

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

School of Energy Systems

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaattityö ja seminaari

**YDINVOIMALAITOS      AES-2006:N      REAKTORIN  
PAINESÄILIÖN      RAKENNE,      MATERIAALIVALINTA,  
VALMISTUSTEKNIikka JA ASENNUS.**

Työn tarkastaja:      Professori Juhani Hyvärinen

Työn ohjaaja:      TkT Vesa Tanskanen

Lappeenranta, 16.04.2015

Roman Polin

## TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Roman Polin

Opinnäytteen nimi: Ydinvoimalaitos AES-2006:n reaktorin painesäiliön rakenne, materiaalivalinta, valmistustekniikka ja asennus.

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015

32 sivua, 8 kuvaa ja 10 taulukkoa.

Hakusanat: Ydinvoimalaitos, reaktori, painesäiliö, AES-2006, teräs

Keywords: Nuclear Power Plant, Reactor, Pressure Vessel, AES-2006, steel

Tässä kandidaattityössä on käsitelty Rusatom Overseas Oy:n toimittaman ydinvoimalaitoksen AES-2006 reaktoripiiriin kuuluvan painesäiliön ominaisuuksia, materiaalivalintoja ja niiden kriteerejä, reaktorin valmistusmenettelyä ja sen asennusvaiheita mukaan lukien pääkiertoputkiston hitsaus julkisesti saatavilla olevan materiaalin pohjalta. Tässä kandidaattityössä on kuvattu AES-2006 ydinvoimalaitoksen kehityshistoria ja lueteltu sen keskeisimmät eroavuudet edeltäjistään. Työn keskeisessä osassa on tarkastettu VVER-1200 reaktorin painesäiliön toimittajan ilmoittaman teräksen koostumus ja tärkeimpien seosaineiden vaikutus painesäiliöön ja koko voimalaitoksen käyttöikään. Tämän jälkeen on käsitelty reaktorin painesäiliön valmistustekniikkaa ja asennusta reaktorirakennuksessa. Johtopäätöksissä on vedetty yhteen tulokset ja otettu kantaa vertailukelpoiseen painesäiliöteräkseen ja sen ominaisuuksiin. Tärkeimmiksi seikoiksi nousevat tässä työssä seosaineiden myönteinen ja kielteinen vaikutus koko ydinvoimalaitoksen käyttöikään, ja ko. seosaineiden hallinnan tärkeys valmistus- ja asennusvaiheissa.

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Työn tavoitteet ja keskeisimmät kysymykset.....	7
1.2	Työn rajaus .....	7
2	AES-2006 LAITOKSEN JA VVER-1200:N REAKTORIN HISTORIA.....	8
2.1	VVER reaktoreiden historia .....	8
2.2	AES-2006 projektin historia.....	9
3	YDINVOIMALAITOS AES-2006:N REAKTROIPAINESÄILIÖN MATERIAALIVALINTA, VALMISTUSTEKNIikka SEKÄ ASENNUS .....	9
3.1	Reaktorin materiaali .....	10
3.1.1	Rakenneteräksen lujuus.....	10
3.1.2	Rakenneteräksen sitkeys .....	11
3.1.3	Rakenneteräksen hyvä hitsattavuus .....	11
3.1.4	Rakenneteräksen korroosionkestokyky.....	12
3.1.5	Rakenneteräksen hyvä säteilyhaurastumisen kestävyys.....	12
3.1.6	Rakenneteräksen huono aktivoitumiskyky .....	13
3.2	VVER-1200 reaktorin painesäiliöteräs. ....	13
3.2.1	VVER-1200 reaktorin painesäiliön rakenneteräksen lujuus.....	14
3.2.2.	VVER-1200 reaktorin painesäiliön teräksen koesulatus ja karkaisu sekä niiden tulokset .....	16
3.2.3.	VVER-1200 reaktorin painesäiliön rakenneteräksen hitsattavuus.....	17
3.2.4.	VVER-1200 reaktorin painesäiliön korroosionkestokyky .....	18
3.2.5.	VVER-1200 reaktorin painesäiliön rakenneteräksen säteilyhaurastumisen kestävyys 19	
3.2.6.	Käytettävän teräksen kehityssuunnat .....	20
3.3.	VVER-1200 reaktorin valmistustekniikka .....	21
3.3.1.	Sulatus, valu ja muovaus.....	21
3.3.1.	Koneistus.....	22
3.3.2.	Sisäpinnan pinnoittaminen ruostumattomalla teräksellä.....	22
3.3.3.	Hitsaus.....	23

3.3.4.	VVER-1200 reaktorin painesäiliön asennus ja hitsaus .....	24
4	VIRANOMAISTARKASTUKSET .....	26
5	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	26
6	YHTEENVETO.....	27

**LYHENTEET**

EPC	Engineering, Procurement and Construction
BOO	Build, Own and Operate
YVL	Ydinvoimalaitos
BDBA	Beyond Design Basis Accident
DBA	Design Basis Accident
HAZ	Heat Affected Zone
LAES	Leningradskaja ydinvoimalaitos

## 1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä käsitellään Rusatom Overseas Oy:n toimittaman ydinvoimalaitoksen AES-2006 reaktoripiiriin kuuluvan painesäiliön ominaisuuksia, materiaalivalintoja ja sen kriteereitä, reaktorin valmistusmenettelyä ja sen asennusvaiheita mukaan lukien jäähdytysputkiston hitsaus julkisesti saatavilla olevan materiaalin pohjalta. Työn keskeisessä osassa tarkastellaan VVER-1200 painesäiliöteräksen seosaineita, jotka vaikuttavat sekä myönteisesti että kielteisesti teräkseen reaktoreiden tavanomaisissa käyttölämpötiloissa, paineissa ja neutronivuossa. Sama seosaine voi parantaa materiaalin lujuutta ja sitä kautta paineen kestävyttä, mutta samanaikaisesti lisätä säteilyhaurastumista neutronivuon vaikutuksessa. Tästä syystä oikea materiaalivalinta ja valmistusprosessi ovat erittäin tärkeässä roolissa ydinvoimalaitoksen Engineering-Procurement-Construction-hankkeissa (EPC) ja itse ydinvoimalaitoksen käyttöään määrittelyssä.

Venäläinen ydinalan hallintoyhtiö Rosatom on esittänyt vuonna 2013 kehitysstrategiansa, jonka mukaan yhtiö on tulossa maailmanlaajuisesti ydinvoimatoimijaksi Build-Own-Operate-periaatteella (BOO). Ydinvoimalaitokset suunnitellaan luotettavaksi osoittautuneen VVER-reaktoritekniikan pohjalta. (Laaksonen 2014, 22). Rakennushanke rahoitetaan pääomasijoituksilla sekä ydinvoimalaitoksella (YVL) tuotettu energiaa myydään paikallisilla energiamarkkinoilla. Ensimmäinen hanke, joka toteutetaan ko. konseptin puitteissa, on YVL Akkuy Turkissa, johon rakennetaan neljän AES-2006 yksikön ydinvoimalaitos BOO periaatteella.

YVL AES-2006:n markkinoinnin kannalta tärkeänä pidetään ko. laitoksen sertifiointia ja sopeuttamista kansainvälisten ja mahdollisesti alueellisten vaatimusten mukaan. Tämä koskee ensisijaisesti turvallisuusluokitettujen komponenttien tarkastusta ja sertifiointia, kuten reaktorin paineastiaa ja jäähdytyspiirin komponentteja. (Laaksonen 2014, 22). Julkisesti saatavilla olevista lähteistä ei löydetty Rosatomin ilmoittamia kansainvälisiä sertifikaatteja tai määrittelyjä, joita olisi voitu ottaa pohjaksi tilaajan hankkiman YVL:n sertifiointissa ja luvituksessa. Fennovoima Oy:n hankkiman AES-2006 Hanhikivi-1:n rakentamisluvan valmistelu on aloitettu keväällä 2014. Säteilyturvakeskuksen (STUK) alustavassa turvallisuusarviointiraportissa ilmoittama reaktorin paineastian teräslaatu on luokiteltu venäläisen tekniset vaatimukset TU-normien mukaan. Kyseinen seikka viittaa siihen, että VVER-1200 painesäiliöterästä ei ole sertifioitu ISO eikä EN standardijärjestelmässä. Sen sijaan voidaan olettaa, että eurooppalaiset ja suomalaiset valvontaviranomaiset tulevat vaatimaan perusteellista selontekoa reaktorin valmistuksessa

käytettävästä teräslaadusta ja valmistusmenetelmistä. Kyseiset vaatimukset osittain johtuvat YVL Loviisan toisen reaktorin painesäiliön hitsausaumojen epäpuhtauksista, jonka seurauksena ovat YVL:n käyttöikää lyhentävät säteilyhaurastumisominaisuudet. ”Laitososille on valittava sellaiset materiaalit, joiden tiedetään kestävän suunnitteluperusteisten käyttötilanteiden ja ympäristöolosuhteiden mekaanisia, kemiallisia ja muita mahdollisia ratkaisuja. Oletettuihin ikääntymismekanismeihin on varauduttava laitososien suunnittelussa ja mitoituksessa. Esimerkkejä tästä ovat reaktoripainesäiliön säteilyhaurastuminen sekä terminen väsyminen virtausten sekoittumiskohdissa” (STUK 2014, 5). VVER-1200 materiaalivalinnat ja valmistustekniikka tulevat esiin niiden tarkastuksessa Ydinenergialain ja YVL-ohjeiden osalta.

## 1.1 Työn tavoitteet ja keskeisimmät kysymykset

Tämän työn tavoitteena on antaa yleiskuva ydinvoimalaitos AES-2006:n reaktorin painesäiliön materiaalivalinnoista ja niiden kriteereistä. Samalla käsitellään painesäiliön valmistustekniikka ja suomalaisen valvontaviranomaisen STUK ohjeita painesäiliön osalta. Työn tulee antaa lisätietoa Rosatomien valmistamien reaktoreiden materiaaleista ja valmistuksesta, joita voidaan käyttää VVER-reaktoreiden sertifiointitoiminnoissa mm. Suomessa.

