

Valuraudat

Seija Meskanen, Teknillinen korkeakoulu

Eero Niini, Teknillinen korkeakoulu

Valurauta on raudan, hiilen, piin, fosforin, muiden seosaineiden ja epäpuhtausaineiden muodostama metalliseos. Valuraudat jaetaan seostamattomiin, niukkaseosteisiin ja runsaasti seostettuihin valurautoihin. Hiilipitoisuus on yli 2 % eli huomattavasti korkeampi kuin tavallisilla teräksillä. Hiilipitoisuus on korkeampi kuin rauta pystyy liuottamaan. Tästä johtuen valuraudoissa on metalliseen, teräksen kaltaiseen perusmassaan eli matriisiin jakautuneena hiilivaltaisia faaseja tai yhdisteitä: grafiittia tai karbideja. Valuraudat eroavatkin teräksistä metallurgisesti siinä, että teräkset voidaan saattaa kiinteässä tilassa tietyssä korotetussa lämpötilassa kokonaan austeniittisiksi, mutta valuraudassa on kiinteässä tilassa lämpötilan korottamisesta huolimatta aina läsnä joko metastabiileja karbideja tai stabiilia grafiittia.

Grafiittisten valurautojen perustyyppit ovat:

- suomugrafiittivalurauta (GJL)
- tylppägrafiittivalurauta (GJV)
- pallografiittivalurauta (GJS)

Suomu- ja pallografiittivaluraudat ovat ylivoimaisesti hyödynnetyimpiä. Grafiittisissa valuraudoissa valuraudan matriisissa on grafiitin kiteytymistä ja valun jähmettymistä riippuvalla tavalla muodostuneita ja jakautuneita grafiittipartikkeleita, joiden muotoon nimitykset viittaavat. Grafiittisten valurautojen ominaisuudet määräytyvät grafiitin koon, jakautumistavan ja muodon mukaan sekä matriisin mikrorakenteen perusteella.

Valurautoja, joissa ei ole vapaata hiiltä grafiittina ja jotka ovat jähmettyneet valun yhteydessä valtarakenteeltaan karbidisina eli ledeburiittisina, nimitetään valkoisiksi valuraudoiksi (GJN). Jähmettymisen yhteydessä niissä ei ole päässyt tapahtumaan grafiitin kiteytymistä. Tällaisen kovan ja hauraan valuraudan murtopinta näyttää vaalealta, mistä nimitys valkoinen valurauta erotuksena nimitykseen "harmaa(valu)rauta". Harmaalla raudalla on alun perin tarkoitettu erityisesti suomugrafiittivalurautaa, jonka grafiittirakennetta pitkin kulkevan murtumapolku antaa tumman himmeän murtopinnan.

Lämpökäsittelmällä valkoista valurautaa saadaan valmistettua adusoitua eli temperrautaa (GJM). Adusoitu valurauta on hitsattavaa ja muovattavaa. Sen käyttö on kuitenkin vähenemässä. Suomu- ja pallografiittivalurautaa lämpökäsittelmällä valmistetaan austemperoituja valurautoja (AGI ja ADI), joista ADI eli austemeroitu pallografiittivalurauta on käytetympää.

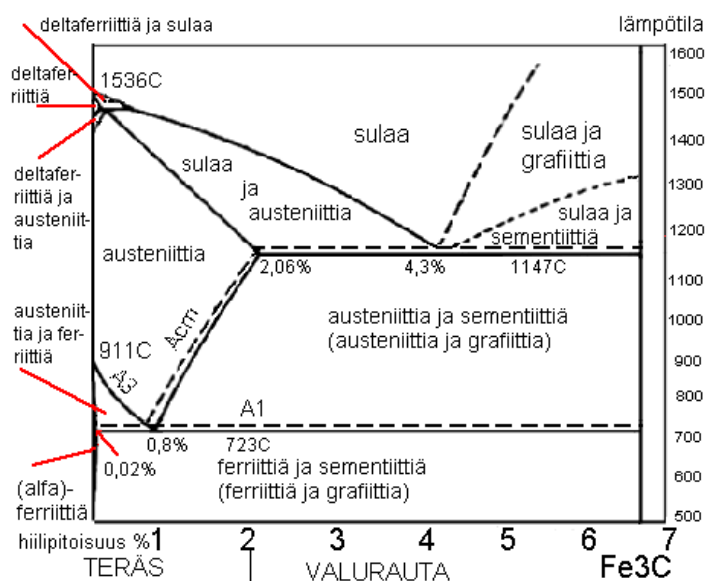
Valurautojen mikrorakenteet ja niiden määräytyminen valussa

Valurautojen tärkeimmät seosaineet ovat hiili (C) ja pii (Si). Grafiittisissa valuraudoissa runsaan hiili- ja piipitoisuuden tarkoitus on saattaa valuraudan koostumus lähelle eutektista koostumusta, mikä alentaa sulatuslämpötilaa, parantaa juoksevuuksia sekä myös käytännössä mahdollistaa valamisen grafiittisena. Täysin eutektinen valurauta jähmettyy sulasta edullisella tavalla yhdessä tietyssä lämpötilassa so. eutektisessa lämpötilassa raudan ja grafiitin (tai rautakarbidiin) seokseksi ilman ns. puuroaluetta.

Valuraudat sisältävät yleensä aina myös mangaania (Mn) ja fosforia (P). Mangaanin avulla sidotaan ylimääräinen rikki sekä voidaan myös lisätä karkenevuutta. Muita seosaineita voidaan hyödyntää

mm. jähmettymistapaan vaikuttamiseksi tai metallisen matriisin tyyppin ja ominaisuuksien kontrolloimiseksi esimerkiksi matriisin kovuutta ja karkenevuutta lisäämällä. Puhutaankin karbidoivista tai grafitoivista seosaineista ja toisaalta ferriittiä tai perliittiä suosivista seosaineista. Samoin kuin teräksissä eri seosainein voidaan myös saada aikaan austeniittinen mikrorakenne (esim. korkealla Ni-pitoisuudella), parantaa kuumen- tai tulenkestävyyttä (esim. Si tai Cr) tai korroosionkestävyyttä (Cr) tai helpottaa karkenemista martensiitiksi tai synnyttää karbideja (esim. Cr, V, Mo).

Alieutektisen raudan jähmettyminen alkaa ensin austeniittina, jonka osuus kasvaa jäähtymisen edetessä (vrt. alla olevaa kuvaa ja kuvaa sivulla "grafiittirakenne"), ja vasta saavutettaessa eutektinen lämpötila jäljellä oleva sula muodostaa austeniitin ja grafiitin (tai karbidin) seosta. Ylieutektinen rauta alkaa vastaavasti ensin jähmettyä grafiittina. Parhaat valuominaisuudet saavutetaan yleensä aina eutektisellä koostumuksella.



Kuva 1. Stabiilin tasapainosysteemin mukainen Fe-C -tasapainopiirros valuraudoille tavanomaisella piiipitoisuudella Si = 2,5 %.

Huomaa ylläolevassa kuvassa, että piirros on tietyssä määrin monimutkaisempi kuin puhtaan binäärisen Fe-C-seoksen vastaava.

Eutektinen koostumus saavutetaan hiilipitoisuudella $C = n. 3,5 \%$. Tällöin $CE = 3,5 \% C + 1/3 (2,5 \% Si) = n. 4,3$. Kuvaan on merkitty alieutektinen koostumus (I) ja likimain eutektinen koostumus (II). Alieutektisellä koostumuksella (kuvassa $C < 3,5 \%$) jähmettyminen alkaa austeniitin muodostuksella jo ennen eutektisen lämpötilan (TE) saavuttamista. Grafiitin (tai karbidien) muodostus voi alkaa vasta, kun eutektinen lämpötila on saavutettu.

Hiilikvivalenttiarvo, CE, kuvaa valuraudan koostumusta eutektiseen koostumukseen nähden ja on tärkeä parametri juuri valuraudan mikrorakenteen määräytymisen, valettavuuden ja ominaisuuksien ymmärtämisen ja ennakoimisen näkökulmasta. Hiilikvivalentin laskennassa otetaan hiilen ohella huomioon myös pii ja fosfori, joilla on hiilen kanssa voimakas ja samansuuntainen vaikutus.

$$CE \% = C \% + 1/3 \times (Si \% + P \%)$$

Hiilikvivalentin avulla ilmoitetaan itse asiassa se nimellinen hiilimäärä, joka pelkällä (binäärisellä) Fe-C-seoksella tulisi olla eutektiseen koostumukseen nähden vastaavassa tilassa. Valurauta on eutektista (ts. jähmettyy eutektisesti) kun $CE=4,3$.

Valuraudan ominaisuuksien määräytymiselle tärkeintä on se, minkälaisesta grafiittirakenteesta ja matriisista se koostuu. Grafiittiset valuraudat erotellaan toisistaan ensisijaisesti hiilen esiintymistavan mukaan siksi, että valurautojen mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet ovat erinomaisen voimakkaasti grafiitin esiintymistavasta riippuvaisia.

Jos hiili on valetussa rakenteessa (so. kaksikulotteisessa mikrorakenneleikkauksessa tarkastellen) suomumaisina grafiittialueina, puhutaan suomugrafiittivaluraudasta (GJL) (vanhahtavasti harmaaraudasta). Grafiitti voi myös esiintyä pallomaisena pallografiittivaluraudassa (GJS). Tylppägrafiittivaluraudaksi (GJV) kutsutaan valurautaa, jossa grafiitti esiintyy suomumaisina, mutta tavallista suomugrafiittia paksumpina ja pyöreämpimuotoisina suomuina. Mekaanisen kestävyuden kannalta pallografiitti edustaa edullisinta muotoa ja johtaa siten mm. parhaimpiin lujuus-, sitkeys- ja väsymisominaisuuksiin. Tylppägrafiittivalurauta edustaa sekä mikrorakenteellisesti että useimpien ominaisuuksiensa kannalta pallografiittivaluraudan ja mekaanisesti heikoimman ja hauraimman suomugrafiittiraudan välimuotoa.

Hiilen esiintymistapa määräytyy valuraudan jähmettymisen yhteydessä, ja siihen voidaan vaikuttaa koostumuksella, jossain määrin valun ja valujärjestelyn suunnittelulla sekä erityisesti sulankäsittelyllä (ympäryksellä ja palloituskäsittelyllä), muttei pääsääntöisesti enää valun jälkeen (poikkeuksena tempervaluraudan adusointi).

