

Energiforbrug, et gidsel ved fremstilling af støbegods

Støbning af komponenter er en meget vigtig fremstillingsproces, som dog kræver ret meget energi, da materialet skal smeltes inden det kan støbes. Det er nødvendigt og et overlevelsesspørgsmål, at industrien investerer i tiltag som reducerer energiforbruget og dermed energiomkostningerne uden at afvige fra de kvalitetskrav, der stilles til de støbte emner. Det er blevet aktuelt i løbet af efteråret og vinteren 2021 med voldsomt stigende elpriser, der formentlig vil blive bibeholdt på dette niveau for en ikke overskuelig fremtid. Øget udbytte er en måde at opnå et lavere energiforbrug på.

AF STEN FARRE

Det er i forbindelse med støbningen, at de største udbyttetab opstår på grund af forme og værktøjers udformning. Hvor meget smeltet metal, der kræves for at fremstille et støbt produkt påvirkes udover volumen hos emnet, også af volumen hos det samlede støbesystem, der er nødvendigt at benytte sig af. [1].

I 2013 var det gennemsnitlige udbytte i Sverige af for eksempel stålstøbegods godt 50 %, men lavere end 40 % i udbytte er ikke unormalt, da der ofte bruges overdimensionerede støbesystemer og alt for store efterfødere. Konsekvensen af dette er, at der forbruges meget energi gennem hele processen, uden at det tilfører produktet nogen ekstra fordel. For at fortsat være konkurrencedygtig, er det afgørende løbende at udvikle emnets design, processer og materialer mod en total reduktion af energiforbruget.

Rapporten "Foundrybench D19: Good practice guide on energy saving potentials and opportunities for foundries" [2] præsenterer en undersøgelse vedrørende energieffektivitet for støberier i Europa. Hos et støberi ligger det meste af energiforbruget i dag i produktionsprocesserne, hovedsageligt under smeltningen af materialet, til at holde det smeltede materiale varmt, under selve støbningen og eventuelt efterfølgende varmebehandling. En total energireduktion kan opnås gennem hovedsageligt tre forskellige angrebsmåder.

Mindre energikrævende ovne til smeltning af materialet og bedre holdeovne.

Bedre håndtering af skeer til smeltetransport og støbning

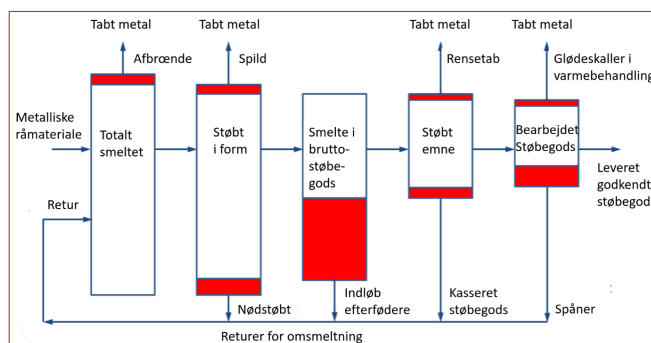
Udbytteforøgende foranstaltninger gennem optimering af indløbsystem, efterfødere og designoptimering af nye emner.

Udbytteforbedrende tiltag er måske nemmest at benytte sig af, da det kun kræver et ændringsarbejde i metodeforberedelsen at implementere en ny udviklingsmetodologi til dimensionering af løbesystem og efterfødere, samt at der indføres topologioptimering af nye komponenter under designstadiet.

Det er velkendt, at det der påvirker hvor meget smeltet metal, der kræves for at fremstille et støbt produkt er, udover volumen af komponenten, også volumen af støbe- og fødesystemet, der er nødvendigt for at fremstille den støbte komponent.

Det meste af energiforbruget til fremstilling af støbegods foregår under smeltning. Det er i forbindelse med støbningen, at forskelle i udbyttet afgør, hvor meget der skal sendes tilbage til omsmelting eller transporteres til et separat eksternt anlæg for omsmelting.

