

Markus Punkari

TERÄSTEN KYLMÄMUOKKAUKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Helmikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Markus Punkari: Terästen kylmämuokkaukseen vaikuttavat tekijät
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma
Helmikuu 2024

Rauta on louhituin ja käytetyin metalli maailmassa ja suuri osa siitä muutetaan teräkseksi ennen käyttöönottoa. Puhdas teräs on raudan ja hiilen muodostama metalliseos. Hiilen lisäksi teräksiin lisätään muita seosaineita parantamaan niiden ominaisuuksia. Suuret teräksen tuottajat valmistavat terästä monessa eri muodossa jatkojalostusta varten. Terästä voidaan muokata kuumana tai kylmänä. Koska kuumamuokkaus vaatii paljon energiaa ja odotusaikaa kappaleen lämmittämiseksi, aloilla joilla tuotantomäärät ovat suuret ja tuotevaihtelu on pientä, suositaan kuumamuokkauksen sijasta kylmämuokkausta.

Kylmämuokkauksessa on kuitenkin rajoituksia terästyypin ja valmistettavan kappaleen ominaisuuksien ja muokkausasteen kannalta. Kuumamuokkauksessa teräksen mekaaniset ominaisuudet palaavat muokkauksen jälkeen alkuperäiseen tilaansa koska muokkaus tehdään rekristallisaatiolämpötilan yläpuolella. Kylmämuokkauksessa materiaalin lujuus ja kovuus kasvavat, joten muokkausta ei voida tehdä loputtomiin asti toisin kuin kuumamuokkauksessa. Kovuuden ja lujuuden kasvu johtuvat dislokaatioiden määrän lisääntymisestä muokkauksen aikana.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää terästen sisäisen rakenteen, seosaineiden sekä muiden ominaisuuksien vaikutusta ja käyttäytymistä kylmämuokkauksen kannalta. Työssä käydään läpi myös perusasioita teräksistä ja niiden ominaisuuksista sekä selvitetään mitkä teräkset sopivat lopputuotteena joko pehmeyttä tai kovuutta vaativiin sovelluskohteisiin käyttäen tyssäystä esimerkkinä muodonantomenetelmästä, jolla valmistetaan erimerkiksi pultteja.

Kylmämuokkauksen kannalta olennaisia materiaaliominaisuuksia hyödyntäen erilaisille teräksille annettiin hyvyysarvo niiden sopivuudelle joko pehmeyttä tai kovuutta vaativiin sovelluksiin. Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin parhaaksi teräkseksi osoittautui C2C-teräs, joka on standardoitu kylmätyöstöön tarkoitettu teräs. Kovuutta vaativiin sovelluksiin parhaaksi teräkseksi osoittautui AISI 9255.

Avainsanat: teräs, kylmämuokkaus, muokkauslujuuttuminen, tyssäys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TERÄKSET JA NIIDEN RAKENNE	2
2.1 Terästen mikrorakenne	2
2.2 Seosaineet	6
2.3 Lämpökäsittelyt	7
3. MATERIAALIOMINAISUUDET	12
3.1 Kovuuden ja lujuuden ero	12
3.1.1 Kovuusmittaukset	14
3.1.2 Kovuuden ja lujuuden välinen yhteys	16
3.2 Muokkauslujuuttuminen	17
4. VALMISTUSMENETELMÄ	20
4.1 Kylmämuokkaus	20
4.2 Tyssäys	21
4.2.1 Muokkausvastus	22
5. MATERIAALIEHDOTUKSET	24
6. YHTEENVETO	32
LÄHTEET	34

LYHENTEET JA MERKINNÄT

PKK	pintakeskeinen kuutiollinen
TKK	tilakeskeinen kuutiollinen
TKT	tilakeskeinen tetragoninen
CCT	jatkuvan jäähtymisen aika-lämpötila-muutospiirros
HV	vickers kovuus arvo
HB	brinellin kovuus arvo
HK	knoop kovuus arvo
A1	alempi kriittinen lämpötila
A3	alieutektoidisen teräksen ylempi kriittinen lämpötila
Acm	ylieutektoidisen teräksen ylempi kriittinen lämpötila
et al.	lat. et alii tai et alieae, ja muut
-p%	painoprosentti
ns.	niin sanottu
mm.	muun muassa
g	putoamiskiihtyvyys
F	voima
A	pinta-ala
σ	jännitys
ϵ	myötymä
n	muokkauslujittumiseksponentti
K	muokkauslujittumiskerroin
Y	muokkausvastus
MPa	megapascal
mm	millimetri

1. JOHDANTO

Terästangon tai -langan muottiin puristaminen halutun muotoiseksi kappaleiksi on hyvin paljon käytetty muodonantomenetelmä. Muottiin puristaminen voidaan tehdä kylmä- tai kuumamuokkauksena riippuen lopputuotteeseen halutuista materiaaliominaisuuksista sekä tarvittavasta muodonmuutoksen määrästä. Tässä työssä tarkastellaan terästangon kylmämuokkaukseen vaikuttavia tekijöitä materiaaliominaisuuksien avulla sekä terästen ominaisuuksia yleisesti. Työn tavoitteena on löytää erilaisia teräslaatuja, jotka sopivat joko pehmeyttä tai kovuutta vaativiin sovelluskohteisiin. Pehmeyttä vaativiin sovelluskohteisiin teräskappaleen tulisi olla mahdollisimman pehmeää ilman muokkauksen jälkeisiä lämpökäsittelyitä. Kovuutta vaativiin sovelluskohteisiin teräskappaleet tulee pääsääntöisesti lämpökäsittellä muokkauksen jälkeen, jotta ne täyttävät kovuusvaatimukset.

Työn teoriaosassa käsitellään teräksen eri faasien muodostuminen ja niiden vaikutus materiaaliominaisuuksiin. Teräksen raekoko vaikuttaa myös olennaisesti materiaaliominaisuuksiin. Koska työssä tutkitaan kylmämuokkausta, raekoko ei muutu muokkauksen aikana, mutta rakeiden geometria muuttuu, mikä myös osaltaan vaikuttaa materiaaliominaisuuksiin. Terästä muokattaessa dislokaatiot sen rakenteessa liikkuvat ja niitä muodostuu lisää, mikä johtaa materiaalin lujittumiseen dislokaatioliikkeen vaikeutumisen vuoksi. Eri seosaineilla on niiden laadusta ja määrästä riippuen merkittäviä vaikutuksia eri teräslaatuojen ominaisuuksiin. Tässä työssä tarkastellaan seostamisen vaikutusta kylmämuokkaukseen ja lopputuotteen materiaaliominaisuuksiin. Teräskappaleiden ominaisuuksia voidaan muuttaa muodonannon jälkeisillä lämpökäsittelyillä. Erilaisten lämpökäsittelyiden toimintaperiaatetta ja vaikutusta teräksen rakenteeseen ja ominaisuuksiin tarkastellaan myös tässä työssä.

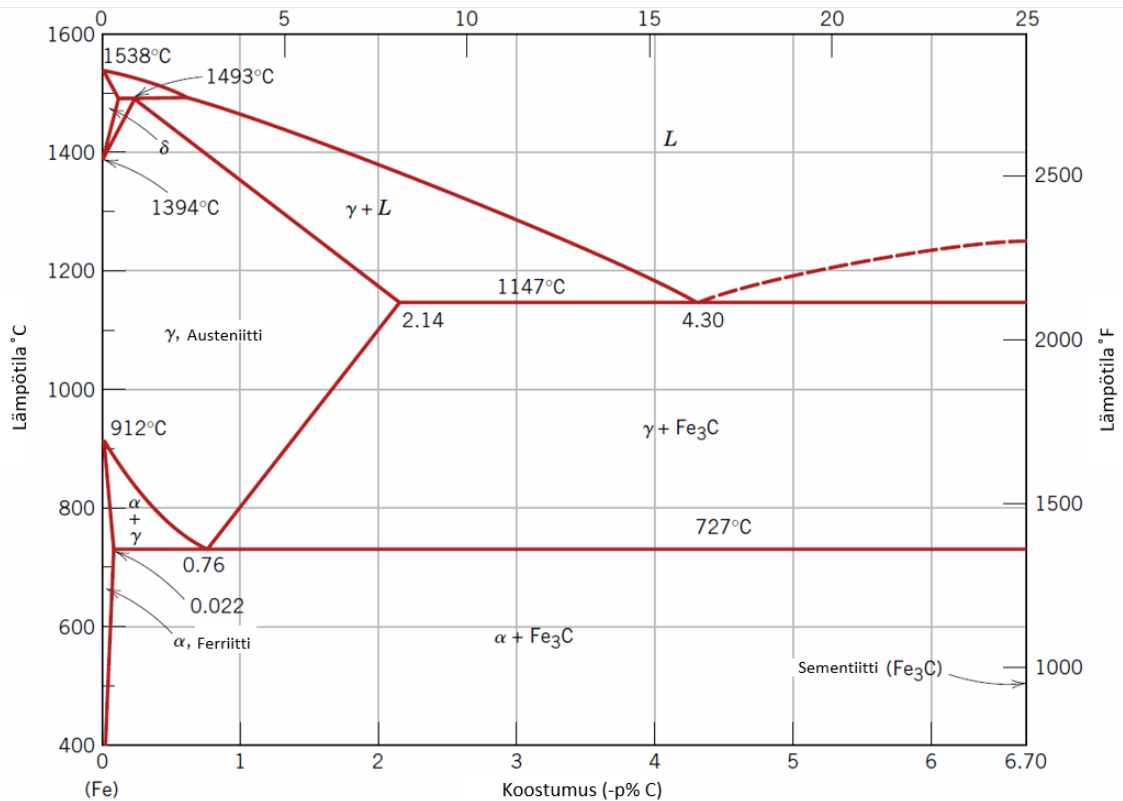
2. TERÄKSET JA NIIDEN RAKENNE

Kun puhtaaseen rautaan seostetaan hiiltä, muodostuu terästä, joten teräs on oikeasti metalliseos, vaikka se useimmiten mielletään metallina. Teräksillä on useita erilaisia käyttökohteita, jotka vaativat suuria eroja käytettävän teräksen ominaisuuksissa. Terästen mekaanisia ominaisuuksia voidaan muokata seosaineiden kuten hiilen, nikkelin ja kromin määriä säätelemällä, sekä erilaisilla lämpökäsittelyillä.

2.1 Terästen mikrorakenne

Teräksellä on monta eri faasia, joissa se voi esiintyä. Näillä faaseilla on erilaiset mikrorakenteet, mikä johtaa eroavuuksiin niiden mekaanisissa ominaisuuksissa. Faasi missä teräs esiintyy, määrittyy teräksen lämpötilasta, hiilipitoisuudesta ja jäähtymisnopeudesta valmistuksen aikana. Korkeissa lämpötiloissa teräs esiintyy pääosin austeniittisessa tilassa. Austeniittiselta alueelta hitaasti jäähdytettäessä austeniitin raerajoille alkaa muodostua perliittiä. Perliittinen rakenne on ferriitin ja sementiitin muodostama faasiseos. Sementiitin muodostuminen perustuu hiilen liukoisuuteen. Kuten kuvasta 1. nähdään, puhtaan ferriitin maksimihiilipitoisuus on 0,022 -p% lämpötilassa 727 °C ja puhtaan austeniitin maksimihiilipitoisuus on 2,14 -p% lämpötilassa 1147 °C. Tämä johtuu näiden faasien erilaisista kiderakenteista ja sitä kautta välisijojen koosta, joissa hiiltä voi esiintyä. Näiden rajojen ulkopuolella hiili muodostaa liuokseen sementiittiä. [3, s.333–337]

Kuvassa 1. on esitetty teräksen lämpötilan, hiilipitoisuuden ja faasien välinen yhteys.



