

Emma Törmä

HIILETYSKARKAISUN VAIKUTUS HAM- MASPYÖRIEN MIKORAKENTEESEEN

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Emma Törmä: Hiiletyskarkaisun vaikutus hammaspyörrien mikrorakenteeseen
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2024

Hammaspyörät ovat laajalti käytössä olevia voimansiirtokomponentteja, joihin kohdistuu erilaisia muun muassa kulutusta aiheuttavia voimia. Tästä johtuen hammaspyöriä voidaan vahvistaa hiiletyskarkaisulla, jonka tarkoituksena on saada hammaspyörän pinnasta kova ja kulutusta kestävä, ytimen jäädessä sitkeäksi. Hiiletyskarkaisussa tapahtuu muutoksia materiaalin mikrorakenteessa ja sitä kautta myös mekaanisissa ominaisuuksissa. Tämä työ on kirjallisuuskatsaus hiiletyskarkaisun vaikutuksista hammaspyörrien mikrorakenteeseen. Tarkoituksena on selvittää, miten hiiletyskarkaisu vaikuttaa hammaspyörrien mikrorakenteeseen ja millaisia materiaaleja hiiletyskarkaistavissa hammaspyörissä käytetään.

Työssä selvitetään aluksi teräksessä olevia erilaisia mikrorakenteita sekä niiden ominaisuuksia. Tärkeimmäksi mikrorakenteeksi osoittautuu martensiitti, joka on hyvin kovaa, mutta myös haurasta. Hiiletyskarkaisuprosessissa pyritään martensiittiseen mikrorakenteeseen, sillä kappaleen kovuus riippuu martensiitin määrästä. Martensiitin lisäksi myös jäännösausteniitilla on vaikutusta muodostuviin ominaisuuksiin.

Hiiletyskarkaisuprosessi jaetaan kolmeen vaiheeseen: hiiletukseen, sammutukseen ja päästöön. Hiiletuksessa tarkoituksena on tuoda kappaleen pintaan lisää hiiltä hyödyntäen hiiltä luovutavaa väliainetta. Vaihe tehdään austeniittialueella, jolloin hammaspyörän mikrorakenne saadaan muuttumaan austeniittiseksi. Tässä työssä tutustutaan kaasuhiiletukseen, jossa väliaineena toimii kaasuseos. Sammutuksessa austeniittialueelle kuumennettu hammaspyörä jäähdytetään nopeasti kastamalla esimerkiksi veteen tai öljyyn. Vaiheessa austeniittinen mikrorakenne saadaan muutettua martensiittiseksi, jolloin hammaspyörästä tulee kova ja hauras. Lopuksi päästössä kappaletta hehkutetaan matalassa lämpötilassa martensiitin sitkeysominaisuuksien palauttamiseksi.

Hiiletyskarkaistavissa hammaspyörissä käytetään usein hiiletysteräksiä, joiden hiilipitoisuus on alle 0,2 %. Lisäksi niitä voidaan seostaa esimerkiksi nikkelillä, kromilla, molybdeenillä ja mangaanilla. Tässä työssä tutustutaan neljään eri hiiletysteräkseen, 18CrNiMo7-6, 20MnCr5, 16MnCr5 ja 20NiCrMo2-2, joiden mikrorakennetta tutkitaan ennen ja jälkeen hiiletyskarkaisun. Näistä 18CrNiMo7-6-, 16MnCr5- ja 20NiCrMo2-2-terästen mikrorakenne ennen hiiletyskarkaisua koostuu ferriittistä sekä perliittistä ja 20MnCr5-teräksen hienolamellisesta perliittistä.

Hiiletyskarkaisun jälkeen materiaalien pinnan mikrorakenne koostuu pääasiassa martensiitista sekä jäännösausteniitista. Näiden lisäksi rakenteista löytyy myös karbideja tai rautaoksideja. Ytimen mikrorakenne puolestaan sisältää martensiittia ja mahdollisesti bainiittia. Sekä pinnan että ytimen martensiitin olisi hyvä olla raekooltaan mahdollisimman hienoa, koska silloin kappaleelle saadaan paremmat lujuus- ja sitkeysominaisuudet. Sopivissa määrin sitkeä jäännösausteniitti tasaisesti jakautuneena parantaa väsymisominaisuuksia, kun taas liian suuri määrä vaikuttaa heikentävästi moniin mekaanisiin ominaisuuksiin. Lisäksi karbidit voivat joko parantaa tai heikentää kappaleen ominaisuuksia: pyöreät ja tasaisesti jakautuneet karbidit lisäävät kulutuskestävyyttä ja isot sekä karkeat raerajakarbidit heikentävät muun muassa sitkeyttä.

Avainsanat: Hiiletyskarkaisu, mikrorakenne, hammaspyörä, hiiletysteräs, martensiitti, jäännösausteniitti

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TERÄKSEN MIKRORAKENTEET	2
2.1 Ferriitti, sementtiitti, perliitti ja austeniitti	3
2.2 Bainiitti	5
2.3 Martensiitti	6
3. HIILETYSKARKAISUPROSESSI	8
3.1 Hiiletys	9
3.2 Sammutus	11
3.3 Päästö	15
3.4 Saavutettavat ominaisuudet	16
4. HAMMASPYÖRIEN TYYPILLISET MATERIAALIT	18
4.1 Hammaspyörät	18
4.2 Hiiletysteräket	19
4.2.1 18CrNiMo7-6	21
4.2.2 20MnCr5	21
4.2.3 16MnCr5	22
4.2.4 20NiCrMo2-2	22
5. HIILETYSKARKAISUN VAIKUTUS ERI MATERIAALIEN MIKRORAKENTEISIIN ..	23
5.1 18CrNiMo7-6	23
5.2 20MnCr5	25
5.3 16MnCr5	27
5.4 20NiCrMo2-2	28
6. YHTEENVETO	30
LÄHTEET	32

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Fe_3C	Sementtiitti, metastabiili rautakarbidi
CO	Hiilimonoksidi
H_2	Vety
N_2	Typpi
CO_2	Hiilidioksidi
H_2O	Vesi
CH_4	Metaani
O_2	Happi
$Fe_{2,4}C$	Raudan karbidi
Cr	Kromi
Ni	Nikkeli
Mo	Molybdeeni
Mn	Mangaani

1. JOHDANTO

Hammaspyörät ovat monenlaisissa sovelluksissa käytettyjä, useimmiten pyöreän muotoisia kappaleita, joissa on hampaat. Ne ovat tärkeitä voimansiirtokomponentteja, joita on käytetty vuosisatojen ajan. Vielä nykyäänkin ne ovat elintärkeitä teollisuudelle, ja niiden laadun parantamiseksi tehdään paljon työtä. Hammaspyörien tarkoituksena on välittää pyörimisliike voiman lähteestä käytettävään laitteeseen, kuten moottorista voiman siirtoakseliin sekä muuttaa lähtöakselin pyörimisnopeutta ja väntömomenttia tuloakseliin nähden. [1] Onnistuakseen tehtävässä niiden tulee kestää erilaisia pintaan kohdistuvia rasituksia [2], mutta lisäksi myös isku- ja väsymisrasituksia [3].

Pintakarkaisulla pinnasta saadaan kova sekä kulutusta kestävä, sisäosan rakenteen säilyessä sitkeänä [4]. Hiiletyskarkaisu on hyvin vanha ja yksi yleisimmin käytetyistä pintakarkaisumenetelmistä hammaspyörien karkaisuun [1]. Menetelmä koostuu kolmesta vaiheesta: hiiletuksesta, sammutuksesta ja päästöstä. Näistä ensimmäisessä tapahtuu kappaleen pinnan hiilipitoisuuden lisääminen. Sammutuksessa kappaleesta saadaan kova, kun taas päästössä vähennetään haurautta. Hiiletyskarkaisu vaatii onnistuakseen korkean lämpötilan sekä hiiltä luovuttavan väliaineen. [5]

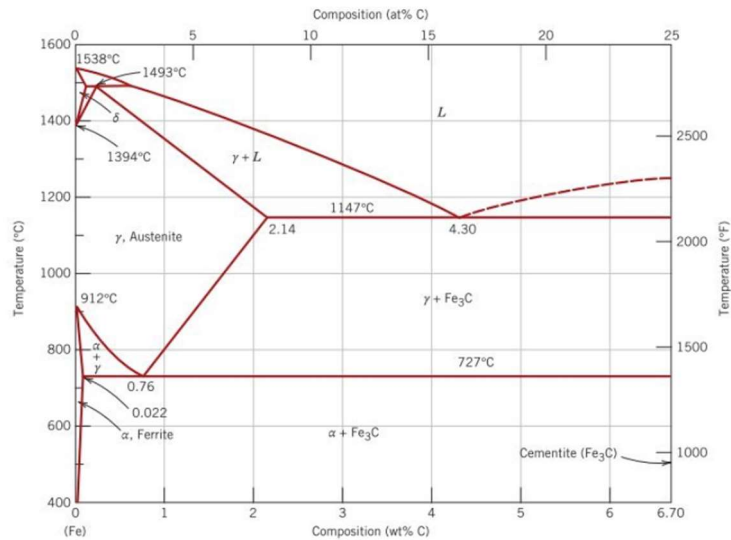
Koska hiiletyskarkaisu tehdään korotetussa lämpötilassa, vaikuttaa se myös materiaalien mikrorakenteeseen. Mikrorakenteella on suuri merkitys muun muassa kappaleen mekaanisille ominaisuuksille [6], joten hammaspyörien mikrorakenteen tunteminen prosessin eri vaiheissa on tärkeää.

Tässä työssä tutkitaan hiiletyskarkaisun vaikutusta isojen hammaspyörien mikrorakenteeseen. Tarkoituksena on selvittää, millaisia materiaaleja hiiletyskarkaisuissa hammaspyörissä tyypillisimmin käytetään ja miten menetelmä vaikuttaa näiden materiaalien mikrorakenteeseen.

Työssä tarkastellaan ensimmäiseksi, millaisia mikrorakenteita teräksissä esiintyy. Seuraavaksi tutkitaan, mitä hiiletyskarkaisuprosessi tarkoittaa ja miten se toteutetaan. Tämän jälkeen tutustutaan muutamiin hammaspyörissä käytettyihin materiaaleihin sekä niiden mikrorakenteisiin ennen hiiletyskarkaisua ja sen jälkeen. Lopuksi on vielä yhteenveto, jossa esitellään saadut lopputulokset sekä vastataan tutkimuskysymyksiin.

2. TERÄKSEN MIKRORAKENTEET

Teräs on raudan ja hiilen muodostama seos, jossa hiilen osuus on alle 2 %. Näiden lisäksi teräkset sisältävät usein seosaineita, jotka vaikuttavat muun muassa terästen sitkeyteen, lujuuteen ja työstettävyyteen sekä myös karkenevuuteen. Teräksen eri mikrorakenteita ovat ferriitti, perliitti, sementiitti, austeniitti, bainiitti ja martensiitti. Mikrorakenteiden ymmärtäminen on tärkeää, sillä ne vaikuttavat teräksen ominaisuuksiin. Lämpökäsittelyitä puolestaan tehdään, koska niiden avulla mikrorakennetta saadaan muutettua halutunlaiseksi. [7] Ohessa kuvassa 1 on esitetty rauta-hiili-tasapainopiirros [6], jonka avulla voidaan päätellä, millainen mikrorakenne saadaan eri hiilipitoisuuksilla ja eri lämpötiloissa [7].

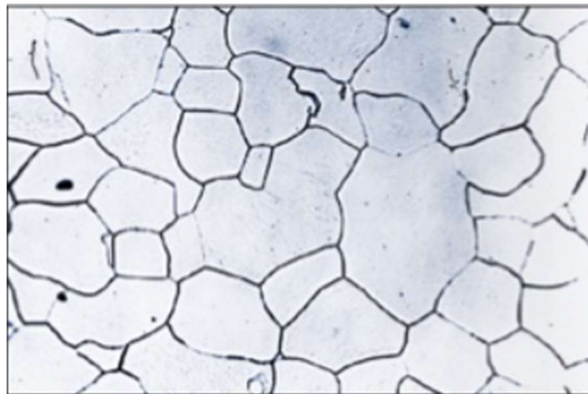


Kuva 1: Rauta-hiili-tasapainopiirros [6]

Teräksen rakenne huoneenlämpötilassa on seurausta austeniitin hajaantumisesta. Korkeissa lämpötiloissa austeniitti hajaantuu diffuusion avulla, jolloin saadaan ferriittiä, perliittiä ja bainiittia. Matalissa lämpötiloissa austeniitin hajaantuminen tapahtuu leikkautumalla, jolloin saadaan martensiittinen rakenne. [4] Seuraavissa alaluvuissa perehdytään teräksen eri mikrorakenteisiin.

2.1 Ferriitti, sementiitti, perliitti ja austeniitti

Kun hiilipitoisuus on matala ja ollaan huoneenlämpötilassa, rauta on ferriitin muodossa [7]. Ferriitti on huoneenlämpötilassa stabiili muoto, jonka kiderakenne on tilakeskinen kuutiollinen. Se on vähähiilistä ja ominaisuuksiltaan pehmeää ja sitkeää. [6] Lisäksi ferriitti on hyvin muovautuvaa, ja se pystyy liuottamaan sisäänsä vain hyvin vähän hiiltä, enintään 0,023 % [8]. Kuvassa 1 ferriittiä on vasemmassa alareunassa. Lisäksi kuvassa 2 on nähtävissä ferriittinen rakenne [7].



