



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Materjalitehnika instituut

Materjaliõpetuse õppetool

MTM70LT

*Tiiu Mürk*

**KIIRLÕIKETERASE BÖHLER S390  
VAAKUMTERMOTÖÖTLUS**

Autor taotleb  
tehnikateaduste magistri  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2015

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Priidu Peetsalu juhendamisel

“1” juuni 2015 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“1” juuni 2015 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....2015 a.

..... allkiri

## MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2015. aasta 4. semester

Üliõpilane: Tiiu Mürk, 132223  
Õppekava: MATM02/09  
Eriala: Tootearendus ja tootmistehnika  
Juhendaja: Priidu Peetsalu, vanemteadur  
Konsultandid:

### MAGISTRITÖÖTÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Kiirlõiketerase Böhler S390 vaakumtermotöötus.

(inglise keeles) Vacuum Heat Treatment of High Speed Steel Böhler S390

### Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Ülesande püstitus	03.10.2014
2.	Kirjanduse ülevaate koostamine	28.11.2014
3.	Katsete planeerimine ja teostamine TTÜ metallograafia laboris	27.03.2015
4.	Katsete planeerimine ja teostamine ettevõttes Stén & Co OÜ	30.04.2015
5.	Katsetulemuste analüüs	14.05.2015
6.	Lõputöö vormistamine, toimetamine	29.05.2015

### Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Kiirlõiketerase Böhler S390 ploki vaakumtermotöötuse parameetrite analüüs saavutamaks etteantud kõvaduse nõuded (63–65 HRC). Soovitused ploki suuruse ja termotöötuse valikuks.

**Täiendavad märkused ja nõuded:**.....

**Töö keel:** eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt 18.mai 2015

**Töö esitamise tähtaeg** 1. juuni 2015

Üliõpilane Tiiu Mürk /allkiri/ ..... kuupäev.....

Juhendaja Priidu Peetsalu /allkiri/ ..... kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

Magistritöö ülesanne .....	2
Eessõna.....	5
Sissejuhatus .....	6
1 Soojuskindlad tööriistaterased.....	7
1.1 Ülevaade soojuskindlatest tööriistaterastest .....	7
1.1.1 Pulbermetallurgiliselt ja tavameetodil valmistatud kiirlõiketerase erinevus.....	8
1.2 Pulbermetallurgiliste tööriistateraste tootmine .....	10
2. Tööriistateraste termotöötlus.....	13
2.1 Austenitiseerimine ja martensiidi teke .....	14
2.2 Pidevjahtumise diagramm .....	15
2.2.1 CCT diagrammide rakendamine .....	16
2.3 Vaakumtermotöötlus .....	18
3. Töös kasutatud uurimismeetodid .....	22
3.1 Termotöötluste teostamine TTÜ MTI metallograafia laboris .....	22
3.2 Vaakumkarastus ettevõttes Stén & Co OÜ .....	23
3.3 Termotöötluste kvaliteedi hindamine .....	26
3.3.1 Kõvaduse ja löögisitkuse määramise meetodika.....	26
3.3.2 Mikrostruktuuri uuringu teostamine.....	27
4. Termotöötlusrežiimi mõju soovitud kõvaduse saavutamisel .....	29
4.1 Austenitiseerimise aja ja temperatuuri mõju õlisse karastamisel.....	29
4.2 Laboratoorsete termotöötluste režiimide väljatöötamine .....	33
4.3 Katsetused täpsustatud termotöötluste režiimidega .....	36
5. Termotöödeldava ploki suuruse mõju kõvadusele .....	39
5.1 Jahtumiskiiruste mõõtmine Stén & Co OÜ vaakumahjus.....	39

5.2 Materjali mõju ploki suuruse valikul .....	45
5.3 Soovitused termotöödeldava ploki suuruse valikuks .....	48
Kokkuvõte .....	51
Summary .....	52
Kasutatud kirjandus .....	53
Lisad .....	55
Lisa 1 I termotöötluskatsetus – Rockwelli mõõtmistulemused.....	56
Lisa 2 II termotöötluskatsetus – Kasutatud katsetusparameetrid .....	57
Lisa 3 II termotöötluskatsetus – Rockwelli kõvadusmõõtmiste tulemused .....	58
Lisa 4 II termotöötluskatsetus – Mikrostruktuurid pärast austenitiseerimist .....	59
Lisa 5 II termotöötluskatsetus – Mikrostruktuurid pärast noolutust .....	60

## EESSÕNA

Käesolev magistritöö on valminud koostöös Tallinna Tehnikaülikooli Materjalitehnika instituudi ja ettevõtetega AS Norma ning Stén & Co OÜ, olles seotud projektiga „Kõrgtehnoloogiliste õhukeste pinnete rakendamine tööriistade kulumiskindluse tõstmisel“. Töö laiema eesmärk on aidata saavutada vaakumtermotötluse käigus plokkidel etteantud kõvadus. Lõputöö teema pakkus välja TTÜ Materjalitehnika instituudi vanemteadur Priidu Peetsalu.

## SISSEJUHATUS

Maailmas järjest suurenevate tootmiste koguste juures otsitakse pidevalt võimalusi ja lahendusi, kuidas toota võimalikult väikeste kuludega. Masstootmisega tegeleva ettevõtte puhul on üks suurem väljakutse tööriistade piisava eluea tagamine. Tööriistade eluiga ning kvaliteet mõjutavad otseselt lõpptoodangu hinna ning kvaliteedi suhet. Üks olulisemaid tööriistade püsivust mõjutavatest teguritest on nende termotöötlus.

Töö temaatika kasvas välja ettevõttes Stén & Co OÜ tekkinud probleemist, kus kiirlõiketerase Böhler S390 ploki ei saavutanud vaakumtermotöötlemise käigus AS Norma nõutavaid kõvadusi (63–65 HRC). Antud terast kasutatakse AS Normas silelõikestansi templit valmistamiseks. Vaakumtermotöötlemise rakendamist antud terase termotöötlemisel on aga eelnevate uuringute käigus vähe käsitletud.

Magistritöö eesmärk on saada parem ülevaade pulbermetallurgilise kiirlõiketerase Böhler S390 ploki vaakumtermotöötlemisest. Uuriti termotöötlemisrežiimide ning ploki suuruse mõju saavutatavale kõvadusele.

Töö annab ülevaate tööriistaterase valmistamisest pulbermetallurgilisel teel, termotöötlemise parameetrite valikust ning teostamisest termotöötlemise juures. Praktilises osas kirjeldatakse katsetuste eesmärke, katsetuste teostamise viisi ning tulemusi. Katsetused on kirjeldatud kronoloogilises järjekorras, mis tagab hea jälgitavuse tulemuste analüüsides ning uute katsetuste teostamise vajalikkusest.

Katsed on läbi viidud koostöös Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) Materjalitehnika instituudi (MTI) metallograafia labori ning ettevõttega Stén & Co OÜ. Katseplaanid koostati lähtuvalt püstitatud hüpoteesidest ja vastavalt senisele tööriistateraste termotöötlemise kogemusele ettevõtetes.

# 1 SOOJUSKINDLAD TÖÖRIISTATERASED

## 1.1 Ülevaade soojuskindlatest tööriistaterastest

Tööriistaterased on grupeeritud vastavalt materjali kasutusalaadele ning viitavad otseselt töötingimustele – sepiistamine, külmsurvetöötlus, survevalu ja kiir-masintöötlus. Iga grupi puhul võib olla terase marke, mis erinevad vähesel määral üksteisest, kohanedes erinevate protsessi nõuete, operatsiooni tingimuste või töödeldavate materjalidega. [1]

Kiirlõiketerased kuuluvad soojuskindlate tööriistateraste gruppi, mille puhul terase tugevus, kõvadus ja kulumiskindlus saavutatakse:

- a. karastamisel martensiitmuutuse tulemusena
- b. noolutamisel kõrgel temperatuuril dispersse kõvenemise tulemusena tugevdavate faaside eraldumisel.

Karbiidse noolutuskõvadusega teraste (*tempered carbide steels*) tugevuse tagavad volframi, molübdeeni ja vanaadiumi karbiidid, intermetalliidse noolutuskõvadusega terastel (*tempered intermetallic hardness steel*) intermetalliidid. Nii intermetalliidid kui ka karbiidid moodustuvad kõrgetel temperatuuridel, mistõttu teraste omaduste säilimine on tagatud kõrgete temperatuurideni. Kiirlõiketerased (*high speed steel*), mis sisaldavad üle 0,6 % süsinikku, on üks enim kasutatavatest tööriistateraste gruppidest. [2]

Erinevad teraste tootjad nimetavad oma tööriistateraseid erinevalt, mistõttu võivad sarnaste keemiliste koostiste ning valmistamise tehnoloogiatega terased kanda erinevaid nimetusi (Tabel 1).



Tabel 1 Tööriistateraste vastavusnimetused [3]

STANDARD ALLOY	UDDEHOLM GRADE	BOHLER GRADE
M2	—	No P/M Equivalent (Bohler S600)
M3 Type 2 Low S	Uddeholm Vanadis® 23 SuperClean™ †	Bohler S790 MICROCLEAN® †
M3 Type 2 with Co	Uddeholm Vanadis® 30 SuperClean™	Bohler S590 MICROCLEAN®
M4	Uddeholm Vanadis® 6 SuperClean™ † (cold work applications only)	Bohler S693 MICROCLEAN®
M4 High Carbon	No P/M Equivalent	Bohler S692 MICROCLEAN®
M4 High Silicon	No P/M Equivalent	Bohler S690 MICROCLEAN® †
M42	No P/M Equivalent	No P/M Equivalent (Bohler S500)
M42 Co Free	No P/M Equivalent	No P/M Equivalent
M48	No P/M Equivalent	No P/M Equivalent
T15 Modified	Uddeholm Vanadis® 60 SuperClean™	Bohler S390 MICROCLEAN® †
1 percent Vanadium	No P/M Equivalent (Uddeholm Caldie / Unimax)	No P/M Equivalent (Bohler W360)
3 percent Vanadium	Uddeholm Vanadis® 4 Extra SuperClean™ †	—
9 percent Vanadium	—	—
A11	Uddeholm Vanadis® 10 SuperClean™ †	Bohler K294 MICROCLEAN®
High Speed, High Co	Uddeholm Vanadis® 60 SuperClean™	Bohler S290 MICROCLEAN®
440C Stainless	Uddeholm Elmax SuperClean™ †	Bohler M390 MICROCLEAN®
Bridge Alloy	—	Bohler S290 MICROCLEAN®
Anti-Galling Tool Steel	Uddeholm Vancron® 40 †	—

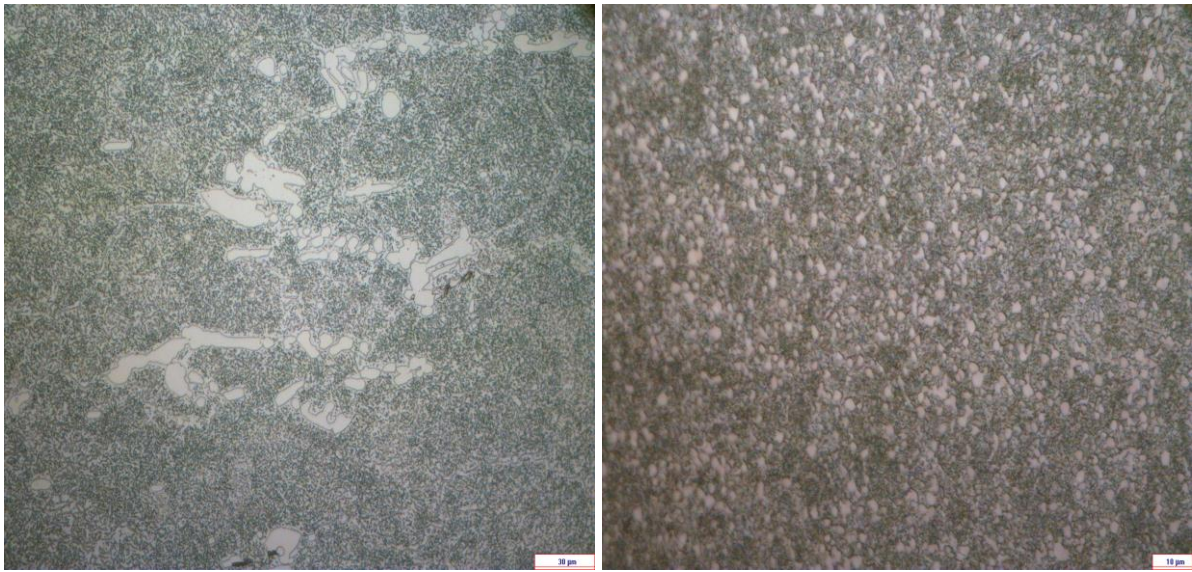
### 1.1.1 Pulbermetallurgiliselt ja tavameetodil valmistatud kiirloiketerase erinevus

Peamiseks ohuks tööriistateraste töösse rakendamisel on purunemine, mis toimub ilma eelnevalt nähtava plastse deformatsioonita. Purunemist põhjustavate pragude tekkimise põhjustavad tihti suured karbiidide kogumid või teised mittemetalsed lisandid. Kõrge süsinikusisaldus ning legeerelementide osakaal viib probleemideni, mis on seotud valamisel tekkinud suure teralise mikrostruktuuriga, mis omakorda viib madala sitkuse ja plastsuseni. [4, 5]

Pulbermetallurgiline (PM) terase tootmise protsess tagab väikeste karbiididega mikrostruktuuri. Lisaks saavutatakse ühtlasemad omadused läbi terve ploki kui tavameetodil valmistatud materjali korral (Sele 1 ). Struktuuris puudub segregatsioon, ei ole valandi kujust tingitud ebahühtlast struktuuri ega anisotroopiat. [4]

Mikrostruktuuri homogeensuse optimeerimiseks ning mõõdupüsivuse ja ühtlaste mehaaniliste omaduste tagamiseks on tehtud pikaajalist arendustööd. Erinevad pulbermetallurgilised valmistamise protsessid annavad ka erinevaid tulemusi mikrostruktuuri homogeensuses pärast paagutamist. Kuigi parimaks mikrostruktuuri ühtlustamise viisiks on pulbermetallurgiline

protsess, suurendab kuum isostaatiline pressimine materjali hinda, mistõttu kasutatakse antud protsessi vaid spetsiaalsete teraste tootmisel. [4, 5]



Sele 1 Erineval tootmisviisil saadud tööriistateraste mikrostruktuurid. Vasakul on toodud tavalisel meetodil saadud Böhler K110 mikrostruktuur, pilt on tehtud 500x suurendusel. Paremalt PM meetodil toodetud Böhler S390 mikrostruktuur, pilt on tehtud 1000x suurendusel.

Peamised PM teraste eelised:

- Väikesed ja ühtlaselt jaotunud karbiidid
  - Segregatsiooni puudumisest suurem vastupanu purunemisele ja väsimusele, säilitades samal ajal kulumiskindluse
  - Lihtsam lihvimine ja poleerimine, võimalik valmistada optiliste toodete valuvorme
- Laialdane legeerelementide kasutamise võimalus
  - Suurenenud kulumiskindlus, säilitades vastupanu pragude tekkele
- Järjepidev tööriista töövõime, ühtlane struktuur, segregatsiooni puudumine
  - Suurem mõõtmete püsivus termotöötamise käigus. Mõõtmete muutused, mis toimuvad, on kergemini ette ennustatavad
- Parem PVD pinne
  - Ühtlaselt jaotunud karbiidide struktuur parandab pinnete püsivust

[6, 7]

## 1.2 Pulbermetallurgiliste tööriistateraste tootmine

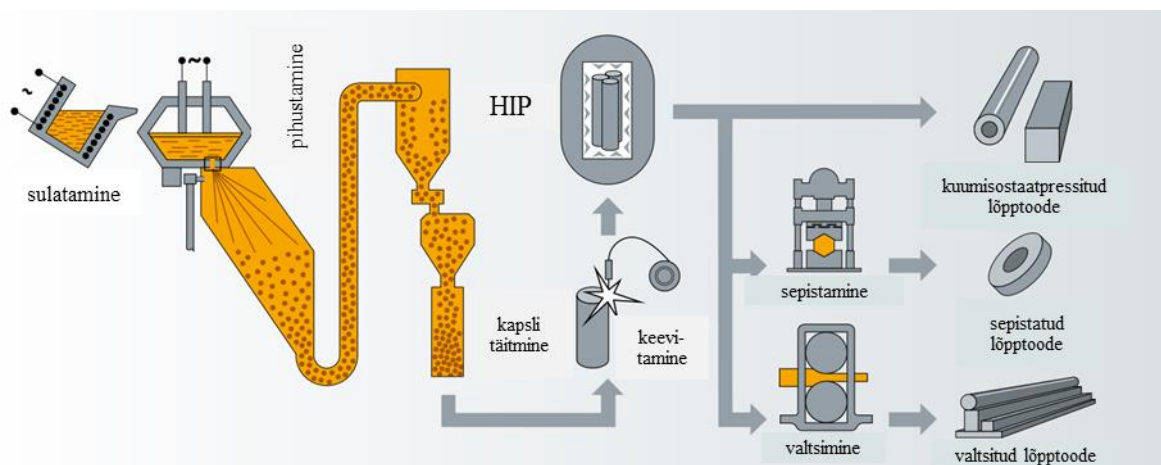
Pulbermetallurgilised tööriistaterased ning kiirloiketerased (*High Speed Steels – HSS*) on olnud kasutusel ligikaudu 40...50 aastat. Antud materjalide suurendatud omadused võrreldes tavaterastega on teinud need atraktiivseks spetsiaalsetel kasutusaladel. Peamine põhjus uue tootmisprotsessi tehnoloogia välja arendamiseks on olnud kõrge kvaliteediga alusmaterjali saamine, kus puuduvad mittemetalsed lisandid ja ebaühtlane karbiidide jaotus. [4]

Peamised tehnoloogiad, mis on asendanud tavalise valmistamise meetodi, on pulbermetallurgiline protsess ja kaarpihustusvormimine. Pulbermetallurgilisel teel terase tootmine on praeguseks laialt uuritud ja rakendust leidnud protsess erinevalt kaarpihustusvormimisest. [8]

Traditsiooniline PM terase tootmine (Sele 2):

1. Sulametall transporditakse vahekoppa, kus kontrollitakse metalli keemilist koostist.
2. Sulametalli pihustamisel kiiresti liikuva inertse gaasiga muutub metall piisakesteks osadeks.
3. Tekkinud osakesed langevad mööda jahutuskanalit ja tarduvad.
4. Tekkinud pulber kogutakse kapslisse, vakumeeritakse ning kapsel keevitatakse kinni.
5. Kuumisostaatpressimine (HIP) – kapsel kuumutatakse rõhu all sepistamise temperatuurile.

