



Grundlæggende støberiteknologi: anvendelse af kølekokiller

Del 1

AF STAF HENDERIECK

INDLEDNING

Det er velkendt, at anvendelse af kølekokiller har en vigtig indflydelse på reduktion af sugningsbaserede støbefejl.

Men kølekokiller kan også være med til at øge støbeudbyttet samt påvirke en bestemt mikrostrukturdannelse.

Før i tiden var anvendelse af kølekokiller et spørgsmål om erfaring. Nu kan brugen beregnes, og de fleste nyere simuleringsprogrammerne har mulighed for at integrere effekten af overfladeafkøling i deres beregninger.

At anvende "kølefinner" på godset for at sikre lokal afkøling har været anvendt længe. Metoden er ikke så effektivt som brugen af kølekokiller, men har nogle særlige fordele.

Brug af kølekokiller kræver korrekt dimensionering og placering. Det er også vigtigt, at kølekokiller anvendes og opbevares korrekt.

HVAD ER EN KØLEKOKILLE

En kølekokille eller i det følgende benævnt en kokille, er et i sandformen anbragt emne, der anvendes til at sænke temperaturen på det sted på godset, den er placeret, den såkaldte påvirkede zone. Den afkølede effekt afhænger af kokillens specifikke varme og dens varmeledningsevne."

Der kan bruges mange forskellige materialer, mest almindeligt er kokiller af metal, men andre materialer kan også finde anvendelse. F.eks. kan anvendelse af specialsand, der har en højere specifik varme og/eller varmeledningsevne, end det sand, der anvendes til formen og/eller kernen, medføre til en lignende effekt som kokiller af metal. Almindeligvis kaldes disse anvendelser af specialsand for kølesand.

Kokiller kan aldrig kompensere for et størkningssvind, de kan kun flytte det til et andet sted!

Et andet vigtig krav til en kokille er, at den ikke smelter, hvilket betyder, at smeltetemperaturen skal være til-

strækkelig høj i forhold til støbegodset støbetemperatur.

Afhængig af kokillens placering skelnes mellem udvendigt og indvendigt placerede kokiller

UDVENDIGT PLACEREDE KOKILLER

Udvendigt placerede kokiller eller bare udvendige kokiller, er anbragt i formen eller kernen og kan komme i direkte eller indirekte kontakt med støbegodsets overflade (fig. 1), men må ikke blive en del af støbegodset.

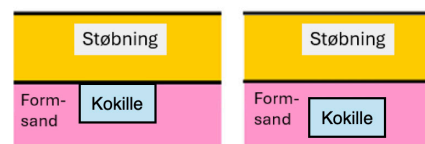


Fig. 1: Udvendig kokille med og uden kontakt til godset

Standard kokiller har en simpel facon, fx terning-, kasse- eller cylinderformet. Faconformede kokiller (fig. 2) har samme overfladeform som støbegodset på det sted, hvor kokillen placeres.



Fig. 2: Faconformet og standard kokiller

Faste kokiller er ikke-deformerbare og bevarer deres form, størrelse og volumen. De er normalt fremstillet af metal eller grafit. Deformerbare kokiller består af kølesand (fig. 3), som er et specialsand, der kan bortlede varmen hurtigere end det anvendte form- eller kernesand; kølesand er i sagens natur deformerbare og kan formes efter behov.

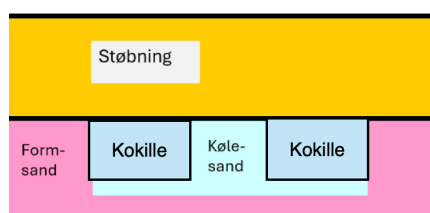


Fig. 3: Faste og deformerbare kokiller

Støbning i metalforme kan (hvis man er filosofisk) betegnes som en speciel form for brug af kølekokiller.

INDVENDIGT PLACEREDE KOKILLER

Indvendigt placerede kokiller er anbragt således, at de bliver en del af støbningen. Som indvendige kokiller anvendes ofte kølesøm eller kølespiraller (fig. 4). Disse indvendige kokiller skal være af samme metal som støbegodset for ikke at påvirke kvaliteten af basismetallet. Vanskeligheden er at få dem til at smelte ind i godset uden defekter, da de fleste kvalitetsstandarderne ikke tillader, at godset indeholder dele af ikke-smeltede kokiller. I værste fald må godset kasseres, med mindre kølelegemet fjernes ved en efterfølgende bearbejdning.

Man skal være opmærksom på, at kernestivere, der anvendes for at holde kernen på plads, også har en afkøleende virkning.

Indsatser af andet materiale end godset anvendes hovedsageligt for at kunne bearbejde et ellers vanskeligt bearbejdeligt støbegods. Et eksempel er indsatser af blødt stål til udbo- ring og gevindskæring af huller i højt

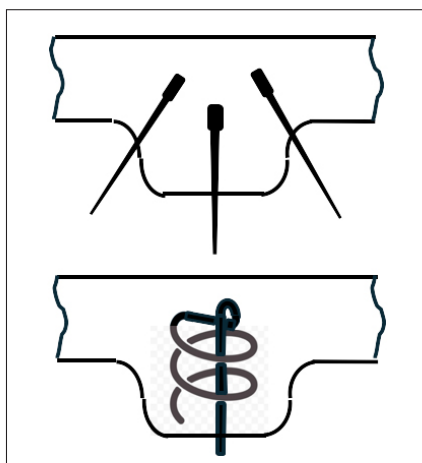


Fig. 4: Kølesøm og kølespiral

kromlegeret jern. Disse indsatser er heller ikke beregnet til at virke afkø- lende på godset, men de vil delvist fungere som kokiller og kan derfor påvirke det omkringliggende metals struktur og hårdhed.

