



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SUPERMARTENSIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET JA NIIDEN KÄYTTÖKOHTEET

Antti Joensuu

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Helmikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Supermartensiittiset ruostumattomat teräkset ja niiden käyttökohteet

Antti Joensuu

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2020, 20 s.

Työn ohjaaja: Olli Nousiainen

Kandidaatintyön tavoitteena oli perehtyä supermartensiittisiin ruostumattomiin teräksiin yleisellä tasolla sekä niiden käyttökohteisiin.

Supermartensiittiset ruostumattomat teräkset koostuvat pääosin martensiittisestä faasista sekä prosentuaalisesta määrästä jäännösausteniittia sisältävästä faasista. Kyseisen materiaali on koostumukseltaan yleensä 11-13% kromia, 4-6% nikkeliä ja ne sisältävät erityisen vähän välisijahiiltä ja typpeä. Tärkein käyttökohde kyseisille teräksille on off-shore-öljy- ja kaasuteollisuudessa erilaisissa putkistoissa, jotka vaativat hyvää korroosion sietokykyä, lujuutta, kovuutta ja hitsattavuutta.

Asiasanat: ruostumaton teräs, martensiitti, supermartensiittinen ruostumaton teräs

ABSTRACT

Supermartensitic stainless steels and applications

Antti Joensuu

The University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2020, 20 pp.

Supervisor: Olli Nousiainen

The objective of this thesis was to get acquainted with supermartensitic stainless steels generally and their general applications. Metallurgy, properties and their most common applications are explained briefly in the thesis.

Supermartensitic stainless steels contain mostly martensitic phase with a prosential amount of retained austenite. The chemical compositions of SMSS are based on the Fe-Cr-Ni-Mo system with 4-6% of Ni, 0.5-2.5% of Mo and very low interstitial elements C and N. It has been increasingly applied to critical structures and components in offshore oil and gas industry like seamless pipes. These applications require excellent combined properties of corrosion resistance, weldability, strength and toughness.

Keywords: stainless steel, martensitic, supermartensitic stainless steel

ALKUSANAT

Kandidaatintyöni päätarkoitus oli tehdä kirjallisuuskatsaus supermartensiittista ruostumattomista teräksistä ja niiden käyttökohteista ja siten tutustua niihin.

Työn tein talven 2019 ja kevään 2020 välisenä aikana. Sovimme ohjaajani Olli Nousiaisen kanssa työn aiheesta ennen kesää 2019. Haluan kiittää tyttöystävääni Annia kannustamasta minua tekemään kandidaatintyöni loppuun. Haluan myös kiittää ystävääni Henriä, joka teki myös omaa kandiaan yhdessä minun kanssani, sekä erityisesti ystävääni Reettaa, joka sai minun aloittamaan kandidaatintyön teon ottamalla minut mukaan ”kandipiiriinsä”. Lopuksi haluan kiittää yleisesti koko konetekniikan alan henkilökuntaa laadukkaasta opetuksesta ja kaikesta tähän mennessä saamastani tiedosta opiskelujeni ajalta.

Oulu 27.2.2020

Antti Joensuu

Antti Joensuu

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	YLEISTÄ RUOSTUMATTOMASTA TERÄKSESTÄ.....	6
2.1.	Ruostumaton teräs	6
2.2.	Martensiittinen ruostumaton teräs	6
3	SUPERMARTENSIITTINEN RUOSTUMATON TERÄS	8
4	HISTORIAA	10
5	MIKRORAKENNE ERÄÄSTÄ MATERIAALISTA	12
6	SEOSAINHEET	13
6.1.	Kromi.....	13
6.2.	Molybdeeni.....	13
6.3.	Nikkeli	13
6.4.	Hiili ja typpi.....	14
6.5.	Mangaani	14
6.6.	Pii.....	14
6.7.	Muut seosaineet	15
6.8.	Erään supermartensiittisen ruostumattoman teräksen koostumus.....	15
7	HITSATTAVUUS	16
8	KÄYTTÖKOHTEET	17
9	YHTEENVETO.....	19
	LÄHDELUETTELO.....	20

1 JOHDANTO

Supermartensiittiset ruostumattomat teräkset ovat mekaanisten ominaisuuksiensa osalta kombinaatioita hyvästä sitkeydestä, lujuudesta, korroosionsietokyvystä ja erityisesti hitsattavuudesta. Siksi ne ovat erityisen hyviä materiaaleja esimerkiksi happamissa käyttökohteissa kuten merellä. Öljy- ja kaasuteollisuus ovat valjastaneet materiaalin käyttöön erityisesti vedenalaisiin putkistoihin, joiden pitää sietää suolaisia olosuhteita.