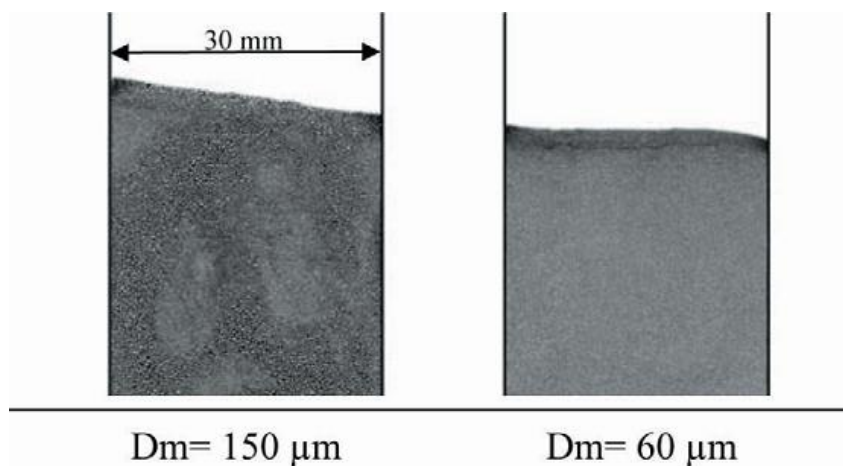
[4, 9, 7]



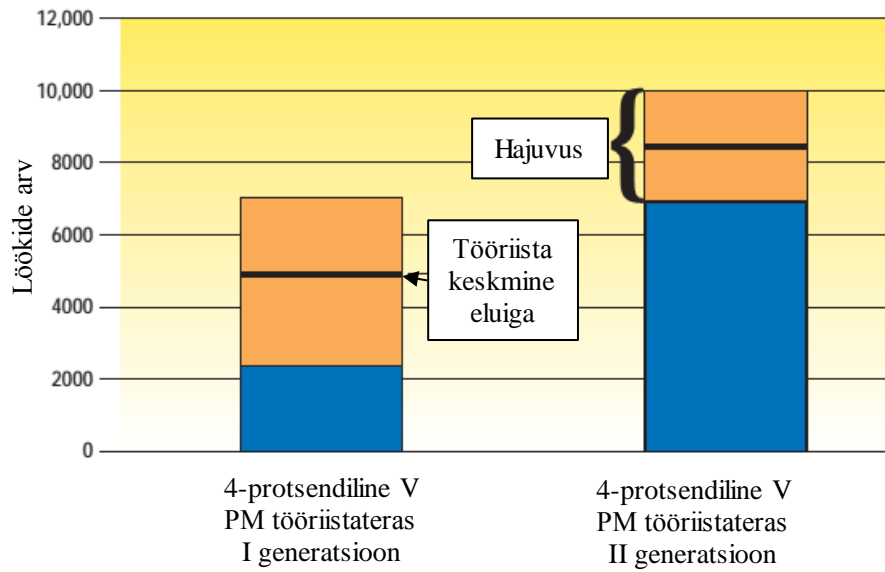
Sele 2 PM protsessi skeem. [10]

Kõrgeima kvaliteedi tagamiseks HSS teraste saamisel kasutakse kaitsva gaasina lämmastikku või argooni. Ühtlase struktuuri tagamiseks pärast kuumisostaatpressimist on vaja võimalikult väikeseid pulbriosakesi, kuna suuremad osakesed moodustavad kergemini segregatsioone ja karbiidide kogumikke (Sele 3). Pärast pihustamist ja osakeste tardumist on oluline tagada pulbri puhtus, mistõttu soovitatakse kasutada maksimaalselt automaatset ja kiiret kapslite kinni keevitamist. Pulbriosakeste peenendamiseks on kasutatud ka sõelumist, kuid sellega kaasneb ka suur materjali saastamise oht. [4, 5]

Kuumisostaatpressimisel vabastatakse materjalist sisemisi pingeid ning moodustatakse tugevaid metallurgilisi sidemeid. Antud meetod on parim ühtlase tihedusega PM plokkide saavutamiseks paagutamisel. Üks tsükkel kestab enamasti tunde ning viiakse läbi temperatuuril 1150 °C rõhuga 100 MPa. Saavutatava materjali kvaliteet on sõltuvuses rakendatud temperatuuride, rõhu ja aja kombinatsioonist. [4, 9]



Sele 3 Segregatsioon erinevate pulbriosakeste suuruste korral. [5]



Sele 4 Neljaprotsendilise vanaadiumi PM tööriistaterase vastupidavuse suurenemine 18Cr9Ni roostevabaterase stantsimisel pärast paranenud materjali puhtust. [6]

PM teraste tootmisel eristatakse I ja II generatsiooni teraseid, kus arendatud tootmise viis tagab peenema karbiidi tera, ühtlasema jaotuse ja väiksema lisandite koguse (Sele 3). II generatsiooni PM terased tõstavadööriista eluiga ja vähendavad üldiseid hooldamise ja seisuaegasid. Enamasti on see kasutusel masstootmisel või olukordades, kus kildumine on suur probleem. (Sele 4). [6]

## 2. TÖÖRIISTATERASTE TERMOTÖÖTLUS

Tööriistatereid kasutatakse survevaluvormide, valuvormide, templite ja paljude teiste elementide valmistamiseks, mille töötemperatuur võib jääda vahemikku 250...700 °C. Peamiseks nõudeks tööriistal on kujuparameetrite püsivus – materjal, millest on valmistatud tööriist, peab vastu pidama koormustele ilma plastse deformatsioonita, säilitades samal ajal kõrge kulumiskindluse. Mõningad tööriistad peavad omama ka kõrgetel töötemperatuuridel, kuni 700 °C, kõrget kõvadust ja tugevust, sobivat sitkust ja vastupanu haprale purunemisele. [11]

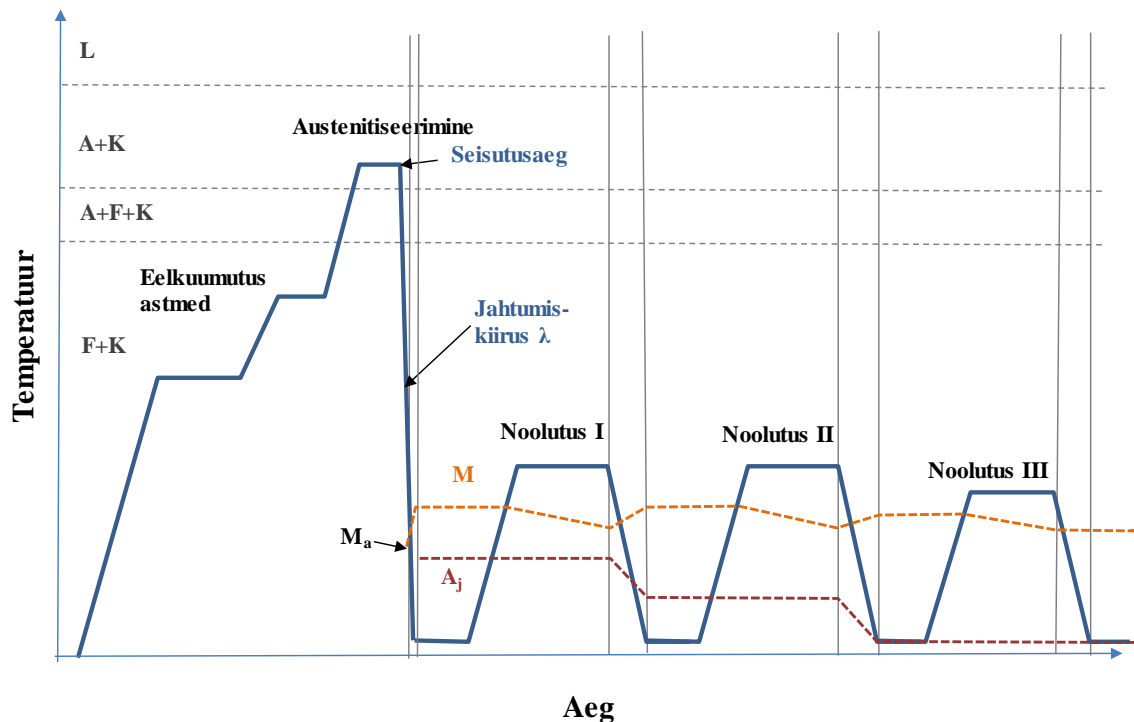
Enamasti valitakse tööriistaterasest lõpptootele termotöötuse režiim, saavutamaks kindlat kombinatsiooni kulumiskindlusest, vastupanu deformatsioonile (*resistance to deformation*) või vastupanuvõimet suurtele koormustele (*resistance to breaking under high loads*) ja kõrget töövõimet kõrgendatud temperatuuridel.

Valuplokkide või pooltoodete termotöötlus tehakse järgmiste eesmärkide täitmiseks:

1. Saavutamaks mikrostruktuuri ja mehaanilisi omadusi, mis võimaldaksid lõiketöötlust ja külmtöötlust (*cold deformation*)
2. Vabastamaks materjali jääkpingetest, mis on tekkinud kuumtöötuse või lõiketöötuse tagajärjel
3. Ühtlustamiseks mikrostruktuuris kerakujulisi karbiide sferoidiseeriva lõõmutusega.
4. Lahustamiseks normaliseerimisega teradevahelisi karbiide, mis on kahjulikud tööriistaterase mehaanilistele omadustele. [3]

Tööriistaterase termotöötlus koosneb kolmest protsessist (Sele 5):

1. Terase kuumutamine, kasutades eelkuumutuse astmeid austenitiseerimise temperatuurile ja seal seisutamine austeniidi tekkeks
2. Terase jahutamine kriitilisel jahutamise kiirusel austenitiseerimise temperatuurilt martensiidi tekkeks
3. Kahe- kuni kolmekordne noolutamine martensiidi noolutamiseks ning intermetalliidide välja sadestamiseks, vahepealsel jahutamisel jääkausteniidist vabanemiseks.



Sele 5 Tööriistaterase termotötluse protsessi etappide skemaatiline diagramm. A – austeniit, K – karbiidid, F – ferriit, M – martensiidi osakaal materjalis,  $A_j$  – jääkausteniidi osakaal materjalis

## 2.1 Austenitiseerimine ja martensiidi teke

Kõige kriitilisemaks etapiks termotötluse juures on austenitiseerimine. Protsessi parameetreid valikul peab hoolikalt valima austenitiseerimise temperatuuri ja aega, et ära hoida

- ebanormaalset tera kasvu;
- pingetest tekkivaid jäävdeformatsioone termotöödeldaval detailil;
- liigset karbiidide lahustumist, mis mõjutab karbiidide hulka kulumiskindlusel;
- süsiniku väljapõlemist, mis võib muuta pinna keemilist koostist.

Austenitiseerimise temperatuur on eriti oluline kõrglegeeritud ja kiirloiketeraste korral, kus austenitiseerimise temperatuurid on lähedal solidusjoonele. [3]

Terase kuumutamisel austeniidi alasse muutub ferriitne struktuur karbiididega või karbiidideta austeniidiks, sõltuvalt terase keemilisest koostisest. Madalsüsinikteraste austenitiseerimisel moodustub homogeenne austeniitne mikrostruktuur, milles puuduvad karbiidid. Kõrgsüsinikteraste korral sisaldab lõpp-mikrostruktuur nii austeniiti kui ka karbiide, mis ei ole lahustunud. Ledeburiitsete teraste korral ei lahustu karbiidid isegi vedelas faasis.

Pulbermetallurgilisel teel valmistatud kiirlõiketeraste korral, kus karbiidid on väiksemad kui tavalisel meetodil valmistatud terastes, toimub karbiidide lahustumine kergemini, eriti kui tegu on MC tüüpi karbiididega. [3]

Kõrgleegeritud teraste korral kasutatakse kõrgemat austenitiseerimise temperatuuri, sest karbiidid  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_5$ ,  $M_6C$  ja MC esinevad lõõmutatud mikrostruktuuris. Nende karbiidide lahustumine sõltub lõõmutuse temperatuurist, austenitiseerimise temperatuurist ning hoidmise ajast nendel temperatuuridel. Tööriistaterase karastamisel austenitiseerimise temperatuurilt võib tekkida martensiit koos jääausteniidiga. Ferriidi ja karbiidide transformatsioon võib olla piiratud kõrge jahtumise kiirusega või takistatud legeerelementide poolt. [3]

## 2.2 Pidevjahtumise diagramm

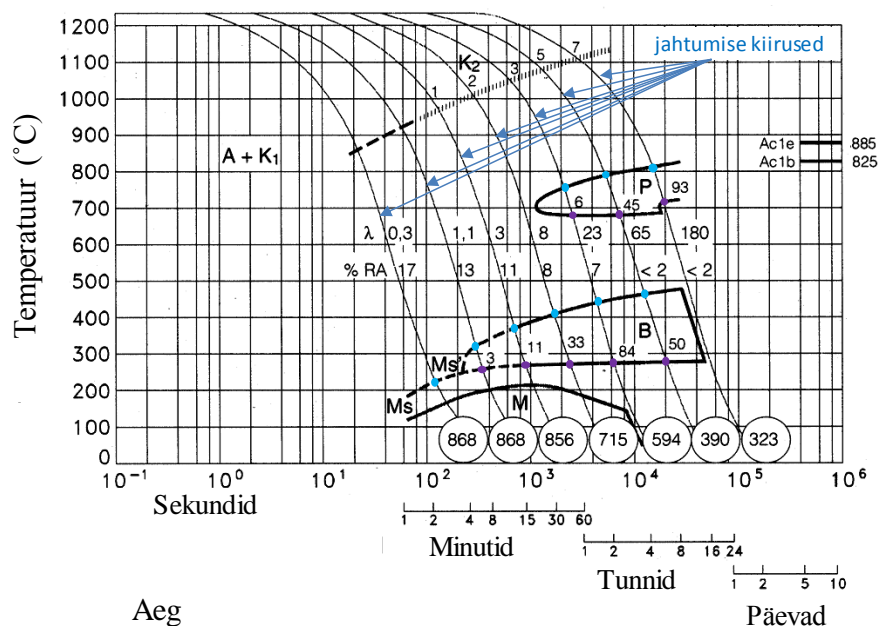
Pidevjahtumise diagramme (*CCT – continuous cooling diagram*) kasutatakse termotöötamise käigus saavutatavate mikrostruktuuride ja kõvaduse ennustamiseks või termotöötamisprotsessi parameetrite määramiseks soovitud mikrostruktuuri ja kõvaduse saavutamisel. Diagrammi kasutamise eelduseks on kasutaja teadlikkus konkreetsetest osadest, võimalustest ja piirangutest. [12]

CCT diagrammid on koostatud väikeste detailide termotöötamise jahtumise jälgimise tulemusena. Diagrammi koostamisel kasutatakse väikeseid katsekehi eri suurustega, saamaks erinevaid jahtumise kiiruseid:

- mõõduga  $\emptyset 4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  katsekehad on kiire jahtumise saavutamiseks;
- mõõduga  $\emptyset 4,5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  katsekehad on keskmise ja aeglase jahtumiskiiruse saavutamiseks.

Kõik katsekehad austenitiseeritakse ja jahutatakse koos dilatomeetriga erinevate jahtumise kiirustega. Iga faasi muutuse algus- ja lõpp-punktid salvestatakse ning need punktid ühendatakse, saavutamaks struktuuriosade erinevaid piirkondi. Seetõttu on CCT diagramm mõeldud lugemiseks ainult samal viisil, kui see on valmistatud – mööda jahtumise joont. [12]





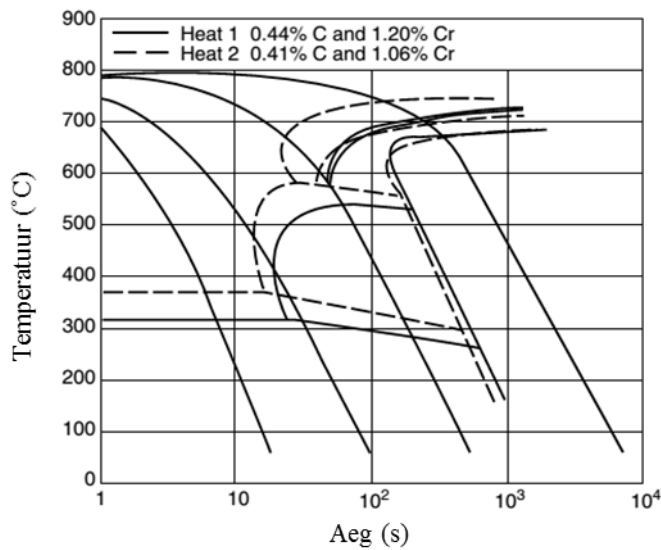
Sele 6 Böhler S390 CCT diagramm. Austenitiseerimise temperatuur 1230 °C, seisutusaeg 180 sekundit. [13]

Böhler S390 CCT diagrammilt (Sele 6) on näha, et ühefaasilised struktuurid saavad tekkida ainult väga kiirel terase jahutamisel pärast austenitiseerimist (tekib martensiid) või väga aeglasel jahutamisel (tekib perliit). Kõikide teiste jahtumiskiiruste korral saavutatakse kombinatsioon erinevatest mikrostruktuuridest. Mitu protsenti ühte struktuuriosa tekib, saab lugeda numbritelt, mis on toodud struktuuri joonte kohale. Tekkivate struktuuride hinnangulised kõvadused on toodud jahtumisjoonte lõpus Vickersi kõvadusnumbri näol. Näiteks Sele 6 toodud CCT diagrammil jahtumiskiiruse  $\lambda = 23$  korral koosneb materjali struktuur pärast austenitiseerimist 6 % perliidist, 7 % jääk austeniidist, 84 % beiniidist ning 3 % ulatuses  $K_2$  karbiididest. Struktuuri suhteliseks kõvaduseks on 594 HV. Jahtumiskiiruse  $\lambda = 3$  korral on materjalis 2 %  $K_2$  karbiide, 8 % jääk austeniiti, 11 % beiniiti ja ülejäänud 79 % on martensiid. Tekkinud mikrostruktuuri suhteliseks kõvaduseks on 856 HV. [12]

### 2.2.1 CCT diagrammide rakendamine

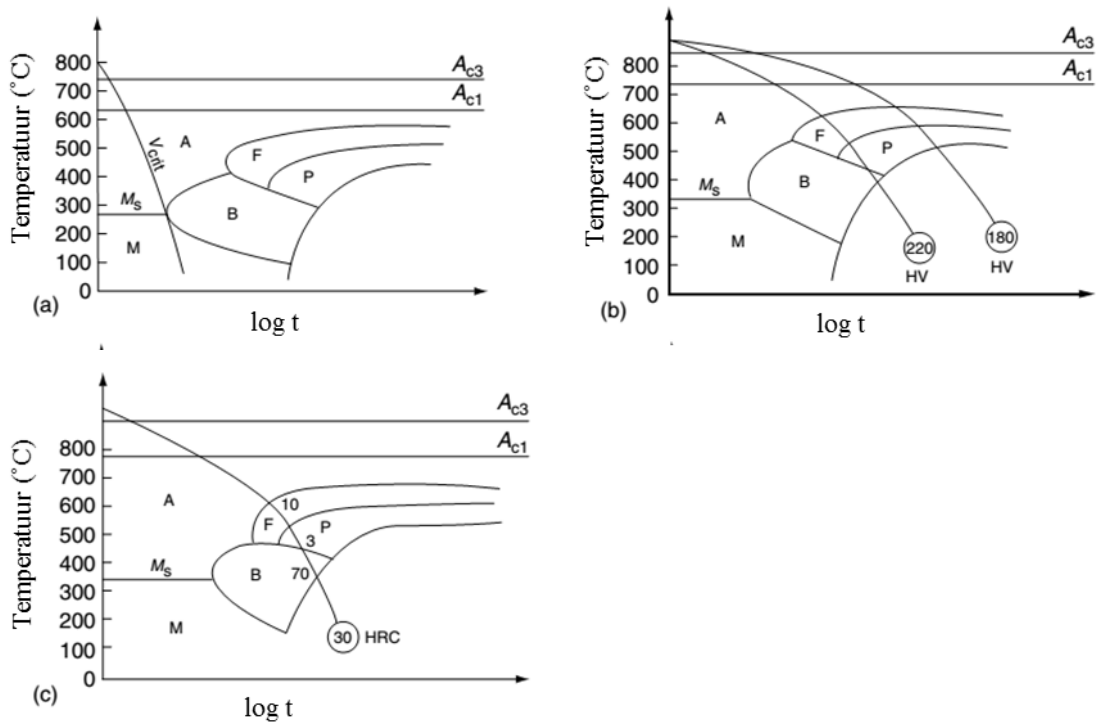
Pidevjahtumisdiagrammide rakendamise korral tuleb kindlasti meeles pidada, et need kehtivad ainult selle kuumutuse astme ja materjali puhul, mida oli kasutatud diagrammi koostamisel. Ainuüksi kuumutamise temperatuuri muutmisel võib olla materjalis tekkivate

mikrostruktuuride alg- ja lõppmuutuste asukohtadele ja protsendilistele koostistele suur mõju (Sele 7). [12]