FORMÅL OG MULIGHEDER MED KØLEKOKILLER

Der findes mange anvendelsesmuligheder for kølekokiller. Den mest almindelige men samtidigt også den mest komplekse anvendelse er bru- gen af eksterne kokiller. Interne ko- killer bruges kun for at fjerne en po- røsitet i et bestemt område i godset. Hvorfor, hvordan og hvornår kokiller anvendes er en beslutning ethvert støberi må træffe på grundlag af viden og erfaring.

UDVENDIGT ANBRAGTE KOKILLER

Udvendige kokiller kan fra støbni- gen begynder indtil den kokillepåvir- kede sektion er fuldstændigt størk- net have følgende formål:

1. At fjerne varme fra godset, hvorved der kan opnås et mindre (størk- ningsrelateret) modul for den på- gældende sektion og/eller en retningsbestemt størkning.
2. At øge efterfødningslængden ved at fremme retningsbestemt størk- ning. Dette kan opnås ved alt stø- begods, hvor der anvendes efter- fødere for at kompensere for den primære sugning.
3. At øge godsets tryktæthed.

Når alt metal er størknet, og afkølin-

gen under det faste svind begynder, kan kokiller påvirke strukturdannel- sen og modvirke varmerevner. Kokillernes struktura-påvirkning kan omfatte:

- en finere kornstruktur
- en ønsket struktur
- en højere styrke og duktilitet
- en stigende hårdhed
- øget hærdbarhed
- mindre mikroporøsitet og anden porøsitet ved at reducere dendrit- afstanden
- øge tryktætheden ved at opnå et tæt (og uden porøsitet) overfladelag på støbegodset.

Varmerevner, især i hjørner og hot spots, kan undgås ved at fremme et kraftigt lokalt temperaturfald så der hurtigt kan dannes et stærkt størknet overfladelag, der kan modstå træk- spændingen under godset svind.

Når der ikke bruges kokiller, størkner godset fra ydersiderne mod midten af godssektionerne, en såkaldt den- dritisk størkning (fig. 5). Den den- dritiske størkning er meget almin- delig for stål, lidt mindre for gråjern og meget mindre for SG- jern, som størkner mere grødagtigt.

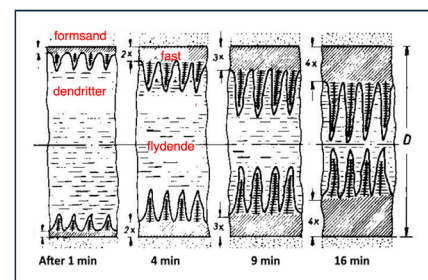


Fig. 5: Dendritisk størkning af stål

Den dendritiske størkning medfø- rer, at det sidste størknede metal på grund af sejgring indeholder flere urenheder, har en anden kemisk sam- mensætning end grundmetallet, samt en stor tendens til dannelse af mikro- og makroporøsiteter. Når der anven- des kokiller vil området med det sidst størknede metal flyttes sig fra midten til den side modsat kokillen. Ud for kokillen dannes hurtigt en finkornet struktur, hvor de ikke-metalliske in-

deslutninger fastfryses i uskadelig form, og størkningsbåndet skubbes opad og bliver betydeligt smallere (fig. 6). Bredden af størkningsbåndet har stor indflydelse på støbegodsets efterfødningsmulighed. Jo bredere det flydende bånd er, desto længere må efterfødningsmetallet bevæge sig fra liquidus til solidus og desto vanskeligere er efterfødningsmetallet. Derfor er kokillestøbt gods nemmere at efterføde og dermed bliver tendensen til porøsitedannelse også mindre.

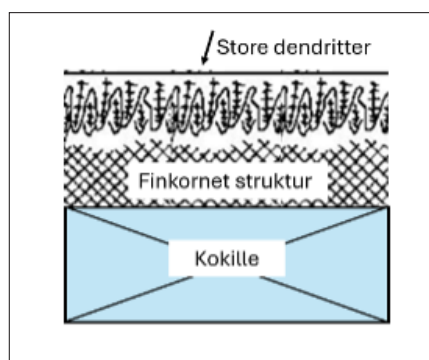


Fig. 6: Smalt størkningsbånd ved kokillepåvirket zone

INTERNT ANBRAGTE KOKILLER

Brugen af interne kokiller har til formål at flytte en (potentiel) porøsitet fra et område i støbegodset, hvor en porøsitet ikke kan accepteres. Den potentielle porøsitet vil blive flyttet til et sted, hvor det kan accepteres og for det meste blive ændret fra én stor porøsitet til et antal mindre porøsiteter.

KOKILLER KAN ALDRIG KOMPENSERE FOR SUGNINGER

Kokiller kan, afhængigt af placeringen og udformningen af indløbs-systemet, sænke temperaturen på det indstrømmende metal og derfor mindske metallens væskesvind (som foregår mellem støbetemperaturen og liquidustemperaturen). Kokiller vil dog aldrig kunne reducere støbegodsets faste svind, men det vil kunne flytte det flydende metal, der størkner sidst, hen mod efterfødere.