Kuva 1. Rauta-sementiitti faasidiagrammi, perustuu lähteeseen [3].

Matalilla hiilipitoisuuksilla ja matalissa lämpötiloissa teräs esiintyy ferriittisessä tilassa, jolloin sen kiderakenne on (TKK). Ferriitti on suhteellisen pehmeä faasi, mikä tarkoittaa, että se ei kestä yhtä paljoa voimaa ennen muodonmuutoksien tapahtumista kuin teräksen muut huoneenlämmössä esiintyvät faasit. Tästä syystä teräkset joilla on matala hiilipitoisuus, useimmiten lämpökäsitellään kestävämpien faasien saavuttamiseksi ennen niiden käyttöönottoa. Terästen lämpökäsittelyä käsitellään luvussa 2.3.

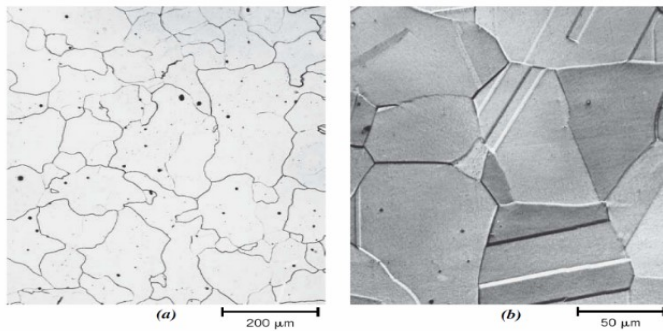
Austeniitti on teräksen faasi, jossa useat terästen kuumamuokkausoperaatiot tehdään. Austeniitti on kiderakenteeltaan (PKK) ja se ei ole magneettinen [3, s.416]. Alkeellisemmissä muokkausoperaatioissa, joissa esimerkiksi käytettävän teräksen tarkkaa hiilipitoisuutta ei tiedetä tai tarkkaa lämpötilaa ei voida mitata, austeniitin magneettittomuutta voidaan hyödyntää. Kun teräksen halutaan muodostaa martensiittinen rakenne, se tulee nopeasti jäähdyttää huoneenlämpöön tai sen alle sen ollessa austeniittisessä tilassa. Teräskappaletta kuumennettaessa esimerkiksi ahjossa, magneettisuuden katoaminen on helppo tarkastaa, jolloin tiedetään sen olevan lähes täysin austeniittisessä tilassa.

Sementiitti tunnetaan myös rautakarbidina ja sen kemiallinen kaava on Fe_3C . Sementiitti on metastabiilia, eli sitä ei esiinny teräksessä yksittäin normaaleissa olosuhteissa, vaan

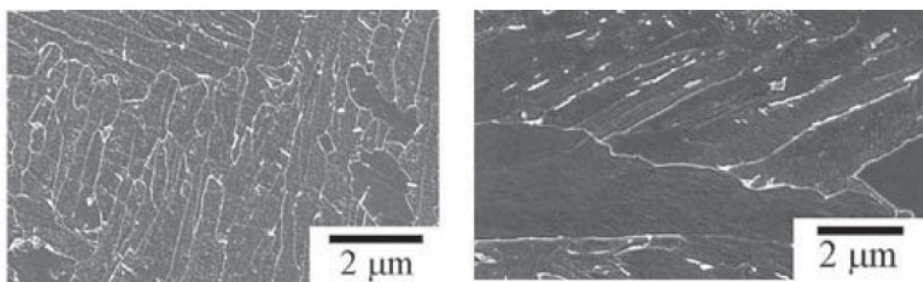
se on sekundaarisena faasina jonkin toisen kanssa tai ainesosana jonkin faasiseoksen muodostamisessa. Sementiitti on todella kovaa ja täten lisää teräksen haurautta sellaisissa faasiseoksissa, joissa sitä esiintyy runsaasti.

Perliitin lisäksi toinen ferriitin ja sementiitin muodostama faasiseos tunnetaan bainiittina. Perliitin mikrorakenne on lamellimainen, eli ferriitti ja sementiitti esiintyvät vuorottelevina lamelleina, kun taas bainiitissa sementiitti esiintyy erkaumina ferriittifaasin seassa. Bainiittia muodostuu, kun teräs jäähdytetään nopeasti austeniittisesta tilasta lämpötilaan, joka on martensiitin muodostumislämpötilan yläpuolella. Bainiitti voidaan karkeasti jakaa kahteen tyyppiin, ylä- ja alabainiitti. Lämpötila johon teräskappale jäähdytetään määrittää, syntykö ylä- vai alabainiittia. Yläbainiitti muodostuu ~400–550 °C lämpötiloissa ja muodostuminen on suhteellisen hidasta korkean lämpötilan takia. Alabainiitin muodostuminen on nopeampaa, sillä se muodostuu ~250–400 °C lämpötiloissa. Alabainiitin sementiitti erkaumat ovat paljon pienempiä verrattuna yläbainiittiin, minkä takia alabainiittia suositaan suurimmassa osaa käyttökohteita. Tämä johtuu siitä, että yläbainiitissa säleiden välissä sijaitsevat karkeammat sementiittierkaumat helpottavat halkeamien ydintymistä ja etenemistä kappaleessa. [6, s. 179–185]

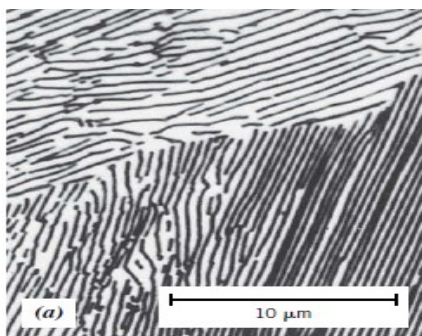
Seuraavissa kuvissa on nähtävissä teräksen eri faasien ja faasiseosten kiderakenteiden erot.



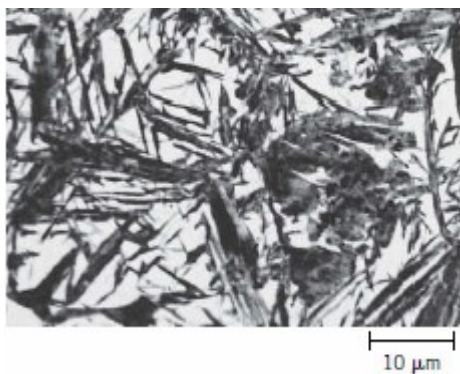
Kuva 2. (a) Ferriitti, (b) Austeniitti [3]



Kuva 3. Alabainiitti (vasen), yläbainiitti (oikea) [5]



Kuva 4. Perliitti [3]



Kuva 5. Martensiitti [3]

2.2 Seosaineet

Teräsiin voidaan lisätä useita eri seosaineita parantamaan niiden mekaanisia ominaisuuksia kuten kovuutta, lujuutta ja korroosion kestoa. Seosaineet ja niiden määrät valitaan tarkasti riippuen valmistettavan tuotteen käyttökohteesta ja sen asettamista vaatimuksista, sillä jokainen seosaine antaa teräkselle erilaisia ominaisuuksia. Hiilen lisäksi käytetyimpiä seosaineita teräksissä ovat kromi, nikkeli ja mangaani. Muita yleisesti käytettyjä seosaineita ovat molybdeeni, vanadiini ja volframi.

Kromin lisääminen teräkseen vaikuttaa sen korroosion kestoon. Jotta teräs voidaan luokitella ruostumattomaksi, sen tulee sisältää vähintään 11 -p% kromia [3, s. 414]. Korroosion kestoa parantava vaikutus perustuu kromin muodostamaan ohueen oksidikerrokseen teräksen pinnalle, mikä estää teräksen reagoimisen ympäristön kanssa. Myös nikkelin lisäämisellä on vaikutusta teräksen korroosion kestoon, vaikkakin sen lisäämisen varsinaisena tarkoituksena on karkenevuuden parantaminen lämpökäsittelyissä, ja tätä kautta vaikutus teräksen lopulliseen kovuuteen ja lujuuteen.

Ruostumattomat teräkset voidaan jakaa kolmeen luokkaan: austeniittiset-, ferriittiset- ja martensiittiset ruostumattomat teräkset. Austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä kromin määrä on yleisimmin 18 -p% ja nikkelin 8 -p%. Nikkelin lisääminen mahdollistaa teräksen austeniittifaasin esiintymisen huoneenlämmössä. Ferriittiset ruostumattomat teräkset eivät sisällä nikkeliä ja niiden kromin määrä on yleensä 15:n ja 20:n -p% välillä. Martensiittiset ruostumattomat teräkset eivät myöskään sisällä nikkeliä ja niiden kromin määrä vaihtelee 12:n ja 18:n -p% välillä. Koska martensiittisissä ruostumattomissa teräksissä on suhteellisen korkea hiilipitoisuus, ne on mahdollista lämpökäsitellä todella lujiksi ja koviksi. [8, s. 109–110]

Mangaani on terästen valmistuksen kannalta välttämätön seosaine, sillä se sitoo rikkiä pois rautaseoksesta estäen rautasulfidin muodostumisen. Rautasulfidilla on hyvin alhainen sulamispiste, joten mikäli rikkiä ei ole sidottu pois mangaanin avulla, terästä ei voida kuumamuokata. Mangaani myös parantaa terästen karkenevuutta ja toimii teräksen valmistusvaiheessa happea poistavana aineena, mikä helpottaa valmistusprosessia. Myös piitä ja alumiinia lisätään teräsiin poistamaan happea seoksesta valmistuksen aikana.

Molybdeeni lisää teräksen karkenevuutta lämpökäsittelyissä ja se myös muodostaa teräkseen karbideja, jotka parantavat teräksen kulumiskestävyyttä. Myös vanadiini muodostaa kulumiskestävyyttä parantavia karbideja, mutta se myös ehkäisee rakeiden kasvua lämpökäsittelyiden aikana parantaen näin teräskappaleen lopullisia ominaisuuksia. [8, s. 108]

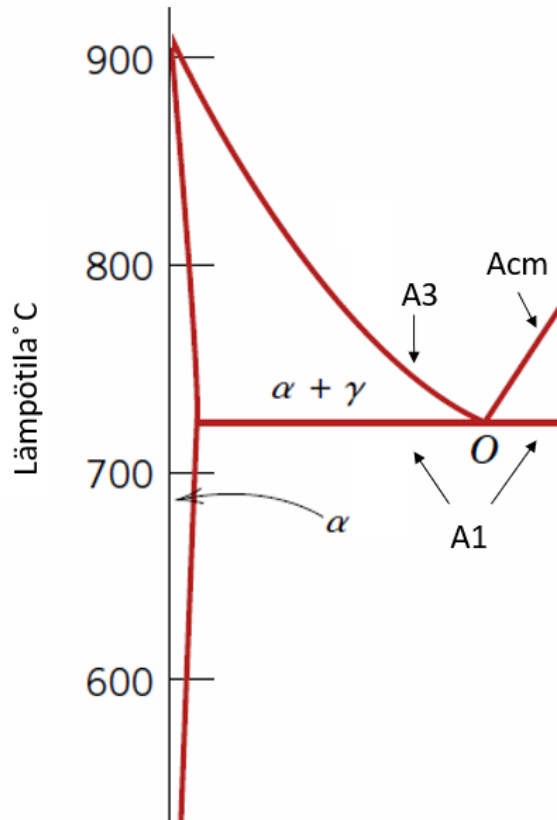
Volframia lisätään teräksiin parantamaan niiden kuumalujuutta käyttökohteissa, joissa sitä vaaditaan. Volframilla on korkein sulamispiste ja korkein kovuus kaikista puhtaista metalleista [8, s. 123]. Volframin korkea sulamispiste ja koko verrattuna mikrorakenteen muihin atomeihin laskee diffuusionopeutta nostaten kappaleen kuumalujuutta. Myös volframi muodostaa teräkseen karbideja, jotka parantavat sen kulumiskestävyyttä.

