

Hvordan de Metallurgiske Egenskaber i Kokillegods kan variere

Denne artikel omtaler en undersøgelse, der er foretaget for at vise, hvordan kokillegodsets metallurgiske egenskaber kan variere i godsets forskellige tværsnit, og hvorfor det er acceptabelt.

Franco Chiesa, Jeremy Carignan, David Levasseur and Gheorghe Marin, Centre de Metallurgie dU Quebec (Trois-Rivieres, Quebec, Canada; and Michael Jutras, Powercast Manufacturing Inc. (St.-Eustache, Quebec, Canada)

Aluminium A356 (AlSi6Mg0,5) støbegods fremstilles hovedsageligt i stålkokiller med størkningstider, der generelt er mindre end 10 minutter. Ved denne proces opnås normalt de bedste metallurgiske egenskaber sammenlignet med de andre almindelige støbeprocesser såsom højtryksstøbning (traditionelt eller vakuum), sandstøbning, gipsstøbning og præcisionsstøbning. Derfor anvendes

støbegods fremstillet i stålkokiller (kokillegods) ofte til komplicerede højt belastede dele (figur 1).

Værdierne af trækstyrke og sejhed er tæt knyttet til de metallurgiske egenskaber såsom sekundær dendritafstand, niveauet af mikroporøsiteter og antallet af urenheder i metallet.

Ved kokillestøbning hældes metallet i kokillen via en støbetap, hvilket resulterer i en del turbulens. Ofte ender det varme metal i bunden af kokillen, mens efterfødere, som kræver de varmeste metal, er placeret i toppen og derfor modtager det koldeste metal. Dette modvirker en retningsbestemt størkning, hvor der ønskes koldt metal i bunden og varmt metal i toppen. Ved tiltøbning anvendes en kokille, der at begynde med befinder sig i en vandret position og under metalfyldning langsomt kippes til en opretstående position. Denne støbeprocess reducerer turbulens og sørger for, at det varmere metal kommer i toppen af kokillen.

For at undersøge, hvorledes de mekaniske egenskaber i kokillegods varierer, blev der foretaget en "obduktion" på en svingplade (figur 2). Hvis en sådan svingplade bliver udsat for ekstreme træk- og bøjningsbelastninger, kan den have varere, hvilket kan medføre alvorlige konsekvenser.

I modsætning til sænksmedede komponenter kan der i støbegods

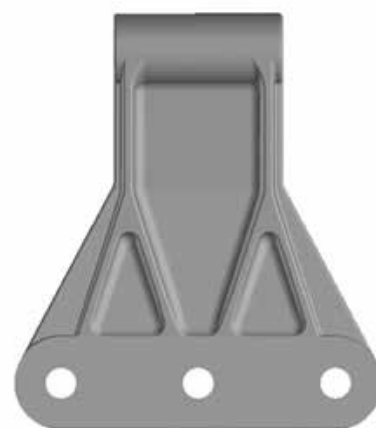


Fig 2. Forsøgsemnet er tiltøbt i kokillegods i A356 og måler 364 x 412 x 72 cm og vejer 5,4 kg. Størkningstiden ca. 3,5 minut.

ikke altid opnås de standardiserede trækstyrker jævnt fordelt i godset. Dette gælder vel at bemærke for alle støbelegeringer. Dette forvirrer støberiets kunder, da de regner med ens mekaniske egenskaber i hele emnet og ikke en række forskellige egenskaber for den angiveligt samme legering, alt afhængigt af hvilket støberi, konstruktør eller håndbog de har rådført sig med. De vil ofte konkludere, at en troværdig konstruktionsværdi slet ikke findes.