Valitsin aiheeni sillä perusteella, että olen käynyt kesätöissä koko opiskeluaikani Torniossa Outokummulla. Tästä syystä ruostumaton teräs on lähellä sydäntäni. Aiheeni oli myös sen verran ”eksoottinen”, että se herätti vielä enemmän kiinnostusta.

Työssä käsitellään hieman ruostumattomia teräksiä yleensä sekä supermartensiittisen ruostumattoman teräksen historiaa, ominaisuuksia ja seosaineita. Lopuksi käydään läpi käyttökohteita, joihin supermartensiittiset ruostumattomat teräkset ovat erityisesti kehitetty.

Aiheesta löytyi vain yksi tohtorin väitöskirja, joka käsitteli aihetta laajemmin, ja siitä sai hyvin paljon tietoa aiheeseen liittyen. Muuten aiheesta löytyi vain tutkimuksia, jotka eivät pureutuneet asiaan sen laajemmin.

2 YLEISTÄ RUOSTUMATTOMASTA TERÄKSESTÄ

2.1. Ruostumaton teräs

Ruostumattomat teräkset ovat rautaseoksia, jotka sisältävät vähintään 10,5 p-% kromia. Kromi muodostaa ohuen kromioksidirikkaan passiivikalvon seoksen pintaan, joka toimii suojaavana eristeenä ja erottaa teräksen syövyttävästä ympäristöstä. Tästä syystä ruostumattomilla teräksillä on hyvä korroosion sietokyky. Kromia lisäämällä korroosionkestävyys paranee (Leinonen 2006).

Ruostumattomat teräksen voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään, austeniittisiin, ferriittisiin ja martensiittisiin. Duplex-teräkset ovat ferriitin ja austeniitin yhdistelmiä ja ne sisältävät noin 50% molempia faaseja (Leinonen 2006).

Eri seosaineita lisäämällä ja vähentämällä voidaan teräksestä supistaa tai lisätä tiettyjä faasiosuuksia. Kun kromipitoisuus ylittää 13% terässeoksessa, austeniitin faasiosuus häviää kokonaan. Kasvanut kromipitoisuus johtaa ferriittisen rakenteen syntymiseen. Nikkeli taas puolestaan laajentaa austeniittialuetta eli sillä on päinvastainen vaikutus kromiin verrattuna (Kömi 2019).

Muita tavanomaisia seosaineita ruostumattomissa teräksissä ovat molybdeeni ja pienemmässä määrin myös kupari, typpi tai titaani. Korroosionsietokykyyn kromin lisäksi positiivisella tavalla vaikuttavat molybdeeni ja typpi. Yleensä mitä runsasseosteisempi ruostumaton teräs on, sitä paremmin se kestää happojen tai muuten vaativien olosuhteiden aiheuttamaa syövytystä (Kömi 2019).

2.2. Martensiittinen ruostumaton teräs

Martensiittinen ruostumaton teräs koostuu nimensä mukaisesti pääasiallisesti martensiittisestä faasista. Tämä faasi syntyy seostamalla siten, että austeniitti kokee faasimuutoksen austeniitista martensiitiksi nopean lämpökäsittelyn aikana tai kylmämuokattaessa. Karkaisu eli nopea jäähdytys austeniittiselta faasialueelta aiheuttaa sen, että kiderakenteesta tulee tilakeskinen tetragoninen kiderakenne (Kömi 2019).

Kun hiiltä sisältävä austeniitti karkaistaan eli jäädytetään nopeasti, se ei ehdi muodostamaan teräkseen rautakarbidi-eräitä nopeasti. Jäähdytys tapahtuu niin nopeasti, ettei austeniitilla ole aikaa muuttua ferriitiksi tai bainiitiksi. Hiiliatomit ovat aluksi austeniitin välisijoissa ja faasimuutoksen kautta ne joutuvat määrättyjen rautaatomien väliin eräänlaiseen ”pakkotilaan”. Kuten jo aiemmin todettiin, tulee kiderakenteesta tällöin tilakeskinen tetragoninen kiderakenne (Leinonen 2006).