Työn keskeisimpiä kysymyksiä ovat:

- Onko AES-2006 reaktorin valmistuksessa käytetty vaatimusten mukaisia materiaaleja ja tekniikoita?
- Mitkä ovat ko. valintojen ja tekniikoiden hyvät ja huonot puolet?
- Onko olemassa kehittyneempiä materiaaleja ja edistyneempää teknologiaa, joiden ansiosta YVL:n turvallisuutta parannetaan ja käyttöikää pidennetään?

STUKin YVL-ohje A.8/501:n mukaan ”laitososan valmistuksessa ja valmistuksen aikaisissa korjauksissa on käytettävä sellaisia valmistusmenetelmiä, jotka eivät myötävaikuta haitallisten ikääntymismekanismien kehittymiseen” (STUK 2014, 6). Vastaamalla ylempänä esitettyihin kysymyksiin pyritään ottamaan kantaa, onko VVER-1200 suunniteltu ja valmistettu STUKin vaatimusten mukaisesti.

## 1.2 Työn raja

Tavoitteena on keskittyä työssä materiaalivalintoihin sekä teräksen sulatusseosaineiden ja valmistamisessa käytettävän hitsauslisäaineiden vaikutukseen reaktorin painesäiliön ominaisuuksiin.

Reaktorin painesäiliöllä ja sen ominaisuuksilla on keskeinen rooli koko YVL:n käyttöiän määrittelyssä. Työssä ei oteta kantaa hilarakenteisiin ja hilamuutoksiin. Työ ei käsitä teräksen kiteitä, niiden ominaisuuksia eikä käyttäytymistä.

## **2 AES-2006 LAITOKSEN JA VVER-1200:N REAKTORIN HISTORIA**

Tässä kappaleessa käsitellään VVER-reaktoritekniikan historiaa, sekä ydinvoimalaitoksen AES-2006 kehitysvaiheita.

### **2.1 VVER reaktoreiden historia**

VVER (Водо-Водяной Энергетический Реактор) reaktorin kehitys on aloitettu ”Kurchatov Instituutissa” ja OKB ”Gidropress”-suunnittelutoimistossa vuonna 1955. Ensimmäinen ydinvoimalaitos VVER-210 reaktorilla otettiin käyttöön Novovoronezhin ydinvoimalaitoksella vuonna 1964 (Kosogorov 2010, 3). VVER-reaktoreiden tehon optimointitulokseen pohjautuu VVER-440-projekti, joka on toteutettu Novovoronezhissa vuonna 1971. VVER-440 on ensimmäinen venäläinen reaktorityyppi, joka valmistettiin sarjatuotantona. Kyseisen reaktorityypin suunnittelussa ja valmistuksessa on otettu huomioon yleiset kansainväliset turvallisuusvaatimukset. Tämän ansiosta vuonna 1974 Itä-Saksan Reinsbergissa ja Bulgarian Kozloduy otettiin käyttöön VVER-440 teknologiaan pohjautuvat ydinvoimalaitokset. Ensimmäiset VVER-440 laitokset olivat kuitenkin puutteelliset turvallisuuden suhteen, eikä niissä ollut esim. reaktorisydämen hätäjähdytysjärjestelmää. Neuvostoliiton ydinenergian turvallisuusohjeet (OPB-82) eivät kieltäneet radioaktiivisen materiaalin vapauttamista ympäristöön hätätilanteissa. (Assistant Secretary for Nuclear Energy 1989, 1-1). Siitä johtuen VVER-440 teknologialla toimivat reaktorit mukautettiin paikallisten normien mukaan, esim. Loviisan reaktorit ja niiden turvallisuusjärjestelmät on suunniteltu ja toteutettu mm. Yhdysvaltojen ydinenergiakomission vuonna 1971 julkaisemien ohjeiden mukaan (Rosatom Overseas 2014, 6). VVER:n V-213 projektiin on lisätty puuttuva reaktorisydämen hätäjähdytysjärjestelmä, sekä reaktorin suojarakennus. Laitostyyppi V-213:ssa on ensimmäistä kertaa toteutettu reaktorin painesäiliön sisäpuolinen pinnoitus ruostumattomalla teräksellä painesäiliön kemiallisen korroosion estämiseksi. Toisen sukupolven VVER-440 ovat pysyneet kriittisinä Armeniassa 7.12.1988 maanjäristyksen aikana, mikä todistaa kyseisen laitostyyppin seismisen vakauden.

Seuraavan VVER:n kehitystason VVER-1000 prototyyppi (laitostyyppi V187) otettiin käyttöön Novovoronezhissa vuonna 1980. Kolmannen sukupolven reaktoria VVER-1000 voidaan pitää



nykyisen VVER-1200 prototyypinä. Nykyiset VVER reaktorit ovat joko kolmannen sukupolven VVER-teknologian mukauttamista yksittäisten hankkeiden vaatimuksiin tai pyrkimys optimoida kyseisten hankkeiden kustannukset. (Vasilchenko 2011, 9) VVER-1000 on neljästä primääripiiristä koostuva kokonaisuus, jossa on pysytty VVER-440:lle ominaisessa reaktorisydämen korkeus/halkaisijasuhteessa. VVER-1000 erottuu edeltäjästään mm. polttoaineniippujen rakenteessa, koteloitujen polttoaineniippujen tilalle on otettu käyttöön avoimet polttoaineniiput. VVER-1000 pohjalta rakennetuissa ydinvoimalaitoksissa on yksivaippainen sisältä teräslevyillä vuorattu esijännitetystä teräsbetonista rakennettu suojarakennus.

## **2.2 AES-2006 projektin historia**

AES-2006 on ydinvoimalaitosprojekti, joka perustuu VVER-1200 reaktoritekniikkaan. Se on kehitetty vuonna 2006 Pietarissa Rosatom yhtiöön kuuluvassa SPb AEP suunnitteluyksikössä. AES-2006 pohjautuu AES-91 ja AES-92 laitoksiin, jotka on kehitetty VVER-1000 laitoksista 1990-luvuilla. Tällä hetkellä AES-2006 ydinvoimalaitokset rakennetaan Sosnovyj Borissa (Leningradskaja AES), ja Kaliningradissa (Baltijskaja AES). AES-2006 projektin tekniikkapäivityksen ja kustannusoptimoinnin ohella ko. mallissa on noudatettu Beyond Design Basis Accident (BDBA) turvallisuusperiaatteita. AES-2006 – laitoksen turvallisuustoiminnot on toteutettu yhdistämällä ja synkronoimalla aktiiviset sekä passiiviset turvallisuusjärjestelmät. Aktiivinen järjestelmä on ensisijainen ja täydentää hätäjähdytystilanteissa päälle kytkeytyvää passiivista järjestelmää. (STUK 2014. 106).

## **3 YDINVOIMALAITOS AES-2006:N REAKTROIPAINESÄILIÖN MATERIAALIVALINTA, VALMISTUSTEKNIikka SEKÄ ASENNUS**

Reaktoripainesäiliö on PWR kevytvesireaktoreilla varustetuissa laitoksissa tärkein painelaite. VVER-1200 reaktorin käyttöpaine on 16,2 MPa ja –lämpötila välillä 298,2 – 328,9<sup>0</sup>C (IAEA 2011, 18) jäähdytteenä ja moderaattorina toimii kevyt vesi. Reaktiivisuuden hallintaa varten veteen sekoitetaan boorihappoa. Käytön aikana jäähdytteesen erottuu muita aggressiivisia aineita, jota vaikuttavat negatiivisesti koko reaktoripainesäiliön käyttöikään. Tässä jaksossa käsitellään reaktorin painesäiliöteräkselle asetettuja vaatimuksia reaktorin suunnittelukäyttöajan varmistamiseksi.

### 3.1 Reaktorin materiaali

Rakennemateriaalit ovat useimmiten rajoittava tekijä teknisessä kehityksessä ja suurten laitteiden suunnittelussa. (Hoffelner 2013, 65). Tällä hetkellä painevesireaktorin painesäiliön materiaalivalinta on selkeintä sen suhteellisen alhaisten käyttölämpötilojen ansiosta. Painevesireaktorin korkeat painelukemat sen sijaan turvataan valitun materiaalin paksuudella. Tässä jaksossa käsitellään VVER-1200 reaktorimallin painesäiliön, rakenneteräksen hilarakenteen ja teräsmateriaalin kemiallista koostumusta. On todettu, että teräksen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa yhdistämällä sen kemiallinen koostumus lämpökäsittelyyn.

Reaktorin paineastian materiaalille sen kemiallisen koostumuksen osalta asetetaan seuraavat vaatimukset:

- Rakenneteräksen hyvä lujuus;
- Rakenneteräksen hyvä sitkeys
- Rakenneteräksen hyvä hitsattavuus
- Rakenneteräksen hyvä korroosionkestokyky
- Rakenneteräksen hyvä säteilyhaurastumisen kestävyys
- Rakenneteräksen huono aktivoitumiskyky

#### 3.1.1 Rakenneteräksen lujuus

Reaktorin teräksen hyvä lujuus varmistaa reaktorin painesäiliön sisäisen paineen kestävyyn, joka on VVER-1200 tyyppisessä reaktorissa 16,2 MPa (IAEA 2011, 12). Teräksen lujuutta kuvaa mekaanisiin ominaisuuksiin lukeutuva myötö- ja murtolujuus. Normaalisti länsimaisten ydinreaktoreiden painesäiliöiden valmistuksessa käytetään teräslaatuja, joiden myötölujuus  $R_{eH}$  on 465 – 564 MPa ja murtolujuus  $R_m$  611-688 MPa (Hoffelner 2013, 88). AREVA:n ja Westinghousen valmistamissa reaktoreissa käytetään useimmiten ASME 508 Class 3 teräslaatuja, jonka vastaa RCCM 16 MND 5 ja DIN 20 MnMoNi55 teräslaatu luokitusstandardista riippuen (Hänninen 2009, 6).