VARMELEDNINGSEVNE OG VARMEKAPACITET AF FORSKELLIGE KOKILLEMATERIALER

En kokilles ydeevne afhænger af dens

Materiale	Smeltepunkt	Størkningsvind	Varmekapacitet	Densitet	Varmeledningsevne	Termisk diffusivitet	Vol. Varmekapacitet
	°C	%	J/kg.°K	Kg/m³	J/m.°K.s	J/m².°K.s½	J/°K.m³
Kvartssand			1130	1500	6,1	3210	1700000
Mullit			750	1600	3,8	2120	1200000
Jern	1536	3,16	456	7870	73	16200	3940000
Grafit			1515	2200	147	22100	3330000
Kobber	1084	5,30	386	8960	397	37000	3600000

Fig. 7: Retningsgivende varmetekniske værdier for forskellige materialer

egnethed til at absorbere varme og lede den væk.

Effektiviteten hvormed en kokille kan absorbere og bortlede metallens varme kan vurderes ved hjælp af den termiske diffusivitet.

Termiske diffusivitet = $(K.C.\rho)^{1/2}$
hvor:

K = Specifik varmeledningsevne

C = Specifik varmekapacitet

ρ = Densitet

Den specifikke varmeledningsevne er således en værdi, der angiver kokillens evne til, hvor hurtigt den optagne varmeenergi kan fordele sig i hele kokillen og dermed holde kontaktfladen smelte/kokille længere tid på en lavere temperatur. Den specifikke varmeledningsevne er meget vigtig for at kunne fortsætte varmeoptagelsen, indtil det pågældende støbeafsnit er størknet

Den specifikke varmekapacitet er den totale varme kokillen kan optage. Jo større denne værdi, desto bedre kan varmeoptagelse finde sted idet kokillens temperatur forbliver lav i.f.t. smelten. Jo højere den specifikke varme er, jo mindre behøver kokillen at være for at have den samme køleeffekt som en større kokille med lavere specifikke varme.

Jo højere en kokilles termiske diffusivitet, desto bedre er dens afkølede egenskaber. Fig. 7 viser værdier for nogle forskellige materialer. Vær opmærksom på, at tallene varierer i diverse opslagsværker og andre kilder, da de varmetekniske værdier påvirkes af under hvilke forhold målingerne er foretaget, fx temperatur og

materialets densitet. Værdierne er derfor kun retningsgivende.

Uanset disse retningsgivende forhold ses det tydeligt, at jern er betydeligt bedre velegnet som kokillemateriale end eksempelvis kvartssand, hvilket enhver der arbejder i et støberi sandsynligvis er klar over.

Den termiske diffusivitet angiver således kokillens evne til at absorbere og bortlede varme, men det er vel at bemærke ved en uendelig stor (tyk) kokille. Den volumetriske varmekapacitet af et materiale er varmekapaciteten ganget med materialets densitet. Det er den mængde energi, der skal tilføres, i form af varme, til én volumenhed af materialet for at forårsage en stigning på én enhed i dets temperatur. og har enheden $J.^{\circ}K^{-1}.m^{-3}$. Jo større værdien er, desto mindre kan kokillen være. Et kokillemateriale bør derfor vurderes på både sin termiske diffusivitet og sin volumetriske varmekapacitet.

MATERIALER TIL KØLEKOKILLER

Kokiller kan fremstilles af alle typer materialer, som har mindst en højere specifik varme og/eller varmeledningsevne end det anvendte form- og/eller kernesand. Disse materialer kan være:

1. jern
2. forskellige typer sand
3. grafit

Et afgørende krav til en kokille er, at den ikke smelter, hvilket betyder, at smeltetemperaturen skal være tilstrækkelig høj i forhold til støbegodset støbetemperatur.

Anvendelse af kokiller vil være en ekstra omkostning. Derfor skal der være nogle fordele til at retfærdiggøre eller kompensere for denne omkostning. Det kan være at undgå porøsitetsfejl i støbegodset, at reducere antal og/eller størrelse af efterfødere eller at kunne opnå en ønsket mikrostruktur.

Den endelige materialevalg baseres på kokillens varmekapacitet og varmeledningsevne, formgivningsmulighed (samme form som støbegodset), genbrugsværdi/levetid og fremstillingspris.

KOKILLER AF JERN

Alle typer jern er anvendelige med hensyn til smeltetemperatur og varmekapacitet. Men de har ikke samme effektivitet på grund af forskellen i varmeledningsevne. Jerntyper med den højeste varmeledningsevne har den højeste effektivitet. Som det fremgår af tabellen (fig. 8) er gråt støbejern med lamelgrakit bedst, efterfulgt af kompakt jern med vermiculær grakit og SG-jern med kuglegrakit.

Aducerjern bruges ikke og hvidt jern (martensitisk med mange karbider) kan ikke bruges på grund af den meget lavere varmeledningsevne (ingen fri grakit) og den høje tendens til at revne.

Nogle gange bruges stålkokiller. Som det fremgår af tabellen er stålkokiller med hensyn til varmekapacitet ikke de allerbedst egnede.

Materiale	Densitet	Varmekapacitet	Varmeledningsevne
	Kg/m ³	J/kg.°K	J/m.°K.s
Gråt støbejern	7,20	720	39
SG-jern	7,10	515	29
Vermiculær jern	7,10	620	35
Stål	7,80	520	25
Grafit	2,1	1510	60
SiC		963	

Fig. 8: Varmetekniske egenskaber af forskellige kokillematerialer.

Materiale	Maksimal Pakningsdensitet	Varmekapacitet	Varmeledningsevne	Termisk udvidelse
	kg/m ³	J/kg.°K	J/m.°K.s	%
Kvartssand	1,60	1130	0,255 (0,71)	1,50
Kromitsand	2,80	1214	0,215 (0,58)	0,26
Zirkonsand	3,00	1424	0,305	0,01
Magnesitsand	2,80	1047		
Siliciumcarbid		963		
Cerabead	1,70	1842	0,223 (0,56)	-0,03
Mullite	1,60	750		

Fig. 9: Varmetekniske egenskaber af forskellige typer kølesand

IKKE-METALLISKE KOKILLER

Der findes forskellige sandtyper, der kan anvendes som kølesand, fx kromit-, zirkon- og magnesitsand, som alle har bedre varmeledningsevne end kvartssand (fig. 9).