Kromia martensiittisissä ruostumattomissa teräksissä on yleensä noin 13% ja hiiltä 0.2-0.3%. Koska kyseistä kromia ei ole yhtä paljon kuin esimerkiksi austeniitissa, myöskin korroosiokestävyys on heikompaa martensiittisissä ruostumattomissa teräksissä (Leinonen 2006).

Martensiittiset ruostumattomat teräkset soveltuvat käyttökohteisiin, joissa vaaditaan erittäin hyviä mekaanisia ominaisuuksia, kuten kovuutta ja sitkeyttä. Ne soveltuvat esimerkiksi terämateriaaliksi veitsiin tai nosturien ja työkoneiden puomeissa ja rungoissa (Leinonen 2006).

3 SUPERMARTENSIITTINEN RUOSTUMATON TERÄS

Supermartensiittinen ruostumaton teräs koostuu pääosin martensiittisestä mikrorakenteesta ja se sisältää erityisen matalan määrän välisija-atomeja, hiiltä ja typpiä. Matalan hiilipitoisuuden vuoksi supermartensiittinen ruostumaton teräs ei ole yhtä kovaa kuin martensiitti konventionaalisissa hiiliteräksissä (Nießen 2018).

Kromipitoisuus on yleensä 11 - 13 %. Muiden seosaineiden pitoisuudet riippuvat teräksen seostuksen tasosta ja käyttökohteesta. Seostukset kategorisoidaan yleensä kolmeen eri luokkaan seostuksen avulla. Kevyesti seostetut sisältävät yleensä noin 2 % nikkeliä eivätkä ollenkaan molybdeeniä. Runsaammin seostetuilla nikkelpitoisuus on noin 4.5 % ja molybdeenipitoisuus 1.5 %. Korkeimman seostuksen omaavissa laaduissa on nikkeliä noin 6 % ja molybdeeniä 2 – 2.5 % (Farrar 2004).

Taulukko 1 Tyypilliset koostumukset eri seostuksille (Farrar 2004)

		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	N
Paino %	'kevyt'	0.01	1.5	0.2	<0.01	<0.02	11	2	-	<0.01
	'keskisuuri'	0.01	1	0.2	<0.01	<0.02	12	4.5	1.5	<0.01
	'korkea'	0.01	1	0.2	<0.01	<0.02	12	6	1.5	<0.01

Kun supermartensiittista ruostumatonta terästä hehkutetaan lämpötilaan, joka on lämpötilojen A_{c1} ja A_{c3} välissä, alkaa teräksen muodostua hienosti hajaantunutta austeniittia. Sen muodostusta seuraa diffuusio, joka kiihdyttää nikkelin partitiota eli jakaantumista martensiitissa ja austeniitissa. Kun nikkelpitoisuus nousee austeniitissa, se stabiloi austeniittia martensiitin muodostumista vastaan jäädytyksen aikana. Hehkutus johtaa täten kaksifaasiseen mikrorakenteeseen, jossa on karkaistua martensiittia ja jäännösausteniittia. Edellä mainitulla austeniitilla on suuri vaikutus supermartensiittisen ruostumattoman teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Jäännösausteniitin myötä teräksen vetolujuus, myötölujuus ja kovuus laskevat, mutta iskutkeys ja muovattavuus kasvavat. Jäännösausteniitin määrää voidaan hallita eri lämpökäsittelyillä (Nießen 2018).

Jäännösausteniitti on mekaanisten ominaisuuksiensa lisäksi myös toisella tavalla hyödyllinen supermartensiittisille ruostumattomille teräksille. Se edistää molybdeeni ja kromi-karbidien liukenemista materiaalin matriisiin (Anselmo 2006).

Täysin martensiittiseen mikrorakenteeseen voidaan päästä, jos austenointi tehdään A_3 -lämpötilan yläpuolella. Tälle mikrorakenteelle on tyypillistä sen suuri määrä dislokaatioita (Bojack 2014).