Sandheden er, at de mekaniske egenskaber i støbegods ikke alene ændrer sig med processen, men også kan variere inden for samme



Fig 1. A356 kokillestøbt fælg og komponent til styretøj

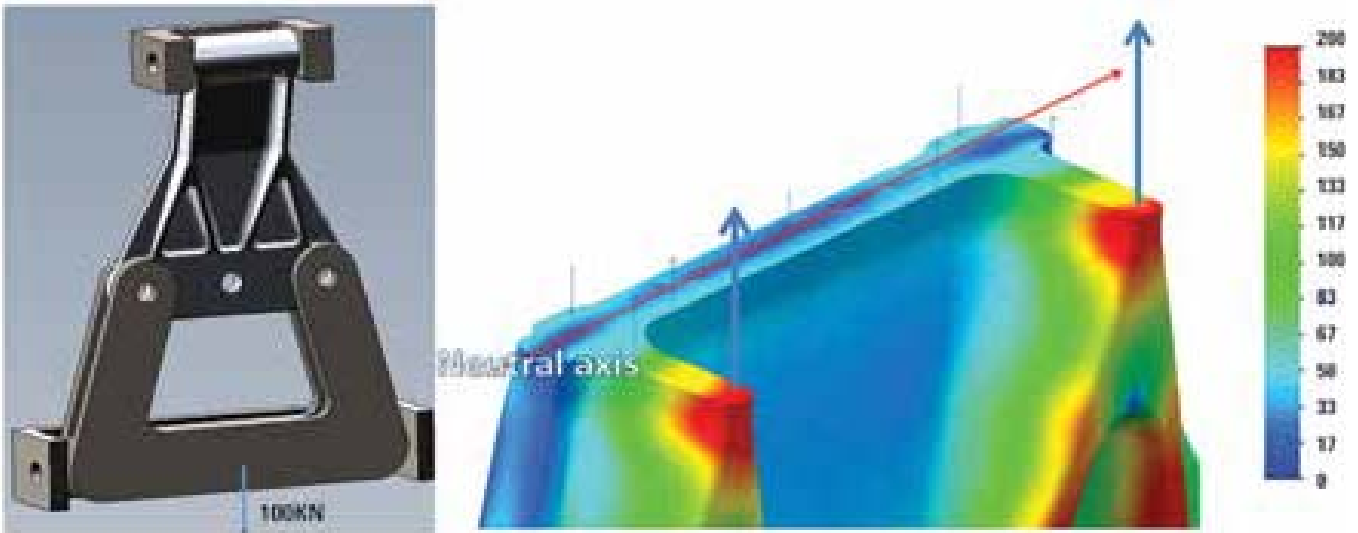


Fig 3. Spændingsfordeling i den kritiske zone (von Mises kriteriet)

støbning. For eksempel varierede forlængelsen i svingpladen fra 2,1 til 0,8%, alt afhængig af størkningssituationen på et bestemt sted (størkningstid og temperaturgradient). Metalstøbere kan dog med temmelig god pålidelighed forudsige, hvilke egenskaber der kan forventes på forskellige steder i godset, og dermed sikre, at de nødvendige egenskaber er til stede i de kritiske områder.

At præsentere den potentielle støbegodskunde for nærværende analyse kan være med til at overbevise disse ikke-metallurger om, at godsets mekaniske egenskaber kan vurderes pålideligt.

Den undersøgte svingplade

Den undersøgte svingplade (figur 2) har en typisk tykkelse på 12 mm. I undersøgelsen blev pladen udsat for kombinerede træk- og bøjningsspændinger (figur 3). Pladens kemiske sammensætning, målt på en prøve udkåret i bundens nederste venstre hjørne, var: 6,65 % Si, 0,11 % Fe, 0,01 % Cu, 0,006 % Mn, 0,30 % Mg, 0,002 % Sr (dvs. legeringen blev ikke modificeret), hvilket svarer til sammensætningen af en primær legering af højeste kvalitet A356.