2.3 Lämpökäsittelyt

Metallien lämpökäsittely perustuu materiaalin sisäisen rakenteen muokkaamiseen lämmittämisen ja jäädyttämisen avulla. Kun metallia lämmitetään sen faasit ja raerakenne muuttuvat. Valitsemalla oikea jäähdytysnopeus kappaleeseen jääviä faaseja ja raerakennetta voidaan kontrolloida. Lämpökäsittely on siis yhdistelmä kuumennus- ja jäähdytysoperaatioita, joissa kontrolloidaan lämpötilaa, kuumennus- ja jäähdytysnopeutta, sekä pitoaikoja tietyissä lämpötiloissa haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi.

Kun metallikappale jäähtyy hitaasti korkeasta lämpötilasta huoneenlämpöön, kappaleen rakenteessa olevat sisäiset jännitykset vähentyvät ja raerakenne sekä koostumus homogenisoituu. Jäähdytys tehdään usein uunissa, jotta jäähtymisnopeutta voidaan tarkasti kontrolloida. [9, s. 133–134] Tätä prosessia kutsutaan hehkutukseksi. Sovelluksissa, joissa jäähtymisnopeutta ei tarvitse tarkasti kontrolloida, jäähdytys voidaan tehdä hautaamalla kappale lämmityksen jälkeen hiekkaan tai antamalla kappaleen jäähtyä ilmassa.

Kuvassa 6. on esitetty teräksen faasiirroksen osa, johon on merkitty alempi- ja ylempät kriittiset lämpötilat, sekä eutektoidinen piste O. Ylemmän kriittisen lämpötilan (A3/Acm) yläpuolella teräs esiintyy vain austeniittisessa tilassa. Alemman kriittisen lämpötilan (A1) yläpuolella austeniitin seassa on joko ferriittiä tai sementiittiä, riippuen teräksen hiilipitoisuudesta.



Kuva 6. Teräksen kriittiset lämpötilat, perustuu lähteeseen [3].

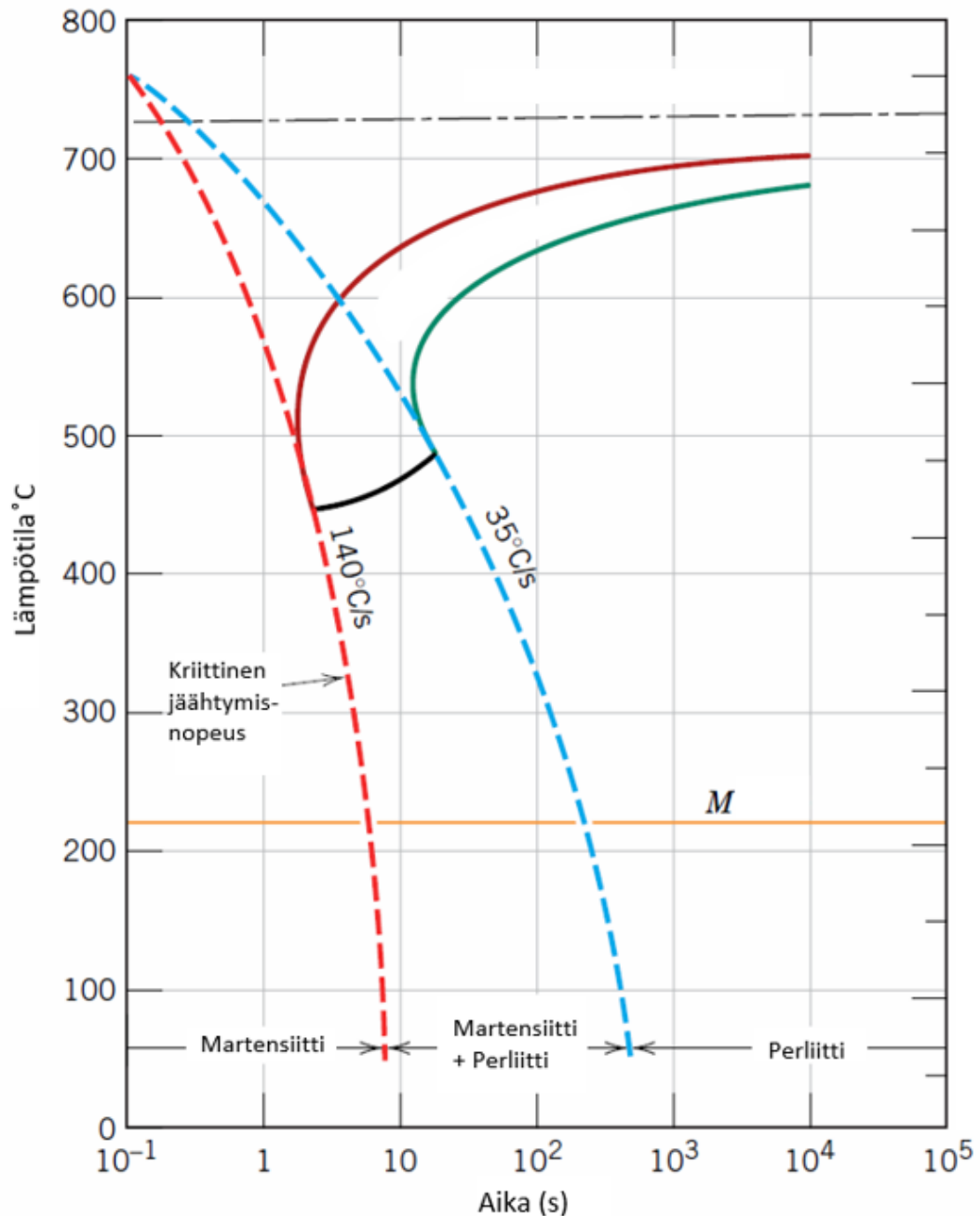
Kun alieutektoidisia teräksiä, eli teräksiä joilla hiilipitoisuus on alle 0,76 -p%, hehkutetaan, ne lämmitetään yleensä 20–40°C ylemmän kriittisen lämpötilan yläpuolelle. Riippuen käsiteltävän kappaleen koosta ja muodosta pitoaika tässä lämpötilassa vaihtelee. Kun kappaletta pidetään tässä lämpötilassa tarpeeksi kauan, sen raerakenne muuttuu homogeeniseksi hienorakeiseksi austeniitiksi. Tästä tilasta hitaasti jäädyttämällä kappaleeseen muodostuu hienorakeinen ferriittis-perliittinen rakenne. Jos hehkutus tehdään yli 100°C ylemmän kriittisen lämpötilan yläpuolella, austeniittirakeet kasvavat ja jäähtymisen jälkeen ferriittis-perliittinen raerakenne jää karkeammaksi [9, s. 134]. Ylieutektoidisilla teräksillä, eli teräksillä joilla hiilipitoisuus on yli 0,76 -p%, hehkutus tehdään yleensä 20–40°C alemman kriittisen lämpötilan yläpuolella mikä johtaa jäähtymisen jälkeen rakenteeseen, jossa on perliittiä ja pyöreän muotoista sementiittifaasia. Jos näillä

teräksillä hehkutus tehdään liian korkeassa lämpötilassa, lopullinen faasirakenne koostuu sementtiittiverkostosta, jonka seassa on perliittirakeita. Tätä yleisesti vältetään, koska sementtiitti on todella haurasta ja syntyvä sementtiittiverkosto helpottaa säröjen etene- mistä.

Teräksen kovuuden nostamiseksi käytetään prosessia, jota kutsutaan karkaisuksi. Karkaisussa teräs lämmitetään ylempää kriittistä lämpötilaa korkeampaan lämpötilaan, jolloin siihen muodostuu austeniittinen rakenne. Kun austeniittisessä tilassa oleva teräs-kappale jäähdytetään tarpeeksi nopeasti perliitin ja bainiitin muodostuminen estyy, jolloin kappaleeseen muodostuu martensiittinen rakenne, mikä nostaa teräksen kovuutta, sillä martensiittifaasi on erittäin kovaa [9, s. 141]. Martensiittinen rakenne muodostuu koska jäähtyminen tapahtuu niin nopeasti, että austeniitissa oleva hiili ei ehdi diffundoitua pois rakenteesta muodostamaan sementtiittiä, vaan muodostaa hiilikylläisen liuoksen [6, s. 135]. Tästä syystä austeniitin alkuperäinen PKK rakenne vääristyy ja muuttuu tetrago-naaliseksi rakenteeksi mikä teräksissä tunnetaan martensiittina [6, s.142].

Karkaisussa jäähdytys tehdään asettamalla lämmitetty kappale johonkin väliaineeseen, yleisimmin veteen tai öljyyn. Tätä osaa karkaisuprosessia kutsutaan sammutukseksi. Haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi karkaistu kappale tulee useimmiten päästää, eli asettaa uuniin, jonka lämpötila on alle alemman kriittisen lämpötilan ja pitämällä sitä uunissa tietty aika. Päästäminen vapauttaa karkaisussa syntyneitä jännityksiä ja laskee kappaleen kovuutta. Päästämisen ansiosta kappaleen sitkeys kasvaa. Päästölämpötila sekä pitoaika vaikuttavat lopullisiin materiaaliominaisuuksiin.

Kuvassa 7. on esitetty teräksen jäähtymisnopeuden ja muodostuvien faasien yhteys puhtaalle hiiliteräkselle, jonka hiilipitoisuus on eutektoidinen, eli 0,76 -p%.



Kuva 7. Eutektoidisen teräksen CCT-diagrammi, perustuu lähteeseen [3].

Kuvasta 7. voidaan nähdä, että kyseisen koostumuksen omaavan karkaistavan teräskappaleen on jäädyttävä sammutuksessa austeniittisesta tilasta vähintään 140°C/s , jotta puhdasta martensiittia voi muodostua. Jos jäähtyminen on hitaampaa, martensiittisen rakenteen sekaan muodostuu perliittiä mikä heikentää lopullisen tuotteen ominaisuuksia. Teräksen hiilipitoisuus ja muut seosaineet sekä niiden määrät olennaisesti vaikuttavat teräksen kriittiseen jäähtymisnopeuteen [3, s. 383].

