

Grundlæggende støberiteknologi: Gråt støbejerns metallurgi

Af Herbert Wolthoorn, STØBERIET

Indledning

Metallurgi er læren om metallernes fremstilling og egenskaber. De fleste metalliske grundstoffer kan bedst anvendes i legeret form da rene metaller ofte er for bløde til praktiske formål. For eksempel er støbejern en jern-kulstof-legering. Rent jern og rent kulstof er bløde materialer men som støbejernslegering er det temmelig hårdt. En jern-kulstof-legering der indeholder under 2 % kulstof betegnes som stål, mens kulstofindholdet i støbejern er over 2 %. Kulstoffet i stål findes sædvanligvis som jernkarbid, mens det i støbejern hovedsageligt forefindes som grafit. Støbejern findes i tre hovedtyper, nemlig gråt støbejern, SG-jern og hvidt støbejern.

Gråt støbejern eller gråjern er et vigtigt konstruktionsmateriale med høj formgivningsfrihed og fremragende støbelighed, bearbejdelse og dæmpningsevner. Af den europæiske stål og jern produktion udgør gråt støbejern ca. halvdelen. Gråt støbejern anvendes til uendeligt mange formål, fx brugsgenstande, maskindele, bilkomponenter, motorblokke og topstykker, pumpehuse, maskinstativer, tandhjul, bremseskiver, cylinderforinger og hydraulikgods. Fig. 1 viser et eksempel på støbegods fremstillet i gråjern. Her udnyttes, at gråjern har tilstrækkelig mekanisk styrke, er tryktæt, har dæmpede egenskaber, er let at støbe og nemt at bearbejde.



Fig. 1: Sabroe kølekompresor.

SG-jern er et betydeligt stærkere og meget sejere materiale end gråjern. Det kaldes derfor ofte sejjern og anvendes til hårdt belastet støbegods såsom

komponenter til lastbiler, vindmølegods, off-shore støbegods og lignende. Et kendt eksempel på anvendelse af SG-jern er propelnavet til en vindmølle (fig. 2). Her udnyttes SG-jernets styrke og sejhed, der bibeholdes ved temperaturer under frysepunktet.



Fig. 2: Vestas V164-8.0 MW off-shore vindmølle.

Hvidt støbejern er meget hårdt og slidstærkt og er vanskeligt at bearbejde. Det anvendes primært til sliddele, såsom askepumper, slidplader, valser til knuseanlæg og lignende. Fig. 3. viser et pumpehus i hvidt støbejern.

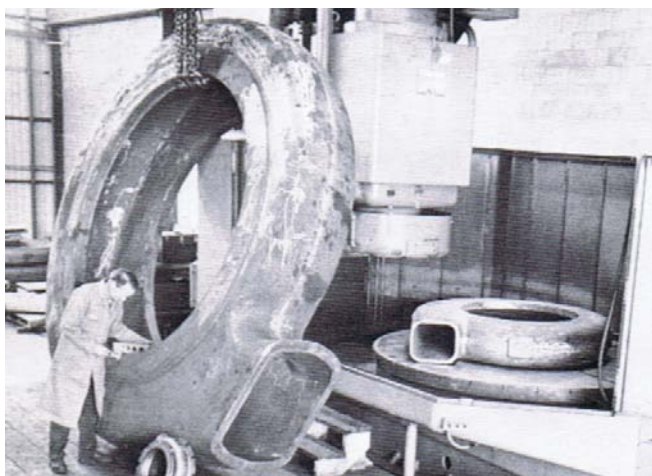


Fig. 3: Pumpehus i hvidt støbejern.

Kulstoffet i støbejern

I støbejern udskilles kulstof som grafit. I gråt støbe-



Fig. 4: Gråjern-flagegrafit.

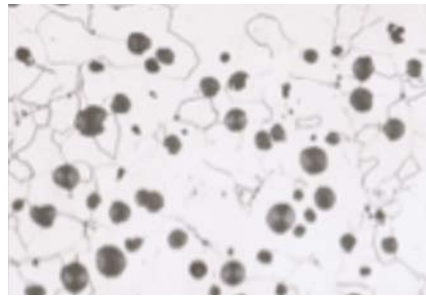


Fig. 5: SG-jern-kuglegrafit.

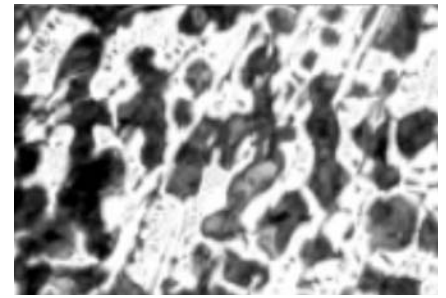


Fig. 6: Hvidt støbejern-cementit.

jern som flager eller lameller og i SG-jern som kugler. I hvidt støbejern udskilles kulstoffet ikke som grafit men som jernkarbid, der også kaldes cementit (Fe_3C). Cementit er meget hårdt og gør at hvidt støbejern er vanskeligt at bearbejde.

Forskellen mellem de forskellige typer kulstof kan ses i et slib under et mikroskop. Et slib er et stykke metal, hvorpå en overflade er blevet slebet, poleret og eventuelt ætset i en sådan grad, at reflekteret lys fra overfladen afslører strukturforskelle i metallet. Placeres et stykke præpareret støbegods under et mikroskop ses tydeligt forskellen mellem kulstofstrukturen i de tre hovedtyper støbejern, nemlig flagegrafit (fig. 4, uætset), kuglegrafit (fig.5, uætset) og cementit (fig. 6, ætset).

De fleste jernstøberier fremstiller støbegods i både gråjern og SG-jern, og det er særdeles vigtigt at sikre sig, at disse typer støbejern holdes adskilt, da deres mekaniske egenskaber er vidt forskellige. Hvis et emne beregnet til SG-jern er støbt i gråjern eller SG-jernet er klinget ud (omtales under SG-jern) kan det medføre katastrofale følger. SG-jern anvendes til formål, hvor styrke og sejhed har afgørende betydning, og hvis en sikkerhedsdetalje støbt i det forkerte materiale svigter på grund af materialebrud kan det medføre store materielle og menneskelige konsekvenser. Naturligvis kontrolleres sådanne sikkerhedsdetaljer også hos kunden (skulle man tro), men det er ikke altid tilfældet. Et mikroslib af det sidst udstøbte jern eller i givet fald af godset er nemt at udføre og kan afgøre hvorvidt grafitstrukturen består af kuglegrafit eller ej.

Om et støbejern er gråjern eller SG-jern kan også efterprøves med en klangprøve. I gråjern har grafitlamellerne en svingningsdæmpende virkning. Gråjern bliver derfor gerne anvendt til støbegods, hvor man vil reducere svingninger og støj, fx maskinstativer og motorblokke. Når man med en hammer slår på gråjern lyder det dumpt, mens SG-jern lyder mere klart som en klokke. Bemærk, at dette ikke er en certificeret afprøvning til bestemmelse af, hvorvidt et stykke gods er grå- eller SG-jern.