Grafiittisten valurautojen ja erityisesti pallografiittivaluraudan ominaisuudet riippuvat myös metallisen perusmassan eli matriisin tyypistä ja ominaisuuksista. Matriisin tyyppiin ja kovuuteen voidaan vaikuttaa koostumuksella ja jossain määrin valujärjestelyllä sekä vielä valun jälkeen tehokkaasti myös lämpökäsittelyillä. Standardeissa valurautoja käsitellään ensisijaisesti lujuus- tai kovuusluokitukseen perustuen. Muut mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet riippuvat kuitenkin mikrorakenteesta siten, ettei pelkkä lujuus- tai kovuusluokitus ole yleensä riittävä optimoitaessa materiaalinvalintaa tai -käsittelyä. Valuraudan määrittelyä onkin hyvin usein välttämätöntä tämentää vähintäinkin nimeämällä grafiittirakenteen tyyppin ohella myös matriisin tyyppi (ts. ferriittinen, perliittinen, ausferriittinen, martensiittinen, austeniittinen tai edellisten yhdistelmä, esim. ferriittis-perliittinen pallografiittivalurauta jne.).

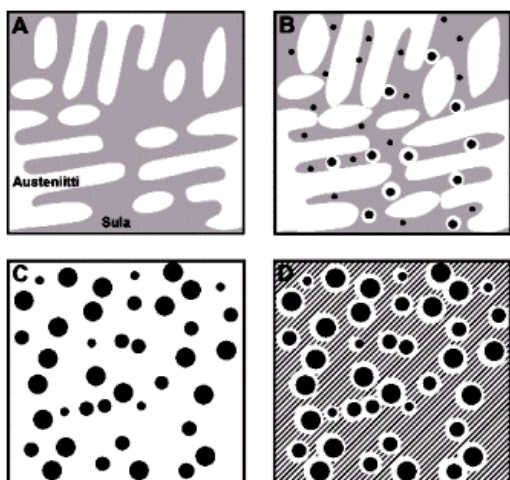
Käytettävissä olevaa laajaa erilaisten valurautojen valikoimaa sekä valutuotteen suunnittelijan tehtävää materiaalinvalinnassa ja ominaisuusyhdistelmien tarkastelussa voidaan helpottaa havainnollistamalla valurautojen eri tyyppisiä kaksikulotteisella matriisikaaviolla, jonka kategorioiden käytetään (1) grafiittirakenteen tyyppiä ja (2) metallisen matriisin tyyppiä. Eri ominaisuuksien riippuvuudet grafiittirakennematriisi-yhdistelmistä voidaan yleensä osoittaa havainnollisesti mainitusta kaaviosta. Suunnittelijan tavoittelemat materiaaliominaisuudet ovat kuitenkin usein matriisista ja grafiittirakenteesta monimutkaisesti riippuvia yhdistelmiä, jolloin tarkastelua ja spesifikaatioita on edelleen tarkennettava mikrorakenteellisiin yksityiskohtiin kuten matriisin kovuuteen ja karbidien läsnäoloon jne.

2 \ 1	Ei-grafiittia (valk.valur.)	Pallografiitti	Tyypägrafiitti	Suomugrafiitti
Martensiitti				Martensiittinen suomugrafiitti-valurauta
Ausferriitti		Ausferriittinen pallografiitti-valurauta, ADI	esim. SITKEYS	
Perliitti				
Ferriitti				Ferriittinen suomugrafiitti-valurauta
Austeniitti		Austeniittinen pallografiitti-valurauta		esim. KQVUUS tai LUJUUS

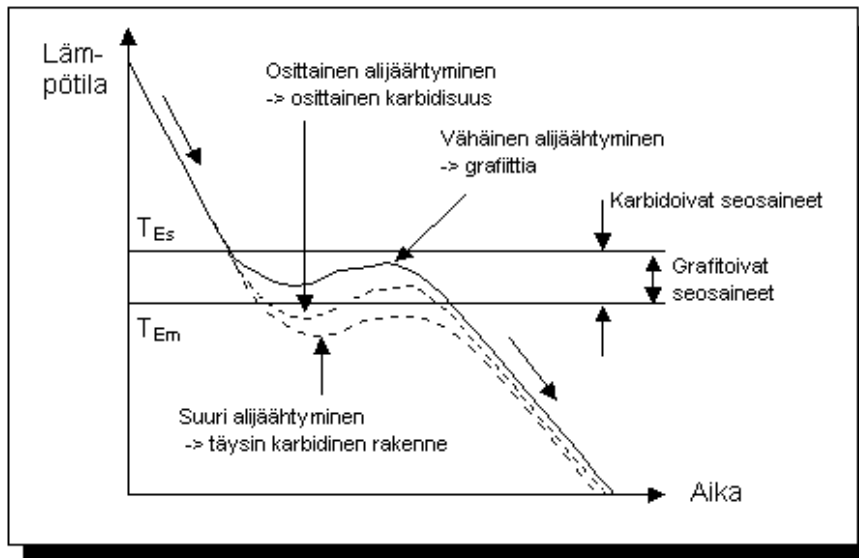
Kuva 2. Valuraudan grafiittirakenne-matriisi-kaavio. (Kaavioon ei ole otettu mukaan Suomessa varsinkin vähän käytettyjä tempervalurautoja.)

Grafiittirakenne

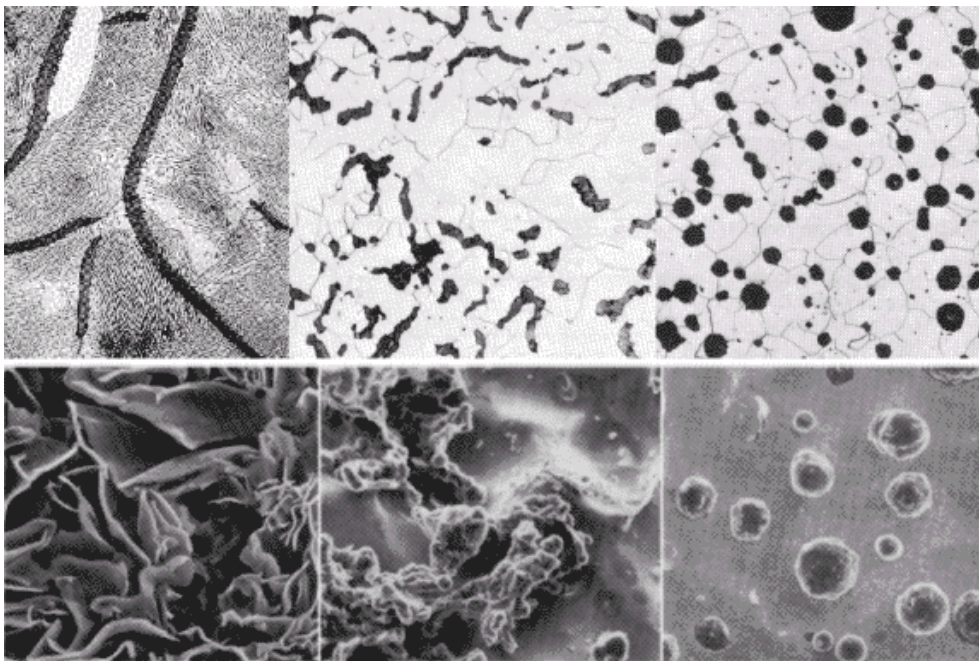
Sula valurauta sisältää runsaasti hiiltä eikä kaikki hiili voi jäähmettymisen yhteydessä jäädä valuraudan metalliseen matriisiin. Sula valurauta jäähmettyy jäähmettymisolosuhteista riippuen siten paitsi austeniitiksi - austeniitin ohella myös joko grafiitiksi tai karbideiksi. Jäähmettyminen alkaa yleensä ensin austeniitin kiteytymisellä sulasta (ns. dendriitteinä). Jäähdytymisen edetessä, jäähmettyneen ns. esieutektisen austeniitin määrän kasvaessa ja raudan saavuttaessa (stabiilin tasapainosysteemin mukaisen) eutektisen lämpötilan jäljellä oleva sula muuttuu eutektisessä reaktiossa grafiitiksi ja austeniitiksi. Grafiitin kiteytyminen sulasta mahdollistuu periaatteessa stabiilin systeemin mukaisessa eutektisessä lämpötilassa (TEs) ennen (so. korkeammassa lämpötilassa) kuin karbidien muodostuminen. Kun eutektinen reaktio ja grafiitin kiteytyminen käynnistyy, vapautuu lämpöä ja valoksen (paikallinen) jäähtyminen pysähtyy tai ainakin hidastuu reaktion ajaksi. Näin valos ei välttämättä saavuta metastabiilin tasapainosysteemin mukaista eutektista lämpötilaa (TEM), jossa karbidien muodostuminen mahdollistuu, ennen kuin kaikki loppusula on jo muuttunut kiinteäksi austeniitti-grafiitti-faasiseokseksi. Tällä tavoin mikrorakenteeseen syntyy jo olemassa olevien austeniittialueiden väliin vain austeniittia ja grafiittia.



Kuva 3. Alieutektisen (perliittis-ferriittisen) pallografiittivaluraudan mikrorakenteen muodostumisen päävaiheet valun jäähmettymisen ja jäähtymisen yhteydessä: (Kirjaimet viittaavat kuvan 1 tasapainopiirrookseen.) A: Sulan jäähmettyminen alkaa austeniitidendriittien (kuvassa valk.) muodostuksella. B: Austeniitin osuus kasvaa ja jäljellä olevan sulan (harmaa) määrä pienenee, kunnes saavutetaan eutektinen lämpötila, jossa loppusula muuttuu eutektisessä reaktiossa austeniitiksi ja grafiitiksi (musta). Grafiittipallot kasvavat vastaavasti kasvavan austeniittivaipan sisällä. C: Eutektisen reaktion jälkeen rakenne koostuu grafiittipalloista austeniittisessa matriisissa. D: Austeniitti hajaantuu eutektoidisessa reaktiossa, jolloin mm. jäähtymisnopeudesta riippuen voidaan saavuttaa erilaisia matriisin mikrorakenteita, tyypillisesti perliittiä (viivoitettu). Etenkin grafiitin yhteyteen syntyy kuitenkin helposti myös ferriittiä (valk.) (Ns. Bull's-Eye-mikrorakenne).



Kuva 4. Valuraudan jäähtymiskäyrä eutektisen reaktion kohdalla.