Det fremgår af tabellen, at zirkonsand kan anvende som kølesand, ikke alene på grund af sin gode varmeledningsevne og specifikke varme i forhold til kvartssand, men også på grund af sin lave termiske udvidelse, som giver en stabil form og støbegods med en god overfladekvalitet. Effekten af kølesand er lille sammenlignet med jern. Derfor bruges kølesand for det meste som udjævningsmateriale ved siden af eller ind imellem jernkokiller. Anvendelsen af kølesand er ukompliceret, da kølesand kan bindes med de samme bindemidler, som anvendes til kvartssand.

Et andet ikke-metallisk kokillemateriale er siliciumkarbid (SiC), som findes i fast form eller pulverform. I pulverform kan det opformes og afhærdes med de sædvanlige selvhærdende bindemidler såsom furan og vandglas, og det kan uden problemer regenereres sammen med kvartssandet. Siliciumcarbids kølende egenskaber er bedre end sædvanligt kølesand, men prisen er betydelig højere.

Være opmærksom på, at en kokilles effekt er en funktion af den termiske diffusivitet ($k\rho c$)^{1/2}, hvor k , c og ρ er hhv. varmeledningsevne, varmekapacitet og kokillens densitet. Derfor er sand pga. dens lave varmeledningsevne ikke så effektivt som jernkokiller.

GRAFIT

Grafit's køleeffekt kan sammenlignes med jern. En vigtige fordel med grafitkokiller er, at der ikke er problemer med gas i støbegodsets overflade. Desuden er vedligeholdelsesomkostningerne forholdsvis lave samt bearbejdelsen god. Levetiden er god, da grafitkokiller kan anvendes op til 50 gange. Til gengæld er kostprisen for grafit høj.

Den er meget velegnet til anvendelse i kerner på grund af dets høje varmeledningsevne og dets gode overfladekvalitet.

KOKILLEMATERIALERNES STØRKNINGSTID

Ifølge Chvorinov afhænger størkningstiden t af et legeme af en temperaturafhængig materialefaktor c og legemets modul M ($=V/A$).

$$t = c \cdot x (M)^2$$

I et forsøg, hvor der blev støbt en 150 mm stålkugle ($M = 2,5 \text{ cm}$), blev der målt størkningstider i forskellige formmaterialer.

Dac $= t / M^2 = t / 2,5^2 = t / 6,25$ kan materialefaktor c beregnes.

I forhold til kvartssand kan kokillemateriallets påvirkning på modulet beregnes som følger:

$$t = c \cdot (M)^2 \text{ eller } t = c_1 \cdot (c_i \cdot M)^2 \cdot \text{hvor}$$

c = faktor for kokillemateriale

c_1 = faktor for kvartssand (2,72)

c_i = modulpåvirkningsfaktor

$$c \cdot (M)^2 = c_1 \cdot (c_i \cdot M)^2, \text{ eller}$$

$$c = c_1 \times (c_i)^2 \text{ eller } c_i = (c/c_1)^2$$

For kvartssand gælder således $c_1 = (0,64/2,72)^2$ eller $c_1 = 0,49$

På samme måde kan faktor c_1 for de andre kokillematerialer beregnes (fig. 10).

For jern- og kobberkokiller med en materialefaktor på 0,49 betyder det, at sådanne kokiller kan reducere godsmodul med en faktor 0,49, dvs. ca. 50 %. Denne værdi er derfor det højeste en kokille kan nedsætte godsmodul med.

Bemærk at denne reducere gælder for stålstøbegods; der findes dog

intet argument for, at påvirkningen skulle være meget anderledes for jernstøbegods.

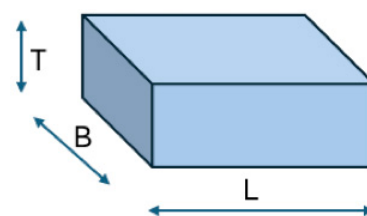
BEREGNING AF KOKILLENS DIMENSIONER

Kølekokillens tykkelse bestemmes af tykkelsen af det pågældende godstværnsnit. Er kokillen for tynd, bliver den hurtigt mættet med varme og dermed ineffektiv. Generelt er det tilstrækkeligt med en tykkelse, der svarer til mindst den halve tykkelse af den sektion, der skal afkøles. Kokillens tykkelse bliver ofte fordoblet på grund usikkerheden med hensyn til varierende varmepåvirkninger under støbningen. Den optimale varmeoverførsel udføres, hvis tykkelsen er lig med tykkelsen af godssektionen. Følgende regler er gældende:

- god varmeoverførsel opnås med en kokilleytykkelse der svarer til godssektionen
- tykkere kokiller øger ikke varmeoverførslen og er derfor ikke mere effektive

Kokillens øvrige dimensioner er vist i fig. 11. Bredden er mindst lig med tykkelsen; en bredde svarende til det dobbelte af tykkelsen foretrækkes, men denne bredde må ikke overskrides, ellers påvirkes størkningsgrader negativt. Kokillens længde bør ikke overstige to eller tre gange dens tykkelse for at undgå at de deformeres/kaster sig under størkningen. Standardkokiller fremstilles gerne med forholdet $T : B : L = 1 : 2 : 3$.