Før svingpladen kan anvendes skal den afprøves på et ekstremt spændingsniveau (figur 3). Skitsen til venstre viser testopstillingen, mens til højre fordelingen af Von Misesspændinger er gengivet med forskellige farver. Det vises tydeligt, at ribbenens spidser udsættes for trækspænding tæt på flydespændingen for en legering A356 T61. Værdierne i Von Mises-kriteriet angiver, hvor materialet forventes at flyde, dvs. når værdien af materialets trækstyrke er nået (ca. 180 MPa / 26ksi for varmebehandlet aluminium A356, anløbet i 4 timer ved 155 ° C efter opløsningsglødning i 8 timer ved 1,004F (540C) og bratkølet i vand (60oC).

Undersøgelsen

Da der er foretaget kun én trækprøvning for hver position, skal prøveresultaterne (flydespænding, brudstyrke og forlængelse) fortolkes med forsigtighed.

Den typiske relative standardafvigelse for brudstyrke og forlængelse er hhv. 5% og 25%. Man bør dog huske på, at såfremt enkelte resultater vil følge en normalfordelingskurve, så ville gennemsnitsværdien baseret på et stort antal prøver ville ligge inden for i intervallet $\pm 10\%$ og $\pm 50\%$ af



Fig 4. Positioner, hvorfra de 13 trækprøver blev udtaget, samt foto af minitrækstang.

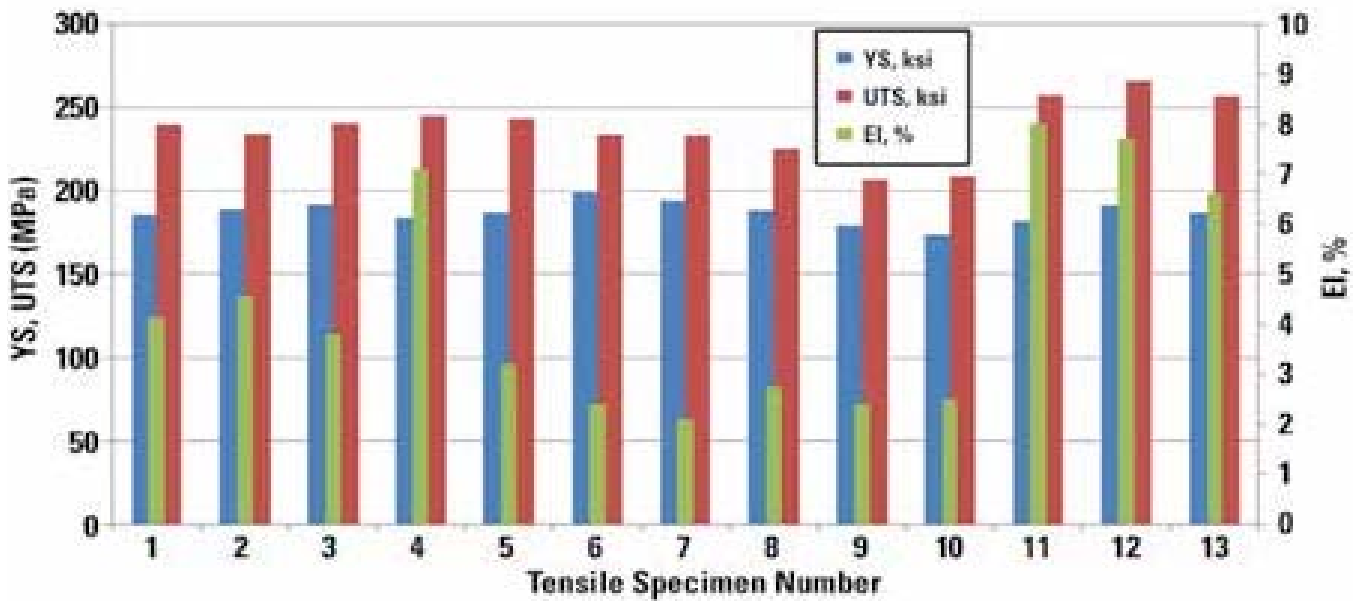


Fig 5. Trækprøvningsresultater af de 13 positioner på emnet vist i figur 4.