Kuva 5. Suomu-, tylppä- ja pallografiittivaluraudan tyypillisiä grafiittirakenteita (vasemmalta oikealle). Yläriivissä optiset mikroskopiakuvat (kaksidimensioisista) mikrorakennehieistä (joista ensimmäisessä perliittinen suomugrafiittirakenne, muissa ferriittiset

Grafiitin kiteytyminen voi kuitenkin olla estynyt tai ulkoinen jäähdytysvaikutus olla niin suuri, että valo tai sen tietty kohta ehtii alijäähtyä ennen eutektisen reaktion käynnistymistä riittävän suurella voimalla. Alijäähtymisen ansiosta saavutetaan metastabiilin rauta-karbidi-systeemin mukainen karbidien muodostumisen lämpötila (T_{Em}) ennen kuin grafiitin kiteytyminen pääsee käyntiin. Tällöin alkaa raudan karbidien kiteytyminen, mikä tapahtuu kineettisesti helpommin kuin grafiitin kiteytyminen. Tilanteeseen vaikuttavat myös grafitoiva (esim. Ni, Cu) tai karbidoiva (esim. Cr, Mo,

V) seostus. Seosaineet suosivat sulassa olevan hiilen kiteytymistä joko grafiitiksi tai sementtiitiksi vaikuttamalla grafiitin ja karbidien muodostumisen lämpötiloihin ts. siihen, miten suuri em. reaktio-lämpötilojen väli (TEs-TE_m) on ts. miten suuri alijäähtyminen tarvitaan karbidien syntymiseen.

Nopea jäähtyminen ja heikot grafiitin kiteytymisedellytykset avustavat alijäähtymistä ja edistävät siten karbidisuutta. Käytännön valuissa edellytykset karbidien muodostumiselle helpottuvat suurella jäähtymisnopeudella sekä alhaisella piipitoisuudella ja karbideja suosivalla seostuksella. Täysin karbidista valkoisen valuraudan mikrorakennetta nimitetään ledeburiitiksi. Siinä loppusulasta muodostuva hauras karbidi-austeniitti-rakenne muodostaa yhtenäisen matriisin tätä aiemmin korkeammassa lämpötilassa (esieutektisesti) muodostuneelle austeniitille. Näin ledeburiittinen mikrorakenne on kova ja hauras. Tarkoituksellinen täysin valkoisena jähmettyminen (esim. temperavalun valmistamista varten) saavutetaan, kun sulassa ei ole grafiitin kiteytymisytimiä, piipitoisuus on alhainen, jäähtymisnopeus on suuri ja/tai seostus on karbidoiva. Osittaista karbidisuutta esiintyy usein myös pääosin grafiittisena jähmettyneissä valuissa. Koska jäähtymisnopeus on valun paikalliseen jäähtymiseen vaikuttavista tekijöistä riippuvainen, on alijäähtymisenkin tapahtuminen valukappaleesta ja sen muotoilusta riippuva. Rautavalukappaleessa voi siten olla paikallisia nopeasti jäähtyneitä kohtia, joissa jähmettyminen on tapahtunut osittain tai kokonaan karbidisena, mikä voi osoittautua suureksi ongelmaksi esim. työstettäviksi tarkoitetuissa valuissa.

Hiilen kiteytyminen austeniitista grafiitiksi voidaan varmistaa tehokkaalla ympäpöksellä. Ympäpöksessä sulaan lisätään vähän ennen valua grafiitin kiteytymisytimiä, minkä tarkoitus on paitsi varmistaa grafiittisuus myös saada aikaan runsas, tasainen ja hienorakenteinen grafiittijakauma. Tällöin stabiilin systeemin mukainen eutektinen reaktio käynnistyy herkästi eikä jäähtymiskäyrä ehdi painua metastabiiliin reaktiolämpötilaan ennen grafiitin kiteytymistä. Ympäpöksellä minimoidaan myös tehokkaasti seinämäherkkyyttä.

Grafiitti on mekaanisesti heikkoa sekä sisäiseltä rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan suuntautunutta (anisotrooppista). Tämä vaikuttaa monin tavoin valurautojen mekaanisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin. Grafiitti saattaa esiintymistavastaan riippuen vaikuttaa mm. valuraudan lujuuteen, sitkeyteen, murtumis- ja väsymisominaisuuksiin, lastuttavuuteen, termisiin ominaisuuksiin ja värähtelyjen vaimennuskykyyn sekä tiettyihin kulumisominaisuuksiin. Erityisesti esiintyessään suurina suomuina grafiitti heikentää mekaanisia ominaisuuksia, mikä näkyy sekä lujuudessa että sitkeydessä ja myös alhaisena kimmokertoimena, mutta saa toisaalta aikaan hyvän vaimennuskyvyn, lämmönjohtavuuden ja lastuttavuuden. Grafiittisuuteen ja grafiitin hienojakoisuuteen pyritään vaikuttamaan edellä mainitulla ympäpöksäsittelöllä. Grafiitin muotoon taasen vaikutetaan palloutuskäsittelöllä. Käsittelemätön valurauta jähmettyy joko valkoisena (karbidisena) tai karkeana suomugrafiittisena. Palloutuskäsittelössä sulaan lisätään kuitenkin (esim. Mg- tai Ce-pohjaisia) palloutusaineita, jotka ohjaavat grafiittiytimen kasvutapaa jähmettymisen edetessä. Sopiva palloutusainemäärä yhdessä sopivan valulämpötilan ja riittävän puhtaan sulan kanssa sekä yhdistettynä tehokkaaseen ympäpökseen tuottaa tasalaatuisen ja hienojakoisen (so. palloutumisasteeltaan ja palloluvultaan [palloja/mm²] korkean) pallografiittirakenteen, minkä avulla saavutetaan valurautoista parhaat mekaaniset ominaisuudet.

Valuraudan matriisi

Heti jähmettymisen jälkeen valurauta koostuu grafiitista ja sitä ympäröivästä austeniittisesta matriisista. Austeniittiseen rautaan liukenee suurimmillaan n. 2 % hiiltä. Ferriitti voi kuitenkin liuottaa hyvin vähän hiiltä, korkeintaan vain n. 0,02 % C. Matriisin määrätymisen kannalta oleellista on, millä tavoin korkeassa lämpötilassa oleva runsashiilinen austeniitti muuttuu (eli hajaantuu muiksi faaseiksi tai faasiseoksiksi) jäähtymisen edetessä ohi eutektoidisen transformaation.

Kun lämpötila laskee alle eutektoidisen lämpötilan (723 °C), hajaantuu jäljellä oleva austeniitti muiksi faaseiksi. Jos valukappaleen annetaan jäähtyä hyvin hitaasti, hajaantuu austeniitti stabiilin tasapainosysteemin mukaisesti periaatteessa kokonaan ferriitiksi ja grafiitiksi. Austeniitin hajaan-

tuminen on kuitenkin diffuusion kontrolloima prosessi, joten jäähtymisnopeutta säätämällä voidaan saavuttaa erilaisia austeniitin hajaantumistuloksia samaan tapaan kuin teräksen lämpökäsittelyssä. Erona teräksen käyttäytymiseen on kuitenkin se, että valuraudassa hiili voi siirtyä myös grafiittiin. Niinpä jäähtymisnopeus ja austeniitin alkuperäinen hiilipitoisuus voivat vaikuttaa austeniitin hetkittäiseen hiilipitoisuuteen ja hajaantumisen tuloksiin moninaisemmin kuin teräksen tapauksessa. Hitaassa jäähtymisessä osa hiilestä ehtii tyypillisesti paeta grafiittiin, mikä saattaa näkyä mm. siten, että matriisissa etenkin grafiitin lähellä esiintyy runsaammin ferriittiä, millä on myös vaikutuksensa mekaanisiin ominaisuuksiin.

Täysin ferriittinen rakenne saavutetaan seostamattomalla valuraudalla vain erinomaisen hitaalla jäähtymisellä (tai valun jälkeisellä ferritointi- eli perlitointikäsittelyllä). Suhteellisen hitaalla jäähtymisellä saadaan matriisiin tyypillisimmin aikaan ferriittis-perliittisiä rakenteita. (Perliitti on ferriitin ja sementiitin hienojakoinen lamellimainen seos, jota muodostuu riittävän runsashiilisen austeniitin hajaantuessa yli 500 °C:ssa.) Todennäköisimmin perliittiä esiintyy nimenomaan grafiittipartikkelien välisillä alueilla samalla, kun grafiitin lähellä saattaa esiintyä ferriittiä. Täysin perliittinen rakenne voidaan tarvittaessa varmistaa perlitoivalla seostuksella (tai valun jälkeisellä perlitointi- eli normalisointilämpökäsittelyllä).

Nopeammalla jäähtymisellä ja sopivalla seostuksella voidaan saada aikaan myös bainiittisiä matriisin mikrorakenteita. Bainiitti on lämpötilavälillä 550–250°C syntyvä neulasmainen ferriitin ja siihen liittyvien hienojakoisten karbidien faasiseos. Jos valos jäähdytetään tarpeeksi nopeasti, ei austeniitti ehdi hajaantua diffuusion avustamalla tavalla ferriitiksi ja/tai sementiitiksi eikä edes bainiitiksi ennen kuin diffuusioprosessit tulevat käytännössä mahdottomiksi. Tällöin hiiliylikilläseinen hila niinsanotusti leikkautuu ja austeniitti muuttuu martensiitiksi: Valos karkenee.

Seostamalla valurautaan ferriitin muodostumista vaikeuttavia aineita, edistetään perliitin muodostumista. Puhutaan perlitoivista seosaineista (kuten Cu ja Ni). Seostamalla valurautaan diffuusiota hidastavia aineita vaikeutetaan kaikkia diffuusiota tarvitsevia muutosprosesseja (esim. perliitin muodostumista) ja edistetään vähemmän diffuusiosta riippuvia austeniitin hajaantumistapoja, so. bainiittisen rakenteen syntymistä tai täysin diffuusiosta riippumatonta martensiitin muodostusta. Puhutaan karkenevuutta lisäävistä aineista (Cr, V, Mo, Mn...). Karkenevuutta lisäävät aineet ovat tyypillisesti myös karbideja suosivia.