Teräksen lujuuteen voidaan vaikuttaa valitsemalla tarkoitukseen sopivia seosaineita, sillä hiili parantaa teräksen lujuusominaisuuksia ja lisäksi hiili on todettu austeniittia stabiloivaksi aineeksi (Nevalainen 1984, 23). Yleisten reaktorin painesäiliön valmistukseen käytettävien terästen kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 1.

Spec.	C	Si	Cr	Cu	S	V	Ti	Ca	Mn	Ni	Mo	Al	P	Nb	B
A508 Req.	≤0.25	≤0.40	≤0.25	≤0.20	<0.025	≤0.05	≤0.015	≤0.015	1.2-1.5	0.4-1.0	0.45-0.60	≥0.025	≤0.025	<0.01	≤0.003
A533B Req.	≤0.25	0.15-0.40	≤0.30	≤0.40	≤0.035	≤0.03	≤0.03	-	1.15-1.5	0.4-0.70	0.45-0.60	≥0.02	≤0.035	≤0.02	-
Actual	0.18	0.22	0.18	0.11	0.001	0.002	0.002	0.0001	1.43	0.62	0.51	0.025	0.006	0.001	0.0002

Taulukko 1: ASME A508 ja vastaavien teräslaatuojen kemiallinen koostumus

Lujuutta voidaan kasvattaa lämpökäsittelyllä, jolloin saavutetaan tarvittava hilamuoto. Lujuus kasvaa kuumassaa muokkauslujittamisessa, sitkeät niukkaseosteiset metallit kestävät 80-95% muokkauksen, jolloin teräksen lujuutta voidaan kasvattaa melkein kaksinkertaiseksi. (Valorinta 1983, ).

### 3.1.2 Rakenneteräksen sitkeys

Rakenneteräksen sitkeysominaisuudet ovat hyvin tärkeitä reaktorin painesäiliön käyttöiän määrittämisessä. Teräksen sitkeys muuttuu reaktorin käytön aikana, jolloin teräksen sitkeä repeämismekanismi muuttuu hauraaksi lämpötilan ja säteilyn vaikutuksesta. Rakenneteräksen sitkeysominaisuudet voidaan varmistaa painesäiliön valmistamisvaiheessa lämpökäsittelyllä ja oikeilla seosaineiden valinnoilla.

Nikkeli on tunnettu austeniitin stabilointiseosaine. Nikkelillä ja austeniittiteräksellä on pintakeskeinen hilarakenne, joten nikkeli austenisoi terästä erittäin vahvasti ja lisää siihen sitkeyttä, mutta vähentää lujuutta ja kovuutta (Leppola & Makkonen 2005, 33). Sitkeyttä parantaa myös Mangaani (Mn), Niobi (Nb) ja Vanadiini (V).

### 3.1.3 Rakenneteräksen hyvä hitsattavuus

Reaktorin painesäiliön perusaineen hitsattavuuteen vaikuttavat kemiallinen koostumus sekä hitsattavan teräksen metallurgiset ja fysikaaliset ominaisuudet. Hitsattavuus koostumuksen suhteen määritellään hiiliekvivalentin avulla, joka lasketaan alempana esitetyllä kaavalla (1) (Leppola & Makkonen 2005, 30).

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + (Ni + Cu)/15 \quad (1)$$

On muistettava, että seosaineet, joiden sulamislämpötila on raudan sulamislämpötilaa korkeampi huonontavat perusaineen hitsattavuutta. Hitsattavuutta pidetään hyvänä, kun hiiliekvivalentti CEV on alle 0,41.

Seostamattomien ja niukkaseosteisten rakenneteräksien hitsattavuus on hyvä, kun  $R_{eH}$  on alle 355 MPa perusaineen paksuuksilla 25 mm saakka. Kyseisten arvojen ylittyessä hitsattavuus varmistetaan erityistoimilla, kuten esi- ja jälkilämmityksellä kylmä- ja kuumahalkeamien syntymisen estämiseksi. Kun ydinreaktoreiden painesäiliöteräksen myötöraja on 465-564 MPa ja seinämänpaksuudet vaihtelevat 195 mm:sta 250 mm:iin, on esi- ja jälkilämmitys pakollinen.

Painevesireaktoreissa vaikeasti hitsattavien kuumakestävien teräslaatuojen käyttö ei ole tarpeellista jäähdytysveden alhaisen alle  $+320^{\circ}\text{C}$  käyttölämpötilan takia. (Hoffelner 2013, 89).

### 3.1.4 Rakenneteräksen korroosionkestokyky

Ydinreaktorin painesäiliön kemiallinen korroosionkestokyky varmistetaan sisäpuolisella pinnoituksella, joka on austeniittista kromiterästä. Austeniittinen teräs on yleisin teräslaji reaktoripiirin pinnoitteiden valmistuksessa. Austeniittiselle teräkselle on ominaista pintakeskeinen hilarakenne, hiilipitoisuus alle 2,06%. (Black et al 2008,). Puhdas austeniittinen rakenne syntyy lämpötilavälissä  $738^{\circ}\text{C} - 1147^{\circ}\text{C}$  ja se saadaan aikaiseksi kappaleen lämpökäsittelyssä. Seosaineilla on vaikutus teräksen austenisoitumiseen (Hoffelner 2013, 85). Kromi on voimakas korroosionestoseosaine, joka parantaa reaktorin korroosiokestävyyttä. Samalla kromi tunnetaan ferriittistabiloivana aineena, tämän takia austeniittisen kromiteräksen hitsaaminen on mahdollista ferrittisiin ja bainiittisiin teräslaatuuihin. Haittatekijänä on kromin aktivointiherkkyys säteilyssä sekä sen taipumus muodostaa karbideja, kuten  $\text{M}_7\text{C}_3$ . Karbidisulkeumat päätyvät teräksen raerajoihin ja heikentävät rakeenväliset sidosvoimia. Tuloksena on teräksen väsymys ja pinnoitteen korroosionesto-ominaisuuksien huononeminen. Kromin sijaan on syytä käyttää volframia ja molybdeenia, niiden korroosionesto-ominaisuudet ja passiivisuus säteilyssä ovat nykyisen paineastiamateriaalin kehitysosa-aiheena (Hoffelner 2013, 93).

Yleisimmin korroosioestotarkoitukseen käytetään ruostumatonta terästä AISI 308/309, jossa kromipitoisuus on rajoissa 20-26% ja nikkeliä 10-15% (Ma 1983, 308).

### 3.1.5 Rakenneteräksen hyvä säteilyhaurastumisen kestävyys

Reaktorin painesäiliön rakenneteräksen säteilyhaurastuminen on keskeisessä roolissa ydintekniikan kehityksessä, käytössä ja sen turvallisuudessa (Ma 1983, 80) Yleisimmin säteilyhaurastumiskyvyn luotettava arviointi perustuu kokeellisiin tuloksiin, vaikka luotettavia laskentakaavoja on kehitetty.

Ydinvoimalaitoksilla turvallisuuden kannalta merkittävien rakenneaineiden mekaanisten ominaisuuksien heikkenemiseen liittyvä ilmiö on reaktoripainesäiliön säteilyhaurastuminen (Isolankila et al 2004, 119). Ferriittisissä ja bainiittisissä teräksissä ja niiden alkuperäinen hyvä sitkeys käyttölämpötiloissa muuttuu huonompaan suuntaan, kun reaktorin painesäiliön rakenteet jäädytetään esim. onnettomuuden takia. Silloin halkeaman hauras muodostamismekanismi korvaa ns. sitkeän tiedetyssä lämpötilassa, tätä lämpötilaa kutsutaan transitiolämpötilaksi. Käytön aikana nopeat neutronit osuvat painesäiliön seiniin ja aiheuttavat rakenteessa hilavikoja, sekä heikkoja kohtia kiderajoilla, mikä aiheuttaa transitiolämpötilan nousua. Tällä tavalla tapahtuu transitiolämpötilan säteilysiirto. Säteilysiirtymä riippuu painesäiliön seinään osuvien neutronien energiasta, materiaalin koostumuksesta ja epäpuhtauksista, jotka altistuvat muodonmuutokselle kovempia materiaaleja nopeammin. Transitiolämpötilan säteilysiirtoa nopeuttavat myös teräksen seosaineet, kuten Ni, Cu. Epäpuhtauksista fosfori on aktiivisimpia säteilyhaurastumista edistäviä aineita.

### **3.1.6 Rakenneteräksen huono aktivoitumiskyky**

Rakenneteräksen seosaineet voivat aktivoitua neutronivuon vaikutuksesta. Reaktorin käytön ja eritoten huollon kannalta teräksen aktivoituminen on haitallinen prosessi, sillä säteilyannoksen määrät rajoittavat käyttö- ja huoltohenkilökunnan käyttöastetta. Suomessa yli 90 prosenttia ydinvoimalaitoksella työskentelevän henkilökunnan säteilyn kokonaisannoksesta kertyy polttoaineen vaihdon ja huoltotöiden vuoksi pidettävän vuosihuoltoseisokin aikana. Reaktori pysäytettynäkin on voimakas säteilylähde. Kyseisen säteilyn vaikutuksen minimointiin tarvitaan suoja, joka on verrannollinen 3 m paksuun vesivaippaan. Reaktorin painesäiliön rakenneteräksessä aktivoituneet aineet tulevat hyvin keskeisiksi koko ydinvoimalaitoksen purkuvaiheessa (Alm-Lytz 2004, 146).