Når støbejern bliver knækket fremtræder brudfladen enten gråligt eller hvidt. En grålig brudflade ty-

der på enten gråt støbejern eller SG-jern fordi bruddet især går gennem de mørke grafitforekomster i materialet. En hvid brudflade tyder på hvidt støbejern, hvor kulstoffet udskilles som jernkarbid, og brudfladen bliver da blank.

En hvid brudflade findes ofte i støbejernets tynde sektioner og meget ofte i støbefinner. Dette kaldes kanthvidhed. Hurtig afkøling af jernet fremmer, at kulstoffet udskilles som jernkarbid. Hvidstørknede støbefinner er derfor vanskelige helt at forhindre, men mere kritisk er det, hvis godssektioner, der skal bearbejdes indeholder jernkarbid.

Hvidt støbejern er en specialegering, som regel med et siliciumindhold under 1%, som ikke bliver omtalt yderligere i denne artikel.

Støbejernets grundstruktur

Når man kommer salt i varmt vand kan der opløses en vis maximal mængde. Når vandet afkøles udskilles saltet igen som krystaller. På nogenlunde samme måde foregår det i støbejern. I flydende støbejern kan der også opløses en vis mængde kulstof, som udskilles under forskellige former under afkølingen. Efter at alt er størknet fortsætter udskillelsen af kulstof nu fra det faste metal, og ved stuetemperatur er opløseligheden meget tæt på 0%.

Støbejernets grundstruktur, også kaldt matrix, må derfor ved stuetemperatur nærmest være rent jern, også kaldt ferrit (fra latin ferrum=jern), idet alt kulstof er udskilt af jernet og ligger i matrix som enten rene grafitflager eller rene grafitkugler. I praksis omdannes ikke alt kulstof til grafit, det kræver nemlig meget langsom afkøling, som vanskeligt kan



Fig. 7: Grafitlameller i ferritisk grundstruktur.

finde sted under normal afkøling i en støbeform i støberiet. Ved hjælp af varmebehandling og/eller til-sætning af visse legeringselementer er det dog muligt at opnå en ren ferritisk struktur. Fig 7 viser et slib med ferritisk grundstruktur. I dette uætsede slib ses kun grafit (kraftige sorte aftegninger) og korngrænserne (tynde og svage aftegninger).



Fig. 8: Grafitlameller i perlitisk grundstruktur.

Når ikke alt kulstof er omdannet til grafit omdannes den resterende kulstof til jernkarbid. Fig. 8 viser et ætset slib under stor forstørrelse, hvor der tydeligt ses en lagdelt struktur af ferrit og jernkarbid. Denne struktur kaldes perlit, da et poleret og ætset slib har et perlemorsagtigt udseende.

Grundstrukturen i de fleste gråjernstyper er rent perlitisk, men tit findes lidt ferrit, især omkring flagegrafittens spidser (fig. 8). SG-jerns grundstruktur kan være fra rent ferrit over en blandet struktur til rent perlit, der hhv. repræsenteres af kvaliteter med EN-norm-betegnelserne EN-GJS 400, EN-GJS 500/600 og EN-GJS 700.

Perlittens lagdeling kan være fin eller grov. En finperlitisk struktur er stærkere men kan være vanskeligere at bearbejde.

Gråt støbejern

Gråt støbejerns struktur

Gråt støbejern er hovedsageligt en jern-kulstoflegering med flagegrafit i en overvejende perlitisk matrix/grundmasse.

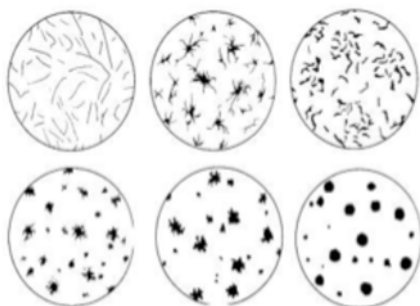


Fig. 10: Grafittens form.

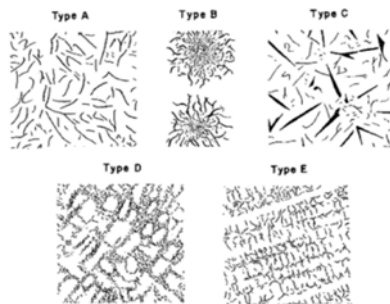


Fig. 11: Grafittens fordeling.

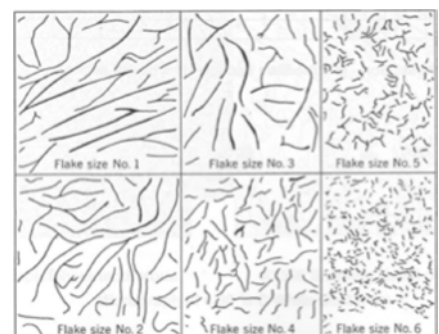


Fig. 12: Grafittens størrelse.

Denne perlitiske grundstruktur er temmelig stærk i forhold til almindeligt stål. Derimod har grafitten stort set ingen trækstyrke, ca. 0,2 N/mm² og virker derfor som hulrum i materialet. Disse hulrum har desuden, på grund af grafittens flageform, ret skarpe kanter, der kærvpåvirker strukturen. Under træk virker hver grafitlamel derfor som en revne, og gråjern er derfor et temmelig skørt materiale med relativ lav styrke. Under trykbelastning har støbejern betydelig større styrke, idet grafitten nemmere kan overføre trykspændinger.

Type gråt støbejern	Trækstyrke N/mm ²
EN-GJL-150	150
EN-GJL-200	200
EN-GJL-250	250
EN-GJL-300	300
EN-GJL-350	350
EN-GJL-400	400

Fig. 9: Trækstyrker for gråjern.

Grafittens betydning for de mekaniske egenskaber fremgår af fig. 9, der viser gråjerns trækstyrker for de gængse typer gråt støbejern. Grundstrukturen for alle disse typer gråjern er overvejende perlitisk, men da styrken varierer fra 150 til 400 N/mm² kan denne styrkevariation kun skyldes grafittens struktur. Grafitstrukturen er klassificeret (ASTM A247) i grafittens form, fordeling og størrelse (fig. 10-11-12).

Fig. 10 viser grafittens form, som kan variere fra det flageagtige over det orm- og edderkoppeagtige til kugleform. Gråt støbejern har flagegrafit og således form I. De andre forme er enten specialstøbejern, fx har SG-jern form VI, eller fejlformationer.

Fig. 11 viser grafittens fordeling for grafitform I og fig. 12 viser grafittens størrelser. For at kunne bedømme grafittens størrelse skal ASTMs originalbilleder anvendes og slibet ses ved 100 X forstørrelse.

Type A har jævnt fordelte grafitflager i et tilfældigt mønster, som giver optimal styrke og foretrækkes derfor normalt til gråt støbejern.

Type B danner et mønster, der kaldes rosettegrakit. Denne type jern har ringere styrkeegenskaber end type A.

Type C ligner type A grafit med grove grafitflager iblandt. Denne type jern har meget lille styrke men stor dæmpningsevne samt god bestandighed mod temperaturchok.

Type D har grafit med tilfældig orientering, der giver forholdsvis god styrke.

