

Painevalumuotin valmistusmateriaalit

Tuula Höök – Tampereen teknillinen yliopisto

Painevalumuotin muottilaatat, inserttikappaleet ja keerna-aihiot on tavallisesti valmistettu jostakin kuumatyöteräslaadusta. Kuumatyöteräkset ovat kromilla, molybdeenilla, nikkellillä ja vanadiinilla seostettuja työkaluteräksiä. Niiden tärkeimmät ominaisuudet ovat:

- Pieni lämpölaajenemiskerroin
- Hyvä lämmönjohtavuus
- Hyvät mekaaniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa
- Korkea päästölämpötila
- Hyvä virumisenkesto
- Sitkeys

Ominaisuudet on valittu siten, että painevaluprosessin aikana tapahtuvat lämpöshokit aiheuttaisivat muottipesän pintaan säröjä vasta mahdollisimman pitkän ajan kuluttua. Lisäksi muotin tulisi säilyttää lämpötasapaino hyvin ja muottimateriaalin tulisi säilyä pehmenemättä, vaikka valettava metalli tuo mukanaan huomattavan paljon lämpöä. Useimpien metalliseosten mekaaniset ominaisuudet alkavat heikentyä jo 200 – 300 asteen lämpötiloissa. Kuumatyöteräkset on koostettu siten, että lujuus- ja kovuusominaisuudet säilyvät hyvinä vielä 300 – 400 asteeseen saakka.

Pieni lämpölaajenemiskerroin lieventää lämpötilan vaihteluiden aiheuttamia jännitystiloja. Jännitystilat ovat yksi merkittävien lämpöväsymissäröjen muodostumiseen vaikuttava tekijä. Muotti pysyy parhaiten lämpötasapainossa, jos se on valmistettu hyvin lämoöä johtavista materiaaleista. Muottiin ei tällöin muodostu helposti paikallisia kuumia kohtia. On olemassa lukuisia materiaaleja, jotka johtavat lämpöä paremmin kuin teräs, mutta minkään muun materiaalin mekaaniset ominaisuudet eivät ole riittävät.

Muottilaatat, jotka eivät ole suoraan kosketuksissa valettavaan metalliseokseen, tehdään jostakin niukkaseosteisesta teräslaadusta, tavallisesti käytetään laatua 1.1730 (AISI 1045/1050). Ohjaus- ja paikoituskomponenttien sekä muotin liikkuvien osien materiaalit valitaan komponentin vaatimusten perusteella. Osat ovat tavallisesti standardiosia, joihin materiaalivalinta on tehty jo valmiiksi. Valittavana on korkeintaan 2 – 3 vaihtoehtoa, mutta tavallisesti vain yksi.

Ulostyöntimet ovat standardiosia, jotka ovat kosketuksissa valettavaan metalliseokseen. Tavallisesti niihin on muutama materiaalivaihtoehto. Valinta tehdään sen perusteella, kuinka pitkä käyttöikä ulostyöntimelle halutaan. Tavallinen materiaali on esimerkiksi 1.2344 (H13). Painevalumuoteissa käytetään nitrattuja, ei karkaistuja ulostyöntimiä.

Taulukossa 1 on esitetty vertailu työkaluterästen, rakenneteräksen, ruostumattoman teräksen ja berylliumkuparin muutaman tärkeimmän ominaisuuden välillä. Berylliumkupari on mukana esimerkkinä materiaalista, joka on hyvä lämmönjohte ja erinomaiset mekaaniset ominaisuudet.

Euroopan unionin EN ISO standardi sisältää neljä kuumatyöteräslajia. Näiden lisäksi teräsvalmistajilla on useita omia laatuja, kuten Uddeholmin Dievar. Useimmiten teräsvalmistajien kauppanimet ovat kuitenkin jotakin standardilaatua – joko täsmälleen tai pienin muutoksin. Taulukko 2 luettelee kaikki EN-ISO –standardin sisältämät kuumatyöteräkset ja taulukko 3 joitakin kauppanimikkeitä.

