



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Kuressaare Kolledž

**TERMOTÖÖTLUSE MÕJU
TÖÖRIISTATERASE TÖÖEALE**
DIPLOMITÖÖ

Juhendaja: Mihkel Kõrgesaar PhD

Üliõpilane: Raul Silem

Üliõpilaskood: 143583SDSR

Üliõpilase meiliaadress: silem.raul@gmail.com

Õppekava nimetus: Meretehnika ja väikelaeva ehitus

Kuressaare 2023

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“3” detsember 2023.

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2023.

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2023.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Raul Silem

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose “Termotöötuse mõju tööriistaterase tööeale,” mille juhendaja on Mihkel Kõrgesaar PhD.

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

03.12.2023

1 Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtjaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

HRC - kõvadusühik

J - jaul

mg/min – milligrammi minutis

MPa - megapaskal

°C – Celsiuse kraad

Fe₃C – tsementiit

kg – kilogramm

nm – nanomeeter

mm – millimeeter

h – tund

F – voolavuspiir

σ – pinge

A – ristlõikepindala

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON	2
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	4
SISUKORD	5
EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1. TERASESULAMID JA RAKENDUSVALDKONNAD SPORRONG EESTI OÜ NÄITEL.....	11
1.1. Calmax.....	12
1.2. Rigor.....	12
1.3. Slepiner.....	13
1.4. Sverker 21.....	13
2. TERMOTÖÖTLUS	15
2.1. Karastamine.....	17
2.2. Noolutamine.....	18
2.3. Teraste termotöötlus Sporrong Eesti OÜ näitel.....	19
2.4. Teraste termotöötlus terasetootja juhendite järgi.....	20
2.5. Erinevused võrreldes Sporrong Eesti OÜ ja terasetootja soovitude vahel.....	22
3. KATSEKEHAD JA MÕÕTMISED.....	23
3.1. Katsekehade planeerimine ja mõõtmiste läbiviimine.....	24
3.1.1. Katsekehade planeerimine.....	25
3.1.2. Mõõtmised.....	26
3.2. Järeldused	29
KOKKUVÕTE	30

SUMMARY	31
KASUTATUD KIRJANDUS	32

EESSÕNA

Käesolevas tööd uuritakse termotöötluste mõju tööriistateraste tööeale. Selleks võrreldakse terasetootja soovitatud termotöötlusmeetodeid Sporrong Eesti OÜ töötlusmeetoditega. Tulemuslikumate termotöötlusmeetodite selgitamiseks analüüsitakse terasetootja ja ettevõtte termotöödeldud tööriistade kõvadusomadusi laboris Rockwell skaalal. Töö tulemusena selguvad terasetootja soovituslikest termotöötlusmeetoditest kõrvalekaldumise mõju tööriistade kõvadusomadustele.

Autor avaldab tänu juhendajale Mihkel Kõrgesaar PhD.

SISSEJUHATUS

Oma olemuselt ei erine tööriistaterased tavalisest terasest - sisuliselt on tegu raua ja süsiniku sulamitega. Tööriistaterased teeb unikaalseks suur valim elemente, mida lisatakse erinevates vahekordades terasesulamisse, et mõjutada erinevaid parameetreid – kõvadus, tugevus, kulumiskindlus jne.

Termotöötlus kujutab endast sulami kuumutamist või jahutamist vastavasse faasi, vastava temperatuuri hoidmist määratud aja vältel ning temperatuuri normaliseerimist ettenähtud kiirusega.

Tööriistateraseid termotöödeldakse nende tööparameetrite edasise parendamise eesmärgil. On teada, et korrektne termotöötlus pikendab tööriistaterasest valmistatud tööriistade eluiga ning ebakorrektnen termotöötlus seda lühendab.



Pilt 1. Pressvorm

Sporrong Eesti OÜ näitel kasutatakse külmtöölusteraseid pressvormide valmistamiseks, mida rakendatakse lehtmetailidest medalite jms. toodete lehtstantsimisel. Lehtstantsimisel avalduvad tööriistadele löike- ja survepinged, mille tulemusel hakkavad tööriistas tekkima mikromõranemised. Mikromõranemised struktuuris nõrgendavad tööriista ning viivad tööriista enneaegse purunemiseni. Seetõttu on korrektusel termotöölusel tööriista

kestlikkusele oluline roll. Selle töö raames mõõdame tööriistaterase kõvadust Rockwelli skaalal, mille kaudu on võimalik otseselt tuletada voolavuspiir ehk maksimaalne pinge, mida materjal on võimeline kandma enne plastset deformatsiooni.



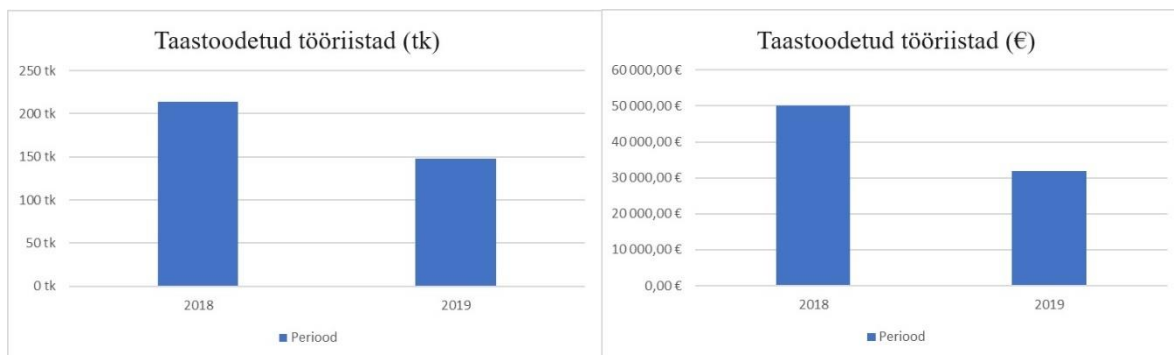
Pilt 2. Purunenud pressvorm.



Pilt 3. Lehtstantsitud toode.

Idee uurida termotöötamise mõju tööriistade elueale pärineb Sporrong Eesti OÜ varalt, kus 2018 ja 2019 aasta näitel taastoodeti 148-214 purunenud tööriista ning mille taastootmisele kulus 30 000 – 50 000€ (joonis 1). Purunenud tööriistade taastootmiskulu moodustab u. 20% ettevõtte tööriistatootmise kogukulust. Ettevõtte on omandanud aegade jooksul karastamisvõtted, mis erinevad märkimisväärselt terasetootjapoolsetest soovitustest. Ettevõtte enam kui 350 aastase ajaloo tõttu on meetodikad väljatöötanud inimesed ammu lahkunud ning ühes nendega ka vajalik oskusteave protsesse juhtida. Vanade tavade

juurdumisele on kaasa aidanud ka ettevõttele kuuluvate tehaste kolimised, mille käigus on arusaamatud töövõtted ühest riigist teise ülekantud ja uued töötajad neist kramplikult kinni haaranud. Kõik eelnev on viinud tänase olukorrani, kus igapäevaselt kasutatakse töövõtteid, millest aru ei saada, kuid ei soovita ka midagi muuta. Selle töö peamine eesmärk on uurida, kas terasetootjapoolsete soovitude järgimine karastamisel toob märgatavat mõju tööriista kõvadusele, mis parendab omakorda vastupidavust survetöötlemisel ning vähendab seeläbi ettevõtte kulutusi tööriistade taastootmisele.



