

Forenkling af varmebehandling af Al-legering 319 uden forringelse af materialeegenskaberne.

Ved at optimere varmebehandlingen af sandstøbegods, således at de ønskede egenskaber opnås hurtigere, kan omkostninger og CO₂-aftryk reduceres.

**FORFATTERE: ROBERT MACKAY & GLENN BYZCYNski,
NEMAK US 8 SOUTHFIELD, MICHIGAN)**

Nylige globale hændelser har demonstreret vigtigheden af at hjemtage produktionen af løbende forsyninger af støbegods for at undgå produktionsafbrydelser. Derfor vil en videre optimering af støbe- og varmebehandlingsprocesser i Nordamerikas støberiindustri gøre den konkurrencedygtig med oversøiske leverandører. Processerne indenfor varmebehandlingsområdet kan optimeres betydeligt ved yderligere forskning. Dette gælder især for Cu-holdige Al-Si støbelegeringer som for eksempel 319-legeringerne.

319-typen er en af de mest brugte støbelegeringer anvendt til motorkonstruktion, og den underkastes en T7 opløsningsglødet varmebehandling for at opnå de bedste mekaniske egenskaber og største målfasthed.

Ved at finde en metode til at reducere omfanget af opløsningsprocessen og stadig kunne opnå de samme materialeegenskaber og dimensionsstabilitet som ved den oprindelige fuldt udførte opløsningsbehandling, kan man sænke energiomkostningerne, øge kapaciteten uden kapitalinvestering i behandlingsovn samt reducere CO₂-aftrykket fra hele processen.

I dette studie, udført af en større komponentleverandør til automobilindustrien, blev støbegods og dets reaktion/opførsel undersøgt for to legeringer (Tabel 1), når de underkastes en T7 varmbehandling.

EKSPERIMENTEL PROCEDURE

For kortheds skyld er den overordnede forsøgsbeskrivelse af præcisionssandstøbningen og varmebehandlingen af støbegodset vist i et flowdiagrammer i fig. 1a (proces-flow 1 uden opløsningsstadie) og 1b (proces-flow 2 med opløsningsstadie).

Analyseintervallet og det krævede interval for værdien af gastest (RPT Reduced Pressure Test) af Legering 2 ses i tabel 2. Fe-koncentrationen, som max. må være 0,6 %, (i henhold til anvendelse inden for automobilindustrien) lå mellem 0,48 % og 0,52 %. Dette er vigtigt eftersom Fe-koncentrationen i begge legeringer danner faserne: β -Al₅FeSi, α -Al₈Fe₂Si, α -Al₁₂Fe₃Si₂, α -Al₁₅(Fe,Cr,Mn)₃Si₂, og δ -Al₄FeSi₆.

Ved et tiltagende indhold fra aluminiumslegeringens restindhold af Fe til det maksimalt tilladelige på 60 %, vil væksten af β -Al₅FeSi fasen og α -Al₁₅(Fe,Cr,Mn)₃Si₂ som volumenandel vokse eksponentielt. Eftersom der er et vidt spænd i koncentrationen af Fe i prøvestøbningerne, vil en sammenligning af resultaterne af de opnåede mekaniske egenskaber ved varmebehandlingen udvise en forøget spredning. For at undgå denne komplikation, som kunne gøre konklusionen af denne undersøgelse mindre signifikant, blev Fe-indholdet begrænset til mellem 0,48-0,52 %.