Figur 1 beskriver materialestrømmen i et typisk stålstøbbestøberi, hvor den farvede del indikerer tab eller reduceret udbytte. Energitabet under smeltning afhænger af typen af smelteovn og alderen hos den ildfaste indfodring. En virkningsgrad ved smeltning er 45 til 80 %, dvs. at 55 til 20 % forsvinder som tab for omgivelserne [3]. En del genbruges dog af smelteovnens kølevand, der via varmevekslere opvarmer luft til lokaler eller det varme brugsvand.

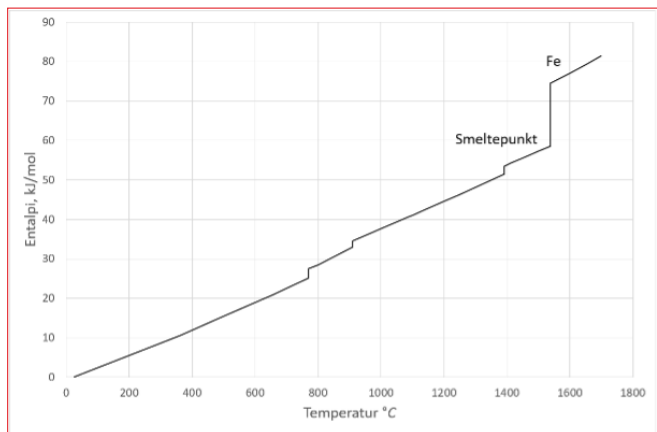


Figur 1 Materialebalance fra råvare til leveret godkendt støbegods

Energiforbruget for at smelte 1000 kg af en legering

Varierende information eksisterer om, hvor meget energi der er nødvendig for at smelte en specifik legering, ofte angivet som et rent grundstof. For en simpel stållegering med lavt kulstof, "jern", er værdien 59 kJ/mol [5] der kræves for at nå 1539°C, derefter kræves det yderligere 15,5 kJ/mol [5] som vist i figur 2 for at holde alt i smeltet form. Det er muligt at beregne det teoretiske energiforbrug til

smeltning af en given legering ved hjælp af et systems indre energi, entalpi, angivet som kJ/mol.



Figur 2 Entalpi for en almindelig stållegering. Revideret fra [5]

Fra figur 2 kan det ses, at der sker flere hop på kurven. Hvert lodret spring er en transformation i atomstrukturen, fasetransformationer. Det sidste hop yderst til højre er, når materialet smelter (M). Højden af det spring er det, der kaldes et materials latente varme (indre energi). Det er mængden af energi, der frigives, når materialer størkner, og som påvirker for eksempel afkølingshastigheden hos forskellige materialer. For at udstøbe smelten skal temperaturen hæves yderligere til en taptemperatur fra ovnen. Hvor meget energi der skal til for at opvarme et emne, afhænger af den specifikke varme hos et givet materiale og en temperaturforskel.

Mol er SI-enheden for stofmængde. Et system med stofmængden 1 mol indeholder et vist antal elementer (atomer eller molekyler) af dette stof. Alle systemer på 1 mol har det samme antal elementer, uanset tryk, temperatur og aggregeringstilstand. Bemærk at forskellige elementer, såsom grundstoffer, har forskellige masser som vist i det periodiske system i figur 3, hvor det er angivet hvad 1 mol grundstof vejer i gram, såsom at atomvægten er 12,011 g/mol for kulstof og 26,9815 g/mol for aluminium.