Yksi martensiittisen perusrakenteen omaava teräslaatu tunnetaan maraging-teräksenä. Maraging-terästä valmistetaan käyttämällä matalan hiilipitoisuuden ja korkean nikkelpitoisuuden omaavaa terästä. Korkea nikkelpitoisuus aiheuttaa austeniittiselta alueelta karkaistaessa martensiittisen rakenteen, jolla on korkea dislokaatiitiheys. Nikkelin lisäksi muita tarvittavia seosaineita maraging-teräksen muodostamiseksi ovat molybdeeni ja titaani. Martensiittirakenteen muodostamisen jälkeen kappale lämpökäsitellään 400–500 °C missä seosaineet muodostavat rakenteeseen erkaumia kuten Ni_3Mo , Ni_3Ti ja Fe_2Mo . Tällainen lämpökäsittely tunnetaan erkautuskarkaisuna. [6, s. 266] Maraging-teräksen korkea kovuus ja lujuus perustuvat näiden erkaumien toimimiseen dislokaatioliikkeen esteinä. Lämpökäsittelyaika ja lämpötila vaikuttavat muodostuvien erkaumien määrään ja kokoon, ja täten lopullisen kappaleen ominaisuuksiin. Vaikka maraging-teräksellä on todella hyvät lujuus- ja kovuusominaisuudet, se silti säilyttää suhteellisen korkean muokattavuuden [6. s, 267].

3. MATERIAALIOMINAISUUDET

Materiaaliominaisuuksia voidaan tarkastella useasta eri näkökulmasta, riippuen käytetystä materiaalista ja sen käyttökohteesta. Teräksillä tärkeimmät ominaisuudet ovat niiden lujuus ja kovuus. Kun teräksiä muokataan niiden rekristallisaatiolämpötilan alapuolella, eli minimi lämpötilan jossa teräs voi muodostaa uusia kiteitä, voidaan havaita ilmiö jota kutsutaan muokkauslujittumiseksi. Muokkauslujittumista hyödynnetään useiden erilaisten metallituotteiden valmistuksessa.

3.1 Kovuuden ja lujuuden ero

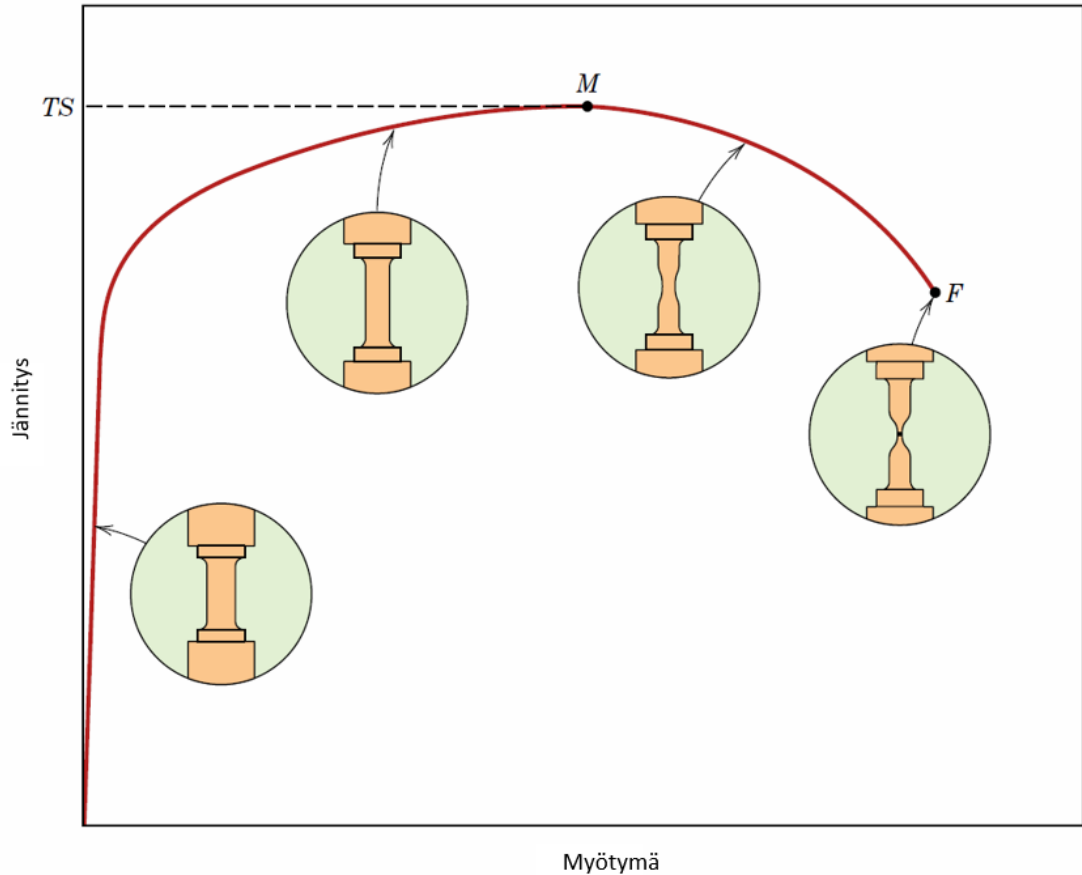
Kovuus on materiaalin pintaominaisuus ja tarkoittaa materiaalin pinnan muuttumattomuutta, kun pintaan kohdistuu ulkoinen voima. Kovuuden mittaamiseen on olemassa useita erilaisia testejä, jotka pääosin eroavat laitteessa käytetyn mittauskärjen muodossa ja koossa. Yleisimmin käytetty mittaustapa on Rockwell kovuusmittaus, jossa karkaistu metallikuula painetaan tutkittavaan kappaleeseen tietyllä voimalla ja materiaalin kovuus määritetään kuulun aiheuttaman kuopan halkaisijasta. Parempiin tarkkuuksiin Rockwell kovuusmittauksissa päästään painamalla ensin pienemmällä voimalla ja sen jälkeen suuremmalla voimalla toiseen kohtaan. Materiaalin kovuus määritetään pienemmän voiman ja suuremman voiman aiheuttamien kuoppien syvyyden ja halkaisijan erosta. [3, s. 191–192]

Lujuus on materiaalin kyky kestää ulkoisen kuorman aiheuttamaa jännitystä ja sitä voidaan käsitellä usealla eri tavalla. Jokaisella materiaalilla on sille ominainen myötöraja, eli se jännityksen määrä minkä materiaali kestää muutamatta muotoaan pysyvästi, tätä kutsutaan myös myötölujuudeksi. Myötörajan alapuolella tapahtuvat muodonmuutokset ovat elastisia, eli kappale palautuu alkuperäiseen muotoonsa kun jännitys poistetaan. Myötörajan yläpuolella tapahtuvat muodonmuutokset ovat plastisia, eli kappaleeseen jää pysyviä muodonmuutoksia. Vaikka kappale muokkautuu plastisesti, osa muodonmuutoksesta palautuu jännityksen poiston jälkeen, eli osa muodonmuutoksesta on aina elastista.

Materiaalin murtolujuus kertoo suurimman jännityksen määrän, jonka materiaali kestää vedossa ilman kurouman muodostumista. Tässä pisteessä materiaali ei vielä murru mutta insinööri-jännitys-insinööri-venymä käyrässä (kuva 8.) jännitys alkaa laskea. Tämä

johtuu siitä, että jännityksen lukuarvoon liittyy kappaleen poikkipinta-ala mikä alkaa pienentyä suuresti kurouman muodostumisen jälkeen. [3, s. 180–182]

Kuvassa 8. on esitetty tyypillinen insinöörijännitys-insinöörivenymä käyrä vetokoikeesta.



Kuva 8. Vetokoekäyrä, perustuu lähteeseen [3].

Pisteellä M on merkitty materiaalin murtolujuus ja pisteellä F murtopiste. Vetokoetta käsitellään tarkemmin luvussa 3.2. Muita tapoja käsitellä lujuutta ovat esimerkiksi puristuslujuus, leikkauslujuus sekä väsymislujuus. Puristuslujuus käsittelee materiaalin kestävyttä puristavan jännityksen alaisena. Leikkauslujuus tarkoittaa materiaalin kestävyttä leikkaavia voimia vastaan, jotka pyrkivät liu'uttamaan kappaleen samansuuntaisia sisäisiä osia toistensa ohi. Väsymislujuus tarkoittaa materiaalin kestävyttä tilanteissa, joissa kappaleeseen kohdistuu syklisiä jännitys-jännityksen poisto tapahtumia.

3.1.1 Kovuusmittaukset

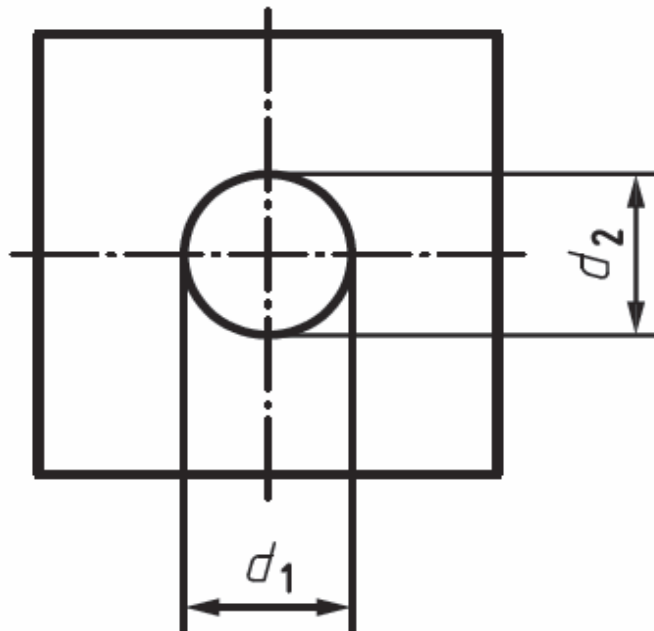
Brinell-testi on yksi standardisoiduista Rockwell tyylistä kovuusmittauksista. Brinell-testissä karkaistu teräs- tai volframikarbidikuula, jonka halkaisija on 1,0, 2,5, 5,0 tai 10,0 mm, painetaan tutkittavaan kappaleeseen. Käytetyt voimat Brinell-mittauksessa ovat yhden ja 3000 kilon välillä ja pitoaika kappaleen pinnalla vaihtelee 10 ja 30 sekunnin välillä. [11] Pitoaika, kuulan halkaisija ja käytetty voima riippuvat materiaalista, josta kovuutta mitataan. Suositeltuja koevoima-halkaisijasuhteita löytyy standardista SFS-EN ISO 6506-1.