Mere nøjagtige dimensioner kræver en beregning af kokillens volumen og kontaktfladen med godset.



B: 1-2 T L maks. 2 – 3 T

Fig. 11: retningsgivende dimensionsforhold for en kokille

Kontaktfladen med godset er vigtig for at kunne beregne kokillens påvirkningszone. Kontaktfladen behøver ikke fysisk at være i kontakt med godset, hvilket forekommer, hvis kokillen ligger bag et (tyndt) sandlag.

Kokillen bliver sommetider forvarmet for at undgå kondensdannelse. Ved forvarmning bliver temperaturforskellen mellem kokillen og støbegodset mindre og det kan derfor påvirke den afkølede virkning negativt. Eventuel forvarmning bør derfor udføres varsomt

En beregning af kokillens dimensioner udføres i princippet på baggrund af varmeledning fra støbningen til kokille således, at den nødvendige afkølingshastighed kan opnås. Afkølingen af godset er afhængig af kokillens volumen, som danner grundlaget for at kunne beregne kokillens kontaktflade og tykkelse.

Den helt korrekte manuelle beregning er praktisk talt umulig på grund af den herskende usikkerhed af og uenighed om udgangsværdierne til disse beregninger. Derfor bør beregningerne ledsages af erfaringsmæssigt velfunderet skøn.

Af denne grund kan simuleringsprogrammer være en stor hjælp. Vær opmærksom på, at ikke alle programmer bruger samme værdier for de nødvendige parametre, og at afhærdede forme og kerne i hvert enkelt støberi kan have forskellige varmetekniske data på grund af forskel i densitet, mængde og type bindemiddel etc.

Materiale	Størknings-tid (t)	Materiale-faktor (c)	Materiale	Størknings-tid (t)	Materiale-faktor (c)
Kobber/Jern	4	0,64	Zlrkonsand	14	2,24
Grafit	5	0,80	Chamotte	15	2,40
SiC	10	1,60	Kvartssand	17	2,72
Magnesit	11	1,76	Isoleringsmat.	28	4,48
Kromitsand	12	1,92	Exotermisk materiale	31	4,96

Fig. 10: Modulpåvirkningsfaktor for forskellige kokillematerialer

VOLUMENBEREGNING AF UDVENDIGE KOKILLER

Den udvendige kokillens minimumsvolumen V_{chil} kan beregnes vha. følgende formel:

$$V_{chil} = \rho_{metal} \cdot V_{0c} \cdot (M_o - M_{req}) \cdot [L_{metal} + C_{metal} \cdot (TP - TL)] / M_o \cdot p_{chil} \cdot T_{chil} \cdot C_{chil}$$

Hvis den maksimalt tilladte temperatur for kokillen er bestemt, og der anvendes en 20 % sikkerhedsfaktor idet variationer i temperatur, densitet, varmeledning og varmekapacitet ikke er fastlagt, bliver formelen mere enkel:

$$V_{chil} = 1,66 \cdot V_{0c} \cdot (M_o - M_{req}) / M_{oc} \text{ v. kokilleteperatur } 400^\circ\text{C}$$

$$V_{chil} = 1,11 \cdot V_{0c} \cdot (M_o - M_{req}) / M_{oc} \text{ v. kokilleteperatur } 600^\circ\text{C}$$

$$V_{chil} = 0,83 \cdot V_{0c} \cdot (M_o - M_{req}) / M_{oc} \text{ v. kokilleteperatur } 800^\circ\text{C}$$

KOKILLENS NØDVENDIGE MODUL M_{req}

Under forudsætning at $M_{req} \geq M_o / 2$ er $M_{req} = V_o / S_{req}$. Men uanset kokillens dimensioner er den maksimale moduleffektivitet ikke større end 50 % af godssektionens tykkelse. I praksis benyttes en sikkerhedsfaktor, og modulet bliver således:

$$M_{req} = 2 \cdot M_o / (y + 1)$$

Ved anvendelse jern- eller stålkokiller med y -faktor (se fig. 14) = 3 fås:

$$M_{req} = 2 \cdot M_o / (y + 1) = 2 \cdot M_o / (3 + 1) = 0,5 M_o$$

Uanset kokillens størrelse er modulets maksimale effektivitet 50 % af støbningens vægtykkelse!

Symbolforklaring:

V_{chil}	kokillens volumen i cm^3
V_{0c}	støbningen volumen i det kokillepåvirkede område i cm^3
p_{chil}	kokillens densitet i g / cm^3
ρ_{metal}	støbegodsets densitet i g / cm^3
M_o	oprindelig godsmodul i cm
M_{req}	nødvendigt modul af påvirket godssektion i cm
S_{req}	nødvend kontaktflade mellem gods og kokille
S_o	oprindelig kontaktflade af påvirket godssektion
ST_{chil}	kokillens kontaktflade

V_{ch}/V_{ca}		0,26	0,40	0,52	0,72	1,00
Temperatur	$^\circ\text{C}$	810	730	720	580	400
Afkøling	$^\circ\text{C}/\text{min}$	11,4	16,6	21,1	28,5	38,9

Fig. 12: kokillens sluttemperatur og afkølingshastighed

TP	støbetemperatur i $^\circ\text{C}$
TL	metallets liquidus temperatur i $^\circ\text{C}$
TS	metallets solidus temperatur i $^\circ\text{C}$
T_{chil}	kokillens maksimale temperatur i $^\circ\text{C}$
C_{chil}	kokillens gennemsnitlige varmekapacitet (v. 20 to 400°C)
C_{metal}	metallets gennemsnitlige varmekapacitet
L_{metal}	metallets smeltevarme

Kokillens sluttemperatur afhænger af forholdet mellem voluminet af kokillen (V_{ch}) og godsektionen (V_{ca}). Tabellen (fig. 12) viser også kokillens afkølingshastighed, målt i området fra støbetemperatur til 730°C .