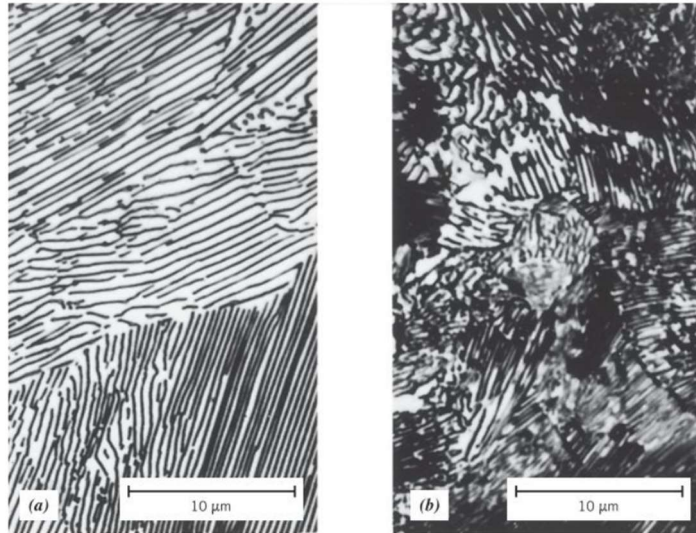
Kuva 2: Ferriittinen rakenne [7]

Hiilipitoisuuden noustessa yli 0,05 %:n muodostuu rakenteeseen ferriitin lisäksi perliittiä, jonka vetolujuus on hyvä, mutta puolestaan muovattavuus on heikompi kuin ferriitillä [7]. Perliitti on kaksifaasinen mikrorakenne, joka koostuu vuorottelevista ferriitti- ja sementiittilamelleista. Sementiitti (Fe_3C) on metastabiili rautakarbidi, joka on kovaa ja haurasta. Kuvassa 1 sementiitti löytyy oikeasta reunasta, sillä siinä on runsaammin hiiltä. Perliitin ominaisuudet ovat ferriitin ja sementiitin ominaisuuksien välistä. [6]

Perliitti esiintyy rakeina, joissa ferriitti- ja sementiittikerrokset ovat orientoituneet samaan suuntaan. Eri faasien kerrosten paksuus riippuu isotermisen muutoksen lämpötilasta. Jos lämpötila on hieman alle 723 °C, on diffuusionopeudet korkeita ja hiiliatomit pystyvät diffundoitumaan pitkiä matkoja. Tällöin rakenteeseen syntyy paksuja ferriitti- ja sementiittilamelleja ja rakennetta kutsutaan karkeaksi perliitiksi. Lämpötilan laskiessa myös diffuusionopeus laskee, jolloin lamellit ohenevat. Lämpötilassa 540 °C muodostuu ohutlamellista perliittiä eli hienoa perliittiä. [6]

Perliittirakenteen kovuus määräytyy sementiitin määrän ja sementiittilamellien etäisyyden mukaan. Tällöin hienolamellinen perliitti on kovempaa kuin karkealamellinen perliitti.

Teräksen hiilipitoisuuden kasvaessa lisääntyy sementiitin määrä ja sitä myötä myös teräksen kovuus. [8] Alla olevassa kuvassa 3 on esitetty sekä karkea- että hienolamellisen perliitin mikrorakenne 3 000-kertaisella suurennoksella. Kuvassa paksimmat ja vaaleat alueet ovat ferriittifaasia. Sementiittifaasi esiintyy puolestaan ohuina ja tummina lamelleina. [6]



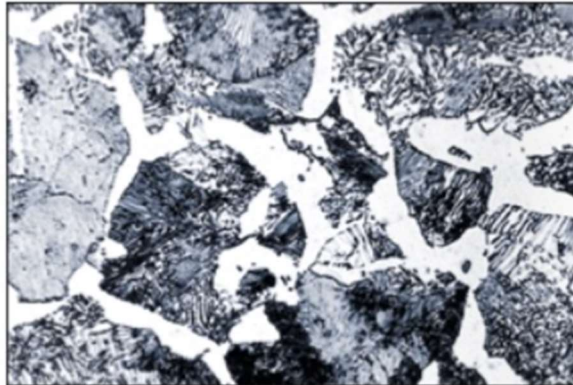
Kuva 3: Mikrokuvat (a) karkealamellisesta ja (b) hienolamellisesta perliitistä 3 000-kertaisella suurennoksella [6]

Kun rautaa kuumennetaan yli $911\text{ }^{\circ}\text{C}$:n, muuttuu kide muoto austeniitiksi, joka voi liuottaa itseensä enemmän hiiltä kuin ferriitti [7]. Austeniitti pystyy liuottamaan itseensä hiiltä 2,06 %:iin saakka [8]. Tällöin austeniitin pisyvyysalue siirtyy kohti alempia lämpötiloja [7]. Austeniitti on kiderakenteeltaan pintakeskinen kuutiollinen [6], ja ominaisuuksiltaan se on melko lujaa sekä ei-magneettista [4]. Koska austeniittinen rakenne on melko pehmeää ja sitkeää, voidaan esimerkiksi takomisessa nostaa lämpötila austeniittialueelle kuumamuokkauksen ajaksi [8]. Kuva austeniittisestä rakenteesta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4: Austeniittinen rakenne [7]

Kun austeniitti hajaantuu alle 0,8 %:n hiilipitoisuuksilla, syntyy ferriittis-perliittinen mikrorakenne [7]. Kuvassa 5 on esitetty ferriittis-perliittinen mikrorakenne.

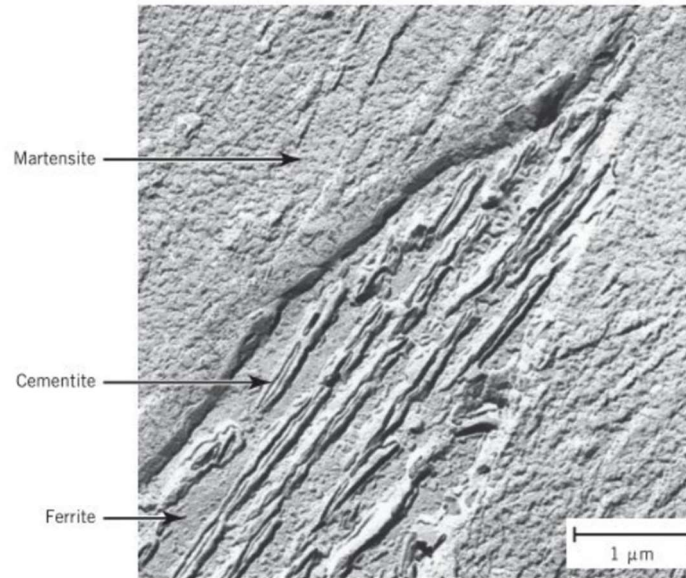


Kuva 5: Ferriittis-perliittinen rakenne, jossa hiiltä on 0,5 % [7]

Tällaisessa mikrorakenteessa perliitin määrä kasvaa hiilipitoisuuden kasvaessa niin, että hiilipitoisuuden ollessa 0,8 %:n kohdilla, mikrorakenteessa on vain perliittiä [7]. Tämä esitellään luvussa 4, jossa käsitellään eri hiiletysterästen mikrorakenteita ennen hiiletyskarkaisua.

2.2 Bainiitti

Austeniitin hajaantuminen perliitiksi loppuu lämpötilassa 500 °C ja martensiitin muodostuminen alkaa vasta huomattavasti alemmissa lämpötiloissa. Tällä lämpötilavälillä austeniitti hajaantuukin bainiitiksi [4], joka koostuu ferriitistä ja hienosta sementiitistä [6]. Bainiitin muodostuminen on ikään kuin perliitti- ja martensiittireaktion välimuoto: rakenne muodostuu osittain diffuusion ja osittain leikkautumisen avulla. Toinen näistä kuitenkin kontrolloi bainiittireaktiota. Diffuusio on vaikeampaa, kun lämpötila laskee ja tästä johtuen bainiittirakenteesta tulee hienojakoisempi. Kun lämpötila on noin 500 °C muodostuu yläbainiittia, jonka ominaisuudet ovat hyvin lähellä hienolamellisen perliitin ominaisuuksia. Toisaalta, kun lämpötila on 300 °C muodostuu alabainiittia, jonka kovuus on lähes martensiitin luokkaa ja sitkeys parempi kuin päästömartensiitilla. [4] Bainiitissa yhdistyy hyvä iskusitkeys ja kovuus [8]. Bainiittimikrorakenteen yksityiskohdat ovat todella hienoja, jolloin niiden näkeminen erillään on mahdollista vain elektronimikroskoopin avulla [6]. Tämä voidaan havaita myös kuvasta 6.



Kuva 6: Elektronimikroskooppikuva bainiittirakenteesta [6]

Kuvassa 6 on esitetty bainiittirakenne vinottain alhaalta ylös, ja kuvaan on merkitty ferriittimatriisi sekä neulamaiset sementiittialueet. Ympäröivä faasi on martensiittia. [6]

2.3 Martensiitti

Kun teräs jäähdytetään hyvin nopeasti diffuusiolämpötilojen alapuolelle, ei austeniitti hajaannu perliitiksi. Sen sijaan austeniitti jää rakenteeseen metastabiiliksi osaksi tai leikkautumisen avulla muuttuu hiiliyliylläiseksi ferriitiksi eli martensiitiksi. Syntyvän martensiitin hiilipitoisuus on sama kuin austeniitin, josta se syntyy ja reaktio tapahtuu vakio- λ -lämpötilan sijaan tietyllä lämpötila-alueella. [9] Martensiittisessä kiteessä on ferriitin sisään jäänyt ylimääräistä hiiltä pakkotilaan. Nopean jäähdytyksen takia hiili ei ehdi suotautua pois austeniittikiteestä, jolloin se jää syntyneen ferriittikiteen sisään. Kun ferriittikide jäähtyy ja kutistuu, ylimääräinen hiili aiheuttaa sisäisiä jännityksiä. Tämä aiheuttaa martensiitin haurauden. [8] Kuvassa 7 on esitetty martensiittinen mikrorakenne.



Kuva 7: Martensiittinen mikrorakenne [7]

Martensiittireaktioon liittyy tilavuuden kasvu, kun austeniitin tiiviisti pakattu pintakeskinen kuutiollinen rakenne korvautuu ferriitin väljemmällä tilakeskisellä kuutiollisella rakenteella. Tilavuuden kasvu riippuu lämpötilasta ja hiilipitoisuudesta, ja se aiheuttaa kappaleisiin karkaisujännityksiä. Nämä jännitykset eivät pääse laukeamaan muodonmuutosten avulla, sillä martensiitti muodostuu niin alhaisissa lämpötiloissa. Varsinkin vetojännitykset, jotka johtuvat martensiitin muodostumisesta eri aikaan eri osissa, ovat haitallisia. Ne aiheuttavat vetojännitystilan. [9] Monet austeniittiin liuenneet seosaineet pyrkivät vaikeuttamaan austeniitin hajaantumista martensiitiksi. Tehokkain estävä vaikutus on hiilellä. [4]

Huomioitava on myös, että, jos jäähditys huoneenlämpötilaan suoritetaan 0,7 %:n hiilipitoisuudella tai sitä suuremmalla hiilipitoisuudella, rakenteeseen jää hajaantumaton austeniittia, jäännösausteniittia [4]. Se on austeniittia, joka ei ole muuttunut martensiitiksi nopean sammutuksen aikana [6]. Jäännösausteniitin määrä lisääntyy hiilipitoisuuden kasvaessa ja tämä vaikuttaa karkaisussa saattaviin tuloksiin [4]. Kuvassa 8 on esitetty martensiittinen rakenne, johon on jäänyt myös hajaantumaton austeniittia. Mustat neulamaiset rakeet ovat martensiittia ja valkoiset alueet jäännösausteniittia. Kuva on otettu 1 220-kertaisella suurennoksella. [6]



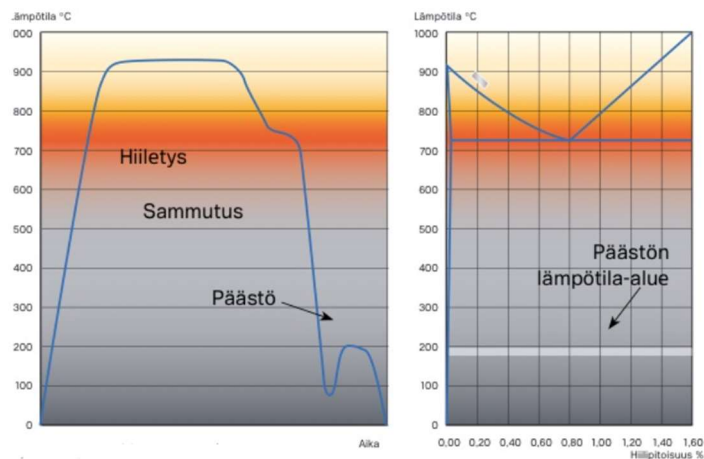
Kuva 8: Mikrorakenne, jossa martensiittia (mustat alueet) ja jäännösausteniittia (valkoiset alueet) [6]

Martensiittinen rakenne on kovaa, ja kovuus riippuu hiilipitoisuudesta. Se kasvaa 0,8 %:n hiilipitoisuuteen asti, kun sammutetaan huoneenlämpötilaan. Tällainen rakenne on myös hauras. Päästämällä martensiittinen rakenne saadaan pehmeämmäksi ja sitkeämmäksi kuin päästämätön martensiitti. [4] Lisäksi karkaistun kappaleen kovuus on riippuvainen muodostuneen martensiitin määrästä [9].