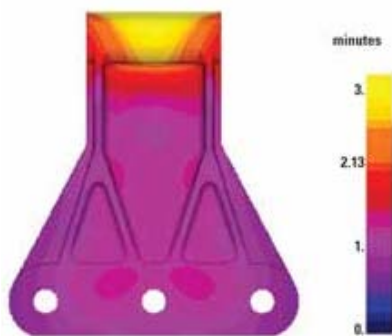


Fig 6a. Størkningstid forudsagt ved termisk modellering af størkningsforløbet.

værdien af en enkeltmåling (med 95 % sandsynlighed). Resultaterne af trækprøvningserne, der er vist i figur 5, angiver:

- Flydespændinger ens i hele emnet (ca. 180MPa / 26ksi).
- Forlængelsen varierer i et bredt område fra 2,1-0,8%.
- Der er stærk korrelation mellem trækstyrken og forlængelsen.

Når procesbetingelserne er kendte (dvs. støbetemperatur, tiltningstid, udstødningstid og kokille-åbningstid), er det muligt at forudsige størkningsbetingelserne overalt i støbningen, når en dynamisk stabil tilstand er nået. For eksempel er den simulerede størkningstid efter 10 cykler plottet i figur 6a.

7. For at reducere disse porøsiteter og dermed opfylde materialekravet til grad C, kan man tilsætte en lille afpasset mængde gas, således at størkningkontraktionen mindskes og fordeles i metallet.

Smeltens begasning styres ved at måle tætheden af vakuumpøven til en densitet tæt på 2,50. Den normalt afgassede smelte svarer til en prøvetæthed på 2,60, sammenlignet med en kompakt densitet på 2,68 for legering A356. En alternativ løsning ville have været at anvende forceret afkøling: modellering havde vist, at forceret luftkøling ville have været utilstrækkelig, så begasning af smelten ville være mere praktisk end placering af vandkølingskanaler i formen.

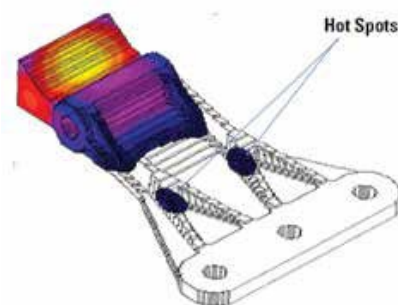


Fig 6b. Hot spot områder bestemt af godsets geometri.

Den primære information, der opnås ved størkningsmodellering er placeringen af varmecenter (hotspots), hvor sen størkning har afskåret disse center fra metaltilstømning. Afhængig af disse hot spots omfang vil der kunne opstå sugninger i kritisk antal i disse områder.

Som vist i figur 6a-6b findes hotspots i 2 områder, hvor spændingen er lavest. De resulterende sugningsporøsiteter er vist i figur

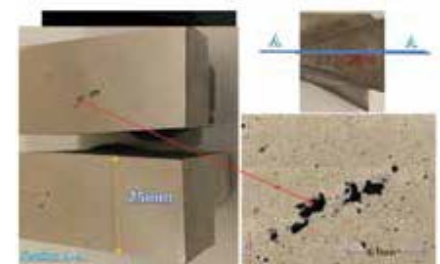


Fig 7. Sugningsporøsiteter i en hot spot fra fig. 6b.