Painevalumuottiin käytettävän teräksen tulisi olla laadukasta ja karkaisun tulisi onnistua mahdollisimman hyvin. Tällöin muotti kestää käytössä mahdollisimman pitkään. Useat teräsvalmistajat ilmoittavat tekevänsä tiettyä kuumatyöteräslaatua, mutta eri valmistajien teräksissä on suuria laatueroja. Painevalumuottiin käytettävän teräksen tulee olla rakenteeltaan yhtenäistä eikä siinä saa olla sulkeumia tai pintavikoja. Lämpökäsittelyn tulee olla huolella tehty siten, että teräksessä on kaikkialla toivottu mikrorakenne.

ASM Handbook osa 11¹ luettelee lisää vaatimuksia:

- Muotin mekaaninen suunnittelu täytyy tehdä valitun teräksen ominaisuuksien, käytössä olevien valmistusmenetelmien ja muotin käyttötarkoituksen perusteella. Suurin osa ongelmista johtuu muotissa olevista terävistä kulmista tai jyrkkien paksuusvaihteluiden aiheuttamista jännityskeskittymistä.
- Teräslaji täytyy valita muotin rakenteen, käytettävissä olevien valmistusmenetelmien, valuolosuhteiden ja halutun muotin kestoajan perusteella. Teräksen sitkeys ja kulumisenkesto ovat osin toisensa kumoavia ominaisuuksia. Useimmiten on parempi valita materiaali, jolla on suurempi sitkeys.
- Teräksen täytyy olla makrorakenteeltaan yhtenäistä, siinä ei saa olla sulkeumia eikä pintavikoja. Tavallisimpia vikoja ovat ontelot, pintahalkeamat (esimerkiksi saumat tai kerrostumat), huokoisuus, jäähtymisen aiheuttamat halkeamat, erkaumat ja epätasainen karbidijakauma.
- Koneistusmenetelmät eivät saa vaikuttaa muottiteräksen pinnan mikrorakenteeseen tai pinnalle tehtyihin viimeistelyihin. Koneistaminen ei myöskään saa muodostaa jännityskeskittymiä, koska ne voivat aiheuttaa ongelmia lämpökäsittelyn aikana tai aiheuttaa muotin rikkoontumisen. Uppokipinätyöstö vaikuttaa teräksen mikrorakenteeseen erityisen haitallisesti. Se tuottaa teräksen pintakerrokseen hauraan martensiittisen kerroksen, joka täytyy poistaa kokonaan ennen kuin painevalumuotti voidaan ottaa tuotantokäyttöön.
- Lämpökäsittelyn täytyy tuottaa teräkseen haluttu mikrorakenne, kovuus, sitkeys ja karkaistavuus sekä pintakerroksessa että sisäosissa. Painevalumuotin insertit ja keernakappaleet karkaistaan ennen käyttöä. Karkaisu on hankala tehdä siten, että pintakerroksen mikrorakenne säilyy muuttumattomana. Hiilenkato voi aiheuttaa tuotantokäytössä suuria ongelmia. Toinen tyypillinen vika on yliaustenisoituminen, joka johtuu liian korkeasta austenisointilämpötilasta.
- Hionta ja muut viimeistelytoimenpiteet eivät saa vaikuttaa pinnan rakenteeseen.
- Muotti on valmistettava siten, että osat asettuvat koottaessa tarkasti paikoilleen. Epätarkkuudet voivat aiheuttaa ylimääräisiä jännitystiloja, joiden suuruus ja paikka on hankalasti ennustettavissa. Jännitystilat nopeuttavat muotin kulumista tai nopeuttavat halkeamien muodostumista.
- Muottia ei saa ylikuormittaa.

¹ George F. Vander Voort, *Failures of Tools and Dies*, ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention, ASM USA 2002

Teräsvalmistajat antavat yleensä ohjeet lämpökäsittelyä varten. Lämpökäsittelyn onnistuminen vaikuttaa huomattavasti lämpöväsymiseen ja pintasäröjen muodostumiseen. Lämpöväsyminen on tavallisin painevalumuotin vauriotyyppi. Austenitointilämpötila täytyy pitää sopivissa rajoissa – ei liian korkealla eikä liian matalalla. Jos muotti on tarkoitettu alle 700 °C valulämpötiloihin, materiaalin sitkeys vaikuttaa myös erittäin paljon.

