

Mikael Hilli

NUOHOUSLAITTEEN LÄMMÖNKESTON PARANTAMINEN

NUOHOUSLAITTEEN LÄMMÖNKESTON PARANTAMINEN

Mikael Hilli
Opinnäytetyö
Syksy 2016
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, tuotantotekniikka

Tekijä: Mikael Hilli

Opinnäytetyön nimi: Nuohouslaitteen lämmönkeston parantaminen

Työn ohjaajat: Jouko Juurikka, Timo Selkälä (Global Boiler Works), Esa Törmälä (OAMK)

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2016 Sivumäärä: 60 + 0 liitettä

Tämä opinnäytetyö tehtiin Oulussa toimivalle Global Boiler Works Oy:lle, joka valmistaa paineilmatoimisia iskuvasaroita teollisuuslaitosten käyttöön. Vasara on teollisuuden laitteisiin suunnattu nuohouslaite pinnoille tarttuneen tai paakkuuntuneen materiaalin irrotukseen. Lämpövoimalaan asennetussa nuohouslaitteessa oli havaittu normaalia korkeammista käyttölämpötiloista seuranneita toimintaongelmia, joiden syyksi paljastui vasarassa käytettyjen polymeeriosien riittämätön lämpötilan kesto.

Paineilmavasara haluttiin pitää luotettavana ja toimintakykyisenä myös erityisen kuumissa käyttöolosuhteissa, joten kuumankesto-ongelman ratkaisemiseksi käynnistettiin tuotekehitysprosessi. Työn aikana laitteen rakenne, materiaalit ja niistä aiheutuneet mahdolliset ongelmat kartoitettiin ja tutkittiin. Ongelmien pohjalta alettiin kehittää ratkaisuja ja uutta parannettua rakennetta vasaralle.

Tärkein tavoite oli vaihtaa lämmönkestoltaan riittämättömien polymeeriosien tilalle uudet paremmin kuumaa kestävä materiaalit, jotta toimintavarmuus kuumissa käyttöolosuhteissa saatiin turvattua. Sopivan materiaalin löytämiseksi suoritettiin valintaprosessi, jossa päädyttiin käyttämään hyvin kuumuutta kestäviä polymeerejä. Materiaalivalinnan jälkeen laitteen mekaanista rakennetta muokattiin, jotta uusia materiaaleja käyttämällä saatiin jokaisesta komponentista paras hyöty irti. Vasaran muokatuista uusista materiaaleista sisältävistä komponenteista tehtiin prototyyppiversiot, joita testattiin huolellisesti luotettavan toiminnan varmistamiseksi. Testausohjelman jälkeen päivitetty komponentit otettiin käyttöön vasaran tuotantoversioissa.

Opinnäytetyön aikana tutkittiin paineilmasasaran vauriot, joiden pohjalta tehtiin laitepäivityksen suunnittelutyö, materiaalinvalinta ja mekaniikkasuunnittelu. Prototyyppiosien suunnittelun, testauksen ja valmistuksen tuloksena saatiin kuumissa olosuhteissa luotettavasti toimiva valmis tuotantolaite.

Asiasanat: tuotekehitys, lämpökestävyys, materiaalin valinta

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	6
2 NUOHOUSLAITE YLEISESTI	7
2.1 Vasaran rakenne	7
2.2 Vasaran toiminta	9
2.3 Rakenteen ongelmat korotetuissa lämpötiloissa	10
3 MATERIAALIN OMINAISUUDET	11
3.1 Tuotteen toiminnot	12
3.2 Tuotteen valmistettavuus	12
3.3 Käyttöympäristö	12
3.4 Kustannus	13
3.5 Toimitusvarmuus	13
3.6 Konstruktiomateriaalit	14
3.6.1 Metallit	14
3.6.2 Polymeerit	14
3.6.3 Keraamit	15
3.6.4 Komposiitit	15
4 VASARAN MEKANIICASSA HUOMIOIDUT ASIAT	16
4.1 Välys	16
4.2 Lämpölaajentuminen	16
4.3 Kuluminen	17
5 VASARASSA KÄYTETYT POLYMEERIT	18
5.1 Nylube	18
5.2 POM	18
5.3 PTFE	18
5.4 NR eli luonnonkumi	19
5.5 Viton	19
6 VASARAN KOMPONENTTIEN KEHITYS	20
6.1 Kehitys yleisesti	20
6.2 Testaus yleisesti	22

6.3 Liukulaakeri ja tiivisterenkaat	23
6.3.1 Lähtökohta	24
6.3.2 Materiaalin valinta	26
6.3.3 Suunnittelu	32
6.3.4 Prototyypin valmistus ja testaus	37
6.3.5 Lopputulos	40
6.4 Pikapoistiventtiili	40
6.4.1 Lähtökohta	42
6.4.2 Suunnittelu	42
6.4.3 Prototyypin valmistus ja testaus	44
6.4.4 Lopputulos	46
6.5 Tärinäeristin	46
6.5.1 Lähtökohta	47
6.5.2 Suunnittelu	47
6.5.3 Prototyypin valmistus ja testaus	48
6.6 Joustoholkki	49
6.6.1 Lähtötilanne	50
6.6.2 Suunnittelu ja testaus	50
6.6.3 Lopputulos	52
6.7 Tiivisterengas	52
6.8 Paineilmaletku ja läpivientikumi	53
7 YHTEENVETO	56
LÄHTEET	58

1 JOHDANTO

Markkinoilla oleva tuote ei ole koskaan lopullisesti valmis. Valmistajan on pidettävä tuotekehitysprosessia yllä pitääkseen kiinni saavutetusta markkina-asemasta. Iskuvasaroita valmistava Global Boiler Works (GBW) kehittää vasaroi- taan paremmiksi luoden asiakkailleen lisäarvoa ja paremmin toimivia tuotteita.

Iskuvasarat ovat yksi osa GBW:n tuotantosegmenttiä. Oulussa toimiva yritys suunnittelee, valmistaa ja myy iskuvasaroita Amec Foster Wheelerin alihankki- jana. Yritys on myös mekaniikan suunnitteluun, mallintamiseen ja laskentaan erikoistunut korkean osaamisen palvelutuottaja, jolla päämarkkina-alue on poh- joismaissa, mutta toimintaa suoritetaan myös globaalilla tasolla ympäri maail- man. GBW:n valmistamia iskuvasaroita on käytössä Suomessa, Ruotsissa ja Japanissa. (1.)

Nuohouslaitteet ovat paineilmakäyttöisiä iskuvasaroita, joita käytetään esimer- kiksi lämpövoimaloiden, metallinjalostuslaitosten ja materiaalisiilojen nuohouk- seen ja paakkuuntuneen materiaalin irrotukseen. Tässä opinnäytetyössä käsi- tellään tuotekehitysprosessia iskuvasaran toimintavarmuuden parantamiseksi kuumissa yli 200 °C:n käyttöolosuhteissa. Työssä käydään läpi nuohouslait- teessa havaittu ongelma ja sen syyt, ongelman korjaamiseksi tehdyt toimenpi- teet, uudistetun rakenteen testaus sekä tehdyn kehitystyön lopputulos.

Iskuvasaran toiminnassa on todettu ongelmia normaalia korkeammissa käyttö- lämpötiloissa. Kehitysprosessin tavoitteena on löytää ratkaisut ongelmiin ja saada vasara toimimaan luotettavasti korkeissa lämpötiloissa, millä mahdolliste- taan aiempaa monipuolisemmat ja haastavammat asennuskohteet vasaralle ja lisätään laitteen kilpailukykyä markkinoilla.

2 NUOHUSLAITE YLEISESTI

Polttolaitoksissa käytetään korkeaa lämpötilaa ja puhtaasti palavaa polttoprosessia, mutta siitä huolimatta syntyy aina pieniä määriä kevyitä partikkeleita, esimerkiksi tuhkaa ja nokea. Nämä kaikki eivät poistu tuhkanpoistojärjestelmän mukana, vaan nousevat kuumen savukaasun mukana ja tarttuvat kiinni lämmönvaihdingpintoihin. Tuhka ja noki ovat lämmönsiirto-ominaisuuksiltaan melko huonoja, joten ne muodostavat eristävän kerroksen kuumen savukaasun ja lämmönvaihdingpintojen väliin ja näin huonontavat niiden hyötysuhdetta ja kykyä ottaa lämpöenergia savukaasuista talteen. (2, s. 209.)

Iskuvasara on paineilmatoiminen nuohouslaite lämpövoimaloiden ja prosessiteollisuuden lämmönvaihdingpintoihin kertyvän pienpartikkelimateriaalin irrotukseen. Iskuvasara pitää lämmönvaihdingpinnat vapaana kertyvistä pienpartikkeleista ja näin parantaa kokonaisprosessin tehokkuutta ja hyötysuhdetta. Nuohouslaite irrottaa ei halutun materiaalin mekaanisen iskun aiheuttamalla korkeataajuisella värähtelyllä. (2, s. 209.)

2.1 Vasaran rakenne

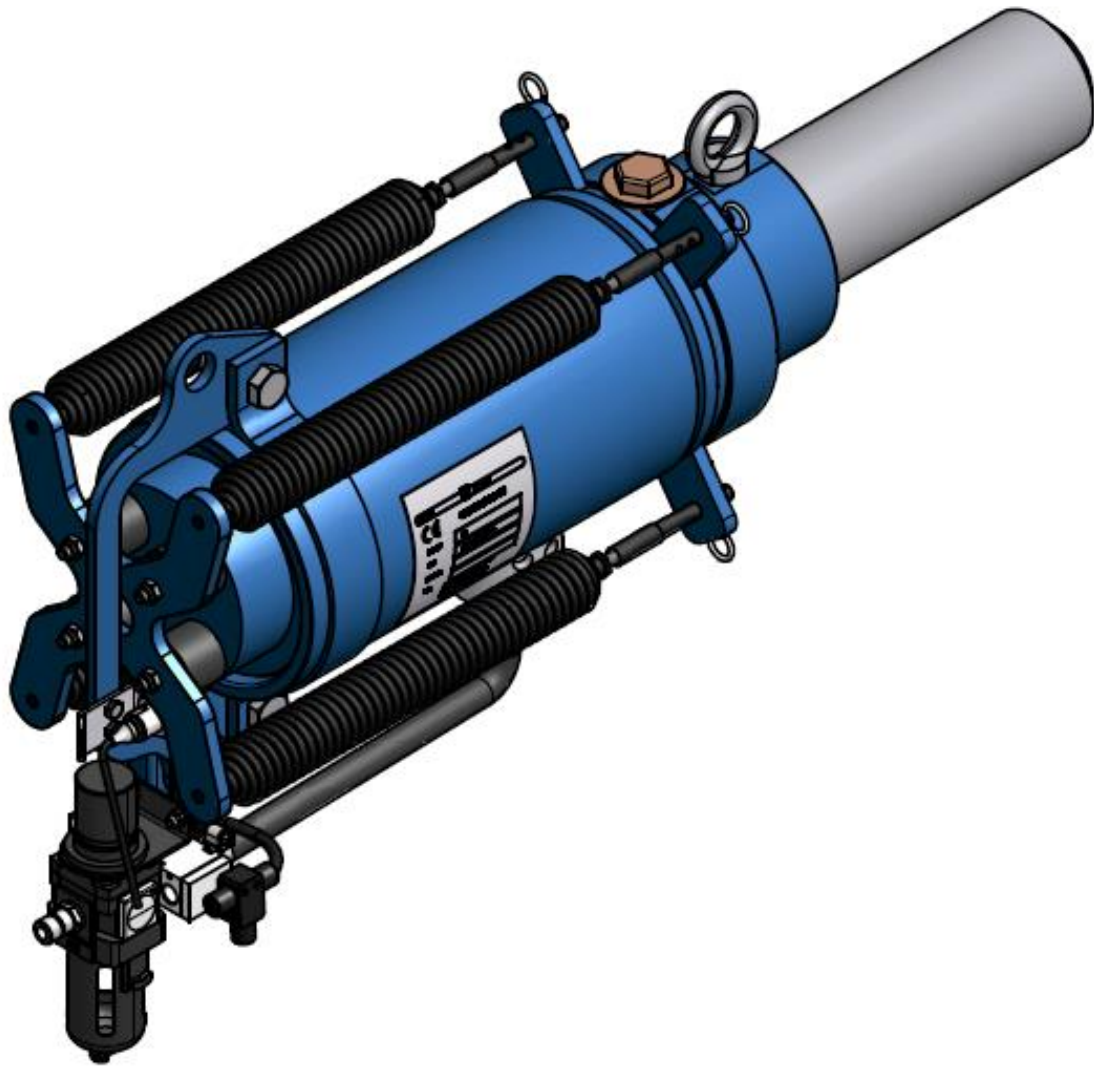
Nuohouslaite on paineilmaviritteinen jousitoiminen iskuvasara, jonka rakenteen lähtökohtana on ollut yksinkertainen ja vaativissa olosuhteissa toimiva laite. Väljät toleranssit ja yksinkertainen tukeva rakenne mahdollistavat laitteen käytön likaisissa, pölyisissä, märissä sekä kylmissä ja lämpimissä olosuhteissa. Yksinkertaistettuna vasara on terässylinteri, joka kiinnitetään lämpökattilan ulkopuolelle ja yhdistetään lämmönvaihtajaan iskun välittävällä alasintangolla.

Iskuvasara koostuu kolmesta isosta rakenteellisesta pääkomponentista ja monesta pienemmästä apukomponentista, joilla laitteen toiminnallisuus ja ohjaus on toteutettu. Laitteen runkona toimii teräksestä sorvattu sylinteriputki, johon kaikki muut vasaran osat kiinnittyvät. Iskumäntä on sylinteriputken sisällä paineilmalla ja jousivoimalla edestakaisin liikkuva teräspaino, jolla vasaran isku muodostetaan. Iskumännän voima saadaan vetojousista, jotka viritetään paineilman avulla. Mäntä liikkuu sylinteriputkessa aksiaalisuunnassa alasimen ja iskupituuden rajoittimen välillä ja kiinnittyy runkoon vetojousiparin välityksellä.

Sylinteriputken ja iskumännän välissä on polymeeristä valmistettu liukulaakerointi estämässä metallipintojen kontakti.

Alasintanko on vedettyä terästankoa, jolla männän iskuvoima johdetaan suoraan haluttuun rakenteeseen, esimerkiksi lämmönvaihtimeen. Vasaran runko kiinnitetään alasintangon päähän, jolloin alasin kannattelee koko vasaran rakenteen. Tällä rakenteella isku saadaan välitettyä haluttuun kohteeseen lähes vaimentumattomana yksinkertaisen terästangon läpi eikä muiden rakenteiden vasarassa tai laitoksessa tarvitse siirtää tai kestää välitettävää iskuenergiaa.

Lämmönvaihdinpintaan kohdistuvan iskun kuormittavuus on mahdollisimman pieni, koska vasaran isku herättää iskettävään kappaleeseen hyvin pienen amplitudin omaavan korkean värähtelytaajuuden. Tämä irrottaa partikkelit tehokkaasti, koska lämmönvaihdinpinnalla ja siihen kiinnittyvillä partikkeleilla on toisistaan poikkeavat ominaisvärähtelytaajuudet. Kuvassa 1 on esitetty iskuvasaran kokoonpanomalli. (2, s. 218.)



KUVA 1. Paineilmavasaran kokoonpanon 3D-malli (3)

2.2 Vasaran toiminta

Paineilmavasara suorittaa tyypillisesti yhden toimintakierron noin kahden sekunnin aikana, jolloin vasara muodostaa alasintankoon yhden iskun. Ohjauslogiikkaan voidaan ohjelmoida toimintakiertoja haluttu määrä tietyn aikamäärän sisään, esimerkiksi kuusi iskua minuutissa, jolloin vasara aktivoituu kymmenen sekunnin välein. Vasara voidaan myös valjastaa laitoksen oman sisäisen ohjausjärjestelmän alaiseksi, jolloin ohjaus tapahtuu keskitetysti yhdestä pisteestä.

Kun vasara aktivoidaan, magneettiventtiili päästää paineilmaa ensin pikapoistoventtiiliin, joka sulkeutuu ja ohjaa paineilman edelleen vasaran sylinteriputken sisään. Paineilma työntää iskumäntää pois päin alasimen päästä samalla viritäten männän ja rungon väliin kiinnitetyt vetojouset. Kun mäntä saavuttaa ääri-asennon iskupituudenrajoittimessa, asentoanturi ohjaa magneettiventtiilin katkaisemaan paineilman syötön ja pikapoistoventtiili (PPV) aukeaa. Sylinteriputken sisällä oleva paineilma poistuu pikapoistoventtiilin kautta, virittyneet jouset vetävät iskumännän takaisin sylinteriputken sisään ja mäntä iskee alasintangon päätä.

Isku johdetaan lämmönvaihtimeen alasintankoa pitkin. Iskun aiheuttaman herätteen avulla lämmönvaihdin saadaan resonoimaan korkealla taajuudella, joka irrottaa lämmönvaihtajan pintaan kiinnittyneet pienhiukkaset ja lämpö siirtyy paremmin lämmönvaihtimen läpi.