Yleensä ensimmäinen päästö suoritetaan lämpötilassa, joka on A_{c1} -lämpötilan yläpuolella. Tämä synnyttää materiaaliin austeniittia, joka on stabiilia päästön jälkeisen jäähtymisen aikana aina huoneen lämpötilaan saakka. Uutta martensiittia alkaa syntyä silloin, jos A_{c1} -lämpötila ylittyy liikaa. Tällä on haitallisia vaikutuksia erityisesti materiaalin sitkeyteen. Lisääntyneen austeniitin määrä on syynä uuden martensiitin muodostumiselle. Alueet, jotka eivät ole austeniitista rikkaita, sisältävät vähemmän austeniittia stabiloivia alkuaineita, joten niistä alueista tulee siksi alttiimpia faasimuutoksille jäähtymisen aikana. (Bojack 2014).

4 HISTORIAA

1960-luvulla esiteltiin näkökulmia, joilla voitaisiin suunnitella muovattava 12 p-% kromia sisältävä teräs, jolla olisi hyvä korroosion sietokyky, ja joka olisi myös vahvaa terästä. Haasteena tässä oli löytää juuri oikea seostus, josta saataisiin lämpökäsittelyllä faasirakenne, joka ei sisältäisi δ -ferriittiä. Materiaalin A_{c1} -lämpötilan pitäisi pysyä 700 °C yläpuolella viiden tunnin isotermisen karkaisun aikana ilman uudelleen austenitointia. Viimeisenä haasteena oli pitää Ms-lämpötila alle 200 °C, jotta faasirakenne saataisiin kokonaan martensiittiseksi jäädytyksen aikana. Tähän lupaavin seos oli lujuuden, iskutheyden ja korroosion sietokyvyltään Fe-0.1C-12Cr-2Ni-1.5Mo-0.3V (Nießen 2018).

Paremmen korroosion sietokyvyn kysynnän myötä seostukseen alettiin lisätä suurempia määriä kromia, mistä syntyi myöhemmin tarve stabiloida austeniitti sen muovattavuuden säilyttämiseksi. Tähän tarkoitukseen hiili oli yksi tehokkaimmista austeniitin stabiloijista, mutta hiiliseostus johti $M_{23}C_6$ erkaumien syntyyn ja siten kromin ehtymiseen raerajoilla, eli teräksen herkistymiseen. Tästä syystä jouduttiin miettimään toisia vaihtoehtoja (Nießen 2018).

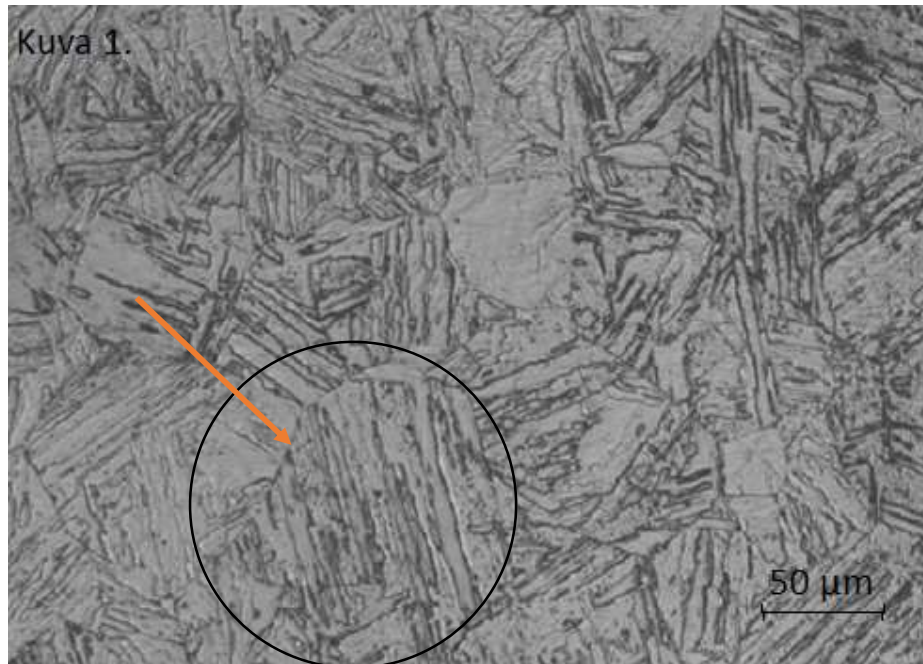
Nikkeli osoittautui tehokkaimmaksi austeniitin stabiloijaksi. Hiilen korvaaminen nikkellillä johti myös siihen, että syntyvää martensiittia saatiin pehmenettyä hyödyllisellä tavalla, eli sen iskutheyttä saatiin parannettua. 1950-luvulla kehitettiin AOD-prosessi (Argon Oxygen Decarburization), jota ennen hiilen vähentäminen seoksesta oli hankalaa (Nießen 2018).