Lämpökäsittely vaikuttaa materiaalin sitkeyteen ja kovuuteen. Tavoiteltava kovuus riippuu sekä muottiteräksestä että valettavasta metalliseoksesta. Tyypillinen kovuus on luokkaa 44 HRC - 52 HRC. Metalliseokset, joiden valulämpötila on korkea, valetaan pienempään kovuuteen käsitellyissä muoteissa kuin keskikorkeissa tai matalissa lämpötiloissa valettavat metalliseokset. Kupariseokset valetaan korkeissa (noin 960 °C), magnesium- ja alumiiniseokset keskikorkeissa (noin 700 °C) ja sinkkiseokset matalissa (noin 450 °C) lämpötiloissa. Kovuus määrittyy päästölämpötilan mukaan. Maksimikovuuden tuottava päästölämpötila-alue on tavallisesti kapea. Lämpötilan kasvattaminen pienentää kovuutta. Sitkeys määrittyy karkaisun jälkeen tehtävän jäähtymisen nopeuden perusteella. Suuri jäähtymisnopeus tuottaa yleensä hauraan rakenteen ja hidas nopeus sitkeän.

Teräksen sisäinen rakenne vaikuttaa sitkeyteen huomattavasti. Rakenteeseen kuuluttomat sulkeumat ja erkaumat vaikuttavat eniten. Teräksen tulisi olla niin puhdasta ja tasarakenteista kuin mahdollista. Teräsvalmistajat luokittelevat teräksiä 'standard' ja 'superior' -luokkiin. 'Superior' -laatujen mikrorakenne on hienompi ja tasalaatuisempi kuin 'standard' -laatujen. 'Superior' -teräksiset muotit kestävät tuotantolosuhteissa pidempään. 'Superior' -laadun tunnistaa kaupanimeen liitetystä "supra", "supreme" tai vastaavasta tunnuksesta.

Painevalumuotin kokonaiskustannukset koostuvat seuraavista:

- Materiaalikustannukset, suunnittelu ja koneistus
 - Lämpökäsittely
 - Tuotannon ylösajo
-
- Muottihuolto ja korjaus
 - Menetetyn tuotannon arvo suunnittele mattomien tuotantopysähdysten aikana
 - Viivästyneiden toimitusten aiheuttamat kustannukset
 - Susikustannukset

Kaikki kustannukset täytyy kattaa myydylä tuotannolla. Liiketoiminta on kannattavampaa, jos tuotantomäärä muottia kohti pysyy korkeana, muotti ei rikkoonnu ja jos muotin elinikä on riittävän pitkä. Materiaalikustannukset, suunnittelu- ja koneistuskustannukset sekä kaikki muut kustannukset, jotka syntyvät ennen kuin muottia ajetaan tuotantoon (listassa viivan yläpuolella), ovat vain pieni osa kokonaiskustannuksista. Jos muotin valmistusmateriaalit valitaan järkevästi ja pesät lämpökäsitellään huolella, suunnittele mattomien tuotantopysähdysten toden-näköisyys pienenee ja myös suunniteltuja huoltotoimenpiteitä tarvitaan harvemmin. Huollon ja tuotantotulojen kustannukset on lueteltu viivan alapuolella.

Muottimateriaalikustannukset lankeavat välittömästi, mutta tuotanto-ongelmien aiheuttamat kustannukset vasta myöhemmin ja pitkän ajan kuluessa. Järkevä kappaleen ostaja ennakoi mahdolliset ongelmat ja osaa tehdä oikeat päätökset ajoissa. Myöhästyneen tuotannon aiheuttamat kustannukset voivat olla hyvin suuret, koska painevaluttu komponentti on usein osa kokoonpanoa. Lopputuotteen on oltava markkinoilla ajoissa eikä tuote saa aiheuttaa ongelmia loppukäyttäjille.

Taulukko 1. Työkaluterästen, rakenneteräksen, ruostumattoman teräksen ja berylliumkuparin ominaisuuksien vertailu.