Säteilysuojelun kannalta reaktorin painesäiliöterästen tärkeimmät aktivoitumisalkuaineet ovat Co-60, Mn-54, Cr-51 ja Fe-59. Reaktorin rakenneterästen aktivoitua voidaan vähentää kolmella eri tavalla: nopeiden neutronien hidastamisella, termisten neutronien kaappaamisella ja gamma-säteilyn intensiivisyyden vähentämisellä esim. veden avulla (Glasstone et al. 1981, 637).

## **3.2 VVER-1200 reaktorin painesäiliöteräs.**

STUKin alustavassa turvallisuusraportissa VVER-1200 reaktorin painesäiliön rakenneteräkseksi on ilmoitettu venäläisen teknisen määrittelyn TY-08 93-013-00212179-2003:n mukaan teräslaadut 15X2HMΦA, 15X2HMΦA – A ja 15X2HMΦA class 1. Kyseinen tekninen määrittely käsittelee mm.

ydinvoimalaitosten reaktorin esivalmisteita. (Juhanov 2009, 1). Tutkitussa lähdekirjallisuudessa ei ole löydetty ASME, DIN, EN tai muun normiston mukaista luokitusta VVER-reaktorin paineastiateräkselle.

### 3.2.1 VVER-1200 reaktorin painesäiliön rakenneteräksen lujuus

Teräslaadun 15X2HMΦA, 15X2HMΦA – A и 15X2HMΦA class 1:n kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 2:

Teräslaatu	Seosaineiden prosenttiosuus, %							Seosaineiden prosenttiosuus, ma %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Va	Cu	S	P	As	Co	Sn	Sb
15X2HMΦA	0,13- 0,18	0,17- 0,37	0,30- 0,60	1,8-2,3	1,0-1,5	0,5-0,7	0,10- 0,12	0,30	0,020	0,020	0,04	0,03	-	-
15X2HMΦA – A					1,0-1,5		0,10	0,012	0,010	0,01	0,005		0,005	
15X2HMΦA class 1					1,0-1,3		0,08							

Taulukko 2: Teräslaadun 15X2HMΦA, 15X2HMΦA – A ja 15X2HMΦA class 1:n kemiallinen koostumus

Kyseinen teräslaatu on kehitetty 1970-luvuilla VVER-reaktoreiden painesäiliöiden valmistusta varten. Teräksen mekaaniset ominaisuudet on saatu vastaamaan suunnittelupainetta, -lämpötilaa ja ympäristöä.

Ylempänä esitettyjen teräslaatuojen erittäin matala hiilipitoisuus vähentää paineestiamateriaalin lujuutta, mutta sen sijaan ko. teräksen hitsattavuus on erittäin hyvä. Hiilen liukoisuus austeniittiteräksissä on hyvä, mutta huono ferriittiteräksissä. Kromin matala pitoisuus on merkki tutkittavien teräslaatuojen kemiallisesta korroosioherkkyydestä, mutta se parantaa säteilypassiivisuutta ja hitsattavuutta. Nikkelin osuus on 1,0-1,5 laadusta riippuen. Nikkelin korkea pitoisuus parantaa lujuus- ja sitkeysominaisuuksia.

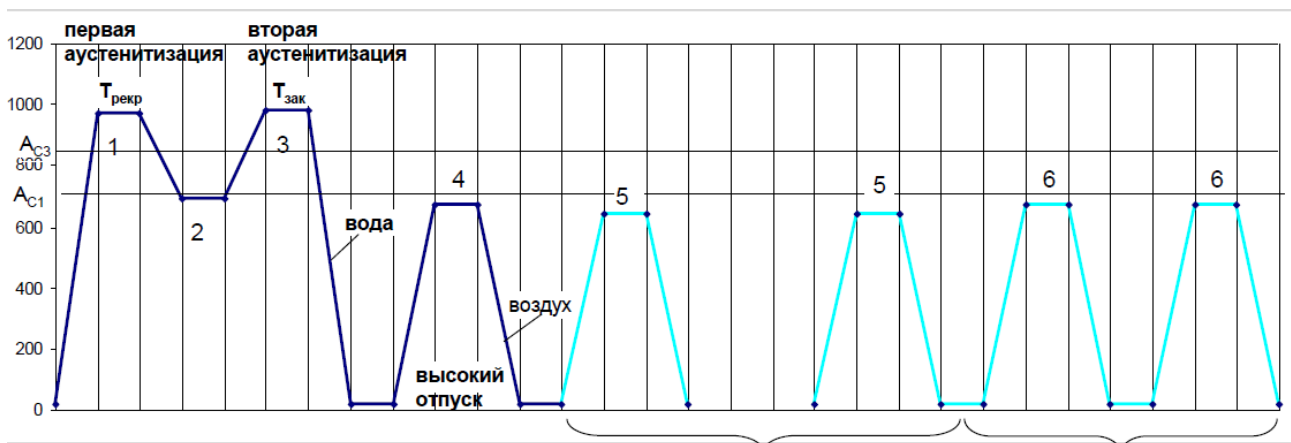
Koesulatuksen rakenneteräs on bainiittia, joka koostuu ferriittistä ja perliittistä. Bainiitissa yhdistyy lujuus ja sitkeys. Perliittiä pyritään välttämään, koska sen muodostusprosessissa syntyy FeC-lamelleja, jotka ovat hauraita ja kovia. Tämän takia austeniittialueelle kuumennettu teräs jäädytetään niin nopeasti, kun se teknisesti on mahdollista joko öljyssä tai vedessä. Karkaisun jälkeen teräs päästetään 400-600<sup>0</sup>C alueella useimmiten yli 20 tunnin aikana. Nopealla jäädytyksellä estetään hauraan ja kovan martensiitin syntyminen. Bainitisoinnin tuloksena saadaan 15X2HMΦA, 15X2HMΦA – A и 15X2HMΦA class 1 rakenneteräs, jonka mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.

Teräslaatu	20°C			350°C			iskutikeus -10 °C (J/cm <sup>2</sup> )	haurastumislämpötila (°C)
	myötölujuus (N/mm <sup>2</sup> )	murtolujuus (N/mm <sup>2</sup> )	venymä, %	myötölujuus (N/mm <sup>2</sup> )	murtolujuus (N/mm <sup>2</sup> )	venymä, %		
15X2HMΦA	460	610	15	440	540	14		-10
15X2HMΦA – A								
15X2HMΦA class 1								

Taulukko 3. 15X2HMΦA, 15X2HMΦA – A и 15X2HMΦA class 1 rakenneteräksen mekaaniset ominaisuudet.

AREVA:n ja Westinghousen käyttämään teräslaatuun ASME A508 class 3 verrattuna venäläisellä teräslaadulla 15X2HMΦA on pienemmät murto- ja myötölujuusarvot, mikä voidaan selittää pienemmällä hiilipitoisuudella (0,13-0,18% ja 0,25%). Matalampi hiilipitoisuus parantaa bainiittirakenteen homogeenisuutta.

VVER-1200 reaktorin painesäiliön rengasvalmisteet ja valmiiksi hitsattu reaktorin painesäiliö lämpökäsitellään seitsemän kertaa: esivalmisterenkaat karkaistaan austeniittisiksi (n. 1000°C) kaksi kertaa suuren materiaalipaksuuden takia, kuva 1.



Kuva 1: VVER-1200 reaktorin painesäiliön lämpökäsittely, jonka vaiheet ovat: 1 – austenisointi, 2 – jäähditys, 3 – austenisointi, 4 – päästäminen, 5 – lämpökäsittely enne hitsausta, 6 – lämpökäsittely hitsausken ja korjaushitsauksen jälkeen.

Renkaat päästetään bainiittivyöhykkeelle (n. 680°C) kerran ennen hitsausta ja kaksi kertaa renkaiden hitsauksen jälkeen. Viimeiset päästövaraukset tehdään tapauksissa, jolloin painesäiliö on korjauksen tarpeessa (Karzov 2014, 14).

### 3.2.2. VVER-1200 reaktorin painesäiliön teräksen koesulatus ja karkaisu sekä niiden tulokset

Reaktorin painesäiliön suunnittelutoimisto Girdopress on ottanut teräksen näytteet ja tutkinut ne erään VVER-1000 reaktorin paineastian valmistuksen yhteydessä (Juhanov & Shur 2009, 6). Koetulosten mukaan reaktorin paineastian teräksen kemiallinen koostumus on taulukko 4:n mukainen.:

sulatusnro	Kemiallinen koostumus, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S	P	
192325	0,16	0,33	0,39	1,96	1,25	0,52	0,1	0,05	0,005	0,005	
107454	0,17	0,26	0,45	1,74	1,35	0,57	0,1	0,12	0,013	0,01	
107631	0,18	0,26	0,45	1,89	1,33	0,56	0,1	0,13	0,014	0,012	
132005	0,16	0,35	0,47	1,97	1,14	0,62	0,1	0,022	0,006	0,003	
132009	0,14	0,3	0,41	1,98	1,16	0,63	0,1	0,025	0,006	0,0025	
127972	0,16	0,34	0,47	1,62	1,22	0,57	0,07	0,14	0,01	0,014	
101969	0,15	0,26	0,44	1,88	1,07	0,5	0,11	0,06	0,01	0,006	
210045	0,16	0,29	0,45	2,08	-	0,62	0,10	0,04	0,004	0,004	

Taulukko 4. Koesulatukset ja seosainekoostumus

Seosaineiden vertailun tuloksena voidaan tehdä seuraavat havainnot:

- Seosaineet ovat pääosin TU-teknisen määrittelyn mukaiset;
- Haitallisen kuparin pitoisuus vaihtelee ja sulatuksissa 107454, 107631 ja 127972 ylittää rajan.