Som nævnt blev Sr-indholdet tilsat til mellem 140 og 170 ppm, og der blev brugt 10 % Sr-forlegering i stænger. Sr-tilsætningen blev foretaget af 2 grunde: (1) Sr ændrer Simorfologien fra plader til fiberagtig struktur og (2) det

Tabel 1. Nominel analysesammensætning af legering 1 og 2

Alloy		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
Alloy 1	Max	8.0	0.4	3.8	0.3	0.50	0.30	1.0	0.25
	Min	6.5	-	2.2	0.2	0.05	-	-	-
Alloy 2	Max	9.0	0.6	3.0	0.4	0.3	0.05	0.7	0.2
	Min	8.0	-	2.6	-	-	-	-	-

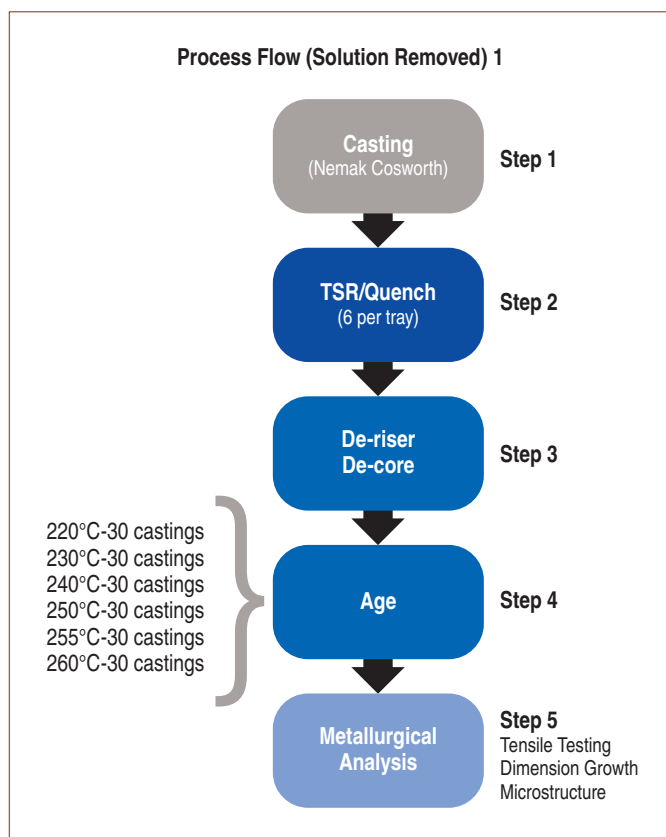


Fig. 1a. Procesforløb for støbning af forsøgsemner. Ingen sekundær opløsningsglødning foretaget. 180 emner produceret. (Forsøg 1 til 6).

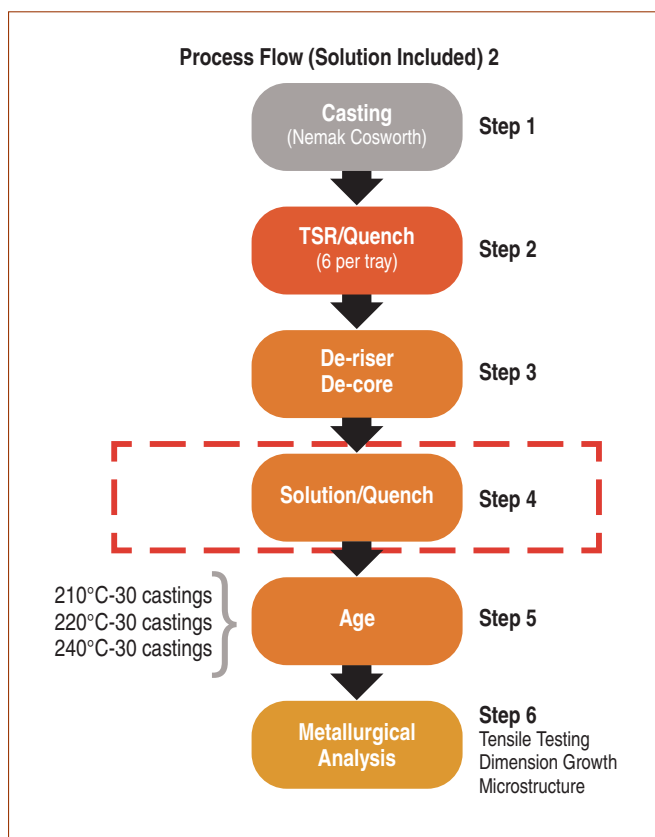


Fig. 1b. Procesforløb for støbning af forsøgsemner. En sekundær opløsningsglødning er foretaget. 120 emner produceret. (Forsøg 7 til 9; 7,5 h opløsningsglødning; Forsøg 10; 4,5 h opløsningsglødning)