2.3 Rakenteen ongelmat korotetuissa lämpötiloissa

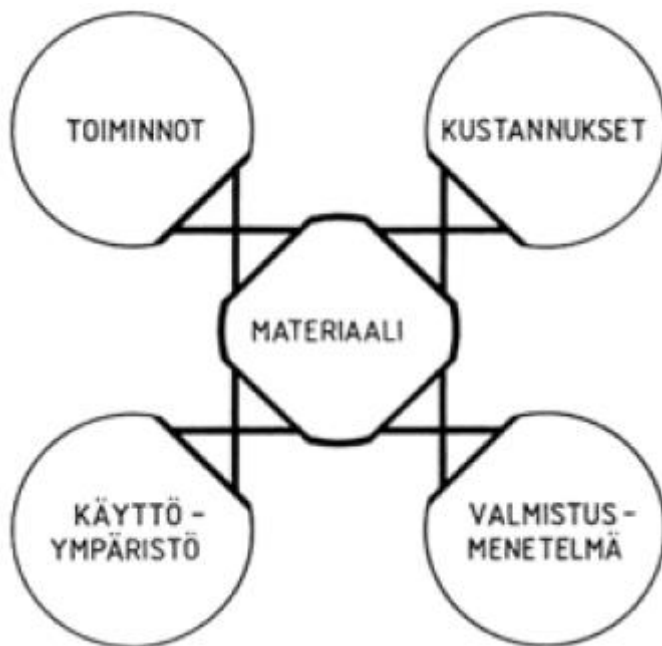
Suoritettujen työn tutkimusongelma liittyy nuohouslaitteen heikentyneeseen toimintavarmuuteen kuumissa asennuspisteissä. Kuumilla olosuhteilla tarkoitetaan tässä tapauksessa yli 100 °C:n toimintalämpötiloja ja tällaisia toimintaympäristöjä löytyy esimerkiksi lämpövoimaloiden ja lämmönvaihtimien läheisyydestä.

Lämpövoimalassa kattilan ulkopuoli eristetään hyvin energiahukan vähentämiseksi, mutta etenkin kattilan ylimmissä osissa lämpötila voi silti nousta hyvin korkealle. Tällaisiin paikkoihin asennetuissa vasaroissa todettiin liian korkeasta käyttölämpötilasta seuranneita ongelmia, jotka liittyivät vasarassa käytettyjen polymeerimateriaalien lämpölaajenemiseen ja osittaiseen sulamiseen. Käytetyt polymeeriosat esimerkiksi pehmenivät, jolloin osien rakenteen geometria vääristyi eivätkä tiivisteet enää toimineet ja liiallinen polymeerin lämpölaajentuma metalliosien välissä aiheutti kiinnileikkaantumisen.

3 MATERIAALIN OMINAISUUDET

Tuotteen suunnitteluprosessissa materiaalin valinta on lopputuotteeseen vahvasti vaikuttava osio. Käytettäväksi suunnitellun materiaalin ominaisuuksissa ja siitä valmistetun tuotteen suunnittelussa pitää huomioida, että tuotteelle asetetut toiminnalliset tavoitteet täyttyvät luotettavasti, tehokkaasti ja taloudellisesti koko tuotteen eliniän ajan. Tuotteen elinkelpoisuus markkinoilla on monesti riippuvainen edellä mainittujen tavoitteiden täyttymisestä. (4, s. 248.)

Materiaalivalinnan tuotekehitysprosessi sisältää useita eri vaiheita ja näkökulmia. Materiaali vaikuttaa oleellisesti kaikkien aineellisten tuotteiden suunnittelun lopputulokseen, koska kaikki fyysiset tuotteet ovat lopulta materiaa muotoiltuna erilaisiin geometrioihin. Materiaalin valinta on riippuvainen materiaalista valmistetun tuotteen vaadituista ominaisuuksista, mutta myös kääntäen tuotteen ominaisuudet ovat riippuvaisia käytetystä materiaalista (kuva 2). (4, s. 11.)



KUVA 2. Materiaalin riippuvuus erilaisista vaatimuksista (4, s. 11)

3.1 Tuotteen toiminnot

Tuotekehitysprosessissa materiaalivalintaa voidaan tarkastella useista lähtökohdista. Monesti ne risteävät toistensa kanssa, joten valintaprosessi vaatii monen tekijän huomioimista. Kehitettävällä tuotteella voi olla monimäärä haluttuja ominaisuuksia, jolloin materiaalin valinnassa harvoin päästään ideaaliseen lopputulokseen. Tällöin valinnassa täytyy tehdä mahdollisimman hyvä kompromissi haluttujen tuoteominaisuuksien ja saatavilla olevien materiaaliominaisuuksien välillä. (4, s. 9 - 11.)

Jos tuotesuunnittelussa jokin tavoitteista on ehdoton, jolloin tämä tavoite voi ohjata materiaalivalintaa. Tuotteet suunnitellaan yleisesti tiettyä toimintoa varten, joten se on monesti määräävin tekijä materiaalivalintaa tehdessä, koska fyysisen tuotteen toimintoja usein ohjaa tuotteen geometria ja geometria muovataan aina materiaalista. (4, s. 9 - 11.)

3.2 Tuotteen valmistettavuus

Materiaaliominaisuudet vaikuttavat materiaalin ja tuotteen valmistettavuuteen sekä käyttöominaisuuksiin yleensä huomattavan paljon. Kun materiaalin ominaisuuksilta vaaditaan enemmän, yleensä myös valmistettavuus muuttuu vaativaksi. Tietyn tuotteen valmistaminen tulisi olla mahdollisimman helppoa ja edullista, mutta tällainen valmistusideologia ei kuitenkaan saa syrjäyttää tuotteen teknisiä ja toiminnallisia vaatimuksia. Seuraavassa on lueteltu valmistusmenetelmän valintaan vaikuttavia tekijöitä:

- materiaaliominaisuudet, kuten lujuus, sitkeys ja kovuus
- tuotteen geometria
- geometrian tarkkuusvaatimus ja toleranssit
- käytettävissä olevat valmistusmenetelmät
- sarjakoko ja valmistusmäärä. (4, s. 9 - 11.)

3.3 Käyttöympäristö

Suunniteltavaan tuotteeseen kohdistuu toiminnallisten vaatimusten lisäksi käyttöympäristön olosuhteiden luomat vaatimukset. Tuotteen käyttöympäristö asettaa vaatimukset esimerkiksi lämpötilan kestolle ja puhtaudelle.

Yleistettynä materiaalien ominaisuudet heikkenevät, kun lämpötila nousee liian korkeaksi tai jäähtyy liian kylmäksi. Liian kuumassa moni materiaali laajenee, pehmenee ja lopulta sulaa. Liian kylmässä ne kutistuvat ja muuttuvat hauraksi. Käyttöympäristön puhtaudesta mukaan tuote voi altistua esimerkiksi sään vaikutuksille, säteilylle ja korroosiota aiheuttaville kemikaaleille, ja nämä kaikki vaikuttavat yleensä haittaavasti tuotteen toimintaan. (4, s. 9 - 11.)

3.4 Kustannus

Materiaalivalinta ohjaa tuotteen myyntihinnan muodostumista. Kustannus on monesti jopa määräävin tekijä tuotteen materiaalia valittaessa. Tuotteen hinta riippuu valitun materiaalin hankintahinnasta ja materiaalille soveltuvasta tuotteen valmistusmenetelmästä. Ominaisuuksiltaan hyvän materiaalin hinta ja siitä tehdyn tuotteen valmistus ovat yleensä sitä kalliimpia, mitä parempia materiaaleja käytetään. Tällöin kuitenkin kustannukset voivat nousta liian suuriksi paremmalla materiaalilla saavutettuun hyötyyn nähden. Mahdollisimman edullinen materiaali todennäköisesti tuottaa ominaisuuksiltaan heikon tuotteen, mutta mahdollisimman hyvästä materiaalista valmistettu tuote voi olla monin kerroin kalliimpi ostaa ja valmistaa tuotteeksi kuin hieman edullisempi, mutta heikompi materiaali. (4, s. 267.)

3.5 Toimitusvarmuus

Valmistettavan tuotteen raakamateriaali ja komponentit joudutaan aina hankkimaan, ellei niitä valmisteta itse. Tuotekehitykseen ja valmistukseen keskittynyt toimija ei välttämättä valmista käytettyjä osia ja materiaaleja itse, vaan ostaa ne ulkopuoliselta toimijalta. Materiaalin riittävä saatavuus on valmistajalle tärkeää, ja perinteisesti se on turvattu hankkimalla riittävä määrä materiaalia omaan varastoon odottamaan käyttötarvetta. Tämä ei kuitenkaan ole yrityksen pääoman kannalta järkevää, koska varastoituu materiaaliin sidottu pääoma ei ole tuottavaa. Tarvittavan materiaalin tulisi olla ostettavissa nopeasti tuotannon sen hetkiin tarpeeseen japanilaisen JIT - (Just In Time) ideologian mukaisesti. Tuotteen valmistajan toimitusvarmuuden kannalta on järkevää valita luotettava ja tavoitettavissa oleva toimittaja osille ja materiaalille, jolloin niiden saatavuus ja yhteistyö myyjän kanssa on helpompaa. (5, s. 428.)

3.6 Konstruktiomateriaalit

Konstruktiomateriaalit sisältävät neljä eri ryhmää, joihin kuuluvat metallit, polymeerit, keraamit ja komposiitit. Eri ryhmien sisältämät materiaalit tarjoavat laajasti vaihtoehtoja erilaisiin sovelluksiin. Tässä opinnäytetyössä materiaalien ominaisuuksia tarkastellaan iskuvasaraan soveltuvuuden näkökulmasta ja tarkka valintaprosessi käydään läpi komponenttikohtaisesti. Valintaan vaikuttavat tarkasteltavat tekijät ovat lueteltu seuraavassa:

- lujuus
- sitkeys
- kovuus
- kulutuskesto
- lämpö
- valmistettavuus
- saatavuus
- hinta. (4, s. 260.)

3.6.1 Metallit

Metallit voidaan jakaa kahteen alaryhmään, rautametalleihin ja ei-rautametalleihin. Molemmat alaryhmät sisältävät monenlaisia metalleja, mutta ovat yleisesti lujuusominauksiltaan hyviä ja myös kohtuullisen sitkeitä ja kovia. Metallit kestävät kovaa käyttöä, kulutusta ja korkeita lämpötiloja keskimäärin paremmin kuin muut materiaaliryhmät. Monia eri metalleja on hyvin saatavissa edulliseen hintaan, ja ne ovat valmistettavissa ja käsiteltävissä helposti yksinkertaisillakin työkaluilla. (4, s. 37 - 39.)

3.6.2 Polymeerit

Polymeerit kattavat hyvin laajan alueen erilaisia materiaaleja. Puhekielessä polymeeri tunnetaan muovina, joka on helposti muovattavaa ja valmistettavaa raaka-ainetta. Materiaalilla on monia hyviä mekaanisia ominaisuuksia ja se on riittävän luja ja sitkeä moniin käyttökohteisiin. Polymeerit häviävät metalleille lujuusvertailussa tai lämpötilan kestossa, mutta omaavat pienen kitkakertoimen ja

hyvän kulutuskestävyyden. Polymeeritekniikka mahdollistaa monipuolisten materiaalien luomisen yhdistelemällä eri ominaisuuksia samaan materiaaliin tarpeen mukaan. (4, s. 192 - 196.)

3.6.3 Keraamit

Keraamit ovat yleisesti erityisen kovia, hyvin kulutusta ja lämpöä kestäviä yhdisteitä. Keraamien staattinen lujuus on monesti erinomainen, mutta materiaalin joustavuus ennen hajoamista on hyvin pientä, mikä tekee siitä hauraan ja helpommin rikkoutuvan jatkuvan ja väsyttävän kuorman alla. Vaativaan rakennekäyttöön suunnattujen erikoiskeraamien valmistus suuressa mittakaavassa voi olla hankalaa vaatien monimutkaisia työmenetelmiä, mikä vaikuttaa saatavuuteen ja hintaan negatiivisesti. (4, s. 213 - 215.)

3.6.4 Komposiitit

Komposiitit ovat käytännössä useamman eri materiaalin yhdistelmiä, jotka ovat liitetty toisiinsa yleensä adheesion avulla. Komposiitit ovat heterogeenisiä materiaaleja, mikä tarkoittaa, että komposiitin muodostavat eri materiaalit ovat edelleen selvästi erotettavissa toisistaan. Komposiitit muodostuvat vähintään kahdesta eri materiaalista, joista toinen antaa halutut mekaaniset lujuusominaisuudet ja toinen sitoo kokonaisuuden yhteen. (4, s. 218 - 220.)

Komposiittien materiaaliominaisuudet ovat monesti erinomaisia lujuuden ja sitkeyden suhteen, koska niihin voidaan yhdistää kahden tai useamman materiaalin halutut ominaisuudet tukemaan toisiaan. Näin saadulla materiaalilla voi olla ominaisuuksia, joita ei perinteisillä materiaaleilla voida saavuttaa. Komposiittirakenteiden saatavuutta rajoittaa tarve räätälöidä tuote sekä niiden valmistuksessa vaadittu muottitekniikka ja työkalut aina tapauskohtaisesti. (4, s. 218 - 220.)

4 VASARAN MEKANIKASSA HUOMIOIDUT ASIAT

4.1 Väly

Kaikkien liikkuvien osien välillä on oltava jonkinlainen väly. Täydellisesti kiinni olevat materiaalit ilman välystä eivät voi liikkua toisiinsa nähden ilman materiaalin rakenteellista muodonmuutosta eli jonkinlaista kulumista. Muuttumattomissa puhtaissa olosuhteissa liikkuvat hyvin tarkasti valmistetut osat voivat käyttää hyvin pientä välystä toistensa välillä ja silti toimia hyvin. Esimerkki tällaisesta on laboratorio-olosuhteissa toimiva tarkkuuslaakeri. Muuttuvissa olosuhteissa, joissa lämpötila ja puhtaus vaihtelevat, on käytettävä suurempaa välystä liikkuvien osien välillä.

Väly liikkuvien osien välillä on tarpeellinen, mutta mahdollistaa myös osapintojen hetkellisen linjauksen vääristymisen ja pienet liikepoikkeamat ei-toivottuihin suuntiin, jolloin liikkuvan kappaleen uloimmat ääripisteet voivat koskettaa hyvin pienen pinta-alan kautta. Jos liikkuvien kappaleiden pinnat lähestyvät ja osuvat toisiinsa, kappaleisiin kohdistuu tällöin kiihtyvyyttä, koska kappaleet hidastavat ja pysäyttävät toistensa liikkeen. Nämä pienet pinta-alakontaktit yhdistettynä mahdollisesti suuriin kiihtyvyyksiin muodostavat suuria pintapaineita, jotka voivat rikkoa materiaalin pintaa, mikäli paine ylittää materiaalin lujuuden.

4.2 Lämpölaajentuminen

Lämpölaajentumisella tarkoitetaan fyysisen kappaleen geometrisen muodon, tilavuuden ja tiheyden muuttumista kappaleen lämpötilan muuttumisen seurauksena. Lämpölaajentuminen vaikuttaa jokaiseen materiaaliin. Valtaosa materiaaleista laajenee lämmitessään ja kutistuu jäähtyessään. On myös joitain poikkeuksia, joissa materiaali voi laajeta jäähtyessään tai kutistua lämmitessään. Tällainen poikkeus on esimerkiksi vesi, joka on tiheimmillään +4 °C:ssa, mutta laajenee, jos lämpötila muuttuu suuntaan tai toiseen. (6.)

Mekaanisia rakenteita suunnitellessa täytyy lämpölaajentuminen ottaa huomioon, mikäli rakenne joutuu toimiessaan kokemaan lämpötilan vaihteluita. Jos kahdella eri materiaalilla samassa rakenteessa on toisistaan selvästi poikkeava

lämpölaajenemiskerroin, niiden geometrinen tilavuus muuttuu eri nopeudella lämpötilan muuttuessa. Kun lämpötila muuttuu voimakkaasti, suuren lämpölaajenemiskertoimen omaavasta materiaalista valmistettu rakenteen osa voi kasvaa tai pienentyä ulos suunnitelluista mittatoleransseista ja tämä voi aiheuttaa rakenteen toimimattomuuden.

4.3 Kuluminen

Kahden materiaalipinnan suora kosketus toisiinsa liikkeen aikana aiheuttaa nopeasti kulumista pehmeämmässä materiaalissa. Jos koskettavat pinnat ovat samaa materiaalia tai omaavat saman kovuuden, molemmat pinnat alkavat kulua tasaisesti. Kulumisen voi estää tai sitä voidaan hidastaa huomattavasti erottamalla liikkuvat pinnat toisistaan. Erottamiseen voidaan käyttää esimerkiksi hyvin yleistä öljyvoitelua, missä voitelukalvo estää pintojen kosketuksen toisiinsa. Muita tapoja on käyttää tarkoituksellisesti uhrattavaa kulutusmateriaalia pintojen välissä tai estää pintojen kosketus jotenkin muuten, esimerkiksi kelluttamalla toinen vastinpinnoista paineilmakalvolla öljykalvon tapaan tai magneettikentän avulla. (4, s. 27 - 28.)