Brinellin kovuus arvo lasketaan seuraavalla kaavalla [11]:

$$HB = 0.102 \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \quad (3.1)$$

jossa F on käytetty voima, D on kuulan halkaisija ja d on painauman halkaisijoiden (kuva 9.) keskiarvo mikä lasketaan seuraavalla kaavalla [11]:

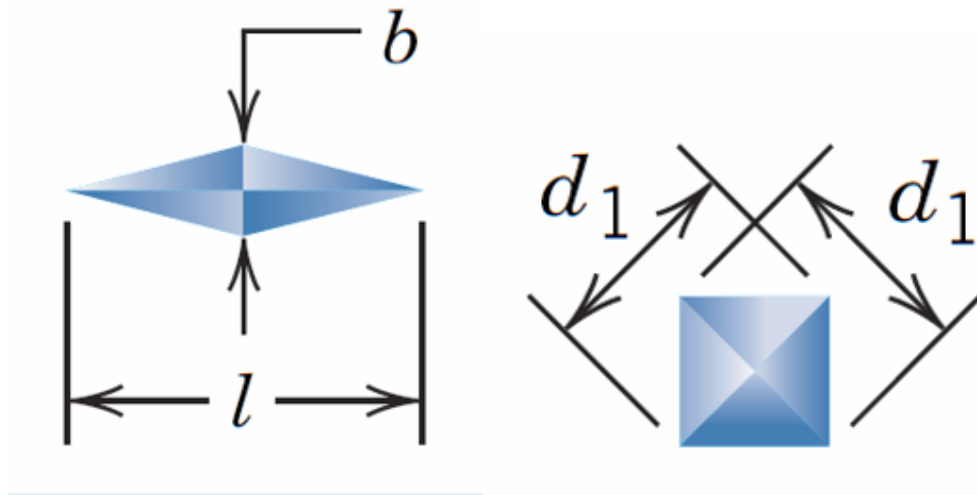
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.2)$$



Kuva 9. Brinell mittauksen halkaisijan määrittäminen [11]

Muita standardisoituja kovuusmittauksia ovat esimerkiksi Vickers ja Knoop kovuusmittaukset, joissa hyvin pieni pyramidin muotoinen timanttikärki painetaan tutkittavaan kappaleeseen. Näissä mittauksissa massat, joilla kärki painetaan kappaleeseen, ovat yleensä paljon pienempiä kuin Rockwell mittauksissa. Mittakärjen tekemää jälkeä tarkastellaan mikroskoopilla ja materiaalin kovuus määritetään jäljen koosta ja käytetystä massasta. [3, s. 194]

Vickers ja Knoop mittaukset eroavat niiden mittakärjen muodossa (kuva 10.). Ylhäältä päin katsottuna Vickers mittauksessa käytetyn kärjen muoto on symmetrinen ja Knoop mittauksessa toinen pyramidin akseleista on pidempi. Vickers on huomattavasti yleisempi mittaustapa kuin Knoop. Knoop mittausta käytetään pääosin vain todella hauraiden materiaalien kuten keraamien kovuuden mittaukseen.



Kuva 10. Knoop ja Vickers laitteiden mittakärjet [3]

Vickers ja Knoop kovuudet voidaan molemmat laskea kaavalla:

$$HV/HK = \frac{1}{g} * \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

jossa g on $9,80665 \text{ m/s}^2$, F on käytetty voima ja A on painauman pinta-ala neliömillimetreinä. [13][14]

Molemmille mittausmenetelmille on myös olemassa tarkemmat laskukaavat, jotka ottavat huomioon enemmän parametreja esimerkiksi mittakärjen dimensioista.

Vickers ja Brinell kovuusmittauksien lukuarvojen välinen muunnostaulukko on nähtävissä alla.

Taulukko 1. *Vickers -ja Brinell-kovuusarvojen muunnostaulukko [15].*

HV	HB
100	95
150	143
200	190
250	238
300	285
350	333
400	380
450	428
500	475
550	523
600	570
650	618

3.1.2 Kovuuden ja lujuuden välinen yhteys

Materiaalin kovuuden ja lujuuden välillä on yhteys, mikä tavallisille metallimateriaaleille seuraa empiiristä kaavaa:

$$\sigma_{UTS} = 3,3H_V \quad (3.4)$$

jossa σ_{UTS} on materiaalin murtolujuus ja H_V on materiaalin Vickers kovuus. Hamada *et al* tekemä tutkimus osoittaa, että tämän kaavan tarkkuus riippuu materiaalin muokkauslujittumiseksponentista sekä kovuusmittauslaitteen kärjen kulmasta [7, s. 1–5]. Tutkimus tehtiin käyttämällä ANSYS-mallinnusohjelmaa ja mallintamalla kokeita erilaisilla mittakärjen kulmilla, jotka olivat Vickers mittauksessa käytetyn kärjen kulman molemmiin puoliin. Vickers kovuusmittauksessa käytetään pyramidin muotoista timanttikärkeä missä pyramidin kylkien kulma on 136° . Parhaimman tarkkuuden lujuuden ja kovuuden yhteydelle saadaan käyttämällä 110° kulman omaavaa mittakärkeä. Tavallisille metallimateriaaleille, joiden muokkauslujittumiseksponentti n on välillä $0,05 < n < 0,2$, lujuus voidaan

arvioida 8% epätarkkuudella kovuudesta, mikä on mitattu käyttämällä 110° kulmaa mitauslaitteen kärjessä. Käyttämällä mittakärkeä jonka kulma on 136° lujuus voidaan arvioida kovuudesta 10% epätarkkuudella. Suuremmilla muokkauslujittumiseksponentin arvoilla epätarkkuus kasvaa. [7, s. 8]

3.2 Muokkauslujittuminen

Muokkauslujittuminen on tärkeä ominaisuus tietyissä valmistusprosesseissa, mutta suurimmalta osin sitä hyödynnetään metallien kylmämuokausprosesseissa. Muokkauslujittuminen on ilmiö missä muokattavan kappaleen lujuus kasvaa myötymän kasvaessa. Muokkauslujittumisen vaikutus on havaittavissa esimerkiksi vetokokeessa. Kun myötymä kasvaa, jännitys vetokoesauvassa kasvaa, eli muokkaamiseen tarvittava voima kasvaa muokkausasteen kasvaessa. Muokkauksen jatkamiseksi vaadittavaa voimaa tietyn muokkausasteen jälkeen kutsutaan muokkausvastukseksi mitä käsitellään myöhemmin luvussa 4.2.

Vetokoe on standardisoitu testi, jonka avulla määritellään erilaisia materiaaliominaisuuksia kuten lujuusarvoja. Vetokoeita varten tutkittavasta materiaalista valmistetaan sauva, joka on joko pyöreä tai neliskanttinen. Sauvan päihin jätetään enemmän materiaalia kuin keskelle, jotta vetokoelaitteen leukojen vaikutus voidaan minimoida ja varmistetaan, että muodonmuutokset tapahtuvat sauvan keskiosassa. Vetokokeessa toinen laitteen leukoista liikkuu, venyttäen kappaletta tasaisella nopeudella. [3, s. 170–172] Laite mittaa muokkaamiseen tarvittavaa voimaa sekä siirtymän määrää ja tallentaa lukuarvot, jotka voidaan tarkastelua varten siirtää esimerkiksi Excel-tiedostoon. Laitteen mittaamista tuloksista voidaan muodostaa vetokoeikäyrä, jossa on pystyakselilla jännitys ja vaaka-akselilla myötymä. Koska testikappaleen dimensiot muuttuvat vetokokeen aikana ja jännitys on verrannollinen kappaleen poikkipinta-alaan, vetokokeen tuloksista saatu ns. insinööri-jännitys ei ole tarkka kuvaus kappaleen sisäisestä jännitystilasta. Tämän korjaamiseen tarvitaan suuret todellinen jännitys ja todellinen myötymä, jotka huomioivat kappaleen dimensioiden muutoksen.

Todellisen jännityksen σ_T ja todellisen myötymän ε_T arvot voidaan laskea seuraavista kaavoista sillä oletuksella, että kappaleen tilavuus ei kokeen aikana muutu.

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.6)$$

joissa σ on insinööri jännitys ja ε on insinööri myötymä. Kaavat (3.5) ja (3.6) ovat kuitenkin voimassa vain kurouman alkamiseen asti. [3, s. 188]

Kun kiteistä materiaalia muokataan plastisesti, sen kiderakenteeseen syntyy dislokaatioita. Dislokaatiot ovat materiaalin kiderakenteessa olevia virheitä, joiden kohdalla kiderakenne ei ole säännöllinen. Riippuen dislokaation suunnasta suhteessa kiderakenteeseen, voidaan erottaa erilaisia dislokaatiotyyppejä, kuten särmä- ja ruuvidislokaatio. Eri tyyppiset dislokaatiot vääristävät materiaalin kiderakennetta eri tavoin. Myös sekadislokaatiot, jotka ovat särmä- ja ruuvidislokaatioiden yhdistelmiä, ovat mahdollisia. [3, s. 115–118]

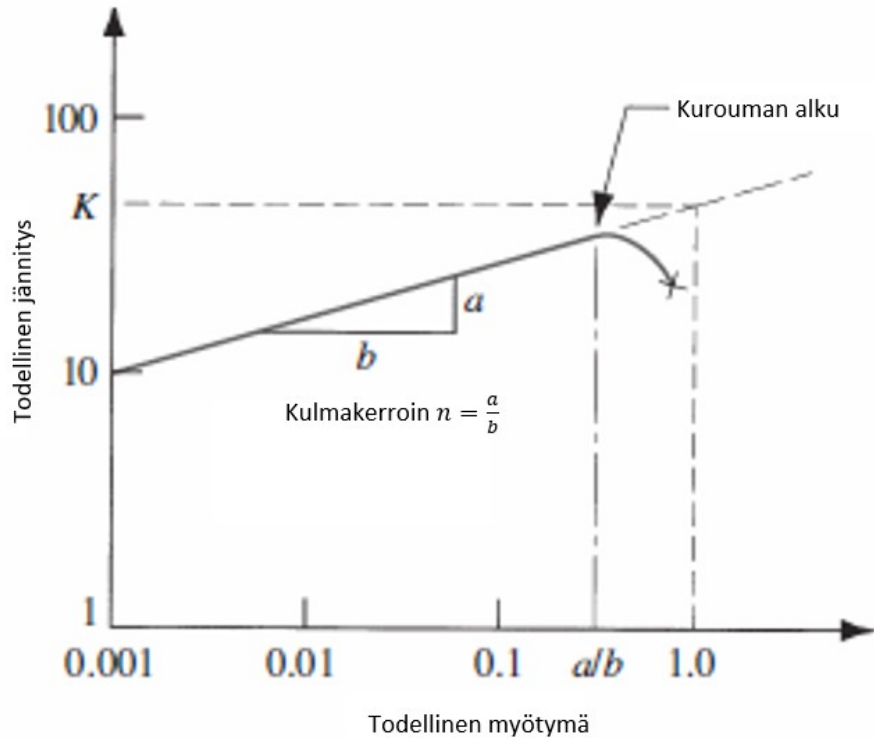
Kiderakenteen vääristyminen aiheuttaa elastisen energian varastoitumista kiderakenteeseen dislokaatioiden läheisyyteen. Mitä enemmän rakenteessa on dislokaatioita, sitä enemmän rakenteessa on sitoutunutta energiaa [1, s.170]. Dislokaatioiden liike kiderakenteessa vaatii suhteellisen paljon energiaa koska kiderakenteessa esiintyy esteitä, joiden yli tai ohi dislokaation on vaikea liikkua. Dislokaatiot ovat myös esteitä toisille dislokaatioille, joiden vaikutuksen määrä riippuu dislokaatioiden orientaatiosta kiderakenteessa suhteessa toisiinsa [1, s. 197–198]. Sitoutuneen energian kasvu sekä dislokaatioliikkeen esteiden lisääntyminen selittää kappaleen lujittumisen muokkauksessa, kun se tehdään rekristalisaatiolämpötilan alapuolella.

Muokkauslujittumisen vaikutusta voidaan arvioida Hollomonin yhtälöllä:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (3.7)$$

jossa σ on lujuus, ε on myötymä ja K sekä n ovat vakioita.