3. HIILETYSKARKAISUPROSESSI

Pintakarkaisuprosessissa lisätään kappaleen pintaan esimerkiksi hiiltä tai typpeä, jolloin pinnan koostumus muuttuu. Pintakarkaisu onkin lämpökemiallinen käsittely. [3] Sillä tavoitellaan rakennetta, jossa kappaleen pinta on hyvin kova ja kulutusta kestävä, mutta sisäosan mikrorakenne säilyy sitkeänä. Sitkeyttä ja väsymisominaisuuksia saadaan lisättyä pyrkimällä saavuttamaan kappaleen pinnalle puristusjännityksiä. [4]

Yksi yleisimmin käytetyistä pintakarkaisumenetelmistä on hiiletyskarkaisu. Siinä käytetyt materiaalit ovat usein matalahiilisiä teräksiä, joita käsittelyssä kuumennetaan hiilipitoisessa ympäristössä. Tällöin hiili diffundoituu kappaleen pintaan ja pinnasta saadaan runsashiilinen. Tästä johtuen kappaleen pinnan kovuus on suurempi kuin matalahiilisenä pysyvän sisäosan. Sisäosan ollessa matalahiilistä terästä, hiiletuksen jälkeinen sammutus ei vaikuta siihen. Tällöin sisäosat säilyvät sitkeinä ja siten lisäävät isku- ja väsymysrasitusten kestoja. [3]



Kuva 9: Hiiletyskarkaisuprosessi [7]

Hiiletyskarkaisuprosessi jaetaan kolmeen osaan: termokemialliseen prosessiin eli hiiletukseen, sammutukseen ja päästöön. Näistä ensimmäisessä tarkoituksena on lisätä pinnan hiilipitoisuutta korkeissa lämpötiloissa. [10] Vaihe voidaan suorittaa erityyppisissä uuneissa [4] ja siihen on mahdollista yhdistää sammutus kaasussa sekä korkeissa lämpötiloissa, noin 880-980 °C. Toinen vaihe, eli sammutus suoritetaan jäähdyttämällä kappale kastamalla esimerkiksi öljyyn, jolloin saadaan kappaleelle kova pinta. Kolmas vaihe

tapahtuu jälleen korotetussa lämpötilassa: päästössä saadaan vähennettyä muun muassa alkumurtumia [10] ja palautettua sitkeysominaisuuksia [4]. Siinä käytettävät lämpötilat ja ajat riippuvat päästettävästä tuotteesta [10]. Kuvassa 9 on esitetty hiiletyskarkaisuprosessin periaate.

Tässä luvussa tutkitaan tarkemmin hiiletyskarkaisuprosessin periaate ja lyhyesti siinä saavutettavia ominaisuuksia.

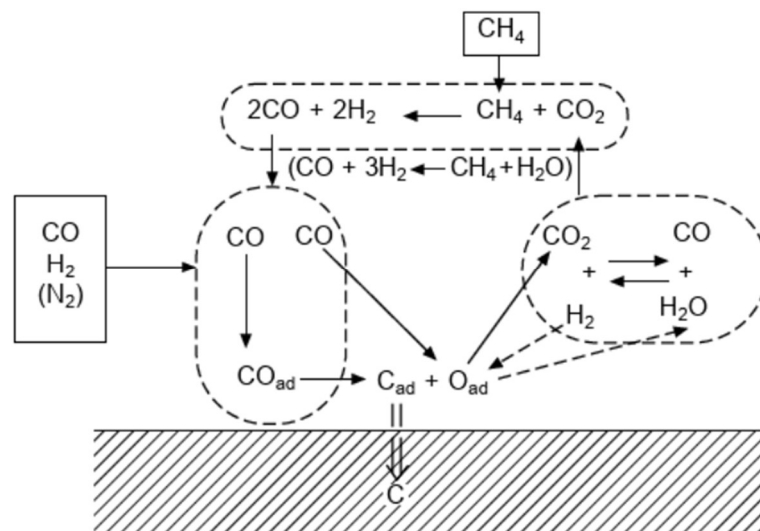
3.1 Hiiletys

Hiiletyskarkaisuprosessin ensimmäinen vaihe on hiiletys, jossa tarkoituksena on tuoda kappaleen pintaan lisää hiiltä. Tästä johtuen hiiletys tehdään austeniittialueella [4], jossa lämpötila on noin 850-950 °C [11]. Lisäksi kappaleen on oltava väliaineessa, joka luovuttaa hiiltä [4]. Tällöin varmistetaan ympäristön riittävä hiilipotentiali, jolloin hiili pystyy absorboitumaan kappaleen pintaan ja luomaan pitoisuusgradientin kappaleen pinnan ja sisäpuolen välille diffuusion avulla [11]. Kun pintakerros on rikastettu hiilellä, mahdollistaa se suuren lujuuden saamisen sammutuksen jälkeen [1]. Hiiletys voidaan suorittaa pakkaus-, liuos-, kaasu-, tyhjiö- tai plasmahiilettyksenä, riippuen, missä muodossa väliaine on [11]. Kuitenkin kaikkia menetelmiä yhdistää se, että hiilettyminen itsessään tapahtuu kaasufaasin avulla [4]. Tässä työssä perehdytään enemmän kaasuhiilettykseen, joka on hyvin yleinen menetelmä hammaspyörien hiilettykseen.

Kaasuhiiletys on termokemiallinen prosessi, jossa muutama kappaleen pinnan lähialueen kemiallista koostumusta rikastamalla pinta hiilellä. Jotta tällainen vaikutus saadaan aikaan, tulee hiiletysuunin sisällä olla tietty atmosfääri. [5] Lisäksi uunin on oltava atmosfäärikontrolloitu ja ilmakehän tulee olla korkeahiilinen, mikä mahdollistaa hiilen kulkeutumisen kappaleiden pintaan [12]. Uunin atmosfääri koostuu kaasuseoksesta, jossa on pääasiassa hiilimonoksidia (CO), vetyä (H_2) ja typpeä (N_2). Näiden lisäksi seoksessa on myös pieniä määriä hiilidioksidia (CO_2), vesihöyryä (H_2O), metaania (CH_4) ja happea (O_2). Hiilettävän vaikutuksen aiheuttavat hiilimonoksidi ja vety. [5] Usein kaasuhiiletysuuneihin on asennettu puhaltimia, joiden tarkoituksena on sekoittaa ilmakehää. Tämä auttaa aikaansaamaan tasaisesti käsiteltyjä kappaleita. [12]

Kaasuhiiletysreaktion ensimmäisessä vaiheessa kaasumuotoiset hiilimonoksidimolekyylit absorboituvat kappaleen pinnalle. Seuraavaksi absorboituneet molekyylit hajoavat hiili- ja happiatomeiksi johtuen uunin korkeasta lämpötilasta ja teräksen pinnan katalyyttisestä vaikutuksesta. Tätä seuraa hiiliatomien diffundoituminen teräkseen, jolloin hap-

piatomit kerrostuvat teräksen pinnalle. Kaasumaisten vetymolekyylien tehtävänä on reagoida happiatomien kanssa ja poistaa ne kappaleen pinnalta muodostamalla vesihöyryä. Myös hiilimonoksidimolekyylit voivat poistaa happea pinnalta, jolloin muodostuu puolestaan hiilidioksidimolekyylejä. Jos vesihöyryn ja hiilidioksidin määrä uunin atmosfäärissä kasvaa liikaa, heikkenee sen hiiletyskyky. Lisäämällä uunin ilmakehään metaania tai propania, saadaan hiiletysvoima palautettua. Tämä johtuu siitä, että lisätyt kaasut reagoivat vesihöyryn ja hiilidioksidin kanssa luoden hiilimonoksidia ja vetyä. [5] Kuvassa 10 on esitelty kaasuhiiletuksen reaktiota kaasun ja teräksen välillä.



Kuva 10: Kaasuhiiletuksessa tapahtuvat reaktiot kaasun ja kappaleen välillä [5].

Hiiletuksen atmosfääri on mahdollista saada aikaan endotermisellä kaasulla, typpikaasun ja nestemäisen metanolin seoksella tai hiilivetykaasun ja ilman seoksella [5].

Hiiletuksessa materiaalien mikrorakenne muuttuu austeniittiseksi. Tällöin ensimmäiseen kriittiseen lämpötilaan saakka, kun ferriitti muuttuu austeniitiksi kappaleen tilavuus kasvaa. Austeniitin muutoksen päätyttyä tilavuus kasvaa edelleen lämpötilan kasvun takia, kuitenkin eri laajenemiskertoimella kuin ferriitin muutoksessa. Lämpösupistumista puolestaan tapahtuu austeniittisen muodonmuutoksen jälkeen lämpötilan laskiessa kohti sammutuslämpötilaa. [11]

Hammaspyörän pinnan hiilipitoisuuteen ja hiilen jakautumiseen pinnasta kohti sisustaa vaikuttaa monet tekijät, kuten lämpötila, hiiletysaika ja väliaineen hiiletysaktiivisuus. Hiiletysaktiivisuus tarkoittaa hiilipitoisuutta, jolla hiiltä luovuttava väliaine ja seostamaton teräs on tasapainossa. Seostetulla teräksellä hiilen aktiivisuuteen vaikuttaa seostus. [4]

Jotta saataisiin lujuus ja sitkeys optimoitua mahdollisimman hyväksi, on hiilipitoisuuden pysyttävä alle 1,0 %:ssa. Parhaan lopputuloksen saa, kun hiilipitoisuus on noin 0,8-0,9 %. [1] Kappaleen ominaisuuksiin vaikuttaa pintahiilipitoisuuden lisäksi myös hiiletyskerroksen syvyys [4]. Hiiletysyvyyteen tärkeimmät vaikuttavat parametrit ovat lämpötila ja aika, sillä syvyys on riippuvainen hiilen diffuusiosta kappaleeseen [1]. Varsinkin lämpötila vaikuttaa hiiletysyvyyteen voimakkaasti: pitämällä hiiletysaika samana ja nostamalla lämpötilaa 50 °C on mahdollista saada aikaan 50 % suurempi hiiletysvyvyys. Kuitenkin, vaikka lämpötilan nostaminen ja siten uunijan lyhentäminen on kustannusten kannalta kiinnostavaa, on huomattava, että haitallinen rakeenkasvu alkaa lämpötilan 950 °C yläpuolella. Korkeampaa lämpötilaa rajoittaa myös muun muassa uunin kestävyys ja hiiletysyvyyden hanakala kontrollointi. [4]

3.2 Sammutus

Hiiletöksessä aikaansaatu hiilirikaspinta ei yleensä paranna kappaleen mekaanisia ominaisuuksia kovinkaan paljoa. Tällöin myös hiiletyskarkaisuprosessissa halutut lujuus ja kulutuksenkestävyys eivät juuri muutu. Jotta nämä ominaisuudet voidaan saavuttaa, tulee kappaleeseen saada aikaan faasimuutos. [5] Hiiletysprosessia seuraakin sammutus, jolla on tarkoitus saada teräs lujaksi [4].

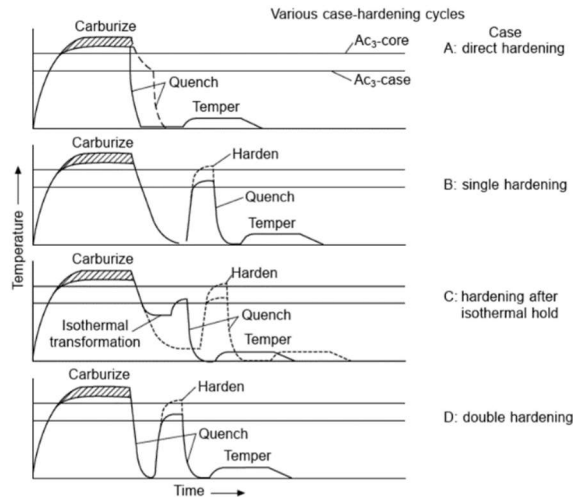
Hiiletöksessä austeniittialueelle kuumennettu kappale sammutetaan eli jäähdytetään nopeasti esimerkiksi kastamalla veteen tai öljyyn, jolloin kappaleesta tulee kova ja hauras. Hiiletyskarkaisussa kappaletta pidetään riittävän kauan austeniittialueella, jotta austeniittia muodostuisi mahdollisimman paljon ja rakenteesta tulee homogeeninen. Saatuun lopputulokseen vaikuttaa muun muassa aineen karkenevuus, joka tarkoittaa taipumusta kareta eli saavuttaa martensiittirakenne. Hiiletyskarkaisussa pyritäänkin kovaan martensiittirakenteeseen. [4] Seosaineista hiili vaikuttaa martensiitin kovuuteen positiivisesti, jolloin teräksen lujuus ja kovuus kasvaa. Samalla sen määrän kasvaessa heikentyy muun muassa sitkeys- ja muovattavuusominaisuuksia. [9] Karkenevuuteen puolestaan vaikuttaa hiilipitoisuuden lisäksi seosaineet, esimerkiksi mangaani ja kromi, sekä jäähtymisnopeus [8]. Karkenevuutta lisäävistä seosaineista mangaani on kustannustehokkain. Se nostaa muun muassa rakenteen lujuutta ja kulutuskestävyyttä lisäämällä karkenevuutta. Kromin karkenevuuden lisäys on vähäisempää kuin mangaanilla ja sen merkitys karkenevuuteen riippuu sen karbideihin sitoutumattomasta määrästä. [9] Karkenevuus ei kuitenkaan tarkoita teräksen kovuutta prosessin jälkeen, sillä kovuus määräytyy hiilipitoisuuden perusteella [8]. Käytännössä siis martensiitin määrä riippuu jäähdytysnopeudesta ja se syntyy, kun kappaletta jäähdytetään niin nopeasti, ettei austeniittialueella

muodostunut austeniitti ehdi hajaantua ferriitiksi, perliitiksi tai bainiitiksi. Jotta haluttu mikrorakenne saataisiin aikaan, on jäähdytysnopeuden oltava riittävän nopea aikaansaamaan haluttu ydinmikrorakenne, mutta ei kuitenkaan niin nopea, että pinta alkaisi halkeilemaan tai syntyisi paljon jäännösausteniittia [11]. Jäännösausteniitin merkitys on kiistanalainen ja se riippuukin paljon halutusta sovelluksesta [13]. Esimerkiksi jäännösausteniitin vaikutuksesta väsymiskäyttäytymiseen on eriäviä mielipiteitä. Joidenkin tutkimusten mukaan väsymiskykyä parantaisi jäännösausteniitin tilavuusosuuden kasvu. Tämä perustuu siihen, että sykliisessä jännityksessä jäännösausteniitin muuttuminen martensiitiksi voi hidastaa väsymishalkeamien kasvua. Toisaalta, jos jäännösausteniittia on liian paljon, se vähentää jäännösjännitystä ja pinnan kovuutta. Tämä puolestaan johtaa väsymiskyvyn heikkenemiseen. [14]

Myös teräksen seosaineilla on vaikutus jäähdytyksessä saatuun mikrorakenteeseen. Mangaani auttaa saavuttamaan hienon raerakenteen estämällä austeniitin hajaantumista. Tällöin saadaan paremmat lujuus- ja sitkeysominaisuudet. Nikkeli puolestaan stabiloi austeniittia ja lisäksi vaikuttaa ferriitin ja perliitin muodostumisaikoihin siirtämällä niitä pidemmille ajoille. Tällöin sammutuksessa saadaan helpommin aikaan martensiittinen rakenne. [9] Nikkeli myös vähentää kriittistä jäähdytysnopeutta, jolloin hitaampi sammutus riittää saavuttamaan samat ominaisuudet [11]. Lisäksi molybdeeni vaikuttaa perliitin muodostumiseen siirtämällä sen pidemmille ajoille [9].

