7	N7	125	2.5	0.28	1465	220	11	1481
3	N3	125	2.5	0.1	703.4	212.5	103.8	742
1	N1	125	0.5	0.1	184.9	68.23	19.42	198
5	N5	125	0.5	0.28	332.9	67.53	7.54	340
9	N9	150	1.5	0.19	643.4	112.9	38.7	654
11	N11	150	1.5	0.19	709.3	140.6	39.06	724
8	N8	170	2.5	0.28	1438	186.1	15.41	1450
6	N6	170	0.5	0.28	256.8	59.01	13.4	264
4	N4	170	2.5	0.1	678.3	189.7	90.01	710
2	N2	170	0.5	0.1	134.7	48.73	13.63	144

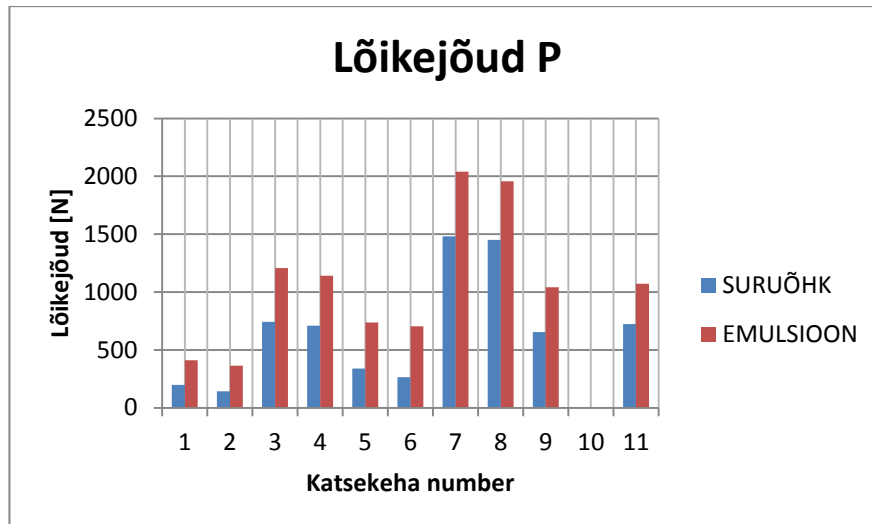
Tabel 12. Mõõdetud lõikejõudude väärtused emulsiooniga lõigates

Exp no	Exp Tähis	Lõikekiirus	Lõikesügavus	Ettenihe hamba kohta	Jõud X	Jõud Y	Jõud Z	Jõud
3	N3	150	3	0.15	1164	311.5	82.25	1208
7	N7	150	3	0.35	2027	231.2	46	2041
5	N5	150	1	0.35	729.3	107.8	14.14	737
1	N1	150	1	0.15	391	120.3	28.58	410
11	N11	175	2	0.25	1060	160.4	1.72	1072
9	N9	175	2	0.25	1026	180.1	7.22	1042
8	N8	200	3	0.35	1955	22.36	51.67	1956
6	N6	200	1	0.35	697.3	95.92	14.82	704
2	N2	200	1	0.15	343.3	116.9	20.03	363
4	N4	200	3	0.15	1104	271	86.21	1140

Jõukomponentide väärtused saadi kasutades programmi Dynoware, millel kuvatud graafikult võeti mõõtetulemuste keskmine. Valitud piirkond ei olnud määratletud ajalise konstandiga, seetõttu ei olnud graafiku peal võimalik märkida iga kord täpset intervalli, mistõttu võeti mõõt visuaalselt stabiilseima koha juurest. X – teljel on kuvatud katsekestvus ning y – teljel saadud resultantjõu komponentide väärtused.

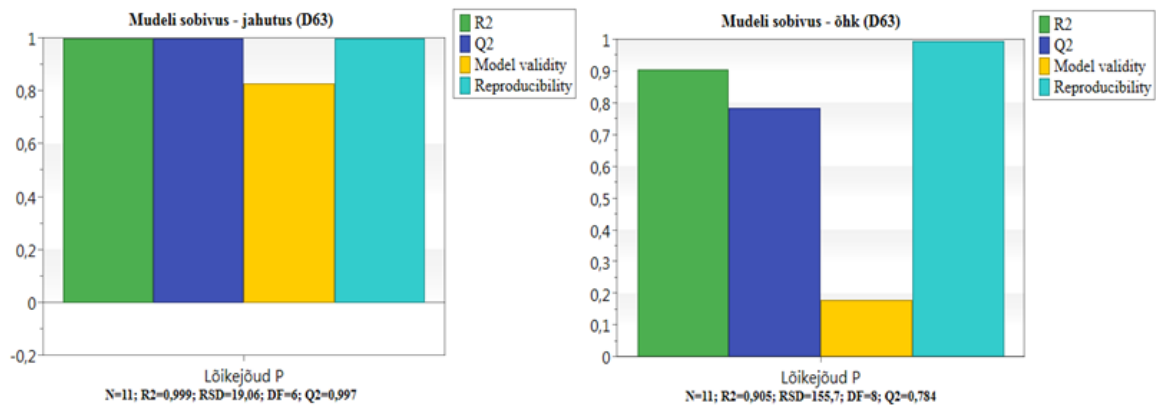
Saadud tulemusi võrreldi tooreetilise mudeliga, mis näitas eeldatavat katses kasutatud parameetrite mõju lõikejõu väärtusele. Seejärel analüüsiti mudeli ning tegelike katsetulemuste vahelisi seoseid.

Järgnevalt koostati graafik, kus toodi välja lõikejõudude väärtused lähtudes detaili jahutamise viisist (Joonis 38). Joonisel on näha, et emulsiooniga lõigates saadi lõikejõud suuremad. Keskmine lõikejõud emulsiooniga tuli 1067 N seevastu suruõhuga ainult 671 N. Kuna parameetrite väärtused olid jahutusvedelikuga lõikamisel kõrgemad, siis saadud tulemus on ootuspärane.



Joonis 38. Mõõdetud lõikejõud freesiga D63 lähtuvalt jahutuskeskkonnast

Selleks, et analüüsimise käigus oleks võimalik võrrelda mudeliga saadud tulemusi, tuli veenduda katsete kordaminekus. Vastavalt sellele koostati diagrammid, mis näitavad nelja parameetriga saadud tulemuste mõju mudelile lähtudes jahutuskeskkonnast (Joonis 39). Näitajate sobivuskaala on vahemikus 0 kuni 1. Tulpadena kuvatud parameetrite tähendused on toodud peatükis 3.2.1.

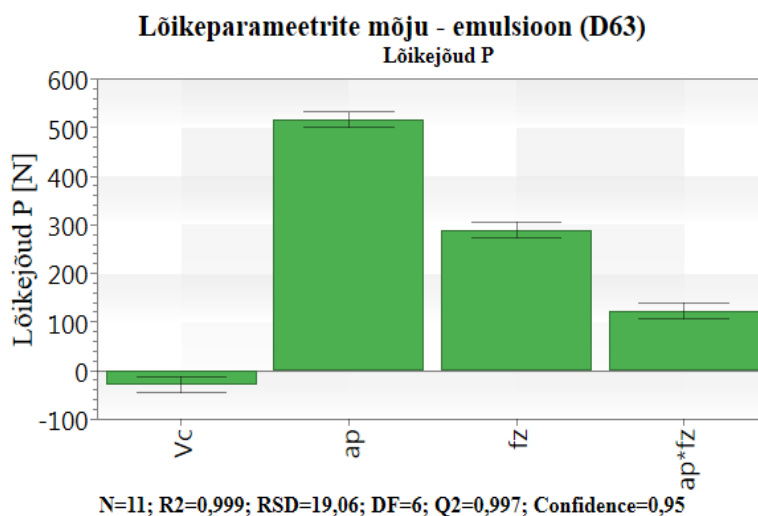


Joonis 39. Mudeli sobivus lähtuvalt saadud tulemustest

R2 minimaalne lubatud väärtus on 0,5. Vastavalt emulsiooniga tuli tulemiks 0,999 ning suruõhuga 0,905. Seega jäävad mõlemad lubatud piiridesse. Q2 ehk mudeli ennustuse täpsus loetakse õigeks kui tulem on suurem 0,1-st. Emulsiooniga saadi tulemuseks 0,997 ning suruõhuga 0.784. Nendest väärtustest on võimalik järeldada, et edasist pinnakareduse analüüsi saab teostada mõlemas keskkonnas.

Järgnevalt hinnati mudeli õigsust ning katseandmete korratavust. Emulsiooniga läbitud tulemustest saadi mudeli õigsus 0,828 ning katsete korratavus 1, vastukaaluks suruõhuga mudeli õigsus 0,178 ning katsete korratavus 0.994. Sellest on võimalik järeldada, et emulsiooniga tehtud katseosa on korda läinud ning suruõhuga mitte. Seega tehti edasine analüüs ainult emulsiooniga katseosale.