Sele 7 Kuumutuse temperatuuri mõju struktuuriosade tekke joonte asukohtadele DIN 41Cr4 näitel [12]

Pidevjahtumisdiagramme saab kasutada kolmel erineval juhul (Sele 8). Esiteks on diagrammi abil võimalik määrata kriitiline jahtumise kiirus, saavutamaks täielikult martensiitset struktuuri konkreetse terase korral (Sele 8, diagramm (a)). Teiseks saab diagrammi abil valida sobiva jahtumise kiiruse, saavutamaks soovitud kõvadust aeglasel jahtumisel õhu käes (Sele 8, diagramm (b)). Tekkinud ferriidi ja perliidi osakaalu struktuuris saab lugeda eelnevalt kirjeldatud viisil. Kolmandaks, diagramm võimaldab hinnata rohkema kui kahe tekkinud struktuuri osa proportsionaalset osakaalu ja materjali suhtelist kõvadust pärast jahutamist (Sele 8, diagramm (c)). [12]



Sele 8 Termotötlusprotsessid pideva jahtumisega, mille puhul ainult CCT diagramme saab kasutada. (a) Kiire jahtumine, saavutamaks täielikult martensiitset struktuuri; (b) aeglane jahtumine, saavutamaks ferriit-perliit struktuuri nõutud kõvadusega; (c) pidev jahtumise režiim, millega saavutatakse erinevate struktuuride kooslus [12]

CCT diagrammide abil on võimalik valida vastavalt kasutatavale jahtumiskiirusele sobivat materjali või vastavalt materjalile valida sobiv jahtumiskiirus, saavutamaks soovitud mikrostruktuuri. Suurim probleem diagrammi reaalses elus rakendamisel on etteantud jahtumise kiirust täpselt saavutada. [12]

## 2.3 Vaakumtermotötlus

Termotötluseks vajalikku keskkonda on võimalik saavutada ühes vaakumkambris, mis on varustatud kõrge rõhu (2–20 bar) all oleva inertse gaasi jahutussüsteemiga. Vaakumtermotötluse (*Vacuum heat treatment*) protsess on jälgitav ja maksimaalselt kontrollitav, võimaldades muuta nii detailide kuumutamist kui ka jahutamist. Esialgu töötati vaakumtermotötlus eriteraste termotötluse teostamiseks, nagu seda on vastupidavust nõudvad kosmosetehnikas kasutatavad materjalid. Protsessides on vaakumtermotötlus kasutusel jootmisel, paagutamisel ning difusioonsete sidemete loomisel. Vaakumahjud on

kasutusel ka lõõmutusel, nitriitimisel, süsinikuga rikastamisel, ioniseerimisel, kuumutusel koos karastamisega, noolutusel ja pingestuslõõmutamisel. [1, 11]

Vaakumtermotöötlus viitab termotöötlusprotsessidele, kus rauda sisaldavad ja mitte sisaldavad komponendid on termiliselt kuumutatud vaakumkeskkonnas. Sõna vaakum pärineb ladina keelesest sõnast *vacuum*, mis tähendab tühja ruumi. Selle all on võimalik mõelda ruumi, kus puudub täielikult materia, mis realselt ei eksisteeri ja mida ei ole võimalik ka tekitada. Tehniliselt tähendab see ruumi, kus on tugevalt taandatud gaasi tihedus. Sellist ruumi tekitatakse õhu ja teiste gaaside eemaldamisega gaasikindlast konteinerist vaakumpumba abil. [14]

Vaakumi kvaliteet on kirjeldatud gaasi tiheduse vähendamise astmega ehk teisisõnu gaasi rõhuga. Atmosfääri rõhk standardsel temperatuuril mere kohal on 760 torr (101 325 Pa ehk 1,01325 bar). [14]

Tabel 2 Vaakumi kvaliteedi hinnang. [14]

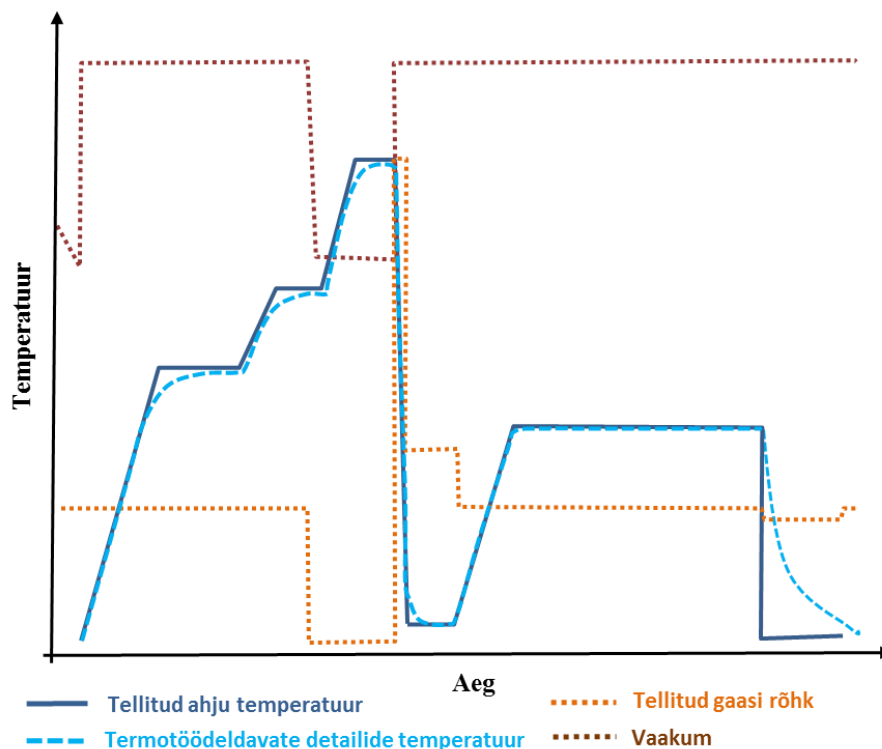
Vaakumi kvaliteet	Inglisekeelne termin	Rõhu vahemik (torr)
Madal	Rough	1 - 760
Tavaline	Fine	$10^{-3}$ - 1
Kõrge	High	$10^{-7}$ - $10^{-3}$
Ülikõrge	Ultrahigh	$< 10^{-7}$

Terase termotöötlus viiakse läbi kolmes vaakumi kvaliteedis: madal, tavaline, kõrge (Tabel 2). Vaakumikeskkonnas terase termotöötlus tagab kaitse pinna oksüdeerumise eest. Kaitsmaks pinnakihti, asendatakse atmosfäär gaasiga, mis ei sisalda hapnikku. Ühe võimalusena kasutatakse inertset atmosfääri, nagu lämmastik ( $N_2$ ). Teise variandina saab kasutada kaitsvaid atmosfääre, kus kasutatakse lämmastikku koos taandavate elementidega, nagu vesinik ( $H_2$ ) ja süsinikoksiid ( $CO$ ). Mõlema meetodi puhul tuleb keskkond täielikult tühjendada hapnikust ning rikastada siis gaasiga, eriti siis kui tegemist on kergesti süttiva kaitsegaasiga. [14]

Enamus vaakumahje on partiipõhised, kuid kasutusel on ka tootmises pidevalt kasutatavad liinipõhised vaakumahjud, kus ahjus on mitu ala: eelkuumutus, kõrgtemperatuurne töötlus, jahutus gaasis või vedelikus. [14]

Vaakumtermotöötlus võimaldab

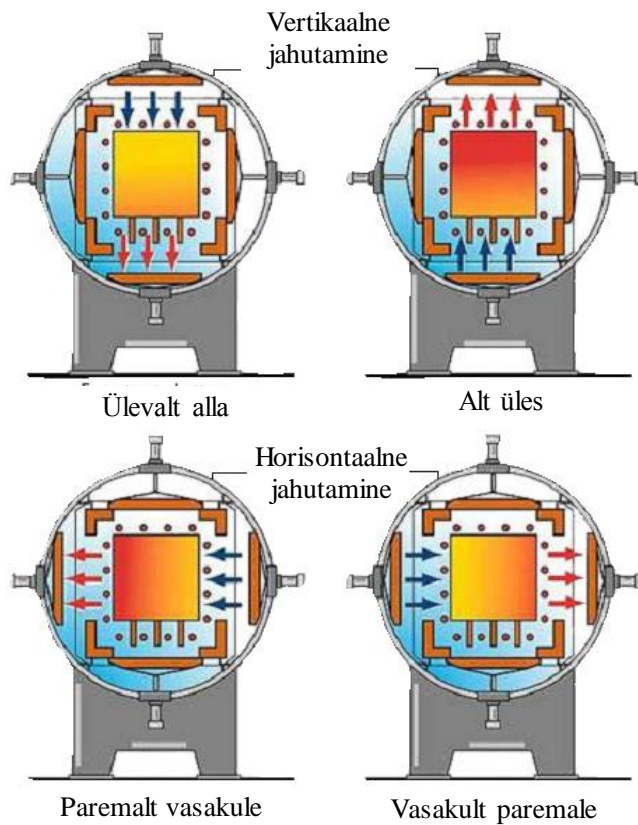
- hoida ära pinnapealsed reaktsioonid, nagu oksüdeerumine ja süsiniku väljapõlemine, tagades puhta pinna;
- eemaldada pinnasaasteid, nagu oksiidiribad ja töötlusprotsessides kasutatud vedelike jäägid;
- lisada aineid pinnakihtidesse (näiteks süsinikuga rikastamine);
- eemaldada saastavaid aineid metallist vaakumi degaseeriva omaduse tõttu ( $H_2$  eemaldamine titaanist);
- ühendada materjale jootmisega või difusiooni teel. [6]



Sele 9 Vaakumtermotöötlus-tsükli skeem

Vaakumtermotöötamise alguses eemaldatakse ahjust õhk ja viiakse sisse kaitsegaas. Kaitsegaas hoiab ära detailide oksüdeerumise ja konventsiooniga aitab detailidel ühtlaselt kuumeneda.

Vaakumtermotöötlusel on vaakum tekitatud vaid austenitiseerimise ajal (alates 850 °C), kuna sel hetkel on töödeldava terase pind kõige vastuvõtlikum erinevatele gaasidele. Jahutamise alguses tõuseb kiiresti inertse gaasiga tekitatud ülerõhk, mis tagab kiirema jahutuse. Gaasi suunatakse vahelduvalt kas ülevalt alla ja alt üles või vasakult paremale ning paremalt vasakule (Sele 10). Suundade vahetus toimub programmis ette nähtud aegade tagant. [14]



Sele 10 Vaakumahju erinevad jahutamise süsteemid. [15]

### **3. TÖÖS KASUTATUD UURIMISMEETODID**

#### **3.1 Termotöötuse teostamine TTÜ MTI metallograafia laboris**

TTÜ Materjalitehnika instituudi metallograafia laboris teostatakse termotöötuse väikeste mõõtmetega katsekehadele. Detailideks võivad olla nii pisemad tooted kui ka materjalist välja lõigatud ribad, ristkülikud jms. Uuritavate katsekehade paigutamisel ahju jälgitakse, et detailid oleksid alusel ning ei puutuks kokku teiste uuritavate detailidega. Antud paigutus on oluline katsekehade võrdseks kuumutuseks ning jahtumiseks, vähendades võimalust katsekehade omavaheliseks mõjutamiseks. Ahi on enne detailide sisse paigutamist saavutanud soovitud austenitiseerimise temperatuuri.

Seisutusaega hakatakse lugema hetkest, mil detailid on saavutanud soovitud austenitiseerimise temperatuuri. Katsekehade temperatuuride jälgimiseks on ahju paigutatud etalonkatsekehasse pandud termopaar. Vähendamaks igal korral vajadust termopaaride kasutamiseks ning kiirendamiseks termotöötuse aega, tehti katsetused töös kasutatavate temperatuuride saavutamise aegade teadasaamiseks. Antud ajad kehtivad ainult sama kujuga detailidele konkreetsete temperatuuride korral.

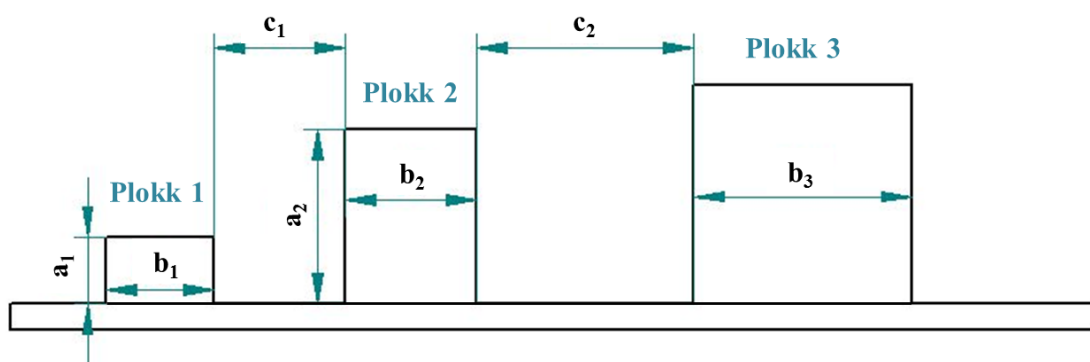
Soovitud austenitiseerimise temperatuuril hoidmise aeg on ette määratud. Seisutusaaja täitumisel võetakse detailid ahjust ning jahutatakse vastavalt katseplaanis ette nähtud keskkondades – vesi, õhk, õli või sool. Vesi, õhk ja õli on karastamise hetkel toatemperatuuril, soolale antakse katseplaaniga ette soovitud temperatuur, pärast mida lastakse detailil jahtuda enamasti õhu käes. Tööriistateraste katsetamisel on jahutuskeskkondadeks õli ja õhk.

Austenitiseerimise järgselt võidakse võtta välja üks detail, hindamiseks austenitiseerimise kvaliteeti. Ülejäänud detailid pannakse eelnevalt kuumutatud noolustusahju, hoitakse 2...3 tundi ning lastakse detailidel õhu käes jahtuda toatemperatuurini. Noolutusi teostatakse kolm korda, protsessiks vajalik temperatuur valitakse vastavalt tootja poolt koostatud noolustusdiagrammile.

## 3.2 Vaakumkarastus ettevõttes Stén & Co OÜ

Ettevõtte Stén & CO OÜ teostab tööriistateraste vaakumahjus termotöötlusti suurel määral ettevõttele AS Norma. Ühe partii suuruse termotöötlustel määrab suuresti soovitud töö tähtaeg. Töö hinda määratakse ahjutäite kaupa, seega, tellijal on kasulik, kui termotöötlust teostatakse võimalikult suure ahjutäituvusega. Seetõttu termotöödeldakse tööriistaterast S390 koos tööriistaterasega S690, mis seab piirangud termotöötluste temperatuuride valikule – need peavad sobima mõlemale terasele. Antud tööriistateraste töötlemisel ei satu tavaliselt teiste klientide detaile samasse ahju, kuna nii kõrget austenitiseerimise temperatuuri nõudvad terased on kasutuses hetkel vaid AS Normas.

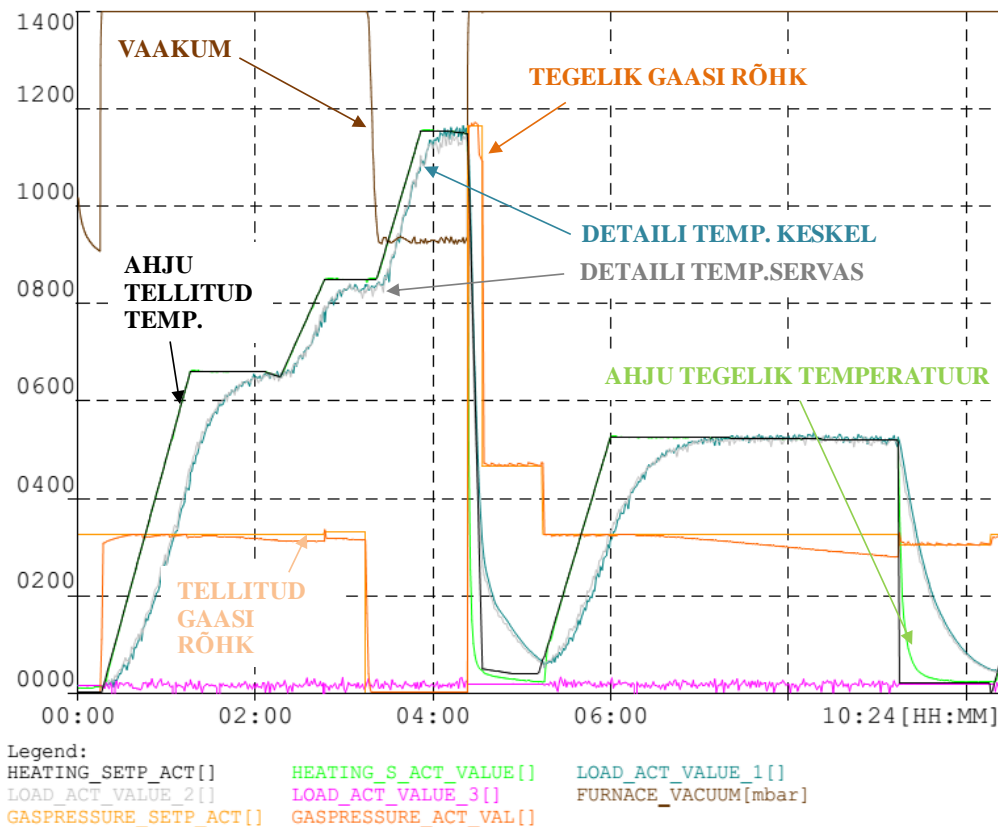
Detailide ahju paigutamisel tuleb tagada nende ühtlane kuumutamise kiirus ning võrdne ja võimalikult efektiivne jahutamise kiirus. Seetõttu paigutatakse detailid ahju nn kuldreegli alusel – kuumutatavate plokkide vahekaugus peab olema vähemalt võrdne või suurem ploki vähima küljepikkusega (Sele 11). Samuti paigutatakse detailid alati püsti, mitte pikali. Plaatidevaheline kaugus tagab jahutusgaasile hea ligipääsu. Jahutamine vaakumahjus toimub kahes suunas: ülevalt alla ja alt üles. Suundade vaheldumine toimub automaatselt iga 90 sekundi tagant.



Sele 11 Plokkide ahju paigutamise skeem. Plokk 1 on paigutatud valele küljele, sest  $a_1 < b_1$ , Plokkid 2 ja 3 on paigutatud õigesti, sest  $a \geq b$ . Blokkide vahekauguse arvestamisel peab blokkide vaheline kaugus olema suurem või võrdne kui laiema bloki läbimõõt ehk  $c_1 \geq b_2$  ja  $c_2 \geq b_3$ .