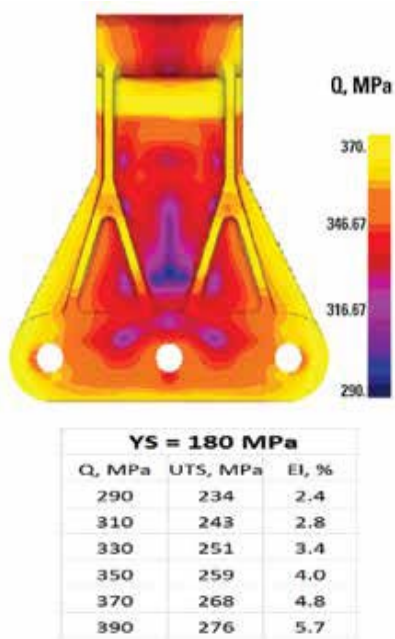


Fig 8. Den forventede fordeling af kvalitetsindekset Q. Tabellen viser forlængelse (El%) og trækstyrke (UTS) afledt af forskellige Q-værdier for en fast flydespænding (YS) på 180MPa.

Imidlertid giver simuleringen flere information end størkningsforløbet og placeringen af hot spots. Trækstyrkeegenskaber kan også forudsiges.

Man har defineret et kvalitetsindeks Q for varmebehandlede Al-Si-Mg legeringer, som i en første tilnærmelse, kun er afhængig af legeringens metallurgiske kvalitet og ikke af den varmebehandling, der efterfølger opløsningsglødning og bratkøling.

Den metallurgiske kvalitet afhænger af mikrostrukturens finhed, udtrykt ved den sekundære dendritafstand (DAS) i mikrometer, samt af mikroporositeternes niveau, udtrykt i volumenprocent. Tilstedeværelsen af urenheder vil også reducere værdien af Q. Kvalitetsindeksen Q er defineret som: $Q = UTS + 150 \text{ Log El}$

I en ren legering afhænger Q kun af afstanden mellem dendritforgreninger og niveauet af mikroporositeten. Eftersom DAS er relateret til størkningstiden,

kan mikroporositet udtrykkes som funktion af størkningstid og størkningshastighed. Q kan beregnes ud fra resultaterne fra de termiske modelleringer, der giver en værdi for størkningstid og -hastighed overalt i støbegodset. Bemærk, at den lokale størkningstid er tidsforløbet mellem begyndelsen og slutningen af størkningen, og derfor er den kortere end den totale størkningstid i figur 6. Værdier for Q er baseret på en moderat begasset smelte med en vakuumbestemt densitet på 2,48, svarende til et hydrogenindhold på ca. 0,20 ppm. Et Q-fordelingsbillede på svingpladen er vist øverst i figur 8. Det ses, at zoner med lave Q-værdier svarer til længere størkningstider mens høje Q-værdier svarer til høje størkningshastigheder.

De mekaniske egenskaber (flydespænding YS, trækstyrke UTS, forlængelse El) i AlSiMg-legeringer er ikke uafhængige. Følgende empiriske forhold er blevet foreslået:

$$YS = UTS - 60 \text{ Log El} - 13$$

Da pr. definition $Q = UTS + 150 \text{ Log El}$, bliver YS:

$$YS = Q - 210 \text{ Log El} - 13$$

$$\text{Følgelig: } El = 10^{(Q - YS + 13) / 210} \text{ [ligning 1]}$$

Flydespændingen afhænger hovedsageligt af magnesiumindholdet og anløbningsbetingelser, som er ens for hele emnet. Flydespændingen kan beregnes ud fra magnesiumindholdet (0,30%) og anløbningsforholdene (4 timer ved 155oC). Flydespændingen blev bestemt til 180 MPa, hvilket er i god overensstemmelse med trækprøvningsresultaterne i figur 5, der vel at bemærke er baseret på kun en trækprøvning.

Under antagelse af $YS = 180 \text{ MPa}$ er konstant kan forlængelse beregnes fra Q ved anvendelse af ligning 1.