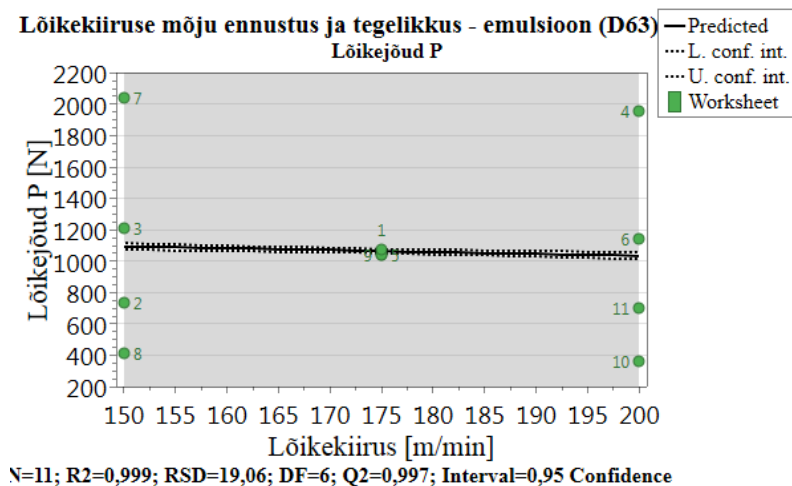
Et hinnata lõikejõu mõju materjali pinnale, koostati sõltuvusgraafik (Joonis 40). Selles toodi välja parameetrid, mis mõjutasid materjali lõikamise käigus saadud lõikejõude. Need väärtused, mis ei olnud olulised lõikejõu tulemuse saamisel, eemaldati graafikult. Kuna R2 ja Q2 saadi ligilähedased maksimaalsele väärtusele, eeldati vajadust keerukama mudel järgi. Seetõttu on lisatud graafikule kahe teguri korrutis. Vastavalt sellele järeldati lõikesügavuse ning ettenihke ulatuslikku mõju pinnakaredusele. Kuna lõikekiiruse tegur on suurem kui $y=0$ ning mõõtemääramatus ei ületa $y=0$, siis on ka lõikekiirus loetud mõjutavaks teguriks, kuigi selle mõju on oluliselt väiksem kui lõikesügavusel või ettenihkel.



Joonis 40. Lõikeparameetrite mõju detaili lõikamisel saadud lõikejõule

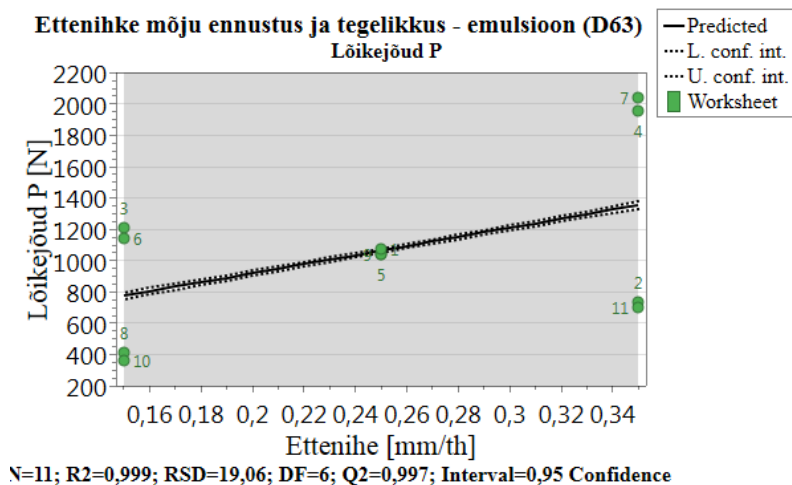
Lähtuvalt sõltuvusgraafikust koostati kolm hajuvusdiagrammi kuna graafikul oli toodud kõigi kolme lõiketõõtluseks vajamineva näitaja mõju. Seetõttu on alljärgnevalt toodud iga parameetri otsese mõju analüüs. Mudeli ja saadud tulemuste vaheline mõõtetäpsus on 100 %.

Mudeli põhjal prognoositi lõikekiiruse suurenedes lõikejõu vähenemine (Joonis 41). Seda kinnitab ka saadud tulemused, mistõttu võib hinnata lõikekiiruse mõju lõikejõule minimaalseks.



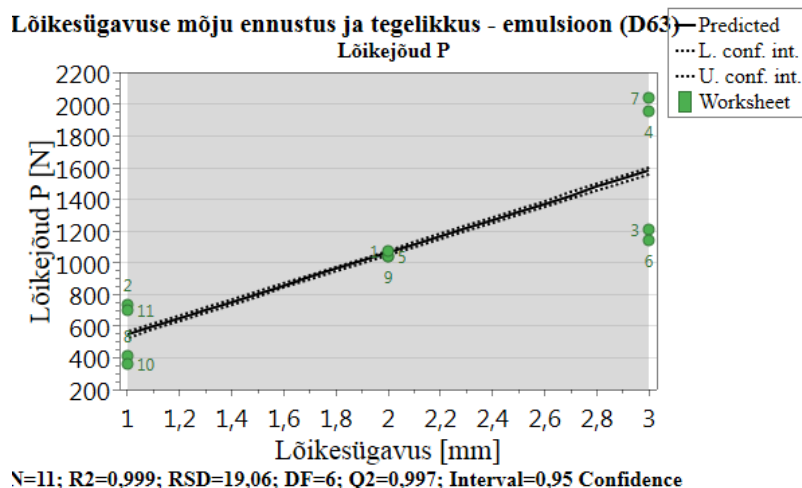
Joonis 41. Lõikekiiruse ennustatav ja tegelik mõju lõikejõule

Järgnevalt uuriti ettenihke mõju ulatust lõikejõu kujunemisel (Joonis 42). Mudeli põhjal oodati ettenihke suurendes ka lõikejõu kasvumist. Täpselt seda sama on kinnitatud katsetulemustega.



Joonis 42. Ettenihke ennustatav ja tegelik mõju lõikejõule

Sõltuvusgraafikult on näha, et lõikesügavus mõjutas lõikejõu suuresti (Joonis 43). Hajuvusdiagrammil on toodud selle parameetri mõju mastaap. Seega mõõtmistulemused näitasid, et mida paksem on lõikesügavus, seda suurem tuli lõikejõu väärtus. Seejuures toimus kasv hüppeliselt sügavuse kasvades kahe mm pealt 3 mm peale.



Joonis 43. Lõikesügavuse ennustatav ja tegelik mõju lõikejõule

Analüüsidest saadud tulemusi saab järeldada mudeli ning tulemuste vahelised seoseid tõetruuks. Lõikejõudu mõjutab enim lõikesügavuse muutmine. Natuke vähem mõjutab ettenihke väärtus. Mõlemal juhul oli märgata tendentsi, et kasvatades parameetrite väärtusi tõusis ka lõikejõud suureks. Lõikekiiruse mõju oli olemas, kuid mudeli põhjal on see peaaegu olematu. Antud tulemuste mõõtetäpsus oli 100%. Kuigi saadud väärtuste kvaliteeti hinnati ideaalseks, siis see seda ei olnud. Niivõrd heade tulemuste saamine tähendab seda, et saavutati perfektne töökeskkond. Samas saab see tähendada lisaks, et teostatud sai liiga vähe katseid selge hinnangu andmiseks.

3.3.2 Pinnakareduse mõju analüüs

Pinnakaredus on oluline pinnakvaliteeti kirjeldav omadus ning seetõttu uuriti selle mõju ulatust. Katsekehadele teostati pärast lõiketöötluse lõppu pinnakaredus mõõtmine, mille tööprotsessi kirjeldus toodi peatükis 3.2.2. Mõõdetud tulemused koondati ning jagati vastavalt jahutuskeskkonnale (Tabel 12, 13). Pärast saadud tulemusi teostati pinnakareduse analüüs. Esimesena koostati joonis, kus on toodud mõõtetulemused lähtuvalt detaili jahutamise viisist.