KOKILLERNES PRAKTISKE ANVENDELSE

Der er mange meninger om kokillers levetid, det vil sige, hvor mange gange kokiller kan anvendes, inden de ikke længere virker optimalt. Dette gælder først og fremmest kokillens afkølede virkning. Desuden kan anvendelse af gamle kokiller resultere i overfladefejl i støbegodset.

Utilstrækkelig afkølede virkning kan skyldes kokillens aftagende volumen og materialenedbrydning. Kokillens evne til at absorbere og bortlede varme afhænger i høj grad af dens volumen, som aftager ved gentagne brug og efterfølgende sandblæsning eller rensning. Desuden forsvinder kulstoffet efterhånden ud af jernkokillerne og efterlader porer, som indeholder luft, fugt og urenheder, som kan forårsage overfladefejl i støbegodset. Rustne eller beskidte kokiller kan også optage fugt og urenheder og ligeledes forårsage overfladefejl i godset. Kokiller af grafit har ikke tendens til at absorbere fugt og kan

bruges flere (mange) gange, men de kan ikke tåle hårdhændet håndtering og går nemt i stykker. Til gengæld kan de så ikke fejlagtigt genbruges. Derfor er det vigtigt, at støberiet sætter grænser for kokillernes levetid og kontrollere det afkølede effekt. Når effekten ikke er den forventede, skal kokillerne skrottes og erstattes af nye. En tommelfingerregel siger, at en kokille maksimalt må anvendes 5 gange. Som vist i fig. 13. er dette ofte en stort set overset praksis i de fleste af støberierne.



Fig. 13: Rustne kokiller

INDVENDIGE KOKILLER

Det er meget svært at udføre en korrekt beregning, men under forudsætning af, at den indvendige kokille har den samme kemiske sammensætning og vil sammensmelte med støbemetallet kan beregningen med temmelig godt resultat udføres med følgende formel:

$$V_{chil} = V_{0c} \cdot (M_{oc} - M_{req}) [0,33 \cdot L_{metal} + C_{metal} \cdot (TP - TS)] / M_{oc} \cdot (C_{metal} \cdot TS + 0,5 \cdot L_{metal})$$

Der findes også en gammel tommelfingerregel, der siger en vægten af en indvendige kokille bør være 2 – 5 %

Materiale	Luft-spalte	Densitet	Varme-kapacitet	Varmeled-ningsevne	Kokillens temperatur	Y-faktor	M _{mod}	Kokillens tykkelse	Påvirknings zone
		kg/m ³	J/kg.°K	J/m.°K.s	°C		x M ₀	x d ₀	x d ₀
Jern	nej	7200	670	73	500	3,0	0,50	0,50	1,5
	ja	7200	670	73	500	2,0	0,65	0,5	2,0
Grafit	nej	2100	1510	147	500	2,60	0,55	0,36	1,67
	ja	2100	1510	147	500	1,80	0,70	0,36	2,15
SiC-blok	nej	2400	965		500	1,65	0,75	2,45	2,65
	Ja	2400	965		500	1,20	0,90	2,45	3,00
SiC-sand		2400	965		400	1,65	0,75	2,90	2,65
Kromitsand		2800	1215	0,215	400	1,40	0,83	1,50	2,75
Magnesitsand		2800	1045		400	1,32	0,86	1,60	2,80
Zlrkonsand		3000	1420	0,305	400	1,35	0,85	1,60	2,80
Kvartssand		1600	1130	0,255	400	1,00	1,00		
Cerabead		1700	1840	0,223	400				

Fig. 14: Vigtige data for kokillens dimensioner

af den godssektion, den skal afkøles. Er vægten mindre en 2 %, bliver virkningen utilstrækkelig, og er den større end 5 %, bliver indsmeltningen ufuldstændig.

BEREGNING AF KOKILLER VHA. TABELVÆRDIER

Fig. 14 angiver de vigtigste data, der kan anvendes til en hurtig vurdering af kokillens nødvendige dimensioner.

Y-FAKTOR

Y-faktor anvendes i forskellige formler.

MINIMAL KOKILLEMODUL, M_{min}

Den lavest mulige værdi for godsmodul M_{min} i forhold til det oprindelige godsmodul er:

$$M_{min} = \text{faktor} \cdot M_0$$

For eksempel for kokiller uden luftspalte under støbningen fås:

$$\begin{aligned} \text{Jern: } M_{min} &= 0,50 \cdot M_0 \\ \text{SiC: } M_{min} &= 0,75 \cdot M_0 \end{aligned}$$

KOKILLENS MINIMALE TYKKELSE, Tchill

Kokillens minimale tykkelse tchill er angivet i forhold til den fysiske tykkelse (d₀) af den pågældende godssektion. Til kokiller, der ligger tæt indløb skal der anvendes en sikkerhedsfaktor, der er ca. dobbelt så stort.

$$Tchill = \text{faktor} \cdot d_0$$

$$\begin{aligned} \text{Jern } Tchill &= 0,50 \cdot d_0 \\ \text{Grafit } Tchill &= 0,36 \cdot d_0 \\ \text{SiC } Tchill &= 2,45 \cdot d_0 \end{aligned}$$

INDFLYDELSSEZONEN, Tchill

Indflydelseszonen Tchill er den zone, der med hensyn til størkning påvirkes af kokillen. Den kan være end-zone eller imellem kokillerne. Den beregnes i forhold til den fysiske tykkelse (d₀) af den pågældende godssektion.

$$Zchill = \text{faktor} \cdot d_0$$

$$\begin{aligned} \text{Jern } Tchill &= 1,50 \cdot d_0 \\ \text{Grafit } Tchill &= 1,67 \cdot d_0 \\ \text{SiC } Tchill &= 2,65 \cdot d_0 \end{aligned}$$

GENERELLE DATA FOR GODSMODULETS REDUKTION

En kokille kan som nævnt før reducere den pågældende godssektions modul. Som vist i fig. 15 er den reducerende virkning afhængig af kokillens placering.