I figur 8 varierer de beregnede Q-værdier i svingpladen hovedsageligt fra 308 til 363 MPa, hvilket fra tabellen i samme figur svarer

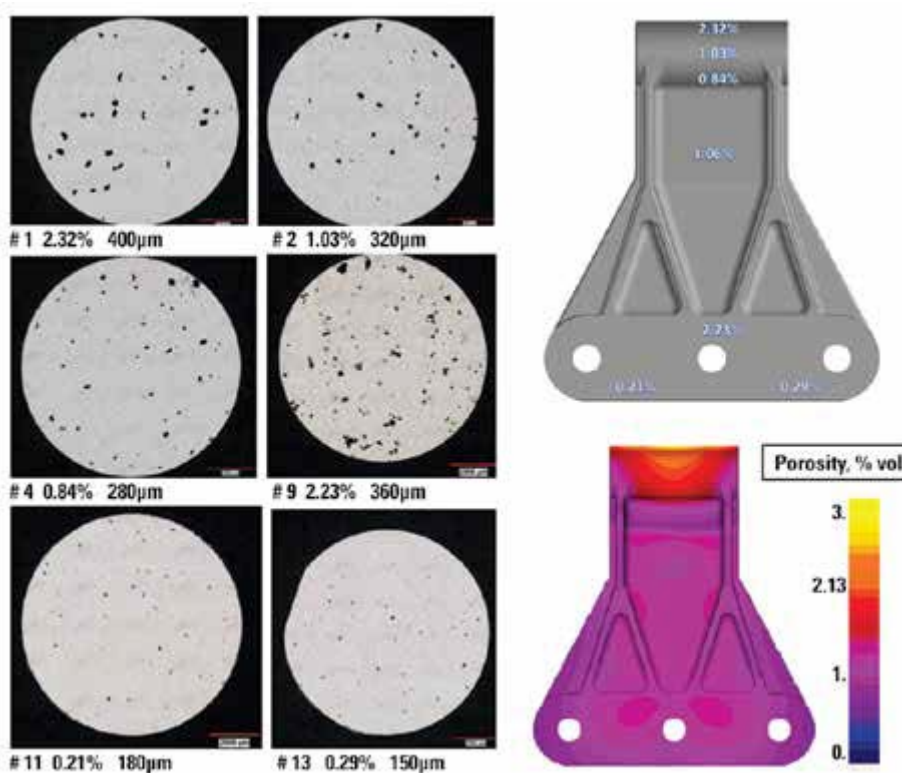


Fig 9. Mikrobilleder af positioner vist i figur 4 med angivelse af målte niveauer for mikroporositet (øverst th) og simulerede værdier (nederst th)

til beregnede forlængelser varierende fra 2,4-4,6%, et bredere område end det, der blev målt, idet de eksperimentelle forlængelser varierer fra 2,1-0,8 %. Denne tilsyneladende uoverensstemmelse er muligvis ikke signifikant, fordi de eksperimentelle resultater blev opnået på en afprøvning pr. position. Den typiske standardafvigelse for forlængelse er 25%, hvilket betyder, at for de to ekstreme tal vil den "sande værdi" af forlængelsen ligge i området $2,1 \pm 1,0\%$ og $8,0 \pm 4,0\%$ med en sandsynlighed på 95%. Den "sande værdi" ville blive opnået ved at beregne gennemsnittet af et uendeligt antal testresultater. Det er således umuligt under de nuværende omstændigheder at påstå, at forudsigelserne er i overensstemmelse eller i strid med virkeligheden. Et meget højere antal tests ville være nødvendigt. Det kan imidlertid siges, at både eksperiment og teori vi-

ser, at der findes en bred vifte af mekaniske egenskaber inden for samme støbning. De målte trækprøveresultater (figur 5) synes generelt bedre end de beregnede, hvilket tyder på, at det afprøvede emne har en metallurgisk kvalitet, der er højere end normalt (eller beregninger upålidelige, oa).