Type E har grafit med ensartet orientering, der giver ringere styrke end type D:

Hvordan de forskellige typer grafit dannes eller kan undgås omtales senere i artiklen.

Type	Styrke N/mm ²	Grundstruktur
A	350	finperlit
A	260	grovperlit
A	140	ferrit
B	225	grovperlit + ferrit
C	125	perlit + ferrit
D	170	ferrit

Fig. 13: Eksempler på forskellige grafittypers styrke.

Fig.13 viser eksempler på trækstyrker opnået i gråjern med forskellig struktur. Værdierne bør tages med forbehold, da de kun repræsenterer få prøver fra et enkelt støberi, men de viser dog, at A-grakit har de bedste styrkeegenskaber. Desuden spiller det også en rolle, hvorvidt grundstrukturen er ferritisk, perlitisk eller en blanding, samt hvorvidt perlitten findes som fin- eller grovperlit.

Støbejern med rosettegrakit kan styrkemæssigt anvendes til mange formål, men godset vil have en uensartet struktur, som kan give bearbejdningsvanskeligheder.

De grove udskilte grafitlammeler i C-grakit giver jernet meget lille styrke. Desuden kan de være sammenhængende gennem godsets tværsnit, og derfor er en sådan struktur ikke egnet til gods, som skal være tryktæt. Desuden giver de grove lameller synlige fordybninger i en bearbejdet overflade, hvilket er uønsket på støbegodsets dele, som skal frem-

træde blanke, fx et værktøjs prismevinger. Bestandighed mod temperaturchok gør dog gråjernet med de grove grafitlameller egnet til kokiller.

D-grakit har for det meste en større eller mindre mængde ferrit, hvilket giver jern med denne type grafit en ringere styrke.

Grafittens mængde, størrelse og fordeling samt grundstrukturen har således stor betydning for gråt støbejerns mekaniske egenskaber og anvendelsesformål. Grafitstrukturen bestemmes hovedsageligt af jernets kemiske sammensætning, størkningsprocessen, kimpling og podning, mens grundstrukturen hovedsageligt bestemmes af afkølingshastigheden i fast tilstand.

Gråt støbejerns kemiske sammensætning

Kulstof er det vigtigste element i støbejernets sammensætning, fordi det bestemmer mængden af grafit i grundstrukturen.

Efter kulstof er silicium (Si) det vigtigste element. Silicium forøger grafitudskillelse og fremmer dannelse af flagegrakit. Hvis siliciumindholdet er for lavt dannes karbider. For at undgå karbiddannelse ligger siliciumindholdet normalt mellem 1,2 og 2,6 %. Der findes diagrammer, fx et Maurer diagram (fig. 14) hvor den forventede grundstruktur ved et bestemt C/Si-forhold kan aflæses. Et sådant diagram bør dog ikke anvendes til at sammensætte en kemisk analyse for kulstof og silicium. I diagrammet vises en perlitisk struktur ved fx 2 % C og 3 % Si eller 3 % C og 2 % Si. Da kulstofindholdet i støbejern normalt ligger i områder 2,9 - 3,6 %, skal man ikke vælge kombination 2 % C og 3 % Si for at opnå en perlitisk struktur. Generelt betyder et højere kulstofindhold mindre risiko for karbiddannelse.

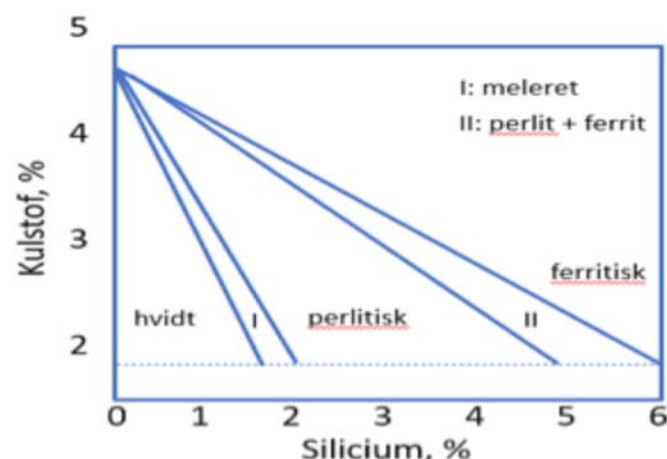


Fig. 14: Maurer Diagram.

Kulstofækvivalent

Forholdet mellem kulstof og silicium er vigtigt for alle typer gråt støbejern, og betegnelsen kulstofækvivalent

valent anvendes til at udtrykke kulstof og siliciums kombinerede virkning. Kulstofækvivalent betegnes CE (fra engelsk carbon equivalent).

$$CE = \% C + 1/3 \% Si$$

I støbejern har CE = 4,3 % en speciel betydning, da det er denne sammensætning som har det laveste smeltepunkt. Denne sammensætning kaldes den eutektiske sammensætning (eutektisk betyder let at smelte på græsk).

Fra et metallurgisk synspunkt klassificeres støbejern som undereutektisk (CE-værdien er mindre end 4,3 %) eller overeutektisk (CE-værdien er større end 4,3 %).

Under- og overeutektisk kaldes også hypo-eutektisk og hyper-eutektisk.

Kulstofækvivalenten siger altså noget om, hvor tæt en støbejernslegering ligger på den eutektiske sammensætning. Nu indeholder støbejern også mange andre grundstoffer, der alle påvirker CE-værdien i mere eller mindre grad. I litteraturen findes derfor formler for CE, der medtager flere elementer, fx $CE = \%C + 0,25 \%Si + 0,5 \%P$ og $CE = \%C + 0,3x(\%Si) + 0,33x(\%P) - 0,027x(\%Mn) + 0,4x(\%S)$, men den enkle beregning ($CE = \%C + 1/3 \%Si$) er praktisk anvendeligt med forholdsvis god nøjagtighed.

Kulstofækvivalenten kan også give en indikation om støbejernets styrke. Lave CE værdier giver større styrke end høje værdier, se fig. 15. Generelt har overeutektisk støbejern lavere mekaniske egenskaber end undereutektisk støbejern.

Kulstofækvivalent (%)	Ca. trækstyrke (N/mm ²)
4,0 - 4,5	150
3,9 - 4,3	200
3,6 - 4,1	275
3,3 - 3,9	350

Fig. 15: Gråjerns trækstyrke ved forskellige CE-værdier.

Mangan, svovl og fosfor

Støbejerns hovedelementer udover kulstof og silicium omfatter mangan, svovl og fosfor. Typiske niveauer er 0,2 – 1,2 % for mangan og 0,05 – 0,15 % for svovl. Disse små mængder kan dog have stor indflydelse på trækstyrke og struktur.

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Sn	Ti	Al
%	3,27	2,04	0,66	0,075	0,0013	0,049	0,18	0,12	0,007	0,019	0,012	0,012	0,002

Fig. 16: Analyseresultat for gråt støbejern type EN-GJL-250.

Mangan kan binde svovlet til mangansulfid (MnS), som er uskadeligt i støbejern. Forholdet mangan og svovl i mangansulfid er 1,7 : 1. Det er almindelig praksis at justere manganiveauet efter formlen: Minimal mængde mangan % = S % x 1,7 + 0,3.