Joonis 1. Taastoodetud tööriistad aastatel 2018 ja 2019.

1. TERASESULAMID JA RAKENDUSVALDKONNAD

SPORRONG EESTI OÜ NÄITEL

Sporrong Eesti OÜ tootmises kasutatakse pressvormide tootmiseks nelja erinevat terasesulamit: Calmax, Rigor, Sleipner ja Sverker 21. Eelmainitud terastest valmistatakse tööriistad, mida rakendatakse metallide külmtöötlemiseks. Külmtöötlemine kujutab endast erinevate nii vase- kui ka väärismetallide sulamistest metallide lehtstantsimist - kahe matriitsi vahele asetatakse lehtmetsall, millele rakendatakse kokkusuruvat jõudu.



Pilt 4. Lehtstantsitud toode.

Ettevõttes valmistatakse 90% tööriistadest Calmax terasest ja ülejäänud 10% on jagunenud Rigor, Sverker 21 ja Sleipner teraste vahel. Alates 2021 aastast ei ole uusi tööriistu Sverker 21 ega Sleipner terastest valmistatud. Sverker 21 ja Sleipner teraste välistamise peamiseks põhjuseks on nende keeruline karastamise protsess – eelnimetatud teraseid on soovituslik karastada vaakumkeskkonnas, mida Sporrong Eesti OÜ ei ole võimeline ise sooritama. Vastav teenus allhangiti, mistõttu oli protsess aja ja ressursikulukam.

Teraseid, mida kasutatakse tööriistade valmistamiseks külmtöötlemiseks, nimetatakse külmtöötlasterasteks. Külmtöötlemise teraseid iseloomustavad järgmised mehaanilised omadused: suur kõvadus (54 – 67 HRC), madal (5 – 10 J) kuni kõrge (üle 150 J) löögikindlus, kõrge kulumiskindlus (alla 20 mg/min) ja kõrge survetugevus (üle 2000 MPa). [5]

1.1. Calmax.

Calmax on kroomi, molübdeeni ja vanaadiumi terasesulam. Calmax terast iseloomustavad suur sitkus, kõrge kulumiskindlus, hea läbikarastatavus, hea dimensionaalne stabiilsus karastamisel, hea poleeritavus, hea keevitavus ning hea leek- ja induktsioon karastatavus. Calmax terase loomisel oli terasetootja eesmärgiks luua materjal, mis lisaks heale kulumiskindlusele ja kõvadusele pakub ka häid eelpool mainitud omadusi ning mille hoolduskulud on soodsad. Terasetootja soovitusel on Calmax teras ideaalne kasutamiseks külmtöötlemise valdkonnas presstöödel. [1]

Tänu eelpool mainitud tingimustele ning soodsale hinnale on suurusjärgus 90% Sporrong Eesti pressvorme valmistatud Calmax terasest.

Sporrong Eesti puhul langeb 90% juhul valik Calmax terase kasuks. Peamisteks põhjusteks on Calmax terase suhteliselt soodne hind ning head karastamisjärgsed omadused lehtstantsimisel.

1.2. Rigor.

Rigor on õhus või õlis karastatav kroomi ja molübdeen-vanaadiumi sulam, mida iseloomustavad hea töödeldavus, suur karastamisjärgne stabiilsus, kõrge survetugevus, hea karastatavus ning kõrge kulumiskindlus. Kõrge kulumiskindluse ja sitkuse tõttu on Rigor terasetootja hinnangul “universaalne” külmtöötlemise teras. [2]

Ettevõtte kasutab Rigor terast valdkondadest, kus on vaja suuremat sitkust ja eriti kulumiskindlust. Seetõttu kasutatakse Rigor terast peamiselt läikepinnaga müntide pressvormide valmistamiseks. Sellised pressvormid töötavad automaatpressides, kus neile rakenduvad suured survejõud väga kiirete intervallidega.

1.3. Slepiner.

Sleipler on kroomi ja molübdeen-vanaadiumi terasesulam. Sleipner terast iseloomustavad: hea kulumiskindlus, kõrge purunemiskindlus, kõrge survetugevus, suur noolutusjärgne kõvadus, hea läbikarastatavus, kõrge stabiilsus karastamisel, hea vastupidavus tagasinooldumisele, hea töödeldavus ning head pinnatöötamise omadused. [3]

Terasetootja näeb ette Sleipner terase peamiseks kasutusvaldkonnaks külm töötluse. Sleipner terasel on hea abrasiivse kulumise profiil ning kõrge purunemiskindlus, mistõttu soovitab terasetootja Slepiner terasest valmistatud tööriistu kasutada münditootmisel. [3]

1.4. Sverker 21.

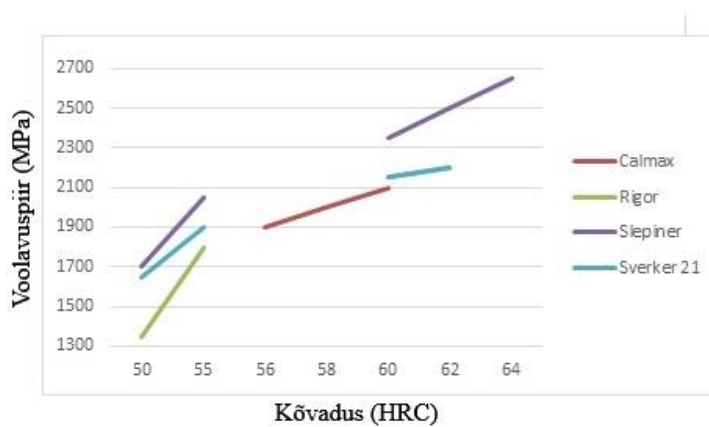
Sverker 21 on kõrge süsiniku ja kõrge kroomi sisaldusega teras, mis on legeritud molübdeeni ja vanaadiumiga. Sverker 21 iseloomustavad: kõrge kulumiskindlus, kõrge survetugevus, hea läbikarastatavus, kõrge stabiilsus karastamisel, hea vastupidavus tagasinooldumisele.

Terasetootja näeb ette Sleipner terase rakendamist keskkonnas, mis nõuab suurt kulumiskindlust kombineerituna mõõduka kõvadusega. [4]

Tabel 1. Terasesulamite kõvadus ja voolavuspiir.