5 VASARASSA KÄYTETYT POLYMEERIT

5.1 Nylube

Nylubea käytettiin vasaran vanhassa liukulaakerissa. Nylacastin valmistama Nylube-polymeeri on ominaisuuksiltaan lähellä nailonina tunnettua polyamidia, mutta sillä on siihen verrattuna noin kaksi kertaa pienempi kitkakerroin 0,8. Materiaalissa on yhdistetty märkä ja kuivavoiteluominaisuudet jättämällä polymeerin sisään hyvin pieniä materiaaliin sitoutumattomia öljytaskuja, jotka aktivoituvat pintapaineen ollessa suuri. Materiaalilla on hyvät liukuominaisuudet ja kulumisen kesto, mittapitävyys ja kemikaalien kesto, ja se on tarkoitettu käytettäväksi kuivana käyvissä laakereissa ja liukupinnoissa. Materiaalin maksimi suositeltu käyttölämpötila on noin 100 °C. (7; 8.)

5.2 POM

POM oli käytössä PPV:n vanhan mäntärakenteen materiaalina. POM eli polyasetaali on osakiteinen yleinen koneen rakenneosissa käytetty polymeeri, koska sillä on hyvät mekaaniset ominaisuudet. Materiaali on luja ja jäykkä, mutta silti joustava ja se kestää väsyttävää kuormitusta. Sillä on hyvä mittapysyvyys, se kestää kemikaaleja ja soveltuu hyvin koneelliseen työstämiseen. Materiaalin lämmönkesto on noin 100 °C. (9; 10, s. 91.)

5.3 PTFE

PTFE:ä käytetään vasaran uuden liukulaakerin, tiivisterengasrakenteen ja PPV:n mäntärakenteen materiaalina. PTFE eli polytetrafluorieteeni tunnetaan DuPontin kauppanimellä Teflon ja se on yleisesti käytetty esimerkiksi paistinpannujen tarttumattomana pinnoitteena. Teflon on fluorimuovien ryhmään kuuluva kestopolymeeri, joka materiaalina omaa monipuolisia hyödyllisiä ominaisuuksia. Toisin kuin muut kestopuovut, Teflon ei sula eikä plastisoidu materiaalin pitkien polymeeriketjujen vuoksi. Lämpötilan noustessa tämä ominaisuus mahdollistaa materiaalin pysymisen kiinteässä muodossa sulamatta jolloin se säilyttää kappaleen geometrisen muodon, kunnes polymeeriketjut ja materiaali hajoavat kokonaan. (11.)

Teflon on tunnettu huonosta tarttuvuudesta eri materiaaleihin ja se omaa pienemmän tunnetun kitkakertoimen itseään ja metallia vasten, joten sen liuku- ja laakerointiominaisuudet ovat hyviä. Materiaali on lisäksi täysin inertti monia kemikaaleja vastaan ja sen käyttölämpötila-alue on hyvin laaja -270 °C :sta $+260\text{ °C}$:seen. (11.)

PTFE:stä on saatavilla myös lisääaineseostettuja laatuja, joista yleisimmät ovat lasi- ja hiiliseosteisen PTFE. Molempien seosaineiden lisäyssuhde on 25 % ja näillä saavutetaan materiaalille suurempi jäykkyys, parempi mittapitävyys ja kulutuksenkesto. (11.)

5.4 NR eli luonnonkumi

Luonnonkumi oli käytössä vasaran vanhoissa tärinäeristimissä, joustoholkeissa ja o-rengastiivisteissä. Luonnonkumi on yksi eniten käytetyistä elastomeereistä ja sillä on hyvä kimmoisuus, kulutuksen kesto ja lujuus. Materiaalin korkein käyttölämpötila on noin 100 °C . (12; 13.)

5.5 Viton

VITON on käytössä vasaran uudistetuissa joustoholkeissa ja o-rengastiivisteissä. Materiaali on fluoripohjainen elastomeeri, mikä antaa sille noin 200 °C :n lämpötilankeston ja hyvän kemikaalikestävyyden muiden elastomeereille tyypillisten ominaisuuksien lisäksi. (14.)

6 VASARAN KOMPONENTTIEN KEHITYS

6.1 Kehitys yleisesti

Nuohouslaitteiden ongelmat kohonneissa lämpötiloissa loivat tarpeen paremmin kuumaa kestäville materiaalille vikaantuvissa komponenteissa. Suoritettussa työssä nostettiin nuohouslaitteen eri komponenttien lämmönkesto materiaalien haluttujen ominaisuuksien parantamisella ja rakennegeometriaa muuttamalla.

Kokemusten perusteella tiedettiin, että pääosin teräsrakenteisen iskuvasaran toimintaongelmat korkeammissa käyttölämpötiloissa johtuivat hajoavissa apukomponenteissa käytettyjen polymeeriosien materiaaliominaisuuksien puutteellisuudesta. Ennen kehitysprojektia käytössä olleet polymeerimateriaalit olivat luokiteltu käytettäväksi maksimissaan noin 100 °C:n lämpötiloissa, mikä viittasi lämpötilojen olleen ainakin kohtuullisesti korkeampia hajonneiden vasaroiden asennuspisteissä.

100 °C:n lämpötilankesto oli riittävä yleisimpiin asennuskohteisiin, mutta kaikkien kuumimmissa asennuskohteissa osien sulaminen kuitenkin aiheutti tarpeen parantaa niiden materiaalien lämmönkesto-ominaisuuksia. Koska epäkuuntoon menneiden iskuvasaroiden asennuskohteista ei ollut saatavilla varmaa lämpötilahistoriaa, tavoite materiaalien lämpötilankestosta asetettiin kaksinkertaiseksi noin 200 °C:seen.

Ratkaisun hakeminen vikaantuvien polymeerikomponenttien parantamiseksi aloitettiin alkuperäisten materiaaliominaisuuksien selvityksellä, josta saatiin selville, kuinka paljon materiaalien lämmönkesto oli asetettua tavoitetta alhaisempi. Valmistajilta kysymällä ja datalehtiä lukemalla selvitettiin mm. materiaalien suositeltu jatkuva ja ylin sallittu käyttölämpötila. Myös muut tärkeät ominaisuudet kuten kitkakerroin, lujuus ja kulutuksen ja kemikaalien kestävyys selvitettiin.

Tavoitteeksi asetettu 200 °C:n lämpötilan kesto vaati materiaaleilta hyvää muo-
tostabiliteettiä laajalla lämpötila-alueella. Materiaalien geometrinen muoto ei

saanut vääristyä ja sen oli toimittava luotettavasti sekä asetetussa korkean lämpötilan tavoitteessa, että myös käyttölämpötila-alueen toisessa ääripäässä kylmissä pakkasolosuhteissa, joita pohjoismaissa monesti esiintyy.

Säätilan lisäksi ympäristötekijät altistivat vasaran rakenteet mahdollisesti myös muille haitallisille tekijöille, kuten kemikaaleille, säteilylle, lialle ja pölylle. Teollisuuslaitosten ympäristöissä käytetyt kemikaalit voivat aiheuttaa korroosiota reaktioherkissä materiaaleissa ja tarttuvat lika ja pöly voivat rikkoa tai tukkia rakenteita. Vasarassa käytetty materiaali voisi ajan kanssa reagoida sen muiden rakennemateriaalien kanssa suoraan tai jonkin ympäristön kemikaalin katalysoimana. Mahdollisimman inertti materiaali olisi tämän vuoksi turvallinen valinta materiaalille, koska ympäristötekijöistä riippuvainen huolto ja korjausvaatimus pienenesi.

Nuohouslaitteen tuotekehitysprosessin tarkoituksena oli parantaa vasaran käyttömahdollisuuksia monipuolisemmissa olosuhteissa ja näin myös lisätä vasaran kilpailukykyä markkinoilla. Jotta kehitystyössä saatava kilpailukykyetu olisi ylläpidettävissä, laitteen materiaalien hankintahinta ei saisi nousta kohtuuttomasti verrattuna aikaisemmin käytettyihin materiaaleihin. Tämä tarkoitti mahdollisesti joidenkin hyvien, mutta myös kalliiden materiaaliratkaisujen jättämistä pois materiaalivalinnasta. Kalleilla erikoismateriaaleilla saavutettu mekaaninen etulyöntiasema ei oikeuttaisi niiden käyttöä vasaran komponenttimateriaalina, koska saavutettu hyöty ei toisi lopulliseen tuotteeseen riittävästi lisäarvoa suhteutettuna panostettuun pääomaan.

Paineilmavasaran rakennemateriaalien oli oltava luotettavasti saatavilla tarpeen tullen, mikä asetti vaatimuksia alihankkijalle. Kotimaassa toimiva materiaalitoimittaja olisi nopeampi ja helpompi yhteistyökumppani tuotetuen ja materiaalios-tojen kannalta, kuin ulkomailla sijaitseva tavarantoimittaja.

Kaikki vasaraan tehtävä kehitystyö oli oltava alaspäin yhteensopivaa, eli vasaran mahdollisten muokkausten piti soveltua käytettäväksi kaikkiin vasaran rakennevariaatioihin ja tuotantoversioihin mahdollisimman pienellä vaivalla. Vaatimus estäisi vasaran isot rakennemuutokset ja sitoisi muokkaukset komponentti-kohtaisiksi päivityksiksi.

6.2 Testaus yleisesti

Testausta varten vasaralle on rakennettu oma testilaitteisto. Testauksen olosuhteet ja toimintakiertojen määrä haluttiin saada lähelle arvoja, joita vasara joutuu kestämään todellisessa tilanteessa huoltojen välillä. Vasaroiden iskutaajuus käytön aikana tiedettiin olevan keskimäärin noin yksi isku minuutissa, joten vasaran toimiessa ilman taukoja vuoden ympäri, iskuja olisi kertynyt hieman yli 500 000 kappaletta. Vasaroiden asennuslaitoksissa suoritetaan yleensä ainakin yksi huoltoseisokki vuodessa, joten 500 000 testikiertoa todettiin riittäväksi testimääräksi uudelle liukulaakerille ja tiivisterakenteelle.

Testipenkissä vasaraa voitiin iskeä nopeutetusti kerran sekunnissa, jotta testaukseen kulutettu aika saataisiin minimoitua. 500 000 iskulla koko testijakson käyntiajaksi muodostui vain hieman vajaa kuusi vuorokautta. Käytännössä testi kuitenkin ajettiin läpi osissa, joissa keskimäärin vuorokauden välein ajo keskeytettiin ja testattavat osat purettiin esiin tarkastusta varten.

Testikatkojen aikana vasaran päivitetty osat tarkastettiin, mutta niille ei tehty huoltavia toimenpiteitä vaan rakenteiden testaamista jatkettiin siinä kunnossa, kun ne olivat. Liukulaakerin ja pikapoistoventtiilin kohdalla rakenteet jopa tahallisesti altistettiin pölylle ja hiekalle ympäristön kontaminaatiovaikutuksen simuloimiseksi. Mikäli testattavissa osissa huomattiin kulumaa tai ongelmia, ne kuvattiin ja kirjattiin muistiin jatkokehitystä varten.

Kuumien olosuhteiden testausta varten vasaran testilaitteistoon rakennettiin uusi irrotettava lisäkammio, jossa lämpötila saatiin nostettua pysyvästi yli 200 °C:seen. Kuvassa 3 esitetty kammio koostui villalla eristetyistä metallisyylinteristä ja sähkökäyttöisistä lämpöpuhaltimista, joilla lämpötilaa voitiin ylläpitää ja kontrolloida. Testilaitteistoon kiinnitettiin myös lämpötila- ja paineantureita, joilla tarkkailtiin vasaran sisäistä lämpötilaa ja painejakaumaa. Vasaran koko rakenne voitiin sijoittamaan kammion sisään käytön ajaksi, joten käyttöolosuhteet pystyttiin simuloimaan lähelle oikeita.



KUVA 3. Vasaran testilaitteisto

6.3 Liukulaakeri ja tiivisterenkaat

Liukulaakeri on nuohouslaitteen suurin polymeerikomponentti ja se sijaitsee vasaran rungon sisällä sylinteriputkessa, kuten on esitetty kuvassa 4. Liukulaakerin rakenteeseen on yhdistetty kolme eri toimintoa. Sen tehtävänä on eristää vasaran runkona toimivan sylinteriputken ja sen sisällä liikkuvan iskumännän metallipinnat toisistaan, vaimentaa iskuja ja vähentää kitkaa niiden välillä sekä sallia pieni ohilinjaus. Samalla laakeri myös tiivistää iskumännän ja sylinteriputken välin ja estää vasaran virittämiseen käytetyn paineilman karkaaminen sylinteriputkesta.



KUVA 4. Liukulaakeri vasaran sisällä

6.3.1 Lähtökohta

Vanhan liukulaakerin rakenteeseen sisällytetyt kolme eri toimintoa olivat osittain ristiriidassa keskenään. Liukulaakerin ensimmäinen toiminto eristi iskumännän ulkopinnan sylinteriputken sisäseinämästä ja esti näin metallipintojen suoran kosketuksen toisiinsa liikkeen aikana. Toinen toiminto tuki edellistä sen vähentäessä kitkaa metallipintojen välissä ja näin ehkäisi osien ennenaikaista kulumista.

Laakerin kolmas tehtävä oli tiivistää iskumännän virittämiseen käytetty paineilma vasaran sisään, mikä oli kuitenkin ristiriitainen kahden edellisen toiminnon kannalta. Paineilman tiivistäminen olisi vaatinut mahdollisimman pienen välilyksen käyttöä ohivuodon minimoimiseksi, kun taas vasaran toiminta likaisessa ja pölyisessä toimintaympäristössä, jossa lämpötila vaihtelee, vaati liikkuvien osien välissä käytettävän riittävän suurta vällystä.

Vanha laakeri mahdollisti vasaralle tyydyttävän toiminnan useimmissa tilanteissa, mutta sen huonot puolet olivat riittämätön lämmönkesto, toleranssiongelmat valmistuksessa ja paineilman ohivuoto. Vanhan laakerin valmistusmateriaalina käytetyllä Nylube-polymeerillä oli pienet kulumis- ja kitkakertoimet ja soveltuu tämän vuoksi erityisesti käytettäväksi liukulaakeroinneissa ja kulutuspin-

noissa. Materiaalin hyvä muotostabiilitetti ja kemikaalien kesto tekivät siitä sopivan materiaalin iskuvasaran liukulaakerille normaalien käyttölämpötilojen vallitessa.

Vanha laakeri valmistettiin putkiaihiosta ensin sorvaamalla se sopivaan sisä-, ulko- ja pituusmittaan, minkä jälkeen pala putkea halkaistiin vesileikkurilla. Liukulaakerin seinämän materiaalipaksuus oli joustavalle polymeerimateriaalille suhteellisen ohut sorvauksen kannalta, mikä tuotti ongelmia pienen toleranssitarakkuuden kanssa.

Perinteisellä sorvausmenetelmällä tehtynä laakeri muotoutui lievästi kartion malliseksi, koska sorvin leukojen tuenta ei riittänyt joustavalla ja ohuella materiaalilla koko työkappaleen läpi. Leukojen juuresta sorvin työtarkkuus oli hyvä, mutta kappaleen toisessa päässä materiaali jousti teräpalkan alla ja lastunmuodostus ei ollut tasaista. Tästä seurauksena sorvatut kappaleet muotoutuivat kartion mallisiksi, joissa osa oli toisesta reunastaan liian paksuja ja osa liian ohuita.

Liian paksut laakerit omasivat riittämättömän toimintavälyksen ja saattoivat juuttua kiinni iskumännän ja sylinteriputken väliin jo asennettaessa tai myöhemmin käytön aikana lämpölaajenemisen myötä. Liian ohuet laakerit toimivat muuten hyvin, mutta päästivät virittämiseen käytetyn paineilman ohitseen liian helposti, mikä johti tarpeettoman suureen paineilman kulutukseen.

Sorvauksen ongelmat saatiin kierrettyä sen jälkeen, kun laakerin työstössä alettiin käyttää erikseen valmistettuja sisä- ja ulkopuolisia tuentoja työkappaleelle. Tuenta otti vastaan kaikki sorvauksessa syntyneet kuormat ja sorvattava kappale pysyi suorana. Tuentapintojen käyttö kuitenkin teki sorvauksesta monimutkaisempaa vaatien normaalia enemmän aikaa ja työkappaleen käsittelyä, mikä hidasti valmistusta ja lisäsi kustannuksia.

Sorvauksen jälkeen laakeriaiho leikattiin halki lämpölaajenemisen ja asennusteknisten syiden vuoksi. Liukulaakerin ohuen seinämän laajenema ei aiheuttanut ongelmia korkeintaan millin kymmenesosien muodonmuutoksellaan, mutta halkaisemattoman putken kehämitan laajenema olisi ollut liian suuri ilman joustavan sauman välystä.