Jäähdytysnopeuden lisäksi sammutuksessa on tärkeää huomata, että jäähtyminen ei ole täysin tasaista. Sammutusaineen kanssa kosketuksissa oleva ulkopinta jäähtyy sisäosaa nopeammin. Epätasainen jäähtyminen muuttaa hieman kappaleen kokoa sekä vääristää sitä, eli aiheuttaa mitta- ja muodonmuutoksia. Tätä edistää myös se, että hiiltyneen pinnan tilavuus on suurempi kuin ydinmateriaalilla. Sammutussuuttimien käyttö voi auttaa vähentämään näitä muodonmuutoksia. [1]

Sammutus voidaan suorittaa suorakarkaisuna, erillisen lämmityksen kautta, pienen lämmöntiputuksen kautta tai kaksoiskarkaisuna [5]. Nämä kaikki eri tavat on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: Erilaisia sammutusvaihtoehtoja [5]

Kuvassa 11 A-kohdassa on esillä suorakarkaisu, jossa sammutus tapahtuu joko suoraan hiiletyslämpötilasta tai vähän alemmasta lämpötilasta, kuitenkin austeniittialueelta. Tämä sammutusmenetelmä on ihanteenteellinen taloudellisesta näkökulmasta [5], mutta sitä tulee käyttää hyvin harkitusti. Sen käytössä tulee huomioida ja testata, että käytetyt materiaalit ja menetelmät tuottavat riittävän hyviä hammaspyöriä haluttuun sovellukseen. Kyseistä menetelmää käytetään esimerkiksi ajoneuvoalalla, missä osat ovat pieniä, mutta volyyymi suurta, ja käytetyt tilat ja laitteet on pystytty valitsemaan sopivasti kappaleen kannalta. [1] Suora sammutus hyvin korkeista lämpötiloista, joita hiiletöksessä käytetään, saattaisi aiheuttaa mikrorakenteeseen jäännösausteniittia, mikä liiallisena heikentää lujuutta ja jäännöspuristusjännitystä. Sen sijaan uunin lämpötilaa voidaan laskea (840-860 °C) ja tämän tasausjakson jälkeen sammuttaa suoraan kyseisestä lämpötilasta. Näin saadaan kovuus hyväksi ja jäännösausteniitin määrää vähennettyä. [5]

Kuvassa 11 B-kohdassa on puolestaan nähtävillä kertakarkaisu. Sitä hyödynnetään, kun halutaan suuria hiiletysvyökyksiä, jotka vaativat hiiletysuunissa pitkiä aikoja korkeissa lämpötiloissa. Nämä olosuhteet voivat aiheuttaa austeniittisten rakeiden kasvua hiiletyskäsittelyn aikana, mikä johtaa karkeaan martensiittiseen mikrorakenteeseen ja siten suurempaan haurauteen. Tässä sammutusmenetelmässä kappale jäähdytetään hiiletuksen jälkeen huoneenlämpötilaan, jonka jälkeen se lämmitetään uudelleen, pidetään siinä

lämpötilassa pieni hetki ja sammutetaan. [5] Tätä menetelmää käytetään esimerkiksi turbiiniteollisuudessa, missä hammaspyörät ovat suuria, volyyymi on pieni ja käytetyt laitteet ovat yleiseen lämpökäsittelyyn tarkoitettuja. Uudelleenlämmitysmenetelmällä saadaan aikaan parempi metallurginen rakenne [1], mikä johtuu uudelleenlämmityksen aikana tapahtuvasta uudelleenaustenoitumisesta. Siinä karkea martensiitti muuttuu hienorakeiseksi austeniitiksi. Kun tällainen rakenne sammutetaan, saadaan mikrorakenteeksi hienorakeista martensiittia, jolla on paremmat sitkeysominaisuudet kuin karkearakeisella martensiitilla. [5]

Samanlainen vaikutus on myös kuvan 11 C-kohdassa, jossa jäädytystä ei suoriteta huoneenlämpötilaan saakka vaan noin 650 °C:seen. Kappaletta pidetään tässä lämpötilassa riittävän kauan, jotta austeniitti saadaan hajaantumaan perliitiksi ja ferriitiksi ennen uudelleenlämmitystä ja sammutusta. Lisäksi kuvassa 11 D-kohdassa on esitelty kaksoiskarkaisu, jossa ensin sammutetaan suoraan hiiletyslämpötilasta, sitten lämmitetään ja sammutetaan uudelleen. Tällä tavoin mekaaniset ominaisuudet pysyvät samana kuin C-tavassa, mutta vääristymiä tapahtuu enemmän. [5]

Erilaisten sammutusreittien lisäksi myös sammutusväliaineet vaikuttavat saavutettaviin ominaisuuksiin. Yleisimpiä sammutusväliaineita ovat vesi, öljy ja kaasu. Sammutusväliaineena vesi on hyvin tehokas, mutta sillä on hyvin suuri jäähdysteho lämpötiloissa, joissa martensiittia muodostuu. Tällöin voi syntyä jännityksiä ja muodonmuutoksia, mikä aiheuttaa riskin halkeamien kasvulle. [4] Usein veden seassa käytetään polymeerejä, joiden avulla on jonkin verran mahdollista säätää sammutusnopeutta [5]. Polymeerejä käyttämällä vedelle saadaan öljyn ominaisuuksia, kuitenkin ilman palovaaraa ja savuamista. Öljyillä on suurempi viskositeetti kuin vedellä, jolloin myös öljysammutus on vesisammutusta lievempi. Tällöin myös kappaleiden riski halkeamiselle pienenee. Sammutustehoa on mahdollista säädellä sekä parantaa sekoittamalla erilaatuisia öljyjä keskenään sekä lisäämällä sopivia lisäaineita. Sammutusöljyjen tärkeimmät huomioon otettavat asiat ovat viskositeetti ja leimahduspiste. Kaasusammutuksessa puolestaan hyödynnetään hiiletysterästen kohdalla paineistettuja kaasuja ja suuria virtausnopeuksia. Sen hyviä puolia verrattuna kahteen muuhun sammutusväliaineeseen ovat muun muassa parametrien helpompi säädeltävyys ja pienemmät syntyvät päästöt ovat. [4] Lisäksi kappaleet pysyvät puhtaina, eikä niitä tällöin tarvitse puhdistaa sammutuksen jälkeen [15]. Vedyllä on hyvä sammutusteho ja tiheys, mutta se on hyvin räjähdysvaarallista. Typpeä käytetään puolestaan hyvin paljon sen edullisuuden takia. Heliumilla taas on paljon pienempi tiheys kuin typellä, jolloin sen kaasuvirtaus saadaan huomattavasti suuremmaksi. [4]

3.3 Päästö

Sammutusta seuraa päästö, jossa kova ja hauras kappale hehkutetaan matalassa lämpötilassa (150-300 °C) sitkeysominaisuuksien palauttamiseksi. Lisäksi sen avulla saadaan vähennettyä karkaisujännityksiä ja jäännösausteniittia sekä ehkäistyä martensiitin liiallista haurautta. [4] Liian hauraana kappaletta on hyvin haastavaa käyttää. Martensiittimikrorakenteen hauraus johtuu monista tekijöistä, kuten hiiliatomien aiheuttamista hilavääristymistä, karbidien muodostumisesta sammutuksen aikana sekä austeniitin raerajoille syntyneistä epäpuhtauksista. [5]

Päästö olisi hyvä tehdä varovaisesti ja mahdollisimman pian sammutuksen jälkeen, jolloin voidaan vähentää sammutuksen yhteydessä muodostunutta vetojäännösjännitystilaa [4]. Kuitenkin, sekä liian aikainen tai liian pitkällä viiveellä tehty päästö aiheuttaa ongelmia: liian aikaisin tehdyssä päästössä martensiitiksi muuttuminen voi keskeytyä ja liian myöhään tehdyssä päästössä voi syntyä vääristymisongelmia ja jopa halkeilua. Myös päästölämpötila vaikuttaa päästön lopputulokseen: kappaleiden pinnan kovuus laskee, kun päästölämpötila nousee. Päästölämpötila vaikuttaa myös ytimen kovuuteen. Näiden lisäksi on tärkeää huomata, että korkeammat päästölämpötilat vähentävät pinnan kovuutta sekä hiiletyksen syvyyttä. [11] Kromiseostus voi aiheuttaa päästöaurautta eli sitkeyden heikkenemistä. Sen vaikutusta voidaan lieventää seostamalla teräkseen myös molybdeeniä. [9]

Päästö voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäinen on lämpötila-alueella 80-160 °C. Kyseisessä lämpötilassa muodostuu yli martensiitin $Fe_{2,4}C$ -karbidi, joka ydintyy epäjatkuvuuskohtiin. Samalla kappaleen tilavuus pienenee, koska martensiitin hiilimäärä pienenee. Tämä aiheuttaa hilavirheiden määrän vähenemisen. [4] Karbidin saostuminen laskee hieman kovuutta, mutta toisaalta sitkeys lisääntyy huomattavasti. Lisäksi halkeamisherkkyyks vähenee kyseisessä lämpötilassa, mutta jäännösjännitykset vähenevät hyvin vähän. [5] Näin ollen, päästö helpottaa kovaa työstöä kuten hiontaa [16].

Toisessa vaiheessa, lämpötilassa 250 °C, tapahtuu jäännösausteniitin hajaantumista [4]. Hajaantuminen tapahtuu vasta, kun karbidi on vakiintunut [5]. Jos jäännösausteniitin määrä on suuri, tapahtuu austeniitin hajaantuminen bainiittireaktiolla. Puolestaan pieni jäännösausteniitin määrä aiheuttaa hajaantumisen sementiitiksi, koska ympäröivästä martensiitista virtaa hiiltä. [4] Lisäksi jäännösausteniittia voi sementiitin lisäksi hajota ferriitiksi [5].

Päästön kolmas vaihe tapahtuu lämpötila-alueella 260-300 °C. Siinä muodostuu sementtiittiä, Fe_3C , joka ydintyy martensiitin raerajoille sekä niiden sisäpuolella oleviin edullisiin kohtiin. Kun sementtiittialueet kasvavat, tapahtuu ensin karbidin liukeneminen kauttakulkumekanismin mukaisesti. Tässä mekanismissa karbidi liukenee, jolloin ympäristön hiilipitoisuus pysyy tasapainossa, ja toisaalta sementtiitti kasvaessaan pitää martensiitin hiilipitoisuuden lähes nollassa. Pitoisuusero aiheuttaa hiilen kulkeutumisen sementtiittiin. [4]

Päästön jälkeinen jäähditys riippuu teräksen laadusta sekä kappaleen muodosta. Esimerkiksi monimutkaisia kappaleita ei saa jäähdyttää liian nopeasti, sillä se voi aiheuttaa suuria jännityksiä. Kesto ja lämpötila valitaan sen mukaan, millainen kovuus kappaleelle halutaan päästön jälkeen. [5] Koska päästö sisältää lämmityksen ja jäähdityksen, voi kappaleisiin syntyä uusia jännityksiä. Kuitenkin, päästön matalasta lämpötilasta johtuen, näiden vaikutus kappaleen geometrisiin muotoihin on pieni. Lämmitys ja jäähditys on kuitenkin hyvä tehdä tasaisesti, jolloin vääristymiä aiheuttavat jännityksen saadaan pysymään vähäisinä. [11]

Kaikissa käyttökohteissa päästö ei ole välttämätöntä, mutta varsinkin kriittisissä sovelluksissa, kuten avaruussovelluksissa, käytetyissä kappaleissa sen tekeminen on hyödyllistä. Päästö ei ole haitallista ja se estää jonkin verran esimerkiksi halkeilua. [11]

3.4 Saavutettavat ominaisuudet

Kuten aiemminkin on käynyt ilmi, hiiletyskarkaisussa on tarkoituksena saada aikaan martensiittinen kova pinta ja pehmeä ydin. Aikaansaatuun kovuuteen vaikuttaa pinnan hiilipitoisuus ja martensiitin määrä, kun taas ytimen kovuuteen vaikuttaa teräksen karkenevuus. Kovuus suurenee, kun hilaan liukenee enemmän hiiltä. [5] Kuitenkin, on huomattava, että pinnan kovuus kasvaa noin 0,7 %:n hiilipitoisuuteen saakka, ja sitä suuremmilla pitoisuuksilla kovuus alkaa pienentyä. Tämä johtuu rakenteeseen jäävästä jäännösausteniitin määrästä. Suurin kovuus saadaan, seostuksesta riippuen, hiilipitoisuudella 0,6-0,8 %. Riittävän pintakovuuden varmistamisen takia on tärkeää pystyä hallitsemaan pintahiilipitoisuutta sekä valita teräs, jolla on riittävä karkenevuus kappaleen kokoa ajatellen. Lisäksi on ymmärrettävä myös hiiletysväliaineen hiilipotentialin sekä seostamisen vaikutus saatuun lopputulokseen. Puristusjännityksiä syntyy kovaan pintakerrokseen [4] ja niiden määrä riippuu martensiitin määrästä [5]. Lisäksi siihen vaikuttaa hiiletyskerroksen ja kappaleen paksuuden suhde [4].