Saman kokeen yhteydessä valmiit koekappaleet on lämpökäsitelty taulukko 5:n mukaan:

Teräslaatu	Karkaistus	Päästäminen
15X2HMΦA-A	Isoterminen helkutus,	650°C, 26 tuntia
	karkaistus 910°C, vesi	
15X2HMΦA	915°C, öljy; 900°C, vesi	650°C, 25 tuntia
15X2HMΦA	920°C, vesi	660°C, 11 tuntia
15X2HMΦA-A	920°C, vesi	635°C, 9 tuntia
		640°C, 9 tuntia
		650°C, 9 tuntia
15X2HMΦA-A	920°C, vesi	620°C, 25 tuntia; 650°C, 20 tuntia
15X2HMΦA	925°C, öljy; 900°C, vesi	625°C, 70 tuntia; 650°C, 30 tuntia
15X2HMΦA -A	920°C, vesi	620°C, 25 tuntia; 650°C, 20 tuntia
15X2HMΦA класс 1	900-920°C, ilma, 910-920°C, vesi	620°C, 25 tuntia; 650°C, 20 tuntia

Taulukko 5. Koekappaleiden lämpökäsittely



Koekappaleen lämpökäsittelylämpötila (910 – 925<sup>0</sup>C) on nostettu austeniittiselle vyöhykkeelle ja karkaistu öljyssä, vedessä ja ilmassa. Mikäli koekappaleet ovat pienikokoisia, kaksivaiheista austenointia ei tarvittu. Koekappale on lämpökäsitelty 620-650<sup>0</sup>C lämpötilassa 9-26 tunnin ajan. Tällä käsittelyllä pyritään mahdollisimman homogeeniseen mikrorakenteeseen.

Ylempänä kuvattu sulatus- ja lämpökäsittelykoe näyttää, että VVER-1200 reaktorin painesäiliöteräksen seosaineiden valinta on toteutettu teknisten vaatimusten mukaisesti. Yksityiskohtana on kuparipitoisuus yli sallittua rajaa. Tämä voi johtua mm. perusraudan epäpuhtauksista, mihin on syytä kiinnittää huomioita perusraudan valinnassa. Paineastiateräksen lämpökäsittelyllä varmistetaan bainiittirakenne, joka on tavoitteena VVER-1200 reatorille.

### 3.2.3. VVER-1200 reaktorin painesäiliön rakenneteräksen hitsattavuus.

VVER-1200 reaktorin painesäiliön seinämien paksuus on jopa 250 mm. Tällöin teräksen hitsattavuus ja lämmöntuonnin hallinta on tärkeä seikka virheettömän ja kestäväen sauman turvaamiseksi. VVER-1200:n painesäiliöteräksen hiiliekvivalentti seosaineiden maksimipitoisuuksilla laskettuna on

$$CEV = 0,18 + \frac{0,60}{6} + \frac{2,3 + 0,7 + 0,12}{5} + \frac{1,5 + 0,3}{15} = 1,024$$

Tutkittavan teräslaadun korkea kromipitoisuus tekee teräksen vaikeasti hitsattavaksi. Isoilla seinämävahvuuksilla hitsattava kappale on esi- ja jälkilämmitettävä. Hitsausmenetelmä on valittava sellaiseksi, jolla perus- ja lisäaineen sulattamiseksi vaadittava lämmöntuonti on optimoitu perusaineen ylikuumentumisen ehkäisemiseksi.

VVER-1200 reaktorin painesäiliön esivalmisterenkaiden hitsauksessa käytetään hitsauslankaa СВ-09ХГНМТА-ВІ teknisten vaatimusten TU-14-1-3675-2001 mukaan (Gorynin et al 2006, 3). Hitsauslangan kemiallinen koostumus on määritelty teknisten vaatimusten TU-14-1-3675-2001 mukaan taulukossa 6:

Hitsauslanka	Kemiallinen koostumus, %															
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Va	N	Cu	Co	As	Sn	Al
СВ-09ХГНМТА-ВІ	0,07-0,11	0,80-1,05	0,17-0,30	0,006	0,006	1,60-1,90	1,00-1,30	0,50-0,70	0,05-0,11	0,03	0,015	0,06	0,02	0,01	0,001	0,05

Taulukko 6: Hitsauslanka СВ-09ХГНМТА-ВІ:n kemiallinen koostumus

Kyseisen hitsauslangan käyttötarkoitukseen nähden vähäinen nikkelpitoisuus parantaa hitsialueen säteilyhaurastumisarvoja. Ennen vuotta 1995 käytössä olleissa hitsauslangoissa nikkelpitoisuudet olivat olleet 1,5-1,8%. Epäpuhtauksien (S, P, Sb, Sn, As, Cu) osalta vaatimuksia on kiristetty (FGUP TSNII KM Prometey 2009, 2). Kyseiset epäpuhtaudet pyrkivät neutronivuon vaikutuksesta teräksen raerajoihin ja täten heikentävät rakeiden välisiä sidosvoimia.

### 3.2.4. VVER-1200 reaktorin painesäiliön korroosionkestokyky

Teräslaatuja 15X2HMΦA, 15X2HMΦA – A ja 15X2HMΦA class 1 kromipitoisuus on sama 1,8-2,3%, kyseinen kromimäärä ei voi estää reaktorin painesäiliön kemiallista korroosiota. Useimmat painevesireaktorit ovat varustettu ruostumattomasta teräksestä valmistetulla sisäpuolisella pinnoitteella (Hoffelner 2013, 97).

VVER-1200 sisäpinnat on pinnoitettu kahdella ruostumattomalla teräskerroksella. Pohjakerrokseen on käytetty pinnoitetta CB-07X25H13 ja sen ensisijainen toiminto on turvata siirtoraja niukkaseostetun bainiittiteräksen ja austeniittisen ruostumattoman teräksen välille. Kemiallinen koostumus on taulukossa 7 (GOST 2246-70):

Hitsauspinnoite	Kemiallinen koostumus, %						
	C	Si	Cr	Ni	Mn	P	S
CB-07X25H13	≤ 0,09	0,50-1,00	23,00-26,00	12,00-14,00	1,00-2,00	<0,025	<0.018

Taulukko 7: Austeniittipinnoitteen CB-07X25H13 kemiallinen koostumus

Pinnoitemateriaalin pohjakerrosteräkselle on ominaista hyvin korkeat kromi- ja nikkelpitoisuudet, jotka ovat yhteenlaskettuna 40% teräksen aineista. Pintakerros on terästä CB-08X19H10Г2Б. Kemiallinen koostumus on taulukossa 8 (GOST 2246-70):

Hitsauspinnoite	Kemiallinen koostumus, %															
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	Cu	Al	V	W	Nb	N	As
CB-08X19H10Г2Б	0.05-10	0.2-0.45	1.8-2.2	18.5-20.5	9.5-10.5	<0.25	<0.2	<0.020	<0.030	<0.25	ei vaat	ei vaat	ei vaat	0.9-1.3	<0.05	-

Taulukko 8: Austeniittipinnoite CB-08X19H10Г2Б:n kemiallinen koostumus

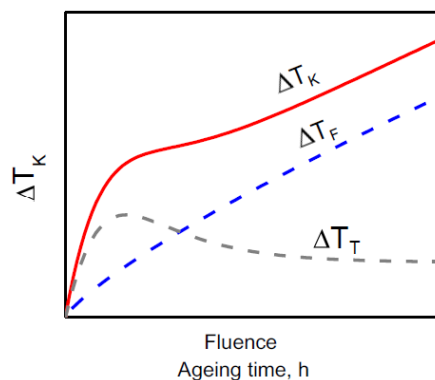
Pinnoitemateriaalin pintakerrosteräkselle on ominaista matalammat kromi- ja nikkelpitoisuudet, jotka ovat yhteenlaskettuna 31% teräksen aineista. Pintakerroksessa on monipuolisempi

seosainekokonaisuus, mm. koostumukseen kuuluu niobium 1,3%. Niobium voimakkaasti lujittaa pehmeätä ruostumatonta terästä ja parantaa sen hitsattavuutta.

### 3.2.5. VVER-1200 reaktorin painesäiliön rakenneteräksen säteilyhaurastumisen kestävyys

Tällä hetkellä ydinreaktorin painesäiliön säteilyhaurastuminen on keskeinen tekijä, jolla on suora vaikutus ydinvoimalaitoksen suunnitteluikään. (Karzov et al 2014, 2). Aiemmissa VVER reaktortyypeissä riittävä myötöraja turvattiin kromilla ja molybdeenilla. VVER reaktoreiden tehon kasvun yhteydessä rakenneteräkselle asetettiin korkeammat lujuusvaatimukset, mitkä toteutettiin nikkeli- ja mangaanin korottamisella. Käytön aikana 250-300<sup>0</sup>C lämpötilassa nikkeli nopeuttaa säteilyhaurastumista (Kozlov 2012, 1062). Myös mangaani ja pii ovat säteilyhaurastumisen myötävaikuttaja-aineita.

VVER-1200 reaktoreissa käytettävän teräksen 15X2HMΦAA säteilyhaurastumisominaisuuksien kokeellisia arvoja ei ole saatu riittävää määrää. Säteilyhaurastumisprosessi ei etene lineaarisesti, vaan reaktorin käytön alussa rakenneteräs haurastuu nopeamman kaavan mukaan, sitten haurastuminen siirtyy suhteelliseen lineaariseen haurastumisprosessiin (Kozlov 2012, 1064). Kyseisen teräslaadun säteilyhaurastumiskokeiden tuloksena on havaittu, että alkuvaiheen nopeampi haurastuminen voi olla sekä positiivinen että negatiivinenkin. Haurastuminen joko etenee tai pysyy muuttamatta, kuten kuvassa 2 on esitetty. Hetkellisesti se voi jopa laskea.



Kuva 2: Kriittisen säteilyhaurastumislämpötilan muutos ajan suhteen, jossa  $\Delta T_K$  on transitiolämpötilamuutos,  $\Delta T_F$  on kylmäaurastumisen lämpötilamuutos ja  $\Delta T_T$  on lämpöaurastumisen lämpötilamuutos.

Laskennallisesti reaktorin käyttöönottovaiheessa rakenneteräksen 15X2HMΦAA haurastumislämpötila on -10<sup>0</sup>C TU 08 93-013-00212179-2003:n mukaan.