Materiaali	Analyysi	Lämmönjohtavuus, W/m °C	Lämpöpiteneimis- kerroin 1 / °C	Myötöraja R _{p0,2} MPa	Venymä, %	Kovuus
AISI 1045/1050 (1.1730) niukkaseosteinen teräs	C: 0,47 – 0,55 – Mn: 0,60 – 0,90	49,8 huoneen lämpötilassa	12,4 × 10 ⁻⁶ 250 °C:ssa	425 huoneen lämpötilassa	20 huoneen lämpötilassa	183 – 255 HB
BÖHLER N360 ISOEXTRA ruostumaton teräs	C: 0,30 - Si: 0,60 - Mn: 0,40 - Cr: 15,00 - Mo: 1,00 - N: 0,40	14 huoneen läm- pötilassa	11,6 × 10 ⁻⁶ 400 °C:ssa			56 – 57 HRC
Uddeholm Impax Supreme, työkaluteräs ruiskuvalu- muoteille	C: 0,37 – Si: 0,30 – Mn: 1,40 – Cr: 2,00 – Ni: 1,00 – Mo: 0,20 – S: <0,01	30 200 °C:ssa	12,7 × 10 ⁻⁶ 200 °C:ssa	900 huoneen lämpötilassa, 800 200 °C:ssa		290 – 330 HB ²
Uddeholm Orvar Supreme, kuumatyöteräs painealu- muoteille	C: 0,39 - Si: 1,00 – Mn: 0,40 – Cr: 5,20 – Mo: 1,40 – V: 0,90	31 400 °C:ssa	12,7 × 10 ⁻⁶ 400 °C:ssa	1210 huoneen lämpötilassa, 1000 400 °C:ssa; HRC = 44 ³	13 huoneen lämpötilassa, 15 400 °C:ssa	44 – 52 HRC
CuBe2, berylliumkupari	Be: 1,8...2,1 - Fe: max 0,05 - Ni: max 0,10 - Co: max 0,45 - Ni + Co: min 0,2	85 – 133 ⁴ 200 °C:ssa	17 × 10 ⁻⁶ 200 °C:ssa	700 – 1000 hu- oneen lämpöti- lassa	0 – 6 huoneen lämpötilassa	340 – 400 HB

² Lämpökäsitelty, käytetään yleensä tässä kovuudessa, voidaan karkaista tarvittaessa³ Mekaaniset ominaisuudet paranevat, kun kovuus kasvaa⁴ Eri arvoja lähteestä riippuen

Taulukko 2. EN ISO 4957 kuumatyöteräkset, kauppanimet ja valmistajat

EN ISO 4957 laji	Muut standardit	Analyysi, %	Kauppanimet	Käyttökohteet
55NiCrMoV7	1.2714 AISI L6	C: 0,50-0,60 Si: 0,10-0,40 Mn: 0,60-0,90 Cr: 0,80-1,20 Mo: 0,35-0,55 V: 0,05-0,15 Ni: 1,50-1,80	- Böhler W500 - Cogne Acciai UR16 - Dörrenberg A50 - Kind&Co Dominial PWM - Metal Ravne UTOPEX2 - S + B THYROTHERM® 2714 - S + C MÄRKER® 1.2714 - Uddeholm ALVAR 14	Kuumatyöteräs takomuotteihin, kuumatyötuurniin, pitimiin ja leikkaustyökaluihin. Ei erityisesti painevalumuotteihin.
32CrMoV12-28	1.2365 AISI H10	C: 0,28-0,35 Si: 0,10-0,40 Mn: 0,15-0,45 Cr: 2,70-3,20 Mo: 2,50-3,00 V: 0,40-0,70	- Böhler W320 - Cogne Acciai UD27 - Dörrenberg DM3 - Kind&Co Dominial RP - OSSA 1.2365 - S + B THYROTHERM® 2365 EFS/2365 EFS SUPRA - S + C MÄRKER® 1.2365	Erityisen voimakkaasti rasitetut kuumatyökalut, raskaiden metalliseosten prosessointityökalut, tuurnat, muotit ja säiliöt putkien ja tankojen pursottamiseen; kuumapursotustyökalut, raskaiden metalliseosten painevalutyökalut, muotomeistit, insertit ja kuumaleikkurin terät.