Myös hiiletyskarkaisussa mahdollisesti muodostuvat jäännösausteniitti ja karbidit vaikuttavat kovuuteen. Jos rakenteessa on paljon jäännösausteniittia, jää pinta pehmeämmäksi ja puristusjännitykset pienemmäksi, jolloin kulumis- ja väsymiskestävyys heikkenevät [4]. Jäännösausteniitti voi pahimmillaan synnyttää vetojännityksiä [5]. Kuitenkin, sopiva määrä jäännösausteniittia parantaa kappaleen vierintäväsymiskestävyttä ja iskusitkeyttä [4]. Jos rakenteessa on paljon mangaania, muodostuu usein myös paljon jäännösausteniittia, sillä mangaani laskee martensiitin muodostumisen alkamislämpötilaa [9]. Karbidit puolestaan voivat joko parantaa tai heikentää kappaleen ominaisuuksia [4]. Esimerkiksi karbidit, jotka ovat saostuneet martensiitissa lisäävät hankauskestävyyttä [5]. Rakennetta parantavia ovat myös pyöreät ja tasaisesti jakautuneet karbidit, jotka lisäävät kulutuskestävyyttä. Puolestaan raerajakarbidit heikentävät muun muassa sitkeyttä. Jos raerajakarbidit muodostavat raerajakarbidiverkkoja, aiheuttaa se pinnan halkeilua esimerkiksi hionnassa. [4] Seosaineista hiili muodostaa karbideja muiden seosaineiden, kuten kromin ja raudan kanssa. Kromikarbidit lisäävät lujuutta ja sitkeyttä sekä kulumisenkesto-ominaisuuksia. [9] Näiden lisäksi myös hiiletysprosessin lämpötilan noustessa saattaa tapahtua rakeiden kasvua. Tätä ei haluta tapahtuvan, sillä hieno rakenne on sitkeämpi kuin karkea rakenne. [5] Kromikarbidit, jotka ovat kovia ja stabiileja estävät austeniitin raekoon kasvua [9].

Kovuuden lisäksi hiiletyskarkaisukerroksen syvyys vaikuttaa saataviin ominaisuuksiin, varsinkin mekaanisiin ominaisuuksiin [4]. Syvyyteen vaikuttaa hiiletyslämpötila sekä -aika, ja tavoitteena onkin usein 0,8 %:n hiilipitoisuus pinnassa. Lisäksi pyrkimyksenä on saada hiilipitoisuus pienenemään asteittain kulkiessa pinnasta ytimeen. Hiiletysyvyys riippuu muun muassa materiaalista ja työkappaleen paksuudesta [5] ja sen valintaperusteisiin voi vaikuttaa esimerkiksi kulutuskestävyys, väsymislujuus ja kustannukset [4].

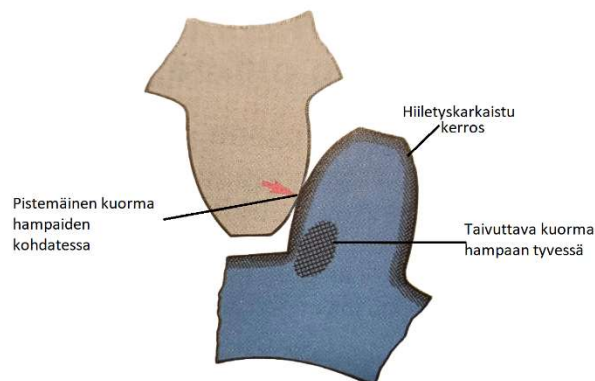
4. HAMMASPYÖRIEN TYYPILLISET MATERIAALIT

Hammaspyörät ovat hyvä esimerkki hiiletyskarkaistavista kappaleista [4]. Tässä osiossa tutustutaan lyhyesti hammaspyöriin sekä hiiletysteräkseen. Tämän jälkeen perehdytään tyypillisiin hiiletyskarkaistavien hammaspyörien materiaaleihin ja niiden ominaisuuksiin sekä mikrorakenteeseen. Hammaspyörien mikrorakenteen tunteminen on tärkeää, sillä mikrorakenne vaikuttaa muun muassa mekaanisiin ominaisuuksiin [6].

4.1 Hammaspyörät

Hammaspyörien tehtävänä on siirtää liikettä ja voimaa esimerkiksi erilaisissa konejärjestelmissä. Niiden etuna voidaan pitää tehokasta voimansiirtoa, luotettavuutta ja pitkäikäisyyttä sekä mahdollisuutta käyttää vaikeissakin olosuhteissa. [2] Hammaspyöriä käytetään hyvin moniin erilaisiin sovelluksiin, kuten työstökoneisiin, kuljetusvälineisiin sekä laiva- ja avaruusteollisuuteen. Koska erilaisia sovelluskohteita on paljon, myös erilaisia hammaspyörien malleja ja kokoja on hyvin laaja määrä [11], mutta tässä työssä keskitytään enemmän suuriin hammaspyöriin.

Hammaspyöriä käyttäessä tulee ymmärtää, että ne ovat usein alttiita esimerkiksi hampaiden kylkien kolhuille, kulumiselle ja taipumiselle. Tämä johtuu siitä, että hammaspyöriin kohdistuu erilaisia voimia, muun muassa taivutusjännityksiä ja iskukuormia. [2] Kontaktissa olevat hampaat liukuvat toisiaan vasten kuvan 12 tavoin.



Kuva 12: Kontaktissa olevat hampaat. [4] Muokattu lähteestä [4]

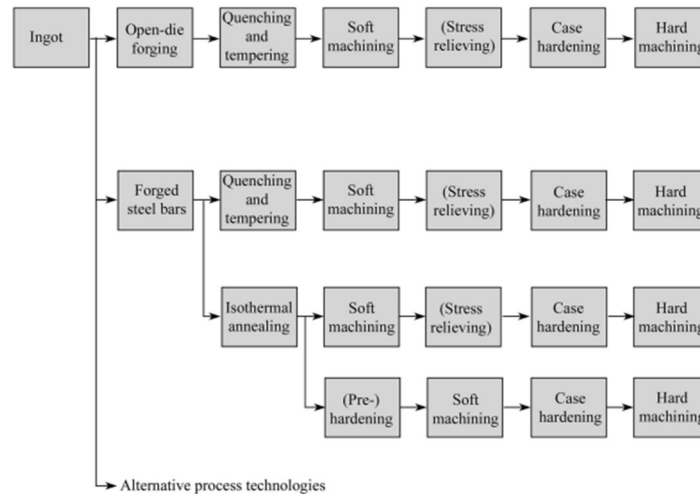
Kuvasta 12 nähdään, että taivutusjännitys kohdistuu pääasiassa hammaspyörän hampaan tyveen. Käytössä syntyvästä väsyttävästä kuormituksesta johtuen hampaaseen voi syntyä murtuma murtolujuutta pienemmilläkin jännityksillä. Toisaalta hankauksen ja pintapaineen takia hampaan kylkeen voi muodostua kuoppia tai siitä voi kuoriutua kerroksia. [4] Nämä asiat onkin otettava huomioon hammaspyöriä suunniteltaessa ja haluttuja ominaisuuksia pohtiessa. Esimerkiksi tyveen vaaditaan kovuutta ja puristusjännityksiä, jotta saadaan kestävyys ja taivutusväsymisikä paremmaksi. [11] Näitä vaurioitumismekanismia voidaan vastustaa hiiletyskarkaisulla, jolla saadaan sekä tyven että kyljen ominaisuuksia paremmaksi [4]. Sen ideana on taata mikrorakenteen riittävä kosketus- ja taivutuslujuuskyky, varsinkin kriittisissä kohdissa [2]. Hiiletyskarkaisussa optimaalisen kovuuden ja metallurgisen rakenteen saavuttaminen suuremmilla hammaspyörillä on vaikeampaa kuin pienillä hammaspyörillä [1].

4.2 Hiiletysteräkset

Usein hiiletyskarkaisussa käytetään hiiletysteräksiä, joissa on hiiltä noin 0,2 % [4]. Niitä käytetään kohteissa, joissa tarvitaan hyvä pinnan kovuus sekä ytimen sitkeys, jolloin saadaan luja ja väsymisenkestävä kappale, eli esimerkiksi hammaspyörissä [16].

Hiiletysteräksiä voidaan seostaa esimerkiksi nikkelillä, kromilla, molybdeenillä ja mangaanilla [7]. Nikkeli-kromi-molybdeeni- ja nikkeli-molybdeeniteräksiä käytettäessä pyritään saamaan ydin hyvin sitkeäksi ja pinta kulutusta ja puristuslujuutta kestäväksi [11]. Lisäksi nikkeli, kromi ja molybdeeni lisäävät myös teräksen karkenevuutta [4] ja näillä seostettuja teräksiä voidaankin käyttää esimerkiksi raskaasta kuormitettuihin koneisiin. Mangaani-kromiteräkset sekä kromi-molybdeeniteräkset ovat puolestaan keskikarkenevia, ja nikkeli-kromiteräksillä on korkea karkenevuus, joka on hyvä kappaleisiin, joissa on poikkeukselliset sitkeysvaatimukset. [16] Nämä eri seosaineet voidaan jakaa kahteen ryhmään riippuen siitä muodostavatko ne sementtiitti-karbideja vai ei. Esimerkiksi kromi ja molybdeeni muodostavat karbideja, kun taas puolestaan mangaani ja nikkeli eivät muodosta karbideja. [7]

Kuvassa 13 on esitettyä tyypillisen hiiletyskarkaistun kappaleen, eli esimerkiksi hammaspyörän valmistuksen vaiheet. Valmistukseen kuuluu paljon yksittäisiä muovaus-, koneistus- ja lämpökäsittelytoimenpiteitä. [16]



Kuva 13: Hammaspyörän valmistuksen vaiheet [16]

Kuvasta 13 nähdään, että ennen hiiletyskarkaisua, komponentille tehdään muitakin lämpökäsittelyitä. Standardissa SFS-EN ISO 683-3:2022 määritetään hiiletyskarkaistujen terästen toimitusehdot. Siitä käy ilmi, että ellei toisin sovita, tuotteet on toimitettava käsittelemättöminä, eli kuumamuokattuina. [17] Teräsaihiot toimitetaan usein esimerkiksi valssattuina ja hehkutettuina tai taottuna ja nuorrutettuna [18]. Tulevissa alaluvuissa tutkitaan muutamien materiaalien mikrorakennetta näiden mahdollisten muokkausten jälkeen ennen hiiletyskarkaisua.

Käytettävien hiiletysterästen valintaan vaikuttaa muun muassa kappalekoko sekä vaatimukset lujuudelle, väsymislujuudelle sekä kulumisenkestävyydelle. Haluttujen ominaisuuksien perusteella on määritettävä tiettyjä ominaisuuksia materiaaleille: riittävä pintakovuus, sisustan lujuus ja sitkeys, sopiva hiiletyskerroksen syvyys sekä pinnan ja sisustan kovusero. Nämä kaikki riippuvat materiaalin karkenevuudesta, joten se on otettava huomioon materiaalia valittaessa. [4]

Tässä työssä esitellään muutamia hammaspyörissä käytettyjä hiiletysteräksiä. Tällaisia ovat esimerkiksi 18CrNiMo7-6, 20MnCr5, 16MnCr5 ja 20NiCrMo2-2.

4.2.1 18CrNiMo7-6

18CrNiMo7-6 on hiiletysteräs, johon on seostettu kromia, nikkeliä ja molybdeeniä. Sitä käytetään suurikokoisiin sovelluksiin, kuten hammaspyöriin, joilta vaaditaan ytimen hyviä sitkeysominaisuuksia. [19] Sen kemiallinen koostumus painoprosentteina on määritetty standardissa SFS-EN ISO 683-3:2022 ja on esitetty alla olevassa taulukossa 1 [17], ja siitä onkin havaittavissa, että hiiletysteräksissä on hiiltä hyvin vähän.

Taulukko 1: 18CrNiMo7-6 teräksen kemiallinen koostumus painoprosentteina [17]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu ja B
0,15- 0,21	0,40	0,50- 0,90	0,025	0,035	1,50- 1,80	0,25- 0,35	1,40- 1,70	Cu: 0,40

Kuten yllä todettiin, teräksiä toimitetaan esimerkiksi nuorrutettuina tai hehkutettuna [18]. Tällaisilla toimilla pyritään saavuttamaan hammaspyöräaihion työstämiseen soveltuva mikrorakenne, eli ferriittis-perliittinen mikrorakenne. Painoprosentteina kyseisessä teräksessä on ferriittifaasia enemmän kuin perliittifaasia. [20] Rakennetta ei aina kuitenkaan saada täysin ferriittis-perliittiseksi. Kun 18CrNiMo7-6-tankoja käsitellään isotermisesti, rakenteeseen tulee tyypillisesti ferriitin ja perliitin lisäksi myös bainiittia. [17]

4.2.2 20MnCr5

20MnCr5 on 18CrNiMo7-6 tavoin hiiletysteräs, jolla on alhainen hiilipitoisuus. Se on hyvin karkeneva, jolloin sen pinnasta saadaan kova ja kulutusta kestävä. Lisäksi hyvää sitkeyttä ja väsymislujutta edistää pieni raekoko. Ominaisuuksiensa takia, se soveltuu hammaspyörien materiaaliksi. [21] Sen standardissa SFS-EN ISO 683-3:2022 määritetty kemiallinen koostumus painoprosentteina on esitetty alla olevassa taulukossa 2 [17].