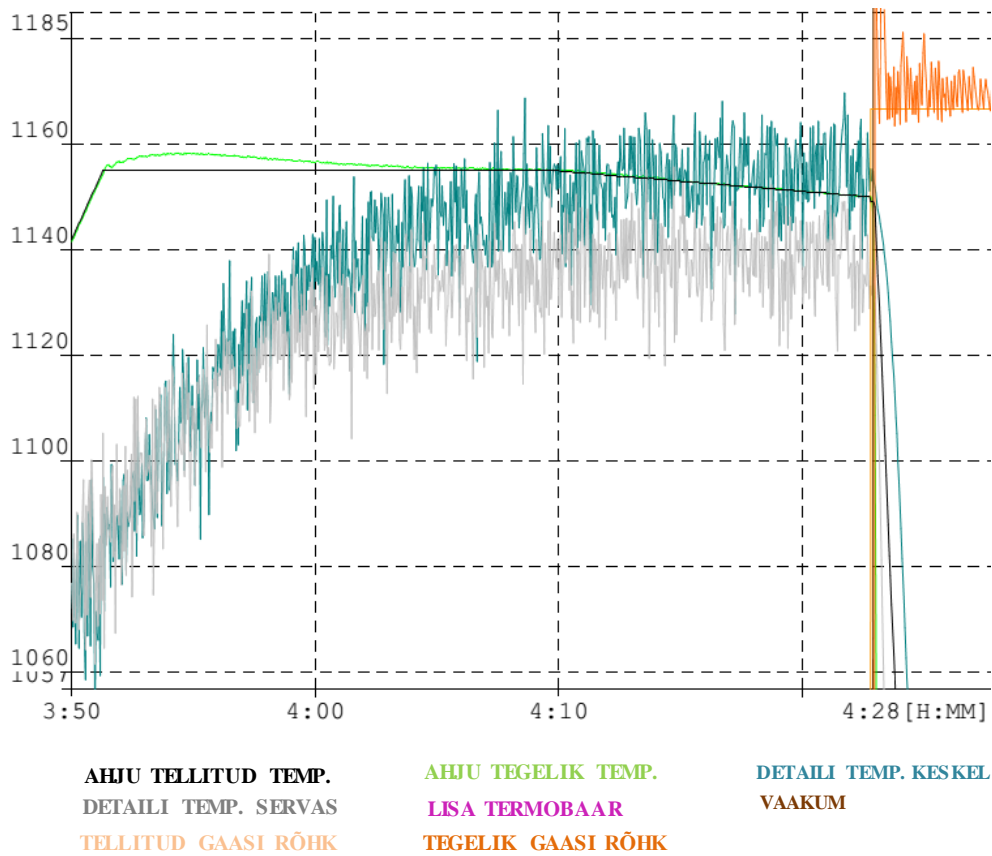
Detailide kuumutuse jälgimiseks, austenitiseerimise aja mõõtmiseks ning termotötluse kvaliteedi hindamiseks on ahjus suurimasse detaili paigutatud termopaar. Antud detail on omakorda paigutatud ahju keskmesse, kus temperatuuri saavutamine detailil toimub kõige aeglasemalt. Soome Stén & Co Oy esindaja A. Pieso hinnangul ei ole vaakumkarastusel niivõrd oluline termopaari asukoht ja kuumutuse jälgimine, kui seda on saavutatav detaili jahtumise kiirus.



Sele 12 Ettevõttes Stén & Co OÜ vaakumtermotötlusest saadav graafik

Eelkuumutusega on vajalik tagada detailide ühtlane ja üheaegselt kõrgele temperatuurile jõudmine, mis tagatakse astmelise kuumutamisega (kolm kuumutusastet) (Sele 12). Kuni 850 °C temperatuurini toimub kuumutus lämmastikukeskkonnas rõhul 1 bar (100 000 Pa), sealt edasi juba vaakumis. Austenitiseerimise temperatuuriks praktikas on 1180 °C, mida hoitakse umbes 10 min. Seda on rohkem kui ahju automaatne programm lubaks, mistõttu jälgitakse austenitiseerimise aega alati kõrvalt. Samuti toimub austenitiseerimise aja alguspunkti määramine termotötleja enda poolt ning võib olla sõltuvalt detailidele ja temperatuurile varieeruv (Sele 13). Vahemik, mille piires temperatuur võib kõikuda enne austenitiseerimise

temperatuuri saavutamist, on suhteliselt lai. Jahutamisel on standardset kasutusel ülerõhk 1,5...2 bar.



Sele 13 Vaakumtermotöötuse graafik – austenitiseerimine. Kolme Böhler S390 ploki termotöötus.

Tööriistateraste puhul kasutatakse kolmekordset noolutamist, millest kaks esimest on sama temperatuuriga ning kolmas 30...50 °C madalam. Esimene noolutus teostatakse kohe kui detail on jahtunud temperatuurile 40...70 °C. Ühe noolutuse pikkuseks on 2,5 tundi. Enamasti tõstetakse selleks detailid teise ahju, vabastamaks vaakumahi uute detailide jaoks. Soovi korral on võimalik teostada ka esimene noolutus vaakumahjus, mis teeb detailide termotöötuse kallimaks, kuid võimaldab samas saada infot temperatuuri kõikumiste kohta. Noolutuste vahel jahutatakse detailid vähemalt 50 °C juurde.

Termotöötuse kvaliteeti hinnatakse saavutatud kõvaduse alusel. Ettevõttes Stén & Co OÜ on kõvadusmõõturid taatlemata, kuid olemas on etalonkehad, mille alusel hinnatakse seadme tulemuste õigsust. Kõikide termotööteldud teraste kõvadused mõõdetakse üle ka AS Normas.

Erinevus kahe ettevõtte mõõtetulemuste vahel on 1...2 HRC ühikut. Noolutusahjude termopaarid on kalibreerinud AS Metrosert. Kvaliteetse termotöötlemise tagamiseks on uuendatud hiljuti termopaaride tulemuste salvestamise elektroonika. Sellega seoses on võimalik kliendile kaasa anda vaakumtermotöötlemise graafik, mis võimaldab hinnata termotöötlemise kvaliteeti.

### 3.3 Termotöötlemise kvaliteedi hindamine

Tagamaks, et termotöötlemisprotsessiga saavutati soovitud parameetrid ning kvaliteet, tuleb teostada protsessis osalenud detailidele katsetused. Praktikas kõige laiemalt levinud protsessi tulemuste hindamise viisiks on HRC kõvadus, sest enamasti on termotöötlemisrežiim valitud, lähtudes konkreetse kõvaduse saavutatavusest. Materjali sitkuse määramiseks ehk hindamiseks materjali kalduvust haprale purunemisele, kasutatakse löökpaindeteimi. Termotöötlemise ühtluse hindamiseks detaili ristlõikes ning saavutatavate struktuuride vaatlemiseks on vajalik mikrostruktuuri uuring. Kõikide mikrostruktuuriuuringute puhul on tegemist purustavate analüüsidega, kus uuritavast detailist lõigatakse tükk. Termotöödeldava ploki säilitamiseks võidakse see siduda lisakatsekehaga, mida on võimalik hiljem testida (näiteks löökpainde katsekeha).

#### 3.3.1 Kõvaduse ja löögisitkuse määramise meetodika

Materjali kõvadust mõõdetakse kindla kujuga otsiku materjali sisse surumise teel. Otsikust tingitud jälje suuruse järgi hinnatakse materjali kõvadust – mida suurem on jälg, seda väiksem on kõvadus. Rockwelli kõvaduse mõõtmise puhul on otsakuks koonus tipunurgaga 120°, skaaladeks on A, B, C, D, E, F, G, H, K, N ja T. Katsetamisel surutakse otsak eeljõuga  $F_0=98$  või 29,4 N materjali ning asend fikseeritakse. Antud koormusele lisatakse jõud  $F_1=1373...117,7$  N, pärast mida taastatakse esialgne jõud  $F_0$ . Rockwelli kõvadust iseloomustab otsaku materjali tungimise sügavuste vahe. [16]

$$HR = N - \frac{h}{S} ,$$

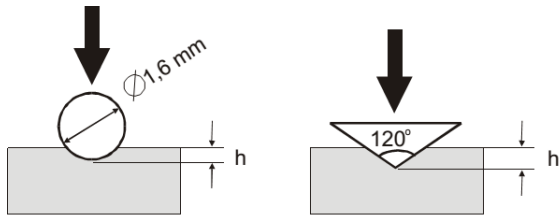
kus

$h$  – otsaku sissetungimise sügavus

$N$  – skaalakonstant

$S$  – skaalajaotis.

Näiteks HRA, HRC ja HRD korral  $HR = 100 - \frac{h}{0,002}$



Sele 14 Rockwelli kõvaduse määramise skeem [16]

Materjali katsetamine löökpaindele võimaldab määrata materjali vastupanu haprale purunemisele. Katsetus seisneb kahele toele toetatud ning keskelt sisselõiget omava teimiku purustamises löökpendliga, määrates teimiku purustamiseks kulunud töö. Löögisitkuse näitajaks on kulunud töö džaulides (J). Löökpaindeteimi katsetusel Charpy meetodil saab olla katsekeha soon kahte tüüpi:

- V-kujulise soonega profiilinurgaga  $45^\circ$ , sügavus 2 mm, soone põhja ümardusraadius 0,25 mm, (tähis KV);
- U-kujulise soonega, sügavus 5 mm, põhja ümardusraadius 1 mm, (tähis KU). [16]

Tööriistateraste löögisitkus on enamasti väga madal materjali suure kõvaduse tõttu. Vastavad materjalid on tundlikumad soontele, mille tõttu kasutatakse katsetustes siledaid, soonteta katsekehi mõõtudega 10 x 7 x 55 mm. Tulemused on tavaliselt esitatud J või alternatiivselt ka  $J/cm^2$ . [15]

### 3.3.2 Mikrostruktuuri uuringu teostamine

Mikrostruktuuri uuringute teostamise aluseks on katsekeha korrektne ettevalmistus, mis tagab, et mikroskoobis vaadeldav pind on rikkumata, puhas ning vastavuses tegeliku mikrostruktuuriga. Katsekeha ettevalmistus mikrostruktuuri uuringuteks koosneb järgmistest etappidest:

- 1) katsekeha valik ja tükeldamine;

- 2) katsekehade fikseerimine;
- 3) lihvimine ja poleerimine;
- 4) söövitamine.

Enamik struktuuri uuringuteks vajalikest seadmetest on vajalikud katsekeha prepareerimiseks (Tabel 3).

Tabel 3 Mikrostruktuuri uuringutes kasutatavad seadmed

<b>Jrk</b>	<b>Seadme nimetus</b>	<b>Kasutusvaldkond</b>
1	Struers Labotom	Lõikamine
2	Buehler Simplimet 3000	Katsekeha paigaldamine lihvi
3	Struers Planopol-3	Lihvimine
4	Buehler Phoenix 4000	Lihvimine ja poleerimine
5	Zeiss Axiovert 25	Valgusmikroskoop
6	Zeiss LaB6 type EVO MA-15	Skaneeriv elektronmikroskoop

Põhiliseks struktuuri vaatlemise seadmeks on optiline valgusmikroskoop Zeiss Axiovert 25. Mikrostruktuuride hindamiseks kasutatakse 50x, 100x, 200x, 500x ja 1000x suurendust. Väikesem suurendus on kasutusel materjali struktuuriosade jaotuse ja segregatsiooni hindamiseks, suuremad suurendused struktuuriosade ning pinnakihi täpsemaks analüüsiks. Metallograafialabori igapäevases praktikas hinnatakse mikrostruktuure standardi SEP 1520 alusel.

Skaneeriva elektronmikroskoobi Zeiss LaB6 tüüp EVO MA-15 abil teostatakse struktuuriuuringuid erinevatel suurendustel. Struktuuriuuringud on aeganõudvamad kui valgusmikroskoobiga, sest töö toimub suurematel suurendustel ning enne tööga alustamist tuleb mikroskoobi kamber vakumeerida. Samuti peab katsekeha olema fikseeritud voolu juhtivas materjalis või kaetud õhukese voolu juhtiva kihiga (näiteks kullaga). SEM võimaldab hinnata struktuuriosasid, mis valgusmikroskoobiga vaadeldes ei ole hinnatavad, nagu väiksemate karbiidide olemasolu ja suurus. Skaneerivat elektronmikroskoopi kasutatakse tavaliselt juhtudel, kui valgusmikroskoobiga ei ole võimalik ebapiisava suurenduse tõttu hinnangut anda.

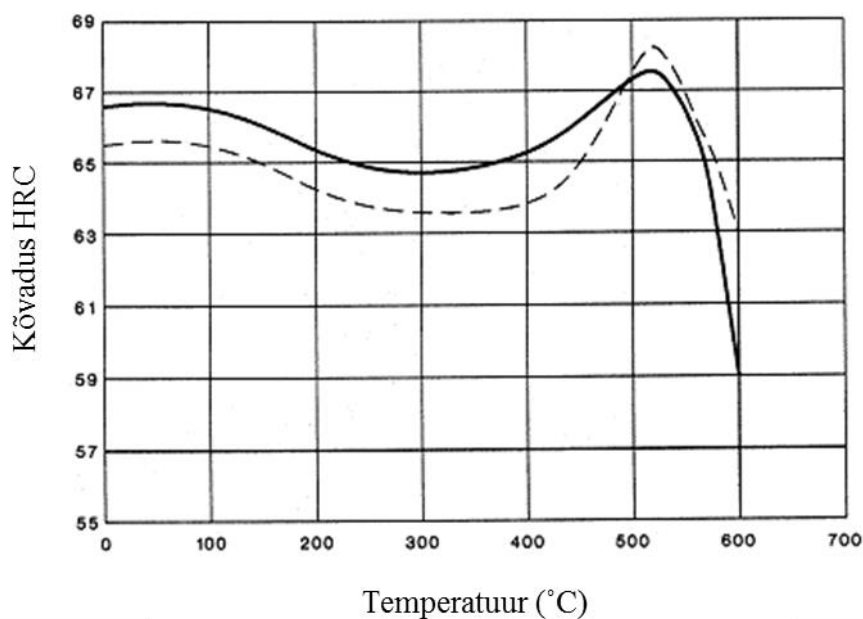
## **4. TERMOTÖÖTLUSREŽIIMI MÕJU SOOVITUD KÕVADUSE SAAVUTAMISEL**

Ettevõtete AS Norma ja Stén & Co OÜ koostöös avaldus probleem kiirlõiketerase S390 termotöötlusel etteantud kõvaduse 63–65 HRC saavutamisel. Vastavalt terase tootja Böhler Edestahl GMBH ja CO KG koostatud kiirlõiketerase S390 termotöötluste soovitudele [13] on austenitiseerimise temperatuurivahemikuks 1150...1230 °C. Tööriistaterastele soovitatakse võimalikult madalat temperatuuri, mis tagab parema sitkuse. Pärast temperatuuri saavutamist tuleb sellel detailil hoida enne jahutamist 80...150 sekundit. Karbiidide lahustumiseks on vajalik seisutusaeg vähemalt 80 sekundit. 150 sekundi ületamine võib aga kaasa tuua ülekuumutuse kahjustusi. Vaakumahju puhul pole nii lühike hoidmise aeg saavutatav ning seetõttu eeldati, et põhjus kõvaduse mitte saavutamises seisneb liiga madalas austenitiseerimise temperatuuris või vales temperatuuril hoidmise ajas.

### **4.1 Austenitiseerimise aja ja temperatuuri mõju õlisse karastamisel**

Austenitiseerimise temperatuuri ja aja mõju uurimiseks kiirlõike terase S390 kõvadusele ja struktuurile koostati katsetusemaatriks erinevate austenitiseerimistemperatuuride ja -aegadega. Hinnang toimunud termotöötlusele teostatakse Rockwelli C-skaala kõvaduste tulemuste ja mikrostruktuuri analüüsi põhjal.

I termotöötluskatsetuse temperatuuride valikul lähtuti terase tootja soovitatud austenitiseerimise temperatuuride vahemikust (1150 °C...1230 °C), valides katsetatavateks temperatuurideks vahemiku ülemise ja alumise piiri. Terase termotöötlusel kasutusel olnud temperatuuriga 1180 °C ei saavutatud nõutud kõvadust, mistõttu võrdlusmaterjali saamiseks lisati katsetustesse tugevalt alla soovitatud austenitiseerimise temperatuuride vahemikku jääv 1000 °C. Kuumutusaja valikul lähtuti soovitatud 80...150 sekundist ning võimalusest, et ülekuumutusega võivad kaasned materjali kahjustused. Valitud aegadeks võeti 2, 5, 30 ja 65 minutit. (Tabel 4)



Sele 15 Böhler S390 noolustusgraafik [13]

Pärast austenitiseerimist toimub detailide jahutamine õlis ning kolmekordne noolutus 520 °C juures. Temperatuuri valikul sooviti noolutusega saavutada materjalil maksimaalne võimalik kõvadus (Sele 15). Noolutuse aeg oli vahemikus 1 tund ja 40 minutit kuni 4 tundi ja 10 minutit. Noolutuste vahel jahtusid detailid õhu käes.

Tabel 4 I termotöötluskatsetusel kasutatud termotöötamise parameetrid

Austenitiseerimine				Noolutus 1		Noolutus 2		Noolutus 3		Jahutus-keskkond noolutuste vahel
Ahju temp. (°C)	Termopaari näit(°C)	Hoidmise aeg (min)	Jahutus-keskkond	Ahju temp. (°C)	Aeg (h:min)	Ahju temp. (°C)	Aeg (h:min)	Ahju temp. (°C)	Aeg (h:min)	
1000	999-1002	5	õli	520	2:30	520	2:30	520	3:30	õhk
1150	1120	2	õli	520	2:20	520	1:40	520	4:10	õhk
1150	1120	5	õli	520	2:20	520	1:40	520	4:10	õhk
1150	1148	30	õli	520	2:30	520	2:30	520	3:30	õhk
1150	1140	65	õli	520	2:30	520	2:30	520	3:30	õhk
1230	1190	2	õli	520	2:30	520	2:30	520	3:30	õhk
1230	1190	5	õli	520	2:30	520	2:30	520	3:30	õhk
1230	1190	30	õli	520	2:30	520	2:30	520	3:30	õhk

Termotöötamise tulemuste hindamiseks mõõdetakse materjalilt Rockwelli kõvadust C-skaalal pärast austenitiseerimist ja pärast noolutust. Samuti valmistati mikrolihvid materjalidest pärast noolutamist, hindamaks saavutatud struktuure. Austenitiseerimise temperatuuril 1230 °C

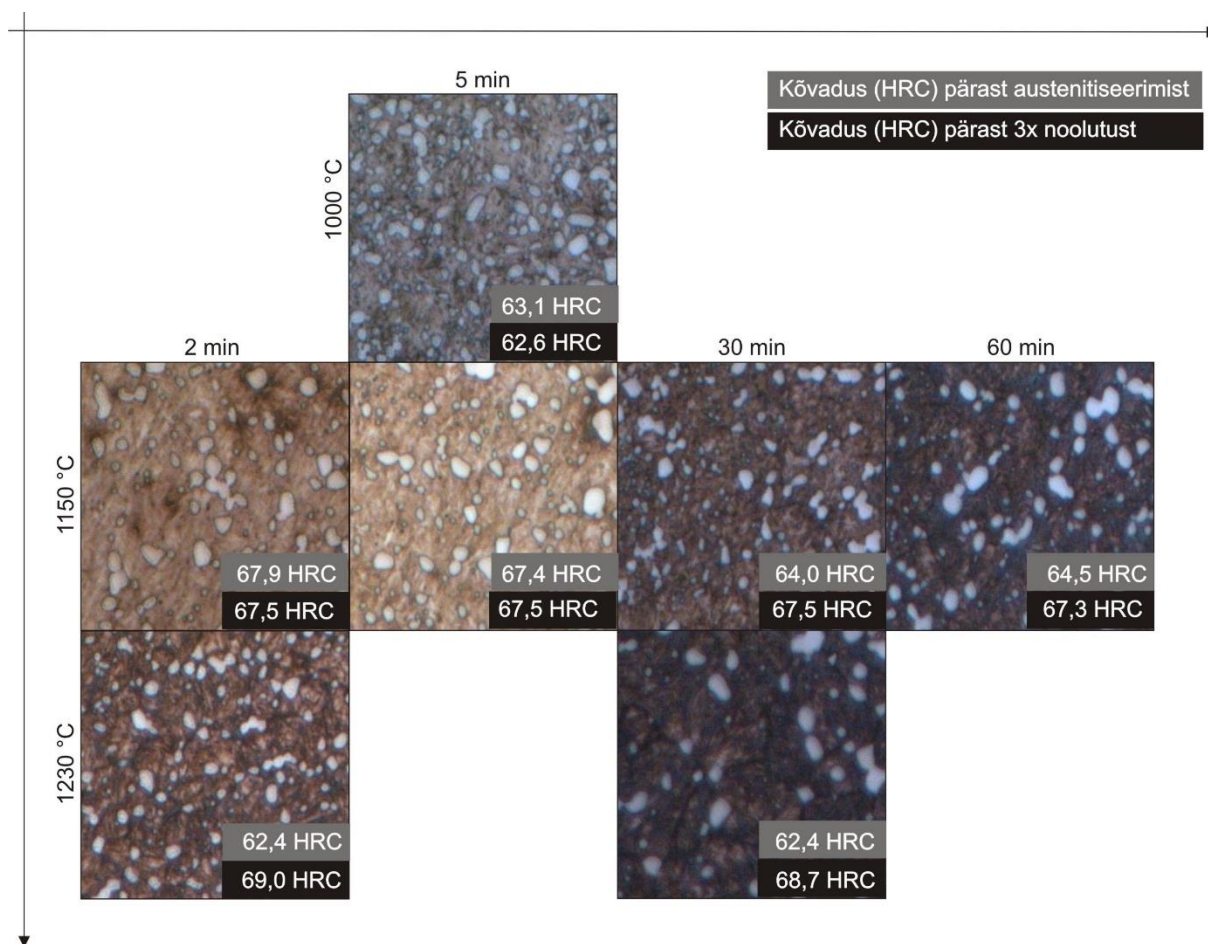
hoidmise ajaga 5 min puudub tulemus, sest struktuuripildist selgus, et antud detail oli teisest materjalist ning eksikombel sattunud S390 materjalide sekka.