Det ekstra 0,3 % mangan skulle give en tilstrækkelig sikkerhedsmargin til, at alt svovl bliver neutraliseret. Uden mangan vil svovl kunne danne jernsulfid, som har et lavt smeltepunkt, og derfor vil lægge sig i korngrænserne og blandt andet reducere jernets styrke og flydeevne. Desuden er svovl stærkt karbid-dannende.

For at opnå optimal respons til podning kræves dog en vis lille mængde svovl, normalt i området 0,05 – 0,1 %.

Fosfor findes i det meste støbejern. Det bliver sjældent tilsat planlagt men skyldes råjernets indhold af fosfor. I nogen grad øger det jernets flydeevne. Fosfor danner steadit (Fe₃P), der først størkner ved 950°C. Ved høje niveauer (over ca. 0,5%) fremmer det slidstyrken men også dannelse af porøsiteter, medens det ved lave niveauer (under ca. 0,05%) øger metalindrængning og finnedannelse.

Andre elementer

Støbejern indeholder ud over de 5 hovedelementer C, Si, Mn, S og P flere andre elementer. Fig. 16 viser et spektralanalyseresultat af en støbejernsprøve, der ud over de 5 hovedelementer viser 8 andre elementer. Hvor mange elementer støbejern indeholder afgøres nærmest af støberiets analysemuligheder. De fleste nyere spektrometre kan analysere over 50 forskellige elementer, hvoraf de fleste da også kan findes i støbejern. De fleste af disse elementer er såkaldte sporelementer, det vil sige elementer, hvis koncentration er meget lav. Ikke desto mindre vil alle have en vis indflydelse på jernets struktur og egenskaber.

Legeringselementer

Legeringselementer tilsættes bevidst for at give jernet bestemte egenskaber. Normalt drejer det sig om tilsætninger i størrelsesorden 0,5 til 2 % for at kunne opnå slid-, varme- og korrosionsfaste kvaliteter. For eksempel tilsættes krom (Cr) med ca. 1-2 % for at opnå varmebestandigt jern. En undtagelse er nikkel (Ni) som tilsættes med op til 32 % for at opnå en austenitisk struktur.

En del elementer fremmer dannelse af perlit og til-

sættes for at sikre fuld perlitisk struktur. Det skal dog bemærkes at anvendelse af disse elementer samtidigt øger risikoen for dannelse af karbider.

Kobber (Cu) er et perlitdannende element, der er meget anvendt i sejjern men ikke særlig almindeligt anvendt til gråjern. Hvis det anvendes for at opnå fuld perlitisk struktur tilsættes ofte 1-2 %. Opløseligheden i støbejern er begrænset til 3%.

Elementer såsom tin(Sn), molybdæn (Mo), vanadium (V), og antimon(Sb) er kraftigt perlitdannende. Valget mellem det ene eller andet perlitdannende element beror på flere faktorer. For eksempel forøger molybdæn hærdbarhed, vanadium fremmer dannelse af et finere grafit, tin er let opløseligt i flydende jern og kan derfor tilsættes støbeskeen. Således kan ethvert perlitdannende element have op til flere egenskaber, som kan udnyttes samtidigt. Man skal dog være opmærksom på, at de fleste af disse elementer også har skadelige virkninger, især hvis det maksimalt tilladelige niveau overskrides. For eksempel opnås fuld perlitisk struktur allerede ved 0,05 % tilsætning af antimon, mens det maksimalt tilladelige niveau er 0,1 %. Disse små tilsætninger kræver stor opmærksomhed i smelteriet, blandt andet, at legeringselementer afvejes og ikke tilsættes efter "rutinemæssig erfaring". Desuden er det vigtigt, at legeret omgangsjern holdes skarpt adskilt fra det almindelige omgangsjern og at analysen på det er kendt.

Sporelementer

Sporelementer er som nævnt elementer, hvis koncentration er meget lav. Hvor lav er ikke defineret, men når de ikke bevidst er tilsat kan de betragtes som sporelement. Elementer som, fx nikkel, krom og antimon kan derfor være både spor- og legeringselement.

Sporelementer kan have skadelige egenskaber, hvis de kommer over et vist niveau. Nogle kan være farlige, nogle mindre farlige. Desuden kan forskellige sporelementer, der hver for sig ligger under et maksimalt tilladeligt niveau, forstærke hinanden og samlet være skadelige.

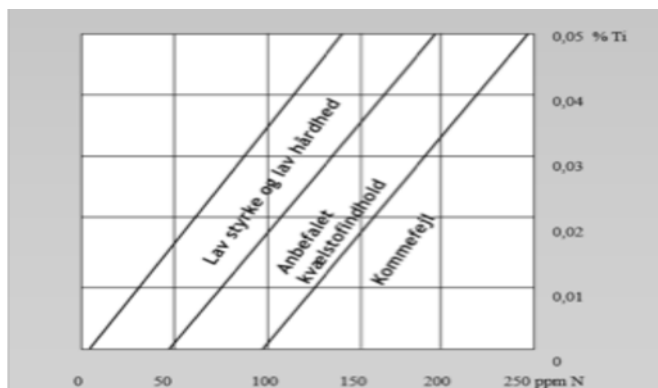


Fig. 17: Kvælstofs betydning i støbejern.

Meget skadelige sporelementer er blandt andet Bly (Pb), Antimon (Sb), Tellur (Te), Bismut (Bi) og Arsen (As).

Især bly er farlig, da der ikke skal meget bly til for at ødelægge en jernsmelte. Man mener, at helt ned til 0,005 % Pb kan være skadeligt. Spormængder bly i støbejern kan fremme dannelsen af degenereret grafit såsom Widmanstätten grafit. Uden at omtale denne degenererede grafitform nærmere, kan siges, at støbejernets trækstyrken reduceres katastrofalt. Før i tiden var vigtige kilder til bly i gråjern skrot, der indeholdt bly eller var overtrukket med blybaseret maling, blyrør, bilbatterier etc. Flere af disse kilder hører nu fortiden til eller blive forhåbentligvist fraseret som farligt affald på et tidligt tidspunkt.

Titan fremmer dannelse af D-grafit og ferritisk struktur og anvendes derfor sjældent som tilsætningsselement. En undtagelse er tilsætning for at styre kvælstoffet i jernet. Som det fremgår af fig. 17 opnås optimale forhold, når kvælstofindholdet ligger mellem 70-80 ppm.

Aluminium i støbejern kan skyldes skrot, der indeholder aluminium såsom øldåser, topstykker og gearkasser. Niveauer over 0,005 % kan forårsage brint-pinholes. FeSi-baserede podemidler, der indeholder over 1,7 % Al vil fremme pinholes, især ved overdreven brug.

Det er umuligt indenfor denne artikels ramme at omtale alle virkninger af de nævnte elementer samt alle mulige andre elementer i gråt støbejern mere indgående. De øvre tilladelige grænser for sporelementer samt grænseværdier for hovedelementerne er ofte baseret på støberiets egne erfaringer.