Bainiittinen rakenne on tulosta riittävän nopeasta jatkuvasta jäähtymisestä kuitenkin niin, ettei martensiitin muodostuksen alkulämpötilaa ole ehditty saavuttaa ennen bainiittitransformaation alkua. Bainitointikäsittely voidaan tehdä myös vakiolämpötilassa martensiitin muodostuslämpötilan yläpuolella. Puhutaan isotermisestä bainitointikarkaisusta tai mieluummin austemperointikäsittelystä. Tällöin austenitoitu valurauta sammutetaan sopivaan lämpötilaan (yleensä suolakylpyyn välillä 250...450 °C), jossa sitä pidetään muutosprosessin vaatiman ajan ennen jäähdyttämistä huoneenlämpötilaan. Kun valuraudassa on runsaasti hiiltä ja piitä (> 2 % Si), mikä vaikeuttaa karbidien syntymistä, ei bainiitille tyypillistä hienojakoista karbidirakennetta kuitenkaan pääse kehittymään. Tällöin isoterminen lämpökäsittely tuottaa matriisiin bainiittia läheisesti muistuttavan neulasmainen ausferriittisen mikrorakenteen, jossa karbidittomien ferriittineulasten väliin jää runsaasti runsashiilistä jäännösausteniittia, jossa korkea hiilipitoisuus stabiloi austeniittia. Austemperointikäsittelyn kautta tuotettuja ausferriittisiä valurautoja kutsutaan austemperoiduiksi valurautoiksi (esim. ADI). Niissä lujuuden ja sitkeyden yhdistelmä sekä kulumisominaisuudet ovat tyypillisesti huomattavasti parempia kuin muilla mikrorakenteilla.

Suomugrafiittirauta GJL

Suomugrafiittirauta on vähitellen menettänyt asemiaan valurautojen ja valumetallien valtamateriaalina, mutta on edelleenkin käytetyin valumetalli mm. alhaisten valmistuskustannusten, erinomaisten valu- ja työstettävyysominaisuuksien, hyvien värähtelyjen vaimennus- ja lämmönjohdavuusominaisuuksien sekä tiettyjen tribologisten ja fysikaalisten erikoisominaisuuksien ansiosta.

Suomugrafiittivaluraudassa grafiitti esiintyy suomumaisina grafiittierkaamina. Grafiittisuomut ovat kolmiulotteisesti tarkastellen keskenään läheisessä yhteydessä ns. grafiittiruusukkeiden puitteisissa. Siten suurehko grafiittisuomujen ryhmä muodostaa yhdessä laajahkon mutta mekaanisesti heikon mikrorakenteellisen alueen, ja mekaaniset kuormitukset jäävätkin oleellisesti ottaen grafiittiruusukkeiden välisten kapeiden matriisikannasten varaan.

Matriisin tyyppistä riippumatta suomugrafiittivaluraudat ovat aina hauraita, mikä onkin niiden käyttöaluetta rajoittavista tekijöistä tärkein. Tästä huolimatta niitä hyödynnetään myös ankarasti mekaanisesti, tribologisesti ja termisesti kuormitetuissa kohteissa kuten mm. polttomoottorien sylinterinkansissa ja -holkeissa. Suomugrafiittirautojen lujuuteen vaikuttavat sen kemiallinen koostumus, jäähtymisnopeus ja grafiittirakenteen hienous.

Suomugrafiittirauta on seinämäherkkä valumateriaali. Seinämäherkkyydellä tarkoitetaan lujuusominaisuuksien (ja muidenkin ominaisuuksien) riippuvuutta valun koosta ja seinämänpaksuudesta. Paksut seinämät ja ainekeskittymät jäähtyvät ja jähmettyvät hitaasti, minkä vuoksi niihin syntyy helposti karkeampi grafiittirakenne ja runsaammin ferriittiä, mikä antaa huonommat mekaaniset ominaisuudet. Toisaalta myös nopeasti jäähtyviin (ohuisiin tai nurkka-) kohtiin saattaa syntyä karbideja. Samasta sulasta valetun suomugrafiittivaluraudan mekaaniset ominaisuudet riippuvat siten valun koosta ja paikallisesta seinämänpaksuudesta. Raudan nimellinen lujuusluokka ei siten kerro suoraan odotettavissa olevista paikallisista ominaisuuksista, vaan ne on erikseen arvioitava lujuusluokan ja paikallisten olosuhteiden perusteella.

Suomugrafiittivaluraudan grafiittirakenteeseen liittyvää seinämäherkkyyttä vastaan taistellaan ensisijaisesti ympäryksellä. Grafiittirakenteen vaihteluja ei voida korjata valun jälkeen (lämpökäsittelyllä) tehokkaasti. (Pallografiittivaluraudan huomattavasti vähäisempi seinämäherkkyyys liittyy ensisijaisesti valussa määräytyvään matriisin tyyppiin, mihin taasen voidaan vaikuttaa myös valun jälkeisin lämpökäsittelyin, esim. ns. normalisointikäsittelyllä.)

Suomugrafiittivaluraudan valettavuus, lastuttavuus ja hitsattavuus

Suomugrafiittirauta on erinomaisesti valettava valumetalli, jossa grafiitin kiteytyessä tapahtuva tilavuuden kasvu kompensoi edullisesti metallin jähmettymiskutistumaa. Varsinkin alemmissa lujuusluokissa (joissa raudan CE on korkea) jähmettymisen aikana tapahtuu jopa laajenemista. Korkea CE lisää myös metallin juoksevuutta ja laskee sulamispistettä. Tämä alentaa suomugrafiittivaluraudan sulatuskustannuksiakin ja osaltaan myös kokonaiskustannuksia. Alhaista CE:tä voidaan hyödyntää suomugrafiittivaluraudan mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi. Alhaisella CE:lla valetussa raudassa ennen eutektista reaktiota jähmettyvän austeniittisen "selkärangan" osuus on suurempi ja siten raudan lujuus, sitkeys ja kovuuskin ovat korkeammat mutta valettavuus vastaavasti huonompi. Lujemmilla laaduilla vaaditaankin usein tehokasta syöttöä imuvikojen välttämiseksi. Nopea jähmettyminen ja tehokas ympäryys johtavat hienojakoisempaan grafiittirakenteeseen, mikä myös parantaa lujuutta, sitkeyttä ja kovuutta.

Suomugrafiittivalurauta on grafiittisuomujensa ansiosta tyypillisesti hyvin lastuavasti työstettävä materiaali erityisesti matriisirakenteen ollessa ferriittinen (pehmeä). Grafiittisuomut katkaisevat työstölastut lyhyiksi ja grafiitin voiteleva vaikutuskin säästää työstöterää. Koska lastu katkeaa grafiittisuomujen mukaan ja materiaalia irtoaa myös pintaa syvemmillä, työstöpinta on tyypillisesti karkea ja siinä on usein myös pieniä murtumia. Tämä aiheuttaa toisinaan ongelmia jatkokäsittelyjen ja väsymiskestävyuden kanssa. Pinnanlaatu paranee siirryttäessä lujempiin laatuluokkiin, joissa

grafiittisuomut ovat tyypillisesti pienempiä ja niiden määrä vähäisempi. Suurena vaikeutena las-
tuamisessa voivat olla materiaalin kovuuden paikalliset vaihtelut (nurkissa ja muissa nopeasti
jäähdyneissä kohdissa). Erilaiset pinnan alaiset valuviat, jotka paljastuvat vasta työstövaiheessa,
vaikuttavat työstetyn pinnan ulkonäköön ja valukappaleen ominaisuuksiin.

Suomugrafiittivalurauta on haurasta eikä yleensä ottaen kestä hitsauksen aiheuttamia muodon-
muutoksia murtumatta. Hitsauksen lämpösykliin liittyvässä nopeassa jäähtymisessä liitokseen
syntyy myös hauraita karbideja ja martensiittisiä matriisin mikrorakenteita. Varsinaisessa konstruk-
tiivisessa tarkoituksessa suomugrafiittivalurautoja ei yleensä hitsatakaan. Liittäminen on yleensä
suoritettava mekaanisin liitoksin. Rajoitettua korjaus- ja varusteluhitsausta harjoitetaan pääasiassa
puikkohitsauksena pehmein nikkeli-seosteisiin lisäainein ja korkean esilämmityksen avulla.

Suomugrafiittivaluraudan käyttösovelluksia

Alhaisesta nimellisestä lujuudestaan huolimatta suomugrafiittivalurautoja hyödynnetään yksinker-
taisten ja vaatimattomille rasituksille altistettujen halpojen valujen ohella myös erinomaisen
vaativissa mekaanisesti, tribologisesti ja termisesti kuormitetuissa käyttökohteissa kuten esimerkik-
si polttomoottorikomponenteissa ml. sylinterinkansissa. Koska grafiittisuomut auttavat öljykalvon
säilymistä liukupinnoissa, suomugrafiittirauta soveltuu myös voideltujen liukupintojen rakennei-
neeksi esimerkiksi moottorien sylinterinholkeissa, sylinteriryhmissä ja venttiilikoneiston osissa.
Kulumiskestävyyttä voidaan vielä lisätä erilaisin pintakarkaisukäsittelyin. Grafiitti toimii myös
kuumankestävänä voiteluaineena kuivina toimivissa liukupinnoissa esim. jarrurummuissa ja kyt-
kinlevyissä, joissa tarvitaan myös suomugrafiitin avustamaa hyvää lämmönjohtokykyä ja pientä
kimmokerrointa termisen väsymisen vaurioiden välttämiseksi. Vaimennuskykynsä ansiosta suo-
mugrafiittirautaa hyödynnetään koneiden rungoissa ja alustoissa, joissa se vaimentaa iskuja ja
värähtelyjä

Tylppägrafiittirauta GJV

Tylppägrafiittia on aina esiintynyt pallografiittivalurautoissa etenkin epätäydellisen palloutuksen
seurauksena. Kiinnostus kontrolloidusti tylppägrafiittisena valetun raudan ominaisuuksiin heräsi
kuitenkin vasta paljon sen havaitsemista myöhemmin ja käytännössä toimivat menetelmät tylppä-
grafiittivaluraudan kontrolloituun valmistukseen on kehitetty vasta viimeisen 10–20 vuoden aikana.

Jotta lopulliseen rakenteeseen saataisiin pallotuskäsittelyssä tuotettua tylppägrafiittirautaa, lämpöti-
laltaan ja puhtaudeltaan kontrolloituun sulaan on lisättävä tarkalleen hallittu määrä grafiitin
palloutumista häiritseviä aineita (esim. Ti). Koska sulan epäpuhtautena esiintyvä rikki haittaa myös
palloutusta, on rikin määrä myös oltava hyvin hallittu ja tätä voidaankin osaltaan hyödyntää tylp-
pägrafiittisen mikrorakenteen saavuttamisessa.