1																	18					
H Hydrogen 1.00794																		He Helium 4.002602				
Li Lithium 6.941	Be Beryllium 9.012182																B Boron 10.811	C Carbon 12.011	N Nitrogen 14.007	O Oxygen 15.999	F Fluorine 18.998	Ne Neon 20.180
Na Sodium 22.990	Mg Magnesium 24.305											Al Aluminium 26.982	Si Silicon 28.086	P Phosphorus 30.974	S Sulfur 32.065	Cl Chlorine 35.453	Ar Argon 39.948					
K Potassium 39.098	Ca Calcium 40.078	Sc Scandium 44.956	Ti Titanium 47.88	V Vanadium 50.942	Cr Chromium 51.996	Mn Manganese 54.938	Fe Iron 55.845	Co Cobalt 58.933	Ni Nickel 58.693	Cu Copper 63.546	Zn Zinc 65.38	Ga Gallium 69.723	Ge Germanium 72.64	As Arsenic 74.922	Se Selenium 78.96	Br Bromine 79.904	Kr Krypton 83.8					
Rb Rubidium 85.468	Sr Strontium 87.62	Y Yttrium 88.906	Zr Zirconium 91.224	Nb Niobium 92.906	Mo Molybdenum 95.94	Tc Technetium 98	Ru Ruthenium 101.07	Rh Rhodium 102.91	Pd Palladium 106.36	Ag Silver 107.87	Cd Cadmium 112.41	In Indium 114.82	Sn Sn 118.71	Sb Antimony 121.76	Te Tellurium 127.6	I Iodine 126.91	Xe Xenon 131.29					
Cs Cesium 132.91	Ba Barium 137.33	La Lanthanum 138.91	Hf Hafnium 178.49	Ta Tantalum 180.95	W Tungsten 183.84	Re Rhenium 186.21	Os Osmium 190.23	Ir Iridium 192.22	Pt Platinum 195.08	Au Gold 196.97	Hg Mercury 200.59	Tl Thallium 204.38	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 208.98	Po Polonium 209	At Astatine 210	Rn Radon 222					
Fr Francium 223	Ra Radium 226	Ac Actinium 227	Rf Rutherfordium 261	Db Dubnium 262	Sg Seaborgium 266	Bh Berkelium 267	Hs Hassium 277	Mt Moscovium 288	Ds Darmstadtium 289	Rg Roentgenium 290	Cn Carlbergium 295	Nh Nihonium 294	Fl Flerovium 299	Mc Mendelevium 301	Lv Livermorium 303	Ts Tennessine 304	Og Oganesson 304					

Atomnummer

Symbol

Navn

Atomvægt

Lanthanoider

Actinoider

Ce

Pr

Nd

Pm

Sm

Eu

Gd

Tb

Dy

Ho

Er

Tm

Yb

Lu

Th

Pa

U

Np

Pu

Am

Cm

Bk

Cf

Es

Fm

Md

No

Lr

www.BioSite.dk

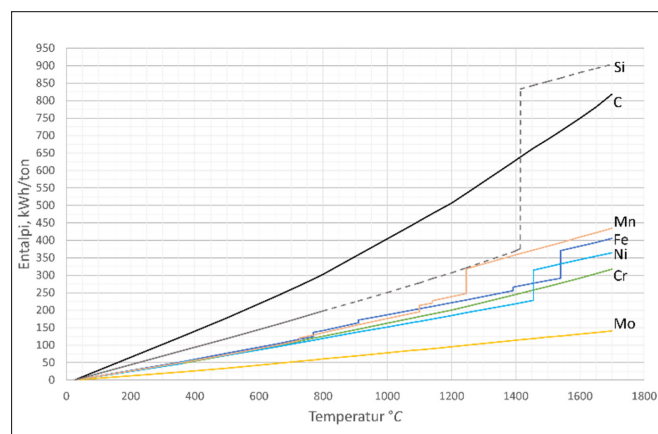
Figur 3 Del af det periodiske system [4]

Sammenstilling af entalpi for en række grundstoffer hvor mængden energi, der kræves for at tilføje hvert enkelt

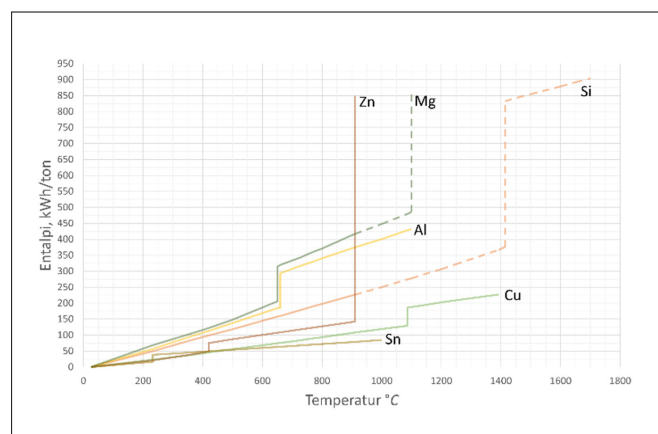
stof, for at opnå en given temperatur er fremstillet og rapporteret i en række diagrammer i bogen Thermodynamic Tables for Process Metallurgists [5].