Koska liukulaakeri toimi myös paineilmaa tiivistävänä kappaleena, sauman aiheuttama epäjatkuvuuskohta lisäsi haitallista paineilman ohivuotoa. Sauman suora yksinkertainen leikkaus päästi paineilman läpi liian helposti, joten leikkaus tehtiin vesileikkurilla, jotta sauma saatiin muotoiltua hammastetuksi ja paineilman vuotoa vähennettyä. Hammastetussa saumassa (kuva 5) pituus oli noin kaksinkertainen suoraan verrattuna ja läpivuotava ilmavirta joutui kulkemaan terävien kulmien ohi, jolloin virtausvastus suureni oleellisesti.



KUVA 5. Vanhanmallinen asennusvalmis Nylube-polymeeristä valmistettu liukulaakeri ja hammastettu halkio

6.3.2 Materiaalin valinta

Iskuvasaran uudessa liukulaakerissa käytettävän materiaalin täytyy omata monia hyviä ominaisuuksia, joita tarvitaan laakerin toiminnan varmistamiseksi monenlaisissa olosuhteissa. Vasaran luonteesta johtuen laakeriin kohdistuvat kiihtyvyydet iskun aikana ovat suuria, vaikka laakeri itsessään ei siirrä iskuenergiaa eteenpäin. Materiaalin on kuitenkin oltava sitkeää ja lujaa kestääkseen suuria määriä iskuja väsymättä ja rikkoutumatta.

Kulutuskestävyys ja pieni kitkakerroin ovat laakerin toiminnan kannalta tärkeitä, koska laakeri eristää kaksi kovaa metallipintaa toisistaan ja vähentää kitkaa niiden välillä. Laakerin on oltava pehmeämpää kuin sen metalliset vastinpinnat, jotta itse laakeri kuluu käytössä metallipintojen sijaan. Koska laakeri on tarkoituksellisesti kuluva osa, mahdollisimman pieni kitkakerroin lisää laakerin kestoikää ja näin pidentää huoltoväliä ja pienentää huoltokustannuksia.

Liukulaakerin uuden materiaalin valinnassa käytiin läpi konstruktiomateriaaliryhmät, joiden yleisominaisuudet sekä hyvät ja huonot puolet puntaroitiin soveltuvuuden mittaamiseksi. Konstruktiomateriaalit on jaettu neljään ryhmään, joita ovat metallit, polymeerit, keraamit ja komposiitit. Kaikki ryhmät tarjosivat monipuolisia materiaaleja, mutta niillä oli kuitenkin tiettyjä yleispiirteitä, joiden avulla voitiin kohdentaa tarkempi valinta vain yhden ryhmän sisälle.

Metallin käyttö laakerin materiaalina olisi ratkaissut lämpötilan kestoon liittyvään ongelmaan. Metallisen laakerin lämmönkesto olisi ylittänyt tavoitteeksi asetetun 200 °C:n rajan ja se olisi ollut mekaanisesti luja sekä kovuutensa ansiosta hyvin kulutusta kestävä. Metallin kovuudesta johtuen vasaran muissa metalliosissa olisi kuitenkin tapahtunut nopeaa kulumista ilman jonkinlaista metallipintoja toisistaan erottavaa eristettä, kuten voitelukalvoa tai mekaanista suojaa.

Potentiaalisen uuden ongelman kiertämiseksi esimerkiksi voitelujärjestelmän lisääminen vasaraan olisi tuonut enemmän osia sisältävän monimutkaisemman rakenteen ja tarpeen voiteluaineelle, mikä efektiivisesti olisi kumonnut saavutetun hyödyn. Mekaaninen suoja olisi vastannut hyvin pitkälti toiminta-ajatukseen jo olemassa olevaa liukulaakerointia. Metallin sopivuus liukulaakerin materiaaliksi olisi ollut mekaanisilta ja lämmönkesto-ominaisuuksiltaan muuten hyvä, mutta olisi tuonut mukanaan uusia ratkaistavia ongelmia.

Polymeerien alustava tutkinta osoitti niiden tarjoavan hyvin potentiaalisen vaihtoehdon uuden liukulaakerin materiaalille. Vanhan liukulaakerin materiaaliarvoja tutkittaessa huomattiin, että käytetty Nylube-polymeeri oli hyvin soveltuvaa laakerin materiaaliksi täyttäen kaikki tärkeimmät uudelle laakerimateriaalille asetetut vaatimukset, paitsi riittävän lämpötilan keston. Kaupallisesti oli kuitenkin saatavilla polymeerejä, jotka pystyivät täyttämään asetetut laakerin materiaalivaatimukset sekä myös 200 °C:n lämpötilan kestovaatimuksen.

Keraamien erinomainen lämmön ja kulutuksen kesto olisi ollut laakerin materiaalissa haluttava ominaisuus. Liukulaakerin suuri pinta-ala ja pieni materiaalipaksuus yhdistettynä laakeriin kohdistuviin kuormituksiin olisi todennäköisesti tehnyt siitä kuitenkin käytössä herkästi murtuvan. Laakerin kovuus olisi voinut

myös aiheuttaa vasaran rakenteissa kulumista ja sen mukanaan tuomia ongelmia samaan tapaan kuin metallisen laakerin kohdalla olisi voinut käydä.

Komposiittien tarjoamaa materiaaliominaisuuksien optimointimahdollisuutta käyttämällä uudelle liukulaakerille annetut mekaaniset vaatimukset olisi ollut helppo täyttää. Komposiittien valmistettavuus ja saatavuus olisi mahdollisesti ollut haastavampaa ja hinta kalliimpi, kuin muilla materiaaleilla, mutta nämä eivät kuitenkaan olisi olleet poissulkevia syitä valintaprosessissa. Suotuisat materiaaliominaisuudet samaan tapaan, kuin polymeereillä, tekivät myös komposiiteista vahvan vaihtoehdon uuden laakerin materiaaliksi.

Alustavan materiaalitarkastelun perusteella polymeerit ja komposiitit osoittautuivat parhaiten soveltuvan uuden liukulaakerin rakennemateriaaliksi. Metallit ja keraamit hylättiin materiaalivalinnasta kokonaan niiden käytöstä seuranneiden mahdollisten uusien ongelmien vuoksi. Tarkempi materiaalin valinta aloitettiin etsimällä tietoja polymeerilaatujen lämpöominaisuuksista. Monet polymeerit näyttivät menettävän ominaisuuksiaan yli 100 °C:n lämpötiloissa, joten vain lämmönkestoltaan asetettuun 200 °C:seen yltävät polymeerit hyväksyttiin jatkoon. Taulukossa 1 on esitetty tutkittujen muovilaatujen lämpöominaisuuksia.

TAULUKKO 1. Muovilaatujen lämpöominaisuuksia (10, s. 28 - 121; 15, s. 77 - 82; 16; 17; 18, s. 26)

Materiaali	Käyttölämpö (°C)	Sulamislämpö (°C)	Lämpölaajen. (10 ⁻⁶ /K)
PE	-250 - 80	135	150 - 230
PP	-30 - 100	167	120 - 190
POM-C	-50 - 100	165	110
PA	-40 - 85	220	90
PVC	85	100	60 - 80
PMMA	108	160	78
PC	-40 - 130	-	70
PS	-30 - 92	210	80
ABS	98	-	80
PET	-20 - 115	255	60
PBT	113	225	130
TPE	-	170	190
PTFE	-200 - 260	-	120
PVDF	-30 - 140	175	100 - 140
PEEK	-60 - 250	343	50
PSU	-50 - 160	-	55
PPS	-20 - 220	285	-
PUR	-40 - 80	-	-
PK	-30 - 100	225	110
PAI	-50 - 250	-	30
PEI	-50 - 170	-	45
PBI	-50 - 310	-	25

Komposiittien ryhmästä jätettiin pois lujitteet ja sidosmateriaalit, jotka sisälsivät metalleja tai keraameja. Jäljelle jääneet yleiset komposiittimateriaalit käytiin läpi ja niiden lämpöominaisuudet selvitettiin. Komposiittien yleisimmät sideaineet polyesteri, vinyyliesteri ja epoksi kuuluvat kertapolymeereihin, ja ne menettävät ominaisuutensa viimeistään noin 175 °C:n lämpötilassa, joten niiden lämmönkesto ei ollut riittävää eivätkä ne siksi soveltuneet käytettäväksi. (19; 10, s.128)

Komposiiteissa yleisimmin lujitteena käytettyjä materiaaleja ovat lasikuitu, hiilikuitu ja polymeerikuidut, kuten aramidi ja dioleeni. Lasikuitu ja hiilikuitu ovat todella lujia materiaaleja ja kestävät helposti vaadittuja 200 °C:n lämpötiloja. Kevlarina paremmin tunnettu aramidi sekä dioleeni ovat polymeerikuituja, joista Kevlar kestää yli 400 °C:n lämpötiloja. Dioleeni on polyesteripohjainen kuitu, joten sen lämmönkesto-ominaisuudet ovat liian alhaiset muiden polyesterien

tapaan, eikä tämän vuoksi sovellu käytettäväksi. Komposiitteihin käytetyistä lujitemateriaaleista lasikuitu, hiilikuitu ja Kevlar täyttivät lämmönkestovaatimuksen ollen mahdollisia lujitemateriaaleja. (20.)

Komposiittirakenne koostuu sidosaineesta ja lujitteesta, joten molempien on täytettävä lämmönkestovaatimus. Koska perinteiset hyvin saatavilla olevat sidosmateriaalit eivät tarjonneet riittäviä lämpöominaisuuksia, eikä projektissa haluttu käyttää aikaa uusien tuntemattomien materiaaliratkaisujen kokeiluun, perinteinen laminoitava komposiittirakenne karsiutui pois materiaalivaihtoehdoista.

Kaikista tutkituista polymeerimateriaaleista vain viisi eri laatua ylittivät lämmönkestoltaan vaaditut 200 °C. Mekaaniset, termiset ja kemialliset ominaisuudet sekä säänkestävyys olivat yleisesti vaatimukset täyttäviä kaikilla viidellä muovilaadulla, joten lähes tasaväkisten materiaalien valinnassa saatavuus ja hankintahinta nousivat ratkaisevaksi tekijäksi. PTFE hävisi muille vertailussa mukana olleille polymeereille lujuuden ja muotostabiiliteetin osalta, mutta materiaaliominaisuuksien ollessa riittävän hyvät saatavuus ja suhteellisesti edullisin hinta tekivät PTFE:stä parhaan vaihtoehdon uuden liukulaakerin materiaaliksi. (Taulukko 2.)

TAULUKKO 2. Lämmönkestävien polymeerien materiaaliarvoja ja suhteellinen hinta (17; 18, s. 16 - 22; 21; 22)

Materiaali	Käyttölämpö (°C)	Kitkaker.	Murtoluj. (MPa)	Lämpölaaj. (10⁻⁶/K)	Hinta (+,++,+++)
PTFE	-200 - 260	0.06 - 0.10	24	120	+++
PEEK	-60 - 250	0.25 - 0.35	120	50	+
PPS	-20 - 220	0.20 - 0.35	78	55	++
PAI	-50 - 250	0.25 - 0.60	110	30	+
PBI	-50 - 310	0.30 - 0.50	130	25	+

PTFE on fluoripohjainen polymeeri, mikä tekee siitä todella liukkaan, tarttumattoman ja inertin monia kemikaaleja vastaan. Viisikon selvästi pienimmän lujuuden ja kitkakertoimen omaava seostamaton laatu kuluu melko helposti, mutta seosaineilla kestävyyttä voidaan oleellisesti parantaa. Käyttölämpöalue ja lämpölaajanemiskerroin ovat joukon suurimmat ollen noin kaksinkertaiset seura-

vaan nähden. Fluorimuoveihin erikoistunut kotimainen toimija mahdollisti materiaalille erinomaisen saatavuuden ja edullisimman hinnan verrattuna muihin lämmönkestäviin polymeerilaatuihin.

PEEK omaa erinomaisen lujuuden ja kemikaalikestävyyden läpi sen laajan käyttölämpötila-alueen. Mekaaniset ominaisuudet olivat samaa luokkaa muiden vaihtoehtojen, paitsi teflonin kanssa. Materiaali olisi ollut ominaisuuksiltaan hyvä valinta laakerimateriaaliksi, mutta hinta oli kallis ja saatavuus hitaampaa ulkomaisen toimittajan vuoksi.

PPS on mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyvä, mutta erityisesti jäykempi ja kovempi kuin muut vertailtavat materiaalit. Pohjoismaissa mahdolliset kovat pakokset alittavat materiaalille suositellun alimman -20 °C :n käyttölämpötilan, mikä tekisi PPS:stä valmistetusta laakerista mahdollisesti hauraan ja epäluotettavan arktisissa olosuhteissa. Materiaalin hinta sijoittui vertailun keskiarvon paikkeille, mutta ulkomainen toimittaja teki saatavuudesta huonompaa.

PAI ja PBI ovat polymeerejä, jotka sisältävät imidi-ryhmän. Niillä on suuri lujuus sekä korkein polymeeripohjaisilla materiaaleilla saavutettava lämpötilankesto ja erinomaisen muotostabiilitteetti myös korkeissa lämpötiloissa. Vertailujoukon suurimmat kitkakertoimet olisivat voineet olla kulumista lisäävä tekijä laakerointikäytössä, mutta molemmat materiaalit olisivat silti tarjonneet erinomaiset termit ja mekaaniset ominaisuudet liukulaakerille. Materiaalien hankintahinnat olivat kalleimpien joukossa ja saatavuus hidasta. Kotimainen jälleenmyyjä ei varastoinut materiaalia pienen menekin ja kalliin hinnan vuoksi, joten materiaali olisi pitänyt tilata ulkomaiselta toimijalta.

Puhdas PTFE pystyi täyttämään materiaalille asetetut vaatimukset, mutta seosaineilla oli mahdollista edelleen parantaa tiettyjä ominaisuuksia. Pääasialliset lisäaineet PTFE:lle ovat lasi, hiili, pronssi, ruostumaton teräs sekä molybdeeni-sulfidi, mutta seosteista vain lasi ja hiili olivat saatavilla laakerille riittävän kokoisina materiaaliaihioina, joten valinta tehtiin näiden kahden välillä.

PTFE:n seosaineina hiili ja lasi vähentävät kulumista ja muodonmuutosta kuormituksen alla lisäämällä kovuutta ja jäykkyyttä. Lisätyt seosaineet johtavat lämpöä paremmin kuin puhdas PTFE-polymeeri, joten seostetut laadut johtavat myös lämpöä paremmin. Lisäominaisuutena lasilla on kyky pienentää seoksen lämpölaajenemiskerrointa ja se on hiileen verrattuna epäherkempi reagoimaan kemikaalien kanssa.

Hiiliseos omaa hieman pienemmän kitkakertoimen kuin lasiseos ja on enemmän suunnattu dynaamisesti liikkuviin liukupintoihin. Puhtaan ja seostettujen PTFE-laatuojen välillä päädyttiin käyttämään seostettuja, koska ne kestivät paremmin kulutusta. Seostetuista laaduista päätettiin käyttää hiiltä, koska sen kitkakerroin oli pienempi ja se oli suunnattu käytettäväksi juuri liukupintojen materiaalina. (Taulukko 3.)

TAULUKKO 3. PTFE:n laatuojen ominaisuuksia (17; 23; 24)

Materiaali	Tiheys (g/cm³)	Kitkaker.	Murtoluoj. (MPa)	Lämpölaaj. (10⁻⁶/K)	kovuus Shore D
PTFE puhdas	2.14 - 2.18	0.06	24	120 - 130	58
PTFE hiili 25%	2.05 - 2.11	0.11	14 - 18	100 - 120	62 - 67
PTFE lasi 25%	2.23 - 2.25	0.13	14 - 21	75 - 110	62 - 67

6.3.3 Suunnittelu

Kun vanhan laakerin ongelmat olivat selvitetty, aloitettiin uuden liukulaakerin suunnittelu. Uuden laakerin suunnittelussa pyrittiin ensisijaisesti kasvattamaan sen maksimaalista sallittua käyttölämpötilaa aiemmasta noin 100 °C:sta vähintään 200 °C:seen ja toissijaisesti myös korjaamaan ongelmat liittyen paineilman ohivuotoon ja valmistuksen monimutkaisuuteen.

Lämmönkeston parantaminen priorisoitiin, koska se oli syy vasaran heikentyneeseen toimintavarmuuteen korkeammassa 100 °C:n ylittävissä lämpötiloissa. Paineilman hallittu vuotaminen ei varsinaisesti haitannut vasaran toimintaa, mutta lisäsi kulutusta ja vaati enemmän paineilmaa tuottavalta ja siirtävältä laitteistolta. Liukulaakerin valmistusprosessi oli myös toimiva, vaikka työvaiheet olivat aikaa vieviä ja monimutkaisia.