Tabel 5 Erinevate termotöötlusrežiimidega saavutatud kõvadused

Jrk	Austenitiseerimise temp. (°C)	Aeg (min)	HRC	
			Pärast austenitiseerimist	Pärast noolust
1	1000	5	63,1	62,6
2	1150	2	67,9	67,5
3	1150	5	67,4	67,5
4	1150	30	64,0	67,5
5	1150	65	64,5	67,3
6	1230	2	62,4	69,0
7	1230	30	62,4	68,7

Kõikide katsetuste puhul saavutati pärast noolust nõutud 63 HRC (Tabel 5). Austenitiseerides tugevalt allpool soovitatud austenitiseerimise vahemikku 1000 °C juures seisutusajaga 5 min, saavutati kõige väiksem kõvadus. Antud temperatuur on materjali jaoks liialt madal, mistõttu karbiidid pole saanud piisaval määral lahustuda. Austenitiseerides 1150 °C juures seisutusajaga 2 või 5 minutit, ei mõjuta see oluliselt kõvadust. Pikendades seisutusaega, jääb materjali rohkem jääkausteniiti, millest on võimalik vabaneda noolutamise teel. Pikema seisutusaja korral ei ole enam erinevust, kas hoitakse 30 või 65 minutit. Austenitiseerides kiirlõiketerast ülemisel lubatud temperatuuril 1230 °C, väheneb seisutusaja mõju saavutavale kõvadusele, mida näitab sama kõvaduse tulemus pärast seisutamist nii kaks kui ka 30 minutit. Kõrgelt temperatuurilt kiiresti jahutades on tekkiva jääkausteniidi hulk suur, mida näitab madal 62 HRC kõvadus pärast austenitiseerimist. Noolutamisel jääkausteniidist vabanemisega tõusis kõvadus 69 HRC juurde.





Sele 16 Mikrostruktuuri fotod pärast austenitiseerimist ja kolmekordset noolutamist.

Mikrostruktuuride uurimise eesmärgiks oli tundma õppida materjali struktuure pärast erinevaid termotötluse režiime. Erinevate termotötluse parameetritega saavutatud mikrostruktuurid võimaldavad tulevikus hinnata termotöödeldud detailidele teostatud termotötlusi – saavutatud või saavutamata jäänud austenitiseerimistemperatuuri mõju või liiga lühikest või pikka seisutusaega. Antud mikrostruktuuridest sooviti koostada võrdlusmaterjal eelnevalt kirjeldatud olukordades mikrostruktuuride hindamiseks (Sele 16). Saadud mikrostruktuurid on omavahel väga sarnased, mistõttu kiire jahutamisega saadud mikrostruktuuri piltide põhjal ei ole võimalik hinnata materjalile teostatud austenitiseerimise aega või temperatuuri.

TTÜ laboris teostatud katsetuste põhjal on näha, et isegi madala austenitiseerimise temperatuuriga või liialt pika austenitiseerimise ajaga on võimalik saavutada soovitud 63...64 HRC kõvadus. Kiirel katsekehade jahutamisel ei ole termotötlusel valitud austenitiseerimise temperatuur või seisutusaeg kõvadust mõjutavateks teguriteks.

Erinevus TTÜ laboratoorselt saavutatud katsetuste ja ettevõttes Stén & Co OÜ teostatud termotöötlemise tulemuste vahel võib seisneda järgnevatel põhjustel:

- 1) ebatäpne austenitiseerimise aeg;
- 2) jahtumiskiiruste erinevus pärast austenitiseerimist;
- 3) ebasobiv noolutamise temperatuur.

Austenitiseerimise aja ebatäpsus seisneb seisutusaja algushetke lugemises. Detaili temperatuuri tõusmine aeglustub, kui katsekeha hakkab saavutama ahjuga sama temperatuuri. Termopaari näit võib olla tükki aega soovitud saavutatava temperatuuri lähedal ning sellisel juhul võib tegemist olla nii saavutamata õiges temperatuuris kui ka termopaari näidu mõõtemääramatuses olnud alaga. Ettevõttes Stén & Co OÜ hoitakse austenitiseerimise temperatuuril detaili 10...15 minutit, antud katsetusskeemi puhul 2...65 minutit, mistõttu saab järeldada, et austenitiseerimise ajas ei saanud seisneda kõvaduste mittedaavutamise ettevõttes. Metallograafia laboris saavutatud jahtumiskiiruste võrdlemisel ettevõttes saavutatutega selgus, et realselt kasutusel olev jahtumiskiirus on aeglasem kui laboris kasutatud õlisse karastusel ning seega on peamiseks tulemuste erinevuste põhjuseks materjali jahutamise kiirus. Antud katsetustes kasutati temperatuuri, mis vastavalt noolutusgraafikule peaks andma maksimaalse kõvaduse. Ettevõttes teostatud noolutusel võis olla kõrgem temperatuur, mis alandas materjali kõvadust.

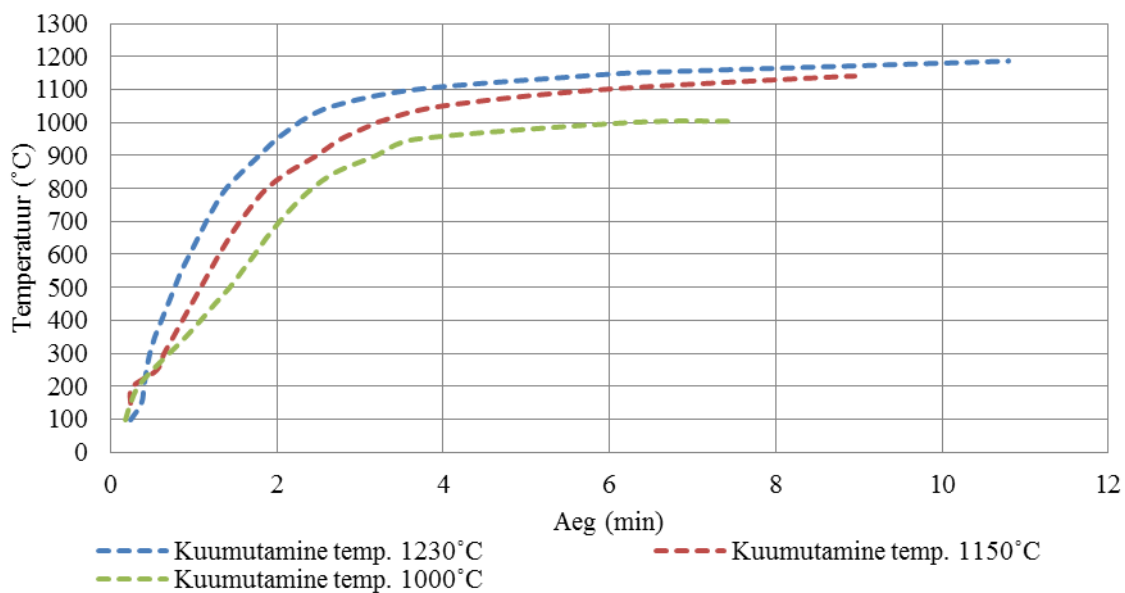
## **4.2 Laboratoorsete termotöötlemise režiimide väljatöötamine**

Erinevate erinevate termotöötlemisrežiimidega saavutatud parameetrite vahel on väike, mistõttu tuleb olla veendunud ja täpne katsetuste teostamisel. Seetõttu osutus vajalikuks ahju töö hindamine ning uuring antud katsekehadega termotöötlemise teostamisel. Samuti võimaldab täpsem ülevaade kuumutamise ja jahutamise ajast lihtsustada ja kiirendada termotöötlemise läbiviimist, vähendada reaalset ahju kõrval seismise ning protsessi jälgimise aega ja vajadust. Täpsustamiseks austenitiseerimiseks vajalikku seisutusaja alguspunkti, teostati kuumutamise uuring. Jahutamiskatsetuste eesmärgiks oli saavutada laboratoorsetes tingimustes väikese katsekehaga sarnane jahtumiskiirus ettevõttes termotöötlemise kasutatava plokiga.

Katsetusteks kasutati väikseid detaile mõõduga 10 x 7 x 55 mm. Detaili keskmesse oli puuritud ava termopaari jaoks. Ahjule määrati soovitud temperatuur ning oodati, kuni see oli ka selle saavutanud. Ahju temperatuuri hinnati nii ahju enda termopaari kui ka eraldi lisatud välise

termopaariga, mis pärast asetati jälgitava detaili avasse. Katsekeha asetati aluse peal koos termopaariga ahju. Kui detail oli saavutanud ahjuga sama temperatuuri, tõsteti katsekeha ahjust välja koos alusega ning jäeti jahtuma. Alusega koos jahtumine tagab aeglasema jahtumiskiiruse. Kogu protsessi vältel salvestas termopaar temperatuuri muutusi iga 0,01 minuti tagant.

Katsetuste käigus selgus, et ahjusisene termopaar ja katsetuste jaoks lisatud väline termopaar ei näita temperatuure üheselt. Mida kõrgemaks muutus temperatuur, seda suurem oli ka termopaaride erinevus. Töö käigus eeldati, et ahjusisene termopaar on täpsem, sest väline termopaar võib olla viga saanud. Soovitud temperatuuri saavutanud ahju lisati väline termopaar ning saadud näit kirjutati üles. Katsekehade ahjupanekul välise termopaariga hakati austenitiseerimise aega lugema hetkest, mil väline termopaar saavutas eelnevalt üles märgitud numbri ehk ahjuga sama temperatuuri. Kuna see väärtus oli madalam kui tegelik etteantud temperatuur, on detailide kuumutamise graafikul näha, et üks detailidest poleks justkui saavutanud etteantud temperatuuri (Sele 17).



Sele 17 Detailide austenitiseerimise temperatuuridele kuumutamine

Katsetuste tulemusena saadi antud mõõtmetega katsekehadele korral ajad, mille jooksul detailid saavutavad etteantud temperatuurid (Tabel 6). Vastavad ajad võimaldavad teostada laboratoorseid katsetusi välise termopaarita, mis vähendab abitegevuste aegasid termotöötlusprotsessis. Samuti saab ette arvestada kogu austenitiseerimiseks kuluvat aega ning sellega seoses väheneb termotöötaja poolt tekkiv määramatus austenitiseerimise temperatuuri saavutamise hetke lugemisel.

Tabel 6 Detaili austenitiseerimise temperatuurile jõudmise aeg

Austenitiseerimise temp (°C)	Aeg (min)
1000	6,23
1150	8,72
1230	10,8

Detailide jahutamisel õlisse toimub jahtumine kiiresti, mis on suureks määrajaks materjali kõvaduse ning martensiitse struktuuri saavutamisel. Ettevõttest Stén & Co OÜ saadud info põhjal on detailide jahtumiskiirus iseloomustav  $\lambda = 1,5...1,8$  (Tabel 7). Info on saadud ettevõttes töötavalt termotöötlejalt, kes kirjutas vastavad ajad koos temperatuuridega jahutamise protsessi kõrvalt jälgides. Antud ajahetkel puudus ettevõttes temperatuuri muutuste automaatne salvestamise võimalus termotöötlusprotsesside teostamisel ning seetõttu ei saa neid andmeid ka täielikult usaldada.

Tabel 7 Ettevõttest Stén & Co OÜ saadud jahtumise aeg

Katse 1		Katse 2	
Aeg (min)	Temp (°C)	Aeg (min)	Temp (°C)
0	1185	0	1060
2,7	750	2,5	650
5,7	400	5	300
$\lambda = 1,8$		$\lambda = 1,5$	

TTÜ katselaboratoriumis teostatud jahtumiskatsetuste korral saavutati kiirem jahtumine ja seega väiksem  $\lambda$  väärtus kui vaakumahjus teostatava jahtumise korral (Tabel 8).

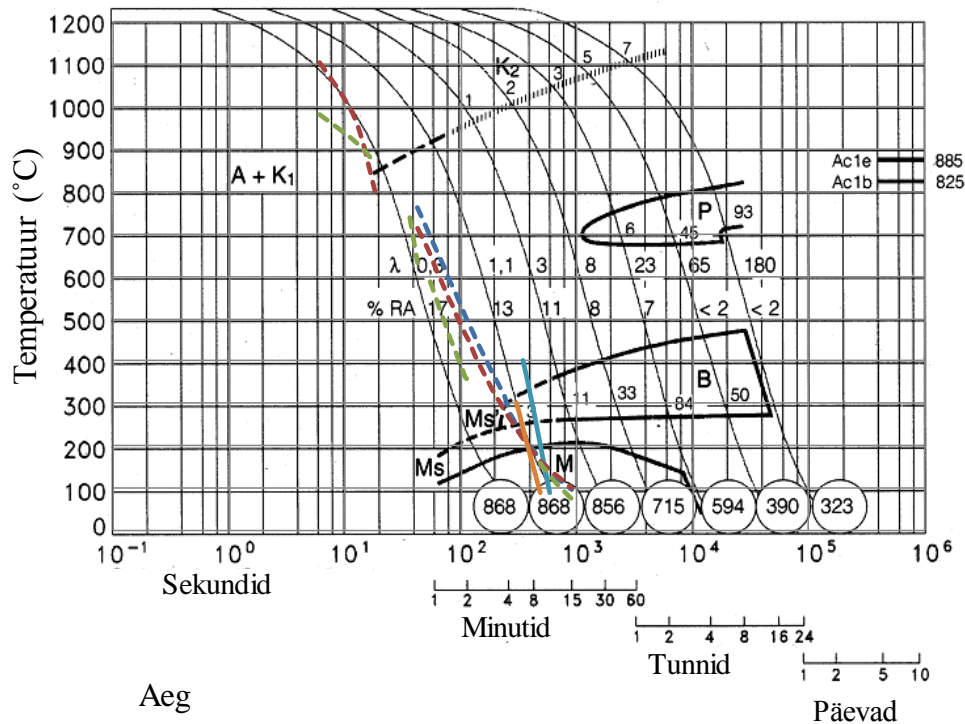
Tabel 8 TTÜ metallograafia laboris katsekehade jahtumise aeg õhu käes jahutamisel

Austenitiseerimise temp. (°C)	Temp 1 (°C)	Saavutamise aeg 1 (min)	Temp 2 (°C)	Saavutamise aeg 2 (min)	$\lambda = \frac{(aeg2 - aeg1) * 60}{100}$
1230	814	0,18	501	1,84	0,996
1150	800	0,3	500	1,56	0,756
1000	835	0,36	502	1,15	0,474

TTÜs saavutatav  $\lambda$  jääb vahemikku 0,47...1,0; ettevõttes Stén & Co OÜ saavutatav jahtumise kiirus  $\lambda = 1,5...1,8$ . Tulemustest on näha, et ka sarnaste detailide jahutamisel samalt temperatuurilt võib olla jahtumise kiirus erinev. Võrreldes jahtumiskiirust Böhler S390 CCT diagrammiga, on näha, et nii TTÜ metallograafia laboris teostatud jahtumiste kui ka ettevõttes

Stén & Co OÜ teostatud katsetuste korral lõikavad jahtumisjooned samu struktuuriosasid (Sele 18).

- Jahtumine õhu käes temp. 1230°C
- Jahtumine õhu käes temp. 1150°C
- Jahtumine õhu käes temp. 1000°C
- Jahtumine vaakumahjus temp. 1185°C
- Jahtumine vaakumahjus temp. 1060°C



Sele 18 TTÜ Metallograafia laboris teostatud õhu käes jahtumiste ning ettevõttes Stén & Co OÜ vaakumahju jahtumise võrdlus Böhler S390 CCT diagrammiga [13]

### 4.3 Katsetused täpsustatud termotöötamise režiimidega

Eelnevate katsetulemustele ning kirjandusele toetudes on suurimaks teguriks kõvaduse saavutamisel detailide jahutamise efektiivsus. Jahtumiskiiruse tegeliku mõju hindamiseks teostati samade austenitiseerimise temperatuuride ning aegadega katseskeem ettevõttes teostatava jahtumiskiirusega sarnaselt (Tabel 9). Varasemalt teostatud katsetuste põhjal on näha, et erinevused erinevate austenitiseerimise aegade vahel on väikesed, mistõttu seekord valiti katsetamiseks kaks hoidmise aega – 2 ja 30 minutit. Pärast austenitiseerimist tõsteti termotöödeldavad detailid õhu kätte, kus nad jahtusid toatemperatuurini koos alusega. Detailidele teostati kolmekordne noolutus, millest kolmas oli eelnevatest 50 °C võrra madalama temperatuuriga. Noolutustemperatuur on valitud vastavalt ettevõtte Stén & Co OÜ soovitusel.

Tabel 9 II Termotöötluskatsetuse skeem aeglase jahutamisega

Austenitiseermise temp (°C)	Seisutusaeg (min)	Jahtumine	Noolutus 1		Noolutus 2		Noolutus 3	
			Temp. (°C)	Aeg	Temp. (°C)	Aeg	Temp (°C)	Aeg
1000	2	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
1000	30	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
1150	2	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
1150	30	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
1230	2	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
1230	30	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min

Termotöötluses oli iga austenitiseerimise temperatuuri ja aja kohta kolm detaili. Vahetult pärast austenitiseerimist lõigati ühelt detaililt tükk, millelt mõõdeti saavutatav kõvadus ning valmistati mikrolihv struktuuriuuringute teostamiseks. Kõik detailid läbisid pärast austenitiseerimist samasuguse noolutusprotsessi, millele järgnes kõvaduse ja mikrostruktuuri uuring ühelt katsekehalt.

Termotöötlusega saavutatud kõvadused on toodud Lisas 3, mikrostruktuurid pärast austenitiseerimist Lisas 4 ning pärast noolutust Lisas 5. Aeglase jahutamise korral saavutasid detailid erinevamaid kõvadusi, kui seda oli õlisse karastamise puhul (Tabel 10). Kasutades 1000 °C austenitiseerimise temperatuuri, on vajalik pikem seisutusaeg, et saavutada kõrgem kõvadus. Sama kehtib ka austenitiseerimisel temperatuuril 1150 °C. Temperatuuri 1230 °C korral muudab aga pikem seisutusaeg materjali pehmeks karbiidide lahustumise tõttu materjalis.