Kõvadus (HRC)	Voolavuspiir (MPa)			
	Calmax	Rigor	Slepiner	Sverker 21
50		1350	1700	1650
55		1800	2050	1900

56	1900			
58	2000			
60	2100	2150	2350	2150
62		2200	2500	2200
64			2650	



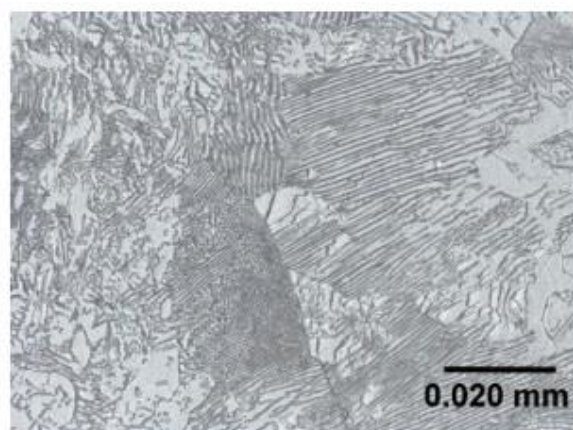
Joonis 2. Teraste voolavuspiiri sõltuvus kõvadusest.

2. TERMOTÖÖTLUS

Rauasulamid ja nende termotöötlus on olnud läbi aegade palju uuritud valdkond. Seda tänu oma vajalikkusele kaasaegsetes industriaalharudes nagu autotööstus, transport jne. Rauasulamite termotöötlemine on olnud alati tähtis, et saavutada vajalikud tugevuse, kõvaduse, sitkuse jne tasemed. Viimase mõnekümne aasta jooksul on inimkond omandanud väga arenenud termotöötlemise meetodid nagu karastamine kaitsvas atmosfääris või vaakumis, karastamine allpool 0-temperatuuri, laserkarastamine, madalrõhuga karburiseerimine jpm.[8]

Arenenud termotöötlemise tehnikad mängivad materjalide käsitlemisel kaasaegses tööstuses olulist rolli, et kaitsa neid pinnakahjustuste nagu rooste ja dekarburiseerumise, suurte kuju ja dimensioonide muutuste eest. Seda kõike, et vältida tööriistade enneaegset purunemist või kasutuskõlbmatuks muutumist. [8]

Metallurgias kasutatakse mõistet faas viitamaks materjali homogeensele olekule, kus esinevad kindlad aatomite sidemed, elementide järjestus ja keemiline koostis. Sulamites võib korraga esineda kahte või enam faasi – terastes näiteks ferriit ja tsementiit. [12]



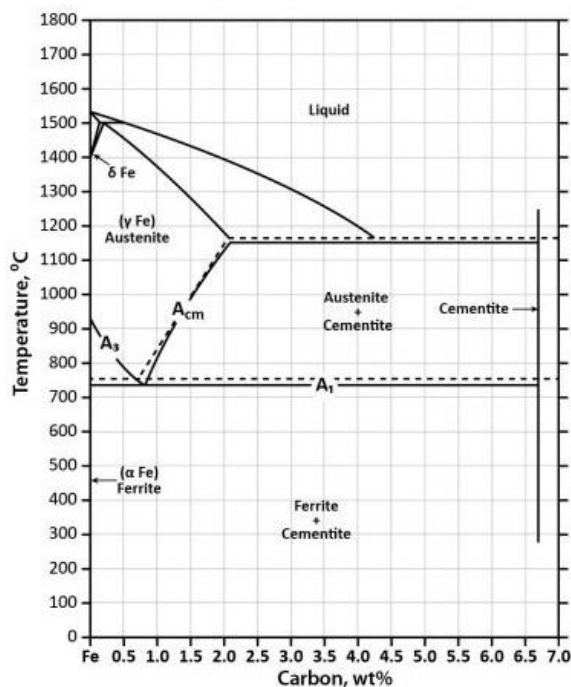
Pilt 5. Ferriit (valge) ja tsementiit (tume) terases.

Sulamites on igal faasil oma kindlad füüsilised, mehaanilised, elektrilised ning elektrokeemilised omadused. Näiteks terastes on ferriit suhtelisel pehme faas ja tsementiit on kõva ja habras faas. Kui need kaks faasi esinevad korraga, on sulami tugevus palju suurem,

kui ainult ferriidil ning plastsus oluliselt parem, kui tsementiidil. Sulamis esinevad faasid sõltuvad sulami koostisest ja termotööstusest, mida sulamile rakendatakse. Faasi diagramm on graafiline esitus faasidest, mis võivad kindlates sulamites kindlatel temperatuuridel esineda. Faasi diagrammi kasutatakse muuhulgas faasi muutuste ennustamiseks, kui materjalile rakendatakse termotööstust. [12]

Terases esinevate faaside kirjeldamiseks kasutatakse terase faasi diagrammi. Süsiniku sisaldus protsendina sulami kogumassist kujutatakse x-teljel ja temperatuur kujutatakse y-teljel. Iga faasi väli viitab faasile või faasidele, mis esinevad kindla sulami ja temperatuuri puhul. Terasete puhul on huvipakkuvad väljad ferriit, tsementiit, austeniit, ferriit + tsementiit, ferriit + austeniit ja austeniit + tsementiit. [12]

Allolev diagramm näitab, et 0,5% süsiniku sisaldusega terasesulam hoituna temperatuuril 900 °C koosneb austeniidist ja, et sama sulam temperatuuril 650 °C koosneb ferriidist ja tsementiidist. Lisaks saab diagrammilt näha, et kui 0,78% süsiniku sisaldusega teras aeglaselt jahutada temperatuurilt 900 °C, transformeerub sulam temperatuuril 727 °C ferriidiks ja tsementiidiks. [12]



Joonis 3. Terasete faasi diagramm.

2.1. Karastamine.

Terase karastamine saavutatakse läbi termotöötlemise sammude, mis moodustavad martensiidi või bainiidi, suurendamaks terase kõvadust ja tugevust. Karastamine koosneb kolmest sammust: kuumutamine, austenitiseerimine ja kiire jahutamine. [5]

Kuumutamine austenitiseerimistemperatuurini võib olla sujuv või järkjärguline, kus igal kuumutamise sammul kuumutatakse kogu tööriist soovitud temperatuurini. Materjali kuumenedes suurenevad termilised pinged, mistõttu elastsus ja tõmbetugevus vähenevad. Seetõttu tuleb tagada, et tööriist kuumutamisel ei purune. [5]

Austenitiseerimise eesmärk on sellise temperatuuri saavutamine ja hoidmine, kus ainult austeniit on stabiilses faasis. Austenitiseerimise temperatuuri tuleb hoolikalt valida, sest ebasobivatel temperatuuridel austenitiseerimine võib viia austeniidi kristalliidi suurenemiseni, mis omakorda jäeldub terase madalas kõvaduses. [5]

Austeniidi kristalliidi suurusel on suur mõju martensiitliku terase kõvadusele. Kristalliidi suuruse vähendamine austeniidis saavutab peenema alamstruktuuri martensiitlikus terases, mis omakorda viib suurenenud kõvaduse, tugevuse ja survetugevuseni. Kristalliidi suuruse kontrollimist peetakse süsinikteraste soovitud tugevusomaduste saavutamisel esmatähtsaks. [6]

Kehtib pöördvõrdeline seos kristalliidi suuruse ja voolavuspiiri vahel. Mida väiksem on kristalliidi suurus, seda väiksem on pinge, mida kristalliidi piir nihetusel tunneb ning seda suurem peab olema rakendatud jõud, et tekitada materjalis dislokatsioone. Seetõttu võib teoreetiliselt olla materjal lõpmata tugev, kui tema kristalliidi suurus on lõpmata väike. Praktiliselt on see võimatu, sest igal materjalil on praktiline minimaalne kristalliidi suurus, milleks on ühe tera suurus. [7]

Austenitiseerimisele järgneb kiire jahutamine, mille eesmärk on materjali temperatuur viia kiiresti ümbritseva õhu temperatuurini. Jahutamise kiirus on kriitilise tähtsusega tegur, sest

sellest sõltub lõppfaasis terase mikrostruktuur. Jahutamise kiiruse valikul tuleb silmas pidada materjali koostist. [5]

Austenitiseerimise käigus karbiidid osaliselt lahustuvad, rikastades seeläbi austeniidi maatriksi legeerivates elementides, mis alandab martensiidi tekkimise alg- ja lõpp temperatuure. [5]

2.2. Noolutamine.

Noolutamine on termotöötlemise viimane etapp, mis viiakse läbi tsükliliselt kaks kuni kolm korda, pärast mida on tööriist kasutamiseks valmis.