I dag har de fleste støberier spektrometre, og derfor kan en smelte analyseres og justeres før den udstøbes. For at holde sporelementerne på et acceptabelt niveau kan det være nødvendigt at bruge mere rå-

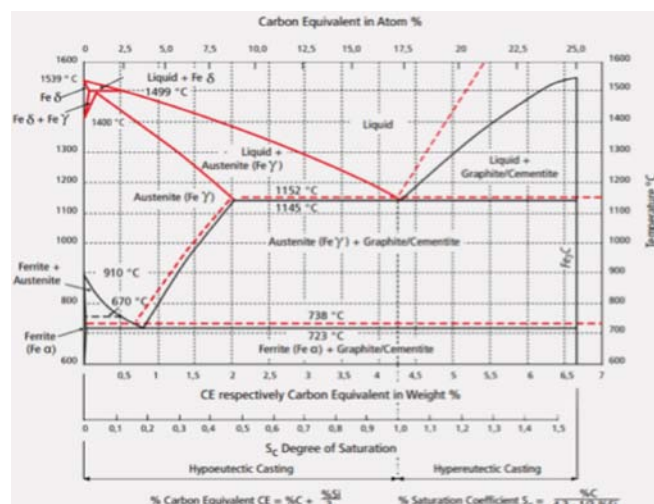


Fig. 18: Jern-kulstofdiagram (Foseco Wall Chart).

jern i chargin, da indkøbt skrot kan være af varierende kvalitet.

Størkningsprocessen

Støbejernets afkøling fra smelte til udslagningstemperatur spiller en stor rolle for dannelsen af støbejernets struktur. Ved langsom afkøling under størkning udskilles grafit og ved hurtig afkøling dannes cementit. Under den videre afkøling i fast tilstand ændres støbejernets grundstruktur, igen afhængig af afkølingshastigheden. De forskellige størknings- og afkølingsforhold ved forskellige jern-kulstof-sammensætninger kan vises i et tilstandsdiagram. Fig 18. viser et jern-kulstof-diagram for rene Fe/C-legeringer. Et sådant diagram kan virke temmelig kompliceret, især staldelen, dvs. hvor kulstofindholdet er mindre end 2 %. Fig 19 viser et forenklet Fe-C-diagram for støbejernsområdet.

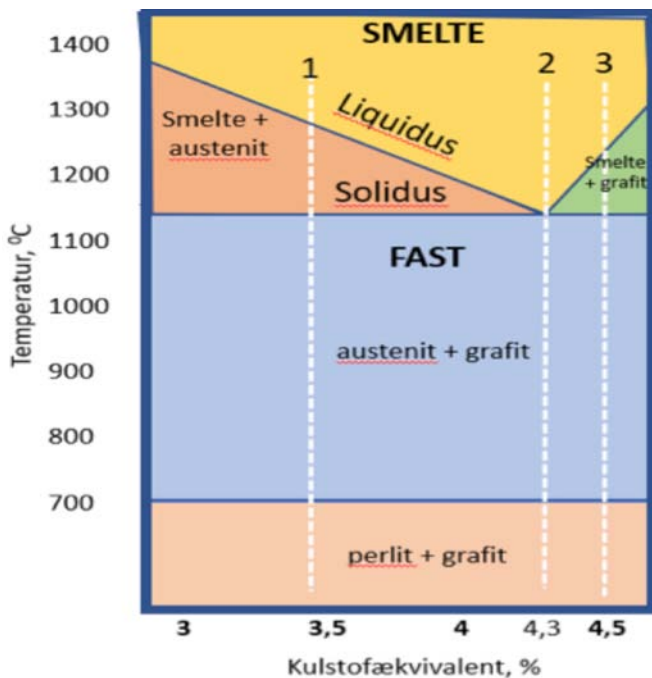


Fig. 19: Forenklet tilstandsdiagram for støbejern.

Den lodrette akse viser temperaturen og den vandrette akse kulstofækvivalenten, der går fra ca. 3 – 4,5 %, da støbejernslegeringer ligger indenfor dette område.

Den øverste kurve hedder liquidus (af latin flydende) og viser begyndende størkning. Ved solidus (af latin fast) er alt størknet.

Den vandrette linje ved 1147 °C angiver den laveste temperatur, hvor man kan have smeltet jern-kulstoflegering. Den kaldes den eutektiske temperatur, og under størkning ved denne temperatur udskilles austenit samt grafit og/eller cementit samtidigt og temperaturen falder ikke yderligere før alt er størk-

net. Om der dannes grafit eller cementit afhænger af afkølingshastigheden, men i gråt støbejern er det meningen at kulstoffet udskilles som grafit.

Ved ca. 730 °C ligger den vandrette linje, hvor eutektoid omdannelse af austenit til ferrit eller perlit finder sted. Eutektoid bruges, når der er tale om en proces i faste stoffer alene, mens der i en eutektisk proces indgår flydende faser. Om der dannes ferrit eller perlit afhænger igen af afkølingshastigheden, men i gråt støbejern foretrækkes normalt, at der dannes perlit.

Undereutektisk størkning

Når et undereutektisk gråjern størkner (den stiplede linje 1) er alt flydende indtil liquidus passerer. Her begynder dannelse af austenit dendritter.

Austenit er en bestemt krystalform for jern (opkaldt efter den engelske metallurg og materialeforsker Sir William Chandler Roberts-Austen). I et størknet materiale befinder atomerne sig i et bestemt krystalgitter, mens de i flydende tilstand ikke har nogen faste positioner. Ved størkningstemperaturen, for støbejern ca. 1100 - 1300 °C, bliver atomernes bevægelsehastighed meget lille, og der kan opstå steder, hvor atomerne har en position, der næsten svarer til krystalgitteret i fast form. Disse steder kaldes kim, der dannes næsten samtidigt mange steder i smelten. Efterhånden vil flere atomer samles omkring disse kim, hvorefter disse kim vokser og bliver til korn som til sidst danner krystaller.

I en ren Fe-C-legering findes den austenitiske struktur i temperaturintervallet ca. 1150 – 730°C.

Austenitten i støbejern bevarer sin krystalstruktur ned til ca. 730 °C, hvor den eutektoid omdannelse finder sted. Austenitten omdannes nu samtidigt til ferrit og cementit. Denne blanding af ferrit og cementit kaldes for perlit.

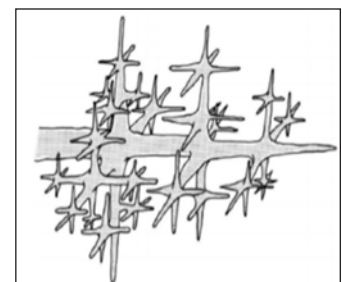


Fig. 20: Dendrit-skematisk (P.R. Beeley).



Fig. 21: Dendritter i støbetap (Cees van de Velde).

Krystallernes vækst i austenit danner dendritter (fra græsk, træliggende). Dannelse af disse juletrælige krystaller (fig. 20 og 21) er det første der sker, når undereutektisk støbejern afkøles og kommer under sin størkningstemperatur.