Taulukko 2: 20MnCr5 teräksen kemiallinen koostumus painoprosentteina [17]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu ja B
0,17- 0,22	0,40	1,10- 1,40	0,025	0,035	1,00- 1,30	-	-	Cu: 0,40

20MnCr5-hiiletysteräksen mikrorakenne takomisen ja normalisoinnin jälkeen koostuu hienosta perliittistä, jossa on joko ferriittiä tai sementtiittiä ylimäärä [22]. Hieno perliitti eroaa perliittistä ferriitti- ja sementtiittilamellien koossa: hienossa perliitissä vuorottelevat lamellit ovat suhteellisen ohuita [6].

4.2.3 16MnCr5

16MnCr5 on hiiletysteräs, jolla on hyvä hitsattavuus ja työstettävyys. Sitä voidaan käyttää kappaleisiin, joilta vaaditaan esimerkiksi hyvää mittapysyvyyttä ja hyviä mekaanisia ominaisuuksia. Sen pinnan kovuus ja kulutuksenkestävyys ovat korkeat ja sitä on helppo työstää. Se sopii näiden vuoksi hammaspyörien materiaaliksi. [23] Sen standardissa SFS-EN ISO 683-3:2022 määritetty kemiallinen koostumus painoprosentteina on esitetty alla olevassa taulukossa 3 [17].

Taulukko 3: 16MnCr5 kemiallinen koostumus painoprosentteina [17]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu ja B
0,14- 0,19	0,40	1,00- 1,30	0,025	0,035	0,80- 1,10	-	-	Cu: 0,40

Vivek [24] on havainnut tutkimuksessaan, että 16MnCr5-teräksen mikrorakenteessa on ferriittiä 82,71 % ja perliittiä 17,29 %.

4.2.4 20NiCrMo2-2

20NiCrMo2-2-hiiletysterästä käytetään kappaleisiin, joiden rasitus on erittäin suuri. Materiaalilla on hyvä ytimen sitkeys, ja se soveltuu suorakarkaisuun. Näin ollen se sopii hyvin hammaspyörien materiaaliksi. [25] Sen standardissa SFS-EN ISO 683-3:2022 määritetty kemiallinen koostumus painoprosentteina on esitetty alla olevassa taulukossa 4 [17].

Taulukko 4: 20NiCrMo2-2 kemiallinen koostumus painoprosentteina [17]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu ja B
0,17- 0,23	0,40	0,65- 0,95	0,025	0,035	0,35- 0,70	0,15- 0,25	0,40- 0,70	Cu: 0,40

Kamjou et al. [26] suorittamassa tutkimuksessa havaitaan, että taottujen aihoiden mikrorakenne 20NiCrMo2-2-teräksillä on ferriittis-perliittinen.

5. HIILETYSKARKAISUN VAIKUTUS ERI MATE- RIAALIEN MIKRORAKENTEISIIN

Kuten on jo aiemmin todettu, hiiletyskarkaisussa teräksen ominaisuudet muuttuvat: kovuus kasvaa, sitkeys pienenee ja kappaleen pintaan voi syntyä iskun- ja väsymisenkestävyyttä heikentäviä vetojännityksiä. Hiiletyskarkaisussa osa mikrorakenteesta muuttuu kovaksi martensiitiksi. Sen lisäksi rakenteeseen jää usein myös jäännösausteniittia, joka alentaa martensiitin kovuutta. [9] Hiiletyskarkaisun aiheuttamat mikrorakenteen muutokset on tunnettava, jotta pystytään kehittämään erilaisten sovelluskohteiden suorituskykyä [27].

Tässä luvussa perehdytään hiiletyskarkaisun vaikutuksiin luvussa 4. esitettyihin mikrorakenteisiin. Terästen mikrorakenne ennen hiiletyskarkaisua on joko ferriittis-perliittinen [20, 24, 26] tai perliittinen [22].

5.1 18CrNiMo7-6

Wang et al. [27] ovat tutkimuksessaan havainneet, että hiiletyskarkaistun 18CrNiMo7-6-kappaleen pintakerroksen mikrorakenne on monimutkainen: se koostuu martensiitista, jäännösausteniitista ja karbideista. Sementiittikarbidit ovat usein muodostuneet austeniittiraajoille [13]. Tällainen rakenne saa aikaan 18CrNiMo7-6-teräksessä korkean pinnan kovuuden ja hyvän kulutuskestävyyden. Kun lisäksi kyseisen teräksen ydin pyritään muuntamaan sitkeäksi, vähähiiliseksi martensiitiksi, saadaan hammaspyöristä hyvin väsymiskuormitusta kestäviä. 18CrNiMo7-6 on hyvin karkeneva teräs, jolloin sen ydin voi sammutusprosessin aika kokea täydellisen muutoksen martensiitiksi. Hiiletyskarkaisuissa kappaleissa pintakerroksessa on suurempi hiilipitoisuus kuin ytimessä. Tämän lisäksi kovuus pienenee siirryttäessä pintakerroksista kohti ydintä. 18CrNiMo7-6-terästä sammuttaessa pinnan korkea hiilipitoisuus muuttaa pinnan austeniittia osittain martensiitiksi, mikä johtaa jäännöspuristusjännitysten kehittymiseen. [14]

Hiiletyskarkaisun vaikutuksissa mikrorakenteisiin on huomattava myös hiiletysyvyvyyden vaikutus. Tutkimuksessaan Qin et al. [14] havaitsee, että hiiletysyvyvyyden ollessa nolla millimetriä, sekä 18CrNiMo7-6-teräksen pinta että ydin ovat pääasiassa päästettyä säle-martensiittia. Puolestaan, kun hiiletysyvyvyys kasvaa, pintakerrokseen muodostuu päästetyn martensiitin lisäksi jäännösausteniittia ja ydin säilyy pääasiassa päästettynä mar-

tensiittina. [14] 18CrNiMo7-6-teräksessä martensiitti pinnassa on muodoltaan neula- maista [27], ja ytimessä sälemartensiitin lisäksi esiintyy myös lohkomartensiittia [13]. Li- säksi rakenteen raekoko sekä pinta-austeniittipitoisuudet kasvavat hiiletysyvyuden kas- vaessa. [14] An et al. [28] ovat havainneet, että raekoko vaikuttaa myös 18CrNiMo7-6- teräksessä hiiletysprosessin keski- ja loppuvaiheen aikana muodostuviin karbideihin, jotka koostuvat pääasiassa sementiitistä. Raekoolla on 18CrNiMo7-6-teräksen karbidien muodostumiseen merkittävä vaikutus, sillä ylimääräinen hiili diffundoituu raerajojen läpi. Karbidit jakautuvat yleensä raerajoille, ja siten katkaisee martensiittirakenteen jatkuvuu- den. Tämä puolestaan lisää haurautta ja vähentää väsymislujuutta sekä altistaa vauri- oille myöhemmissä työstövaiheissa. [28]

Hiiletysyvyuden lisäksi karbidien syntyyn vaikuttaa myös hiilipitoisuus. An et al. [8] ovat tutkimuksessaan havainneet, että karbidiverkkojen muodostamiseen vaadittu kriittinen hiilipitoisuus on suurempi, kun rakeet ovat pieniä. Lisäksi se lisää hiiletysprosessin ai- kana taipumusta muodostaa karbideja austeniittirakeiden sisään sekä raerajoille. Teolli- suudessa tätä pyritäänkin estämään asettamalla 18CrNiMo7-6-teräksen hiiletysproses- sissa hiilipitoisuudeksi noin 0,8 %. [28] Wang et al. [27] tekemän tutkimuksen mukaan hiilipitoisuuden kasvaessa myös martensiitti voi muuttua sälemäisestä muodosta neula- maiseksi, mikä aiheuttaa karbidien muodostumista raerajoille. Lisäksi An et al. [28] ovat tutkimuksessaan havainneet, että karbidien muodostama verkko on mikrorakennevika, jonka muodostumista hiiletyskarkaisussa tulisi välttää. Teräksissä, kuten myös 18CrNiMo7-6, käytetään kuitenkin seosaineita, jotka pyrkivät muodostamaan karbideja. Tällaisia ovat esimerkiksi molybdeeni ja kromi. [28]

Jäännösausteniitti puolestaan on hyvin kiistanalaisessa roolissa, ja sen hyödyt tai haitat riippuvat paljon sovelluskohteesta [13]. Wang et al. [27] mukaan yksi syy minimoida jään- nösausteniitin määrä, on epästabiilissa austeniitissa tapahtuvien muodonmuutosten ai- heuttama martensiittimuutos. Kyseinen muutos helpottaa halkeamien alkamista ja lo- pulta aiheuttaa mekaanisten ominaisuuksien heikkenemisen. Syvyyden kasvaessa sekä jäännösausteniitin että karbidien määrä vähenee [27], koska hiilipitoisuus pienenee [13]. Tällainen jäännösausteniitin määrän väheneminen hiilipitoisuuden kasvaessa indikoi austeniitin stabiiliuden kasvusta hiilipitoisuuden kasvaessa. Se johtaa korkeampaan jäännösausteniittipitoisuuteen. [27] Tähän stabiiliuuteen voi merkittävästi vaikuttaa seos- aineet, kuten kromi [13]. Toisaalta, kuten aiemminkin on todettu, jäännösausteniitti tie- tyissä määrin voi parantaa esimerkiksi iskusitkeyttä [4] ja väsymiskestävyyttä, sillä sykli- sessä kuormituksessa jäännösausteniitti voi muuttua martensiitiksi. Tämä puolestaan auttaa hidastamaan väsymishalkeamien suurentumista. [14]

Pöhl [13] ovat tutkimuksessaan havainneet, että jäännösausteniittia on mahdollista muuttaa martensiitiksi sammutuksen jälkeen tehtävällä kryogeenisellä käsittelyllä, jossa hyödynnetään nestemäistä typpeä. Tämä lisää kovuutta ja vähentää pinnan sirontaa. Vaikka käsittelyllä saadaankin suuria määriä jäännösausteniittia muutettua martensiitiksi, jää rakenteeseen edelleen termisesti stabiilia jäännösausteniittia. Kryogeeninen käsittely ei vaikuta mikrorakenteeseen, kun syvyys on yli 1,5 millimetriä. [13]

5.2 20MnCr5

Tan et al. [29] ovat tutkimuksessaan havainneet, että hiiletyskarkaisuprosessilla 20MnCr5-teräksen pintaan aikaansaatu mikrorakenne on pääasiassa korkeahiilistä päästömartensiittia ja jäännösausteniittia sekä lisäksi pieni määrä karbideja. Zhang et al. [30] ovat havainneet, että näiden lisäksi rakenteessa voi esiintyä myös bainiittia. Raskeasti kuormitettujen hammaspyörien hiiletyskarkaisusta juuri tällaista, martensiitin ja jäännösausteniitin yhdistelmää pidetään hyvin kestäväenä mikrorakenteena [31]. Standardin SFS-ISO 6336-5:2017 mukaan pinnan tulisi koostua hienosta neulamaisesta martensiitista ja jäännösausteniitista, jonka maksimimäärä on 30 tilavuusprosenttia. Vielä korkeampaan laatuokkaan vaaditaan jäännösausteniitin hienoksi dispergoituminen rakenteeseen. [32, 33] Zhang et al. [30] havaitsee tutkimuksessaan, että ytimen mikrorakenne koostuu vähähiilisestä martensiitista sekä bainiitista.

Itse hiiletyskarkaisuprosessi vaikuttaa paljon 20MnCr5-teräksessä esiintyvien mikrorakenteiden määrään. Liang et al. [33] ovat havainneet tutkimuksessaan, että suorittamalla kappaleelle uudelleenlämmitys sekä matalan lämpötilan päästö, saadaan jäännösausteniitin määrä pienemmäksi verrattuna suoraan jäädytykseen ja sammutukseen. Jäännösausteniitin liian suuri pitoisuus mikrorakenteessa heikentää muun muassa 20MnCr5-teräksestä valmistetun hammaspyörän kulutuskestävyyttä. Lisäksi hampaan pinnan halkeiluun voi vaikuttaa päästön tekemättä jättäminen: sekundaarisen martensiitin lujuus jää alhaiseksi ja rakenne on hauras. Prosessi vaikuttaa myös karbidien ilmaantumiseen. Uudelleenlämmityksen ja matalan lämpötilan päästön jälkeen 20MnCr5-teräksen mikrorakenteessa esiintyy lamellimartensiittia, jäännösausteniittia sekä karbideja, kun taas suoran jäädytyksen ja sammutuksen hiiletyskarkaisussa rakenne koostuu lamellimartensiitista ja jäännösausteniitista. Lisäksi prosessissa voidaan esimerkiksi hiiletyskerroksen paksuuden lisäämiseksi ja jäännösausteniittipitoisuuden vähentämiseksi läpäisevässä kerroksessa lisätä hiilipotentialia, nostaa hiiletyslämpötilaa ja lyhentää hiiletysaikaa. Lisäksi voidaan lisätä uudelleenlämmitys. Tällaiset toimet nostavat 20MnCr5-teräksestä valmistettujen hammaspyörien kulutuskestävyyttä ja väsymislujuutta kontaktissa.