Karastamise käigus tekib peamiselt martensiitlik mikrostruktuur, mis on rabe ja kõva, mistõttu tuleb materjali noolutada. Teraseid noolutatakse peamiselt kahel põhjusel:

- 1) Suurendamiseks elastsust – martensiitlikku terast kuumutatakse, süsiniku sisalduse vähendamise eesmärgil üleküllastunud martensiidis. See juhtub karbiidide sadestumisel martensiidis.
- 2) Säilinud austeniidi eemaldamiseks mikrostruktuurist. Säilinud austeniidi eemaldamist tuleb teha hästi kontrollitud tingimustel, et vältida materjali liialt madalat kõvadust.

Ehkki noolutamist saab läbiviia väga laias temperatuuriskaalas (200°C - 600°C), on temperatuuri valik materjali soovitud parameetrite saavutamiseks kriitilise tähtsusega. Näiteks noolutamisel 200°C juures sadestuvad martensiidis ϵ - või η - karbiidid, kuid noolutamisel 200°C - 600°C sadestub martensiidis tsementiit (Fe_3C). [5]

Jääk austeniidi tranformeerumistemperatuur sõltub materjali koostisest. Transformatsioon võib toimuda noolutamise ajal või noolutusjärgsel jahtumisel. Seetõttu on oluline kõrgema jääk austeniidi sisaldusega (üle 15%) materjale noolutada kaks kuni kolm korda, sest ühe tsükli jooksul ei transformeeru kogu jääk austeniit. Iga järgnev tsükel transformeerib jääk

austeniiti ning omakorda karastab eelnevast tsüklilist jahtumise käigus tekkinud martensiiti. [5]

Noolutamisel 500°C - 600°C juures sadestuvad martensiidis väga väikesed karbiidid (2 – 5 nm). Selliseid karbiide nimetatakse noolustuskarbiidideks (tempering carbides) - nende settimine leiab asend noolutamise käigus lõpptemperatuuril hoidmise ajal. Selliste nano-suuruses osakeste moodustumine mikrostruktuuris annab materjalile lisa kõvadust, mistõttu kutsutakse noolutamist ka teiseks karastamiseks. [5]

Noolutamisel liiga kõrgel temperatuuril, väljaspool terasetootja soovitatud temperatuurivahemikku, moodustuvad jämedad karbiidid, mis on ferriitse matriksiga. See avaldab mõju oluliselt madamas materjali kõvaduses. [1 - 5]

2.3. Teraste termotöötlus Sporrong Eesti OÜ näitel.

Sporrong Eesti OÜs karastatakse tööriistateraseid ühtemoodi, olenemata terasemargist ja terasetootjapoolsest ettekirjutusest ning tööriista tööpetsiifikast. Omandatud töövõttes karastamisel on kujunenud pika ajaloo ja kogemuse tulemusena, kus rakendatavad temperatuurid on igale toorikule ühesugused, kuid rakendusaeg oleneb tooriku läbimõõdust.

Kõik tööriistaterasest toorikud asetatakse karastusahju, mis on eelkuumutatud temperatuurile 850°C. Seal hoitakse neid vastavalt tooriku läbimõõdule kaks või kuus tundi. Toorikud läbimõõduga alla 125 mm hoitakse karastusahjuks 2 tundi, suurema läbimõõduga 6 tundi.

Toorikud asetatakse ahju koguses 1-6tk korraga, sõltuvalt tooriku suurusest. 60mm diameetriga toorikuid, nagu on kasutatud selle töö raames, karastatakse 4-6 haaval.

Karastusaja möödudes võetakse toorikud karastusahjust välja ning asetatakse koheselt õlivanni. Õlivannis hoitakse toorikuid igal juhul ühe tunni mille möödudes asetatakse toorikud noolustusahju.

Noolutatakse toorikuid ahjus temperatuuril 250°C kaks tundi. Kõiki toorikuid noolutatakse kaks tsükli. Esimese noolutustsükli järgselt lastakse toorikutel jahtuda toatemperatuuril. Teise tsükli lõppedes jahtuvad toorikud maha koos ahjuga väga aeglase tempoga. Viimase tsükli teostatakse reeglina tööpäeva lõpus, kus toorikud jäetakse noolutusahju. Noolutusaja möödudes lülitab taimer ahju välja, mistõttu ahi enam ei kuumene ning jahtub loomulikult maha. Järgmise tööpäeva alguses eemaldab operaator toorikud ahjust. Sellega on termotöötlus Sporrong Eesti OÜ näitel teostatud.

Operaator testib pisteliselt termotöödeldud tööriistade kõvadust, oodates tulemuseks 50-55 HRC. Soovitud kõvadus 50-55 HRC oodatakse kõikidelt tööriistadelt hoolimata kasutatud materjalist või töörakendusest. Kui saadud mõõtmistulemus on soovitud vahemikust väljas, antakse tööriist, hoolimata hälbest, töösse kuniks tööriista purunemiseni.


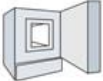

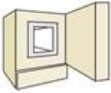
2.4. Teraste termotöötlus terasetootja juhendite järgi.