De austenitiske dendritten forsætter med at vokse, først fra formens (kolde) væg og senere overalt i godset, men da austenit kun kan indeholde 2 procent kulstof stiger kulstofindholdet i den resterende del af smelten indtil den når 4,3 procent. På dette tidspunkt har den resterende smelte opnået sin eutektiske sammensætning og den eutektiske størkning begynder.

Den eutektiske størkning begynder fra grafitkim. Disse grafitkim dannes af bl.a. uopløst grafit, oxider, sulfider, brint og kvælstof, som findes i smelten. Mens grafiten vokser dannes samtidigt austenit på begge sider af grafiten. Austenitten og grafiten vokser nu samtidigt under dannelse af eutektiske celler.

Fig. 22 viser et skematisk billede af en eutektisk celle. I toppen vises, hvordan grafiten ser ud på et slib under et mikroskop. Den oprindelige dendritiske struktur kan normalt ikke iagttages, men kan blive synlig ved specielle ætsningsmetoder.



Fig. 22: Skematisk billede af en eutektisk celle.

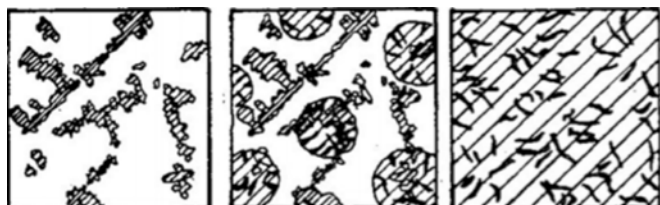


Fig. 23: Størkningsforløb i undereutektisk støbejern.

Til sidst mødes disse eutektiske celler og dendriternes austenit og de eutektiske celler og austenit bliver sammenhængende. Strukturen består nu af grafitlameller i en austenitisk grundstruktur. Fig 23 viser størkningsforløbet, og det ses, at antal og størrelse af de eutektiske celler vokser indtil størkningen er afsluttet. På dette tidspunkt bliver dendritternes au-

stenit og austenitten i de eutektiske celler sammenhængende, og jernet struktur består nu af grafitflager i en grundstruktur af austenit.

Eutektisk størkning

En eutektisk sammensætning størkner efter den stiplede linje 2 i fig 19. En jernsmelte med denne bestemte sammensætning danner fra begyndelsen eutektiske celler og (under ligevægtsbetingelser) ingen austenitdendritter.

Overeutektisk størkning

En overeutektisk sammensætning, den stiplede linje 3 i fig. 19, begynder sin størkningsproces ved at udskille ren grafit, det såkaldte garskumsgrafit. Når restsmelten når den eutektiske sammensætning starter dannelsen af eutektiske celler som fortsætter til alt er størknet.

Strukturomdannelse i fast tilstand

Ved den videre afkøling efter størkning falder austenittens kulstofindhold yderligere. Ved solidus kan austenit indeholde 2 % kulstof, men ved ca. 730 °C kun 0,77 % kulstof.

Den eutektoide omdannelse danner som tidligere beskrevet hovedsageligt perlit og grafit. Ved meget langsom afkøling og/eller højt siliciumindhold kan der dannes ferrit og grafit, hvor det udskilte kulstof afsættes på den allerede dannede grafit.

Gråt støbejerns størkning i virkeligheden

Størkningsforløbet, som er beskrevet ovenfor gælder for en jern-kulstoflegering, som afkøler under ligevægtsbetingelser, det vil sige meget langsomt. Dette forekommer ikke i virkeligheden, når støbejern støbes i sandforme eller kokiller.

Desuden indeholder støbejern ud over andre elementer, der påvirker strukturdannelsen i mere eller mindre grad, en betydelig mængde silicium, der har stor indflydelse på afkølingsforløbet. Støbejern er derfor i det væsentlige at betragte som en trestoflegering. Fig. 24 viser et Fe-C-Si-diagram med ca. 2,4 % Si. Bemærk at der er et interval for den eutektiske og eutektoide omdannelse. Desuden er den eutektiske sammensætning rykket til venstre. Bemærk at kulstofindholdet ved den eutektiske sammensætning i fig. 24 er ca. 3,5 %. Kulstofækvivalenten bliver derfor $3,5 + 2,4/3 = 4,3$.

Fig. 25 viser siliciums påvirkning af den eutektiske ligevægtstemperatur ved at danne et interval for eutektisk omdannelse. Det fremgår af figuren, at størkningsområdet udvides når siliciumindholdet øges. Dette giver mulighed for større afkølingshastighed uden øget risiko for dannelse af karbider.

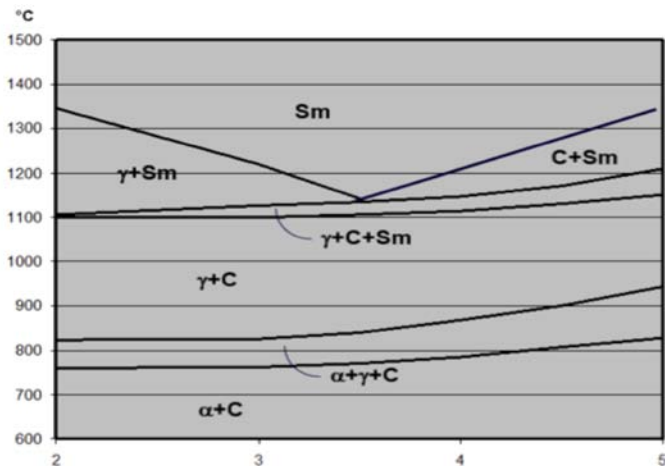


Fig. 24: Fe-C-Si-diagram ved 2,4 % Si.

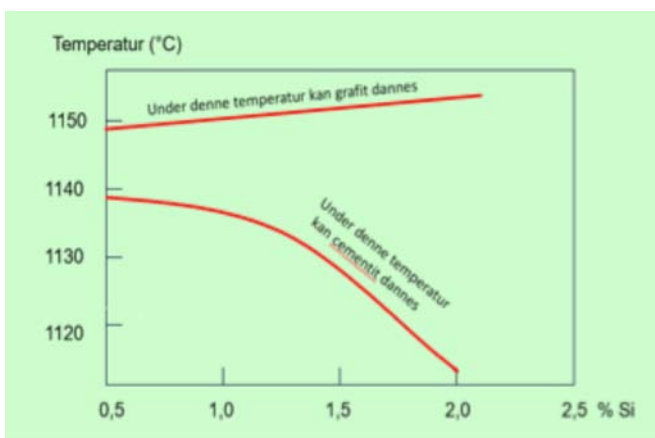


Fig. 25: Siliciums påvirkning af den eutektiske ligevægtstemperatur.

Kimvækst

Fra et mikroslib skulle man kunne få det indtryk, at kulstoffet i støbejern omdannes til cornflakes lignende grafitpartikler. I virkeligheden danner grafiten et forgrenet grafit skelet. Den styrkereducerende effekt af dette skelet er meget større end hvis grafiten fandtes som små, enkelte flager. Grafitflagerens størrelse, mængde og fordeling påvirker derfor jernets mekaniske egenskaber betydeligt.