X37CrMoV5-1	1.2343 AISI H11	C: 0,33-0,41 Si: 0,80-1,20 Mn: 0,25-0,50 Cr: 4,80-5,50 Mo: 1,10-1,50 V: 0,30-0,50	<ul style="list-style-type: none"> - Böhler W300, (W400 VMR, suunnilleen 1.2343) - Cogne Acciai UD12 (- Cogne Acciai UPKR, 1.2340, muunnettu AISI H11) - Dörrenberg WE5 - Kind&Co Dominial USN - Metal Ravne UTOPMO1, RAVNEX (Muunnettu 1.2343) - OSSA 1.2343 - S + B THYROTHERM® 2343 EFS/2343 EFS SUPRA (- S + B THYROTHERM® E 38 K suunnilleen 1.2343) - S + C MÄRKER® 1.2343, MÄRKER® 1.2343-Esu - Uddeholm Vidar Supreme 	Yleiskäyttöteräs. Painevalutyökalut ja pursotustyökalut kevytmetalleille, takomuotit, tuurnat, muotit ja sylinterit muovien prosessointiin, kuumaleikkurin terät.
X38CrMoV5-3	1.2367 (AISI H10)	C: 0,36-0,40 Si: 0,30-0,50 Mn: 0,30-0,50 Cr: 4,80-5,20 Mo: 2,70-3,20 V: 0,40-0,60	<ul style="list-style-type: none"> - Böhler W303, (W403, suunnilleen 1.2367) - Kind&Co Dominial RPU - Metal Ravne UTOPMO7 - S + B THYROTHERM® 2367 EFS/2367 EFS SUPRA - S+ C MÄRKER® 1.2367, MÄRKER® 1.2367-Esu 	Takomuotit, painevalumuotit, vuoraukset ras-kaita metalliseoksia varten, profilointimuotit ja tuurnat.
X40CrMoV5-1	1.2344 AISI H13	C: 0,35-0,42 Si: 0,80-1,20 Mn: 0,25-0,50 Cr: 4,80-5,50 Mo: 1,20-1,50 V: 0,85-1,15	<ul style="list-style-type: none"> - Böhler W302 - Cogne Acciai UD14 - Dörrenberg WP5V - Kind&Co Dominial USD - Metal Ravne UTOPMO2 - OSSA 1.2344 - S + B THYROTHERM® 2344 EFS/2344 EFS SUPRA - S + C MÄRKER® 1.2344 - Uddeholm Orvar Supreme 	Yleiskäyttöteräs kevytmetallien prosessointiin. Painevalumuotit, pursotustyökalut, ruiskuvalu-muotit vaativiin sovelluksiin, nitratut ulostyöntimet, kuumaleikkurin terät, takomuotit ja tuurnat.

50CrMoV13-15	1.2355	C: 0,45-0,55 Si: 0,20-0,80 Mn: 0,50-0,90 Cr: 3,00-3,50 Mo: 1,30-1,70 V: 0,15-0,35	-	
X30WCrV9-3	1.2581 AISI H21 AISI H22	C: 0,25-0,35 Si: 0,10-0,40 Mn: 0,15-0,45 Cr: 2,50-3,20 V: 0,30-0,50 W: 8,50-9,50	- Böhler W100 - Kind&Co Dominial MA - Metal Ravne UTOP2, UTOPSP - OSSA 1.2581	Voimakkaasti rasitetut kuumatyökalut, tuurnat, muotit ja säiliöt putkien ja tankojen pursottamiseen, kuumapursotustyökalut, työkalut ruuvien, niittien ja mutterien valmistamiseen, painevalutyökalut, insertit, kuumaleikkurin terät.
X35CrWMoV5	1.2605	C: 0,32-0,40 Si: 0,80-1,20 Mn: 0,20-0,50 Cr: 4,75-5,50 Mo: 1,25-1,60 V: 0,20-0,50 W: 1,10-1,80	-	
38CrCoWV18-17-17	-	C: 0,35-0,45 Si: 0,15-0,50 Mn: 0,20-0,50 Cr: 4,00-4,70 Mo: 0,30-0,50 V: 1,70-2,10 W: 3,80-4,50 Co: 4,00-4,50	-	