Lämpötilan kestävyyttä päätettiin parantaa yksinkertaisesti vaihtamalla vanhassa laakerissa käytetty Nylube-muovi paremmin kuumaa kestävään PTFE-muoviin. Laakerin materiaalivalinnasta kerrotaan tarkemmin myöhemmin tässä osiossa. Toissijaisiin ongelmiin ratkaisua lähdettiin hakemaan vasaran ja laakerin rakennegeometrian muokkauksella.

Paineilman vuotamiseen liittyvä ongelma johtui vasaran sylinteriputken, liukulaakerin ja iskumännän väliin jäävistä pienistä raoista, joista ilma pääsi karkaamaan vasaran viritystilanteessa. Välyksetön rakenne olisi ollut parempi ratkaisu pelkästään paineilman tiivistämisen kannalta, mutta rakenteeseen oli jätettävä välystä, jotta kuivana liikkuva liukulaakeri toimisi liasta, pölystä ja lämpölaajenemisesta huolimatta.

Rakenteeseen jätettävän vällyksen määrä oli tarkka, koska se muodosti kompromissin paineilman hallitun vuodon ja laakerin liikkuvuuden välillä. Tarkkaan määritelty välly puolestaan vaati myös tarkkoja toleransseja laakerin sorvauksessa, mikä lisäsi valmistuksen työmäärää.

Kompromissi laakerin liikkuvuuden ja tiiveyden välillä johtui laakerin kaksoistoinnosta. Jos laakerin vanhat tehtävät eriytettäisiin omille komponenteilleen, voitaisiin eri komponentit optimoida toimimaan tietyn tehtävän vaatimalla tavalla. Jos liukulaakerin ei tarvitsisi tiivistää paineilmaa, vällyksen määrää voitaisiin lisätä, mikä parantaisi laakerin liikekykyä hankalissa olosuhteissa ja helpottaisi valmistusta pienentämällä vaadittavia valmistustoleransseja. Myös laakerin halkaisemiseen käytetty vesileikkaus voitaisiin korvata yksinkertaisella suoralla leikkauksella, koska paineilman vuoto ei olisi ongelma. Jos paineilman tiivistämisen hoitaisi erillinen uusi osa, rakenne voitaisiin tehdä mahdollisimman tiiviiksi huolehtimatta iskumännän laakerointivaatimuksista.

Vasaran rakennetta päätettiin muuttaa lisäämällä iskumäntään erillinen tiivistysrengasosio liukulaakerin etupuolelle iskumännän sisäpäätyyn, sekä kasvattamalla liukulaakerin toimintavällystä. Liukulaakerin toimintavällyksen kasvattaminen oli helppoa pienentämällä uuden laakerin materiaalipaksuutta 5 mm:stä noin 4,5 mm:iin, mikä lisäsi riittävästi vällystä turvaamaan toiminta yli 200 °C:ssa

lämpölaajenemisesta huolimatta. (Kaava 1.) Välyksen suurentaminen noin millimetrin kokoluokkaan myös helpotti laakerin valmistusta pienentämällä oleellisesti vaadittavaa koneistustarkkuutta millimetrin kymmenesosasta lähes puoleen millimetriin.

Lämpölaajeneminen lasketaan kaavalla 1 (25, s.106).

$$\Delta l = \alpha * l_1 * \Delta t$$

KAAVA 1

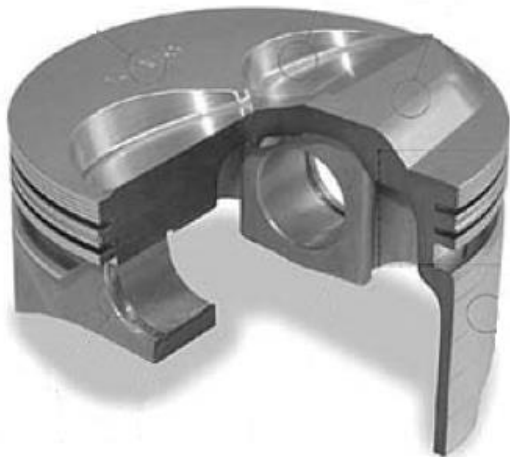
Δl = pituuden muutos

α = lämpölaajenemiskerroin (1/K)

l_1 = alkuperäinen pituus

$\Delta t = l_2 - l_1$ = lämpötilan muutos

Tiivistysrenkaan rakenne haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena ja huoltovapaana. Suunnittelussa lähdettiin liikkeelle yleisesti tunnetusta ja toimivasta männänrenkas-ratkaisusta. Männänrenkaita käytetään maailmanlaajuisesti lähes kaikkien polttomoottoreiden mäntien tiivistämiseen, joten rakenne ja käytetty tekniikka on todettu toimivaksi moneen kertaan. Kuvassa 6 esitetty männänrenkasrakenne on yksinkertainen, helppo valmistaa ja ylläpitää ja se muuntuu hyvin erilaisiin tarpeisiin.



KUVA 6. Polttomoottoreissa käytetty männänrenkasrakenne (26)

Männänrenkaan toiminta perustuu fluidivirtauksen tehokkaaseen jarruttamiseen ja ohjaamiseen mahdollisimman pienten rakojen läpi vastinpintojen välillä. Renkastrakenne ei ole täydellisen tiivis, koska sen on sallittava männän liike sylinteriputkessa. Renkailla kuitenkin saavutetaan hyvä tiivistystaso, kun tiivistäviä rengaspintoja lisätään toistensa vierelle useampi kappale. (27.)

Vasaran tiivisterenkaat haluttiin kiinnittää iskumäntään väljästi muotolukitteen avulla, koska rakenteessa täytyi huomioida kasvaneen laakerivälyksen myötä suurempi männän sivuttaisliike ja mahdollinen ohilinjaus. Mäntään suunniteltiin väljät ja riittävän syvät urat, missä tiivisterenkaat pääsisivät liikkumaan vapaasti, koska niillä oli myös lämpötilan kohotessa oltava riittävästi tilaa laajentua männän keskustaa kohden sylinteriputken estäessä luontaisen laajentumisen ulospäin. Liukulaakerin tapaan tiivisterenkaiden kehälle jätettiin katkaistu väli, jotta lämpölaajentumisen aikana renkaan kehämitta pääsisi kasvamaan esteettä.

Männän liikkeen aikana tiivistys saavutettaisiin vain jatkuvalla renkaiden kontaktilla sylinteriputken sisäseinämään, joten renkaiden lisääminen peräkkäin mahdollisti suuremman määrän toisiaan varmistavia kontaktipintoja. Renkaita asennettiin neljä kappaletta kahteen uraan, mikä muodosti kaksoisrakenteen ja varmistati näin toimintaa, jos jokin renkaista sattuisi kulumaan liikaa tai rikkoontumaan.

Laakeriin, mäntään ja tiivisterenkaisiin liittyvien mekaanisten muutosten kestävyys ja toimivuus haluttiin varmistaa jo ennen varsinaisen prototyypin valmistusta, joten rakenteista tehtiin 3D-mallit, joita kuormitettiin virtuaalisesti simulointiohjelmistolla. Uutta liukulaakeria ei simuloitu, koska sen mekaanista rakennetta ei varsinaisesti oltu muokattu. Laakeriin oltiin vaihdettu parempi materiaali, joten sen oletettiin toimivan vähintään samalla tavalla kuin vanhakin laakeri.

Uudet tiivisterenkaan tiivistivät vasaran virittämiseen käytetyn paineilman vasaran sisälle, joten renkaisiin kohdistui täysi käyttöpaine. Tiivisterenkaiden pinta-ala suhteessa niiden materiaalipaksuuteen oli suuri, joten paineen myötä renkaisiin kohdistuvan voiman vaikutus haluttiin selvittää.

Paine lasketaan kaavalla 2. (25, s. 99.)

$$p = F / A \Leftrightarrow F = p * A$$

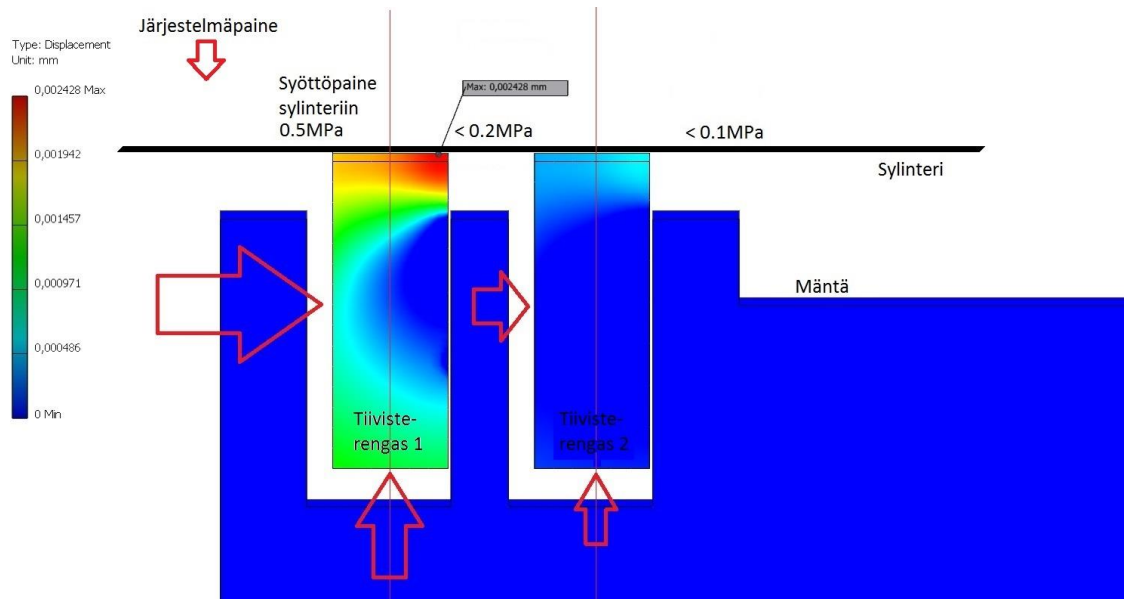
KAAVA 2

p = paine

F = voima

A = pinta-ala

Paineen vaikutus tiivisterenkaisiin ja niiden tiivistysominaisuudet simuloitiin käyttämällä Autodesk Inventorin CFD- ja FEM-moduuleita. Vasara on suunniteltu toimimaan ja virittymään jo 0,3 MPa:n paineella, mutta varmuuden vuoksi simuloinnit suoritettiin yli puolitoistakertaisella varmuuskertoimella suurimman syöttöpaineen ollessa 0,5 MPa. Simuloinnin tulokset osoittivat, että tiivisterenkaisiin syntyvä suurin mahdollinen jännitys oli vain noin 0,8 MPa, mikä oli alle 10 prosenttia käyttöön suunnitellun hiiliseosteisen PTFE:n murtolujuudesta. Myös paineen jakautuminen renkaille ja niiden tiivistyskyky näytti hyvältä simuloinnin perusteella. Simulaatio tulos on esitetty kuvassa 7.

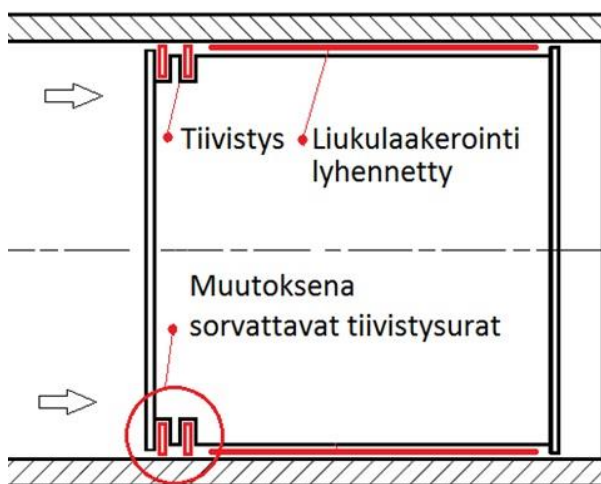


KUVA 7. Simulaatiotulos tiivisterenkaiden siirtymistä ja painejakaumasta 0,5 MPa:n syöttöpaineella

Uuden rakenteen haluttiin olevan taaksepäin yhteensopiva, mikä tarkoitti vaatimusta uusien osien yhteensopivuudesta vanhojen vasaroiden kanssa. Mikäli yhteensovittaminen vaatisi toimenpiteitä vanhoille vasaroille, niiden pitäisi olla yksinkertaisia ja vain materiaalia poistavia. Vanhan vasaran rakenteesta olisi

mahdollista poistaa materiaalia kohtuullisen helposti esimerkiksi työstämällä, mutta materiaalin lisääminen olisi vaikeampaa, ellei lisämateriaali olisi kokonaan uusi toimitettava ja helposti kiinnitettävä osa. Liukulaakereiden osalta alaspäin yhteensopivuus oli hyvä, koska käytössä olevia laakereita ei tarvitsisi muokata, vaan tilalle laitettaisiin kokonaan uudesta materiaalista valmistettu paremmin lämpöä kestävä laakeri.

Tiivisterenkaiden käyttö vanhanmallisissa iskumännissä vaati iskumäntien muokkaamista tiivisterenkaille sopivaksi. Iskumännille suunniteltiin päivitys, jossa niihin esimerkiksi asennuslaitoksen huollon aikana sorvattaisiin paikallisesti sopivat urat tiivisterenkaille ja kiinnitettäisiin ennalta toimitetut renkaat paikoilleen. (Kuva 8.) Liukulaakerin lämmönkestoa ja iskumännän toimintaa parantava päivitys olisi siis tehtävissä myös vanhanmallisiin vasaroihin, mutta vaatisi iskumännän muokkaamista.



KUVA 8. Illustratio iskumännän muokkauksesta

6.3.4 Prototyypin valmistus ja testaus

Vanhan liukulaakerin valmistus teetettiin alihankkijalla, jolle toimitettiin GBW:n hankkima raakamateriaali. Tässä mallissa materiaali ensin tilattiin ulkomaiselta jälleenmyyjältä omaan varastoon ja toimitettiin edelleen laakerin valmistajalle, jolta se palautui taas valmiina laakerina takaisin GBW:lle. Ketjun toiminnallinen rakenne sisälsi siis kaksi tilausprosessia ja kolme materiaalin siirtoa, jotka kaikki veivät aikaa sekä lisäsivät kustannuksia ja työmäärää.

Uuden liukulaakerin hankintaprosessia haluttiin yksinkertaistaa ja nopeuttaa jättämällä raakamateriaalin hankinta ja varastointi kokonaan pois GBW:n omista toiminnoista. Uuden laakerimateriaalin toimittaja tarjosi myös koneistuspalveluita, joten uusi liukulaakeri oli loogista valmistuttaa materiaalitoimittajan tiloissa ja hankkia toimittajalta suoraan käyttövalmis laakeri. Hankintaprosessin muutoksella käyttövalmiin laakerin toimitusaika saatiin pudotettua alimmillaan vain muutamaan päivään sekä materiaalin siirtely, vaadittu työmäärä ja varastoon sidottu pääoma pienenevät. Näillä tehdyillä muutoksilla saatiin monia parannuksia verrattaessa vanhaan tapaan toimia.

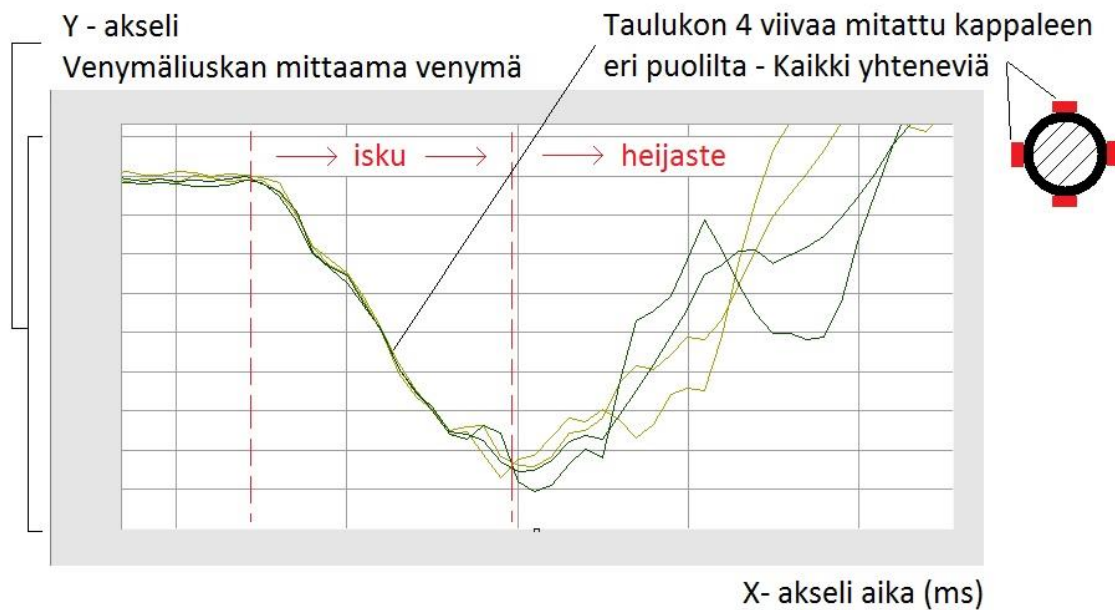
Uudeksi materiaaliksi valitun hiiliseosteisen PTFE:n sekä rakenteiden toiminta haluttiin testata perusteellisesti ennen niiden käyttöönottoa vasaran tuotantoversiossa. Materiaaliarvot ja simuloinnit antoivat lupaavia tuloksia rakenteen toiminnasta, mutta rakenteen luotettavuus oli silti varmistettava riittäväällä käytännön testaamisella, jossa olosuhteet olisivat lähellä todellisia.