Calmax terasest tööriistatoorikuid soovitab terasetootja eelkuumutada 600-750°C. Austenitiseerimise temperatuur 950°C - 970°C, tavaliselt 960 °C. Karastusmediumiks soovitab terasetootja kasutada kas suruõhku või gaasi, vaakumahju piisava ülesurvega, vesivanni temperatuuril 200°C -500°C või õli. [1]

Rigor terasest tööriistatoorikuid soovitab terasetootja eelkuumutada temperatuurini 650°C - 750°C. Austenitiseerimise temperatuur 925°C - 970°C. Karastusmediumiks soovitab terasetootja kasutada vesivanni temperatuuril 450°C – 550°C, ringlevat õhku või atmosfääri, vaakumahju ülerõhuga või õli. Õli soovitab terasetootja vaid väikeste või vähekeerukate tööriistade karastamisel. [2]

Sleipner terasest tööriistatoorikuid soovitab terasetootja eelkuumutada temperatuurini 650°C - 750°C. Austenitiseerimise temperatuur 950°C - 1080°C. Karastusmediumiks soovitab terasetootja kasutada surgaasi või atmosfääri, vaakumit, vesivanni temperatuuril 500°C – 550°C või õli. Õli soovitab terasetootja kasutada vaid lihtsama geomeetriaga tööriistade karastamisel. [3]

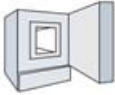
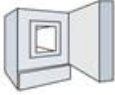

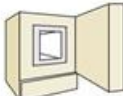
Sverker 21 terasest tööriistatööriikuid soovib terasetootja eelkuumutada temperatuurini 650°C - 750°C. Austenitiseerimise temperatuur 990°C - 1050°C. Karastusmeediumiks soovib terasetootja kasutada suruõhku või surugaasi, vaakumit, vesivanni temperatuuril 180°C - 500°C või õli. [4]

	SPORRONG IGA LIIGI PUHUL	TOOTJA SOOVITUSED			
		CALMAX	RIGOR	SLEIPNER	SVERKER 21
	Eelkuumutamine jäetakse vahele	Eelkuumutamine, 600C - 750C	Eelkuumutamine, 650C - 750C	Eelkuumutamine, 650C - 750C	Eelkuumutamine, 650C - 750C
↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Karastamine 850C, 2-6h	Karastamine, 960C, 0,5h	Karastamine, 960C, 0,5h	Karastamine, 1030C, 0,5h	Karastamine, 1030C, 0,5h
↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Õlivann, ~1 h	Õlivann, ~1 h	Vesivann, 500C, siis õhk	Vesivann, 500C, siis õhk	Vesivann, 180C, siis õhk
↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Noolutamine, 250C, 2x2h	Noolutamine, 500C, 2x2h	Noolutamine, 550C, 2x2h	Noolutamine, 550C, 2x2h	Noolutamine, 180C, 2x2h

Joonis 4. Termotöötamise protsessi diagrammid.

2.5. Erinevused võrreldes Sporrong Eesti OÜ ja terasetootja soovitude vahel.

Kõikide teraste puhul jäetakse ettevõtte meetodil terasetootja soovitud materjali eelkuumutamise samm sooritamata. Selle asemel asetatakse tööriistad otsemaid karastusahju temperatuurile, mis igal juhul erineb terasetootja soovitusest vahemikus 75°C - 200°C. Samuti erineb Sporrong Eesti OÜ meetodil karastamise aeg terasetootja soovitusest sõltuvalt tööriista suuruselt vahemikus 1,5 – 5,5h. Edasine noolutamine tehakse ettevõttes terasetootjapoolse ajalise soovituse järgi, kuid valitud temperatuur on kõigi teraste puhul madalam vahemikus 150°C - 350°C, kui terasetootja soovitab.

	ERINEVUSED TOOTJA SOOVITUSTEST			
	CALMAX	RIGOR	SLEIPNER	SVERKER 21
	Jäetakse sooritamata	Jäetakse sooritamata	Jäetakse sooritamata	Jäetakse sooritamata
↓	↓	↓	↓	↓
	Temperatuur < 110C Aeg > 1,5 - 5,5h	Temperatuur < 75-120C Aeg > 1,5 - 5,5h	Temperatuur < 100-230C Aeg > 1,5 - 5,5h	Temperatuur < 140-200C Aeg > 1,5 - 5,5h
↓	↓	↓	↓	↓
	Õlivann tehakse vastavalt tootja soovitusele	Vesivann, 500C, siis õhk	Vesivann, 500C, siis õhk	Vesivann, 180C, siis õhk
↓	↓	↓	↓	↓
	Temperatuur < 150C Aeg vastavalt tootja soovitusele	Temperatuur < 300C Aeg vastavalt tootja soovitusele	Temperatuur < 350C Aeg vastavalt tootja soovitusele	Temperatuur < 200C Aeg vastavalt tootja soovitusele

Joonis 5. Termotöötamise erinevused võrreldes terasetootja soovituga.

3. KATSEKEHAD JA MÕÕTMISED

Voolavuspiir on materjalidele mõjuvate survejõudude piirseisund, millest suuremate jõudude rakendamine kutsuks esile keha plastse deformeerumise või hapra purunemise. Voolavuspiiri mõõdetakse materjalides. Definiitsiooni järgi on ülim voolavuspiir ühesuunaliselt mõjuva jõu väärtus, mille puhul materjal hakkab voolama. [9]

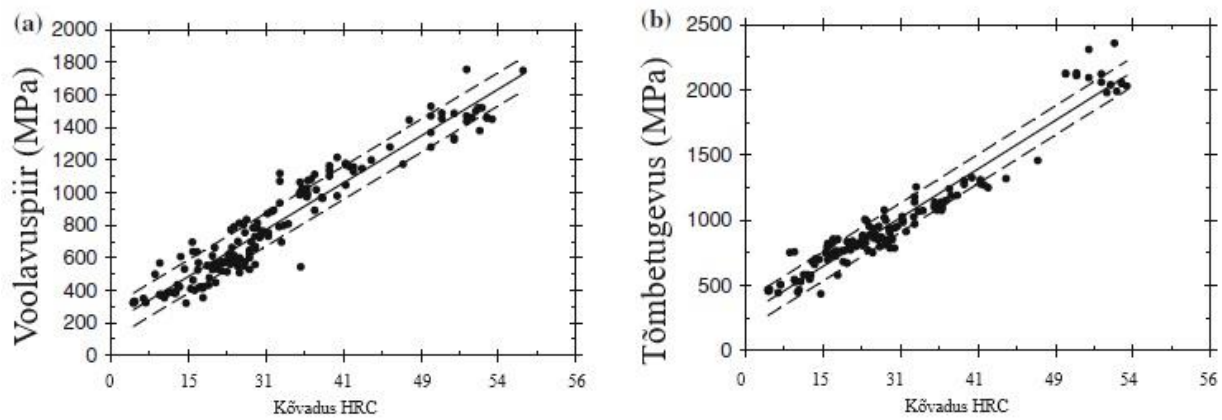
$$F = \sigma / A$$

Kus voolavuspiir (F) võrdub kehale mõjuva pingega (σ) tema purunemispunktis jagatuna tema ristlõikepindalaga (A). [9]

Terase kõvadus kirjeldab terase võimet vastupidada plastseid deformatsioone, täkestamist, läbitungimist ning kriimustusi. Mida suurem on terase kõvadus, seda vastupidavam on tema pind. Kõvaduse mõõtmiseks on mitmeid erinevaid empiirilisi katseid, millest olulisemad on Brinell, Rockwell ja Vickers – selle töö raames kasutame Rockwelli skaalat. Kuna kõvaduse testid on olemuselt väga sarnased, ei ole testi tulemuseks ühik, vaid indeks, mis kuvatakse numbrina, millele järgneb sümbolite kombinatsioon, mis viitab testimeetodile. [10]

Rockwelli mõõtmised viiakse läbi Rockwelli kõvaduse testeriga. Testkeha asetatakse terasest alasile ning viiakse kontakti kerge koormusega (10 kg), milleks plastsete kehade puhul on terasest kuulike. Nii tehakse testkehale esmane täke. Kerge koormuse all olles nullitakse näidiku skaala. Seejärel rakendatakse 15 sekundiks suur koormus (60 – 100 kg), mis teeb testkehasse suurema täkke. Koormuse eemaldamisel loetakse skaalalt näit. Seejärel arvutatakse kerge koormuse ja raske koormuse tulemusel tekkinud täkete vahe, ning tuletatakse kõvadus (HRC).