Ved hjælp af figur 2 og andre tabeller fra samme bog [5], som beskriver præcist, hvor meget energi der skal til for at opvarme et stof til en bestemt temperatur, kan den teoretiske mængde energi udlæses, og en tabel kan fremstilles for flere vigtige elementer, der indgår almindelige støbelegeringer. Enheden kJ/mol omregnes passende til kWh/ton ved at bruge molekyelvægten af hvert grundstof ved en given temperatur og en omregningsfaktor.

I figur 4 og figur 5 er der indsat lidt flere legeringselementer og forfatteren har beregnet et teoretisk billede af det energiforbrug, der skal til for at opvarme elementer til en bestemt temperatur for henholdsvis jernlegeringer og metallegeringer.



Figur 4 Teoretisk energiforbrug til opvarmning af almindelige legeringselementer til jern- og stållegeringer [5]



Figur 5 Teoretisk energiforbrug til opvarmning af almindelige legeringselementer til metallegeringer [5]

Da sammensætningen af en legering er kendt, kan ligningen $H = \sum (H_i \cdot w_i)$ bruges til at beregne entalpi for sammensætningen af den pågældende legering, et teoretisk energiindhold.

Den mængde energi, der kræves for at hæve temperatu-

ren fra stuetemperatur til smeltepunktet for en given legering, beskrives som:

$$H = a_1 \times h_1 + a_2 \times h_2 + \dots + a_n \times h_n$$

H = Entalpien af legeringen (kWh/ton)

a_1 = Vægtprocent af legeringselement nummer et (%)

h_1 = Entalpitet for legeringsstof nummer et (kWh/ton)

a_n = Vægtprocent af legeringselement nummer n (%)

h_n = Entalpitet for legeringsstof nummer n (kWh/ton)

Eksempel: G20Mn5 med smeltetemperatur 1600 °C med analysen:

0,2 % C 0,4 % Si 1,4 % Mn 0,5 % Ni resterende Fe,

Teoretisk kræver følgende

$$0,002 \cdot 750 + 0,004 \cdot 880 + 0,014 \cdot 405 + 0,005 \cdot 345 + 0,975 \cdot 380 \approx 380 \text{ kWh/ton}$$

Som det ses, er den sidste faktor klart størst, hvorfor det ofte er tilstrækkeligt at bruge værdierne for jern når det drejer sig om almindelige ståltyper og støbejern, når energiforbruget teoretisk er angivet.

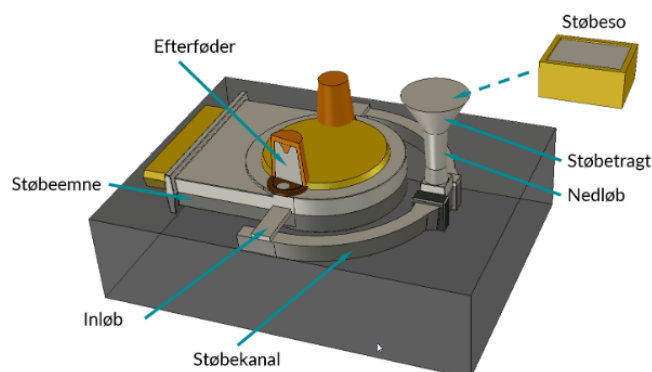
Et andet eksempel er AC 46000 med en smeltetemperatur på 725 °C med analysen:

10 % Si 0,9 % Fe 3 % Cu 0,3 % Mn 0,4 % Mg 1 % Zn-rest Al, Kræver teoretisk følgende

$$(10 \cdot 178 + 0,9 \cdot 117 + 3 \cdot 84 + 0,3 \cdot 114 + 0,4 \cdot 343 + 1 \cdot 118 + 84,4 \cdot 317) / 100 = 2 \text{ kWh/ton}$$

Udbyttets indvirkning på energiforbruget

Støberierne arbejder hele tiden på at øge udbyttet, hvordan det kan påvirkes ved fx brug af isolerende efterfødere.