Tabel 13. Mõõdetud Ra väärtused emulsiooniga freesides

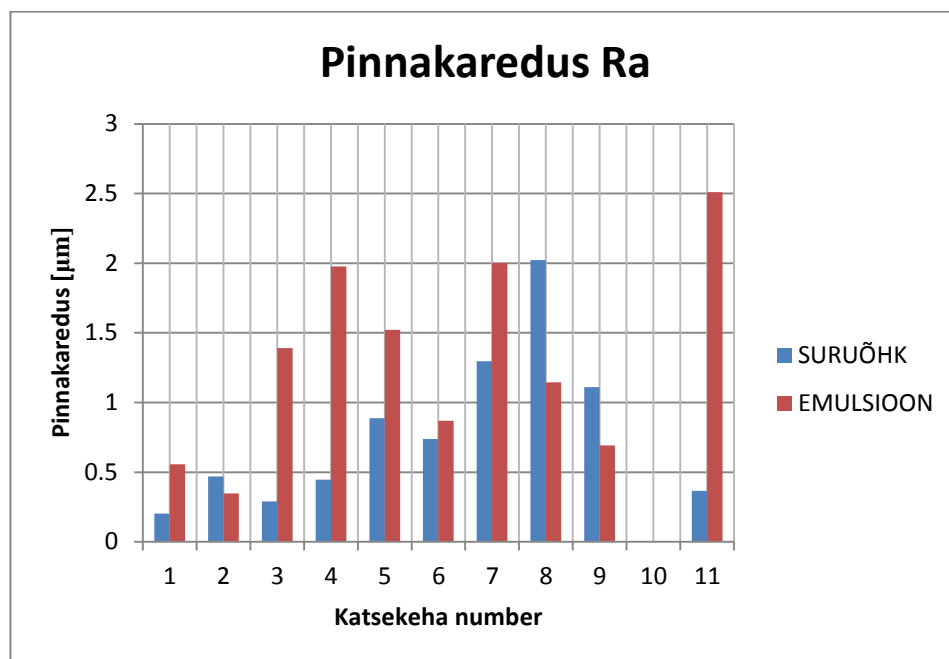
Jrk nr.	Tähistus	Ra pinnakaredus [µm]
1	0111	0.556
2	0112	0.348
3	0113	1.391
4	0114	1.976
5	0115	1.522
6	0116	0.870
7	0117	2.001
8	0118	1.145
9	0119	0.692
11	01111	2.510

Tabel 14. Mõõdetud Ra väärtused suruõhuga freesides

Jrk nr.	Tähistus	Ra pinnakaredus [µm]
1	1111	0.203
2	1112	0.469
3	1113	0.290
4	1114	0.446
5	1115	0.888
6	1116	0.737
7	1117	1.296
8	1118	2.022
9	1119	1.111
11	11111	0.365

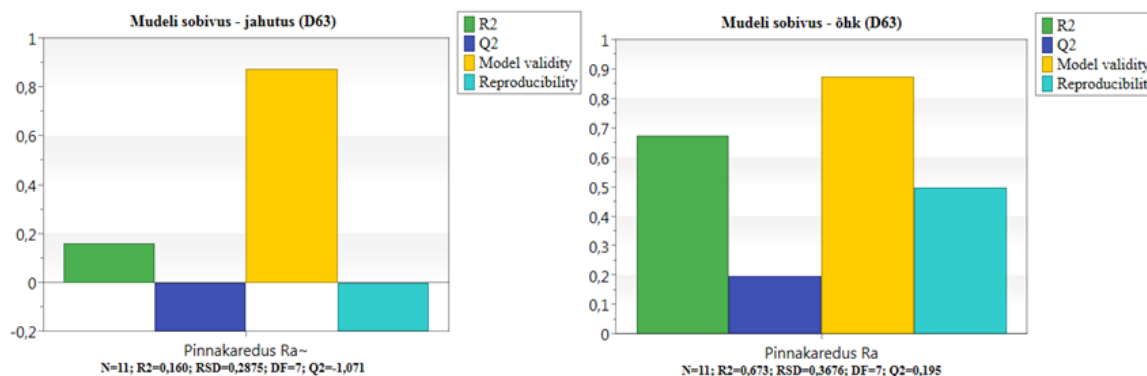
Tabelite järgi koostati graafik, kus toodi võrdlusena katsekehade pinnakareduse mõõtmistulemused liigitatuna jahutamise tüübist (Joonis 44). Keskmiseks pinnakareduseks saadi emulsiooniga lõigates 1,301 µm ning suruõhuga 0,712 µm. Seega lõigati jahutusvedelikuga detailide pinna kvaliteet halvem. See võib olla tingitud

karmidest lõikeparameetri väärtustest. Selle välja selgitamiseks teostati põhjalikum pinnakareduse analüüs.



Joonis 44. Saadud keskmine pinnakaredus freesiga D63 lähtuvalt jahutamiskiirusest

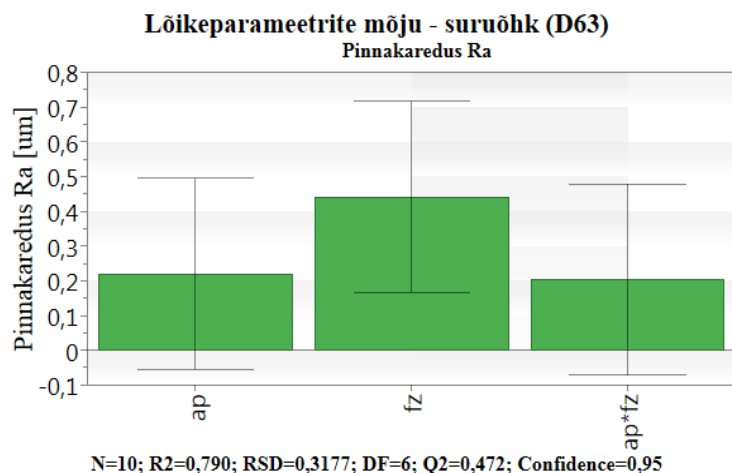
Järgnevalt koostati mudeli sobivuse hinnang (Joonis 45). Ühel juhul on antud hinnang mõõtmistulemustele emulsiooniga lõigatud keskkonnas, teisel juhul suruõhuga. Tuldade kirjeldused ning väärtused on toodud peatükis 3.2.1.



Joonis 45. Mudeli sobivus lähtuvalt katsetulemustest

Joonisel kuvatud R2 väärtused saadi emulsiooniga lõigates 0,160 ning suruõhuga 0,673. Q2 ehk mudeli ennustuse täpsus see-eest vastavalt jahutusvedelikuga lõigates -1,071 ning suruõhuga 0,195. Kahe näitaja tulemustele tuginedes ei saanud edasist analüüsi teostada jahutusvedelikuga lõigates saadud tulemustele.

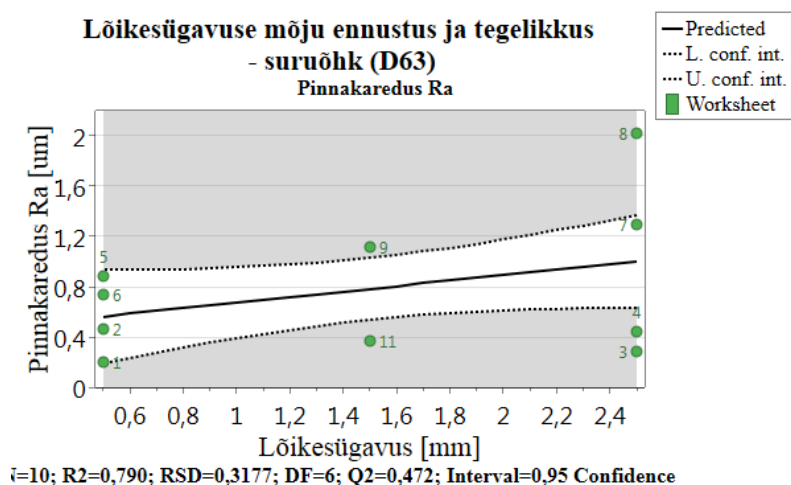
Järgnevalt saadi mudeli õigsuse hinnang emulsiooniga 0,914 ning katsete korratavus üle 0,5. Sellest võib järeldada, et jahutusega tehtud katseosa on korda läinud ning saadud tulemuste järeldused on arvestatavad.



Joonis 46. Lõikeparameetrite mõju detaili pinnakaredusele

Järgnevalt uuriti suruõhuga lõigatud detailide lõikamisel kasutatud lõikeparameetrite ja pinnakareduse omavahelist seost (Joonis 46). Gaafikule kuvati lõikesügavus ning ettenihe, millest ettenihke tulemust ei saa arvestada, kuna tegur on küll suurem kui $y=0$ kuid mõõtemääramatus ületab $y=0$. Vastavalt sellele saab järeldada, et antud katse puhul kujunes pinnakaredus ainult lõikesügavuse põhjal.

Tulemuste põhjal koostati lähtuvalt lõikesügavusest hajuvusdiagramm pinnakaredusele (Joonis 47). Sellest on võimalik järeldada, et pinnakaredus halvenes kui lõikesügavus kasvas. Mõõtetäpsus saadi 20%, mis olulise mudeli puhul võib arvestatavaks lugeda.



Joonis 47. Lõikekiiruse mõju detaili pinnakaredusele

Pinnakareduse tulemusi oli võimalik analüüsida ainult suruõhuga läbitud katseosas, kuna mudeli sobivuse hindamisel leiti, et saadud kontrollväärtused olid lubatust väiksemad. Kuigi suurõhuga saadud näitajad ei olnud ka kõrged, olid need piisavad edasiseks käsitlemiseks. Sõltuvusgraafikul ilmnes, et pinnakaredust teise katse puhul mõjutas lõikesügavuse muutmine. Teised lõikeparameetrid mõju ei avaldanud. Seetõttu ei ole eraldi hinnatud nende individuaalset mõju.