Tylppägrafiitin muotoa voidaan kuvata reunoiltaan pyörityneeksi suomugrafiitiksi. Tylppägrafiit-
tivaluraudan mikrorakenteessa on aina myös jonkun verran pallo- ja suomugrafiittia. Nämä
vaikuttavat kuitenkin voimakkaasti ominaisuuksiin ja siksi niiden määrät pakko hallita ja rajoittaa.
Ominaisuuksiensa puolesta tylppägrafiittirautaa voidaan pitää palloutumisasteensa mukaan pallo-
ja suomugrafiittivaluraudan välimuotona. Erityisesti palloutumisasteen noustessa lähelle pallogra-
fiittivalurautaa tylppägrafiittivaluraudan mekaaniset ominaisuudet paranevat ja kimmokerroin
kasvaa nopeasti, mutta esim. lämmönjohtavuus laskee. Tylppägrafiittivaluraudan termisten shokki-
en kestävyys on hyvä, koska sen termiset ominaisuudet ovat lähellä ja mekaaninen kestävyys
kuitenkin parempi kuin suomugrafiittivaluraudalla. Samalla puhtaasti termisten shokkien kestä-
vyys ja myös vaimennuskyky ovat paremmat kuin pallografiittivalurautoilla. Tylppägrafiittivalurautaa
hyödynnetäänkin mm. termisesti rasitetuissa käyttökohteissa haluttaessa
suomugrafiittivalurautaa parempi kestävyys mekaanisille rasituksille.

Tonnimääräisesti tylppägrafiittivaluraudan suurimman käyttöalan muodostavat terästehtaiden
valukokillit. Muita sovelluksia ovat olleet mm. moottorien sylinteriryhmät ja rungot, pumpun

pesät, vaihdelaatikoiden rungot ja kannet, kampikammiot, napa-, vauhti- ja ketjupyörät, kytkinlevyt, hydraulikkakomponentit, neste- ja kaasusylinterit, Wankel-moottoreiden pyörivät männät sekä turboahdinten rungot ja männänrenkaat, joissa kaikissa haetaan ominaisuuskombinaatioita, joita pallo- tai suomugrafiittivaluraudat eivät kykene tarjoamaan.

Pallografiittirauta GJS

Pallografiittirauta kehitettiin alunperin jo 1940-luvulla, mutta löi itsensä kaupallisesti läpi vasta paljon myöhemmin ja sen käytön kasvu jatkuu edelleenkin mm. temper- ja suomugrafiittivalurautojen kustannuksella, mutta osin myös teräsvaluja ja -rakenteita korvaten.

Pallografiittivaluraudassa grafiitti on satunnaisesti jakaantuneina erillisinä pallomaisina partikkeleina raudan matriisissa ja vaikuttaa huomattavasti vähemmän epäedullisesti valuraudan mekaanisiin ominaisuuksiin kuin somu- tai tylppägrafiitti. Niinpä huokeiden ja hyvin valettavien pallografiittivalurautojen mekaaniset ominaisuudet ovat rakenne- ja koneterästen luokkaa ja ylikin.

Grafiitti saadaan palloutumaan käsittelemällä sulaa valurautaa ennen ympäystä ja valua erityisellä palloutusaineella. Käsitelyaineita ja -tekniikoita on useita, mutta kaikissa tarkoituksena on saada jähmettymisen yhteydessä kiteytyvä grafiitti kasvamaan edulliseen pallomaiseen muotoon. Käsitelyaineen magnesium reagoi myös raudassa olevan rikin kanssa, minkä vuoksi pallografiittirautaa valmistettaessa sulan rikkipitoisuus pyritään pitämään hallinnassa palloutusmenetelmän edellyttämällä tasolla (yleensä < 0,02 % S). Magnesiumsulfidin muodostuksen lisäksi osa Mg-lisäyksestä palaa voimakkaassa reaktiossa oksidiksi. Palloutumisen onnistumiseksi on palloutusta häiritsevien alkuaineiden (mm. Pb ja Al) määrän oltava sulassa riittävän alhainen, mikä mm. rajoittaa epäpuhtaan kiertoromun käyttöä sulatuksessa. Mg on voimakkaasti karbidoiva aine, joten palloutuskäsittely rauta on tarpeen ympätä tehokkaasti.

Grafiittipallojen korkea palloutumisaste ja pieni koko parantavat mekaanisia ominaisuuksia. Kun palloutus on onnistunut ja pallomainen grafiittirakenne on korkealuokkainen, pallografiittivaluraudan ominaisuudet ja käyttäytyminen määräytyvät pitkälti myös matriisin rakenteen ja ominaisuuksien perusteella. Runsaalla seostuksella voidaan pallografiittirautaan tuottaa myös erikoisominaisuuksia, joita käsitellään kohdassa erikoisvaluraudat.

Pallografiittirautojen lämpökäsittelyt

Taloudellisesti edullisinta on toki tuottaa valukappale vaadittuja ominaisuusvaatimuksia vastavaksi valutilaisena - ilman lämpökäsittelyjä. Tähän usein pyritäänkin. Pallografiittirautojen lämpökäsittelyjen tarkoituksena on yleensä taata valokselle tietty tasalaatuinen mikrorakenne, parantaa lujuusominaisuuksia ja/tai lisätä kulumiskestävyyttä.

Pallografiittivalurautaa ei ole grafiittirakenteensa suhteen samalla tavalla seinämäherkkä kuin suomugrafiittivalurautaa. Paksuissa, hitaasti jäähtyneissä seinämissä voi grafiitti olla palloutumisasteeltaan puutteellista, mihin ei lämpökäsittelyillä voida vaikuttaa. Matriisin mikrorakenne (so. ferriitti-/perliittiosuudet) voi vaihdella seinämänvahvuuden mukaan. Hidas jäähtyminen suosii ferriittiä grafiittipallojen välittömässä läheisyydessä. Hyvin hitaasti jäähtyneissä valuissa perliitti ehtii myös pitkälti hajaantua valun yhteydessä.

Grafiittirakenteeltaan hyvälaatuisten pallografiittirautojen lujuusominaisuudet määräytyvät pitkälti niiden metallisen matriisin rakenteen mukaan: Suurin sitkeys saavutetaan ferriitillä ja austeniitilla. Lujimmaksi matriisi saadaan päästömartensittisilla ja ausferriittisillä (ADI-) lajeilla, mutta paras lujuuden ja sitkeyden yhdistelmä saavutetaan kuitenkin ehdottomasti ADI:lla. Austemperoinnista on kerrottu enemmän otsikon "Austemperoidut valuraudat" alla.

Austemperointikäsitteilyn lisäksi pallografiittiraudoille tavallisimmin tehtävät lämpökäsittelyt ovat seuraavat:

- Ferritointi, ferriperlitointi tai perlitointi (normalisointi), joilla haluttu tasalaatuinen mikrorakenne saavutetaan austenitoinnilla 850–900°C:ssa ja sitä seuraavalla kontrolloidulla jäähdyttämällä. Jäähdytystapa kontrolloi syntyvää rakennetyyppiä.
- Jännitystenpoistohehkuksella (l. myöstöllä) poistetaan valu- ja lämpökäsittelyjännityksiä. Jännitykset laukeavat käsittelylämpötilan mukaan. Jäähdytys tapahtuu hitaasti.
- Karkaisu, nuorutus ja pintakarkaisut ovat ensisijaisesti kulumiskestävyuden parantamiseksi tehtäviä lämpökäsittelyjä, jotka eivät valuraudoilla toimi niinkään väsymiskestävyyttä parantavasti.

Pallografiittivaluraudan työstettävyys ja hitsattavuus

Pallografiittivaluraudan työstettävyys on yleensä ottaen hyvä - kovuuden mukaan vertailtuna jopa parempi kuin suomugrafiittiraudan. Lämpökäsittelyillä GJS-lajeilla rakenne on tasainen, jolloin kovuusvaihtelutkaan eivät aiheuta ongelmia; valutilaisissa lajeissa saattaa esiintyä kovuusvaihteluja ja paikallista karbidisuutta. Lisäksi valu- tai hehkutuspinta saattaa haitata lastuamista. Työstetyn pinnan laatu on yleensä hyvä, koska pinta ei repeile työstettäessä. Pallografiittirautojen työstö edellyttää suurempaa työstövoimaa ja tehontarvetta kuin suomugrafiittirautaa työstettäessä materiaalin suuremman lujuuden tähden. Teräksiin verrattuna GJS:n työstettävyys on parempi.

Valurautojen korkea hiilipitoisuus vaikeuttaa niiden hitsaamista, sillä liitoksen mikrorakenteeseen syntyy hauraita karbideja ja martensiittia. Tämä pätee myös pallografiittivalurautaan, joskin pallografiittivaluraudan hyvä yleinen sitkeys helpottaa murtumien välttämistä. Pallografiittivalurautaa hitsataankin nykyään jopa konstruktiivisissa tarkoituksissa.

Temperrauta GJM

Tempervaluraudat muistuttava ominaisuuksiltaan läheisesti pallografiittivalurautoja. Niiden käyttö onkin jatkuvasti vähentynyt pallografiittivaluraudan vallatessa niiden tärkeimpiä sovellusalueita.

Tempervaluja valettaessa valurauta jähmetetään ensin valkoiseksi (so. täysin karbidiseksi eli lede-buriittiseksi). Koska kappaleiden on oltava "läpeensä valkoisia", temperraudasta valettavien kappaleiden koko on rajoitettu (massa < 15 kg ja seinämänpaksuus << 50 mm). Valun jälkeen kappaleille suoritetaan halutun lujuusluokan ja temperrautatyypin mukainen pitkä lämpökäsittely, adusointi, jonka yhteydessä karbideiksi sitoutunut hiili erkautuu matriisista kerämaisiksi grafiittierkaumiksi.

Ns. mustaydintemperrautaa valmistetaan suorittamalla em. adusointihehkuus neutraalissa atmosfäärissä. Mustaydintemperraudan mikrorakenne on erinomaisen tasalaatuinen läpi kappaleena. Valkoydintemperrautavalut käsitellään hiilenkatoa aiheuttavassa atmosfäärissä. Tämän seurauksena pintakerrokseen ja ohuisiin seinämiin ei muodostu grafiittia, vaan ne vastaavat käsittelyn jälkeen mikrorakenteeltaan pikemminkin (pehmeää) ferriittistä terästä. Grafiittittoman pintakerroksen ja ohuiden seinämien osalta valkoydintempervalut ovat myös hyvin hitsattavia, toisin kuin valuraudat yleensä. Tätä on hyödynnetty mm. hitsattavaksi tarkoitettujen pienehköjen valukomponenttien valmistuksessa esim. ajoneuvoteollisuuden tarpeisiin.

Tempervaluraudan matriisin tyyppi ja siten myös lujuusluokka määräytyy ensisijaisesti adusointikäsitteilyn jälkeisen jäähtymisnopeuden mukaan. Eri lujuusluokkiin adusoitavat temperraudat voidaan siten valaa samasta perussulasta.