Tabel 10 II Termotöötluskatsetuste tulemused. Kõvadus pärast austenitiseerimist ja noolutust

Austenitiseermise temp (°C)	Aeg (min)	HRC pärast austenitiseerimist		HRC pärast 3 x noolutust	
	Hoidmine	Keskmine	STDEV	Keskmine	STDEV
1000	2	57,1	0,2	55,6	0,2
1000	30	62,4	0,6	56,2	0,1
1150	2	63,1	0,5	62,6	0,1
1150	30	65,6	0,7	63,6	0,2
1230	2	64,7	1,0	63,3	0,1
1230	30	62,6	0,4	61,9	0,4

Pärast noolutust on 1150 °C ja 1230 °C juures termotöödeldud detailid kõvadusega 61,9–63,6 HRC. Noolutustemperatuuri muutmisega on võimalik materjalide kõvadusi tõsta (Sele 15), mistõttu saab öelda, et ka aeglasema jahtumise korral on võimalik saavutada nõutud kõvadus. Löögisitkuse katsetustest (Tabel 11) on näha, et lühema austenitiseerimisajaga teostatud termotöötlus annab ka parema sitkuse. Katsetuste teostamist alustati detailidest, mille austenitiseerimise temperatuur oli olnud kõrgem. 1000 °C ja 30 min seisutusajaga termotöödeldud detaili katsetamise käigus purunes löökpaindeteimi tempel.

Tabel 11 II Termotöötluskatse tulemused. Löögisitkus

Austenitiseermise temp (°C)	Seisutusaeg (min)	Löögisitkus (KJ)				
		1	2	3	Keskmine	STDEV
1000	2	-	-	-	-	-
1000	30	-	30	-	30,0	-
1150	2	21	17	17	18,3	2,3
1150	30	13	13	8	11,3	2,9
1230	2	19,4	24	14	19,1	5,0
1230	30	12	13	14	13,0	1,0

Laboris teostatavatest jahutamistest kõige aeglasema jahtumiskiiruse juures ehk õhu käes jahutades saavutati pärast austenitiseerimist kõvadus 57,1...62,6 HRC ning pärast noolutust 55,6...63,6 HRC. Antud jahtumiskiirus on kiirem kui ettevõttes Stén & Co OÜ kasutusel olev kiirus. Kõvadust pärast noolutust oleks võimalik tõsta kui muuta noolutamise temperatuuri. Ettevõttes teostataval termotöötlusel võivad olla Böhler S390 puhul kasutusel liialt suured detailid, mida vaakumahi ei suuda piisavalt kiiresti jahutada, või on valitud noolutusel liialt kõrge temperatuur.

## 5. TERMOTÖÖDELDAVA PLOKI SUURUSE MÕJU KÕVADUSELE

Kiirlõike terase S390 vaakumahjus teostatud termotöötuse korral ei saavutata alati soovitud kõvadust (63–64 HRC). Erinevate austenitiseerimise aegade ja jahtumiskiiruste katsetamisel TTÜ MTI metallograafia laboris selgus, et enim mõjutavaks teguriks kõvaduse saavutamisel on jahtumise kiirus kohes pärast austenitiseerimist. Jahutus vaakumahjus teostatakse enamasti 2 bar rõhu juures, millega saavutatav jahtumiskiirus ei pruugi olla piisav. Kõvaduse saavutamiseks termotöötusel võib olla vajalik jahutamisel kiiruse suurendamine, termotöödeldavate detailide maksimaalsete mõõtmete vähendamine või ühe korraga termotöödeldavate detailide koguse vähendamine.

### 5.1 Jahtumiskiiruste mõõtmine Stén & Co OÜ vaakumahjus

Termotöötusel kõige määravamaks osaks kõvaduse saavutamisel on detailide jahtumise kiirus pärast austenitiseerimist. Jahtumise hindamiseks termotöötlusahjus katsetati kahte erinevat olukorda:

- 1) ploki jahtumine kõrgendatud rõhuga väikese ahju täituvuse korral;
- 2) erinevate suurustega plokkide jahtumine kõrgendatud rõhuga täis ahju korral.

Esimese olukorra simuleerimiseks asetati vaakumahju kolm Böhler S390 testplokki mõõtmetega 66,0 x 81,0 x 112,5 mm (601,4 cm<sup>3</sup>) (Sele 19). Ahjus on palju vaba ruumi plokkide vahel ning seega on tagatud detailide parim võimalik jahutamine antud tingimuste juures.

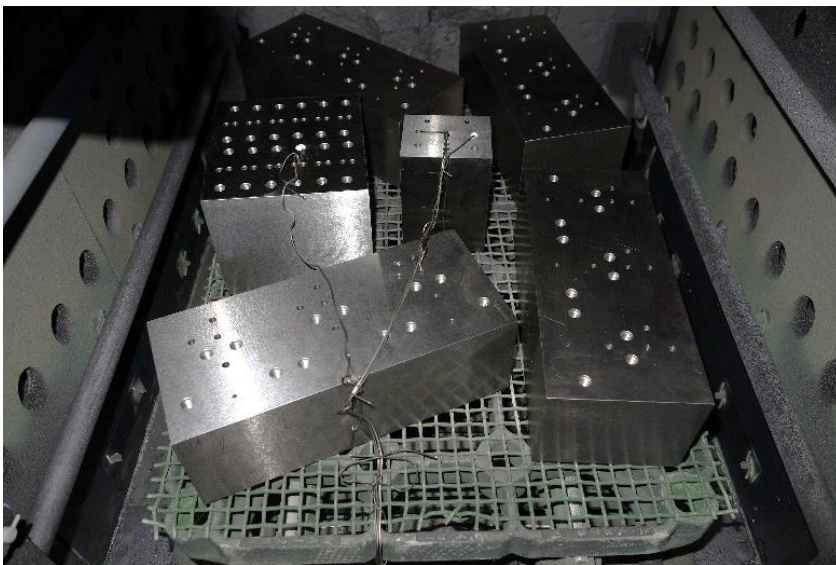




Sele 19 Kolme Böhler S390 ploki paigutus vaakumahjus

Teise olukorra simuleerimiseks täideti ahi võimalikult suurte Böhler K490 plokkidega (Sele 20). Katseplokkide jahtumiskiiruste võrdlemiseks eelneva olukorraga lisati samade mõõtmetega (66,0 x 81,0 x 112,5 mm) Böhler K110 testplokk ahju keskmesse.

Temperatuuri jälgimiseks oli mõlemas katsetuses kasutusel kaks termopaari ploki mõõtmetega 66,0 x 81,0 x 112,5 mm. Üks termopaaridest asetses ploki keskel ning teine 2 cm kaugusel servast. Teises katsetuses oli termopaar lisatud veel kõige suurema ploki, mõõtmetega 150 x 137 x 112 mm (2301,6 cm<sup>3</sup>), keskmesse.

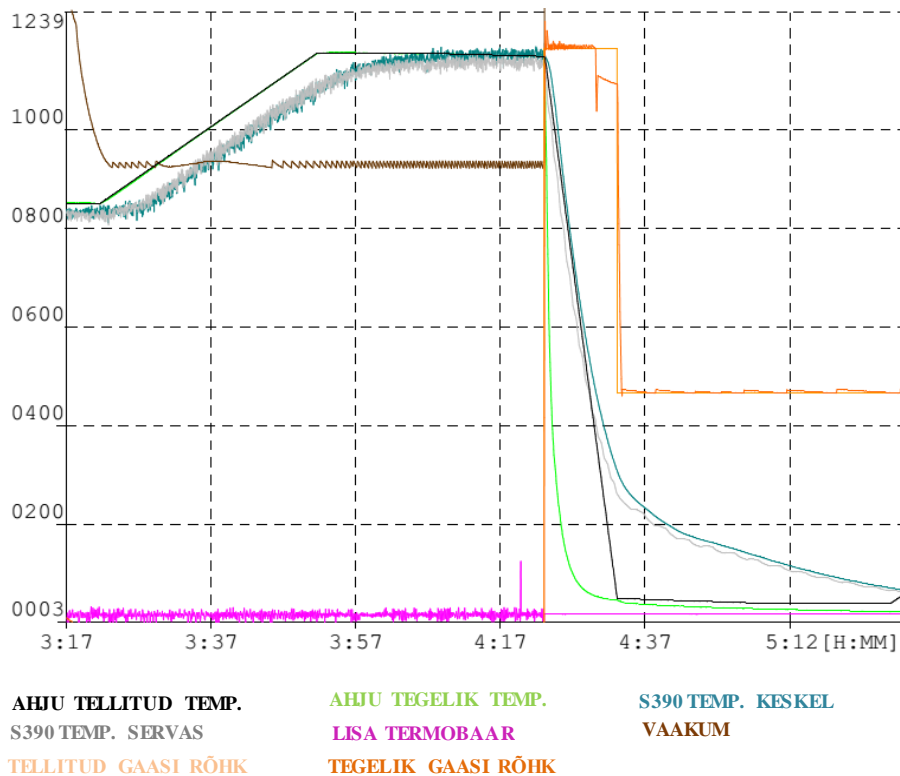


Sele 20 Böhler K490 ja K110 plokkide paigutus ning termopaaride asukohad vaakumahjus

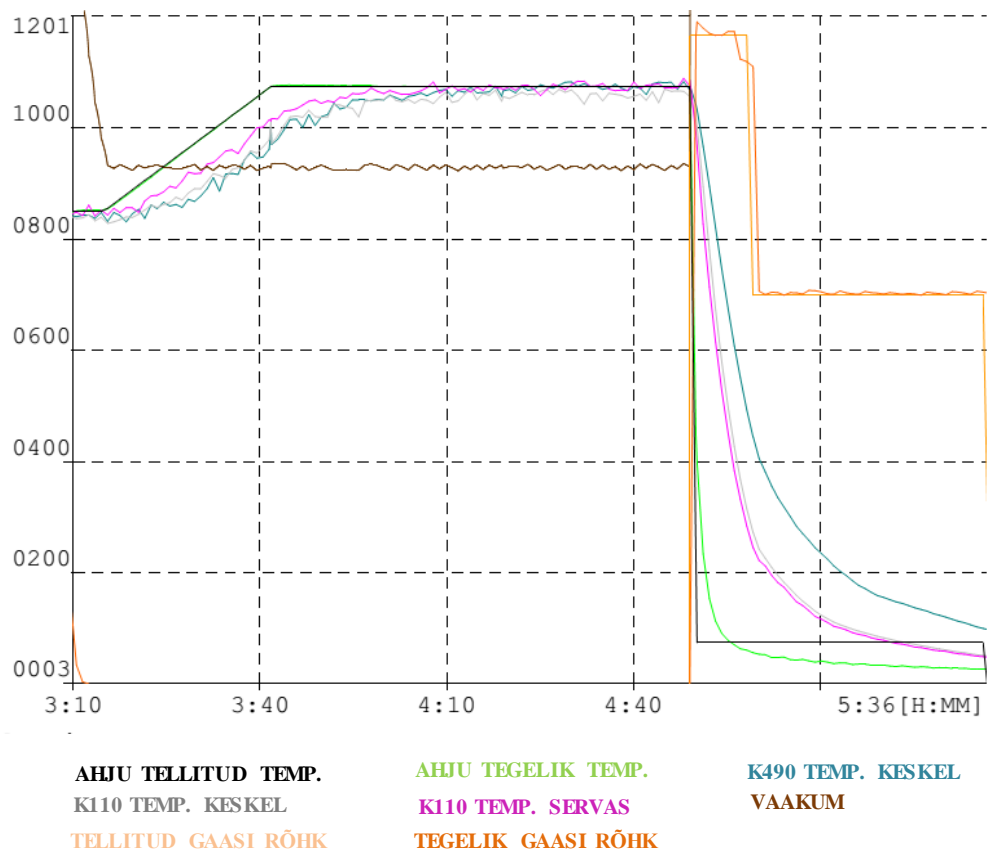
Tabel 12 Termotöötlusparameetrid jahtumiskiiruste hindamiseks

Jrk nr	Katsekehad	Austenitiseerimine		Jahutus 1			Jahutus 2		
		Temp (°C)	Seisutusaeg (min)	(bar)	(rpm)	Aeg (min)	(bar)	(rpm)	Aeg (min)
1	3 Böhler S390 plokki	1150	13	4	3000	10	2	1500	30-70
2	K490 suured plokid ja K110 plokk	1075	4	3000	10	2	1500	kuni toa temp.	

Katseplokkide kiire jahtumise saavutamiseks kasutati pärast austenitiseerimist esimesel kümnel minutil kõrgemat rõhku (Tabel 12). Ettevõttes teostatavaks tavapraktikaks on ühtlane 2 bar rõhu juures toimuv jahutamine kogu jahtumise ulatuses. Antud katsetuste puhul sooviti efektiivsema jahutamisega saavutada kõrgemat võimalikku kõvadust.

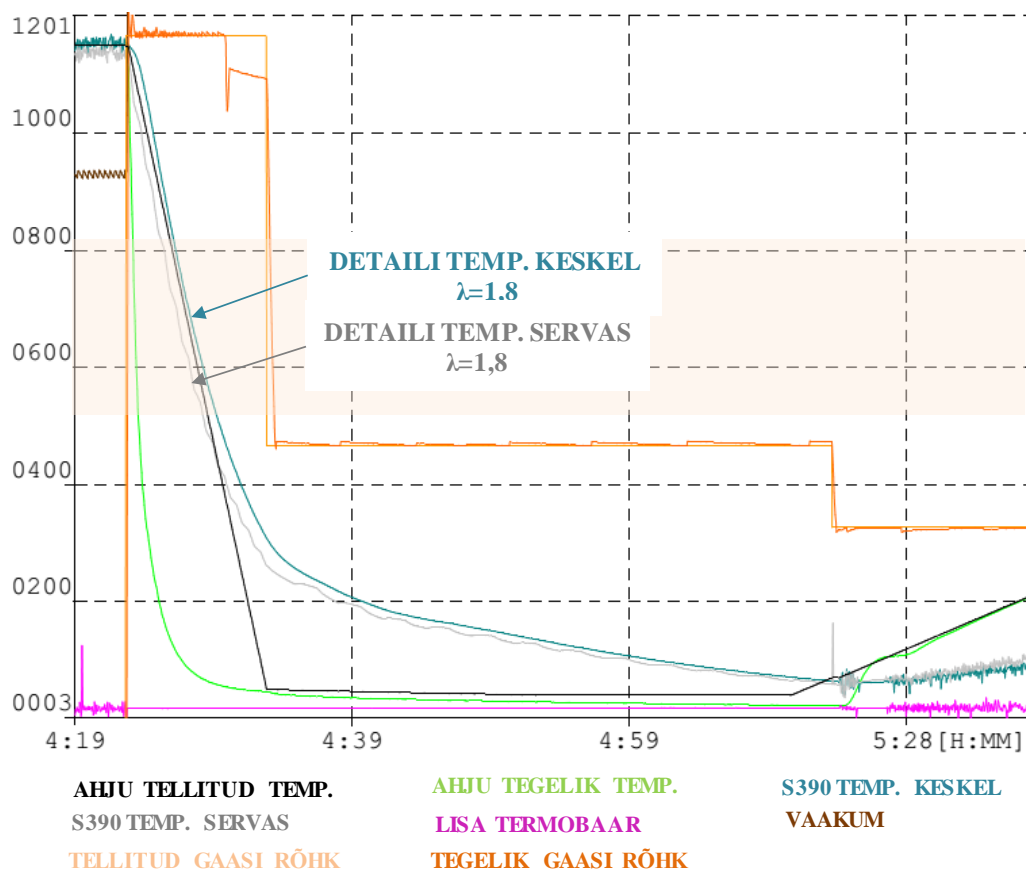


Sele 21 Vaakumtermotöötluste graafik. Ploki austenitiseerimine ja jahtumine ahju väikese täituvuse korral



Sele 22 Vaakumtermotöötuse graafik. Plokkide austenitiseerimine ja jahtumine täisahju korral

Vaakumtermotöötusest saadavad graafikud näitavad, et termotöötlus vaakumahjus on kontrollitav ning termotöötuse kvaliteet jälgitav. Ahju temperatuur ning gaasi rõhk on vastavuses tellitud temperatuuri ja rõhuga. Austenitiseerimise temperatuuril seisutusaja alguspunkti lugemise hetk on raskesti fikseeritav ning võib olla ebatäpne. Varieeruvus seisutusajas ei oma lõpptulemusele suurt mõju, kui pärast austenitiseerimist toimub kiire plokkide jahutamine.

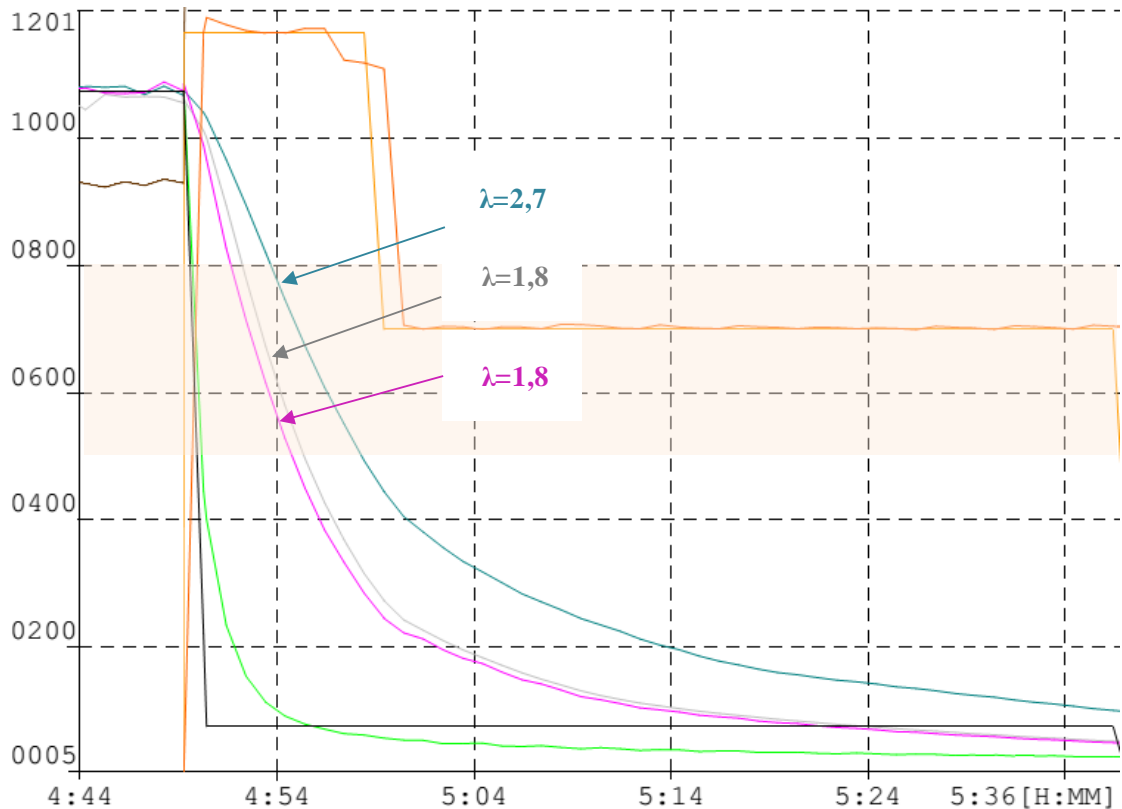


Sele 23 Vaakumtermotöötamise graafik. Ploki jahtumine ahju väikese täituvuse korral

Väiksemasse ploki asetatud kahe termopaari põhjal on näha, et mõlema katsetuse puhul on kogu termotöötamise lõikes katsekeha keskosa ja serv sarnase temperatuuriga (Sele 21, Sele 22). Esimeses termotöötamises kasutatud detailist löigati pärast noolutust välja ristkülik terve ristlõike ulatuses, millelt mõõdeti kõvadus iga 15 mm tagant (Tabel 13). Vaakumtermotöötamise tulemusena saavutati ploki ühtlane kõvadus ning omadused läbi terve ristlõike.