Terase kõvaduse ja voolavuspiiri vahel kehtib lineaarne seos, kus kõvaduse kasvades kasvab ka terase võime taluda pinget. Sarnane seos kehtib ka tõmbetugevuse osas, kuid sel juhul kipub suure kõvaduse juures olema tõbetugevus kõrgem, kui lineaarne seos ennustab. Sel põhjusel on antud töös otsustatud kasutada kõvaduse mõõtmisi tõmbekatse asemel. [13]



Joonis 6. Lineaarses seosed. a) Voolavuspiir; b) Tõmbetugevus



Pilt 6. Rockwelli mõõtevahend.

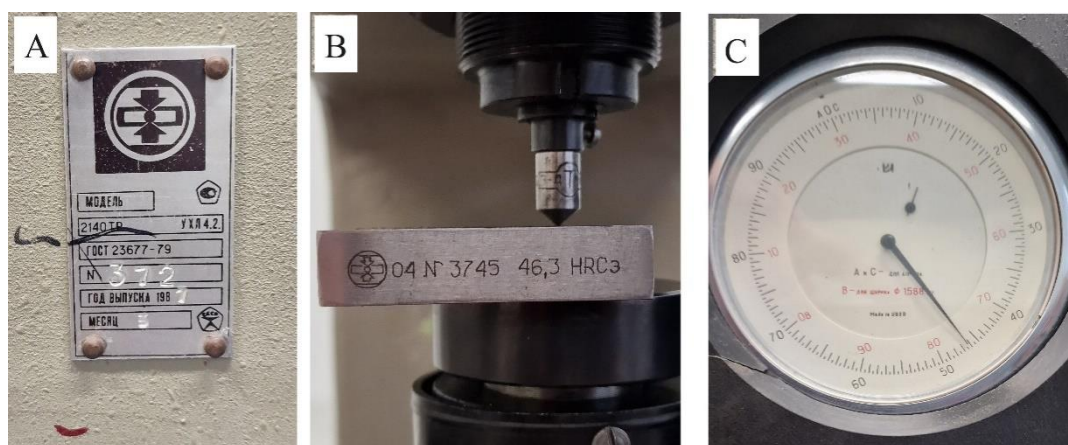
Eelnevat arvesse võttes võime järeldada, et karastamise tulemusena saavutatud suurem kõvadus näitab paralleelselt ka voolavuspiiri tõusu ehk pinget, mida tööriist on võimeline enne struktuurset purunemist taluma. Seetõttu saame lugeda erinevate karastamismeetodite võrdlemisel paremaks tulemuseks suurema kõvaduse Rockwelli skaalal saavutanud meetodi.

3.1. Katsekehade planeerimine ja mõõtmiste läbiviimine

Katsekehade mõõtmised on läbiviidud Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanika ja Metrologia katselaboris tehniku Laivi Väljaots juhendamisel. Katsekehade testimiseks kasutati Rockwell

testseadet numbriga 372. Testseade töötab vastavalt eelmises peatükis kirjeldatud töömeetodile, kuid rakendatud koormus on 135kg. Testseade kalibreeriti testkehaga 46,3 HRC, mille võib läbiviidud testide jaoks lugeda piisavaks.

Raadiusega kehade mõõtmisel tuleb arvestada koefitsienti vastavalt standardile EVS-EN ISO 6508-1: 2016. Suuremate kehade puhul kui raadius 19mm võib koefitsiendi arvestamata jätta.

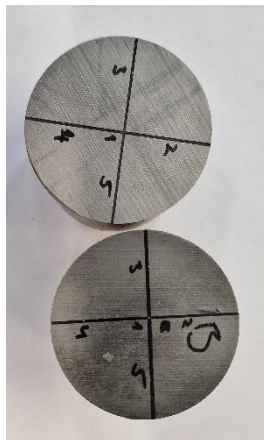


Pilt 7. Testseadme aparatuur A) Tootjaplaat; B) Kalibreerimine; C) Mõõteskaala

3.1.1. Katsekehade planeerimine.

Katsekehade puhul oli oodatud, et ebakorreksete termotöötlusvõtete tõttu on läbikarastumine olnud ebahütlane ning seetõttu ka katsekehade kõvadused varieeruvad. Ühtlase raadiusega katsekehadele on joonistatud kaks üksteisega ristuvat diameetrit, millele omakorda on markeeritud mõõtepunktid 1 – 5, kus 1 tähistab iga katsekeha tsentrit ning punktid 2 – 4 asuvad vastavatel telgedel. Täiendavalt mõõdeti katsekehade külgi iga diameetri projektsioonidelt. Selliselt läbiviidud mõõtmised loovad võimaluse tuvastada

võimalikke kõvaduse variatsioone katsekehades. Kokku testiti 12 katsekeha, tehes igale kehale 5 mõõtmist töötasapinnale ning 4 mõõtmist raadiusega servale.



Pilt 8. Katsekehade mõõtemaatriks.

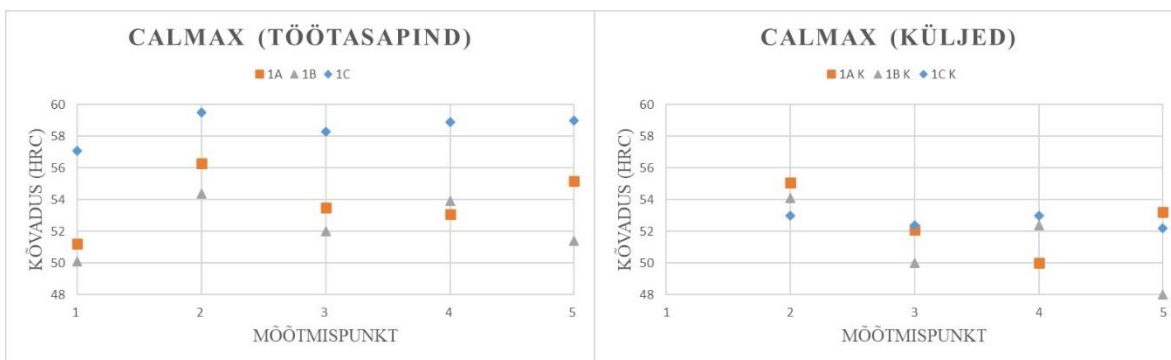
3.1.2. Mõõtmised.

Katsekehad on markeeritud allolevate numברי- ja tähe kombinatsioonidega: 1A, 1B ja 1C calmax teras; 2A, 2B ja 2C rigor teras; 3A, 3B ja 3C Sverker 21 teras; 4A, 4B ja 4C Slepiner teras. Külgedelt sooritatud mõõtmised on markeeritud täiendava tähisega “K”. Tähistusega A ja B on markeeritud Sporrong Eesti OÜ poolt termotöödeldud tööriistad ning tähisega C on markeeritud terasetootja termotöödeldud toorikud. Mõõtmistulemused on kantud tabelisse 2.