Adusoitua rautaa käytetään yleensä suursarjatuotannossa kulkuväline- ja sähköteollisuudessa etuinaan hyvä työstettävyys, alhainen transitiolämpötila sekä hyvä vaimennuskyky, kutakuinkin pallografiittivalurautaa vastaavat mekaaniset ominaisuudet sekä valkoydintemperraudan tapauk-

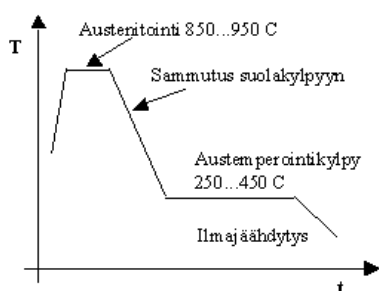
sessä myös hyvä hitsattavuus. Kokonaistuotanto on kuitenkin laskenut viimeisten vuosikymmenten ajan (ilman adusointia valmistettavan) pallografiittivaluraudan suosion kasvaessa.

Austemperoidut valuraudat

Austemperointia voidaan hyödyntää periaatteessa kaikkien grafiittisten valurautojen mekaanisten ja kulumisominaisuuksien parantamiseen. Austemperoidun suomugrafiittiraudan tapauksessa mekaaniset ominaisuudet paranevat valutilaisesta vieläpä niin, ettei sitkeys heikkene, mutta kuitenkin esimerkiksi vaimennuskyky kasvaa huomattavasti. Kaupallisesti katsoen austemperointia on hyödynnetty ylivoimaisesti onnistuneimmin pallografiittivaluraudalla, mikä on nyttemmin myös johtanut pitkälti Suomessa kehitetyn ADI:n kansainväliseen läpilyöntiin ja standardisointiin.

Austemperoidulla pallografiittivaluraudalla eli ADI:lla (Austempered Ductile Iron) on ylivoimaiset mekaaniset ja tribologiset ominaisuudet useimpiin teräksiinkin verrattuna. Alhaisten valmistuskustannusten ja valamiseen liittyvän muotoilun vapauden ansiosta ADI-valut korvaavat usein kalliita seosteräksiä sekä työstettyjä, taottuja tai hitsattuja konstruktioita - monesti vieläpä useita komponentteja yhdellä valuosalla.

Austemperointi on lämpökäsittely, jolla valurautaan tuotetaan (austeniittis-ferriittinen eli) ausferriittinen matriisin mikrorakenne. Tämä antaa suuren lujuuden ja hyvän sitkeyden. Ausferriittinen matriisi kykenee myös lujittumaan muokkauksen vaikutuksesta.



Kuva 6. Austemperointikäsittely

Isotermisessä austemperointikäsittelyssä (kts. ylläoleva kuva) valurautakomponentin lämpötila nostetaan ensin austenitointilämpötilaan (0,5-4h, tyypp. 850–950°C), jolloin matriisin mikrorakenne muuttuu austeniittiseksi. Tämän jälkeen kappale sammutetaan suolakylpyyn austemperointilämpötilaan (250–450°C). Austemperointilämpötila ja -aika riippuvat mm. tavoitelluista lujuus-, kovuus- ja sitkeystasosta ja mikrorakenteesta. Austemperoitavan valuraudan koostumuksella ja austemperointilämpötilalla ja -ajalla on tärkeä merkitys austeniitin hajoamisreaktion kululle ja lopulliselle mikrorakenteelle ml. austeniitin määrälle ja stabiilisuudelle. Kulumisprosessin yhteydessä tapahtuva lujittuminen liittyy austeniitin stabiilisuuteen ts. alttiuteen muuttua muokattaessa martensiitiksi.

Artikkeli: Austemperoitu suomugrafiittivalurauta, AGI: Lujempia ja vaimennuskykyisempiä suomugrafiittivaluja

Eero Niini - "Austemperoitu suomugrafiittivalurauta, AGI: Lujempia ja vaimennuskykyisempiä suomugrafiittivaluja", VKS 1995

Valuraudan lujuus- ja värähtelyvaimennusominaisuudet riippuvat oleellisesti grafiittirakenteesta: grafiitin jakaumasta, koosta ja muodosta. Grafiittirakennetta ei kuitenkaan voida optimoida yhtäaikaisesti molemmista näkökulmista. Lujimmat valuraudat (ts. pallografiittivaluraudat) omaavat alhaisimman vaimennuskyvyn. Karkean grafiittirakenteen omaavat suomugrafiittivaluraudat ovat vastaavasti erittäin vaimennuskykyisiä mutta mekaanisilta ominaisuuksiltaan vaatimattomia. Matriisin vaikutusta suomugrafiittivaluraudan ominaisuuksiin, etenkin vaimennuskykyyn, on pidetty vähäisenä, mutta TKK:n Valimotekniikan laboratoriossa v. 1994 läpiviedyssä tutkimuksessa todettiin austemperoinnilla l. matriisin ausferritoinnilla voitavan kuitenkin lisätä merkittävästi sekä suomugrafiittivaluraudan lujuutta että vaimennuskykyä sitkeysominaisuuksiakaan heikentämättä ja vieläpä ilman kallista seostusta. Valun käyttäjälle onkin lähiaikoina tarjolla edullisia lujempia, kulumiskestävämpiä ja vaimennuskykyisempiä AGI -suomugrafiittivalurautoja ferriittisten/perliittisten suomugrafiittivalujen konventionaalisiin ja niitä vaativampiin käyttökohteisiin.

Johdanto

Kiristyvien rajoitusten ja tiukentuvien asiakasvaatimusten vuoksi on koneenrakennuksen eri alueilla ollut pakko kiinnittää kasvavassa määrin huomiota melun ja mekaanisten värähtelyjen kurissapitoon. Melun ja värähtelyjen hallinta ja rajoittaminen voi perustua eri menetelmiin ja lähestymistapoihin: mm. värähtelyn syntymisen tai etenemisen estämiseen tai sen vaimentamiseen aktiivisin tai passiivisin menetelmin ts. aktiivisin vaimennuskomponentein tai vaimennuskykyisin materiaalein. Kun värähtelyt ovat taajuuksiltaan ja suuruuksiltaan vaihtelevia, ongelmiin on usein puututtava hyödyntämällä vaimennuskykyistä rakennemateriaalia.

Suomugrafiittivaluraudat tunnetaan vaimennuskykyisinä, hyvin työstettävänä ja valettavina, yleiskäyttöisinä koneenrakennusmateriaaleina, joiden mekaaniset ominaisuudet (lujuus, sitkeys, väsymislujuus jne.) ovat kuitenkin varsin vaatimattomat. Toisaalta valuraudat, joiden grafiittirakenne on lujuusominaisuuksien kannalta edullinen (pallo-, tylppä- ja tempervaluraudat), ovat kestävämpiä, mutta niiden vaimennuskyky on selkeästi heikompi. Suomugrafiittivaluraudan korvaaminen lujemmilla valurautalajeilla tai muilla metallisilla rakenneaineilla johtaa usein värähtelyille altistetuissa tilanteissa korostuneisiin vaimennusongelmiin ja esimerkiksi lämpöiskuille altistetuissa tilanteissa myös termisen väsymisen ongelmiin. Usein samalla myös materiaalikustannukset lisääntyvät, muotoilun vapaus rajoittuu ja työstö hankaloituu. Tietyillä koneenrakennuksen aloilla, kuten esimerkiksi kulkuneuvotekniikassa, onkin suuri tarve suomugrafiittivalurautojen yleis- ja erityisominaisuuksia omaaville materiaaleille, joiden mekaaniset ominaisuudet olisivat kuitenkin tavallisia suomugrafiittivalulajeja paremmat.

Valuraudan lujuus ja vaimennuskyky

Grafiittia sisältävät valuraudat (suomu-, pallo-, tylppä- ja tempervaluraudat) voidaan nähdä metallisen matriisin (l. "perusmassan") ja "grafiittipartikkelien" muodostamiksi komposiittimateriaaleiksi. Metallinen matriisi ja grafiitti eroavat ominaisuuksiltaan merkittävästi useissakin suhteissa. Esimerkiksi lujuudet, jäykkyydet, lämmön- ja sähkönjohtavuudet, lämpölaajenemiskertoimet sekä vaimennuskyvyn määräävät sisäisen kitkan mekanismit poikkeavat oleellisesti toisistaan. Valurautojen fysikaalisten ominaisuuksien ymmärretäänkin yleisesti eroavan merkittävästi niiden matriisia vastaavien terästen ominaisuuksista ja määräytyvän hyvin pitkälle juuri grafiitin esiintymisestä: ts. "grafiittipartikkelien" lukumäärästä-, koosta-, muodosta ja jakautumasta.

Pitkät ja terävät grafiittisuomut helpottavat murtumien ydintymistä ja kasvua sekä vähentävät rakenteen jäykkyyttä (ts. kimmokerrointa). Suomugrafiittirakenteen voimakas riippuvuus valun jäähtymisnopeudesta merkitsee seinämäherkkyyttä ts. ohuissa valuissa ja seinämissä hieno grafiittirakenne tuottaa paremman lujuuden (ja sitkeyden) kuin paksuissa valuissa ja seinämissä. Mekaanisten ominaisuuksien kannalta edullisin grafiittirakenne on tasaisesti jakautunut pallografiittirakenne, jonka tapauksessa grafiitin määrällä (ja hiiliekvivalentilla) on myös vähiten vaikutusta ominaisuuksiin, mutta vastaavasti lämpökäsittelyn ja/tai seostuksen määräämällä matriisin tyypillä on tällöin voimakas vaikutus. Suomugrafiittivaluraudan erinomaisen työstettävyyden, vaimennuskyvyn ja termisen väsymisen kestävyuden ymmärretään liittyvän juuri runsaaseen suomugrafiittiin ja siten suomurakenteen tiedetään sekä periaatteessa että käytännön havaintojen perusteella olevan useimpien ominaisuuksien kannalta määräävä tekijä. Vastaavasti matriisin tyyppiin on havaittu olevan suomugrafiittivaluraudalla oleellisesti vähemmän merkittävä kuin esimerkiksi pallografiittivaluraudalla.