Riittäväksi testausmääräksi laskettiin noin 500 000 iskua, mutta liukulaakerille iskuja kertyi lähes 800 000. Liukulaakeri oli ensimmäinen nuohouslaitteen kehitysprosessin aikana päivitetty komponentti, joten sitä testattiin aluksi tarkoituksellisesti ja myöhemmin myös muiden komponenttien testauksen yhteydessä. Tiivisterenkaiden rakenne saatiin valmiiksi laakerin jälkeen, joten toistoja ei kertynyt yhtä paljon kuin laakerille, mutta kuitenkin yli 500 000 kappaletta.

Testauksen aikana sekä liukulaakeri että tiivisterenkaat toimivat halutusti simuloituvaiheessa saatujen ennako-odotusten mukaisesti. Normaalilämpötiloissa uusi liukulaakeri pysyi hyvin linjassa uudesta väljemmästä rakenteesta huolimatta ja yli 200 °C:n lämpötiloissa lämpölaajenema ei aiheuttanut muutoksia männän liikekyvyssä tai vasaran iskuvoimassa verrattuna normaaliin.

Laakerin suuremman välyksen vuoksi haluttiin vasaran iskun voima ja suoruus todentaa mittaamalla, koska mahdollinen vino iskutyö kuluttaisi rakenteita nopeasti. Iskun aikana alasintangossa tapahtuu kimmoisa muodonmuutos, joka voitiin mitata venymäliuskoilla kiinnittämällä ne tangon ympärille pyörähdyssymmetrisesti. Mittaustuloksista selvisi, että kaikkien neljän liuskan havaitsema

muodonmuutos oli yhtäläinen, joten vasaran muodostama isku oli suora myös uudella väljemmällä laakerilla. Iskumittaustulos on esitetty kuvassa 9.



KUVA 9. Alasintangon venymäliuskamittauksen tulos

Tiivisterenkaiden tiivistysominaisuudet olivat hyvät alusta alkaen, mutta paraniivat vielä ensimmäisen 100 000 iskun aikana rakenteen hioutuessa sylinteriputken sisäseinämään, jolloin kontaktipinnat muotoutuivat paremmin toisiinsa sopivaksi. Tiivisterenkaiden tiivistyskyky mitattiin aiemman simuloinnin mukaisesti, jolloin simulaation tuloksia voitiin verrata todelliseen tilanteeseen.

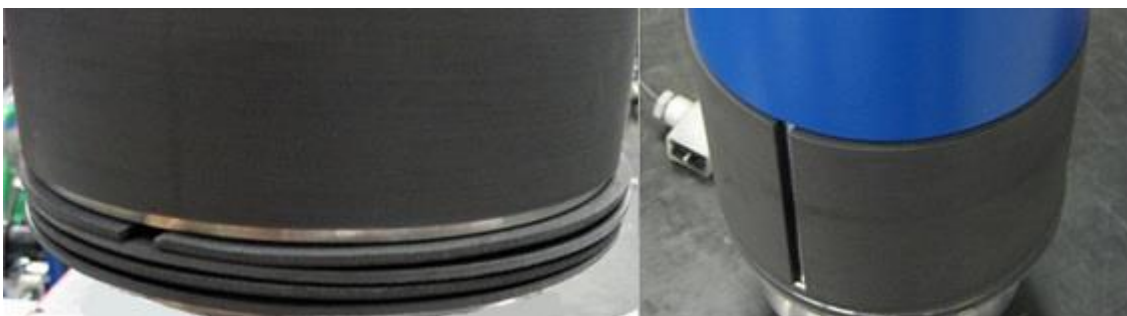
Mittaus osoitti todellisen painejakauman tiivisterenkailla olevan lähellä simulaation tuloksia (taulukko 4). Paine-ero tiivisterengasparien välillä oli suurimmillaan noin 0,1 MPa:n laskien syöttöpaineen mukana. Painehäviön ja läpivirtauksen huomattiin simuloinnin vastaisesti olevan pienempi korkeammilla käyttöpainneilla, minkä arveltiin olevan seurausta simuloinnin yksinkertaistetusta tilanteesta.

TAULUKKO 4. Vasaran painejakaumamittauksen tulokset

Järjestelmäpaine (MPa)	Syöttöpaine (MPa)	Tiivisterengaspari 1	Tiivisterengaspari 2	Painehäviö (%)
0,60	0,45	0,38	> 0,01	16
0,50	0,38	0,31	> 0,01	18
0,40	0,30	0,25	> 0,01	17
0,30	0,22	0,19	> 0,01	14
0,20	0,15	0,11	> 0,01	27
0,10	0,07	0,05	> 0,01	29

6.3.5 Lopputulos

Tuotekehitysprosessin aikana iskumännän ympärille kehitettiin uusi liukulaakeri sekä tiivistysrengasrakenne (kuva 10). Uuden liukulaakerin toimintavälystä kasvatettiin vanhasta ja tällä saatiin parannettua laitteen toiminnan luotettavuutta hankalien olosuhteiden vallitessa. Iskumäntään lisätyt tiivisterenkaat vähensivät paineilman kulutusta ehkäisemällä ohivuotoa ja mahdollistivat väljemmän laakerin käyttämisen. Päivitetylle rakenteelle tavoitteeksi asetettu 200 °C:n lämpötilankestä saavutettiin käyttämällä rakenneaineena luotettavasti kuumia olosuhteita kestävää hiiliseosteista PTFE:ä.



KUVA 10. Uudet hiiliseosteisesta PTFE:stä valmistetut tiivisterenkaat ja liukulaakeri

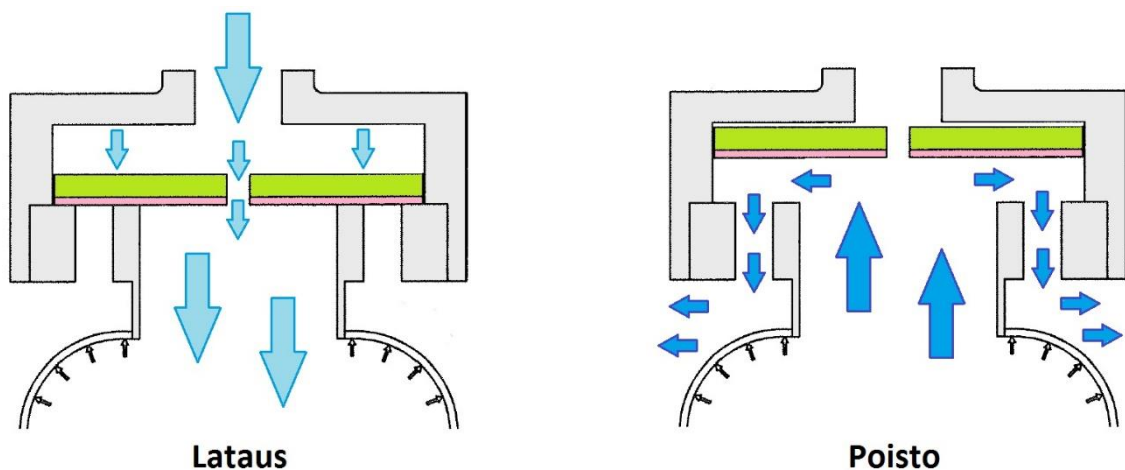
6.4 Pikapoistoventtiili

Pikapoistoventtiili on suuren tilavuusvirran läpipäästävä venttiili käytetyn paineilman nopeaan poistamiseen vasarasta. Paineilma johdetaan vasaraan ja sieltä

pois sylinteriputken kylkeen kiinnitetyn PPV:n kautta. Virittämisen aikana sylinteriputken johdettu paineilma täytyy poistaa nopeasti, jotta vasaralla saadaan muodostettua isku tehokkaasti. Jos paineilmaa ei saada poistettua nopeasti, se hidastaa iskumännän liikettä laukaisun aikana ja tämä vaimentaa muodostuvaa iskua.

Pikapoistoverkossa on metallinen runko ja sen sisällä polymeeristä valmistettu mäntärakenne. Mäntärakenne koostuu kahdesta pienemmästä sisäkkäin olevasta liikkuvasta männästä, joustoelementistä ja kiinnitysmutterista, jotka kontrolloivat ilmavirtauksen liikettä sylinteriputken ja sieltä pois automaattisesti PPV:lle syötetyn paineilman mukana.

Kun PPV:lle syötetään paineilmaa, paine ja joustoelementti puristavat mäntärakenteen tiiviisti runkoa vasten, jolloin venttiilin poistovirtauskanavat sulkeutuvat ja paineilma ohjautuu sylinteriputken. Kun paineilman syöttö katkaistaan, sylinteriputkessa olevan paine työntää venttiilin poistokanavat auki, jolloin ilma pääsee poistumaan vasaran sisältä. Toiminta on esitetty kuvassa 11. Mäntärakenteen joustavuudella varmistetaan venttiilin poistokanavien sulkeutuminen eri lämpötiloissa kompensoimalla lämpölaajenemisen aiheuttamia venttiilirakenteen mittamuutoksia.



KUVA 11. PPV:n toiminta

6.4.1 Lähtökohta

Pikapoistoventtiilin vanha mäntärakenne oli hyvä ja halutusti toimiva komponentti normaaleissa käyttöolosuhteissa. Mekaniikka oli toimiva, mutta lakkasi toimimasta, kun se altistettiin pitkäksi ajaksi 100 °C:n ylittävälle käyttölämpötiloille. Mäntäosissa käytetyn polyasetaalien määritetty jatkuva lämmönkesto on vain noin 100 °C, jolloin se menettää materiaaliominaisuutensa melko nopeasti ja materiaalista valmistetut rakenteet eivät toimi suunnitellusti.

Mikäli vasaraa iskettäisiin jatkuvalla ja tiheällä lyöntivälillä sallitun käyttölämpötilan ylittävän käyttöjakson aikana, mäntä kestäisi käyttöä ongelmitta, kunnes iskuväli jostain syystä kasvaisi selvästi pidemmäksi. Vasaraa ja venttiiliä ympäröivä lähes seisova kuuma ilma ei kerkeä lyhyessä ajassa lämmittää rakennetta yli sallitun lämpötilan, mutta pidemmän ajanjakson aikana rakenteet ylikuumentuvat, jos vasara pysyy käyttämättömänä.

Ilmiö aiheutuu paineilmapvirtauksen tehokkaasta jäähdytysvaikutuksesta PPV:n sisällä. Jokaisen virityksen ja laukaisun aikana PPV:n läpi ja ympäri virtaa useita litroja paineistettua ilmaa, joka jäähtyy laajetessaan ja samalla jäähdyttää mäntärakennetta absorboimalla itseensä mäntään varastoitunutta lämpöenergiaa. Yhdessä ongelmaesimerkissä nuohouslaitteen asennuspisteessä käyttölämpötila oli lähellä materiaalin sulamispistettä, jolloin männän geometrinen muoto deformoitui. Vasara aktivoitiin tämän jälkeen, jolloin ilmavirtaus jäähdytti männän nopeasti ja geometria kiinteytyi vääristyneeseen muotoon aiheuttaen vikatilanteen.

6.4.2 Suunnittelu

Vanhanmallinen pikapoistoventtiili koostui alumiinisesta rungosta, POM-muovista tehdystä mäntärakenteesta ja polyuretaanista valmistetusta joustoelementistä. Venttiilin toimintaongelmat kuumissa olosuhteissa aiheutuivat polymeeristen mäntäosien liian matalasta lämmönkestosta. Alumiinisen runko-osan tiedettiin kestävän käyttöä turvallisesti huomattavasti 200 °C:n tavoitetta korkeammassa lämpötiloissa sulamispisteen ollessa noin 650 °C:ta. (28.)

PPV:n mäntärakenne oli mekaanisesti toimiva, joten turvallisen käyttölämpötilan rajaa päätettiin kohottaa vaihtamalla mäntäosissa käytetyn polyasetalin ja polyuretaanipohjaisen joustoelementin tilalle paremmin lämpöä kestävä materiaali. Materiaalin valintaa määrittivät pitkälti samat ehdot kuin liukulaakerinkin kohdalla. Vaatimuksina olivat jatkuva, vähintään 200 °C:n lämpötilan kesto ja riittävän luja rakenne kestävänsä vasaran iskuluontoisia kuormituksia. Materiaali oli oltava yhteensopiva alumiinin kanssa ja kestävä ympäristön olosuhteita kuten likaa ja mahdollisia kemikaaleja. Järkevät materiaali- ja valmistuskustannukset sekä alihankkijan toimitusvarmuus oli otettava huomioon.

PPV:n vanhanmallisen mäntärakenteen materiaalina käytetty polyasetali täytti kaikki muut vaatimukset, paitsi 200 °C:n lämpötilankeston. Liukulaakerin materiaalivalinnassa todettiin polymeerien tarjoavan monipuolisia ja hyviä materiaaliominaisuuksia, jotka puolsivat polymeerien käyttöä mäntärakenteessa verrattuna muihin yleisesti käytettyihin rakennemateriaaleihin. Saadun kokemuksen myötä tiedettiin PTFE:n kestävänsä vaadittua 200 °C:n lämpötilaa ja materiaalin ominaisuuksien täyttävän mäntärakenteelle asetetut vaatimukset. Oli järkevää käyttää samaa materiaalia ja toimittajaa mahdollisimman monessa vasaran komponentissa, joten mäntärakenteen materiaaliksi valittiin PTFE-seos.

Liukulaakerissa käytetyn hiiliseostetun PTFE:n sijaan PPV:n mäntärakenteessa päätettiin käyttää lasiseostettua laatua, koska sen lämpölaajenemiskerroin oli hieman pienempi. Hiiliseostetun PTFE:n lämpölaajenemiskerroin oli noin kuusinkertainen PPV:n rungossa käytettyyn alumiiniin verrattuna, kun lasiseosteillä laajeneminen oli noin nelinkertaista. (23.)

Moninkertaisesti suuremman lämpölaajenemiskertoimen vuoksi lämpötilan noustessa polymeeristä valmistettu mäntärakenne laajeni selvästi enemmän verrattuna alumiiniseen runkoon. PPV:n toiminta vaatii tarkasti ajoitettujen erillisten tasopintojen tiivistymistä venttiilin sisällä, joten mahdollisimman pieni muodonmuutos oli toivottavaa ja se saavutettiin parhaiten käyttämällä lasiseostettua PTFE:ä. (24; 28.)

PPV:n mäntärakenteen joustoelementissä käytetty Sylomer-joustohuopa oli polyuretaanipohjainen valmiste, jolloin sen lämmönkesto rajoittui muiden polyuretaanien tapaan noin alle 100 °C:seen. Materiaali täytyi vaihtaa, mutta mäntiin valittua PTFE:ä ei voitu käyttää, koska se oli liian jäykkää ja kovaa. Rakenteessa päätettiin kokeilla käytettäväksi metallista jousilaattaa, koska se kestäisi helposti vaaditun 200 °C:n lämpötilan ja sopiva jousen jäykkyys olisi nopeasti ja helposti saatavilla suoraan monen liikkeen hyllystä. (29.)

Tarvittavan metallisen jousen jäykkyys saatiin selville määrittämällä vanhan joustoelementin pinta-ala ja jäykkyys, joiden avulla laskettiin tarvittava voima. Varmuuden vuoksi laskennallisesti jäykkyydeltään oikean jousen lisäksi hankittiin hieman löysempiä ja jäykempiä jousia, jotta niitä oli tarvittaessa mahdollista testata. Pehmeän polymeerisen joustoelementin vaihtaminen metallisiin jousiin aiheutti aluksi huolen mahdollisesta polymeerimäntäosien kulumisesta kovemman vastinmateriaalin vaikutuksesta. Metallisen jousen vastinpinta oli kuitenkin sileä ja pyörästetty, minkä ajateltiin ehkäisevän, tai ainakin hidastavan kulumista. (30.)

6.4.3 Prototyypin valmistus ja testaus

Pikapoistiventtiilin uusi mäntärakenne koostui useammasta osasta, joilla oli eri toimittajat. Tästä syystä rakennetta ei voitu tilata valmiina suoraan yhdeltä toimittajalta, vaan valmiit osat oli hankittava erillään GBW:lle, missä prototyyppi kokoonpantiin. Mäntärakenteen lämmönkestävään prototyyppiin kuului sisempi ja ulompi mäntäosa, kaksi sormilaattajousta, korilaatta niiden väliin sekä kaikki osien kiinnitysmutteri.