Som nævnt dannes eutektiske celler når den eutektiske sammensætning er nået. Eutektisk størkning kræver dog, at der findes kim af en vis kritisk kimstørrelse. Hvis de er for små, kan de ikke overleve. Ved størkningstemperaturen er den kritiske størrelse så stor, at det er usandsynligt, at så store kim kan dannes af sig selv. Men jo lavere temperaturen kommer under solidus, desto mindre bliver den kritiske kimstørrelse. Det vil sige, at en smelte, der ikke indeholder nogen kim må underafkøles så meget, at der kan dannes stabile kim.

I praksis er en lille underafkøling tilstrækkeligt for at starte en eutektisk størkning. Dette skyldes at gråt

støbejern indeholder fremmede, faste partikler, som virker som grafitkim, der kan starte grafitudskillelse på et tidligt tidspunkt. Sådanne grafitkim kan være uopløst grafit, oxider, sulfider, silikater, brint og kvælstof, som findes i smelten.

Dannelse af eutektiske celler er derfor betinget af tilstedeværelse af effektive kim for grafitudskillelse og gode vækstbetingelser for den videre udvikling af de eutektiske celler.

Ved en bestemt temperatur under størkningen begynder de effektive kim at vokse, de største først og ved videre afkøling de mindre. Ved langsom afkøling kan den latente varme fra de store kim få temperaturen til at stabilisere sig og stoppe temperaturfaldet. Det betyder, at underafkøling går i stå, og derfor dannes der ikke nye kim. En langsom afkøling giver således de tidligst dannede celler god tid til at vokse. Resultatet bliver en grovere struktur, færre eutektiske celler og større grafitlameller. Dette ses tydeligt ved et støbejern med et højt indhold af kulstof og silicium, og som afkøler langsomt.

Ved hurtig afkøling kan den latente varme fra de store kim ikke stoppe underafkølingen, og under den fortsatte underafkøling kan flere kim dannes og vokse. En lille underafkøling betyder normalt, at der udskilles A-grafit.

Ved hurtigere afkøling vokser underafkøling og mængden af B-grafit kan tiltage.

Hvis der ikke findes tilstrækkelig med kim eller ved hurtig afkøling eller begge dele kan underafkøling nå et punkt, hvor mange grafitkrystaller dannes spontant med stor væksthastighed af hver eutektiske celle, hvilket fører til et mindre og ofte forgrenet flagegrafit af type D.

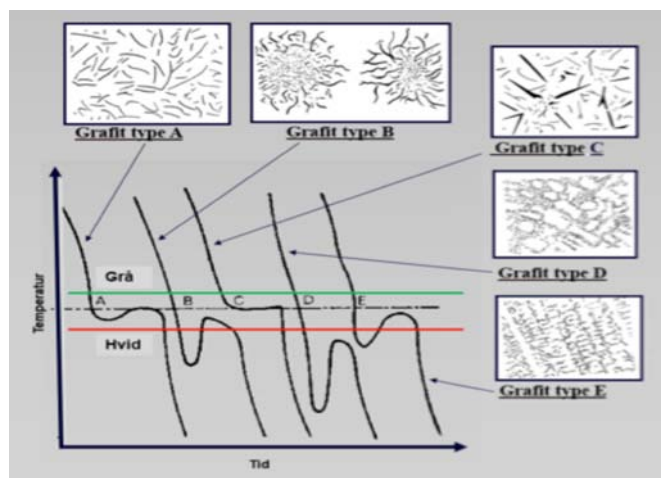


Fig. 26 viser dannelse af de forskellige typer grafit ved hjælp af termisk analyse. Ved øget indhold af silicium flyttes grænsen for hvidstørkning nedad, jf. fig. 25.

E-grafit kan dannes i forbindelse med relativ stor underafkøling og retningsbestemt dendritvækst, der fortrinsvis finder sted i meget under-eutektiske smelter.

Afkølingshastigheden afhænger ikke alene af varmebortførelse fra vægge og hvor kraftigt godsets sektioner er, men også af støbejernets sporelementer, som har en væksthæmmende virkning. Hertil menes at høre elementer som Te, B, Bi, Pb og Sb. Ved stor afkølingshastighed forårsager disse betingelser en forstærket underafkøling og dermed sandsynligheden for dannelse af D- og E-grafit eller karbider.

Ved langsomme afkølingshastighed vil disse væksthæmmende elementer kunne gøre A-grafitten grovere og antal eutektiske celler mindre.

Karbidstabiliserende elementer vil også formindskede kulstofaktiviteten i smelten og således forringe vækstbetingelser.

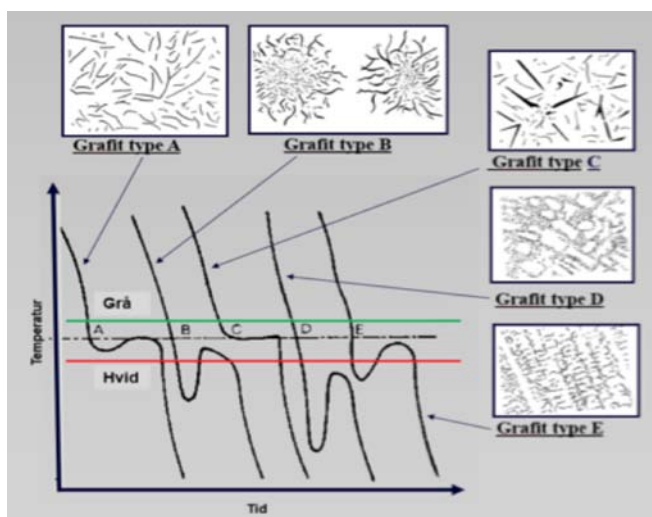


Fig. 26: Afkølingskurver for forskellige grafittyper.

Podning

Antallet af kim i smelten er vigtigt for størkningsforløbet. Et lavt kimtal kan blandt andet skyldes høj stålandel i chargen, overophedning, og kimneutraliserende tilsætninger. Lavt kimtal vil resultere i få eutektiske celler, som vokser sig store i et forgrenet grafitskelet.

Ved podning tilføres nye kim og underafkøling elimineres. Podning styrer således størrelsen af både grafitten og de eutektiske celler. Eutektisk størkning optræder mange steder i smelten, resulterende i mange, små celler. Endvidere er væksten moderat, så grafitforgrening reduceres. Derfor bliver stort set alt støbejern podet.

Podning kræver en vis grad af underafkøling, ellers har podningen ingen effekt. Generelt kan siges, at

hvis der ønskes en struktur med fint fordelt A-grafit (der giver størst styrke) kræves tilpas stor underafkøling og stort kimdannelsepotentialer.

Man bør dog være opmærksom på, at overpodning øger risikoen for sugninger (fig. 27) og slaggeindslutninger.

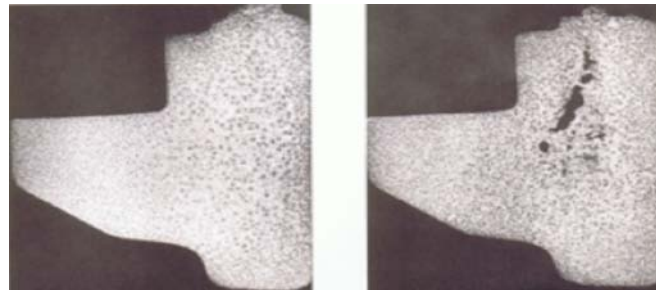


Fig. 27: upodet (tv) og podet jern (th).