Tylppägrafiittivaluraudan ominaisuudet ovat usealla tavalla pallo- ja suomugrafiittivaluraudan väliltä. Tylppägrafiittivaluraudan grafiitin muodon säätäminen (sulan käsittelyssä) pallouttavaan suuntaan johtaa raudan ominaisuuksien muuttumiseen pallografiittivaluraudan kaltaisiksi ja päinvastoin. Vaikka tylppägrafiittivalurautojen ominaisuusyhdistelmä on pidetty varsin kunnostavina useisiin erityissovelluksiin, saatavuus ja valmistuksen laatuongelmat ovat rajoittaneet niiden käyttöä ainakin viime vuosiin saakka. (Tosin laadunhallinnan suhteen on raportoitu merkittävästä kaupalliselle asteelle viedystä kehityksestä. vrt. ns. Backerud -menetelmä.). Huokeutta ja yleiskäytöisyyttä tai toisaalta vaimennusominaisuuksiin ja termisen väsymisen kestävyyyteen liittyviä erityisominaisuuksia edellyttävissä koneenrakennuskohteissa on totuttu edelleenkin hyödyntämään nimenomaan suomugrafiittivalurautoja.

Suomugrafiittivaluraudan hyvän vaimennuskyvyn selittämiseksi on aikojen myötä esitetty erilaisia oletuksia. Vanhimpien oletusten mukaan värähtelyyn liittyvää energiaa dissipoiutuu matriisin plastiiseen muodonmuutokseen grafiittisuomujen aiheuttamissa jännityskeskittymissä. Vaimennusmekanismien lähempi tarkastelu on kuitenkin paljastanut energian dissipoitumisen tapahtuvan selvästikin grafiitissa sen vaimennusmekanismien kautta. Grafiitin oleellinen rooli on todettu sekä käytännön empiirisissä havainnoissa että valuraudan sisäisen kitkan mittauksissa. Ferriittisperliittisillä valuraudoilla tehdyt havainnot ovat viitanneet myös siihen, ettei suomugrafiittivaluraudan matriisin tyyppillä ole vaikutusta vaimennuskykyyn. Pallografiittivalurautojen vaimennuskyvyn on toisaalta todettu olevan vaatimaton kaikilla matriisityypeillä suomugrafiittivalurautoihin verrattuna mutta kuitenkin tavallisia rakenneteräksiä paremman.

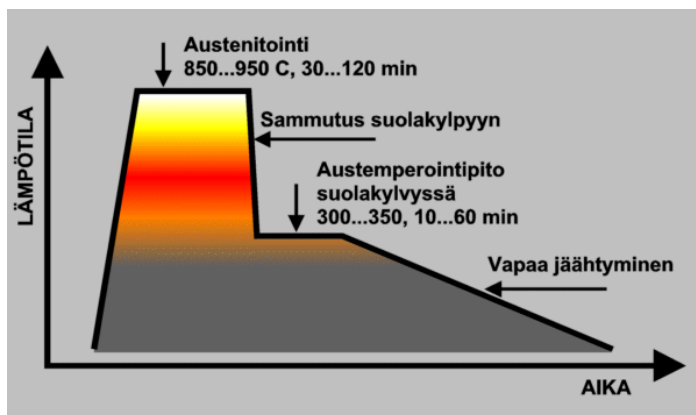
Mekaanisen kestävyuden ja vaimennuskyvyn välillä onkin nähty vallitsevan sovitamaton ristiriita. Tämän on katsottava pitävän paikkansa uudemmankin tiedon valossa, mitä tulee grafiittirakenteen vaikutuksiin, joskin on myös löydetty uusia keinoja paremman vaimennuskyky/lujuus-yhdistelmän saavuttamiseksi. Pyrittäessä kehittämään samanaikaisesti sekä vaimennuskykyä että lujuutta tehtävää voidaan tarkastella kahdesta näkökulmasta. Ensinnäkin voidaan etsiä keinoja vaimennusmekanismien voimistamiseksi lujissa valuraudoissa (GRP). Toisaalta voidaan pyrkiä lisäämään suomugrafiittivalurautojen lujuutta niiden vaimennuskykyä oleellisesti tuhoamatta.

TKK:lla vuoden 1994 aikana läpiviedyssä tutkimuksessa ei löydetty käytännöllisiä keinoja pallografiittivaluraudan vaimennuskyvyn dramaattiseen lisäämiseen. Aihetta koskevan kirjallisuuden selvittämisen ja käytännön kokeiden kautta kyettiin kuitenkin löytämään toimiva menetelmä suomugrafiittivaluraudan lujuuden ja vaimennuskyvyn samanaikaiseen kehittämiseen. Kyseinen menetelmä, austemperointi, on lisäksi käytännön valimotoiminnan kannalta varsin yksinkertainen ja perustuu olemassa olevaan teknologiaan ja laitteistoon. Suomugrafiittivaluraudan austemperointi on muutoinkin yksinkertainen ja huokea tapa parantaa suomugrafiittivalujen lujuutta ja mm. kulumiskestävyttä.

Austemperoitu l. ausferrittinen suomugrafiittivalurauta, AGI (Austempered Gray Iron)

Austemperoitu pallografiittivalurauta (ADI) on laajalti tunnettu erinomaisista mekaanisista ominaisuuksistaan ja poikkeavasta kulumiskestävydestään. Vastaavia hyviä ominaisuuksia on myös saavutettu mm. austemperoimalla tylppä- ja tempervalurautoja, mutta suomugrafiittivalurautojen alhaisemmat lujuusominaisuudet ovat jättäneet sen lujempien em. lajien, erityisesti ADI:n, varjoon. Kirjallisuudessa esitetyt havainnot sekä TKK:ssa v. 1994 tehdyt kokeet osoittavat kuitenkin, että austemperoidulla suomugrafiittivaluraudalla voidaan helposti saavuttaa vetomurtolujuuksia yli 400MPa vähintään ferriittisiä/perliittisiä laatuja vastaavin sitkeyksin ja selkeästi parantunein vaimennusominaisuuksin.

Austemperoinnilla l. ausferritoinnilla tarkoitetaan lämpökäsittelyä, joka tuottaa valuraudan matriisiin neulasmaista ferriittiä ja runsashiilistä jäännösausteniittia sisältävän mikrorakenteen: Valuraudan hiiltä matriisiin liuottavan austenitoinnin jälkeen rauta sammutetaan lämpötilaan 300–450°C (yleensä suolakylpyyn). Suomugrafiittivaluraudan tapauksessa parhaat ominaisuudet tuottaa austemperointihekutus suhteellisen alhaisessa lämpötilassa, esim. 300-320°C, jolloin lujuus ja vaimennuskyky ovat parhaimmillaan ja venymäkin parempi kuin valutilaisena. Ominaisuuksien paraneminen liittyy erityisesti korkeahiiliseen jäännösausteniittiin. Matriisin kautta tapahtuva ominaisuuksien paraneminen ei kuitenkaan peitä grafiittirakenteen oleellista roolia ominaisuuksien hallinnassa ts. esim. seinämäherkkyyttä ja ympäyksen merkitystä. Austemeroitavuus ei aseta hankalia vaatimuksia koostumukselle. Lähinnä edellytetään riittävää piipitoisuutta ja "huonosti karkenevien" suurempienkin kappaleiden tapauksessa vain niukkaa seostusta. Erityispuhtaita raaka-aineita ei tarvita, joskin perussulan puhtaus parantaa lämpökäsittelävyyttä.



Kuva 7. Suomugrafiittivaluraudan austemperointikäsittely.

Jos värähtelyjen tehokas vaimeneminen suomugrafiittivalurauodoissa perustuu grafiitissa tapahtuvaan energian dissipoitumiseen, kuten viimeaikaiset tutkimukset yhtenevästi esittävät, miten sitten on selitettävissä, että matriisin tyyppiä muuttava lämpökäsittely, austemperointi, lisää huomattavasti vaimennuskykyä? TKK:n Valimotekniikan laboratorion tutkimusten perusteella ko. lämpökäsittely ei muuta vaimennuksen perusmekanismeja ts. energian dissipoituminen tapahtuu edelleen grafiitissa, eikä matriisiin kehity merkittäviä vaimennusmekanismeja. Ferriittisen ja perliittisen raudan välillä ei todettu oleellisia eroja vaimennuskyvyssä. Sisäisen kitkan mittaukset ja vapaasti ominaistajuudella värähtelevillä koekappaleilla tehdyt värähtelynvaimennusmittaukset osoittavat pikemminkin, että vaimenemisilmiö ja niihin liittyvät sisäisen kitkan mekanismit ovat sinänsä oleellisesti samanlaisia ferriittisin, perliittisin ja ausferrittisin matriisein. Lämpötila- ja amplitudiriippuvuudet ovat tyypiltään samanlaisia. Vaimennuskyvyn taso on vain poikkeavan korkea austemperoinnin tapauksessa.

Ausferriittisen (riittävän C- ja Si-pitoisen) jäännösausteniittia sisältävän raudan (matriisin) mekaaninen käyttäytyminen poikkeaa siinä määrin ferriittisistä ja perliittisistä raudoista, että on päädytty oletukseen, jonka mukaan pienemmän jäykkyyden ja poikkeavien jännitys-venymäominaisuuksien omaava ausferriittinen matriisi jakaa muodonmuutokset eri tavoin valuraudan mikrorakenteessa ja maksimoi grafiitin kokeman muodonmuutoksen. Tätä tukevat mm. havainnot, joiden mukaan vaimennuskyky on sitä korkeampi, mitä alhaisempi raudan kimmokerroin (=alhaisempi värähtelyn ominaistajuus) ja mitä korkeampi jäännösausteniitin hiilipitoisuus on. Muita selityksiä vaimennuskyvyn eroille voidaan toki hakea esim. sisäisen jännitystilän vaikutuksista tai ausferriittisen matriisin epähomogenuudesta. Mittaukset eivät kuitenkaan tue teorioita em. tekijöiden aiheuttamista matriisissa toimivista vaimennusmekanismeista.

AGI-laadut ja -sovellukset

Edelleen on syytä korostaa sitä käytännön tuloksissakin selkeästi havaittua seikkaa, että vaimennuskyky ja lujuusominaisuudet ovat niin austemperoiduissa kuin muissakin suomugrafiittivalurautalajeissa oleellisesti grafiittirakenteesta riippuvaisia: siis seinämäherkkiä ominaisuuksia ja siten säädeltävissä grafiittirakenteen hienouteen vaikuttamalla (vrt. ympärys ja grafiittirakenteeseen vaikuttava seostus). Näin voidaan tuottaa ominaisuuksiltaan eri tavoin painotettuja austemeroituja suomugrafiittivalurautoja. Vastaavasti kunkin valun puitteissa eripaksuiset kohdat omaavat erilaisia ominaisuusyhdistelmiä. Lisäksi on syytä todeta, ettei suomugrafiittivaluraudan murtovenymä ja sitkeys yleisemminkään heikkene tavoiteltaessa lisää lujuutta austemperoinnilla.