Tabel 13 Ahju väikese täituvusega termotööteldud ja noolutatud Böhler S390 ploki HRC kõvadus läbi ristlõike

Böhler S390 termotööteldud ja noolutatud HRC kõvadus läbi ploki ristlõike												Average	STDEV
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
67,0	67,1	67,0	67,2	66,2	67,2	66,5	67,2	67,0	67,3	66,8		<b>67,0</b>	<b>0,3</b>



**AHJU TELLITUD TEMP.**  
**K110 TEMP. KESKEL**  
**TELLITUD GAASI RÕHK**

**AHJU TEGELIK TEMP.**  
**K110 TEMP. SERVAS**  
**TEGELIK GAASI RÕHK**

**K490 TEMP. KESKEL**  
**VAAKUM**

Sele 24 Vaakumtermotöötuse graafik. Plokkide jahtumine täisahju korral

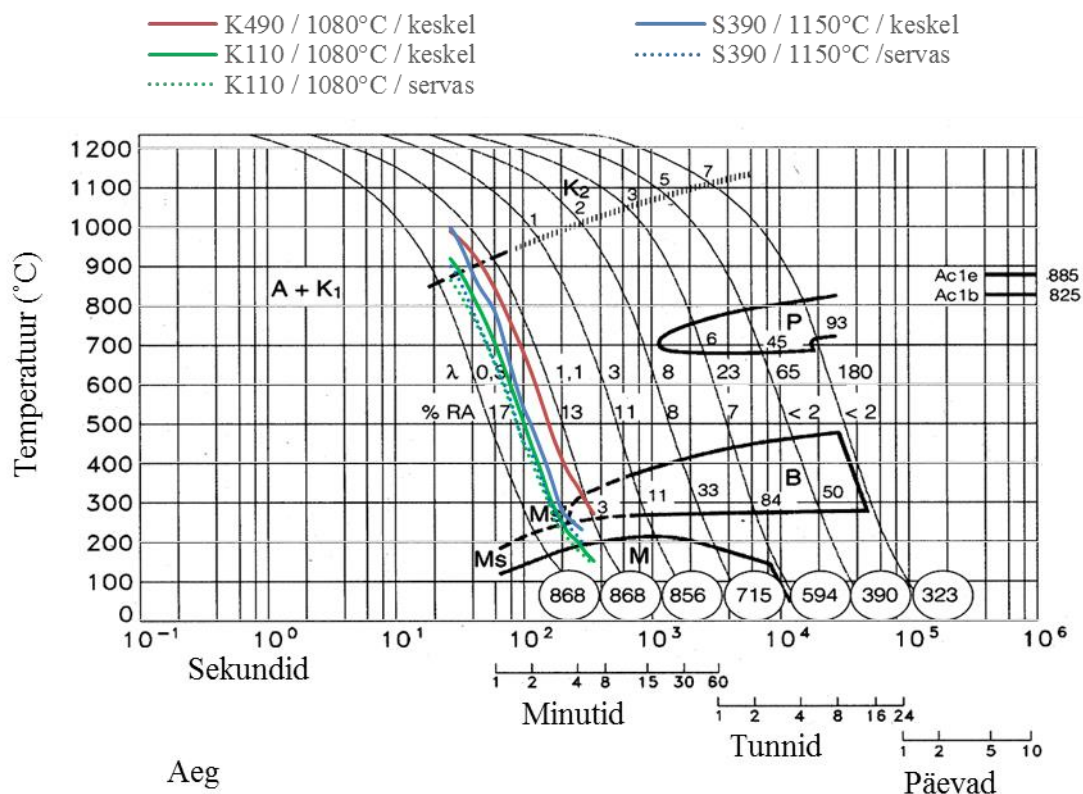
Tabel 14 Jahtumiskiirused erinevate plokkide jahutamisel vaakumahjus.

Ploki materjal/ Austeniti- seerimise temp./ termopaari asukoht	Böhler S390/ 1150 °C/ keskel	Böhler S390/ 1150 °C/ servas	K490/ 1080 °C/ keskel	K110/ 1080 °C/ keskel	K110/ 1080 °C/ servas
Temp (°C)	Aeg (min)	Aeg (min)	Aeg (min)	Aeg (min)	Aeg (min)
800	26,5	25,5	4,5	3	2,5
500	29,5	28,5	9	6	5,5
$\Lambda$	1,8	1,8	2,7	1,8	1,8

Ahju täituvusest sõltumata jahtus ahju keskosas olev detail sama jahtumiskiirusega  $\lambda = 1,8$  (Tabel 14). Suurema detaili jahtumiskiirus oli tunduvalt madalam,  $\lambda = 2,7$ . Plokkide jahtumine on mõlemal juhul aeglasem, kui esialgselt ettevõtte poolt edastatud andmed seda näitasid ( $\lambda = 1,5 \dots 1,8$ ). Erinevus on suure tõenäosusega tingitud esialgsete andmete ebatäpsusest.

## 5.2 Materjali mõju ploki suuruse valikul

Vaakumtermotöötuse kvaliteedi tagamiseks ja kõvaduse saavutamiseks on oluline termotöödeldavate plokkide kiire jahutamine. Jahutamise kiirust mõjutavad ahju paigutatud plokkide omavaheline kaugus, jahutamiseks kasutatava rõhu suurus ning iga ploki suurus. Ettevõttes Stén & Co OÜ pole jahutamisel rõhu suurendamine üle 6 bar võimalik, kuna kõrgemal rõhul amortiseeruks ahi kiiremini ning termotöötuse hind kasvaks. Vahekauguste korralikul jälgimisel saavad korrektse jahutuse kõik detailid. Suurimaks teguriks jahutamise kiiruse langemisel on iga üksiku ploki suurus. Sõltuvalt materjalis sisalduvatest legeerelementidest ning süsiniku sisaldusest, muutub materjali läbikarastatavus, mistõttu muutuvad ka võimalikud ploki suurused kõrge kõvaduse saavutamiseks. Sellega seoses on olulisel kohal ka austenitiseerimise temperatuur, millelt jahutamist alustatakse.



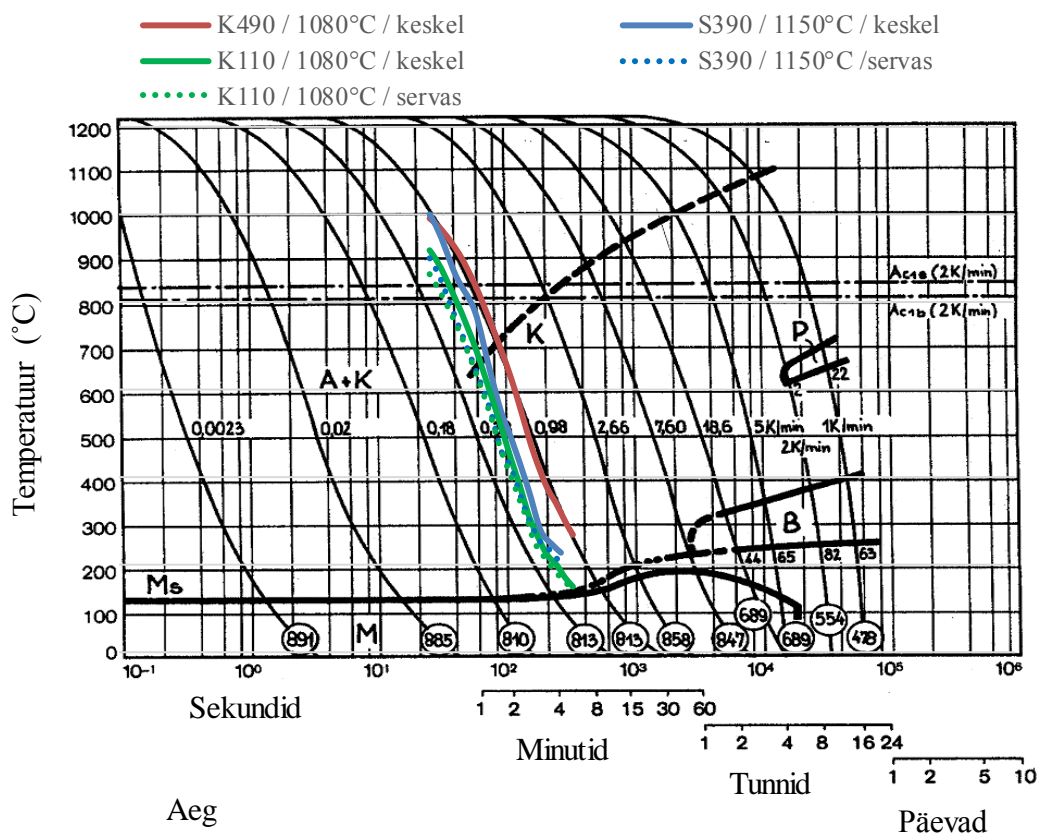
Sele 25 Plokkide jahutamise kiirused S390 CCT diagrammil. [13]

Vaakumahjus protsessist saadud detailide jahutamiskõverad viidi logaritmilisse skaalasse ning ühildati Böhler S390 pidevjahtumise diagrammiga (Sele 25). Kuigi plokkide K110 ja S390

mõõtmel ega ka jahtumiskiiruse näitaja  $\lambda$  ei erine (Tabel 15), ei kattu nende jooned CCT diagrammidel. Erinevus on tingitud erinevatest austenitiseerimise temperatuuridest, millelt jahutamine algas.

Tabel 15 Plokkide mõõtmel ja vastavad jahtumiskiirused

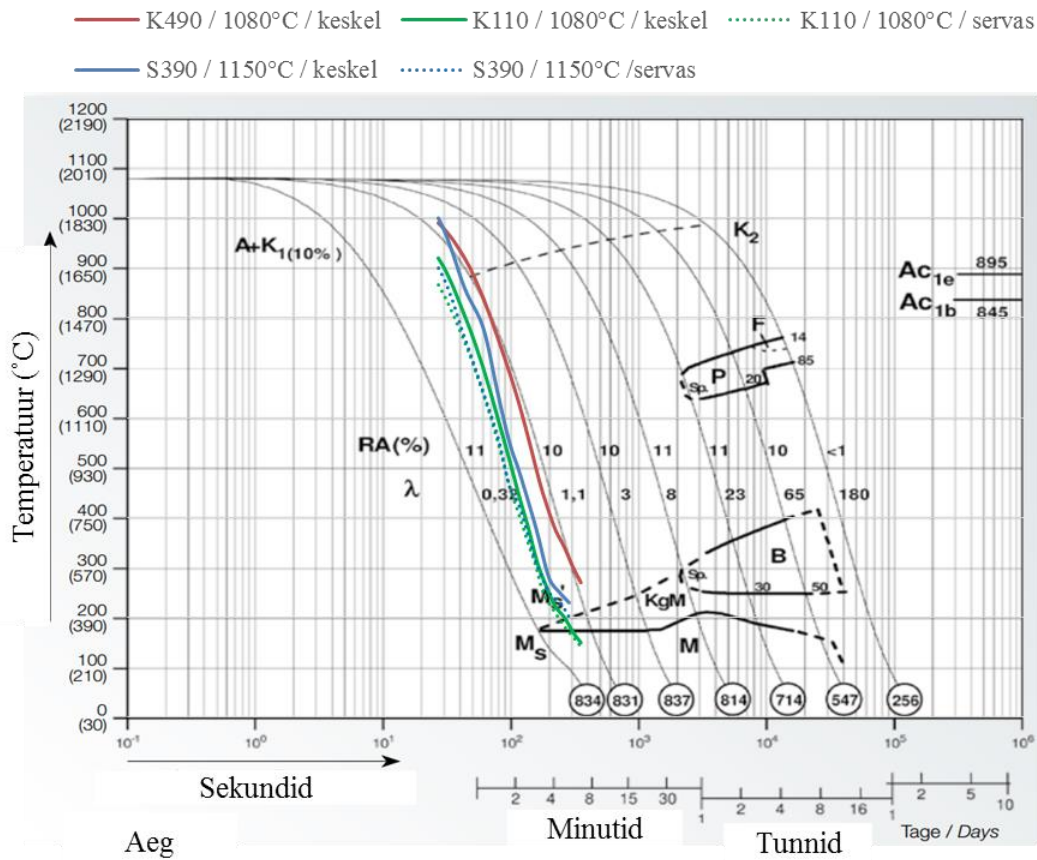
Ploki materjal	Ploki mõõtmel (mm)	Austenitiseerimise temperatuur (°C)	$\lambda$
Böhler S390	66,0 x 81,0 x 112,5	1150	1,8
Böhler K110	66,0 x 81,0 x 112,5	1075	1,8
Böhler K490	150 x 137 x 112	1075	2,7



Sele 26 Plokkide jahtumise kiirused S690 CCT diagrammil. Austenitiseerimise temp. 1210 °C. [17]

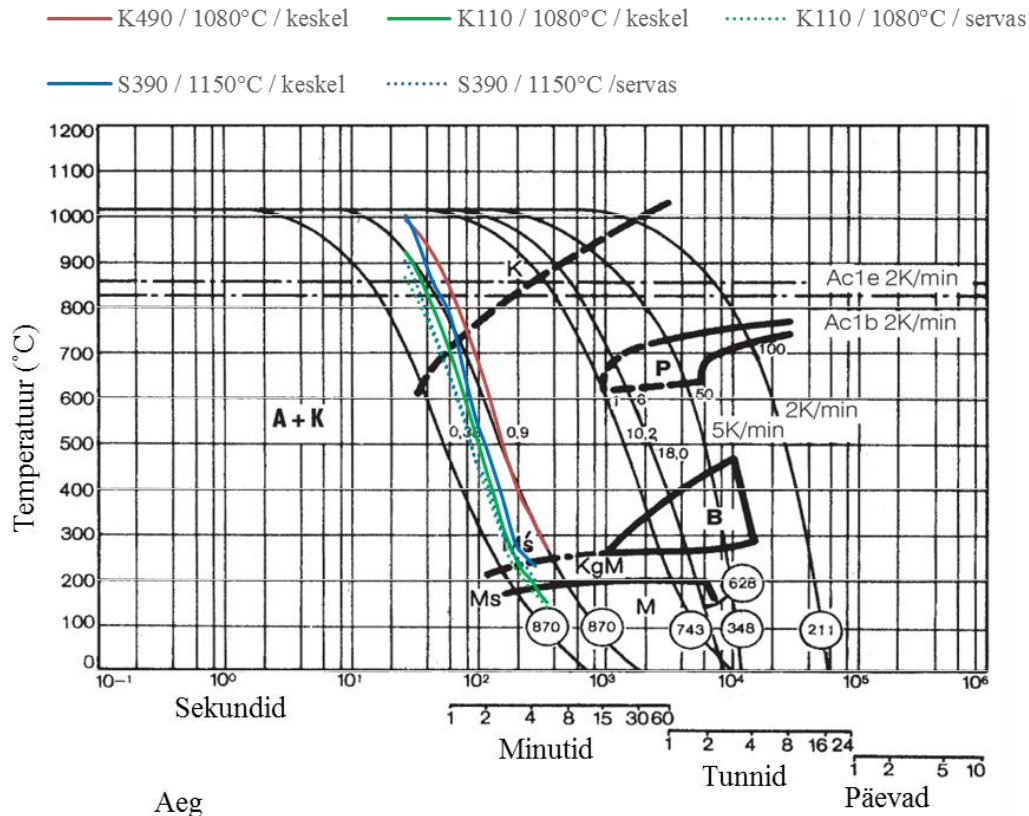
Materjali Böhler S390 korral on näha, et suurem plokk ei jahtu enam piisavalt kiiresti, et saavutada martensiitset struktuuri ja võimalikult kõrget kõvadust (Sele 25). Väiksema ploki korral on võimalik kõvadus saavutada, kuid kindla kvaliteedi tagamiseks võib olla mõistlik kasutada kõrgemat austenitiseerimise temperatuuri või väiksemat ploki suurust. Samad jahtumisjooned sai asetatud ka Böhler S690 (Sele 26), K490 (Sele 27) ja K110 (Sele 28)

pidevjahtumise diagrammidele. Kõikide materjalide korral on näha, et plokkide suurused võivad olla ka suuremad, ilma et lõppstruktuur sellest oluliselt muutuks.



Sele 27 Plokkide jahtumise kiirused K490 CCT diagrammil. Austenitiseerimise temp. 1080 °C. [18]



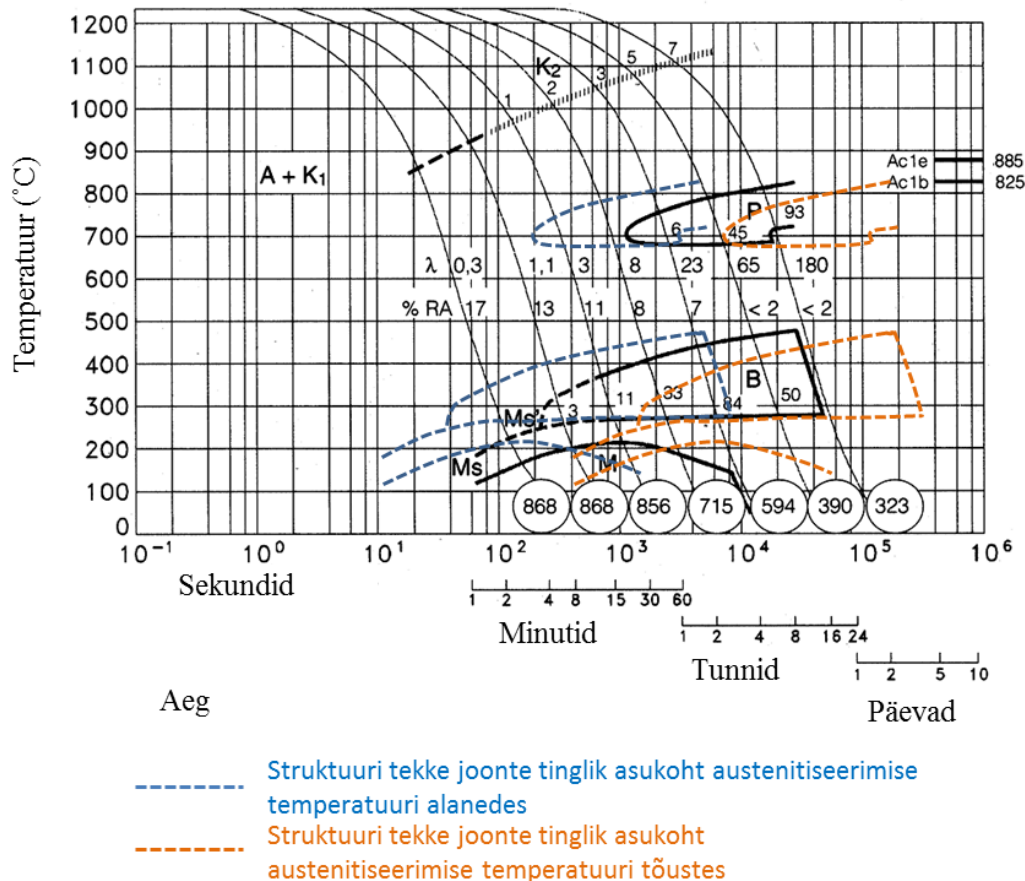


Sele 28 Plokkide jahtumise kiirused K110 CCT diagrammil. Austenitiseerimise temp. 1020 °C. [19]

### 5.3 Soovitused termotöödeldava ploki suuruse valikuks

Termotöötlemisega soovitud omaduste saavutamiseks tuleb valida termotöödeldavale ploki õige suurus. Mõõtmete valikul peab lähtuda materjalist, austenitiseerimise temperatuurist ning jahtumise kiirusest. Antud omadused mõjutavad materjali läbikarastatavust ning võimekust saavutada soovitud ploki kõvadus.

Materjali süsinikusisalduse ning legeerelementide muutus mõjutab jahutamise kiiruse vajalikkust sarnaselt austenitiseerimise temperatuuriga. Kõrgema süsiniku- ja legeerelementide sisaldusega materjalid omavad paremat läbikarastatavust. See tähendab, et sama jahtumiskiirusega on kiirlõiketerasel võimalik saavutada kõrgem kõvadus kui madalama süsiniku- ja legeerelementide sisaldusega materjali korral.