[33] Zhang et al. [30] ovat tutkimuksessaan havainneet, että myös paksumpi hiiletyskerros toisi tämän teräksen hiiletyskerroksen mikrorakenteeseen korkeahiilistä martensiittia, mikä puolestaan nostaisi kovuutta. Kovuutta lisää myös mahdollisimman hieno mikrorakenne. [30]

Tan et al. [29] ovat tutkimuksessaan havainneet, että 20MnCr5-teräksen rakenteen lujuuteen, sitkeyteen ja väsymiseen vaikuttaa olennaisesti myös karbidien määrä, muoto ja jakautuminen. Kuvassa 1 esiintyvän rauta-hiilitasapainopiirroksen mukaan karbideja saostuu, kun hiilipitoisuus on yli 0,77 %. Karbidit näkyvät yleensä esimerkiksi verkkona tai nauhana raerajoilla, ja niitä on sitä enemmän, mitä suurempi on hiilipitoisuus. [29] 20MnCr5-teräksessä karbideja esiintyy pallomaisina ja monikulmaisina, joista varsinkin pallomaiset karbidit ovat saostuneet austeniitin raerajoille. Hienojen ja pallomaisten karbidien avulla on mahdollista lisätä kyseisen teräksen kontakteissa ja taivutuksessa tapahtuvaa väsymislujuuksi sekä parantaa kulutuskestävyyttä. [33] Näiden lisäksi hienot karbidit lisäävät korroosionkestävyyttä ja iskunkestävyyttä sekä pienentävät hiiletyskerrokset haurautta. Tan et al. [29] ovat havainneet, että tämä selittyy pienten karbidien kyvyllä kiinnittää raerajoja ja halkeamia. Kun etenevä halkeama kohtaa karbideja, on sen käytettävä enemmän energiaa niitä ohittaessaan, ja tämä laskee halkeaman etenemisnopeutta. Toisin kuin nämä pienet, toivotut karbidit, suuret ja karkeat karbidit eivät ole toivottuja, sillä ne toimivat halkeamien lähteenä. Tästä johtuen 20MnCr5-teräksessä karbidien kokoa pyritään kontrolloimaan ja saamaan ne mahdollisimman hienojakoisiksi, jolloin niistä saadaan faasia vahvistavia. [29]

Vaikka jäännösausteniittia ei haluta 20MnCr5:n rakenteeseen liikaa, myös sillä on tärkeä rooli mikrorakenteessa. Zhang et al. [30] mukaan liian vähäinen jäännösausteniitti yhdistettynä pieneen hiiletyskerrokseen ja alhaiseen kovuuteen vaikuttaa hammaspyörän väsymisikään heikentävästi. Jäännösausteniitti muuttuu rasituksessa martensiitiksi [30], mikä lisää puristusjäännösjännityksiä ja nostaa pinnan kovuutta 20MnCr5-teräksessä [31]. Tämä saattaa myös hidastaa halkeaman kasvua ja parantaa väsymisikää. Halkeamisen alkamisessa ja etenemisen viivästyttämisessä on havaittu höydylliseksi myös jäännösausteniitin sitkeys. [30] Tärkeää on kuitenkin huomata, että jäännösausteniitin tulee olla tasaisesti jakautuneena sekä hienojakoista parantaakseen yllä mainittuja 20MnCr5-teräksen ominaisuuksia. [31]

5.3 16MnCr5

Hammaspyörät ovat alttiita monille ongelmille altistuessaan erilaisille voimille, kuten taiputusjännityksille. Niiden välittäessä liikettä, suurin pakottava tekijä on kitka, joka aiheuttaa hammaspyörissä kulumista. Lisäämällä pinnan kovuutta ja vähentämällä sen karheutta voidaan vaikuttaa kitkan vähentämiseen ja kulutuksenkestävyyden parantamiseen. Hammaspyöriä vahvistetaan lämpökäsittelyllä, sillä se aiheuttaa martensiittinen mikrorakenteen. Gençoğlu ja Yazıcı [2] ovat tutkimuksessaan havainneet, että hiiletyskarkaistun 16MnCr5-teräksen mikrorakenne on päästettyä martensiittia, joka koostuu korkeahiilisestä martensiitista, jäännösausteniitista ja karbideista. Prosessissa hiilipitoisuus pinnalla lisääntyy, minkä seurauksena martensiitti pinnalla on levymäistä. [2]

Hammaspyöriin kohdistuu myös iskumaisia rasituksia, jolloin ytimen mikrorakenteen on oltava riittävän hyvä. Gençoğlu ja Yazıcı [2] ovat tutkimuksessaan havainneet, että 16MnCr5-teräksen ytimen mikrorakenne on yhdistelmä hienosta neulamaisestä martensiitista ja bainiitista. Ytimen tavoin, myös kyseisen teräksen hiiletyskerroksessa olisi hyvä olla hienoa neulamaista martensiittia, sillä hieno raekoko lisää hampaan kantavuutta [2], jolloin myös kuormankantokyky saadaan optimoitua. Raekoon stabiiliisuuden ja hienon mikrorakenteen saamiseksi vaaditaan riittävät seosaineet. [34]

Kaasuhiiletuksen pitkät prosessointiajat ja korkeat käsittelylämpötilat toisaalta lisäävät hiiletyskerroksen syvyyttä, mutta toisaalta johtavat karkeampiin rakeisiin. Tällainen rakeiden karkeneminen aiheuttaa mittamuutoksia hammaspyörissä. Mittamuutoksiin, ja siten rakeiden hienouteen vaikuttavia prosessiparametreja ovat muun muassa hammaspyörän geometria, hiiletyslämpötila ja sammutuksen tyyppi. [2] Tobie et al. [34] mukaan myös 16MnCr5-teräksessä olevien austeniittirakeiden koon vaikutus on tärkeä ymmärtää, sillä se vaikuttaa martensiitin muodostumisen alkamislämpötilaan. Muodostumislämpötila on sitä matalampi, mitä pienempiä austeniittirakeet ovat [34]. Tämän lisäksi ne vaikuttavat myös kovuuteen: kun suuret austeniittirakeet kovettuvat, muodostuu karkearakeista martensiittia ja enemmän jäännösausteniittia. Martensiittineulojen pituus on riippuvainen alkuperäisen austeniittirakeen koosta. [35]

Kuten yllä todettiin, raerakenteen lisäksi myös jäännösausteniitti vaikuttaa kappaleen kovuuteen. Tobie et al. [34] mukaan jäännösausteniitti on ominaisuuksiltaan sitkeää, ja tästä johtuen pieni määrä sitä rakenteessa voi parantaa muun muassa kuormituska-

siteettia. Liian suuri määrä jäännösausteniittia kuitenkin vähentää 16MnCr5-teräksen kovuutta ja taivutuslujuutta. [34] Jäännösausteniitin määrä, kuten myös hiilipitoisuus ja kovuus pienenevät siirryttäessä tämän teräksen pinnalta kohti ydintä [2].

Tobie et al. [34] ovat tutkimuksessaan havainneet, ettei 16MnCr5-teräs ole välttämättä paras materiaali isojen hammaspyörien valmistamiseen sen huonommasta karkenevuudesta johtuen. Isoissa hammaspyörissä paremmin karkenevilla teräslaaduilla on saatu paljon korkeampia taivutuslujuuden arvoja kuin 16MnCr5-teräksellä. Hammaspyörän koon kasvaessa karkenevuuden vaikutus lujuteen kasvaa, ja siksi onkin hyvä valita teräkseen sellaisia seosaineita, joilla karkenevuus sekä materiaaliominaisuudet saadaan riittävän hyväksi. [34]

5.4 20NiCrMo2-2

Kuten myös muilla hiiletysteräksillä, 20NiCrMo2-2-teräksellä mikrorakenne koostuu pääasiassa martensiitista ja jäännösausteniitista sekä lisäksi pienestä määrästä rautaoksidia, magnetiittia. Hiiletyskarkaisuprosessilla voidaan vaikuttaa tähän syntyvään mikrorakenteeseen: esimerkiksi muuntelemalla hiilettyksen aikaista hiilipotentialia sekä käyttämällä erilaisia sammutusmenetelmiä ja -aineita voidaan vaikuttaa muun muassa jäännösausteniitin määrään, kovuuteen sekä mikrorakenteeseen ja raekokoon. [15] Erdogan ja Tekeli osoittivat tutkimuksessaan, että suorittamalla kyseiselle teräkselle kaasuhiiletys, jossa tavoitteena 0,8 %:n pintahiilipitoisuus, sammutus öljyyn ja päästö, voidaan saavuttaa noin 100 %:n martensiittinen rakenne hiiletetylle pinnalle ja noin 96 % martensiittia ytimeen. Tällainen, lähes täysin martensiittinen mikrorakenne on kaksifaasisen mikrorakenteeseen verrattuna hyvin kova, mutta myös hauraampi. Pintakerroksen martensiitti muodostuu sammutuksen aikana korkeahiilisestä austeniitista. [36] Kun hiilettyksen aikana hiilipotentialia nostetaan, vaikeuttaa se austeniitin muuttumista martensiitiksi sammutuksen aikana, jolloin 20NiCrMo2-2-teräksen rakenteeseen muodostuu enemmän jäännösausteniittia [35]. Ytimen mikrorakenteeseen puolestaan vaikuttaa teräksen hiilipitoisuus sekä karkenevuus. Korkean karkenevuuden omaavilla teräksillä ydin voi muuttua martensiittiseksi, kun taas puolestaan alhaisen karkenevuuden teräksillä muodostuu ferriittia ja vähän perliittia, riippuen karkaisunopeudesta. Kuvassa 1 esiintyvässä rauta-hiili-tasapainopiirroksessa 20NiCrMo2-2-teräksen sekä hiiletyspinta, jonka hiilipitoisuus on noin 0,8 % että hiilipitoisuudeltaan noin 0,2 %:n ydin pysyvät austeniittialueella ennen sammutusta. [36]

Qin et al. [14] ovat tutkimuksessaan havainneet, että hiiletyskerroksen syvyyden ja väsymislujuuden välillä on yhteys, joka ei kuitenkaan ole lineaarinen. Blech et al. [31] näyttää, että syvyyden kasvaminen mahdollistaa todennäköisemmin ei-martensiittisten rakenteiden määrän lisääntymisen 20NiCrMo2-2-teräksen mikrorakenteeseen. Teräksen väsymiskestävyyden kannalta jäännösausteniitti on ristiriitaista. Jotkin tutkimukset osoittavat, että korkea jäännösausteniittipitoisuus pidentää väsymisikää ja parantaa kulutuskestävyyttä, kun osa tutkijoista puolestaan uskoo, että jäännösausteniitin määrä tulisi minimoida. [31] Kun 20NiCrMo2-2- teräksen hiiletysprosessissa hiilipotentialia lisätään ja kappaleelle saadaan näin parempi kulutuskestävyys, johtuu se suuremmasta kovuudesta ja jäännösausteniitin muuttumisen martensiitiksi mahdollistavista olosuhteista. Mikrorakenteeseen jäävä austeniitti voikin estää halkeamien etenemistä, mikä lisää kulutuskestävyyttä. [15]

Myös rakeet ovat tärkeä osa mikrorakennetta. Erdogan ja Tekeli [36] ovat tutkimuksessaan havainneet, että martensiitin tilavuusosuus hallitsee sekä lujuus- että sitkeysominaisuuksia ja niiden säätelyä. Näistä arvoista saadaan parempia, kun martensiitti on rae-kooltaan hienoa karkean rakenteen sijaan. [36] Lisäksi prosessiparametreista liiallista hiiletysajan pidentymistä on hyvä välttää, sillä väsymissuorituskyky voi heikentyä raerajojen hapettumisesta johtuen [14].

6. YHTEENVETO

Lämpökäsittelyjä, kuten hiiletyskarkaisua tehdään, jotta kappaleen mikrorakennetta saadaan muutettua halutunlaiseksi [7]. Esimerkiksi hammaspyörissä hiiletyskarkaisulla saadaan hampaan tyven ja kyljen ominaisuuksia paremmiksi takaamalla mikrorakenteen riittävä pintapaine- ja taivutuslujuuskyky [2,4]. Hammaspyörien mikrorakenteen tunteminen onkin tärkeää, sillä ne vaikuttavat muun muassa sen mekaanisiin ominaisuuksiin [6].

Teräsaihiot toimitetaan kuumamuokattuina [17], esimerkiksi hehkutettuina tai nuorrutettuina [18]. Tällä pyritään saavuttamaan ferriittis-perliittinen mikrorakenne, joka soveltuu hyvin hammaspyörän työstämiseen [20] johtuen esimerkiksi ferriitin hyvästä muovautuvuudesta [8] ja perliitin hyvästä vetolujuudesta [7].

Hiiletyskarkaisun ensimmäisessä vaiheessa, hiiletyksessä, materiaalin mikrorakenne muuttuu korkeissa lämpötiloissa austeniittiseksi [11]. Austeniitti pystyy liuottamaan itseensä ferriittiä enemmän hiiltä [7]. Tämän avulla hammaspyörän pinta saadaan hiilipitoisessa ympäristössä runsashiilliseksi [3], mikä mahdollistaa suuren lujuuden saamisen sammutuksessa [1]. Hammaspyörän sisäosat säilyvät kuitenkin matalahiilisinä, ja tästä johtuen sammutus ei vaikuta niihin [3].

Sammutuksessa, eli nopeassa jäähdytyksessä, tapahtuu faasimuutos austeniittisestä rakenteesta kovaksi ja hauraaksi martensiittirakenteeksi [4, 5, 11]. Syntyvään martensiitin määrään vaikuttaa jäähdytysnopeus [11] ja sen kovuuteen hiilipitoisuus [8]. Lisäksi rakenteeseen jää myös sitkeää jäännösausteniittia [30], joka tasaisesti jakautuneena ja hienojakoisena parantaa teräksen ominaisuuksia [31]. Sopiva määrä jäännösausteniittia muun muassa parantaa väsymisikää [30] ja nostaa pinnan kovuutta [31], sillä rasituksessa jäännösausteniitti muuttuu martensiitiksi [30]. Kuitenkin liian suuri määrä jäännösausteniittia vähentää hammaspyörän kovuutta ja taivutuslujuutta [34].