Muokauslujittumisvakiot voidaan määrittää materiaalin vetokoe käyrästä, kun kuvajassa käsitellään todellista jännitystä ja todellista myötymää, sekä molemmat asteikot asetetaan logaritmisiksi.



Kuva 11. Muokauslujittumis-vakioiden määrittäminen, perustuu lähteeseen [8].

Vakiota K kutsutaan muokauslujittumiskertoimeksi ja se on jännityksen arvo kohdassa, jossa todellisen myötymän arvo olisi 1. Vakiota n kutsutaan muokauslujittumiseksponentiksi, jonka lukuarvo määrittää materiaalin taipumuksen muokauslujittumiselle. Muokauslujittumiseksponentti on logaritmisesta vetokoeikäyrästä kulmakerroin [8, s. 46–47].

4. VALMISTUSMENETELMÄ

Teräskappaleiden valmistusmenetelmiä on useita erilaisia, ja käytettävän menetelmän valintaan vaikuttavat mm. valmistettavan kappaleen dimensiot ja lopputuotteeseen halutut ominaisuudet. Niillä teollisuuden aloilla, joilla tuotantomäärät ovat suuria ja tuotevaihtelu on vähäistä, suositaan teräskappaleiden valmistukseen kylmämuokkausta, jos se on mahdollista. Tyssäys on yksi muodonantomenetelmistä, joka usein tehdään kylmämuokkauksena. Tyssäämällä valmistetaan esimerkiksi pultteja, joilla pitää olla erilaisia ominaisuuksia käyttökohteesta riippuen.

4.1 Kylmämuokkaus

Kylmämuokkaus on yleisesti käytetty muokkaustapa metalleille. Kylmämuokkaus tapahtuu yleisesti huoneenlämmössä tai hieman sen yläpuolella. Kylmämuokkausprosesseja on useita erilaisia, joista yleisimmin käytettyjä ovat valssaus, ekstruusio ja taonta. Valsauksessa metallikappaletta vedetään pyörivien rullien eli valssien välistä, mikä ohentaa kappaletta. Ekstruusiossa metallikappale puristetaan suulakkeen läpi, mikä antaa kappaleelle halutun muodon. Taontaa tehdään kylmä- sekä kuumamuokkauksena. Kylmätaonta suoritetaan useimmiten muottiin takomisena, eli metallikappale pakotetaan iskujen avulla muottiin, mikä antaa kappaleelle halutun muodon. Kylmämuokkauksen suurimmat hyödyt ovat kappaleiden läpimenoaika ja energiatehokkuus, sillä muokattavia kappaleita ei tarvitse lämmittää ennen muokkausta. Muita hyötyjä kuumamuokkaukseen verrattuna on parempi pinnanlaatu sekä tarkempiin toleransseihin pääseminen. Yksi olennainen asia mitä kylmämuokkauksessa tapahtuu verrattuna kuumamuokkaukseen, on muokkauslujittuminen, mitä käsiteltiin luvussa 3.2. Muokkauslujittumista tapahtuu myös kuumamuokkauksessa, mutta koska muokkaus tehdään rekristalisaatiolämpötilan yläpuolella, toipumisprosessit palauttavat metallin ominaisuudet muokkausta edeltävälle tasolle.

Kylmämuokkauksessa metalliin kohdistuu ulkoisen voiman aiheuttamia jännityksiä, mitkä saavat metallin plastisesti muokkautumaan. Plastinen muodonmuutos tapahtuu, kun metallin atomit liikkuvat ja muuttavat kappaleen kiderakennetta. Tämä aiheuttaa dislokaatioiden lisääntymisen kappaleessa mikä nostaa materiaalin kovuutta. Plastisen muodonmuutoksen määrä, jonka kappale voi kokea ennen murtumista, tunnetaan materiaalin sitkeytenä. Dislokaatioiden määrän ja dislokaatiotiheyden kasvaminen kappaleella

leessa aiheuttaa sitkeyden alenemisen. Kovuuden nousu ja sitkeyden lasku muokkauksen aikana johtaa siihen, että muokkausasteen kasvaessa muokkaukseen tarvittava energiamäärä kasvaa. Kappaleen muutkin mekaaniset ominaisuudet, kuten myötöraja ja lujuus, muuttuvat kylmätyöstössä. [8, s. 356–357]

Kylmämuokkauksen on havaittu lisäävän ruostumattomien terästen kestävyyttä korroosiota vastaan [2, s.2]. Ruostumattomat teräkset voivat korrodoitua, kun ne ovat kontaktissa tiettyjen kemikaalien kuten merivedessä esiintyvän kloridin kanssa. Peguet, *et al.* valmistivat näytteitä AISI 304 ruostumattomasta teräksestä ja näytteet kylmävalssattiin eri reduktioilla, jonka jälkeen ne asetettiin suolaliuokseen. Korroosion keston huomattiin kasvavan suuremmilla muokkausasteilla. [2, s. 8]

Liiallinen kylmämuokkaus voi johtaa metallin säröilyyn ja haurastumiseen. Tästä syystä haluttujen ominaisuuksien ja käytettävän metallin aiheuttamien rajoitusten huomioiminen on todella tärkeää sopivaa kylmätyöstöprosessia määrittäessä.

4.2 Tyssäys

Tyssäys on yleisesti käytetty metallitangon muokausprosessi, jota käytetään teollisuuden aloilla, joissa tuotantomäärät ovat suuria ja valmistettavat tuotteet ovat standardisoituneet. Tyssäyksessä sopivan pituiseksi leikattu metallitanko asetetaan lopullisen kappaleen muotoon muottiin ja tangon päästä painetaan voimalla puristaen tankoa muottiin. Tämä saa aikaan materiaalivirtausta mikä pakottaa tangon muotin muotoon. Tyssäyksessä käytetyissä muoteissa on muotin täydellisen täyttymisen varmistamiseksi yleensä paikka, mihin ylimääräinen materiaali eli purse voi virrata. Joissain tapauksissa käytetään umpinaisia muotteja, mutta tällöin alkuperäisen metallitangon koko tulee mitata todella tarkasti, sillä muuten muotti ei täysin täyty, tai lopullisesta kappaleesta tulee liian suuri.

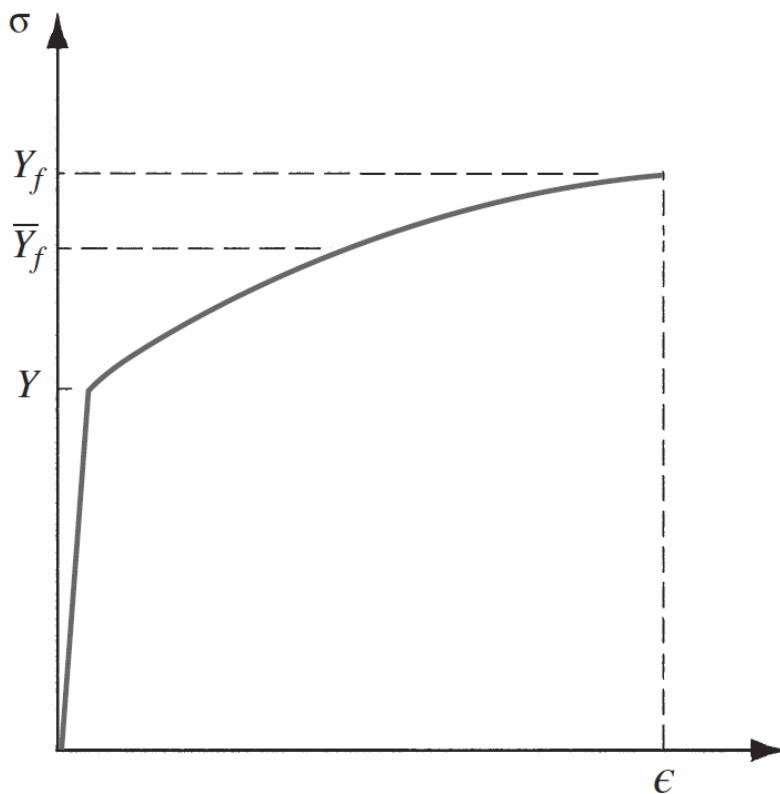
Tyssäyksen etuja on esimerkiksi valmistettujen tuotteiden muodon tarkkuus ja pinnanlaatu. Tämä seuraa siitä, että tyssäyksessä käytetty puristava voima mahdollistaa kontrolloidun materiaalivirtauksen mikä minimoi virheitä ja yleisesti parantaa valmistettavan tuotteen laatua. Puristukseen tarvittavan voiman määrä riippuu tarvittavan muodonmuutoksen määrästä ja käytetyn metallin ominaisuuksista kuten muokkausvastuksesta. Muokkausvastus on materiaalin hetkellinen jännityksen arvo, joka vaaditaan jatkamaan muokkausta, ja se on määritelty seuraavalla yhtälöllä [8, s.355].

$$Y_f = K\varepsilon^n \quad (4.1)$$

jossa Y_f on materiaalin muokkausvastus myötymällä ε ja K sekä n ovat vakioita.

4.2.1 Muokkausvastus

Muokkausvastuksen arvoon vaikuttavat useat eri tekijät, kuten muokattavan kappaleen lämpötila, kappaleen materiaali, muodonmuutosnopeus sekä muodonmuutoksen määrä. Kuten luvussa 3.2 käsiteltiin, kappaleen lujuus kasvaa ja sitä kautta muokattavuus pienenee muodonmuutoksen lisääntyessä. Tästä syystä hetkellisen muokkausvastuksen arvon sijasta materiaalien muokkaantumisen arvioimiseksi käytetään usein myötö- ja murtolujuuden keskiarvoa.



Kuva 12. Muokkausvastuksen määrittäminen [8]

Kuvassa 12. näkyy vetokokeen todellinen jännitys - todellinen myötymä kuvaaja, jossa on merkittynä materiaalin myötölujuus Y , tutkittavan alueen suurin muokkausvastuksen arvo Y_f ja muokkausvastuksen keskiarvo \bar{Y}_f . Muokkausvastuksen keskiarvo määritetään integroimalla yhtälö (4.1) nolasta tutkittavan myötymän arvoon. Integroinnin tuloksena on seuraava yhtälö. [8, s. 356]

$$\bar{Y}_f = \frac{K\epsilon^n}{1+n} \quad (4.2)$$

jossa \bar{Y}_f on keskimääräinen muokkausvastus, ϵ on myötymä ja K sekä n ovat vakioita.

Kaavaa (4.1) voidaan käyttää esimerkiksi arvioimaan kappaleen kokema muokkausvastus muokkauksen aikana, kun tiedetään muodonmuutoksen määrä ja materiaalille ominaiset vakioiden arvot.

5. MATERIAALIEHDOTUKSET

Kaikki teräkset eivät ole kylmämuokkaukseen sopivia niiden mekaanisten ominaisuuksien takia. Joko ne ovat liian lujia jo ennen muokkausta, eikä tarvittavaan muokkausasteeseen päästä käytössä olevan laitteen voimalla, tai ne muokkauslujittuvat niin voimakkaasti, että niistä tulee liian hauraita. Tässä osiossa tarkastellaan pehmeyttä vaativiin sovelluksiin sopivia teräksiä sekä kovuutta vaativiin sovelluksiin sopivia teräksiä, jotka voidaan tarvittavan kovuuden saavuttamiseksi lämpökäsitellä muokkauksen jälkeen.