For en uendelig plade gælder $M = d/2$. Placering af en kokille i bunden eller på en eller begge sider langs med godset formindsker godsmodul til hhv. $d/4$, $d/3$ og $d/6$. Det vil sige, at efterfødningsbehov i sektionen bliver betydeligt mindre.

På samme vis ændres godsmodul for knudepunkter (fig. 16) og stavformet støbegods (fig. 17).

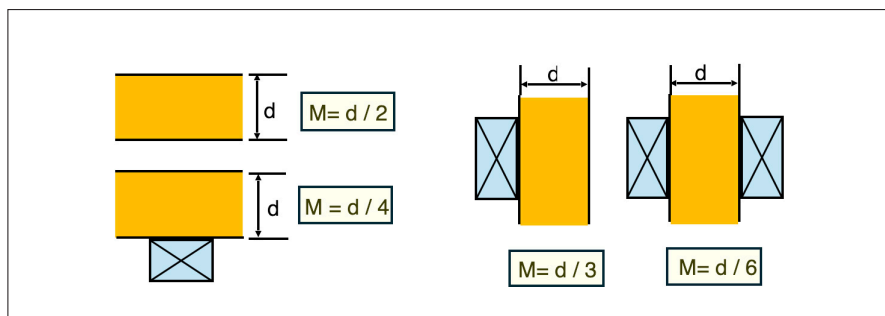


Fig. 15: Reducering af godsmodul for pladeformige emner

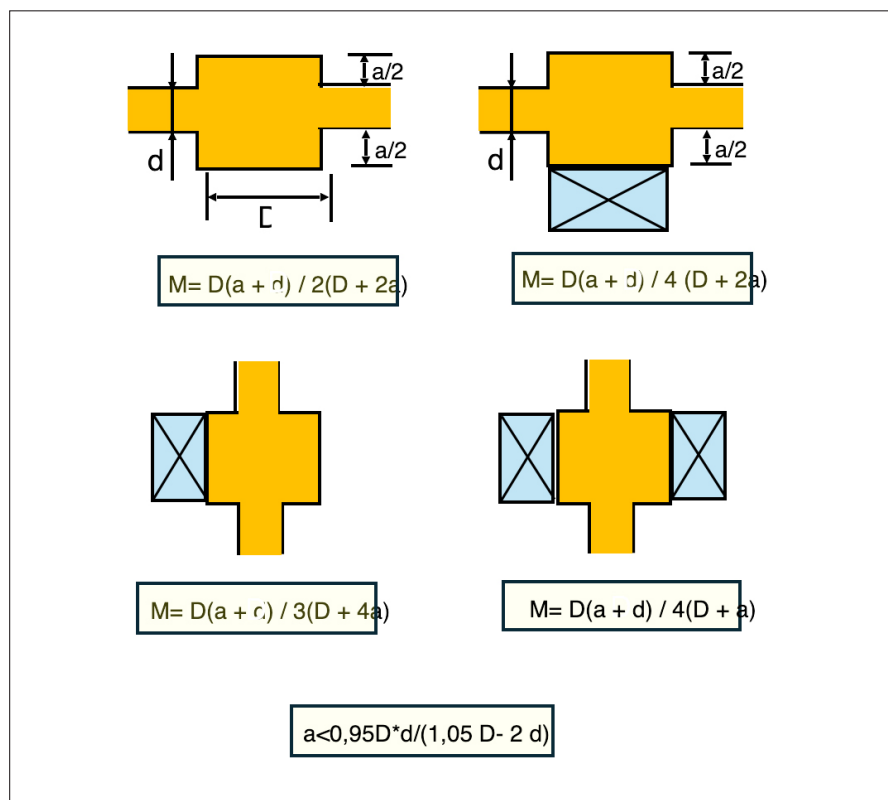


Fig. 16: Reducering af godsmodul for knudepunkter

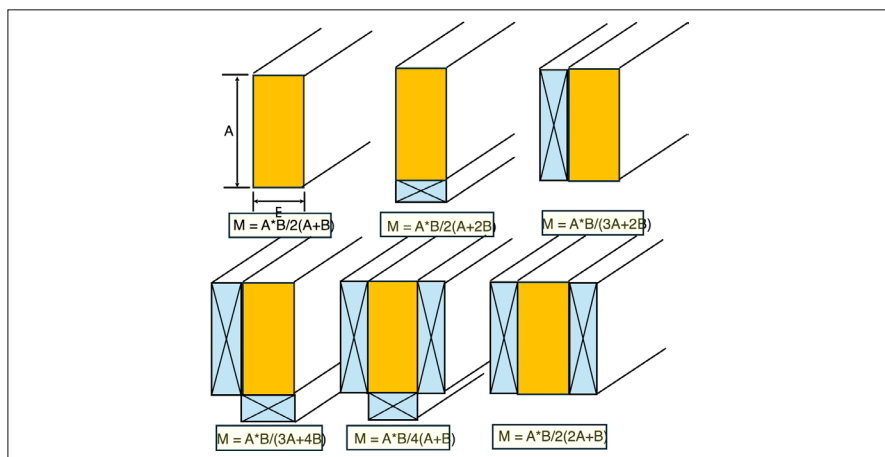


Fig. 17: Reducering af godsmodul for stavformige emner

KOKILLENS PLACERING PÅ STØBEGODSET

En udvendigt anbragt kokille på et vinkeltværsnit (fig. 18) i giver sammen med ende-effekten et godt resultat, men der kan forekomme småporøsiteter. Det samme opnås med en kokille på indersiden. Det bedste resultat opnås ved to udvendigt anbragte tre kokiller.