Mikroporositetsniveauet blev målt for hver af de 13 positioner ved billedanalyse. Prøverne, 9 mm i diameter, er vist i figur 9, og udtaget på positionerne 1, 2, 4, 9, 11 og 13 (se figur 4). Porøsitethullernes maksimale længde er også angivet. Denne maksimale længde er mere relevant for delens træthedstyrke end porøsitetandelen udtrykt i volumenprocent. På trods af smeltes delvise begasning, der er beregnet til at reducere mikrosugninger til et acceptabelt niveau, resulterer den hurtige størkning på positionerne 11 og 13 i meget lave niveauer af

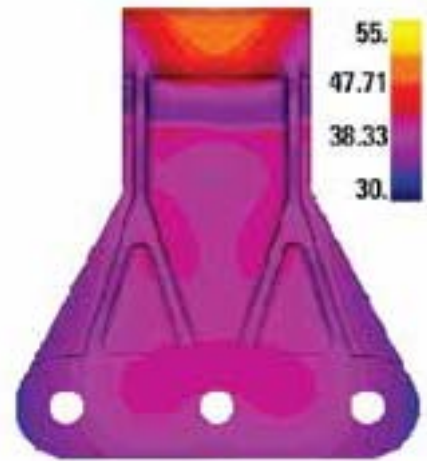


Fig 11. Simuleret fordeling af dendritforgreninger (mikrometer).

mikroporositeter. De beregnede værdier af mikroporøsitet er generelt højere end de eksperimentelle værdier, undtagen i position 9, hvor det målte niveau uventet er meget højt (2,23%). På dette sted er porøsitetshullernes morfologi også meget ejendommelig (se bilde nr. 9 i figur 9), hvilket tyder på, at et bestemt fænomen muligvis har fundet sted på dette sted. Det kunne være tilstedeværelsen af indespærrede urenheder, som kunne have fungeret som kim for dannelse af atomar brint.

Den generelt højere værdi af den beregnede mikroporøsitet i forhold til den målte kan skyldes naturlig afgasning eller fordi det faktiske niveau af atomar brint opløst i smelten var mindre end 0,20 ppm anvendt i formelen til at beregne mikroporositetsfordelingen.

Mikrostrukturene vist i figur 10 er typiske for en umodificeret varmebehandlet Al-Si-legering. Som forventet stiger den dendritiske struktur, når størkningstiden øges; de målte værdier af DAS er angivet under mikrobillederne. Fordelingen af den beregnede DAS (figur 11), der er resultatet af størkningsmodelleringen, er baseret på et tidligere foreslået forhold, som kun afhænger af den lokale størkningstid, dvs. tiden der er gået mellem begyndelsen og slutningen af størkningen på det pågældende sted