VVER-1000 ja VVER-1200 reaktorin painesäiliön alkuaineiden aktivoituminen etenee perus-, seos- ja epäpuhtausaineiden ytimien n-p konversion, kaappauksen ja sironnan kautta.

Rakenneteräsaineiden aktivoitumisena pidetään aineen muuttamista radioaktiiviseksi neutronien energiaspektrissä  $10^9$  - 17,33 MeV. Yleisimmät aktivoitumisreaktiot ja –energiat ovat esitetty taulukossa 9.

Изотоп/Реакция	МАТ	Энергия порога, МэВ
$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$	825	10,245
$^{17}\text{O}(n,p)^{17}\text{N}$	828	8,3658
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	2212	1,6197
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	2232	3,2756
$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$	2425	
$^{52}\text{Cr}(n,2n)^{51}\text{Cr}$	2431	12,273
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$		0,087
$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	2637	
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60m+g}\text{Co}$	2725	
$^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$	2725	10,632
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	2825	0,4078
$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	2825	12,431
$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	2821	2,0758
$^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$	2911	$10^{-11}$
$^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$	4112	0,0307
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$	4112	9,0523
$^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$	4243	

Taulukko 9: Rakenneteräksen aineiden aktivoitumisreaktiot ja –energiat.

Rakenneteräksen seosaineista helpoiten aktivoituvat titaani, nikkeli niobium. Erittäin pienestä energiasta aktivoituu epäpuhtautena pidettävä kupari (Zolotarev 2004, 12).

### 3.2.6. Käytettävän teräksen kehityssuunnat

VVER-1200 reaktoripainesäiliön valmistuksessa käytettävien terästen 15X2HMΦA, 15X2HMΦA – A и 15X2HMΦA class 1 jatkokehitysluokaksi voidaan mainita teräslaatu 15X2MΦA mod. A ja B. Kyseinen teräslaatu on samaan luokkaan kuuluva teräslaji, jossa seosaineita on käytetty muutetulla konsentraatiolla. Aiemmin tutkittuihin teräksiin verrattuna 15X2MΦA:n nikkeliipitoisuutta on

laskettu 1,0..1,3%:sta lukuarvoon 0,2...0,4 ja 0,6..0,8%. Sen ansiosta bainittimatriisi on lujempi, ja säteilyhaurastuminen on hitaampi.(Karzov et al 2014, 3). Kuparin ja fosforin pitoisuudet on vastaavasti minimoitu lukuarvoihin 0,007% ja 0,07%. Näiden muutosten ansiosta bainiittikarkaisu on tehokkaampi kappaleilla, joiden seinämän vahvuus on max. 660 mm. Tasainen karkaisu parantaa bainittimatriisia entisestään. Kyseisten parannusten ansiosta kriittinen haurastumislämpötila on muuttunut siten, että reaktorin paineastian ns. haurasrepeämä on käytännössä mahdoton. Tämän ansiosta reaktorin paineastian laskennallinen käyttöikä nousee 100 vuoteen.

### 3.3. VVER-1200 reaktorin valmistustekniikka

Tässä jaksossa käsitellään reaktorin painesäiliön valmistusmenetelmiä. Pääpaino on valettujen, koneistettujen renkaiden hitsauksessa, sen olosuhteissa ja lisäaineissa. Hitsaustekniset parametrit, kuten hitsausvirrat, asennot, hitsaustapahtuman kuljetusnopeudet ja sen vaikutuspiiriin kuuluva teräksen mikrorakenne jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Hitsausseamaa pidetään kokoonpantavien kappaleiden heikoimpana kohtana, hitsauslisäaineen oikea valinta sen koostumuksen suhteen on tärkeä reaktoripiiriin homogeenisen rakenteen turvaamiseksi.

#### 3.3.1. Sulatus, valu ja muovaus

Teknisten vaatimusten TU 089 93-013-00212179-2003 mukaan teräksen sulatus ja seostaminen suoritetaan sähkökaari- tai marteniunissa. Yli 130 t painaville esivalmisteille on sallittu useamman sulatuserän yhdistäminen. Ennen varsinaista valua sulateräs raffinoidaan sulatusuunin ulkopuolella erillisessä vakuunitilassa. Raffinointivaiheessa sulateräksestä poistetaan epäpuhtaudet ja kaasukuplat, homogeenisoidaan sulametalli sekä lisätään seosaineet.

(a)



(b)



Kuva 3: VVER reaktorin esivalmistusteräksen sulatus (a) ja esivalmisteiden muovaus (b)

Reaktorin esivalmisterenkaiden tuotantokapasiteetti on OMZ Izhorskije Zavody tehtaalla Kolpinossa, Atommash tehtailla Kramatorskissa ja Skodan tehtailla Tšekissä. OMZ Izhorskije Zavody tehtaalla on tarkoituksenmukaiset sulatusuunit ja muovailuprässit, joilla voidaan tuottaa reaktoreiden esivalmistusrenkaat 5000 mm pituuksiin asti. VVER-1200 reaktorit Leningradskaja-2 ydinvoimalaitosta varten on valmistettu Kolpinossa.

### 3.3.1. Koneistus

Renkaiden koneistaminen suoritetaan karusellisorvilla. Koneistustoleranssit ovat määritelty tilaajan toimesta.

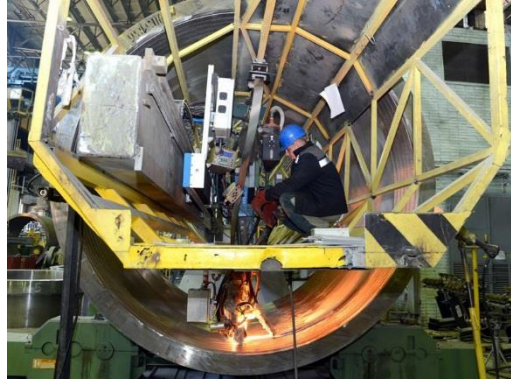


Kuva 4: VVER reaktorin esivalmistusrenkaan koneistus

Koneistuksen jälkeen esivalmistusrenkaat tarkemmitataan, sekä niille suoritetaan ensimmäinen ainetta rikkomaton tarkastus ultraäänellä. Tekniset vaatimukset TU 089 93-013-00212179-2003 sallivat esivalmisteiden korjaushitsauksen, mikäli korjattavan kohdan syvyys on maksimissaan 30 mm esivalmisteen puhtaasta pinnasta.

### 3.3.2. Sisäpinnan pinnoittaminen ruostumattomalla teräksellä.

Korroosionestopinnoitus suoritetaan jauhekaarinauhahitsauksella 122 (ISO 4063) 7-9 mm paksuna kerroksena kuvassa 4 esitetyllä tavalla jalkohitsiasennossa pyörivällä esivalmisterenkaalla. Korroosionestopinta koneistetaan lopullisesti vaadittavaan karheuteen ZiO Podolskissa, missä asennetaan reaktorin sisäosat.



Kuva 5: VVER reaktorin koneistetun esivalmistusrenkaan sisäpuolinen pinnoitus

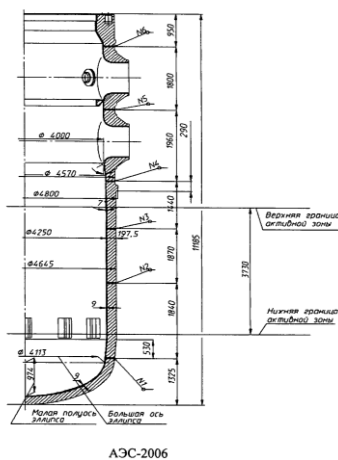
Pinnoiteteräs on hyvin kromi- ja nikkeli-pitoinen, kyseiset aineet turvaavat hyvät korroosionestominaisuudet, mutta aktivoituvat helposti.

### 3.3.3. Hitsaus

VVER-1200 reaktorin painesäiliörenkaat hitsataan yhteen kuudella hitsaussaumalla, kuten kuvassa 5 on esitetty. Hitsausmenetelmä on jauhekaarihitsausmenetelmä 121 (ISO 4063). Hitsaustapahtuma on kaksipuolinen epäsymmetrisellä X-railolla. Hitsaussaumot 2 ja 3 sijoittuvat reaktorin sydämen kohdalle, tämän takia kyseisiin hitseihin kiinnitetään erityistä huomiota. Hitsauksen aikana välipalot tarkastetaan tilaajan ohjeen mukaan ultraäänellä ja radiograafisesti. Perusaineen paksuuden takia hitsauspalkojen välisiä lämpötilavaatimuksia noudatetaan, ja lisäksi alku- ja loppulämmitys suoritetaan tilaajan ohjeiden mukaan. (Gorynin 2006, 19)

(a)

(b)



Kuva 6: VVER-1200 reaktorin esivalmisteiden hitsaussaumot (a) ja jälkilämmitys (b)

VVER-1200 reaktorin painesäiliön esivalmisterenkaiden hitsaus on tärkeä tutkimuskohde. Hitsausaumoissa säteilyhaurastumislämpötila eroaa joissakin tapauksissa hyvin paljon painesäiliön perusaineesta ja saumoissa 2 ja 3 säteilyhaurastumislämpötila saavuttaa kriittisen arvon suunniteltua aiemmin. Tämä voi johtaa joko polttoaine-elementtien uudelleenjärjestelyihin, painesäiliön lämpökäsittelytoimenpiteisiin tai huonoimmassa tapauksessa koko ydinvoimalaitoksen käyttöään alentamiseen. (Isolankila 2004, 120).