Figur 6 Betegnelser på bestanddele af udvekslingsbegrebet

$$\text{Totalt udbytte (T)} = \frac{(\text{Godkendt leveret støbegods})}{(\text{Totalt chargeret metallisk materiale})} \cdot 100\%$$

$$\text{Formudbytte (F)} = \frac{(\text{Nettovægt af støbegods i form})}{(\text{Bruttovægt af totalt udstøbt i form})} \cdot 100\%$$

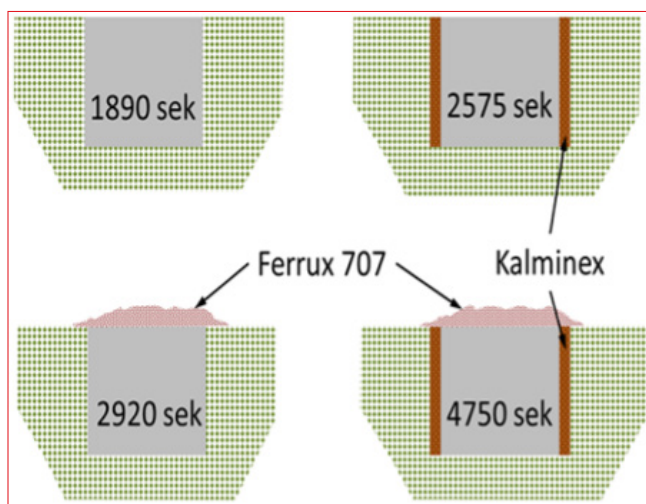
Totalt udbytte er den samlede godkendte støbevægt i forhold til det indsatte metalliske materiale målt over en periode, f.eks. et år. Her afgår kasseret støbegods, hvorfor dette udbytte altid er lavere end formudbyttet.

Godkendt leveret støbegods er færdigt emne inden videre bearbejdning. Dette selvom behandlingen foregår internt. Hvis alle støberier har sin egen bearbejdning af det leverede støbegods, kan det angives i stedet for det støbte emnes vægt.

Formudbyttet er forholdet mellem godkendt leveringsvægt af støbegodset og den samlede støbevægt. Figur 6 viser, hvad der normalt bruges til at beregne forholdet, hvor det støbte emne er over brøkstregen og resten er summeret nedenfor.

Nettovægt af støbt materiale er efter fjernelse af støbesystem og efterfødere. Tabet her er det, der forsvinder via skæreskiven eller skæreblander. Yderligere tab, der dog vender tilbage til ny omsmeltnings, er rester i skeen der ikke hældes i forme, men hældes i en speciel form (spildgrav). Forskellen mellem disse to kvoter er skrotning, materialespild, tilbagehældning til ovnen.