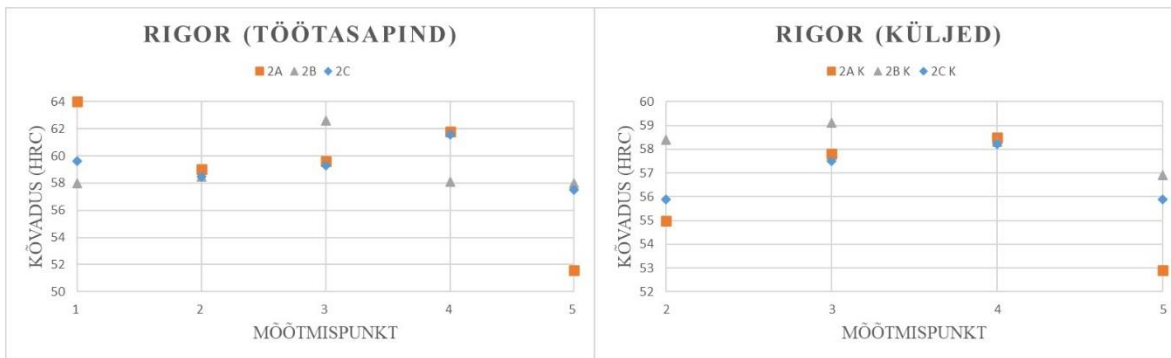
Tabel 2. Mõõtmistulemused.

TÄHIS	1	2	3	4	5
1A	51,2	56,3	53,5	53,1	55,2
1B	50,1	54,4	52,0	53,9	51,4
1C	57,1	59,5	58,3	58,9	59,0
2A	64,0	59,0	59,6	61,8	51,6

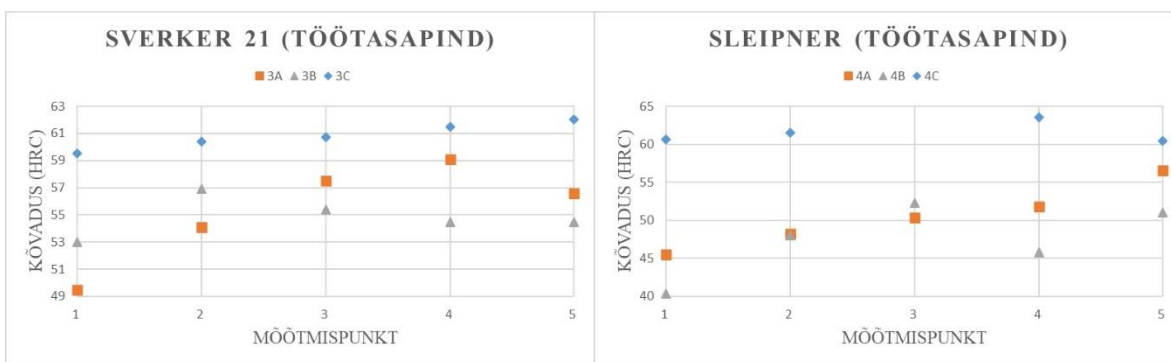
2B	58,0	58,5	62,6	58,1	58,0
2C	59,6	58,5	59,3	61,6	57,5
3A	49,5	54,1	57,5	59,1	56,6
3B	53,0	56,9	55,4	54,5	54,5
3C	59,5	60,4	60,7	61,5	62,0
4A	45,5	48,2	50,4	51,8	56,6
4B	40,4	48,0	52,3	45,8	51,0
4C	60,6	61,5	65,5	63,5	60,4
1A K		55,1	52,1	50,0	53,2
1B K		54,1	50,0	52,4	48,0
1C K		53,0	52,4	53,0	52,2
2A K		55,0	57,8	58,5	52,9
2B K		58,4	59,1	58,3	56,9
2C K		55,9	57,5	58,2	55,9



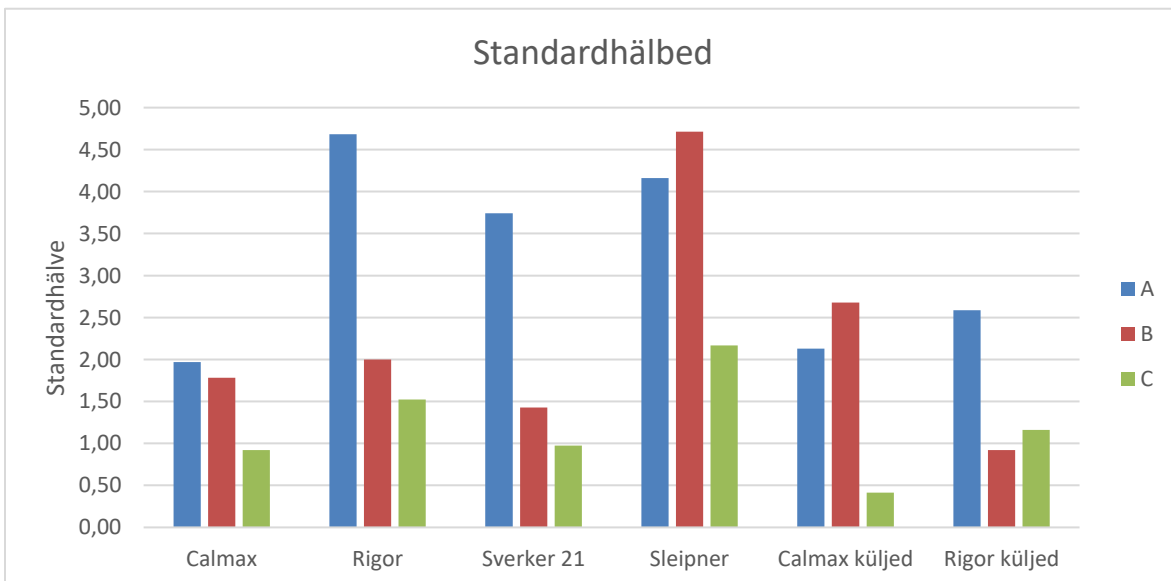
Joonis 7. Calmax mõõtmistulemused. A) Töötasapind; B) Küljed.



Joonis 8. Rigor mõõtmistulemused. A) Töötasapind; B) Küljed.



Joonis 9. Mõõtmistulemused. A) Sverker 21; B) Sleipner



Joonis 10. Standardhälbed.

3.2. Järeldused

Variatsioonid mõõtmistulemustes väljendavad selgelt, kõvaduste erinevust ühtedes ja samades tööriistades, mis on tekkinud tööriistade ebähtlasest läbikuumenemisest termotöötlusel. Variatsioone esineb ka terasetootja termotöödeldud tööriistades, kuid need on valdavalt väikesed. Võib järeldada, et sellised kõvadusomaduste variatsioonid on põhjustatud karastamisele eelneva eelkuumutamise vahelejätmisest.