Hiilipitoisuus laskettiin 0.06 p-% ruotsalaisten valmistajien Boforin ja Avestan toimesta 1960-luvulla, mistä kehitettiin pehmeä martensiittinen ruostumaton teräs. Nämä teräkset kehitettiin erityisesti turbiinin roottoreille, mutta kaikkien hyvien mekaanisten ominaisuuksiensa myötä pehmeät martensiittiset ruostumattomat teräkset saivat osansa myös koko ajan laajenevista ydinvoimateollisuuden paineputkista (Nießen 2018).

Pehmeät martensiittiset teräkset kehitettiin perinteisen 13% kromia sisältäneen martensiittisen ruostumattoman teräksen tilalle hitsaukseen. Ne sisälsivät mikrorakenteeltaan pienen määrän jäännösausteniittia ja muodostunutta reversioausteniittia, joiden vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin oli merkittävä kohonneen sitkeyden ja iskutheyden vuoksi. Supermartensiittisten ruostumattomien

terästen kehitys alkoi siitä, kun energiayhtiö Statoil kiinnostui käyttämään samankaltaisia teräksiä suuriin off-shore-putkisto -projekteihin (Nießen 2018).

5 MIKRORAKENNE ERÄÄSTÄ MATERIAALISTA



Kuva 1 Teräksen $13\text{Cr}5\text{Ni}1\text{Mo}0.025\text{Nb}0.09\text{V}0.06\text{N}$ mikrorakenne (mukailten Liu 2012).

Kuvasta 1 nähdään supermartensiittisen ruostumattoman teräksen mikrorakenne sen jälkeen, kun sille on suoritettu lämpökäsittely 1100 asteeseen ja sitten pakotettu jäähtymään ilmajäädytyksellä. Mikrorakenteesta erottaa esiin syövytetyt perinnäisen austeniitin raerajat ja martensiitin sälemäisen rakenteen, niin kuin kuvan 1 oranssi nuoli osoittaa. Kuva on otettu optisesta mikroskoopista (Liu 2012).

6 SEOSAINHEET

6.1. Kromi

Supermartensiittisiin ruostumattomiin teräksiin on lisättävä vähintään 10.5 p-% kromia, jotta ohuen, stabiilin passiivikalvon muodostuminen onnistuu. Passiivikalvon muodostavat kromioksidit estävät anodisen liukenemisen, ja johtuen sen hyvästä sähkönjohtavuudesta, se voi luoda katodisia reaktioita isolla nopeudella. Sähkönjohtavuutensa vuoksi kromi tekee ruostumattomasta teräksestä herkän piste- ja rakokorroosiolle. Alueet, joissa passiivikalvo on jotenkin heikentynyt, ovat erityisesti vaarassa näille korroosiomekanismeille (Nießen 2018).

6.2. Molybdeeni

Molybdeeniä lisätään supermartensiittisiin teräksiin lisäämään yleistä sietokykyä galvaanista korroosiota vastaan. Molybdeenillä saadaan erityisen hyvä vastustuskyky pistekorroosiota vastaan niin kuin myös jännityskorroosiota vastaan, jota tapahtuu sulfidia sisältävässä ympäristössä (Nießen 2018).

Kromi ja molybdeeni ovat ferriittiä stabiloivia elementtejä, joten martensiittisissä ruostumattomissa teräksissä on oleellista käyttää myös austeniittia stabiloivaa seostusta, jotta deltaferriitin muodostuminen voidaan estää. Tällöin myös martensiitin muodostuminen ilmajähdytyksellä on mahdollista (Liu 2012).

6.3. Nikkeli

Nikkeli on austeniitin paras stabiloija supermartensiittisessä ruostumattomassa teräksessä. Jotta materiaalin mikrorakenne saadaan pidettyä martensiittisena, tasapainotetaan nikkelin määrää kromilla ja molybdeenillä. Mekaanisten ominaisuuksien osalta nikkelin vaikutus materiaaliin on sitkeyden ja lujuuden nosto, ja se on tunnettu myös siitä, että se laskee korroosionopeutta ja nostaa pistekorroosion sietokykyä (Nießen 2018).