Rakenteen osien määrää jouduttiin nostamaan alkuperäisestä, koska joustoelementtiosa vaihdettiin kahteen teräksiseen sormilaattajouseen, joiden väliin lisättiin korilaatta vastinpinnaksi. Valmistuksen kannalta uusi rakenne oli epäedullinen suuremman osien lukumäärän takia, mutta lämpökestävyyden saavuttamiseksi muutos oli tarpeellinen. Mäntärakenne on esitetty kuvassa 12.



KUVA 12. Pikapoistventtiilin lämmönkestävä mäntärakenne

Pikapoistventtiilille oli laitteen kehityksen aikana rakennettu oma testilaitteisto, minkä vuoksi koko vasaraa ei tarvinnut käyttää PPV:n testaamiseen. Testilaitteisto oli PPV:n tavoin pieni ja kevytrakenteinen, jolloin sen käyttäminen ja säätäminen oli nopeaa. Mäntää ajettiin testerissä yhteensä yli 500 000 toiston verran, minkä laskettiin olevan riittävä määrä kuvaamaan todellista käyttöikää.

PPV:n uuden mäntärakenteen geometriaa ei oltu muokattu, joten testauksessa tarkasteltiin rakenteen lämmönkestävyyttä, lämpölaajenemista sekä metallisten jousien toimintaa polymeerimäntää vasten. Lasiseosteinen PTFE kesti hyvin vaadittua lämpötilaa ja korkean lämpötilan testit onnistuivat hyvin. Testauksen aikana huomioitiin ennakoitu paineilmavirtauksen voimakas jäähdytysvaikutus, mikä vuoksi mäntärakenne jäähdyi nopeasti huonelämpötilan tasolle ympäröivästä 200 °C:n lämpötilasta huolimatta.

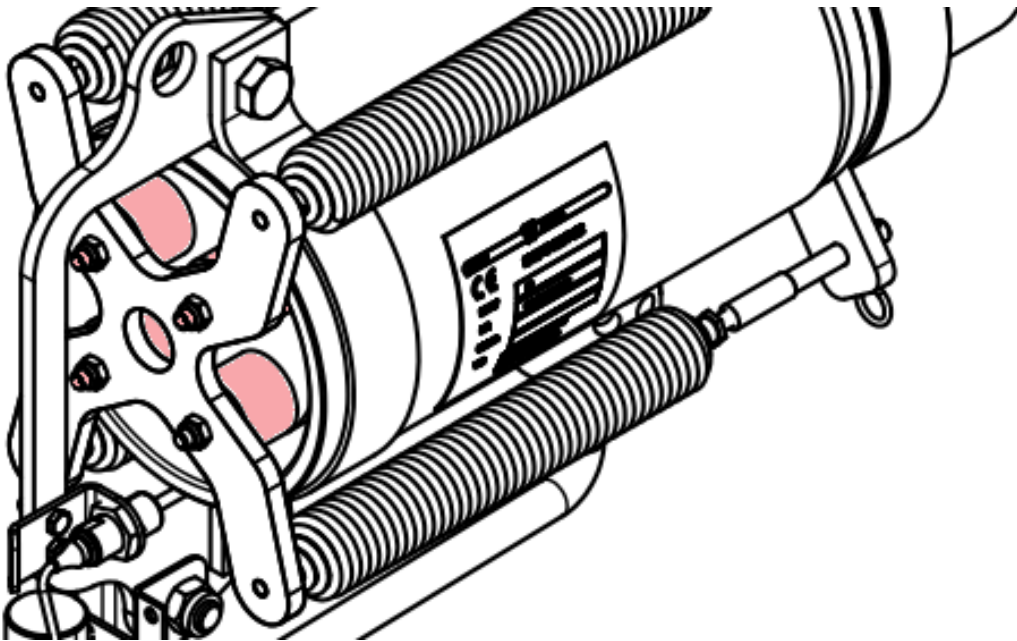
Metalliset jouset mäntärakenteen sisällä toimivat toivotusti eivätkä alkaneet kuluttamaan pehmeämmän polymeerimännän pintaa, minkä ajateltiin olevan mahdollista. Lämpölaajenema ei aiheuttanut suoraa ongelmaa rakenteen toiminnassa, mutta välysten huomattiin olevan välillä hyvin pieniä, minkä vuoksi lopulliseen rakenteeseen mittoja hieman muutettiin vällyksen kasvattamiseksi.

6.4.4 Lopputulos

Pikapoistoventtiilin mäntärakenteen materiaaleja, rakennetta ja geometriaa muokattiin paremman toiminnan ja lämmönkestävyyden saavuttamiseksi. Mäntäosien materiaaliksi vaihdettiin lasiseosteinen PTFE, lisäksi polymeeristä valmistettu joustoelementti korvattiin metallijousilla, joilla saavutettiin rakenteen tavoitteeksi asetettu 200 °C:n lämpötilankesto. Mäntärakenteen mittoja muokattiin välyksen kasvattamiseksi, koska suurempi välykäs ei haitannut komponentin toimintaa, mutta paransi liikkuvuutta ja luotettavuutta korkeammissa lämpötiloissa.

6.5 Tärinäeristin

Tärinäeristimillä kiinnitetään vasaran iskumäntä joustavasti vetojousielementtiin (kuva 13). Niiden tehtävä on eristää vetojouset iskumännän synnyttämiltä teräviltä iskulta ja vaimentaa pois vetojousissa iskun aikana syntyneet värähtelyt. Tärinäeristin on vulkanoidusta luonnonkumistakumista valmistettu elastomeerisylinteri, jonka molemmissa päissä on osan kiinnittämiseen tarkoitetut lyhyet metalliset kierretangot.



KUVA 13. Tärinäeristimet kiinnitettynä iskumäntään ja vetojousielementtiin (3)

6.5.1 Lähtökohta

Vulkanoidun luonnonkumin maksimi suositeltu käyttölämpötila on noin 100 °C, joka on vain puolet asetetusta tavoitteesta. Liian korkean käyttölämpötilan vuoksi epäkuntoon menneissä vasaroissa olleet tärinäeristimet olivat edelleen toimivia, mutta niissä käytetty luonnonkumi oli kuitenkin halkeillut ja kovettunut jonkin verran. Vaikka osat eivät olleet vielä hajonneet, muutokset materiaalissa osoittivat, että ne olisivat todennäköisesti rikkoontuneet jatkuvan käytön myötä. (4, s. 205.)

6.5.2 Suunnittelu

Tärinäeristimeltä vaadittiin riittävää lämmönkestoa sekä kykyä eristää ja vaimentaa iskumännän synnyttämät terävät iskut vetojousielementiltä. Tämä vaati käytetyltä materiaalilta 200 °C:n lämmönkestoa ja joustokykyä. Liukulaakerin ja PPV:n mäntärakenteen muutosten myötä tiedettiin fluorimuovien omaavan riittävän lämpötilankeston, joten tärinäeristimen materiaaliksi päätettiin etsiä mahdollisia fluoripohjaisia elastomeerejä. Korvaavan osan etsintä ja jälleenmyyjiltä tiedustelu toivat ilmi, että kuumankestäviä elastomeerejä oli tarjolla niukasti ja tarpeenmukaisia metallikiinnittimillä varustettuja ei ollut saatavilla.

Etsinnän tuloksena löydettiin kuitenkin Viton-myyntinimikkeellä oleva fluorimuovi, joka oli sopivan kimmoisaa ja sen lämmönkesto ylsi tavoiteltuun 200 °C:seen. Materiaalia toimitettiin kuitenkin vain puolivalmistetankoina, joten eristiin olisi pitänyt kehittää kiinnitysmenetelmä kierretangoille ja komponentit olisi pitänyt valmistaa itse. Vaikka Viton olisi ollut käypä materiaali, sen soveltaminen käyttöön olisi tuonut mukanaan liikaa työtä saavutettuun hyötyyn nähden, joten materiaalin käyttö tärinäeristimessä hylättiin. (14.)

Koska vanhat tärinäeristimet kiinnittyivät jäykän teräslevyn kautta lähes suoraan metallisiin vetojousiin, haluttiin kokeilla, voidaanko myös tärinäeristimet korvata metallisilla jousilla. Jousi olisi yksinkertainen, toimiva ja joustava rakenne kumisylinterin tapaan ja metallin lämmönkesto olisi riittävä. Vanhan osan tilalle löydettiin riittävän jäykkiä ja kokonsa puolesta sopivia jousia samalta toimittajalta, joka toimitti jo vasaran vetojouset ja PPV:n mäntärakenteen sormijousilaatat.

Löydettyjä värähtelyjousia (kuva 14) päätettiin kokeilla käytännössä, koska ne kestivät vaadittua lämpötilaa, olivat yksinkertaisia ja helposti saatavilla tutulta toimittajalta.



KUVA 14. Tärinäeristimessä käytetty värähtelyjousi ilman kiinnikkeitä (31, s. 51)

6.5.3 Prototyypin valmistus ja testaus

Tärinäeristimen lämmönkestävä prototyyppi koostui ostettavasta värähtelyjousta ja kahdesta tavallisesta kiinnityspultista, jotka pujotettiin jousen sisään. Prototyypin kiinnitys vasaraan pulttien avulla oli helppoa, mutta pulttien pujottaminen jousen sisään vei aikaa ja oli pienten osien vuoksi tarpeettoman hankalaa, mikä teki käytetystä ratkaisusta kyseenalaisen suurempia valmistusmääriä ajatellen. Rakenne kuitenkin oli valmistettavissa (kuva 15), joten se päätettiin ottaa testaukseen, koska paremmin toimivaa valmista ratkaisua ei ollut saatavilla eikä vasaran muuta rakennetta haluttu lähteä muuttamaan ongelman kiertämiseksi.



KUVA 15. Värähtelyjouset kiinnitettynä vasaraan

Teräksestä valmistetun jousen lämmönkesto oli materiaalista johtuen riittävä, mutta värähtelyjousien testaus osoitti nopeasti niiden olevan toiminnaltaan niimensä veroisia. Kahden jousiparin kannatteleva välikappale jäi jokaisen iskun jälkeen värähtelemään pitkäksi aikaa elastomeerin vaimennusvaikutuksen puuttuessa. Vasaran toiminnassa tai iskun laadussa ei värisevästä jousikiinnityksestä huolimatta huomattu poikkeavuuksia, joten rakenne oli kuitenkin toimiva. Värähtelyjousten kiinnityspulteissa käytettiin varmuuden vuoksi kuumankestävää kierrelukitetta aukeamisen estämiseksi.

6.6 Joustoholkki

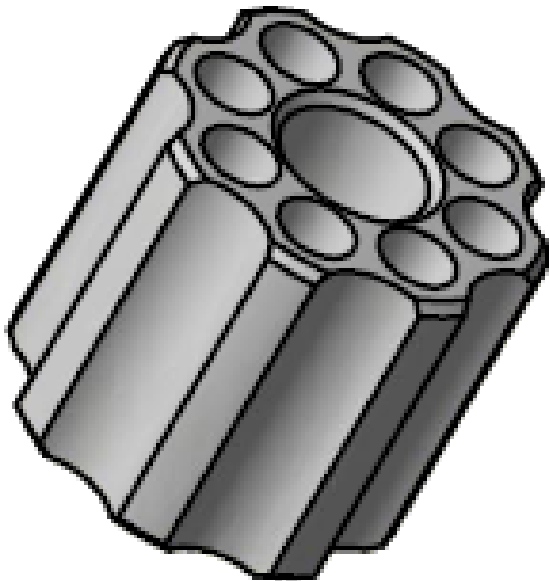
Joustoholkki on yksinkertainen elastomeeristä valmistettu paksuseinämainen putki, joka eristää vasaran rungon putken läpimenevästä lukitustapista. Vasara pidetään paikoillaan kiinnityksessään lukitustapilla, joka on kiinnitetty suoraan iskualasimeen. Vasaran isku johdetaan kohteeseen alasinta pitkin, joten vasaran isku kohdistuu lukitustappiin lähes täysivoimaisena. Vasaran prototyypissä lukitustappia ei ollut kiinnitetty joustavasti vasaran runkoon, jolloin ajan kuluessa toistuvat iskut väsyttivät lukitustapin poikki ja vasara irtosi kiinnityksestään.

6.6.1 Lähtötilanne

Alkuperäinen joustoholkki oli valmistettu luonnonkumista, minkä vuoksi sen lämmönkesto oli vanhan kumisen tärinäeristimen tapaan vain noin 100 °C. Korkean lämpötilan vuoksi rikkoontuneissa vasaroissa myös vanhan joustoholkin kumi-materiaalin huomattiin kovettuneen ja halkeilleen. Joustoholkin lämmönkestävän materiaalin etsintä tapahtui osittain samaan aikaan tärinäeristimen materiaalietsinnän kanssa, joten voitiin hyödyntää sen aikana hankittua tietoa Viton-materiaalista. Tärinäeristimen materiaalivalinnan aikana löydetty Viton-elasto-meri oli joustavaa ja omasi riittävän lämmönkeston, mikä teki siitä hyvän vaihtoehdon käytettäväksi myös uuden joustoholkin materiaalina.

6.6.2 Suunnittelu ja testaus

Ennen Viton-materiaalin löytämistä ja valintaa uuden joustoholkin materiaaliksi kokeiltiin muita materiaaleja ja muotogeometrioita, jotka eivät kuitenkaan osoittautuneet toimiviksi vaihtoehdoiksi. Uuden liukulaakerin ja PPV:n materiaaliksi valittu PTFE oli ensimmäinen looginen valinta, koska materiaalilla oli riittävä lämmönkesto. PTFE ei kuitenkaan ollut luonnostaan riittävän joustavaa, vaan joustavuus saavutettiin suunnittelemalla kappaleen geometria säteissuunnassa joustavaksi käyttämällä rakenteessa reikiä ja uria (kuva 16).



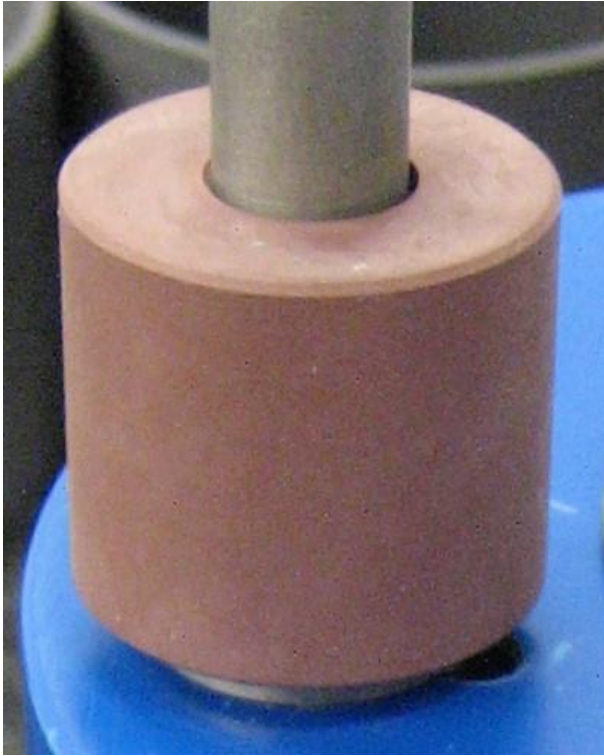
KUVA 16. PTFE joustoholkin suunniteltu muoto

Kappaletta testattaessa huomattiin, ettei PTFE ollut riittävän kimmoisaa. Jonkin aikaa PTFE-joustoholkki toimi halutusti, mutta pidemmän ajan kuluessa materiaali alkoi virumaan kuormituksen alla ja menetti muotonsa. Holkissa kokeiltu PTFE ei palautunut alkuperäiseen muotoonsa pitkäaikaisen staattisen kuormituksen jälkeen, vaan painui kasaan päästäen lukitustapin osumaan vasaran runkoon. Testauksen aikana tapin kontakti vasaran metallirunkoon aiheutti nopeasti tapin murtumisen ja katkeamisen.

PTFE-holkin testauksesta saadun kokemuksen myötä päätettiin käyttää riittävän kimmoisaa materiaalia. Teräksisen apuholkin käyttö lukitustapin ympärillä mahdollisti sopivan kokoisen silikoniputkipalan käyttämisen elastisena eristeenä vasaran rungon ja lukitustappia ympäröivän apuholkin välissä. Silikoniputken lämmönkesto oli riittävä ja rakenne vaikutti hyvältä. Sen valmistus oli helppoa ja se vastasi jäykkyydeltään ja joustavuudeltaan alkuperäistä holkkia.

Testin aikana rakenne ei painunut kasaan kuten PTFE, mutta putken laminoitu rakenne hajosi toistuvan liikkeen aiheuttaman elastomeereille tyypillisen hystereesilämpenemisen takia ja putki muuttui silikonimuruksi. Putken rakenteen hajotessa sen materiaalipaksuus pieneni ja vasara pääsi kasvavalla amplitudilla liikkumaan lukitustappiin nähden, mikä katkaisi tapin. (4, s. 205.)