3.4 Katsete võrdlus

Töödeldud materjali pinna kvaliteedi hindamisel tuli lähtuda kolmest otsitavast väärtusest: pinnakaredus, lõikejõud ning jääkpinged. Töötlusviisiks oli freesimine. Vastavalt sellele teostati kaks katset, mille erinevusteks olid kasutatav tööriist, töökeskus ja jahutuskeskkond töötamise hetkel. Ülejäänud muutujad jäid samaks. Järgnevalt on teostatud kahe katse tulemuse analüüsi võrdlus hindamaks pinnakvaliteedi näitajate olulisust pinge- ja mikropragude tekkele (Tabel 15).

Tabel 15. Katsete tulemused vastavalt muutujatele

	Pinnakvaliteeti kirjeldav omadus	Mõjutav parameeter	Jahutus
Katse 1	Lõikejõud	Lõikesügavus	emulsioon
		Ettenihe	
Katse 2	Lõikejõud	Lõikesügavus	emulsioon
		Ettenihe	
		Lõikekiirus	
Katse 1	Pinnakaredus	Lõikekiirus	emulsioon
Katse 2	Pinnakaredus	Ettenihe	
Katse 1	Jääkpinged	Ettenihe	emulsioon
		Lõikekiirus	

Mõlema katse analüüsist selgus, et suruõhuga tehtud katseosad ei ole hinnangu andmiseks õnnestunud, aga emulsiooniga lõigates on. Seetõttu anti hinnang ainult jahutusvedelikuga saadud tulemustele.

Analüüsisist selgus, et mõlema katse puhul lõikesügavuse suurendes lõikejõud kasvasid. Pinnakaredust muutis halvemaks ja kasvatas jääkpingeid ettenike tõstmine. Pinna kvaliteeti seejuures näitasid ainult pinnakaredus ning jääkpinged. Samas lõikejõud oli otseselt seotud materjali deformatsiooniga töötuse hetkel, mida omakorda hinnati jääkpingete abil. Seega saab väita, et freesimisel mõjutas pinnakvaliteeti kõige rohkem ettenihke, seejärel lõikesügavuse ning alles siis lõikekiiruse muutumine. Enamasti ei mõjuta materjali kvaliteeti ainult üks, vaid mitu parameetrit. Seejuures lõppeb kahe või enama näitaja koosmõju enamasti detaili pinna kahjustamisega ehk tekivad mikromõrad. Lisaks salvestub nendesse töötuse käigus tekkinud jääkpinged. Jääkpingete suurus aga sõltub töötusviisist ning õigesti valitud režiimidest.

Esimese katse analüüsis oli võimalik selgemini eristada erinevate lõikeparameetrite mõju. Teise katse puhul see nii ei olnud. See oli tingitud freesi diameetrist, kuna suurema freesiga hajusid pinged kogu pinna peale paremini ning korraga töötas minimaalselt kaks lõikeserva. Seetõttu ei eristunud näitajate mõju selgesti. Lisaks väljendus see selles, et enamuse teise katse tulemusi ei olnud analüüsitavad.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida freesimise mõju materjali pinnale AISI 316L näitel. Selleks koostati katsemoodika, mille käigus selgitati lõikeparameetrite ning materjali pinnakvaliteedi näitajate vahelisi seoseid. Katsed teostati kasutades erineva suurusega laupfreese, kuid seejures jättes lõiketerad samaks. Toorikute mõõtmed ning töökeskkonnale seatud tingimused jäid mõlemal juhul ühesuguseks. Saadud andmete analüüs teostati programmi Modde Pro abil, kus võrreldi mudeli järgi ennustatud tulemusi tegelikult saadud väärtustega. Tehtud katsete tulemused näitasid, et enamasti mõjutas freesimisel pinnaomadusi ettenihke, seejärel lõikesügavuse muutmine. Kõige vähem avaldas mõju lõikekiirus, mis kajastatud ainult esimese katse pinnakareduse ja jääkpingete ning teise katse lõikejõu analüüsis. Kuigi uurimustöös kasutati materjali AISI 316L, siis saadud järeldused kehtivad kõigi rootevaba teraste töötlemisel freesimise teel.

Lõikejõu mõju analüüsist selgus, et selle suurst mõjutas ennekõike lõikesügavuse ning alles siis ettenihke muutmine. Teises katses tuli välja, et vähesel määral muudab ka lõikekiirus lõikejõudu. Seda oli võimalik seletada jõudude hajumisega materjali pinnal, kus lõiketöötuse hetkel tegi korraga tööd kaks lõikeserva samas kui esimeses katses töötas üks.

Materjali pinnakaredust mõjutas enamjaolt ettenihke. Mõlema katse tulemustest oli näha lõikeparameetri väärtuse kasvades pinnakareduse halvenemist. Kõige halvema pinnakaredusega katsekehad olid teise katse detailidel, kus kasutati jahutamiseks ja laastu eemaldamiseks emulsiooni. See-eest parim pinnakvaliteet saavutati esimesel katsel, kus kasutati suruõhku.

Jääkpingeid analüüsiti ainult esimese katse puhul. Selle tulemusena saadi teada, et jääkpingeid leidub peamiselt materjali pindmise kihis. Mida sügavamale materjali sisse mindi, seda vähem oli märgata selle mõju. Keskmise väärtus emulsiooniga lõigates tuli 454 MPa, mida mõjutas ettenihke ja lõikekiiruse muutmine. Kui suurendati ettenihet suurenes ka jääkpinge, seevastu lõikekiiruse kasvades väärtus hoopis vähenes. Lisaks mõõdeti neljal detailil jääkpingete profiili, mis näitasid kui sügavale ja kui tugevasti

jääpinged materjalis kandusid. Selle tulemusena oli näha, et tehtud katsed olid vähesel määral materjali pinda deformeerinud.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. World statistics of nuclear power. Nuclear energy institute. [WWW]
<https://www.nei.org/Knowledge-Center/Nuclear-Statistics/World-Statistics> (05.04.2017).
2. What is nuclear power. National Nuclear Regulator. [WWW] <http://www.nnr.co.za/what-is-nuclear-energy> (05.04.2017).
3. Field, M., Kahles, J.F., Koster, W.P.,(1970). Surface Finish and Surface Integrity. – *ASM Handbook*. Vol 16, Machining, pp. 43-84.
4. Abboud, E.,Attia, H., Shi, B., Damir, A., Thomson, V., Mebrahtu, Y., (2016). Residual Stresses and Surface Integrity of Ti-alloys During Finish Turning – Guidelines for Compressive Residual Stresses – *Procedia CIRP*. Vol. 45, pp. 55-58.
5. Leida pilt üles netist
6. Residual stress. Residual stress. [WWW]
<http://www.residualstress.org/media/residual%20stress.pdf> (10.05.2017)
7. Maranhão, C., Davim, J. P. (2012). Residual stresses in machining using fem analysis – A review. - *Reviews on advanced materials science*. 30, pp. 267-272.
8. Stress corrosion cracking. NACE International. [WWW] [https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Stress-Corrosion-Cracking-\(SCC\)/](https://www.nace.org/Corrosion-Central/Corrosion-101/Stress-Corrosion-Cracking-(SCC)/) (10.05.2017)
9. Dietzel, W., Turnbull, A.(2007). Stress corrosion cracking. – *Comprehensive structural integrity*. pp. 43-74.
10. Tood, A., Busby, J., Meyer, M., Petti, D., (2010). Materials challenges for nuclear systems. – *Materialstoday*. Vol. 13, issue 12, pp. 14-23.
11. Quick guide to surface roughness measurement. Reference guide for laboratory and workshop. Bulletin No. 2229, SURFACE ROUGHNESS 6. [WWW]
http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf (1.06.2017)
12. Freesimine – protsessi kirjeldus
13. Alauddin, MU., Mazid, M. A., El Barandi, M. A., Hashmi, M. s. J. (1998). Cutting forces in the end milling of Inconel 718. – *Journal of Materials Processing Technology*. No. 77, pp. 153-159.
14. Yangui, H., Zghal, B., Kessentini, A., Chevallier, G., Rivière, A., Haddar, M., Karra, C. (2010). Influence of cutting and geometrical parameters on the cutting force in milling. – *Scientific Research*. Vol. 2, No.10, pp. 751-761.
15. Specification sheet: Alloy 316/316L. Sandmeyer steel company. [WWW]
<https://www.sandmeyersteel.com/images/316-316l-317l-spec-sheet.pdf> (19.04.2017)