Sammutusta seuraa päästö, jossa lämpötilaa korotetaan jälleen ja hammaspyörää hehkutetaan matalissa lämpötiloissa. Tällä pystytään vähentämään jäännösausteniittia sekä martensiitin liiallista haurautta, jolloin hammaspyörän sitkeysominaisuuksia saadaan parannettua. [4]

Hiiletyskarkaisun prosessiparametreilla, kuten hiiletyslämpötilalla voidaan vaikuttaa rakeiden kokoon [2]. Austeniitin raekoon vaikutus on tärkeä, sillä se vaikuttaa martensiitin karkeuteen sekä jäännösausteniitin määrään [35]. Mitä hienompi on martensiitin raekoko, sitä paremmat hammaspyörän lujuus- ja sitkeysominaisuudet ovat [36].

Hiiletyskarkaisu tulee tulevaisuudessakin olemaan tärkeä menetelmä hammaspyörrien karkaisuun, ja sitä tutkitaan itse prosessin ja materiaalien kannalta. Esimerkiksi mikroseostuksella on havaittu olevan vaikutusta muun muassa rakeiden muodostumiseen ja määrään, joilla taas on vaikutusta karbidien muodostumiseen. Kun 18CrNiMo7-6-teräkseen mikroseostetaan titaania ja niobiumia, on niillä suuri vaikutus muun muassa rakeiden karkenemista vastaan hiiletysprosessin aikana. [28] Sekä titaani että niobium ovat raekokoa pienentäviä mikroseosaineita. Pienemmällä raekoolla saadaan nostettua teräksen lujuutta. [9] Raekokoon vaikutus on merkittävä karbidien syntymiseen: karbidien muodostumiseen vaadittava kriittinen hiilipitoisuus on sitä korkeampi, mitä pienempiä rakeet ovat [28]. Esimerkiksi tällaisilla toimilla voidaan välttää haitallisten karbidien muodostumista.

Hiiletyskarkaisussa myös taloudellinen näkökulma on hyvä ottaa huomioon: materiaali- ja lämpökäsittelykustannuksilla on siihen paljon vaikutusta. Materiaalien kustannuksiin vaikuttavat vahvasti seosaineet [16], joista etenkin nikkeli on kallista [20]. Seosaineiden hinta ei kuitenkaan pysy vakaana vaan siihen vaikuttaa muun muassa kysyntä ja tarjonta [16]. Uusia materiaalivariantteja onkin tehty, jotta voitaisiin säästää materiaalikustannuksissa. 18CrNiMo7-6-teräksen muunnelmasta on poistettu nikkeli, vähennetty kromia ja lisätty mangaania ja molybdeenia, jolloin saadaan kustannuksia alhaisemmiksi ja suorituskyky paremmaksi. [20] Kustannuksia voidaan pyrkiä alentamaan myös vaihtamalla nikkeli-kromi-molybdeeniteräkset kromi-mangaaniteräksiin, jotka ovat halvempia [16].

Myös itse hiiletyskarkaisuprosessia sekä sen parametrien vaikutusta syntyneisiin mikrorakenteisiin tutkitaan paljon. Esimerkiksi 20MnCr5-teräksen mikrorakennetta on tutkittu erilaisilla sammutusmenetelmillä sekä ilman päästöä että päästön kanssa. Käytetty menetelmä vaikutti jäännösausteniitin määrään sekä karbidien muodostumiseen. [33] Vastaavia, prosessiin perustuvia tutkimuksia on tehty myös muille materiaaleille. Kustannuksiin vaikuttaa myös hiiletysprosessi. Nostaessa hiiletyslämpötilaa, hiiletysaika lyhenee, sillä diffuusionopeus kasvaa. Tällöin saadaan tietyssä aikayksikössä enemmän eriä hiiletettyä, mikä säästää kustannuksissa. Tässä on kuitenkin huomioitava, että korkeisiin hiiletyslämpötiloihin tarvitaan kestävä uunilaitteisto. Lisäksi käytettävien terästen on vastustettava rakeiden karkenemista. [16]

LÄHTEET

- [1] S.P. Radzevich. Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture. 4 th ed. CRC PRESS; 2021. pp. 1, 7, 65, 604–605. (Viitattu: 22.2.2024).
- [2] S. Gençoğlu, A. Yazıcı. Surface Characteristics and Distortion Analysis of the Case-Hardened Helical Gears: A Comparison of Different Case-Hardening Treatments. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2020;73(1);119-126. Saatavissa (Viitattu: 9.2.2024): <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01810-0>.
- [3] M.P. Groover. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th edition, SI version, International adaptation. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte Ltd.; 2021. s. 631. (Viitattu 9.2.2024).
- [4] S. Kivivuori, S. Härkönen, Teknoliateollisuus. Lämpökäsittelyoppi. Helsinki: Teknologiatieto Teknova; 2004. s. 15, 28–32, 50–58, 113, 141–154. (Viitattu: 9.2.2024).
- [5] E.J. Mittemeijer, M.A.J Somers, editors. Thermochemical surface engineering of steels: improving materials performance. Amsterdam: Woodhead Publishing; 2015. pp. 485–549. (Viitattu: 18.2.2024).
- [6] W.D. Callister, D.G. Rethwisch. Callister's Materials Science and Engineering: an introduction: SI Version. 10th edition, global edition. Hoboken: Wiley; 2020. pp. 274, 327–363, 514. (Viitattu: 21.2.2024).
- [7] Metallinjalostajat ry, S. Härkönen. Teräskirja. 9. painos. Helsinki: 2014. s. 5–8, 64. (Viitattu: 15.2.2024).
- [8] P. Lepola, M. Makkonen. Materiaalit ja niiden käyttö. 3. painos. Porvoo; Helsinki: WSOY konetekniikka; 2003. s. 89–95. (Viitattu: 15.3.2024).
- [9] S. Kivivuori, Teknoliateollisuus. Lämpökäsittelyoppi. / 2, Lämpökäsittelytietoa suunnittelijoille. Helsinki: Teknologiatieto Teknova Oy; 2016. s. 51–62, 75. (Viitattu: 15.2.2024).
- [10] Bodycote. Hiiletys 2024. Saatavissa (Viitattu 15.2.2024): <https://www.bodycote.com/fi/palvelut/lampokasittely/pintakarkaisu-ja-sen-jalkeen-suoritettavat-toimenpiteet/hiiletys/>.
- [11] J.R. Davis, editor. Gear materials, properties, and manufacture. Materials Park, Ohio: ASM International; 2005. pp. 1, 5, 13, 163–169. (Viitattu: 18.2.2024).
- [12] W.E. Bryson. Heat Treatment: Master Control Manual. München: Hanser; 2015. pp. 170, 173. (Viitattu: 18.2.2024).
- [13] F. Pöhl. Local deformation and transformation behavior of retained austenite in 18CrNiMo7-6 after high-carbon carburizing treatment. Materials Characterizaion 2020;167:110446. Saatavissa (Viitattu: 22.3.2023): <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110446>.

- [14] S. Qin, C. Zhang, B. Zhang, H. Ma, M. Zhao. Effect of carburizing process on high cycle fatigue behavior of 18CrNiMo7-6 steel. *Journal of Materials Research and Technology* 2022;16:1136–1149. Saatavissa (Viitattu: 26.3.2024): <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.074>.
- [15] S. Roy, S. Sundararajan. The effect of heat treatment routes on the retained austenite and Tribomechanical properties of carburized AISI 8620 steel. *Surface and Coatings Technology* 2016;308:236–243. Saatavissa (Viitattu: 22.3.2024): <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.095>.
- [16] H. Mohrbacher. Metallurgical concepts for optimized processing and properties of carburizing steel. *Advances in Manufacturing* 2016;4:105–114. Saatavissa (Viitattu: 22.3.2024): <https://doi.org/10.1007/s40436-016-0142-9>.
- [17] SFS-EN ISO 683-3:2022. Lämpökäsiteltävät teräkset, seosteräkset ja automaattiteräkset. Osa 3: Hiiletysteräkset 2022. s. 16. (Viitattu: 21.2.2024).
- [18] Feon. Tuotteet - Pyörötangot n.d. Saatavissa (Viitattu 20.2.2024): <https://feon.fi/tuote/pyorotangot/>.
- [19] Sten. Hiiletysteräs 18CrNiMo7-6 2015. Saatavissa (Viitattu: 10.2.024): https://www.sten.fi/document/1/29/cf8002a/tuote_3d73e1e_18crnimo7_6_1.pdf.
- [20] G. Laschet, M. Abouridouane, M. Fernández, M. Budnitzki, T. Bergs. Microstructure impact on the machining of two gear steels. Part 1: Derivation of effective flow curves. *Material Science & Engineering A, Structural materials: properties, microstructure and processing* 2022;845:143125. Saatavissa (Viitattu 21.2.2024): <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143125>.
- [21] Ovako. Steel grade 20MnCr5 2023. Saatavissa (Viitattu: 21.2.2024): <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/20mncr5/>.
- [22] L.P. Singh, G.S. Mann. Experimental study of effects of annealing process on machinability and tool life of drill bit for 20MnCr5 steel. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* 2017. Saatavissa (Viitattu: 21.2.2024): https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_8_ISSUE_7/IJMET_08_07_212.pdf.
- [23] Xometry. Steel 1.7131 / 16MnCr5 n.d. Saatavissa (Viitattu 9.3.2024): <https://xometry.pro/wp-content/uploads/2023/09/Steel-1.7131.pdf>.
- [24] Cm. Vivek, Department of Mechanical Engineering, Periyar Maniammai University, Thanjavur, Tamil Nadu, India. Influence Of Carburizing and Carbonitriding in 16mncr5 to Enhance Mechanical Properties. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology IJiet* 2016. Saatavissa (Viitattu: 9.3.2024): <https://ijiet.com/wp-content/uploads/2017/01/36.pdf>.
- [25] Saerstahl. Material specification sheet - Saerstahl - 20NiCrMo2-2 (21NiCrMo2) - 20NiCrMoS2-2 n.d. (Viitattu: 9.3.2024).

- [26] L. Kamjou et al. Innovative steel design and gear machining of advanced engineering steel. *Gear Technol* 2016. Saatavissa (Viitattu: 9.3.2024): https://www.ovako.com/49704e/globalassets/steel-portfolio/brands/iq-steel/article_innovative-steel-design-and-gear-machining-of-advanced-engineering-steel.pdf.
- [27] G. Wang, X. Sang, Y. Zhang, M. Zhao, G. Xu, Z. Peng. Carburization-induced microstructure evolution and hardening mechanism of 18CrNiMo7-6 steel. *Journal of Materials Research and Technology* 2023;25:1649–1661. Saatavissa (Viitattu: 23.3.2024): <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.050>.
- [28] X. An, Y. Tian, B. Wang, T. Jia, H. Wang, Z. Wang. Prediction of the formation of carbide network on grain boundaries in carburizing of 18CrNiMo7-6 steel alloys. *Surface and Coatings Technology* 2021;421:127348. Saatavissa (Viitattu: 23.3.2024): <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127348>.
- [29] L. Tan, J. Tan, Q. Lei, S. Hou, H. Zhong. Precipitation mechanism of dispersed carbide in a gear carburizing layer and its effect on properties. *Engineering Reports* 2023:e12813. Saatavissa (Viitattu: 22.3.2024): <https://doi.org/10.1002/eng2.12813>.
- [30] N. Zhang, S. Guo, G. He, B. Jiang, L. Zhou, Y. Chen, et al. Failure analysis of the carburized 20MnCr5 gear in fatigue working condition. *International Journal of Fatigue* 2022;161:106938. Saatavissa (Viitattu: 22.3.2024): <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106938>.
- [31] N. Blech, C. Güntner, S. Schurer, M. Steinbacher, T. Tobie, K. Stahl. Material influence on mechanical properties of gears with alternative microstructures. *Forschung Im Ingenieurwesen* 2023;87:593–603. Saatavissa (Viitattu: 21.3.2024): <https://doi.org/10.1007/s10010-022-00608-9>.
- [32] SFS-ISO 6336-5:2017. Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 5: Strength and quality of materials 2017. pp. 39. (Viitattu: 29.3.2024).
- [33] X. Liang, X.J. Li, X.Y. Lin, Z.Y. Fan, P. Luo, F.L. Sun, et al. The Effect on Carburizing Process on Microstructure and Properties of 20MnCr5 Gear Steel. *Journal of Physics: Conference Series* 2021;1885:022024. Saatavissa (Viitattu: 26.3.2024): <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1885/2/022024>.
- [34] T. Tobie, F. Hippenstiel, H. Mohrbacher. Optimizing Gear Performance by Alloy Modification of Carburizing Steels. *Metals* 2017;7:415. Saatavissa (Viitattu: 26.3.2024): <https://doi.org/10.3390/met7100415>.
- [35] K. Dybowski, L. Klimek. Identification of Intermetallic Phases Limiting the Growth of Austenite Grains in the Low-Pressure Carburizing Process. *Crystals* 2023;13:1683. Saatavissa (Viitattu: 26.3.2024): <https://doi.org/10.3390/cryst13121683>.
- [36] M. Erdogan, S. Tekeli. The effect of martensite volume fraction and particle size on the tensile properties of a surface-carburized AISI 8620 steel with a dual-phase core microstructure. *Materials Characterization* 2002;49:445–454. Saatavissa (Viitattu: 26.3.2024): [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(03\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(03)00070-6).