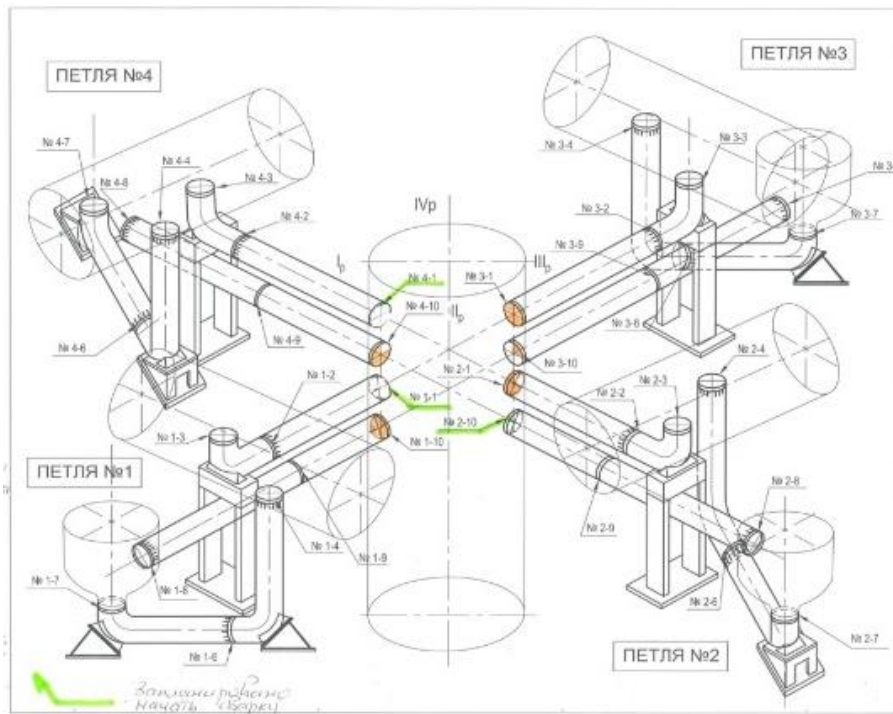
### 3.3.4. VVER-1200 reaktorin painesäiliön asennus ja hitsaus

Reaktorin painesäiliö nostetaan ydinsaarekkeen turvarakennukseen rakentamisen loppuvaiheessa yläkautta, kuten kuvassa 6a on esitetty. Paineastian noston jälkeen turvarakennukseen nostetaan kupoli. Reaktoripainesäiliö lasketaan väliaikaisesti telineelle, paineastian lopullinen asennus suoritetaan turvarakennuksen sisäisellä kehänosturilla. Reaktori asennetaan tukirenkaan päälle, joka on korolla +21,800 reaktorirakennuksen peruslaatan alapisteestä laskettuna.



Kuva 7: VVER-1200 reaktorin painesäiliön nosto





Kuva 8: VVER-1200 reaktorin painesäiliön asennushitsausjärjestys.

Reaktoripainesäiliön liittäminen pääkiertoputkistoon suoritetaan kahdeksalla hitsausaumalla, hitsausmenetelmänä puikkokäsihitsaus. Pääkiertoputkisto asennetaan laitustoimittajan määrittelyn mukaan 255 päivää, reaktorihitsit hitsataan kuvassa 8 ja taulukossa 10 esitetystä järjestyksestä.

Тyövaihe	kiertopiiri 1	kiertopiiri 2	kiertopiiri 3	kiertopiiri 4
1	1-10		3-1	
2		2-1		4-10
3	1-1		3-10	
4		2-10		4-1
5	1-3	2-3	3-3	4-3
6	1-8	2-8	3-8	4-8
7	1-7	2-7	3-7	4-7
8	1-4	2-4	3-4	4-4
9	1-6	2-6	3-6	4-6

Taulukko 10: Reaktorin hitsaus pääkiertoputkistoon, hitsausjärjestys.

Reaktorin ja pääkiertoputkiston väliset hitsausaumamat eivät altistu säteilylle, mutta niiden toteutuksessa kiinnitetään silti erityistä huomiota hitsausvirheisiin. Hitsien korroosionesto-

ominaisuudet varmistetaan sisäpuolisella pinnoittamisella, kuten kappaleessa 3.3.2. on esitetty. Lujuus- ja sitkeysominaisuudet varmistetaan lämpökäsittelyllä, jolla hitsille saadaan bainiittirakenne.

#### **4 VIRANOMAISTARKASTUKSET**

Reaktorin painesäiliö luokitellaan ydinvoimalaitoksen ohje YVL E3:n mukaan ydintekniseksi painelaitteeksi, luokitteluasiakirjan mukaan se kuuluu korkeimpaan turvallisuusluokkaan TL1. Ydinenergialaki (11.12.1987/990) kappaleessa 60 a § määrittelee valvontaviranomaisten perustoiminnot, jotka tarkennetaan Ydinenergia-asetuksessa (12.2.1988 / 161) ja yksilöidään STUKin YVL ohjeissa.

Ydinenergia-asetuksen kappale 117 § määrittelee, että Säteilyturvakeskuksen tehtävänä on painelaitteiden osalta erityisesti:

- 1) asettaa ydinteknisten painelaitteiden turvallisuutta koskevat yksityiskohtaiset vaatimukset;
- 2) valvoa ja tarkastaa, että ydinteknisten painelaitteiden suunnittelu, valmistus, sijoitus, asennus, käyttö, kunnossapito ja korjaus täyttävät turvallisuutta koskevat vaatimukset ja määräykset;
- 3) asettaa ydinteknisten painelaitteiden valmistusta ja siihen liittyvää laadunvarmistusta koskevat tarkemmat vaatimukset.

STUK nimeää tarkastuslaitoksen, joka vastaa reaktorin painesäiliön valmistamisesta, mihin kuuluu painesäiliön asennus. Tarkastus- ja testauslaitoksen hyväksymisen edellytyksenä on, että tarkastus- ja testauslaitos on toiminnallisesti ja taloudellisesti riippumaton ja että sillä on vastuuvakuutus.

Reaktorin painesäiliön valmistus tapahtuu STUKin hyväksymän valmistuksen valvojan tarkastuksen alla. Valmistuksen valvojan tehtäviin kuuluu mm:

- Varmistaa valmistusmenetelmien asianmukaisuutta, pätevyyttä ja ohjeistettavuutta;
- Noudattaa rakenneaineiden merkitsemisestä annettuja ohjeita;
- Valvoa lämpökäsittelyn ja kuumamuokkauksen lämpötilaparametreja.

#### **5 JOHTOPÄÄTÖKSET**

Tässä kappaleessa käsitellään työn aikana esille nousseita johtopäätöksiä niin VVER-1200 reaktoripaineastian materiaalivalinnasta kuin itse paineastian valmistusprosessista mukaan lukien asennus. Yhtenä työn tavoitteena oli tutkia VVER-1200 reaktorin valmistuksessa käytettävän

teräksen seosaineita, niiden vaikutusta reaktorin käyttöominaisuuksiin ja koko ydinvoimalaitoksen käyttöikään.

Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että asetettaviin vaatimuksiin nähden monet seosaineet parantavat joitakin ominaisuuksia ja samalla vaikuttavat negatiivisesti toisiin ominaisuuksiin. Tässä kandidaatintyössä jätettiin käsittelemättä rakenneteräksen sellaiset ominaisuudet, kuten esimerkiksi terminen haurastuminen ja teräksen väsyminen paineessa.

Lujuutta parantava hiili vaikuttaa heikentävästi esivalmisterenkaiden hitsattavuuteen. Korroosionestokykyä ja lujuutta parantavat nikkeli ja kromi aktivoituvat helposti, ja lisäksi kyseiset seosaineet myötävaikuttavat teräksen säteilyhaurastumiseen. Kromin korkean sulatuslämpötilan takia bainiittikarkaisu on työläämpi. Työn aikana läpi käydyn materiaalin perusteella voidaan todeta, että kaikista ominaisuuksista säteilyhaurastuminen on nousemassa tärkeimpään asemaan. Muut tutkitut ominaisuudet voidaan varmistaa olemassa olevien tekniikoiden avulla. Säteilyä kestävä rakenneteräksen kehittämistä vaikeuttavat kehitystyön tulosten arviointiperusteet: laskennallista arviointia ei pidetä yhtä luotettavana kokeellisiin tuloksiin verrattuna. Kehitystyön tuloksista huolimatta jo tässä vaiheessa nikkelin rooli painesäiliön rakenneteräksen seosaineena on todettu haitalliseksi.

Tutkittavan teräksen koesulatus on osoittanut sen, että tehdasolosuhteissa voidaan ylittää seosaineiden maksimipitoisuudet. Helposti aktivoituvan ja säteilyhaurastumiseen myötävaikuttavan kuparin joutumista perus-, seos ja hitsauslisäaineisiin on syytä tarkkailla.

Yleisenä johtopäätöksenä voidaan sanoa, että reaktorin painesäiliön rakenneterästen seostaminen vaatii jatkuvaa kehitystyötä, jossa seosaineiden kielteiset ja myönteiset vaikutukset voidaan lopullisesti määritellä ominaisuuskokonaisuuden kannalta.

## **6 YHTEENVETO**

Venäjällä on toimittu ydinenergia-alalla 1950-luvulta lähtien. Rakenneteräksiä on kehitetty ydinteknisten sovellusten näkökulmasta jatkuvasti. Amerikkalaisiin ja ranskalaisiin reaktoriteräksiin verrattuna venäläisen toimittajan valitsema seosaineiden tasapaino on hieman erilainen. Tämä ei vähennä VVER reaktoreiden yleistä käytettävyyttä, vaan palvelee jotakin ominaisuutta kuten parempaa säteilyhaurastumista. Sen sijaan painesäiliön valmistustekniikka on hyvin vertailukelpoinen Arevan ja Westinghousen kanssa.