Ominaisuudet, joihin tässä osiossa keskitytään, ovat materiaalin kovuus ja lujuus. Koska IF-teräksen kovuuden lukuarvoa ei löytynyt luotettavasta lähteestä, se on arvioitu lujuudesta kaavalla (3.4). Usean taulukoissa esiintyvän materiaalin arvot on saatu Ansys Granta EduPack-ohjelmasta [10]. Taulukoissa esiintyvien arvojen kohdalla on merkitty mistä lähteestä lukuarvo on saatu, ja kun kaavaa (3.4) on käytetty, se on merkitty tähdellä.

Seuraavassa taulukossa esitetään pehmeyttä vaativiin sovelluksiin sopivia teräksiä. Mekaanisten ominaisuuksien arvot on annettu teräksen pehmeäksi hehkutetussa tilassa.

Taulukko 2. *Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin sopivat teräkset*

Teräs	Kovuus [HV]	Myötölujuus [MPa]	Murtolujuus [MPa]
s355	147 – 185 ^[10]	355 – 414 ^[10]	470 – 680 ^[10]
AISI 1015	108 – 128 ^[10]	255 – 315 ^[10]	345 – 430 ^[10]
AISI 1022	130 – 160 ^[10]	285 – 350 ^[10]	380 – 475 ^[10]
AISI 4150	183 – 223 ^[10]	340 – 420 ^[10]	660 – 800 ^[10]
AISI 5160	183 – 225 ^[10]	245 – 305 ^[10]	645 – 800 ^[10]
C2C	90 – 140 ^[17]	190 – 310 ^[17]	320 – 400 ^[17]
C8C	90 – 140 ^[18]	220 – 330 ^[18]	320 – 430 ^[18]
Karkearakeinen IF-teräs	66 – 74*	104 – 108 ^[4]	219 – 245 ^[4]

C2C ja C8C on valittu mukaan tarkasteluun, sillä ne ovat osa CxC teräslaatuja, jotka standardin EN-10263 mukaan on tarkoitettu kylmätöyssäykseen. Standardi EN-10263 on listaus kylmätöyssäys- ja kylmämuovausteräksistä, joita ei ole tarkoitettu lämpökäsitellä

muokkauksen jälkeen. Eri CxC teräsmaat eroavat niiden seosaineissa, jotka ovat listattu seuraavassa taulukossa. Kaikkia seosaineita ei ole taulukossa mainittu, sillä ne ovat kaikille laaduille samat; Si: max. 0,1 -p%, S: max. 0,025 -p% ja Al: 0,02–0,06 -p%. Osalle CxC teräksistä löytyy vastaava AISI-laatu, jotka ovat myös listattu taulukossa. Vaikka AISI vastaavuus osalle laaduista löytyy, tämä ei tarkoita, että ne olisivat täysin verrattavissa toisiinsa varsinkaan kylmämuokkauksessa. Esimerkiksi C15C teräksen minimi murtokouros on 58% ja AISI 1015 teräksellä se on 40%.

Taulukko 3. CxC terästen kemiallinen koostumus [18] ja AISI vastaavuus [20].

Teräs	C -p% max.	Mn -p%	P -p% max.	AISI vastaava
C2C	0,03	0,2–0,4	0,02	-
C4C	0,02–0,06	0,25–0,40	0,02	-
C8C	0,06–0,1	0,25–0,45	0,02	AISI 1008
C10C	0,08–0,1	0,3–0,5	0,025	AISI 1010
C15C	0,13–0,17	0,35–0,6	0,025	AISI 1015
C17C	0,15–0,19	0,65–0,85	0,025	AISI 1018
C20C	0,18–0,22	0,7–0,9	0,025	AISI 1021

Seuraavassa taulukossa esitetään kovuutta vaativiin sovelluksiin soveltuvia teräksiä. Osa teräksistä on samaa teräslaatua kuin taulukossa 2, mutta niiden arvot on esitetty lämpökäsitellyssä tilassa. Muiden teräslaatuojen ominaisuudet ennen lämpökäsittelyä on myös esitetty tässä taulukossa.

Taulukko 4. *Kovuutta vaativiin sovelluksiin sopivat teräkset*

Teräs	Kovuus [HV]	Myötölujuus [MPa]	Murtolujuus [MPa]
Maraging 300	280 ^[16]	827 ^[21]	1034 ^[21]
Maraging 300 (1)	515 – 550 ^[10]	1810 – 2000 ^[10]	1870 – 2070 ^[10]
AISI 4150 (2)	475 – 585 ^[10]	1550 – 1900 ^[10]	1740 – 2120 ^[10]
AISI 5160 (3)	500 – 610 ^[10]	1590 – 1960 ^[10]	1800 – 2200 ^[10]
AISI 6150	183 – 225 ^[10]	370 – 455 ^[10]	595 – 740 ^[10]
AISI 6150 (2)	483 – 593 ^[10]	1520 – 1860 ^[10]	1740 – 2130 ^[10]
AISI 9255	220 – 260 ^[10]	435 – 540 ^[10]	695 – 855 ^[10]
AISI 9255 (2)	540 – 660 ^[10]	1840 – 2260 ^[10]	1890 – 2320 ^[10]

Lämpökäsittelyt taulukossa 4. mainituille teräksille, (1): erkautuskarkaistu 482°C, (2): karkaistu öljyyn, päästetty 205°C, (3): karkaistu öljyyn, päästetty 315°C [10].

Terästen sopivuutta kylmämuokkaukseen voidaan arvioida myötölujuuden ja murtolujuuden suhteella. Mitä pienempi lujuuksien suhde on, sitä vähemmän materiaali muokkautuu ja on täten sopivampi kylmämuokkaukseen. Toisena kriteerinä on käytetty arviota muokkausvastuksesta laskemalla keskiarvo myötö- ja murtolujuuden välillä. Mitä pienempi muokkausvastus on, sitä helpompi materiaalin kylmämuokkaus on tehdä. Jos teräkselle on löytynyt murtokurouman arvo, eli arvo kuinka monta prosenttia teräskappaleen poikkipinta-ala voi pienentyä vetokokeessa ennen murtumista, se on myös huomioitu. Osalle materiaaleista on myös huomioitu EduPack-ohjelman tarjoama ”kylmämuokkaukseen sopivuus”. Ohjelma tarjoaa arvoja esimerkiksi ”sopimaton”, ”hyväksyttävä” ja ”erinomainen”. Esimerkki seuraavissa kuvissa.

Processing properties

Metal casting	ⓘ	Unsuitable
Metal cold forming	ⓘ	Acceptable
Metal hot forming	ⓘ	Excellent
Metal press forming	ⓘ	Excellent

Kuva 13. "Hyväksyttävä" kylmämuokkaukseen. [10]

Processing properties

Metal casting	ⓘ	Unsuitable
Metal cold forming	ⓘ	Excellent
Metal hot forming	ⓘ	Excellent
Metal press forming	ⓘ	Excellent

Kuva 14. "Erinomainen" kylmämuokkaukseen. [10]

Ohjelmassa ei tarkemmin kerrota mistä nämä kriteerit kylmämuokkaukseen sopivuudelle on saatu. Maininta on kuitenkin siitä, että jos materiaalilla on arvo "erinomainen", sitä käytetään paljon kylmämuokausprosesseissa ja sen käyttäminen ei aiheuta ongelmia. Jos materiaalilla on arvo "hyväksyttävä", sitä yleisesti käytetään kylmämuokkauksessa mutta laatu ei välttämättä ole sitä varten optimoitu. [10]

Materiaaliehtotuksia määritettäessä on käsitelty erilaisia materiaaliparametreja ja annettu niiden perusteella arvosana (#) tiettyyn parametriin liittyen (1=paras), sekä annettu lopullinen hyvyysarvo mikä on summa kaikista annetuista arvosanoista. Pienimmän summan saanut materiaali on saanut parhaan hyvyysarvon. Taulukoissa merkityt arvot viittaavat sen vasemmalla puolella olevaan materiaaliparametriin. Hyvyysarvoa määritettäessä jokaisella materiaaliparametreista saadulla arvosalalla on sama painoarvo. Tämä ei välttämättä ole käytännössä totta, joten kokeellisia tutkimuksia vaaditaan, jotta voidaan selvittää mikä materiaaliparametreista on suurimmassa roolissa. Tässä osiossa käsiteltäviä materiaaliparametreja ovat lujuuksien suhde, myötölujuus, kovuus, muokausvastus, murtokurouma ja kylmämuokkaukseen sopivuus. Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin hyvyysarvoa määritettäessä on suosittu pientä myötölujuutta, pientä lujuuksien suhdetta, pientä kovuutta, suurta murtokurouman arvoa ja huomioitu EduPack-ohjelman tarjoama kylmämuokkaukseen sopivuus. Kovuutta vaativiin sovelluksiin hyvyysarvoja määritettäessä mekaaniset ominaisuudet on huomioitu ennen ja jälkeen lämpökäsittelyn. Kaikilla kovuutta vaativiin sovelluksiin ehdotetuista materiaaleista on EduPack-ohjelman tarjoama sopivuus kylmämuokkaukseen "erinomainen".

Seuraavissa taulukossa on esitetty pehmeyttä vaativiin sovelluksiin sopivien terästen materiaaliparametrit, niiden arvosanat sekä lopullinen hyvyysarvo.

Taulukko 5. *Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin sopivien terästen vertailu 1*

Teräs	Myötölujuus [MPa]	#	Kovuus [HV]	#
s355	385 +/- 30	8	166 +/- 19	6
AISI 1015	285 +/- 30	5	118 +/- 10	4
AISI 1022	318 +/- 32	6	145 +/- 15	5
AISI 4150	380 +/- 40	7	203 +/- 20	7
AISI 5160	275 +/- 30	3	204 +/- 21	8
C2C	250 +/- 60	2	115 +/- 25	2
C8C	275 +/- 55	3	115 +/- 25	2
Karkearakeinen IF-teräs	106 +/- 2	1	70 +/- 4	1

Taulukko 6. *Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin sopivien terästen vertailu 2*

Teräs	Lujuuksien suhde	#	Murtokurouma [%]	#
s355	1,480 +/- 0,16	4	-	7
AISI 1015	1,360 +/- 0,01	2	40	5
AISI 1022	1,345 +/- 0,015	1	50	3
AISI 4150	1,920 +/- 0,02	6	40	5
AISI 5160	2,625 +/- 0,005	8	30	6
C2C	1,485 +/- 0,195	5	75	1
C8C	1,375 +/- 0,075	3	65	2
Karkearakeinen IF-teräs	2,185 +/- 0,085	7	-	7

Taulukko 7. Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin sopivien terästen vertailu 3

Teräs	Muokkausvastus [MPa]	#	Sopivuus kylmämuokkaukseen	#	Lopullinen hyvyysarvo (summa=> arvo)
s355	480 +/- 67	6	Hyväksyttävä	3	34=> 7
AISI 1015	337 +/- 37	5	Hyväksyttävä	3	24=> 5
AISI 1022	330 +/- 98	4	Hyväksyttävä	3	22=> 4
AISI 4150	555 +/- 55	8	Erinomainen	1	34=> 8
AISI 5160	499 +/- 54	7	Erinomainen	1	32=> 6
C2C	305 +/- 50	2	-	4	16=> 1
C8C	325 +/- 55	3	-	4	17=> 2
Karkearaikainen IF-teräs	170 +/- 8	1	-	4	21=> 3

Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin parhaan hyvyysarvon sai C2C, joka on standardisoitu kylmätysäykseen tarkoitettu teräs. IF-teräksellä on tarkastelluista teräksistä matalimmat lujuus- ja kovuusarvot, mutta koska murtokuroumaa eikä EduPackin tarjoamaa sopivuutta kylmämuokkaukseen löytynyt, se sai korkeamman summan.