Samme omhu, der kræves ved charging og smeltning skal udvises ved podning. Alle podningsmængder bør afvejes og under ingen omstændigheder været udsat for fugt. Podemidler som har været udsat for fugt vil, også efter de er blevet tørret, resultere i cementitdannelse.

Ved skepodning under tapping bør podningsperioden dække ca. 75 % af tappetiden. Vær også opmærksom på, at podemidlet forholdsvis hurtigt klinger ud. Der er således stor forskel på, om der støbes et eller flere emner fra samme støbeske.

Ved formpodning bør det regelmæssigt kontrolleres, at podningsudstyret virker fejlfrit og siloer for podningsmidlet ikke løber tør. Det bør også løbende kontrolleres, at podningsmidlet ikke rammer ved siden af tappestrålen.

Betydning af den primære størkning for jernets styrke

Austenittens dendritvækst har større betydning for styrken end ofte antaget. Desto mere under-eutektisk et støbejern er, desto mere primær austenit vil der dannes idet størkningstiden mellem liquidus og solidus bliver større med aftagende CE-værdi. Et stærkt forgrenet dendritnetværk bidrager til styrken på samme måde som en fiberforstærkning i plast. Der kan også dannes flere eutektiske celler jo mere en legering er under-eutektisk.

Derfor opnås de største trækstyrker når mange dendritter har kunnet vokse under størkningen, mens de laveste værdier findes når dendritvæksten har været kort.

Godstykkelsesfølsomhed

Støbejern er godstykkelsesfølsomt. Støbejerns struktur

tur og dermed styrke påvirkes af afkølingshastigheden, og da et tyndt tværsnit afkøles hurtigere end et kraftigt tværsnit er støbegodset godstykkelsesfølsomt. Det vil sige, at under ellers ens betingelser vil en tynd sektion under størkningen danne finere grafit, og under den eutektoide omdannelse i temperaturområdet 720 – 850 °C vil der primært dannes perlit. Det vil sige, at der er en relation mellem godstykkelsen og styrke. Fig 28. viser et sådant forhold mellem godstykkelse og styrke.

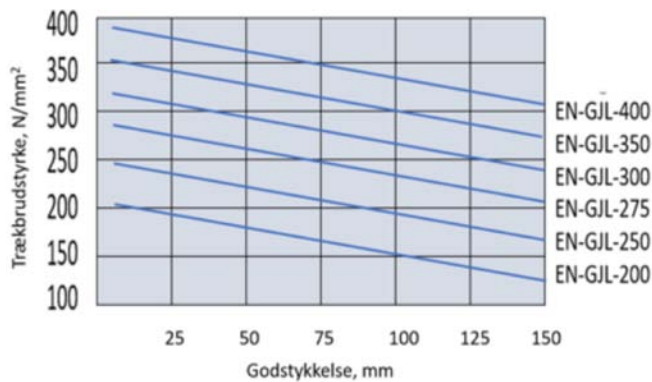


Fig. 28: Forholdet mellem trækstyrke og godstykkelse.

EN-normerne for støbejern angiver en minimumstrækstyrke for hvert type gråt støbejern. Styrken af fx EN-GJL-250 er således minimalt 250 N/mm², men her bør huskes, at trækstyrken skal måles på en separat sandstøbt Ø 30 mm trækstang neddrejet til Ø 20mm. Samme type støbejern vil i et 100 mm godstværsnit kun kunne opnå ca. 180 N/mm². Kræver konstruktøren minimalt 250 N/mm² i et 100 mm tværsnit bør en højere kvalitet vælges, fx EN-GJL-300. Det bør dog ihukommes, at et stærkere gråt støbejern har en større hårdhed.

Et stykke støbegods, som er bestilt i kvalitet EN-GJL-250 vil således kunne have variation i trækbrudstyrke samt hårdhed i forskellige godssektioner. Man bør dog være forsigtig med anvendelse af de forskellige tabeller og diagrammer med forventet trækstyrke i forskellige godsdimensioner. Værdierne tager eksempelvis ikke hensyn til støbetemperatur, kimal og podning.

Ikke desto mindre er det vigtigt, at både kunder og konstruktører er klar over disse godstykkelsesforhold. Desværre har mange kunder ikke længere indsigt i eller forståelse for, hvordan gråt støbejerns egenskaber fremkommer. At opnå samme styrke og hårdhed i stærkt varierende godsdimensioner kan ikke lade sig gøre. Derfor er det støberiets opgave at forklare sine kunder, at standardstyrken gælder for en separat støbt prøvestang, og at trækstyrken i godset varierer med godstykkelsen. Hvis der ønskes garanterede egenskaber bestemt steder i godset kan det eftervises med godsprøver (små træprøvestaver,

som skæres ud af godset) men disse tiltag skal selvfølgelig være aftalt forinden. Til stort gods kræves sommetider en påstøbt prøvestang for at sikre, at gods og prøvemateriale også i virkeligheden hænger sammen.

Sammenfatning

Gråt støbejern er en metallegering, der som konstruktionsmateriale har flere indlysende fordele. Det har gode mekaniske egenskaber, er nemt at støbe og bearbejde, giver stor formfrihed og har fremragende dæmpningsevner. Desuden kan der ved legering opnås slid-, varme- og korrosionsfaste kvaliteter.

Gråt støbejerns styrke bestemmes af grafit- og grundstrukturen. Grafitstrukturen bestemmes hovedsageligt af jernets kemiske sammensætning, størkningsprocessen, kimal og podning, mens grundstrukturen hovedsageligt bestemmes af afkølingshastigheden i fast tilstand. Disse forhold stiller væsentlige krav til, at støberiets fremstillingsprocesser og jernets grænseværdier overholdes.

Stål og mange andre metaller specificeres ofte ved hjælp af deres kemiske sammensætning. Gråt støbejern specificeres normalt kun efter trækstyrken. Kunder og konstruktører skal være klar over, at den specificerede trækstyrke er den minimale værdi, opnået i en separat støbt Ø 30 mm prøvestang, og at varierende godstykkelser giver varierende styrkeværdier. Støbegodsets udformning er derfor vigtigt at tage hensyn til, når støbejernskvaliteten skal vælges.

Støbejern har mange anvendelsesmuligheder som industrien har gjort brug af i næsten 200 år. Mon ikke det også kan bruges til mange formål de næste 200 år.

Litteraturliste:

- BCIRA/Teknologisk Institut: Metallurgi og fremstilling af gråt støbejern.
- Borris Pedersen og Mogens Rasmussen: Materiale-lære for Metalindustrien.
- H. Morrogh og W. Oldfield: Solidification of Grey Cast iron
- Knud Strande: Fremstilling af støbejern med forudsigelig bearbejdelighed.
- K. Offer Andersen. Metallurgi for Ingeniører.
- William H. Moore og Harry H. Kessler: Meehanite Metal Manufacturing Procedures.