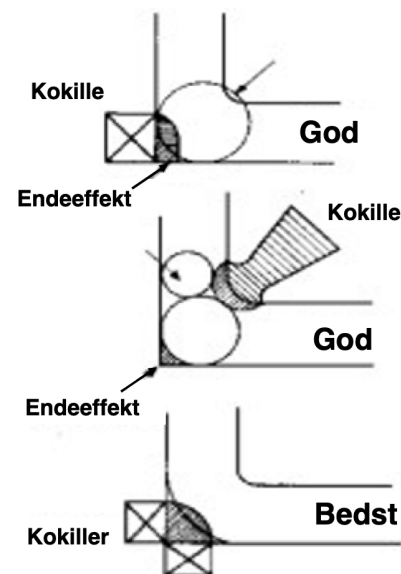


Fig. 18: Vinkeltværsnit

På et T-tværsnit giver den på fig. 19 viste placering af kokiller samme resultat, men små porøsiteter kan forekomme.

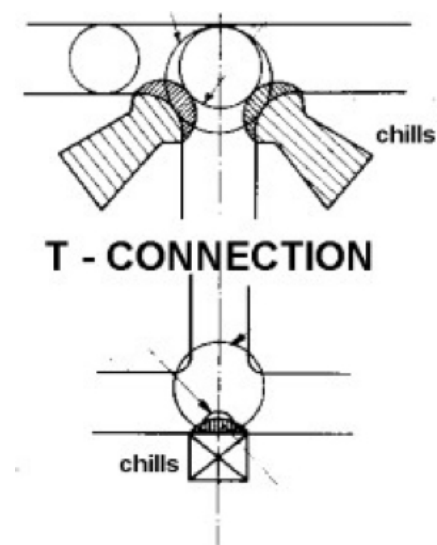


Fig. 19: T-tværsnit

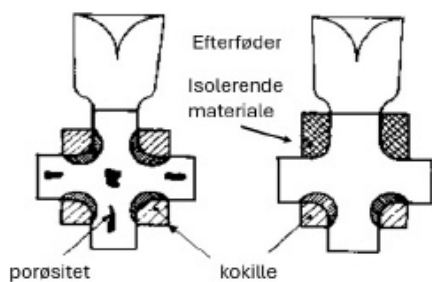


Fig. 20: X-tværsnit

Et X-tværsnit, uanset hvordan kokillerne placeres, kræver altid en efterføder for at undgå porøsiteter.

Det bedste resultat opnås med en efterføder i kombination med et isolerende materiale for at sikre en retningsbestemt størkning mod efterføderen (fig. 20).

KOMBINATION AF FORSKELLIGE KOKILLER

For at sikre, at støbegodsets varme nemt kan bortledes er en kokille for det meste overdimensioneret med hensyn til tykkelse. Fig. 21 viser en kokille, der har en tykkelse på 3 til 4 gange godssektionen. En sådan kokille er unødvendigt tyk, men det er for så vidt ikke noget problem, hvis der bruges én kokille. Hvis det er nødvendigt at nedtrappe den afkølede virkning er det nødvendigt, at den største kokille har en maksimal tykkelse på den halve godstykkelse. Som også vist i fig. 21 afkøler

en overdimensioneret kokille maksimalt den halve godstykkelse og en nedtrapning af kokillen giver derfor ingen nedtrapning i den afkølede virkning.

Området imellem kokillerne skal udfyldes med formsand, og for at kunne opstampe sandet tilstrækkeligt skal der være et vist mellemrum på minimum ca. 1-2 gange kokillens tykkelse. Når afstanden bliver for stor kan der opstå revner mellem kokillerne (fig. 22). Da kokillens kontaktflade med godset størkner først, kan arealet mellem kokillerne, hvor der da kun er en meget tynd støbehud, ikke kan modstå trækpåvirkningen fra metalsvindet, og der kan der opstå revner ved overgangen kokille/sandform. Ved anvendelse af flere mindre kokiller kan trækpåvirkningen fordeles, men det kan være, at afkølingseffekten ikke er tilstrækkelig længere. En anden løsning er at anvende kromit-

eller zirkonsand mellem kokillerne, hvilket udjævner temperaturovergangen fra kokille til formsand.

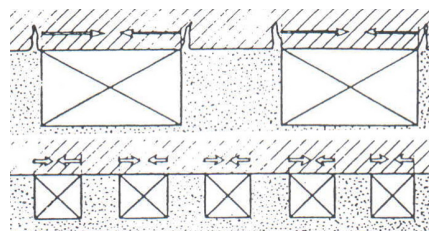


Fig. 22: Revnedannelse mellem kokiller

Problemet opstår især ved stålstøbegods og er næsten ikke-eksisterende for jern. Grå- og SG-jern danner straks et overfladelag, og størkningen skrider frem uden dendritter. På denne måde kan det størknende metal modstå trækkræfterne.

Fortsættes i næste nummer