IF-teräs on levytuotteena yksi parhaiten muokkautuvista teräksistä, mutta koska tässä työssä käytetään pulttien valmistusta esimerkkinä muodonantomenetelmästä, eikä IF-terästä yleisesti tuoteta tankona, hyvyysarvon kriteereitä ja sen määrittymistä ei lähdetty muokkaamaan huomioimaan IF-teräkseltä puuttuvat arvot.

Seuraavissa taulukossa on esitetty kovuutta vaativiin sovelluksiin sopivien terästen materiaaliparametrit, niiden arvosanat sekä lopullinen hyvyysarvo. Myötölujuus ja kovuus on esitetty terästen lämpökäsitellyssä tilassa. Lujuuksien suhde, muokkausvastus ja murtokurouma on esitetty terästen lämpökäsittelemättömässä tilassa, jotta kylmämuokkauksen vaikutus voidaan huomioida.

Taulukko 8. *Kovuutta vaativiin sovelluksiin sopivien terästen vertailu 1*

Teräs	Myötölujuus [MPa]	#	Kovuus [HV]	#
Maraging 300	1905 +/- 95	3	533 +/- 18	5
AISI 4150	1900 +/- 175	4	530 +/- 55	4
AISI 5160	1960 +/- 185	2	555 +/- 55	2
AISI 6150	1860 +/- 170	5	538 +/- 55	3
AISI 9255	2050 +/- 210	1	600 +/- 60	1

Taulukko 9. *Kovuutta vaativiin sovelluksiin sopivien terästen vertailu 2*

Teräs	Lujuuksien suhde	#	Murtokurouma [%]	#
Maraging 300	1,25	1	46*	2
AISI 4150	1,920 +/- 0,02	4	40	4
AISI 5160	2,625 +/- 0,005	5	30	5
AISI 6150	1,610 +/- 0,01	3	48	1
AISI 9255	1,590 +/- 0,01	2	41	3

*Maraging teräkselle murtokurouman arvo löytyi vain erkautuskarkaistussa tilassa

Taulukko 10. *Kovuutta vaativiin sovelluksiin sopivien terästen vertailu 3*

Teräs	Muokkausvastus [MPa]	#	Lopullinen hyvyysarvo (summa=>arvo)
Maraging 300	931	5	16=>4
AISI 4150	610 +/- 55	3	19=>5
AISI 5160	499 +/- 54	1	15=>3
AISI 6150	540 +/- 58	2	14=>2
AISI 9255	632 +/- 67	4	11=>1

Kovuutta vaativiin sovelluksiin parhaan hyvyysarvon sai AISI 9255. Ilman korkeaa muokausvastuksen arvoa Maraging 300 -teräs olisi saanut toiseksi parhaan hyvyysarvon, ja kuten luvussa 2.3 mainittiin, maraging-teräksillä on todella hyvä muokattavuus johtuen sen alhaisesta lujuuksien suhteesta. Korkea lujuuksien suhde voi johtaa siihen, että kylmämuokkaus on hankalaa, varsinkin suurilla muokkausasteilla. Maraging-teräkselle tehtävä erkautuskarkaisu on myös helpompi prosessi kuin tavallinen karkaisu- ja päästöprosessi, mikä muille taulukossa mainituille teräksille tulee muokkauksen jälkeen tehdä.

Riippuen valmistettavasta tuotteesta, valmistustekniikasta ja käytössä olevista laitteista, kovuutta vaativiin sovelluksiin AISI 9255 ja Maraging 300 ovat molemmat varteenotettavia vaihtoehtoja. AISI 9255 muokkauslujittuu paljon voimakkaammin kuin Maraging 300, joten jos muokkausasteet ovat suuret, ja tarpeeksi voimakkaita laitteita ei ole käytettävissä, Maraging 300 on parempi vaihtoehto. Jos muokkaaminen on mahdollista ja haetaan absoluuttisesti parhaita mekaanisia ominaisuuksia, AISI 9255 on parempi vaihtoehto.

6. YHTEENVETO

Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella terästen kylmämuokkaukseen vaikuttavia tekijöitä sekä löytää materiaaliehdotuksia kylmämuokkauksella valmistetuille pulteille. Riippuen tuotteen käyttökohteesta, pultilta vaaditaan erilaisia kovuus- ja lujuusarvoja. Työssä käytettiin ääripäitä mekaanisista ominaisuuksista materiaaliehdotuksia tarkastellessa, eli tuotteen tulisi olla joko mahdollisimman pehmeää tai mahdollisimman kovaa. Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin käytettiin ehtoa, että tuotetta ei tarvitse lämpökäsittellä muokkauksen jälkeen. Kovuutta vaativiin sovelluksiin muokkauksen jälkeinen lämpökäsittely sallitaan ja se on myös pakollista, jotta haluttuihin kovuusarvoihin päästään.

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että sopivan teräksen valintaan vaikuttavat useat eri asiat kuten käytetyn teräksen hiilipitoisuus ja muut seosaineet, lujitusmekanismit, toimitustila, muokkausaste, sekä teräkselle tehtävät muokkauksen jälkeiset lämpökäsittelyt. Hiilipitoisuudella on suora vaikutus teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Muilla seosaineilla on myös suuri vaikutus teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin sekä käyttäytymiseen lämpökäsittelyissä. Teräksen toimitustilalla on vaikutus kylmämuokattavuuteen. Jos teräs on optimoitu kylmämuokkaukseen, päästään suurempiin muokkausasteisiin ennen ongelmien esiintymistä kuin muuten vastaavalla teräksellä. Muokkausaste vaikuttaa olennaisesti lopullisen tuotteen ominaisuuksiin. Terästä kylmämuokattaessa sen lujuus- ja kovuusarvot kasvavat muokkausasteen kasvaessa. Työssä käsiteltiin muokkauksen jälkeisten lämpökäsittelyiden vaikutusta tuotteen ominaisuuksiin sekä niiden toimintaperiaatteita. Tarkastelluille teräksille tulee kovuutta vaativiin sovelluksiin tehdä muokkauksen jälkeen joko perinteinen karkaisu- ja päästöprosessi tai erkautuskarkaisu.

Pehmeyttä vaativiin sovelluksiin tarkasteltiin erilaisia pienen hiilipitoisuuden omaavia perusteräksiä, seostettuja pehmeitä teräksiä, sekä kylmämuokkaukseen optimoituja teräksiä. Parhaaksi teräkseksi pehmeyttä vaativiin sovelluksiin valikoitui C2C, mikä on standardisoitu kylmämuokkaukseen optimoitu teräs. Kovuutta vaativiin sovelluksiin tarkasteltiin eri tavoin seostettuja teräksiä, erikoisteräksiä, sekä osaltaan samoja teräksiä kuin pehmeyttä vaativiin sovelluksiin, jotka olisi muokkauksen jälkeen lämpökäsittely. Parhaaksi teräkseksi kovuutta vaativiin sovelluksiin valikoitui AISI 9255, josta valmistetaan paljon tuotteita kylmämuokkauksella. AISI 9255-teräs sisältää 1,8–2,2% piitä ja sen hiilipitoisuus on 0,51–0,59% [10]. Korkean piin määrän sekä hiilipitoisuuden ansioista, tuotteen valmistuksen jälkeen AISI 9255 on mahdollista lämpökäsittellä todella lujaksi ja kovaksi. Myös Maraging 300 -teräs on kovuutta vaativiin sovelluksiin hyvä vaihtoehto, sillä

se on erittäin hyvin kylmämuokattavissa, sekä sille tehtävä lämpökäsittely muokkauksen jälkeen on helpompi prosessi kuin AISI 9255 teräksen lämpökäsittely.

LÄHTEET

- [1] Joachim Roesler, Harald Harders, Martin Baeker, Mechanical Behaviour of Engineering Materials. Metals, Ceramics, Polymers, and Composites, Springer, 2007.
- [2] L. Peguet, B. Malki, B. Baroux, Influence of cold working on the pitting corrosion resistance of stainless steels, Corrosion Science vol. 49 julkaisu 4, 2007.
- [3] William D Callister Jr. David G Rethwisch, Materials science and engineering, an introduction, 9th edition, Wiley, 2013.
- [4] Onur Saray, Gencaga Purcek, Ibrahim Karaman, Hans J. Maier, Formability of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steels, Metallurgical and Material Transactions A, vol. 44 julkaisu 9, 2013.
- [5] S. Hashmi, Comprehensive Materials Processing, Elsevier, 2014.
- [6] Harry Bhadeshia, Robert Honeycombe, Steels: Microstructure and Properties, 4th edition, Elsevier, 2017.
- [7] S. Hamada, M. Nakanishi, T. Moriyama, H. Noguchi, Re-Examination of Correlation between Hardness and Tensile Properties by Numerical Analysis, Experimental Mechanics vol. 57 julkaisu 5, 2017.
- [8] Mikell P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems, 7th edition, Wiley, 2019.
- [9] Bankim Chandra Ray, Rajesh Kumar Prusty, Deepak Nayak, Phase Transformations and Heat Treatments of Steels, CRC Press, 2020.
- [10] Ansys Granta Edupack sovellus saatavilla osoitteesta:
<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>
- [11] Metallien Brinellin kovuuskoe. Osa 1: Menetelmä, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, SFS-EN ISO 6506-1, 2014
- [12] Metallien Rockwellin kovuuskoe. Osa 1: Menetelmä, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, SFS-EN ISO 6508-1, 2016
- [13] Metallien Vickersin kovuuskoe. Osa 1: Menetelmä, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, SFS-EN ISO 6507-1, 2018
- [14] Metallien Knoopin kovuuskoe. Osa 1: Menetelmä, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, SFS-EN ISO 4545-1, 2018
- [15] Metallien kovuusarvojen muuntaminen. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, SFS-EN ISO 18265, 2013
- [16] Tuomas Riipinen, Heat treatment of AM alloys, VTT-R00899-20, 2020.

- [17] EN 1.0314 (C2C) Non-Alloy Steel, Mechanical Properties. Saatavilla osoitteessa: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.0314-C2C-Non-Alloy-Steel>
- [18] EN 1.0213 (C8C) Non-Alloy Steel, Mechanical Properties. Saatavilla osoitteessa: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.0213-C8C-Non-Alloy-Steel>
- [19] Kylmätys- ja kylmämuovausteräkset. Valssilangat, tangot ja langat. Osa 2: Tekniset toimitusehdot teräksille, joita ei ole tarkoitettu lämpökäsiteltäviksi kylmämuovauksen jälkeen. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, SFS-EN ISO 10263-2:2017
- [20] Wire Rod Cold Heading and Cold Extrusion Steels, saatavilla osoitteessa: <http://akexport.com.tr/ProductDetails/3/kangal>
- [21] Maraging Steel 300, Technical Data Sheet, saatavilla osoitteessa: <https://www.aircraftmaterials.com/data/nickel/C300.html>