16. Materjalid. (2001). Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus. /Toim. Kulu, P., Kübarsepp, J., Hendre, E., Metusala, T., Tapupere, O. 87 lk.
17. Special steels and superalloys for the nuclear industry. Aubert & Duval. [WWW] http://www.aubertduval.com/fileadmin/user_upload/pdf_gb/105419_Plaquette_NUCLEAR_GB_dec2009.pdf (19.04.2017)
18. User Guide to MODDE (2015). MKS Umetrics AB. Ver. 11, pp. 372.
19. Sandvik Coromant.(2015). Rotating tools. Face milling tools, pp. J43-J96, O100-O113.
20. Haas MM Series. The mini mill & super mini mill. Datasheet. [WWW] https://www.haascnc.com/DOCLIB/datasheets/DS_MMseries_US.pdf (10.05.2017)
21. Blasocat 2000 Universal. Blaser Swisslube Inc. [WWW] http://www.cuttingfluids.com.mx/es/wp-content/uploads/2014/09/Blasocut_2000_Universal.pdf (14.05.2017)
22. Multicomponent dynamometer, -5 ... 10kN, Top Plate 100x170 mm, Type 9257B. Kistler. [WWW] <https://www.kistler.com/?type=669&fid=51226> (18.04.2017)
23. Lõikejõudude mõõteseadme Kistler 9257B rakendamise EMÜ Tehnikainstituudi APJ tööpinkidel. T. Kasepuu, diplomitöö. Tartu 2015.
24. Makro-Grip 5-Axis Vise 77. LANG Technovation. [WWW] <http://www.lang-technovation.com/en/products/5-axis-vise-77.html> (18.04.2017)
25. Multichannel charge amplifier for multikomponent force measurement, Type 5070A. Kistler. [WWW] <https://www.kistler.com/?type=669&fid=55772> (18.04.2017)
26. DynoWare, Windows software for data acquisition and evaluation, Type 2825A1-2. Kistler. [WWW] <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/rozvoj/Kistler-CNC-DynoWare-Data-Processing-En.pdf> (18.04.2017)
27. Vishay precision group (2010). Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling* Strain gage method. – *Micro – measurements*. Tech Note TN-503, pp. 19-33.
28. Rigaku Corporation. (2016). Introduction to X-ray analysis using the diffraction method. – *Rigaku Journal*. 32 (2), pp. 35-43.
29. X-ray diffraction. Stresstech group. [WWW] <http://www.stresstech.com/en-fi/products/x-ray-diffraction-equipment/x-ray-diffraction/> (13.05.2017)
30. Mitutoyo. Portable surface roughness tester, SurfTest SJ-210 series. *Mitutoyo*. Catalog No. E4388-178. 12 pp.
31. Two-level full factorial designs. [WWW] <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3331.htm> (06.06.2017)

32. Xtress3000. Stresstech group.[WWW]

<http://ast.stresstechgroup.com/content/en/1034/74659/Xstress%203000%20G2%20G2R.html> (15.05.2017)

SUMMARY

The aim of the research was to investigate the effect of milling upon material surface integrity based on AISI 316L. The method of the experiment was developed to explain various relations between cutting parameters and material surface integrity. Experiment were carried out by using different face mills but in either case same inserts. In both trials there were same specimen dimensions and working conditions. Data analysis was made with Modde Pro program where predicted results were compared with received values. Given results showed that mainly cutting feed effect surface integrity in milling. The other parameter that influenced surface integrity was cutting depth. The least impact gave cutting speed value which was only reflected in the results of first experiment surface roughness and residual stresses and also in the second test cutting speed analysis. Though the used material in the study was AISI 316L all findings are valid in different types of stainless steel.

In the analysis the effect of cutting force revealed that the change in the value was first and foremost influenced by change in cutting depth and after that came influence of the cutting feed. In the second trial there was clarified that in small extent cutting force changes also cutting force value. This was explained by the force dispersion on the surface of the material when during milling at the second run worked two cutting edges simultaneously and in first run only one cutting edge did the same work.

Material surface roughness was mainly influenced by cutting feed. In the analysis of both trials there were shown that the degradation in surface roughness value was increased with magnifying cutting depth. The worst surface roughness was in the second test where coolant was used. The best surface quality was achieved in the first test where compressed air was used.

Residual stress analysis were carried out only in first test. As a result there were discovered that the residual stresses are mainly found in material surface layer. Therefore measuring deeper effect fade away. When analysing results using coolant the average value of residual stress were 454 MPa. Which was influenced by the change in cutting feed and cutting speed. When increasing cutting feed also the value of the residual stress

rise but with cutting speed the effect were contrary. In addition the residual stress depth profile was measured on four samples. As a result there were discovered that by milling the samples the material surface was slightly deformed causing residual stresses to lock into material.

LISAD

Lisa 1. Freeside katseandmed

D32/D63 - Õhk

exp no	exp name	Run order	Incl/Excl	p/min	Cutting speed	Cutting depth	vf	Feed pr tooth	Ra Roughness 1	Sq roughness 1	Residual stress	Cutting force
1	N1	4	Incl	1243	125	0.5	373	0.1				
2	N2	11	Incl	1691	170	0.5	507	0.1				
3	N3	3	Incl	1243	125	2.5	373	0.1				
4	N4	10	Incl	1691	170	2.5	507	0.1				
5	N5	8	Incl	1243	125	0.5	1044	0.28				
6	N6	7	Incl	1691	170	0.5	1420	0.28				
7	N7	1	Incl	1243	125	2.5	1044	0.28				
8	N8	2	Incl	1691	170	2.5	1420	0.28				
9	N9	5	Incl	1467	147.5	1.5	836	0.19				
10	N10	6	Incl	1467	147.5	1.5	836	0.19				
11	N11	9	Incl	1467	147.5	1.5	836	0.19				

D32/D63 - Jahutus

exp no	exp name	Run order	Incl/Excl	p/min	Cutting speed	Cutting depth	vf	Feed pr tooth	Ra Roughness 1	Sq roughness 1	Residual stress (auk)	Cutting force
1	N1	11	Incl	1492	150	1.0	671	0.15				
2	N2	5	Incl	1989	200	1.0	895	0.15				
3	N3	3	Incl	1492	150	3.0	671	0.15				
4	N4	8	Incl	1989	200	3.0	895	0.15				
5	N5	10	Incl	5305	150	1.0	5570	0.35				
6	N6	4	Incl	1989	200	1.0	2089	0.35				
7	N7	7	Incl	1492	150	3.0	1567	0.35				
8	N8	1	Incl	1989	200	3.0	2089	0.35				
9	N9	9	Incl	1741	175	2.0	1306	0.25				
10	N10	2	Incl	1741	175	2.0	1306	0.25				
11	N11	6	Incl	1741	175	2.0	1306	0.25				

Lisa 2. Freesimise programm

```
000015 (ROOSTEVABA FREES D32 KATSE)
(XOY0 KESKEL)
(TOORIK 50 X 50 X 20)
()
T1 M06 (SANDVIK LAUPFREES D32)
G00 G90 G54
X50. Y-1. S1492 M03 (PQQRLEMISSEDUS)
M08
G43 H01 D01 Z2.
G01 Z-1. F1567.
G01 X43.
G02 X25. Y-19. R18.
G01 X-25.
G02 X-43. Y-1. R18.
G01 X-45.
G00 Z5.
X50. Y21.
G01 Z-1. (LQIKESYGAVUS)
X43.
G02 X25. Y3. R18.
G01 X-25.
G02 X-43. Y21. R18.
G01 X-45.
G00 Z5.
G28 G91 Y0 Z0
M30
%
```

Laupfreesiga D32 kasutatud programm

```
000016 (ROOSTEVABA FREES D63 KATSE)
(XOY0 KESKEL)
(TOORIK 50 X 50 X 20)
()
T1 M06 (SANDVIK LAUPFREES D63)
G00 G90 G54
X70. Y19. S632 M03 (PQQRLEMISSEDUS)
M08
G43 H01 D01 Z2.
G01 Z-5.5 F316. (LQIKESYGAVUS JA ETTENIHE)
G01 X59.
G02 X25. Y-12.5 R34.
G01 X-65.
G00 Z5.
G28 G91 Y0 Z0
M30
```

Laupfreesiga D63 kasutatud programm

Lisa 3. Jääkpingete mõõtetulemused

RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS ON AISI316 SAMPLES

MEASUREMENT REPORT: MO00173

**END CUSTOMER: 11829 ESTONIAN UNIVERSITY OF
LIFE SCIENCE (TARTU), ESTONIA**

ABSTRACT

Residual stress measurements were made on 17 samples and residual stress profiles on 4 samples.

Measurements were done using XSTRESS3000 diffractometer made by Stresstech Oy. Material removal was done by electropolishing and depth was measured using a dial indicator.