6.4. Hiili ja typpi

Muita tehokkaita austeniittia stabiloivia alkuaineita ovat hiili ja typpi. Näiden optimaalinen seostus määräytyy siitä, kuinka hyvät mekaaniset ominaisuudet materiaalille halutaan korroosionsietokyvyn suhteen (Liu 2011).

Hiilen määrä määrää myös seostuksessa sen, mitkä lujuus- ja kovuusarvot materiaali saa supermartensiittisille ruostumattomille teräksille tyypillisen lämpökäsittelyn jälkeen (Bahi 2018).

Hitsauksessa hiilen matala määrä on supermartensiittisille ruostumattomille teräksille eduksi, sillä se vähentää juuri karkaistun materiaalin kovuutta sekä hitsauksen jälkeistä herkistymistä. Hitseille ei tarvitse välttämättä suorittaa hitsauksen jälkeisiä lämpökäsittelyjä, sillä materiaali säilyttää hyvät sitkeysominaisuudet (Nießen 2018).

6.5. Mangaani

Jotta supermartensiittisille ruostumattomille teräksille saadaan hyvä kuumasitkeys, siihen lisätään mangaania. Matalissa lämpötiloissa mangaani toimii myös austeniitin stabiloijana ja voi täten korvata nikkelin pienissä määrin. Mangaanilisäykset seostuksessa nostavat typen liukoisuutta ja muodostavat haitallisia sulfideja ollessaan yhteydessä rikin kanssa. Tästä on haitallisia vaikutuksia materiaalin korroosion sietokyvylle (Nießen 2018).

6.6. Pii

Pienillä pii-lisäyksillä seostuksessa lisätään materiaalin kykyä vastustaa hapettumista korkeissa lämpötiloissa tai hyvin hapettavissa ympäristöissä matalissa lämpötiloissa. Pii on ferriittiä stabiloiva elementti, joten materiaaliin voi jäädä δ -ferriittiä ja matalan sulamispisteen omaavat faasit stabiloituvat, jos piitä on seostettuna liikaa (Nießen 2018).

6.7. Muut seosaineet

Seostusaineina voidaan käyttää myös titaania, niobia ja vanadiinia. Nämä aineet reagoivat hiilen kanssa muodostaen karbideja ja nitridejä. Lämpökäsittelyn aikana nämä yhdisteet rajoittavat rakeen kasvua austeniitissa kiinnittämällä sen raerajat. Kyseisiä seosaineita käytetään myös nostamaan materiaalin lujuutta (Nießen 2018).

6.8. Erään supermartensiittisen ruostumattoman teräksen koostumus

Taulukosta 2 nähdään erään supermartensiittisen ruostumattoman teräksen, X2CrNiMoV13-5-2 standardin SFS-EN 10088-3 mukainen kemiallinen koostumus sulatusanalyysistä.

Taulukko 2 X2CrNiMoV13-5-2 teräksen kemiallinen koostumus ja sulatusanalyysi (SFS-EN 10088-3 2015)

Nimi	Numero	C % (max)	Si % (max)	Mn % (max)	P % (max)	S % (max)
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	0.03	0.5	0.5	0.04	0.015
		Cr % (max)	Mo % (max)	Ni % (max)	Ti % (max)	V % (max)
		11.5 to 13.5	1.5 to 2.5	4.5 to 6.5	0.01	0.1 to 0.5

7 HITSATTAVUUS

Martensiittiset teräset sisältävät yleensä niin paljon hiiltä, että niiden hitsattavuus on yleisesti hankalaa. HAZ-alueen mikrorakenne on yleensä liian kovaa hitsauksen jälkeen eivätkä sen iskutkeysvaatimukset täyty. Supermartensiittiset ruostumattomat teräset ovatkin optimoituja hitsaukseen, ja siksi niitä usein kutsutaankin ”hitsattaviksi martensiittisiksi ruostumattomiksi teräksiksi”. Kun hiilipitoisuus on alle 0.01 p-% niin päästään hitsin HAZ-alueeseen, joka ei kärsi kovettumisesta. Pienillä titaanilisäyksillä, noin 0.1 p-%, voidaan HAZ-alueen kovettumista vähentää vielä entisestään (Nießen 2018).