Työssä käydyn materiaalin perusteella voidaan todeta, että Fennovoima Oy:n laitostoimittaja Rosatomilla on tieteelliset, kokeelliset ja tuotannolliset valmiudet suunnitella, valmistaa ja asentaa luotettavaksi osoittautuneen VVER-teknologian pohjalta kehitetty VVER-1200 reaktori. Rosatomin valmiudet täyttävät Ydinenergiain vaatimukset parhaan käytettävissä olevien teknologioiden käytöstä. Parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi suomalaisilta valvontaviranomisilta vaaditaan asianmukaista tarkastustoimintaa reaktorin painesäiliön suunnittelussa, valmistuksessa ja asennuksessa, eritoten painesäiliön valmistajan arviointi- ja hyväksyttämisvaiheissa.

## LÄHDEKIRJALLISUUS

Ahosniemi, Arno. 2004. Jotta Suomessa voitaisiin huoletta kulkea. Vantaa: STUK. Sähköinen asiakirja. Saatavilla: <http://www.stuk.fi/julkaisut/tr/stuk-yto-tr201.pdf>

Bezlepkin, Vladimir. 2010. Modeling processes in the melt localization facility for AES-2006 with VVER-1200 during an unanticipated accident. [Viitattu 12.12.2014]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10512-010-9308-x>

Black, J.T. & Kosher, Roland A., 2008 DeGramos Materials and processes in Manufacturing, Tenth Edition. Hoboken, New York: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-92467-9.

Foster, Arthur & Wright, Robert. 1983. Basic Nuclear Engineering, Fourth Edition. Boston: Allyn and Bacon, Inc. ISBN 0-205-07886-9

Glasstone, Samuel & Sesonke Alexander. 1981. Nuclear reactor Engineering. New York: Van Nostrand Reinhold Company. ISBN 0-442-20057-9

Gorynin I., Karzov G., Timofeev B., Galiatkin S., "Automatic Welding", 2006 nro 3. International Welding Assosiation, Kiev. [Viitattu 22.12.2014]. Sähköinen aikakausilehti. Saatavissa: <http://www1.nas.gov.ua/pwj/r06no03.html>

Hoffelner, Wolfgang. 2013. Materials for Nuclear Plants. London: Springer-Verlag London Limited. [Viitattu 25.03.2015]. Sähköinen kirja. ISBN 978-1-4471-2914-1. Saatavissa: <http://www.springer.com/gp/book/9781447129141>

Hänninen, Hannu, 2009. "Materials development in New Reactor Designs – Gen III and SCWR Concepts" 2009. Espoo 20<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT). [Viitattu 01.04.2015]. Sähköinen esitelmä. Saatavissa: [http://www2.vtt.fi/proj/smirt20/presentations/4technical\\_plenary/hanninen\\_smirt20.pdf](http://www2.vtt.fi/proj/smirt20/presentations/4technical_plenary/hanninen_smirt20.pdf)

IAEA, 2011. Status report 108-VVER-1200 (V-491) (VVER-1200 (V-491)), Viena: IAEA. [Viitattu 10.11.2014]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200%28V-491%29.pdf>

Isolankila, Arto, Järvinen, Marja-Leena, Keskinen, Rauli, Niemelä, Ilkka, Ojanen, Matti, Rantala, Rainer, Sandberg, Jorma, Tiippana, Petteri, Valtonen, Keijo, Virolainen, Reino, Åstrand, Kaisa, 2004. Ydinturvallisuuden varmistaminen. Helsinki, STUK. [Viitattu 02.02.2015]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa:

[http://www.stuk.fi/julkaisut\\_maaraykset/kirjasarja/fi\\_FI/kirjasarja5/files/12222632510021140/default/kirjasarjaV\\_ydinturvallisuus\\_3.pdf](http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja5/files/12222632510021140/default/kirjasarjaV_ydinturvallisuus_3.pdf)

Kolchinsky, Dmitry. 2013. Fulfillment of User requirements UR 1.4 – release into containment in AES-2006 design. INPRO Forum, Viena 19-22.11.2013. SPb Atomenergoproekt, IAEA. [Viitattu 12.12.2014]. Sähköine asiakirja, esitelmä. Saatavissa:

[http://www.iaea.org/INPRO/7th\\_Dialogue\\_Forum/Rosatom\\_5-Kolchinsky\\_D.pdf](http://www.iaea.org/INPRO/7th_Dialogue_Forum/Rosatom_5-Kolchinsky_D.pdf)

Kosogorov, V. 2010. Design and Construction of Advanced Water Cooled Reactors. Evolution of VVER Technology Towards NPP-2006 projects. Moscow: Concern Rosenergoatom. [viitattu 05.11.2014]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1500\\_CD\\_Web/htm/pdf/topic3/3S06\\_V.%20Kosogorov.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1500_CD_Web/htm/pdf/topic3/3S06_V.%20Kosogorov.pdf)

Laaksonen, Jukka. 2014 ”Integroinnin suunnat”, Rosenergoatom 8/2014. Moscow: Rosenergoatom. Artikkele. [Viitattu 03.02.2015]. Sähköinen aikakauslehti. Saatavissa:

[http://www.rosenergoatom.info/images/PDF/2014/web\\_REA\\_08\\_2014.pdf](http://www.rosenergoatom.info/images/PDF/2014/web_REA_08_2014.pdf)

Lepola, Pertti & Makkonen, Matti 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY. ISSN 951-0-2758-6

Ma, Benjamin. 1983 ”Nuclear Reactor Materials and Applications”, New York: Van Nostrand Reinhold Company. ISBN: 0-442-22559-8.

Murray, Raymond. 1988. Nuclear Energy, Third Edition. Exeter: A. Whaton & Co. ISBN 978-0-7506-7136-1

Nevalainen Harri. 1984. Teräsopas. Helsinki, Teknillinen tarkastuskeskus. [Viitattu 09.03.2015]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa: <http://www.elisanet.fi/harri.nevalainen/tietoisk/terasopas.htm>

Rosatom Overseas. 2014. VVER tänään. Kehitys, suunnittelu, turvallisuus. Moskova, Rosatom

SPb AEP, 2011. Design AES-2006. Concept Solution by the example of Leningrad NPP-2. Saint Petersburg: AEP. Esite.

STUK. 2014. Ohje YVL A.8, Ydinlaitoksen ikääntymisen hallinta. Helsinki: STUK [viitattu 10.03.2015] Verkkodokumentti. Saatavissa: [http://www.finlex.fi/data/normit/41424-YVL\\_A.8.pdf](http://www.finlex.fi/data/normit/41424-YVL_A.8.pdf)

STUK, 2014. Alustava turvallisuusarviointi, diaarinro 4/J42211/2014. Helsinki: STUK. [Viitattu 22.11.2014]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa: [http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitosten-toiminta/uudet\\_laitosyksikot/fi\\_FI/uudet\\_laitosyksikot/files/91804824415188316/default/alustava-turvallisuusarvio-fennovoima.pdf](http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitosten-toiminta/uudet_laitosyksikot/fi_FI/uudet_laitosyksikot/files/91804824415188316/default/alustava-turvallisuusarvio-fennovoima.pdf)

U.S. Department of Energy, Assistant Secretary for Nuclear Energy. 1989. Department of Energy's Team's Analyses of Soviet Designed VVERs. Main report. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy. [Viitattu 12.12.2014]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa: <https://www.ntis.gov/Search/Home/titleDetail/?abbr=DE91002540>

Valorinta, Veikko . 1983 ”Koneenrakentajan Metallioppi”, Tampere: Kustannusyhtymä, Tampereen Kirjanpaino. ISBN 951-9316-22-1

Vasilchenko, Igor. 2011. Uusien VVER-reaktoreiden sydämen rakenne. Moscow: Rosenergoatom, 10/2011, 8-13. [Viitattu 03.03.2015]. Sähköinen aikakausilehti, artikkeli. Saatavissa: [http://rosenergoatom.info/images/PDF/2011/web1\\_rea\\_10\\_2011.pdf](http://rosenergoatom.info/images/PDF/2011/web1_rea_10_2011.pdf)

Vuorinen, Asko. 2011. Planning of Nuclear Power systems. Espoo: Energiapro Oy.

Zolotarev, Konstantin & Pashsenko Alexei. 2004. АСТ-1000 – GROUP ACTIVATION CROSS-SECTION LIBRARY FOR VVER-1000 TYPE REACTOR. Obninsk: ГИЦ РФ – Физико-энергетический институт им. академика А.И.Лейпунского. [Viitattu 14.04.2015]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/004/33004609.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/004/33004609.pdf)

В.А.Юханов, А.Д.Шур, 2009. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА СТАТИЧЕСКУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 15Х2НМФА(А) ДЛЯ РЕСУРСА КОРПУСА РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР 60 ЛЕТ. Moskova, Gidropress. [Viitattu:

14.02.2015], Sähköinen asiakirja. Saatavissa:

<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2009/mntk2009-178.doc>

И. В. ГОРЫНИН, Б. Т. ТИМОФЕЕВ, А. А. СОРОКИН, 2006 ”Вероятностный анализ механических свойств материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000” Проблемы прочности, 2006, № 2. [Viitattu 08.01.2015]. Sähköinen aikakausilehti ”Problems of Strength”. Saatavissa: [http://www.ipp.kiev.ua/jpp-full/2006/2006\\_2.pdf](http://www.ipp.kiev.ua/jpp-full/2006/2006_2.pdf)

Karzov, Grigori, Margolin, Boris, Tepluhina, Lidia, Pimenov, Valeri. 2014. МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ТИПА ВВЭР НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТАЛИ ДЛЯ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ. Pietari, FGUP Prometei. [Viitattu 12.02.2015]. Sähköinen asiakirja. Saatavissa: [http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2014/Sections/3.1./G.P. Karzov\\_B.Z. Margolin\\_I.V. Tepluhina\\_V.A. Piminov.pdf](http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2014/Sections/3.1./G.P. Karzov_B.Z. Margolin_I.V. Tepluhina_V.A. Piminov.pdf)

Kozlov, D., Golovanov V., Bunakov N. “ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПОД ВЛИЯНИЕМ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРАХ”, 2014 Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14, №4(4), Samara.