Author Henri Larjosuo

Application Engineer



Auditor Mikko Palosaari

R&D Scientist

1 MEASUREMENT SPECIFICATIONS

Customer	11829 Estonian University of Life Science (Tartu), Estonia	
Customer Address	Kreutzwaldi 5 - 1C8	
ID	Project MSP1485, SID0309 Customer sample, order MO00173	
Date	2016-03-01	
Contact person	Manager Sales and Marketing	Janne Suoknuuti
Author	Application Engineer	Henri Larjosuo
Auditor	R&D Scientist	Mikko Palosaari

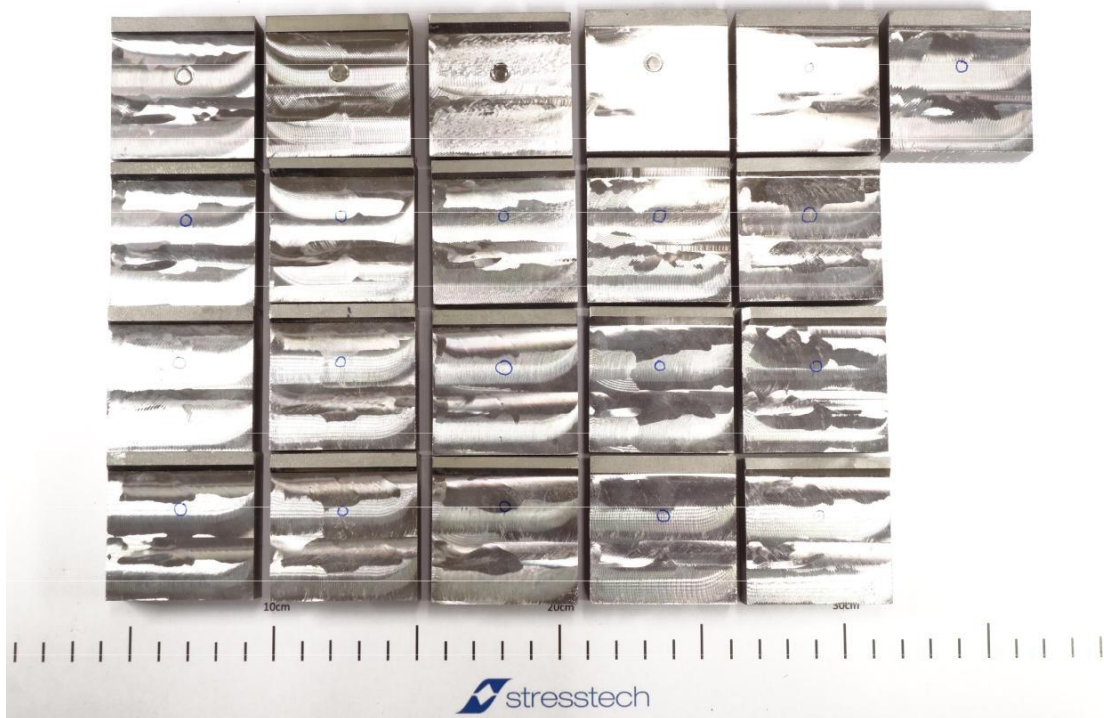


Fig. 1. The measured samples.

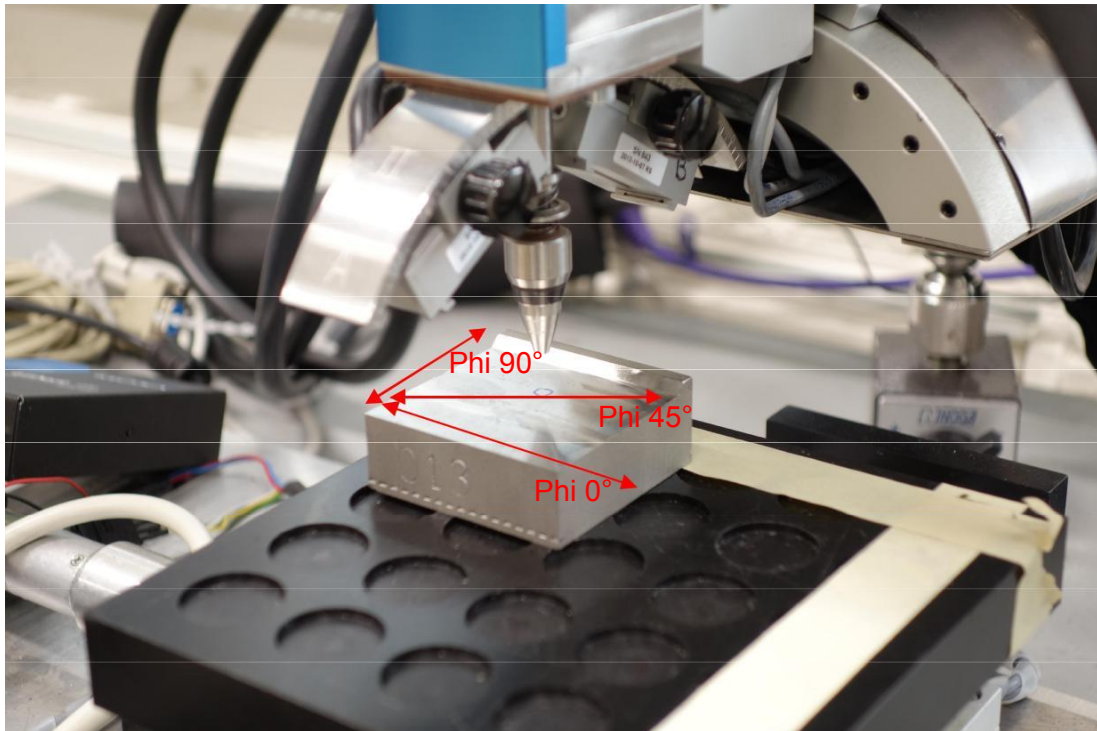


Fig. 2. The measurement setup and the measurement directions.

The samples were received in good condition. The samples were labeled by the customer, and those were used to identify the samples. Also the measurement points were marked by the customer. Four of the samples were electropolished to measure a residual stress profile of the samples.

Measurement parameters are listed in Appendix 1.

2 RESULTS

The residual stress results for the surface measurements are plotted in Fig. 3 and the FWHM values are plotted in Fig. 4. FWHM value illustrates microstresses and/ or hardness and plastic deformation; typically values increases with increasing hardness. The results are also tabulated in Table 1.

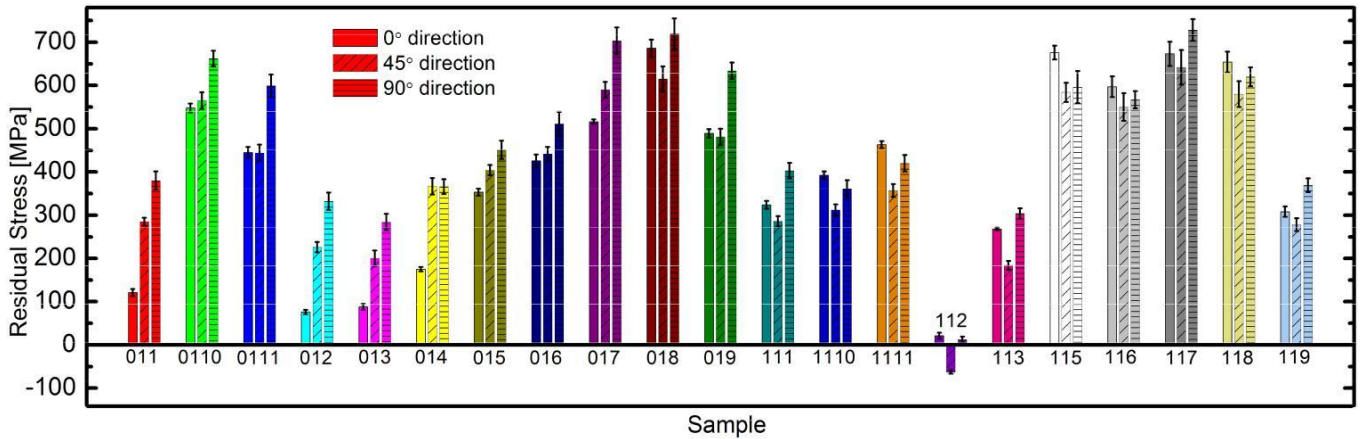


Fig. 3. Surface residual stress measurement results. Each sample has their own labelling on the x-axis and a specific color. The zero direction bar is without stripes, the 45 degree direction is with diagonal stripes and the 90 degree direction is with vertical stripes.