Hitsaaminen suoritetaan yleisesti ilman esilämmitystä. Hitsille ei myöskään tarvitse yleensä suorittaa jälkikäsitteilyjä, mutta on raportoitu, että lyhyt viiden minuutin hehkutus johtaa HAZ:in pehmenemiseen ilman, että sillä on suurempaa vaikutusta mikrorakenteeseen tai lujuuteen (Nießen 2018).

Materiaali on altis vetyhalkeilulle, ellei hitsauksen aikana vedyn pääsyä hitsiin estetä. Sitä voi päästä hitsiin esimerkiksi täyteaineista tai kosteudesta suojakaasussa (Nießen 2018).

8 KÄYTTÖKOHTEET

Supermartensiittisten ruostumattomien terästen mekaaniset ominaisuudet ovat yhdistelmä hyvistä mekaanisista ominaisuuksista, kuten korkeasta lujuudesta ja iskusitkeydestä, kohtuullisesta korroosionsietokyvystä ja hyvästä hitsattavuudesta. Supermartensiittisten ruostumattomien terästen koelujuudet ovat jopa 850 MPa ja käyttölämpötilat korkealla seostusasteella oleville laaduille jopa -40 tai -50 astetta. Niillä on hyvä korroosionsietokyky suolaisissa olosuhteissa ja kohtuullinen kyky sietää piste- ja jännityskorroosiota esimerkiksi rikkivetyä vastaan (Cao 2010).

Kuitenkin kloridien ja rikkivedyn yhteisvaikutus aiheuttaa korroosionsietokyvyn nopean rappeutumiseen (Bahi 2018).

Jos kohteeseen halutaan teräs, jolla on paremmat ominaisuudet korroosionkeston suhteen kuin normaalilla hiiliteräksellä, mutta ei yhtä korkeat kuin Duplex ruostumattomalla teräksellä, voidaan siihen valita supermartensiittinen ruostumaton teräs. Myös hintansa puolesta supermartensiittinen ruostumaton teräs on taloudellisesti houkuttelevampi vaihtoehto, ollen jopa 35-40 % edullisempaa kuin Duplex-vaihtoehto (Farrar 2000).

Supermartensiittisiä ruostumattomia teräksiä käytetään yhä useammin kohteisiin, joissa on kriittisiä rakenteita ja komponentteja. Tällaisia ovat esimerkiksi turbiinit, potkurit merenkäynnissä, lentokoneen osat sekä öljy- ja kaasuteollisuuden välineet, kuten saumattomat putket ja kotelot porausta varten. Energiateollisuudessa erityisesti hydrauliset turbiinit, venttiilien rungot ja korkeapaineputket ovat houkuttelevia kohteita supermartensiittisille ruostumattomille teräksille (Liu 2012).

Supermartensiittisten ruostumattomien terästen lujuus säilyy hyvänä hyvinkin korkeissa käyttölämpötiloissa. Taulukko 3 kertoo erään supermartensiittisen ruostumattoman teräksen, X2CrNiMoV13-5-2 minimi 0.2%- koelujuudet eri korotetuissa lämpötiloissa.

Taulukko 3 X2CrNiMoV13-5-2 teräksen 0,2 % -venymisrajan vähimmäisarvot korotetuissa lämpötiloissa (SFS-EN 10088-3, 2015).

Minimi 0.2%-koelujuus (Mpa) korotetussa lämpötilassa (°C)							
Lämpökäsittely	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C
+QT750	620 MPa	605 Mpa	595 Mpa	585 Mpa	580 Mpa	570 Mpa	560 Mpa
+QT850	710 Mpa	695 Mpa	680 Mpa	670 Mpa	660 Mpa	645 Mpa	635 Mpa

Tärkeimmät käyttökohteet ovat erityisesti off-shore-öljy- ja kaasuteollisuudessa. Korkeaa lujuutta vaativat erilaiset virtausputket ja johdot sekä alas suunnattujen porausreikien putkistot. Verrattuna hiili- ja matalaseostettuihin teräksiin, joille pitää lisätä korroosiota sietävä pinnoite sekä hintavampiin sekä korkeasti seostettuihin ruostumattomiin duplex teräksiin, supermartensiittisillä ruostumattomilla teräksillä on pieni taloudellinen markkinarako niiden välissä (Liu 2012).