Sele 29 Struktuuri tekkejoonte tinglikud asukohad austenitiseerimise temperatuuride muutumisel [13]

Austenitiseerimise temperatuuri kasvades suureneb legeerelementide lahustuvus materjalis ja seega paraneb läbikarastatavus. Visualiseerides seda pidevjahtumisdiagrammil, nihkuksid austenitiseerimise temperatuuri tõusmisega struktuuri tekkejooned justkui paremale (Sele 29). Langetades austenitiseerimise temperatuuri, halveneb läbikarastatavus ning samade omaduste saamiseks on vaja tunduvalt kiiremat jahutust, sest struktuuride tekkejooned on nihkunud vasakule. Pidevjahtumise diagrammid on tehtud kindla temperatuuriga ning seda tuleb alati silmas pidada. Antud töös kajastatud materjalide korral jäävad need temperatuurid vahemikku 1020 °C...1230 °C.

Austenitiseerimise temperatuuri valikul on soovitatav kasutada pigem madalamat temperatuuri kui kõrgemat. Tootja poolset minimaalset austenitiseerimise temperatuurist võib kasutada ka madalamat temperatuuri, kuid siis peab leidma võimaluse kiireks jahutamiseks. Kiirlõiketerase Böhler S390 väikese ploki termotöötlemisel saavutati soovitud kõvadused austenitiseerimise temperatuuriga 1150 °C, mis on madalaim terasetootja soovitatud temperatuur. Seisutusaeg ei

ole nii kriitiline, kui materjali tutvustuslehel on välja toodud (80...150 sekundit). Oluline on tagada, et materjal on austenitiseerimise temperatuuril piisavalt kaua ning saab pärast kiire jahutuse.

Vaakumtermotötluse puhul on jahtumise kiirus enamasti ahju poolt paika pandud ning termotötlust teostava ettevõtte poolt soovitatud vahemik ette öeldud. Arvestades sellega, saab jahtumist kiirendada vaid ploki mõõtmete vähendamisega. Jahtumiskiiruse seisukohalt on oluline ploki seinapaksus, mis hea jahtumise tagamiseks ei saa olla väga lai. Katsetuste käigus on näha, et Böhler S390 plokk mõõtmetega 66,0 x 81,0 x 112,5 mm jahtus piisavalt kiiresti ning termotötlusega saavutati ka soovitud kõvadus. Antud katsetuste põhjal saab öelda, et seinapaksusega 66 mm plokkid jahtuvad piisava kiirusega, et tagada materjali kõrge saavutatav kõvadus. Plokkide projekteerimisel tuleks antud materjali puhul eelistada pikki peeneid ristkülikukujulisi plokkidele kuubikujulistele plokkidele. Antud teooria kinnitamiseks tuleks katsetada sama seinapaksusega (66 mm) kuid tunduvalt pikema (näiteks 328 mm) ploki vaakumtermotötlust ja läbi ristlõike kõvadustee mõõtmist.

## KOKKUVÕTE

Antud magistritöö käigus saavutati parem arusaam Böhler S390 vaakumtermotöötamise režiimi määravate parameetrite olulisusest saavutatavale kõvadusele. Katsetuste baasil selgitati välja ettevõttes Stén & Co OÜ teostatud termotöötlemisel soovitud kõvaduse mittesaavutamise põhjus ning soovitud edaspidiseks termotöötlemiseks.

Töö käigus omandati uusi teadmisi tööriistaterase tootmisest, termotöötlemise põhimõtetest ning teoreetilistest alustest. TTÜ MTI termotöötlemise laboris teostatud katsetustest tuli välja, et piisavalt kiirel jahutamisel pärast austenitiseerimist ei oma austenitiseerimise aeg ega temperatuur materjali kõvadusele suurt mõju, välja arvatud eeldatavale noolutuse diagrammile. Vaakumahjus teostatavate termotöötlemise simuleerimisel katselaboris jääb peamiseks probleemiks sama aeglase jahtumise saamine. Õige jahtumiskiiruse tagamiseks tuleks termotöötlemisel katselaboris kasutada suuremaid katsekehi ning teha nende jahtumiskiirustega eelnevaid katsetusi.

Ettevõttes Stén & Co OÜ teostatud vaakumtermotöötlemise täpsed parameetrid selgusid pärast uue andmete salvestamise süsteemi lisamist. Sellest tulenevalt võimaldas süsteem salvestada kogu ahju parameetreid termotöötlemise käigus, mis on kiire ja hea kvaliteedi näitaja saavutatava kõvaduse kõrval. Vaakumahi on stabiilne ja kontrollitav keskkond, mis tagab kvaliteetse termotöötlemise võimalikkuse. Detailide korrektsel ahju paigutamisel jahtuvad nad sama kiiresti, sõltumata teiste ahjus olevate detailide kogusest. Ploki jahtumise kiirust mõjutab selle vähim paksusmõõde ning nende projekteerimisel on kasulik eelistada piklikke risttahukakujulisi plokkide kuubikujulistele plokkidele. Kiirlõiketerasesest Böhler S390 valmistatud ploki soovituslikuks vähima seina paksuseks on 66 mm. Maksimaalse pikema külje pikkuse teadasaamiseks tuleb läbi viia lisa-vaakumtermotöötlemise katsetusi erinevas suuruses plokkidega.

Oluliseks termotöötlemise kvaliteeti ning saavutatavat kõvadust mõjutavaks teguriks on jahtumiskiirus pärast seisutusaega. Noolutamisel sõltub jahtumiskiiruse efektiivsusest ka plokkide kõvaduste tõstmise võimalikkus. Jahtumine vaakumahjus on aeglane ning vajalike kõvaduste saavutamiseks võib see jääda kiirlõiketerase Böhler S390 korral liiga madalaks.

## SUMMARY

In the course of this thesis important parameters in terms of final hardness results after vacuum heat treatment of high speed steel Böhler S390 were analysed. The reason of low hardness results after vacuum heat treatment in Stén & Co Oy was found out and suggestions for vacuum heat treatment were made.

In the process new knowledge about tool steel production, heat treatment principles and theoretical aspects were obtained. The tests made in TUT Department of Materials Engineering metallography laboratory showed that with fast quenching time the austenizing temperature and holding time do not have a big effect on resulting hardness. The main problem in the simulation of heat treatment in the vacuum furnace was that the quenching time in the laboratory was too fast. Therefore bigger test samples for heat treatment should be used in order to assure the right quenching time.

The exact parameters of the vacuum heat treatment performed in Stén & Co Oy appeared after the installation of a new thermocouple system which allowed to monitor and save all the vacuum hardening parameters during the heat treatment process. This way the quality of vacuum heat treatment cycle can be easily checked. The vacuum furnace gives heat treatment a stable and controlled environment. If the blocks are correctly placed in the furnace, the cooling of the parts in the furnace is the equal, irrespective to total amount of blocks in one heat treatment. The size of a block's shortest side has the main effect on the quenching speed, therefore right parallele piped blocks should be preferred to cubes. For high speed steel Böhler S390 blocks the wall thickness of 66 mm should be used as the length of a shorter side. In order to find out the maximum length for the longer side, further tests with blocks in different sizes should be carried out.

The cooling speed after austenizing has an essential effect on vacuum heat treatment quality. Potential hardness result during tempering depends on the cooling speed after austenizing. The quenching speed in a vacuum furnace is low and for necessary hardness of high speed steel Böhler S390 this may be too slow.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Becherer, B. A., Witheford, T. J., Vasco, T. ASM Handbook. Volume 4. Heat Treating. Heat Treating of Tool Steels. ASM International, 1991.
2. Kulu P., Metallioõpetus, TTÜ kirjastus 2005.
3. Totten, G. E., Essadiqi, E. Steel Heat Treatment: Metallurgy and. Technology. Chapter 11. Tool steels. Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
4. Tornberg, C., Fölzer, A. New optimised manufacturing route for PM tool steels and high speed tool steels – 6th International tooling conference “The Use of Tool Steels: Experience and Research, 2002, Karlstad University, 363-376.
5. Tornberg, C., Fölzer, A. Less carbide means fewer cracks in tools made from gas-atomisedsteel – Metal Powder Report, Volume 60, Issue 6, June 2005, 36-40.
6. Hisskog, T. Powder-Metallurgy tool steel. An overview. Metalforming magazine, 2003, 1. [WWW]  
[http://www.bucanada.ca/media/pm\\_tool\\_steels\\_metalformingmagazine03.pdf](http://www.bucanada.ca/media/pm_tool_steels_metalformingmagazine03.pdf)  
(17.12.13).
7. Rosso, M., Ugues, D., Actis Grande, M. The challenge of PM tool steels for the innovation – Journal of Acievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006, 18(1-2),175-178. [WWW] SienceDirect (17.12.13).
8. Mesquita, R. A., Barbosa, C.A. High Speed Steel Produced through conventional casting, spray forming and powder metallurgy - 6th International tooling conference “The Use of Tool Steels: Experience and Research, 2002, Karlstad University, 387-402
9. Bell, T. The sience of steel. Exploring different manufacturing technologies – Stamping journal, 2005, 8. [WWW]  
<http://www.thefabricator.com/article/metalsmaterials/the-science-of-steel> (17.12.13).
10. Böhler Edestahl [WWW] [http://www.boehler-edelstahl.com/english/files/ST035DE\\_Microclean.pdf](http://www.boehler-edelstahl.com/english/files/ST035DE_Microclean.pdf) (15.03.2015).
11. Korecki, M., Olejnik, J., Kula, P., Wolowiec, E. Best practice in heat treatment of large dies made for hot work tool steels. Heat processing. 2013. a., 04, 39-45
12. Totten, G. E. ja Božidar, L. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. Chapter 6. Steel Heat Treatment, 2006.
13. Böhler Edestahl [WWW] <http://www.boehler-edelstahl.com/english/files/S390DE.pdf>  
(10.01.2014).

14. Edenhofer, B., Bouwman, J. W., Herring, D. H. Steel Heat Treatment: Equipment and Process Design. Volume 3. Vacuum Heat Processing. s.l. : Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
15. Uddeholm [WWW] <http://www.uddeholm.com/files/heattreatment-english.pdf>  
(15.03.2015).
16. Kulu, P. Materjalid. Tallinn, 2001
17. Böhler Edestahl [WWW] <http://www.bohler-edelstahl.com/english/files/S690DE.pdf>  
(15.03.2015)
18. Böhler Edestahl [WWW] <http://www.bohler-edelstahl.com/english/files/K490DE.pdf>  
(15.03.2015)
19. Böhler Edestahl [WWW] <http://www.bohler-edelstahl.com/files/K110DE.pdf>  
(15.03.2015)

## **LISAD**

Lisa 1 I termotöötluuskatsetus – Rockwelli mõõtmistulemused

Lisa 2 II termotöötluuskatsetus – Kasutatud katsetusparameetrid

Lisa 3 II termotöötluuskatsetus – Rockwelli kõvadusmõõtmiste tulemused

Lisa 4 II termotöötluuskatsetus – Mikrostruktuurid pärast austenitiseerimist

Lisa 5 II termotöötluuskatsetus – Mikrostruktuurid pärast noolutust



## Lisa 1 | termotöötuskatsetus – Rockwelli mõõtmistulemused

Tabel 16 Termotöötuskatsetuse tulemused pärast austenitiseerimist

Detaili nr	Ahju temp (°C)	Termopaar (°C)	Hoidimise aeg (min)	Jahutus	HRC					
					1	2	3	4	Average	STDEV
1	1000	999-1002	5	õli	61,2	63,6	63,8	63,8	63,1	1,3
2	1150	1120	2	õli	66,8	67,1	67,0	67,4	67,1	0,3
3	1150	1120	5	õli	67,2	68,3	67,0	67,5	67,5	0,6
4	1150	1148	30	õli	63,5	64,3	63,5	64,5	64,0	0,5
5	1150	1140	65	õli	64,3	64,3	64,6	64,6	64,5	0,2
6	1230	1190	2	õli	61,8	62,6	62,5	62,8	62,4	0,4
7	1230	1190	5	õli	51,7	50,6	51,7	51,8	51,5	0,6
8	1230	1190	30	õli	61,8	62,0	62,8	62,8	62,4	0,5

Tabel 17 Teostatud noolutuse parameetrid ning tulemused

Detaili nr	Noolutus 1		Noolutus 2		Noolutus 3		Jahutus noolutuste vahel	HRC					
	Ahju temp (°C)	Aeg	Ahju temp (°C)	Aeg	Ahju temp (°C)	Aeg		1	2	3	4	Average	STDEV
1	520	2h 30 min	520	2h 30 min	520	3h 30min	õhk	61,2	63,6	63,8	63,8	63,1	1,3
2	520	2h 20 min	520	1h 40min	520	4h 10min	õhk	66,8	67,1	67,0	67,4	67,1	0,3
3	520	2h 20 min	520	1h 40min	520	4h 10min	õhk	67,2	68,3	67,0	67,5	67,5	0,6
4	520	2h 30 min	520	2h 30 min	520	3h 30min	õhk	63,5	64,3	63,5	64,5	64,0	0,5
5	520	2h 30 min	520	2h 30 min	520	3h 30min	õhk	64,3	64,3	64,6	64,6	64,5	0,2
6	520	2h 30 min	520	2h 30 min	520	3h 30min	õhk	61,8	62,6	62,5	62,8	62,4	0,4
7	520	2h 30 min	520	2h 30 min	520	3h 30min	õhk	51,7	50,6	51,7	51,8	51,5	0,6
8	520	2h 30 min	520	2h 30 min	520	3h 30min	õhk	61,8	62,0	62,8	62,8	62,4	0,5

## Lisa 2 II termotöötuskatsetus – Kasutatud katsetusparameetrid

Termotöötusel kasutatud parameetrid

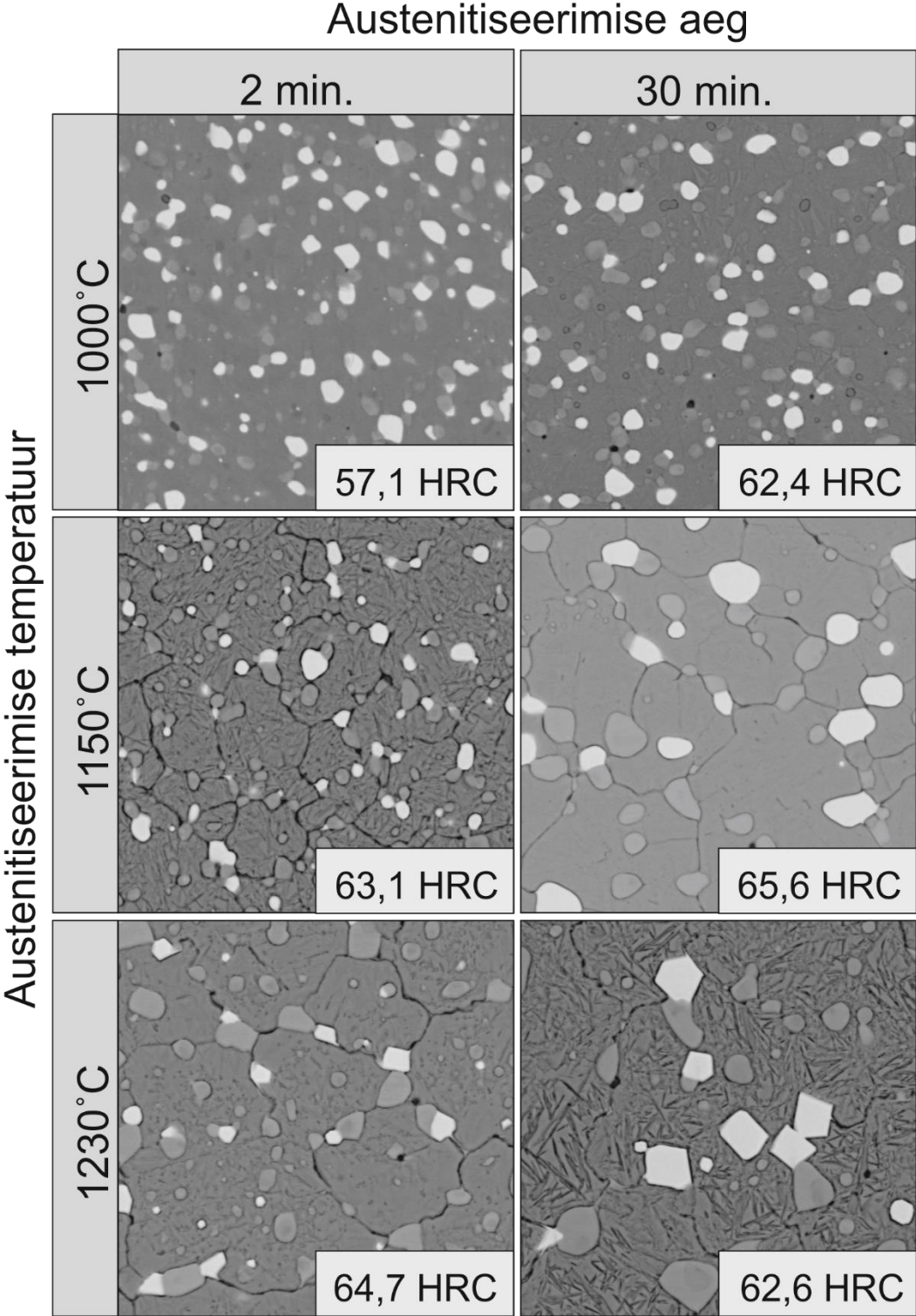
Katsekeha nr	Austenitiseermise temp (°C)	Aeg (min)		Jahtumine	Noolutus 1		Noolutus 2		Noolutus 3	
		Kuumutus	Hoidmine		Temp	Aeg	Temp	Aeg	Temp	Aeg
1	1000	6 min 15 s	2	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
2	1000	6 min 15 s	2		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
3	1000	6 min 15 s	2		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
4	1000	6 min 15 s	30	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
5	1000	6 min 15 s	30		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
6	1000	6 min 15 s	30		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
7	1150	8 min 45 s	2	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
8	1150	8 min 45 s	2		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
9	1150	8 min 45 s	2		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
10	1150	8 min 45 s	30	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
11	1150	8 min 45 s	30		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
12	1150	8 min 45 s	30		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
13	1230	10 min 50 s	2	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
14	1230	10 min 50 s	2		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
15	1230	10 min 50 s	2		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
16	1230	10 min 50 s	30	Õhus ühel alusel	580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
17	1230	10 min 50 s	30		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min
18	1230	10 min 50 s	30		580	2h 40min	580	2h 40min	530	2h 40min

### Lisa 3 II termotötluskatsetus – Rockwelli kõvadusmõõtmiste tulemused

kõvaduste tulemused

Austenitiseermise temp (°C)	Aeg (min) Hoidmine	HRC pärast austenitiseerimist					HRC pärast 3 x noolutust				
		1	2	3	Average	STDEV	1	2	3	Average	STDEV
<b>1000</b>	2	57,3	57,1	56,9	<b>57,1</b>	0,2	55,3	55,7	55,7	<b>55,6</b>	0,2
<b>1000</b>	30	62,0	62,2	63,1	<b>62,4</b>	0,6	56,1	56,3	56,3	<b>56,2</b>	0,1
<b>1150</b>	2	63,3	62,5	63,4	<b>63,1</b>	0,5	62,6	62,7	62,6	<b>62,6</b>	0,1
<b>1150</b>	30	66,2	64,9	65,6	<b>65,6</b>	0,7	63,8	63,5	63,5	<b>63,6</b>	0,2
<b>1230</b>	2	64,3	65,8	63,9	<b>64,7</b>	1,0	63,3	63,2	63,3	<b>63,3</b>	0,1
<b>1230</b>	30	62,4	62,4	63,1	<b>62,6</b>	0,4	62,2	61,5	62,0	<b>61,9</b>	0,4

**Lisa 4 II termotöötuskatsetus – Mikrostruktuurid pärast austenitiseerimist**



## Lisa 5 II termotöötuskatsetus – Mikrostruktuurid pärast noolutust