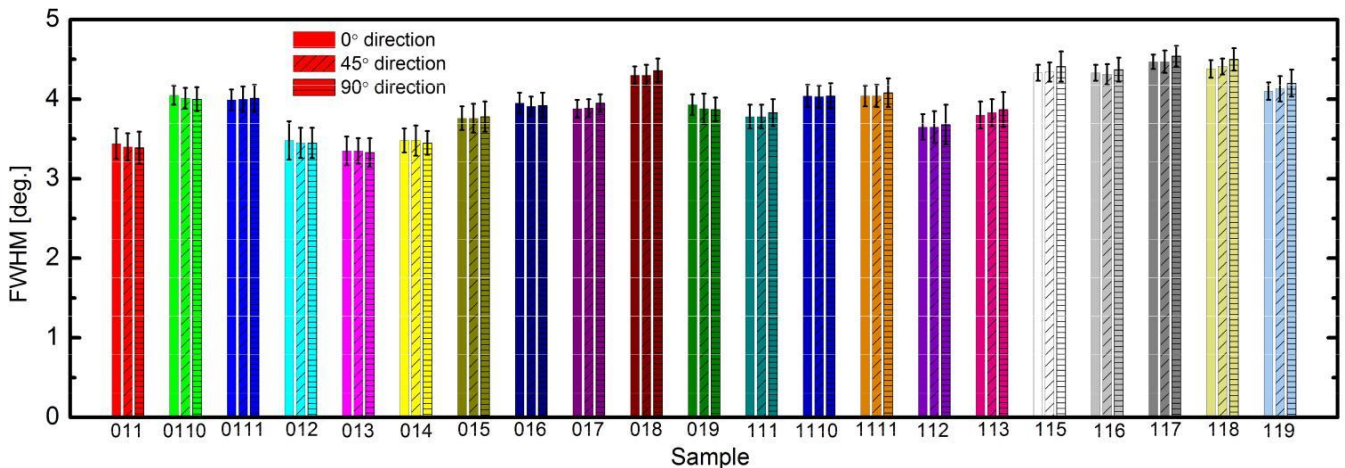


Fig. 4. FWHM values of all of the samples and directions for the surface measurements. Labelling similarly as in Fig. 3.

Table 1. Surface residual stress measurement results.

Sample	Stress phi=0°		Stress phi=45°		Stress phi=90°		FWHM phi=0°		FWHM phi=45°		FWHM phi=90°	
	MPa	±MPa	MPa	±MPa	MPa	±MPa	°	±°	°	±°	°	±°
011	121	8	285	9	380	21	3.44	0.19	3.40	0.17	3.39	0.20
0110	548	10	565	19	662	18	4.05	0.12	4.01	0.13	4.00	0.15
0111	445	13	444	19	599	26	3.99	0.13	4.00	0.16	4.01	0.17
012	76	5	226	12	332	20	3.48	0.24	3.45	0.19	3.45	0.19
013	88	7	200	18	284	19	3.35	0.18	3.35	0.16	3.33	0.18
014	175	5	367	19	366	17	3.48	0.15	3.48	0.19	3.45	0.15
015	353	8	404	12	451	21	3.76	0.15	3.76	0.18	3.78	0.19
016	426	14	442	16	511	28	3.95	0.13	3.91	0.12	3.92	0.16
017	516	5	590	18	703	31	3.88	0.11	3.89	0.11	3.95	0.11
018	686	20	615	29	719	36	4.30	0.11	4.30	0.13	4.36	0.15
019	489	10	481	19	634	19	3.93	0.13	3.88	0.19	3.87	0.15
111	324	9	286	12	403	18	3.78	0.15	3.78	0.15	3.83	0.17
1110	392	9	312	13	361	20	4.04	0.14	4.03	0.14	4.04	0.16
1111	463	8	357	15	420	19	4.04	0.13	4.04	0.14	4.08	0.18
112	21	7	-63	4	12	7	3.65	0.16	3.65	0.20	3.68	0.25
113	268	3	184	10	304	12	3.80	0.17	3.83	0.17	3.87	0.22
115	676	16	584	22	596	37	4.33	0.10	4.34	0.12	4.41	0.19
116	597	24	550	32	567	20	4.33	0.10	4.31	0.13	4.37	0.15
117	673	28	642	40	728	25	4.47	0.09	4.47	0.14	4.54	0.13
118	654	24	580	30	620	22	4.38	0.11	4.41	0.10	4.50	0.14
119	308	12	278	15	369	16	4.10	0.11	4.13	0.16	4.20	0.17

For four of the samples (012, 015, 111 and 118) a residual stress depth profile was measured. Material removal was done by electropolishing and depth was measured using a dial indicator. The residual stress and FWHM values are plotted in Fig. 5 - Fig. 8 and also tabulated in Table 2 - Table 5.

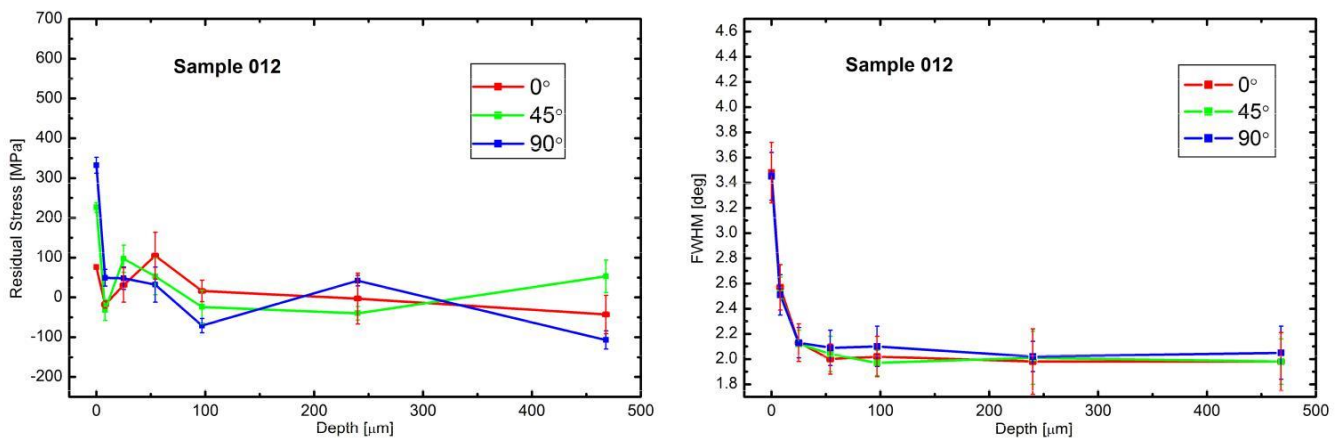


Fig. 5. Residual stress and FWHM depth profile for sample 012.

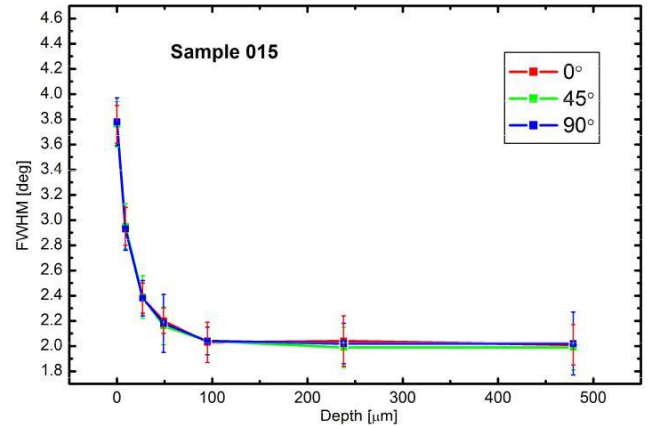
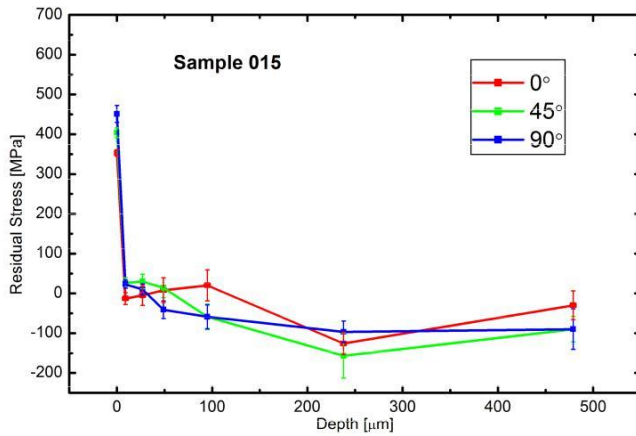


Fig. 6. Residual stress and FWHM depth profile for sample 015.