Pienilläkin lämpötilamuutoksilla lämpökäsittelyiden aikana voi olla merkittäviä vaikutuksia jäännösausteniitista johtuviin materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin kuten myötölujuuteen ja kovuuteen. Off-shore-kohteissa materiaalien pitää täyttää tiukat standardit, joten lämpökäsittelyiden täytyy olla tiukasti kontrolloituja (Bojack 2012).

9 YHTEENVETO

Supermartensiittiset ruostumattomat teräkset ovat rauta-kromi-nikkeli-molybdeeni-perusteisia teräksiä, joiden kromipitoisuus painoprosentteina on vähintään 10.5 p-% ja välisijahiiltä ja typpeä on erityisen pieni määrä, < 0.01 p-%. Supermartensiittisille ruostumattomille teräksille on ominaista hyvä korroosionsietokyky, ja ne ovat hyvin hitsattavissa matalan hiilipitoisuuden ansiosta toisin kuin normaalit martensiittiset ruostumattomat teräkset, jotka sisältävät enemmän hiiltä.

Tärkeimmät käyttökohteet ovat erityisesti off-shore-öljy- ja kaasuteollisuudessa, joissa vaaditaan hyviä mekaanisia ominaisuuksia ja hitsattavuutta. Myös materiaalin hinta on tärkeässä osassa, sillä materiaalia käytetään satoja tonneja kyseisiin käyttökohteisiin erilaisten putkien ja roottorien muodossa. Supermartensiittiset ruostumattomat teräkset ovat hyvä vaihtoehto hieman kalliimman duplex-teräksen sijasta tai edullisemmän, mutta ei niin kestävästi hiiliteräksen sijasta.

LÄHDELUETTELO

Anselmo, N., Kuri, S. E., Mariano N. A., May, J. E., Nascente, P. A. P., 2006. Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel in aerated and CO₂-saturated synthetic seawater. *Materials Science and Engineering: A*, 428 (1-2), s 73-79.

Bahi, R., Beliardouh, N. E., Kaleli, H., Ramoul, C. E., 2018. Thermal Treatment Effect on Tribological and Corrosion Performances of 13Cr5Ni2Mo Super-Martensitic Stainless Steel. *Tribology in Industry*, 40 (3), s 433-439.

Bojack, A., Morris, P.F., Zhao, L., 2014. *In Situ* Thermo-magnetic Investigation of the Austenitic Phase During Tempering of a 13Cr6Ni2Mo Supermartensitic Stainless Steel. *Metall and Mat Trans A* 45, s 5956–5967.

Cao, J., Li, J., Liu, Y., Tao, J., Su, J., Ye, D., Zhao, K., 2010. The Microstructure and Properties of Super Martensitic Stainless Steel Microalloyed with Tungsten and Copper. Teoksessa: Su, C. W., Xia, H., Xiao, P. F., Zhang, Y. F. (toim.) *Advanced Material and Processing 2010*. Singapore. World Scientific Publishing Co, Pte, Ltd, s. 329-333. ISBN 981-4322-78-4.

Farrar, J. C. M. 2000. *The alloy tree. A guide to low-alloy steels, stainless steels and nickel-base alloys*. Abington Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 191 s. ISBN 0-8493-2575-7.

Kömi J. (2019) *Terästen valmistus ja ominaisuudet, Diaesitys Ruostumattomat teräkset osa 1*.

Leinonen J. (2006) *Materiaalitekniikka 1, Opintomoniste*.

Liu, C. M., Ma, C. M., Subramanian, S. V., Wang, L. J., 2012. Microstructure and properties of 13Cr5Ni1Mo0.025Nb0.09V0.06N super martensitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 539, s 271-279.

Liu, C. M., Ma, C. M., Subramanian, S. V., Wang, L. J., 2011. Role of Nb in low interstitial 13Cr super martensitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528 (22-23), s 6812-6818.

Nießen, F. (2018). *Phase Transformations in Supermartensitic Stainless Steels*. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark.

SFS-EN 10088-3, 2015. *Ruostumattomat teräkset. Osa 3: Yleiseen käyttöön tarkoitettut korroosionkestävät puolivalmisteet, tangot, valssilangat, langat, profiilit ja kirikkaat tuotteet. Tekniset toimitusehdot*. Suomen standardoimisliitto SFS: 140 s.