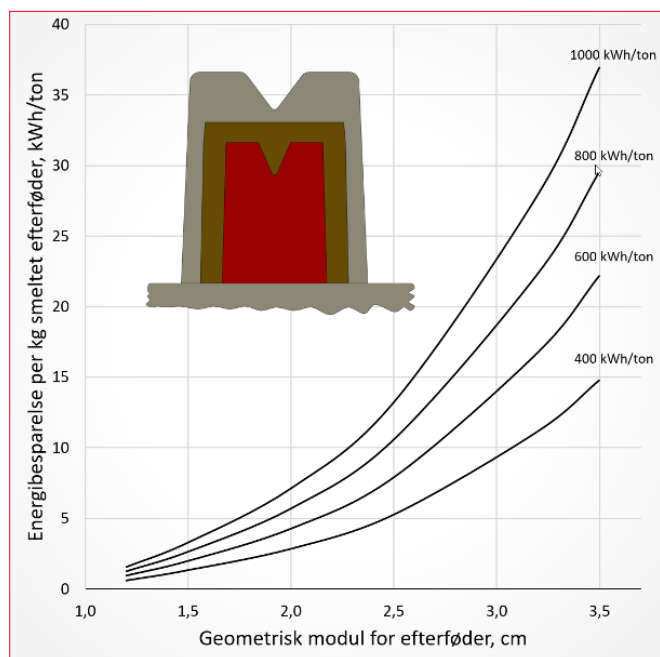
Ved gravitationsstøbning kan udbyttet påvirkes ved hjælp af isolerende eller eksoterme hjælpemidler for herved at reducere efterføderens størrelse. Ønsker du i figur 7 en størkningstid på efterføderen på 1890 sekunder (volumen = 4,9 dm³), kan efterføderen reduceres til 180 x 180 mm (volumen = 2,55 dm³) med hjælpemidler samtidig med at størkningstiden bevares.



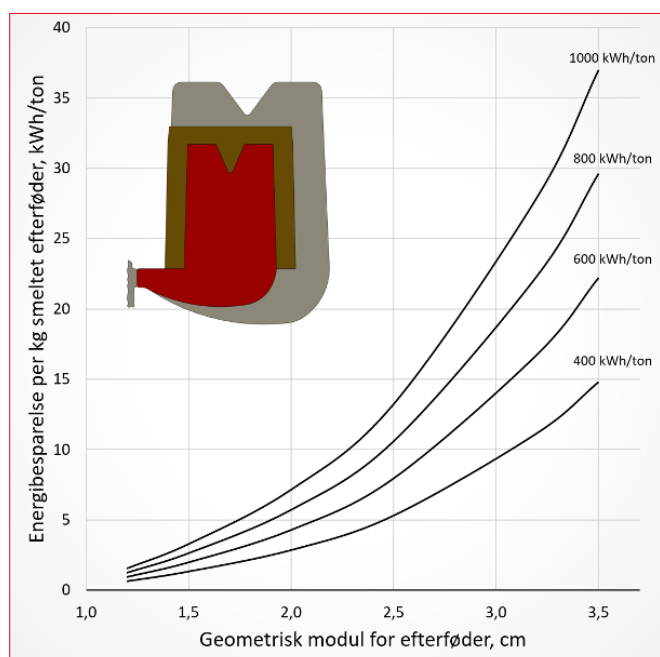
Figur 7 Størkningstid for en cylinder Ø250 x 250 i kulstofstål støbt i sandform med forskellige typer omgivende materialer rundt om cylinderen. [6].

Med dette som udgangspunkt er der foretaget følgende beregninger mellem en såkaldt naturlig efterføder (kun omgivet af en sandform) og en eksoterm/isolerende efterføder. Kurverne i diagrammet er angivet for estimeret energiforbrug til at producere en smelte. Man aflæser føderens størkningstid udtrykt som det geometriske modul, et mål for volumen divideret med kølende overflade ofte angivet i cm og man får energibesparelsen på y-aksen. Figur 8 til 10 viser en mulig besparelse ved at udskifte naturlige efterfødere (omtrentlige størrelsesforhold mellem