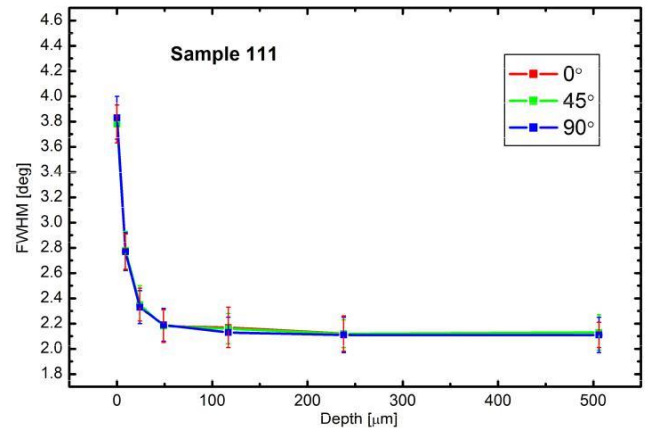
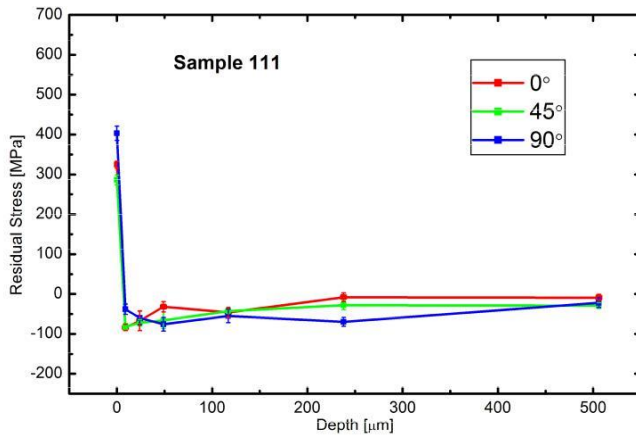


Fig. 7. Residual stress and FWHM depth profile for sample 011.

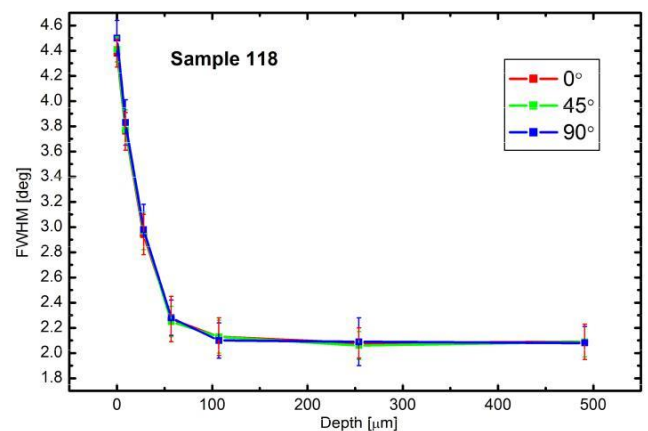
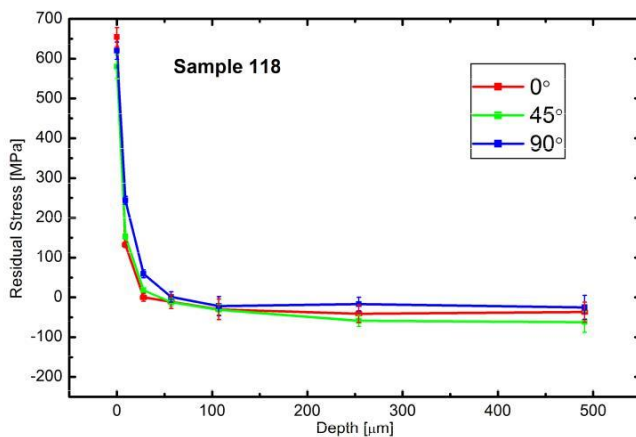


Fig. 8. Residual stress and FWHM depth profile for sample 118.

Table

2. Sample 012 depth profile results

Depth [mm]	Stress phi=0°		Stress phi=45°		Stress phi=90°		FWHM phi=0°		FWHM phi=45°		FWHM phi=90°	
	MPa	±MPa	MPa	±MPa	MPa	±MPa	°	±°	°	±°	°	±°
0	76	5	226	12	332	20	3.48	0.24	3.45	0.19	3.45	0.19
0.008	-18	9	-32	26	49	21	2.57	0.18	2.52	0.13	2.51	0.16
0.025	31	43	97	34	48	28	2.13	0.15	2.12	0.11	2.13	0.12
0.054	105	59	53	46	32	44	2.00	0.12	2.04	0.14	2.09	0.14
0.097	16	27	-24	42	-71	18	2.02	0.16	1.97	0.10	2.10	0.16
0.24	-3	64	-40	17	42	13	1.98	0.26	2.01	0.21	2.02	0.12
0.468	-43	48	53	41	-107	23	1.98	0.23	1.98	0.18	2.05	0.21

Table

3. Sample 111 depth profile results

Depth [mm]	Stress phi=0°		Stress phi=45°		Stress phi=90°		FWHM phi=0°		FWHM phi=45°		FWHM phi=90°	
	MPa	±MPa	MPa	±MPa	MPa	±MPa	°	±°	°	±°	°	±°
0	324	9	286	12	403	18	3.78	0.15	3.78	0.15	3.83	0.17
0.009	-84	8	-82	8	-38	13	2.77	0.14	2.78	0.15	2.77	0.15
0.024	-67	25	-72	8	-60	17	2.35	0.13	2.35	0.15	2.33	0.13
0.049	-32	13	-66	21	-76	17	2.18	0.13	2.18	0.13	2.19	0.13
0.117	-46	12	-43	6	-55	17	2.17	0.16	2.16	0.12	2.13	0.12
0.238	-8	11	-28	11	-70	11	2.12	0.14	2.12	0.11	2.11	0.14
0.506	-9	8	-29	7	-22	12	2.11	0.10	2.13	0.14	2.11	0.14

Table

4. Sample 015 depth profile results

Depth [mm]	Stress phi=0°		Stress phi=45°		Stress phi=90°		FWHM phi=0°		FWHM phi=45°		FWHM phi=90°	
	MPa	±MPa	MPa	±MPa	MPa	±MPa	°	±°	°	±°	°	±°
0	353	8	404	12	451	21	3.76	0.15	3.76	0.18	3.78	0.19
0.009	-13	15	26	13	23	10	2.95	0.15	2.95	0.18	2.93	0.17
0.027	-5	25	30	18	10	14	2.38	0.12	2.39	0.17	2.38	0.14
0.049	8	31	14	25	-41	22	2.20	0.10	2.16	0.15	2.18	0.23
0.095	20	39	-59	32	-59	30	2.03	0.16	2.04	0.11	2.04	0.11
0.238	-126	28	-157	56	-97	27	2.04	0.20	1.99	0.16	2.02	0.16
0.4790	-30	36	-90	32	-90	51	2.01	0.16	1.99	0.18	2.02	0.25

Table

5. Sample 118 depth profile results

Depth [mm]	Stress phi=0°		Stress phi=45°		Stress phi=90°		FWHM phi=0°		FWHM phi=45°		FWHM phi=90°	
	MPa	±MPa	MPa	±MPa	MPa	±MPa	°	±°	°	±°	°	±°
0	654	24	580	30	620	22	4.38	0.11	4.41	0.10	4.50	0.14
0.009	132	7	153	6	244	10	3.76	0.15	3.77	0.16	3.83	0.18
0.028	0	10	18	3	59	10	2.94	0.16	2.97	0.15	2.98	0.20
0.057	-11	17	-12	10	1	13	2.27	0.18	2.25	0.12	2.28	0.14
0.107	-30	26	-31	13	-22	24	2.13	0.15	2.13	0.13	2.10	0.14
0.254	-41	22	-59	14	-17	17	2.08	0.12	2.06	0.11	2.09	0.19
0.491	-37	25	-62	26	-25	30	2.09	0.14	2.09	0.12	2.08	0.13

SUMMARY

All the measurements were carried out according to the listed standards unless stated otherwise. The results only apply to the items tested.

X-ray diffraction measurements, analysis and reporting are in compliance with the following standards:

- Measurements are conducted according to the standard ISO/IEC 17025:2005.
- *EN 15305:2008 “Non-destructive Testing. Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction”.*
- *ASTM E2860 - 12 “Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels”.*
- *EN13925-2:2003 “Non-destructive testing - X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials. Procedures”.*
- *E 975 – 03: “Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation”*
- *ASTM E1426 - 14 “Standard Test Method for Determining the X-Ray Elastic Constants for Use in the Measurement of Residual Stress Using X-Ray Diffraction Techniques”.*

Barkhausen noise and Hole drilling measurements, analysis and reporting are conducted according to the Stresstech Oy internal methods.

Appendix 1:

X-RAY MEASUREMENT PARAMETERS – STRESS MEASUREMENTS

Device #22171)	G2RE (#122951) / XSTRESS (#123551) / tube (Mn
Software version	XTronic 1.7.2
Radiation	Mn K α
2 θ	152.3°
Spot size	3 mm
Exp. time	15 s, 5/5 or 4/4 tilts, -45/45° psi angles, 0° psi oscillation
Young's modulus	193000 MPa
Poisson ratio	0.25
Calculation	Cross correlation, linear background
Measurement method	Modified d(sin ² y)
Dial indicator	Mitutoyo Digimatic (#12111314 and #13124841)

Mina, Mailis Polma,
sünniaeg 30.04.1993,

1. annan Eesti Maailikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
„Freesimise mõju materjali pinnale AISI 316L näitel“

mille juhendaja on Tõnu Leemet,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)