Austemeroituja suomugrafiittivalurautoja voidaan suositella toisaalta korvaamaan tavanomaisia suomugrafiittivalurautoja yleisesti ja toisaalta erityiskohteisiin, joissa halutaan nimenomaan suomugrafiittivaluraudan valettavuutta, huokeutta sekä fysikaalisia erityisominaisuuksia mutta, joissa tavanomaisen suomugrafiittivaluraudan alhainen lujuus johtaa esimerkiksi kohtuuttomaan painoon.

Tehokkaasti ympätyt, niukemman hiiliekvivalentin omaavat laadut (seostamaton GRS: Rm esim. luokkaa 350-400MPa) ovat lujia ja silti hyvin vaimennuskykyisiä. Ne soveltuvat hyvin esim. ajoneuvojen voimansiirron ja vaihteiden tuentoihin ja koteloiteihin. Niillä voidaan myös korvata kaikenlaisia valutilaisia/ferriittisiä/perliittisiä suomugrafiittivaluja, kun halutaan lisää lujuutta tai kulumiskestävyyttä. Runsaammalla hiiliekvivalentilla valetut (ja/tai heikommin ympätyt) laadut eivät ole yhtä lujia (Rm esim. luokkaa 200-300MPa), mutta niillä voidaan saavuttaa aivan erinomainen vaimennuskyky. Niitä voidaankin oikeutetusti sanoa aidoiksi High Damping -materiaaleiksi. Ne soveltuvat mm. teollisuuden koneiden alustojen ja runkojen sekä esimerkiksi laakerien ympärille asennettavien erillisten vaimennusholkkien materiaaliksi. Myös pallografiittivaluraudan austemperoinnilla on sekä lujuutta että vaimennuskykyä lisäävä vaikutus. Muutos ei kuitenkaan ole suomugrafiittivalurautoihin verrattuna yhtä dramaattinen ja lisäksi on otettava huomioon austemperoinnin voimakas vaikutus esimerkiksi sitkeyteen. AGI:n yhteydessä on potentiaalisilla käyttösovelluksina mainittu myös mm. pumppujen, ahtimien ja kompressorien koteloinnit, moottorilohkot, imukanavat, jarrurummut ja -levyt sekä roottorit.

Yhteenveto

Austemperoinnin avulla voidaan tuottaa konventionaalisia suomugrafiittirautavaluja lujempia ja vaimennuskykyisempiä valukomponentteja, jotka omaavat kuitenkin suomugrafiittivalurautoille tyypillisiä ominaisuuksia: mm. alhaiset kustannukset, hyvä valettavuus ja muotoilun vapaus, hyvä työstettävyys, korkea vaimennuskyky sekä hyvä lämmönjohtavuus. Austemperoinnin avulla lujuuden ja vaimennuskyvyn lisäksi myös kulumiskestävyyden paranee. Ominaisuuksien kehittymiseen nähden suomugrafiittivaluraudan austemperointi on huokea ja käytännössä helposti toteutettava tapa tuottaa rautavaluja vastaamaan tiukentuneisiin vaatimuksiin ja kokonaan uusillekin käyttöalueille. Austemperoidut suomugrafiittivaluraudat voidaan optimoida ominaisuusyhdistelmiltään kuhunkin käyttötilanteeseen. Austemperointia voidaan periaatteessa soveltaa mille tahansa nykyi-

selle suomugrafiittivalulle, joiden mallivarusteet soveltuvat luonnollisestikin austemeroitavien valujen kaavaamiseen. Raudan koostumuksellisia muutoksia ei tarvita tai ne ovat vähäisiä. Lämpökäsittely asettaa toki käytännön rajoituksia esimerkiksi valukappaleen koolle ja lisää yhden työvaiheen valmistusketjuun. Valettavuus ja työstettävyys ennen lämpökäsittelyä ovat valutilaisen mukaisia. Erikoistapauksissa tarpeellinen lämpökäsittelyn jälkeinen työstö on toki vaikeampaa, muttei suomumaisen grafiittirakenteen ansiosta kuitenkaan yhtä ongelmallista kuin ADI:n tapauksessa. Valimo, jolla on kokemusta ADI-valujen tuottamisesta ja laadunhallinnasta voi menestyksellisesti tuottaa myös AGI-valuja. Suomugrafiittivalurautoja hyödyntävä valukomponenttien suunnittelija ja käyttäjä voi turvallisin mielin hakea austemeroinnin avulla merkittävästi lisää mekaanista kestävyyttä ja vaimennuskykyä tuotteisiinsa.

Valkoiset valuraudat

Lähde: Autere E., Ingman Y. ja Tennilä P. - "Valimotekniikka I"

Valkoinen valurauta on valurautojen erikoistapaus, jossa ei esiinny ollenkaan grafiittia vapaana. Valkoisten valurautojen ryhmänimitys aiheutuu murtopinnan vaaleasta, teräksenkaltaisesta väristä. Niiden raerakenne on grafiittiton johtuen siitä, että grafiitin muodostus kiteytymisen yhteydessä on estetty:

- nopealla jäähtelyksellä
- metastabiilia jähmettymistä suosivan matalan hiilielivivalenttiarvon valinnalla tai
- karbidoivia seosaineita käyttämällä.

Seokseen sisältyvä hiili esiintyy näissä raudoissa kemiallisesti sidottuina karbideina, pääasiallisesti rautakarbideina Fe₃C tai karbideja muodostavia seosaineita käytettäessä näiden ja raudan sekakarbideina.

Karbidisesta rakenteesta johtuen ovat valkoiset valuraudat kovia ja vaikeasti työstettäviä seoksia, jonka takia niillä on suhteellisen vähän teknistä käyttöä. Ne ovat myös iskuhauraita huoneenlämpötilassa sekä herkkiä äkillisille lämpötilan muutoksille. Niiden käyttö koneenrakennuksessa rajoittuu siksi tarkoituksiin, joissa käytönvalinnan perusteena ovat suuri kulutuskestävyys, kemiallinen kestävyys tai tulenkestävyys. Valkoinen valurauta on myös lähtökohtana ns. adusoidulle eli tempervaluraudalle.

Erikoisvaluraudat

Ns. erikoisvalurautoihin voidaan lukea mm. kulutuksenkestävät valkoiset valuraudat, runsasseosteiset korroosion- sekä ns. tulenkestävät somu- ja pallografiittiraudat. Ko. ominaisuudet saavutetaan yleensä seostuksella, mutta halutun loppurakenteen saavuttaminen edellyttää myös esimerkiksi jäähtymisnopeuden ja hiilielivivalenttiarvon kontrollointia sekä joskus myös lämpökäsittelyjä.

Kulutusta kestävät valuraudat sisältävät sekä valkoisia valurautoja että grafiittisia valurautoja, jotka kukin ovat edukseen tietyissä tribologisissa olosuhteissa. Tärkeimmät kulutusta kestävät valuraudat ovat seostamattomat valkoiset valuraudat, austemeroitadut pallografiittivaluraudat (I. ADI), Ni-Hard-raudat sekä runsaskromiset raudat. Grafiittisten valurautojen kulumiskestävyyttä voidaan lisätä myös pintalämpökäsittelyin.

Syöpymistä kestäviin valurautoihin luetaan mm. austeniittiset somu- ja pallografiittiraudat, runsaskromiset valuraudat sekä runsaasti piillä seostetut valuraudat. Näiden kaikkien korroosionkestävyys perustuu passiivikerroksen muodostumiseen raudan pinnalle. Austeniittisten valurautojen syöpymiskestävyys on jossain määrin heikompi kuin austeniittisilla teräksillä, mutta

niiden valettavuus on vastaavasti parempi. Cr- ja Cr-Mo-seosteisilla raudoilla on hyvä kuumuuden ja syöpymiskestävyys etenkin hapettavissa liuoksissa, joissa suojakalvo syntyy rikkoutuessaan nopeasti uudelleen. Piiseosteisilla valuraudoilla on erinomainen kestävyys mm. rikki- ja typpiha-possa kaikilla väkevyyksillä tavallisissa käyttölämpötiloissa.

Kuumuutta kestävät valuraudat jaetaan silaleihin (5-7 % piitä), austeniittisiin rautoihin sekä niuk-ka hiilisiin ja runsaskromisiin rautoihin. Jo pienikin kromilisäys parantaa raudan kestävyyttä korkeissa lämpötiloissa, joten vielä lämpötila-alueella 450–550°C voidaan käyttää vain 0,5–1,5 % Cr sisältäviä muuten seostamattomia valurautoja. Välillä 550–750°C hapettuminen tulee merkittäväksi ja usein tällä alueella käyttökelpoisimpia valurautoja ovat silalit eli piiraudat, joilla on lisäksi erinomainen korroosionkestävyys. Hinnaltaan edullisia suomugrafiittisen rakenteen omaavia silaleita voidaan käyttää lähinnä kohteisiin, joissa metallilta ei vaadita suuria mekaanisia rasituksia. Pallografiittisia silaleita voidaan käyttää vaativimmissakin kohteissa, koska ne ovat huomattavasti sitkeämpiä. Ni-resist-lajit sopivat stabiloimislämpökäsiteltyinä höyrynkäsittelylaitteisiin 480–540 °C:n lämpötiloihin saakka ja rikkiä sisältäviä kaasuja ne kestävätkin korkeintaan 540 °C:een, vaikkakin niiden kuumuudenkestävyys on hyvä aina 800 °C:een. Lämpötila-alueella 750–950°C sopivimpia ovat runsaasti nikkeliä sisältävät seokset (lähinnä Nicrosilal) sekä 15–35% kromia sisältävät seokset.

Austeniittiset valuraudat sopivat myös alhaisiin käyttölämpötiloihin. Esimerkiksi kromittomalla Ni-Resist D-2C pallografiittiraudan (GGG-Ni22) iskutkeys säilyy korkeana aina -100 °C:een. Enemmän mangaanilla ja nikkelillä seostetun Ni-Resist D-2M-valuraudan erinomainen sitkeys säilyy vielä jopa -196 °C:ssakin.

Epämagneettisia austeniittisiä rautavaluja tarvitaan mm. sähkölaiteteollisuudessa generaattoreissa, moottoreissa, muuntajissa, katkaisimissa jne., joissa magneettiset metallit aiheuttavat energiahäviöitä hystereesivirtojen vuoksi, sekä esimerkiksi tietyissä sotilasteknisissä epämagneettisuutta edellyttävissä käyttökohteissa. Lisäksi esimerkiksi mittauslaitteissa käytetään erikoisvaluja, joissa lämpötilan vaihteluiden aiheuttamat mittamuutokset ovat mahdollisimman pieniä.