Taulukko 3. Muita standardeja ja kaupunimiä

Standardinumero	Analyysi, %	Kauppanimet	Käyttökohteet
1.2706, X2NiCoMo18-9-5	C: max. 0,005 Si: max. 0,05 Mn: max. 0,10 Mo: 5,00 Ni: 18,50 Co: 9,00 Ti: 0,70 Al: 0,10	Böhler W720 Maraging, suunnilleen 1.2706	Työkaluteräs kuuma- ja kylmätyöhön, pitkäaikaiseen käyttöön aina noin 450°C saakka, työkalut puristimiin, kylmäpursotustyökalut, meistotyökalut, muoviteollisuuden muotit, alumiinin ja sinkin painevalutyökalut, kuumapuristustyökalut, kylmätuurnat.
1.2779, X6NiCrTi26-15	-	Böhler W750, suunnilleen 1.2779 Kind&Co Dominial HWF	Kuumatyöteräs raskaiden metalliseosten prosessointiin, pursotustyökalut, painevalutyökalut ja kuumapuristustyökalut.
1.2885, AISI H10A, X32Cr MoCoV3 3 3	C: 0,32 Si: 0,30 Cr: 3,00 Mo: 2,80 Co: 2,90 V: 0,65	Böhler W321 ISODISC, suunnilleen 1.2885 Cogne Acciai UD30 Kind&Co Dominial RPCO, 1.2885 Metal Ravne UTOPCO2 S + B THYROTHERM® 2885 EFS	Painevalumuotit kupariseoksille, kuparin pursotustyökalut, kuumapuristustyökalut, työkalut ruuvien, niittien ja mutterien valmistamiseen.
1.2886, X15CrCoMoV10-10-5	C: 0,16 Si: 0,20 Mn: 0,20 Cr: 10,00 Mo: 5,10 V: 0,50 Co: 10,00	Böhler W705	Termisesti ja mekaanisesti voimakkaasti rasitetut kuumatyökalut, raskaat ja kevyet metalliseokset, tuurnat, muotit ja säiliöt metalliputkien ja tankojen pursotukseen, kuumapursotustyökalut, työkalut ruuvien, niittien ja mutterien valmistamiseen, painevalutyökalut, insertit ja kuumaleikkurin terät.

1.2999,	C: 0.45 Si: 0.30 Mn: 0.30 Cr: 3.0 Mo: 5.0 V: 1.00	S + B THYROTHERM® 2999 EFS SUPRA	Insertit ja takomuotit nopeaan taontaan, runsaasti kulutukselle altistetut työkalut, raskaiden metalliseosten painevalu, kuumatyökalut kaikkein korkeimpiin lämpötiloihin.
Erikoisseokset		Böhler W360 ISOBLOC S + C MÄRKER® DCM HP Uddeholm Hotvar Uddeholm QRO 90 Supreme	Erikoislaatuja, ei-standardoituja kuumatyöteräksiä. Vaativiin käyttökohteisiin, esimerkiksi suurikokoisiin painevalumuotteihin.

Lähteet

Böhler-Uddeholm, <http://www.bohler-uddeholm.com>

Cogne Acciai Speciali S.p.a., <http://www.cogne.com>

Dörrenberg Edelstahl, <http://www.doerrenberg.de>

Kind&Co Edelstahlwerk, <http://www.kind-co.de>

Matweb, the online materials information resource, <http://www.matweb.com>

Metal Ravne, <http://www.metalravne.com>

Norwood, A J; Dickens, P M; Soar, R C; Harris, R A, A new fatigue test procedure for die-casting tool materials, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B, Journal of Engineering Manufacture. Vol. 221, no. 6, pp. 955-965. 2007

Schmidt + Clemens Gruppe, <http://www.schmidt-clemens.com>

Schmolz + Bickenbach Group, <http://www.schmolz-bickenbach.com>

SC Oteluri Pentru Scule SA, <http://www.ossa.ro>

Sjöström Johnny, Bergström Jens, Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 153-154, pp 1089-1096. 2004

Voort George F. Vander, Failures of Tools and Dies, ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention, ASM USA 2002