Joustoholkin yksinkertainen sylinteriputkimainen muotogeometria teki Viton-materiaaliaihion käyttämisen helpoksi. Valmistajan valikoimissa oli putkea, jonka sisä- ja ulkohalkaisijat vastasivat holkin mittoja noin puolen millimetrin tarkkuudella, joten valmistus oli helppoa katkaisemalla aihio oikeaan mittaan. Jälleenyömyjä tarjosi materiaalin lisäksi koneistuspalvelua, joten uudet holkit saatiin tilattua asennusvalmiina (kuva 17).



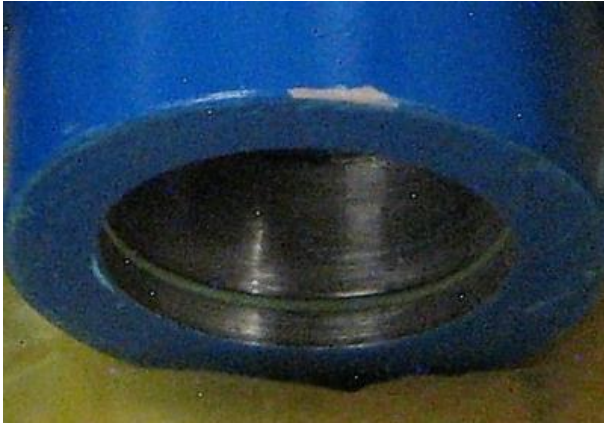
KUVA 17. Asennusvalmis Viton-joustoholkki lukitustapin ympärillä

6.6.3 Lopputulos

Testien jälkeen päädyttiin käyttämään Viton-elastomeeriä joustoholkin materiaalina, joka omaisi riittävän lämmönkeston ja jousto-ominaisuudet. Kappaletta testattiin samaan aikaan vasaran muiden osien kanssa, jolloin toistoja kertyi riittävästi. Testeissä yksinkertainen osa suoriutui hyvin sekä normaalilämpötilassa että kuumissa olosuhteissa muuttamatta muotoaan tai rikkoontumatta.

6.7 Tiivisterengas

Tiivisterengas on normaali o-rengas, jota käytetään paineilman tiivistämiseen alasintangon ja siihen kiinnitettävän vasaran rungon välissä (kuva 18). Vanha tiivisterengas oli valmistettu luonnonkumista, joten sen tiedettiin vasaran muiden kumikomponenttien tutkimisen perusteella olevan soveltumaton käytettäväksi kuumissa olosuhteissa.



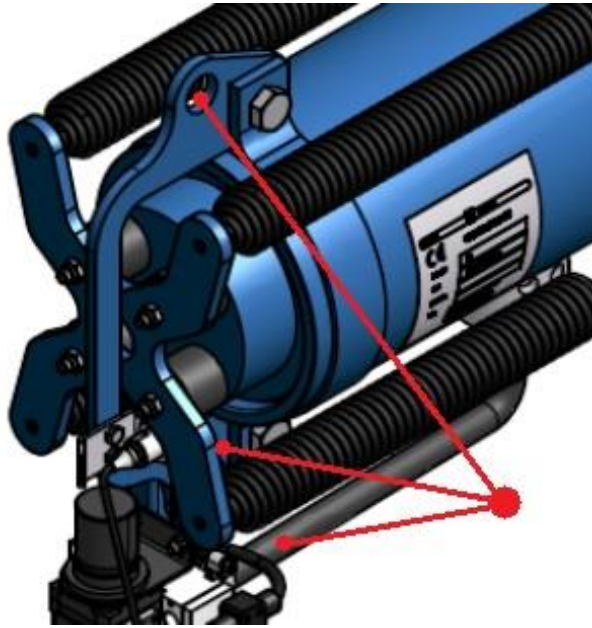
KUVA 18. Viton-tiivisterengas asennettuna vasaran runkoon

Tiivisteiden vaihtaminen lämpöä kestävämpään versioon oli suoraviivainen toimenpide, koska voitiin hyödyntää aikaisemmin kumista ja Viton-elastomeeristä hankittua materiaalitietoa. Tiedustelun perusteella Viton-fluorikumista valmistettuja sopivan kokoisia o-renkaita oli hyvin saatavilla usealta kotimaiselta toimittajalta, joten niiden käyttöönotto oli helppo tehdä.

Uudelle tiivisteelle ei suoritettu pitkää kattavaa testiajkoa, vaan testaus suoritettiin nopeutetusti pääosin kahden päivän mittaisen kuumetestin aikana. Vanha tiiviste tiedettiin toimivaksi normaaleissa käyttölämpötiloissa, joten uudenkin tiivisteiden oletettiin toimivan samoin, koska geometriaa ei oltu muokattu ja materiaali vastasi joustavuudeltaan vanhaa. Uuden tiivisteiden pitkäikäisyys testattiin kuumissa olosuhteissa ilman ongelmia, joten se voitiin ottaa käyttöön turvallisesti.

6.8 Paineilmaletku ja läpivientikumi

Paineilmaletkulla johdetaan asennuskohteen paineilmajärjestelmän kehittämä paineilma vasaran käyttövoimaksi. Järjestelmän paine tuodaan ensin letkua pitkin painesäätimelle, josta se viedään edelleen PPV:n läpi vasaran käyttöön. Läpivientikumi estää vasaran toiminnasta syntyvien tärähdysten johtumisen painesäätimelle eristämällä vasaran rungon painesäätimestä joustavalla kiinnityksellä (kuva 19).



KUVA 19. Paineilmaletku ja läpivientikumit vasarassa

Paineilmaletku ja läpivientikumi ovat molemmat hyllytavarana ostettavia vasaran osia. Molemmat osat ovat valmistettu kumimateriaalista, mutta poiketen vasaran muista kumiosista niissä ei havaittu korkeasta lämpötilasta aiheutuvaa vaurioitumista. Visuaalisesti tarkasteltuna käytetyt osat olivat lähellä uusia eikä materiaalin kimmoisuus ollut muuttunut. Läpivientikumissa käytetystä materiaalista ei valmistajalla ollut selvitystä saatavilla, joten sen tarkkaa lämmönkestoa ei tiedetty. Paineilmaletkun suositeltu suurin käyttölämpötila oli tuotetiedon mukaan riittämätön 70 °C, mutta materiaali näytti selviävän korkeammista lämpötiloista ongelmitta.

Molempien osien asennustarve on riippuvainen asennuskohteen paineilman syötöstä sekä vasaran kiinnitystavasta. Paineilmaletkun pituus voi vaihdella eri asennuskohteissa riippuen paineilman syöttöjärjestelmästä. Paineensäädin saattaa kiinnittyä vasaran rungon sijaan kauemmas asennuspisteestä tai se voi myös jäädä asennuksesta kokonaan pois, jos esimerkiksi laitoksen oma säädintukki jakaa ilmaa useammalle vasaralle. Näissä tapauksissa vasaran tärähdykset eivät kulkeudu painesäätimelle, joten läpivientikumille ei ole tarvetta. Myös paineletkuja saatetaan irrottaa ja vaihtaa ajan kuluessa esimerkiksi kulkemisen helpottamiseksi laitoksen huollon yhteydessä.

Vasarassa käytetyn letkun ja läpivientikumin 200 °C:n lämmönkesto ei ollut varmaa, minkä vuoksi osille päätettiin etsiä lämpötilaa kestävä vaihtoehto. Etsinnän tuloksena löydettiin lämmönkestoltaan ja ominaisuuksiltaan riittävää valmiina saatavaa silikonipohjaista paineilmaletkua ja Viton-elastomeeristä valmistettuja läpivientikumeja. Vanhat osat kuitenkin näyttivät kestävän käyttöä kuukausien olosuhteissa ja niiden käyttö vasaran asennuksen yhteydessä oli vaihtelevaa, joten kaikkia varastoon hankittuja osia ei lähdetty vaihtamaan uusiin. Koska osat olivat helposti vaihdettavissa, päätettiin vanhojen osien käyttöä jatkaa normaalisti ja vaihtaa niitä lämmönkestäviin sitä mukaa kun tarve ilmenee.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tehdyn tuotekehitysprosessin aikana paineilmasasaran toimintavarmuutta parannettiin kuumissa käyttöolosuhteissa. Työn tuloksena vasara saatiin tavoitteen mukaisesti toimimaan luotettavasti hieman yli 200 °C:n lämpötiloissa, minkä seurauksena päivitettyä iskuvasaraa pystyttiin käyttämään aiempaa kuumemmissa asennuskohteissa. Näillä asennusmahdollisuuksilla saavutettiin kilpailuetua muihin vastaaviin laitteisiin nähden.

Nuohouslaitteen lämmönkestoa parannettiin vaihtamalla lämpöominaisuuksiltaan riittämättömät polymeerimateriaalit paremmin kuumuutta kestäviin PTFE-fluoripolymeerilaatuihin. Vasaran rakennegeometriaan tehtiin pieniä muutoksia, joilla parannettiin vasaran paineilmatiiveyttä. Joidenkin komponenttien toimintoja yksinkertaistettiin, jolloin uusista materiaaleista saatiin paras hyöty irti.

Materiaalin valintaprosessi vaati aikaa, koska saatavilla olevia mahdollisia materiaaleja oli tarjolla paljon. Valintaprosessi toteutettiin laatimalla luettelo laadituista ominaisuuksista ja eliminoimalla soveltumattomat materiaalit ensin ryhmäperusteisesti ja myöhemmin yksityiskohtaisesti rajatulta alueelta. Yhden komponentin kehityksessä hankittua tietoa voitiin käyttää seuraavien komponenttien kehitykseen, mikä nopeutti prosessin loppupuolta.

Valmistettujen prototyyppiosien testausta varten suunniteltiin ja rakennettiin kuumia käyttöolosuhteita simuloiva testilaitteisto. Laitteessa osille suoritettiin yhteensä yli miljoona käyttökiertoa, jotta saatiin selville mahdolliset ennakoimattomat ongelmat. Testauksen aikana jotkin komponentit rikkoontuivat materiaalin tai rakenteen ongelman seurauksena ja näistä komponenteista jouduttiin suunnittelemaan ja valmistamaan uudet parannetut versiot toimivan lopputuloksen saavuttamiseksi.

Opinnäytetyön aikana suoritettu nuohouslaitteen kehitystyö tarjosi mielenkiintoisen ja kattavan kokemuksen konkreettisen tuotekehitystyön suunnittelu- ja toteutusvaiheista. Työ eteni suunnitelman mukaisesti, mutta aikatauluja sovitettiin

uudelleen rakennetestsauksessa ilmenneiden ongelmien takia. Projektin tavoitteet saatiin täytettyä, päivitetty vasara toimi kuten haluttiin ja työn tilaaja otti kehitetyn rakenteen käyttöön. Näillä lopputuloksilla projekti oli onnistunut.

LÄHTEET

1. Yrityksestä – Global Boiler Works Oy. 2016. Saatavissa: www.gbw.fi. Hakupäivä 1.12.2016.
2. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita.
3. Piirustusarkisto. 2016. Oulu. Global Boiler Works Oy.
4. Laitinen, Esko – Niinimäki, Matti – Tiainen, Tuomo – Tiilikka, Pentti – Tuomikoski, Juho – Koivisto, Kaarlo. 2008. Konetekniikan Materiaalioppi. Helsinki. Edita.
5. Haverila, Matti – Uusi-Rauva, Erkki – Kouri, Ilkka – Miettinen, Asko 2009. Teollisuustalous. Tampere. Infacs johtamistekniikka.
6. 14. Aine laajenee lämmitessään. Opetusmateriaalista Karkkulainen, Juha – Karkkulainen, Olli – Kinnunen, Ari. 2014. eFysiikka 8. Peda.net. Saatavissa: <https://peda.net/naantali/velkuan-koulu/oppiaineet2/fysiikka/efysiikka-83f/1all>. Hakupäivä 18.12.2016.
7. Materials brochure. 2015. Nylacast. Saatavissa: <https://www.nylacast.com/wp-content/uploads/2015/08/nylacast-nylube-technical-data.pdf>. Hakupäivä 13.11.2016.
8. Nylacast Nylube. 2015. Nylacast. Saatavissa: <https://www.nylacast.com/wp-content/uploads/2015/08/nylacast-nylube-leaflet.pdf>. Hakupäivä 13.11.2016.
9. POM tekniset tiedot. Vink. Saatavissa: http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/pom/vink_pom_esite_a4_web-2.pdf. Hakupäivä 22.10.2016.
10. Järvinen, Pasi – Jokinen, Liisa – Teppola, Kari – Mannermaa, Tuula. 2008. Uusi Muovitieto. Söderkulla. Muovifakta.
11. PTFE tekniset tiedot. Vink. Saatavissa: http://www.tuotteet.vink.fi/media/tuotteet/ptfe/vink_ptfe_esite_a4_web.pdf. Hakupäivä 21.10.2016.

12. NR – luonnonkumit. Ravelast. Saatavissa: <http://www.ravelast.com/tutkimus-ja-kehitys/kumi-elastomeerit/nr-kumit.html>. Hakupäivä 14.11.2016.
13. Kumilaatujen ominaisuudet. Ravelast. Saatavissa: <http://www.ravelast.com/media/esitykset/kumityyppien-ominaisuudet.pdf>. Hakupäivä 14.11.2016.
14. FPM – fluorikumi. Ravelast. Saatavissa: <http://www.ravelast.com/tutkimus-ja-kehitys/kumi-elastomeerit/fpm.html>. Hakupäivä 14.11.2016.
15. Järvinen, Pasi. 2000. Muovin suomalainen käsikirja. Helsinki. Muovifakta Oy.
16. Muovilevyt ja –tangot. Vink. Saatavissa: <http://www.vink.fi/tuotteet/muovilevyt-ja-tangot>. Hakupäivä 14.11.2016.
17. Seostamaton PTFE. Irpola Oy. Saatavissa: <https://irpola.fi/levyt/seostamaton-ptfe.html>. Hakupäivä 17.11.2016.
18. Product and application guide. General and Advanced Engineering Plastics. Quadrant. Saatavissa: http://www.etra.fi/uploads/pdf/Prod_ApplGuideE.pdf#page=1. Hakupäivä 18.12.2016.
19. Ampreg 21 Epoxy wet laminating system. 2010. Kevra Oy. Saatavissa: http://www.kevra.fi/wp-content/uploads/Ampreg_21_2010.pdf. Hakupäivä 18.11.2016.
20. Lujitteiden ominaisuuksia. Kevra Oy. Saatavissa: <http://www.kevra.fi/tuotteet/lujitteet/lujitteiden-ominaisuuksia>. Hakupäivä 18.11.2016.
21. SUSTATRON PPS technical data sheet. 2014. Röchling. Saatavissa: <http://www.vink.fi/media/wysiwyg/Datasheets/Datasheet-SUSTATRON-PPS.pdf>. Hakupäivä 18.11.2016.
22. SUSTAPEEK technical data sheet. 2014. Röchling. Saatavissa: <http://www.vink.fi/media/wysiwyg/Datasheets/Datasheet-SUSTAPEEK.pdf>. Hakupäivä 18.11.2016.

23. PTFE +25% hiili. Irpola Oy. Saatavissa: <https://irpola.fi/putket/ptfe-25-hiili.html>. Hakupäivä 17.11.2016.
24. PTFE +25% lasi. Irpola Oy. Saatavissa: <https://irpola.fi/putket/ptfe-25-lasi.html>. Hakupäivä 17.11.2016.
25. Mäkelä, Mikko – Soininen, Lauri – Tuomola, Seppo – Öistämö, Juhani. 2000. Tekniikan kaavasto. Tampere. Tammertekniikka Oy.
26. Piston rings – kuva. Engine basics. Saatavissa: <http://www.engine-basics.com/Engine%20Basics%20Root%20Folder/Images/Piston%20Rings.png>. Hakupäivä 18.11.2016.
27. Piston rings. Engine basics. Saatavissa: <http://www.enginebasics.com/Engine%20Basics%20Root%20Folder/Piston%20Rings.html>. Hakupäivä 18.11.2016.
28. Aluminium Alloy – commercial alloy – 6061 – T6 extrusions. 2016. Aalco. Saatavissa: www.aalco.co.uk/datasheets/Aalco-Metals-Ltd_Aluminium-Alloy-6061-T6-Extrusions_145.pdf.ashx. Hakupäivä 24.10.2016.
29. Tärinäeristys. Christian Berner. Saatavissa: <http://www.christianberner.fi/products/tarinaneristys-2/sylomer-sylodyn-1>. Hakupäivä 27.10.2016
30. Finger spring washer. Lesjöfors. Saatavissa: <http://catalog.lesjoforsab.com/disc-springs/finger-spring-washer>. Hakupäivä 25.10.2016.
31. Jousi on nerokas keksintö. Esite jousista. Lesjöfors. Saatavissa: http://www.lesjoforsab.com/teknisk-information/standard_stock_springs_catalogue_13_-_finnish_id1106.pdf. Hakupäivä 18.12.2016.