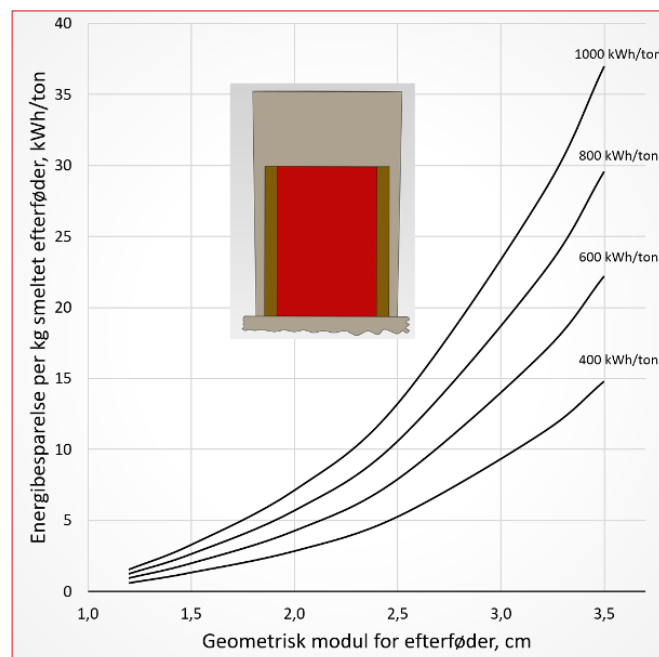
diameter: højde er 1:1,5) og efterfødere med omgivelse af eksotermisk/isolerende materiale. Kurverne angiver mængden af energi, der bruges i støberiet til at fremtage en smelte. Anvendes der fx 600 kWh/ton som gennemsnitsværdi i støberiet, er der mulighed for at reducere dets energiforbrug med cirka 13 kWh/ton for en naturlig sideføder med et geometrisk modul på 2,5 cm. De store besparelser kommer, når udbyttet stiger, og flere komponenter kan støbes på samme smelte.



Figur 8 Besparelser/kg smeltet materiale i efterføder ved forskelligt energibehov, topføder



Figur 9 Besparelser / kg smeltet stål i foderautomaterne ved forskelligt energiforbrug, sideføder



Figur 10 Besparelser/ kg smeltet stål i foderautomaterne ved forskelligt energiforbrug, åbne foderautomater

På sidstnævnte billede er det antaget, at den øvre overflade er dækket af et pulver- eller en dækplade, så varmeudstrålingen er minimal. Hvor meget det påvirker er vist i figur 7. Efterføderne er en videreudvikling af 1950'ernes isolering af bokse til støbning af stål i kokiller. Det er en af flere måder til at reducere energiforbruget i støberiet ved fremstilling af støbegodset.

Forskningshuset på Tullportsgatan i Jönköping har gennem årene produceret adskillige rapporter, der omhandler emnet energibesparelser i støberier. En af dem er "Utbetyesförhöjande åtgärder i gjuterier", hvorfra der er indhentet følgende forslag, der opsummerer aktiviteter till at forbedre udbyttet. Tipsene omhandler problemstillinger fra udformning af design til anvendelse.

Tips i udbyttejagten:

- Designe støbegodset med hensyn til muligt udbytte
- Juster analysen med hensyn til svind (krymp)
- Brug det korrekte chargemateriale
- Forbedre temperaturkontrollen
- Følg nøje op på formmaterialets egenskaber
- Placer flere modeller på modelbrættet
- Forbedre støbeanordningen
- Udfør støbningen mere omhyggeligt
- Gør støbeskålen lille
- Brug hjælpemidler till efterfødere
- Dimensionér støbesystemet korrekt
- Følg omhyggeligt op på løbende kassationer
- Analyser årsagerne til kassationer

Mere specifikt er det følgende også beskrevet

Materialetab kan reduceres ved:

- Brug rent chargeringsmateriale (ikke oxideret)

- Sænke tappetemperaturen
- Reducer tiden i ovn før aftapning
- Reducer tiden mellem forskellige behandlingstrin
- Beskyt smelten mod oxidation (coating, syntetisk slagge, beskyttelsesgas)

Referencer

Sten Farre, Utbytesförhöjande åtgärder i gjuterier, Gjuteriföreningsskrift 821015 (1982)
 Foundrybench D19: Good practice guide on energy saving potentials and opportunities for foundries (2011)

Anders Svensson, Per Sommarin, J. Bloom, R. Lisell. Energieffektiv smältning, Swerea SWECAST Rapport nr 2012-010, (2012)

Periodiske system, <http://www.biosite.dk/leksikon/periodiskesystem.htm>

Christian Jörgensen, Ingegerd Thorngren, Thermodynamic Tables for Process Metallurgists, Almqvist & Wiksell Förlag AB (1969)

Sten Farre, Matarberäkning av stålsgjutgods, Gjutgodssymposium (1988)