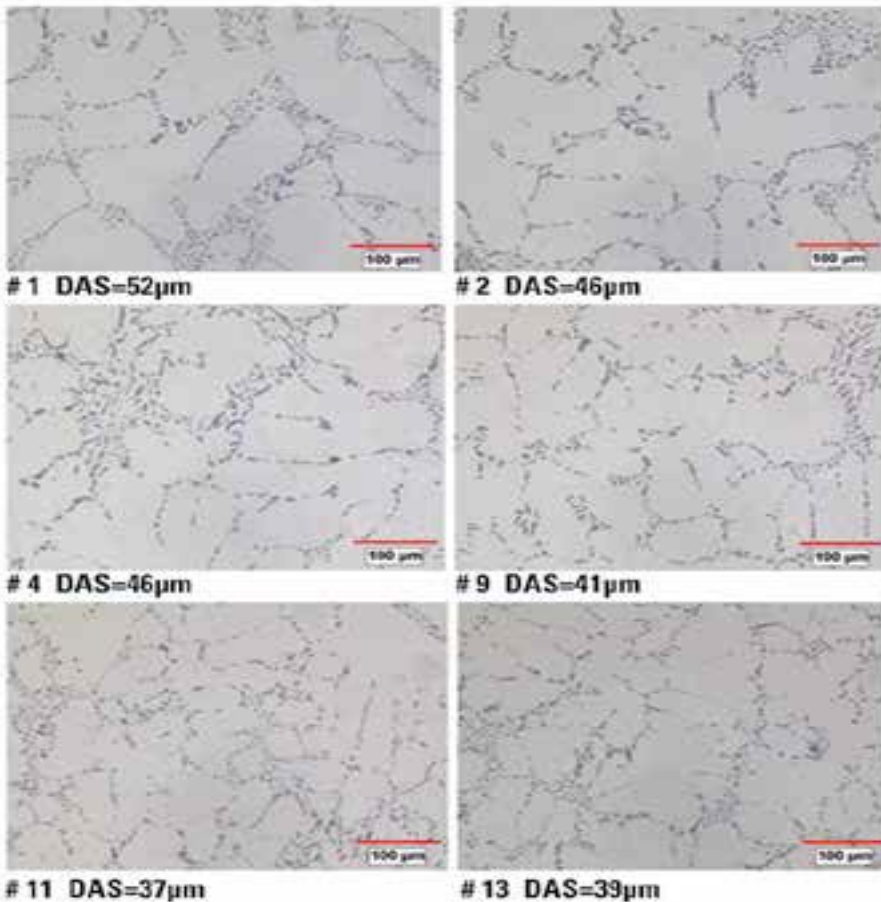


Fig 10. Metallografiske strukturbilleder af positioner 1, 2, 4, 9, 11 og 13 (figur 4)

Hvad vi nu har kendskab til

Den metallurgiske undersøgelse af 13 prøver fra et emne støbt i aluminium A356 i en tiltekokille med lokale størkningstider på mellem 30 og 150 sekunder fører til følgende konklusioner:

- Lokale styrkeegenskaber varierer meget med størkningsbetingelser, og kvalitetsindekset Q spænder fra 308 til 363 MPa. Disse værdier forventes at være lavere end den minimale Q -værdi, der kræves i standard ASTM B108 for separat støbte teststænger ($Q > 367$ MPa med en lokal størkningstid mindre end 20 sekunder).
- Variationerne i mikroporøsiteten og forlængelsen kan med rimelighed forudsiges, når den lokale værdi af størkningstiden og solidushastigheden er kendt via størkningsmodellering. De målte værdier af forlængelsen (2,1-8%) varierer i et langt bredere interval end de forudsagte (2,4-4,6%). Denne uoverensstemmelse skyldes, at der kun blev udført en trækprøvning pr. position, idet konfidensintervallet for forlængelsen af støbt aluminium typisk er 25% af gennemsnitsværdien opnået ved et meget stort antal tests.
- Den sekundære dendritforgreningsafstand (DAS) kan nøjagtigt forudsiges, når tiden mellem begyndelsen og afslutningen af størkning bestemmes ved størkningsmodellering.

Det viste sig, at udover sin konventionelle anvendelse til at forudsige makrosugning i støbegods (fx ved hot spots), kunne størkningsmodellering anvendes til at evaluere variationerne i mikroporøsitet og trækforlængelse inde i støbegodset. Denne fremgangsmåde skal dog bruges med en vis forsigtighed og forbehold. Med hensyn til størkningssimulering bør en forudsigelse betragtes som et relativt rigtigt billede af virkeligheden. For en given legering kan der kun gives troværdige forudsigelser efter en lang afprøvningsperiode med en bred vifte af geometriske konfigurationer og procesforhold.

.....

Denne artikel er baseret på foredraget "Metallurgical Properties inside a Tilt Poured Permanent Mold Structural Aluminum AlSi7Mg03 (A356) Casting" (Paper 18-011), der oprindeligt blev præsenteret på den 122. Metalcasting Congress.

Artiklen er bragt i Modern Casting August 2018. Den er gengivet med venlig tilladelse af American Foundry Society (www.moderncasting.com)
Oversat for STØBERIET af Herbert Wolthoorn

.....