Joonisel 11 väljatoodud standardhälbed väljendavad selgelt, et terasetootja juhendi järgi termotöödeldud tööriistade kõvadused on ühtlasemalt jaotunud. Terasetootja ja Sporrong Eesti OÜ tööriistade standardhälvete erinevused on vastavalt: Calmax puhul 1,05; Rigor puhul 3,16; Sverker 21 puhul 2,77 ja Sleipner puhul 2,54. Sellest võib järeldada, et terasetootja soovitude järgimine läbikuumutamise osas viib tööriistade ühtlasemate kõvadusteni.

Täiendavalt nähtub joonistelt 8-10, et terasetootja tööriistad on saavutanud suurimad kõvadusomadused, erandiga Rigor teras, kus Sporrong Eesti OÜ termotöödeldud tööriist on saavutanud 2,4 HRC võrra kõrgema tulemuse.

Kõik eelnev toetab järeldust, et terasetootja juhendi järgi termotöödeldud tööriistad saavutavad ühtlasema läbikarastumuse ja võivad saavutada kõrgemad kõvadused.

KOKKUVÕTE

Selles töös keskenduti erinevate termotöötlusmeetodite mõju uurimisele terasetootja ja Sporrong Eesti OÜ näitel ning vastavate tööriistade kõvadusomaduste analüüsimisele laboris.

Tööriistateraseid termotöödeldakse nende tööparameetrite edasise parendamise eesmärgil. On teada, et korrektne termotöötlus pikendab tööriistaterasest valmistatud tööriistade eluiga ning ebakorrektnen termotöötlus seda lühendab.

Termotöötlusmeetodite võrdlemiseks võeti aluseks terasetootja termotöötlusjuhendid ning Sporrong Eesti OÜ väljakujunenud töövõtted. Terasetootja annab soovitusi eelkuumutamise, karastamise ja noolutamise ajaks, temperatuuriks ja keskkonnaks. Võrdluse tulemusena selgus, et Sporrong Eesti OÜ meetodid erinevad terasetootja soovitustest igas võimalikus tingimuses.

Katsekehade mõõtmised viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanika ja Metroloogia katselaboris tehniku Laivi Väljaots juhendamisel. Katsekehade testimiseks kasutati Rockwell testseadet numbriga 372. Kõvadusmõõtmiste tulemusena selgus, et Sporrong Eesti OÜ termotöödeldud tööriistade kõvadusomadused olid terasetootja tööriistade kõvadusomadustest madalamad. Mõõtmiste tulemusena selgus veel, et Sporrong Eesti OÜ tööriistade kõvadused olid ebahühtlaselt jaotunud. Sellest sai otseselt järeldada, et ettevõtte eiras hühtlase läbikuumenemise soovitusi ning kiirustas karastamise etapis.

Selle töö tulemusena järeldub, et Sporrong Eesti OÜ peab oma tööriistade kõvadusomaduste parandamiseks järgima terasetootja soovitusi hühtlase läbikuumutamise osas karastamise etapis. See tagaks kõvadusomaduste hühtlasema jaotuse termotöödeldud tööriistades.

Selle töö edasiarendusena võiks analüüsida Sporrong Eesti OÜ tööriistade kõvadusomadusi, kui läbikuumutamine on tehtud hühtlaselt, kuid ettevõtte ei ole teinud muudatusi terasetootja soovitustele vastavalt eelkuumus-, karastus- ja noolustus temperatuurides. See tooks välja temperatuuride valiku mõju termotöötlusel kõvadusomadustele.

SUMMARY

The aim of this thesis was to investigate the effects of different heat treatment methods on steel tools hardness properties.

Steel tools are heat treated to further improve their working properties. It is known that correct heat treatment of steel improves the tools life cycle and incorrect heat treatment will shorten it.

In this thesis steel producers suggested methods were compared to Sporrong Eesti OÜ developed and rooted methods. Steel producer offers suggestions in preheating, hardening and tempering time, temperature and quenching medium. The result of this comparison revealed that Sporrong Eesti OÜ methods differ from steel producer's suggestions in every aspect.

The test objects were tested in Tallinn University of Technology laboratory of Mechanics and Metrology under supervision of laboratory technician Laivi Väljaots. The test objects were tested under Rockwell device number 372. Hardness testing showed that Sporrong Eesti OÜ heat treated tools' hardness parameters were lower than of the steel producer's samples. The analysis also uncovered that Sporrong Eesti OÜ tools hardness parameters were unevenly distributed. It could be directly derived that Sporrong Eesti OÜ had ignored the suggestion to evenly heat the objects in hardening faze.

The result of this work indicates that Sporrong Eesti OÜ must follow the steel producer's suggestions in order to improve their hardness parameters. Firstly, Sporrong Eesti OÜ must follow steel producer's suggestions in even heating in hardening faze. This would ensure more even hardness distribution in tools.

In further development of this work, Sporrong Eesti OÜ tool's parameters should be analyzed when they have adopted even heating in their process but have not made any changes to their used temperatures. This would allow to analyze the effects of temperature choices to hardness parameters.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Uddeholm, “Uddeholm Calmax,” 2023. [Võrgumaterjal].
https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/10/2023/08/productdb/api/tech_uddeholm-calmax_en.pdf
2. Uddeholm, “Uddeholm Rigor,” 2023. [Võrgumaterjal].
https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/10/2023/07/productdb/api/tech_uddeholm-rigor_en.pdf
3. Uddeholm, “Uddeholm Sleipner,” 2023. [Võrgumaterjal].
https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/10/2023/08/productdb/api/tech_uddeholm-sleipner_en.pdf
4. Uddeholm, “Uddeholm Sverker,” 2023. [Võrgumaterjal].
https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/10/2023/08/productdb/api/tech_uddeholm-sverker-21_en.pdf
5. M. A. Rehan, “Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of a 5wt.% Cr cold work tool steel,” 2019.
6. O. Haiko; V. Javaheri; K. Valtonen; A. Kaijalainen; J. Hannula; J. Kömi, “Effect of prior austenite grain size on the abrasive wear resistance of ultra-high strength martensitic steels,” 2020. [Võrgumaterjal].
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203336>
7. ChemEurope, “Grain boundary strengthening,” 2023. [Võrgumaterjal].
https://www.chemeuropa.com/en/encyclopedia/Grain_boundary_strengthening.html
8. P. Jurči, “History, Developments and Trends in the Heat Treatment of Steel,” 2020. [Võrgumaterjal].
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7560109/>
9. MatMatch, “What is Compressive Strength?” 2023. [Võrgumaterjal].
<https://matmatch.com/learn/property/compressive-strength>
10. ShapeCut, “Steel hardness test methods and hardness conversion,” 2023. [Võrgumaterjal].
<https://www.shapecut.com.au/steel-hardness-comparison-table/>

11. ScienceDirect, “Rockwell Hardness,” 2023. [Võrgumaterjal].
<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/rockwell-hardness>
12. IndustrialMetallurgists, “Phase Diagram,” 2023. [Võrgumaterjal].
<https://www.imetllc.com/phase-diagram/>
13. E. J. Pavlina; C. J. Tyne, “Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels,” 2008. [Võrgumaterjal].
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11665-008-9225-5.pdf>