Tabel 2. Kemisk analyse af legering 2, brugt til støbning af forsøgsemner. RPT (test for gasindhold) 2,70 – 2,72 g/cm³.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	Ni
8.54	0.48	2.88	0.40	0.33	0.43	0.11	0.0144	0.11
8.64	0.52	2.91	0.43	0.35	0.44	0.14	0.0158	0.12

undertrykker dannelsen af makrolunker, som kan resultere i problemer med tryktæthed.

Til denne undersøgelse blev der produceret 390 stykker prøvegods med Newmark-Cosworth processen. Der blev anvendt 31.200 lbs/14.000 kg af legering nr. 2.

Før fjernelse af indløb på prøvegods blev sandet fjernet ved termisk behandling i en TSR-ovn (Thermal Sand Removal) ved 485 ± 5 °C / 905 ± 9 °F. Ovnens gennemløbstid var 6,5 h. De første 2,5 h fandt sted ved 485 °C (første opløsningsproces) fulgt af en forceret bratkøling med 85 °C/min ved hjælp af kold luft. Efter fjernelse af sand og indløb blev godset, i procesforløb 2 (fig1b), underkastet enten en 4,5 h eller 7,5 h opløsningsopvarmning også ved 485 ± 5 °C (anden opløsningsproces) efterfulgt af en forceret bratkøling 90 °C/min med kold luft. Dette procestrin var udeladt i procesforløb 1.

Trin 4 – kunstig modning – blev udført i en kontinuert gennemløbsovn, ikke i en batch-ovn. Temperaturgradienten var under 3,5 °C for at sikre repeterbarhed. Totale gennemløbstid var 5,5 h.

Så snart det foreskrevne varmebehandlingsprogram var gennemført, udtoges af godset trækprøver.

Tabel 3 indeholder den fulde forsøgsinformation, der beskriver de specifikke detaljer om antallet af udførte støbninger for hver gruppe og de ved varmebehandlingen anvendte temperaturer.

RESULTATER FRA TRÆKPRØVNING

En trækprøve blev udtaget fra hvert af de 390 stykker gods. Mikrostrukturen af brudfladen på hver trækprøve er $\lambda_2 = 20.0 \pm 0,30$ µm og porøsitetsandelen var > 0,10 % max. (ved prøveantal n=20). Nemak Engineering Centre's Metallurgical Laboratory udførte alle trækprøverne på en

Tabel 3. Oversigt over forsøgsemner til undersøgelsen med detaljer for proces 1 og proces 2.

Heat Treat Trial	Number of casings (n)	TSR		Solution		Over Age	
		TSR Temp. (°C)	Duration (hrs.)	Sol Temp. (°C)	Duration (hrs.)	Age Temp. (°C)	Duration (hrs.)
PF 1 - Trial 1	30	485	2.5	NA	NA	220	5.5
PF 1 - Trial 2	30	485	2.5	NA	NA	230	5.5
PF 1 - Trial 3	30	485	2.5	NA	NA	240	5.5
PF 1 - Trial 4	30	485	2.5	NA	NA	250	5.5
PF 1 - Trial 5	30	485	2.5	NA	NA	255	5.5
PF 1 - Trail 6	30	485	2.5	NA	NA	260	5.5
PF 2 - Trail 7	30	485	2.5	485	7.5	210	5.5
PF 2 - Trial 8	30	485	2.5	485	7.5	220	5.5
PF 2 - Trial 9	30	485	2.5	485	7.5	240	5.5
PF 2 - Trial 10	30	485	2.5	485	4.5	240	5.5
PF 1 - Repeat of Trial 5	30	485	2.5	NA	NA	255	5.5
PF 2 - Repeat of Trial 9	30	485	2.5	485	7.5	240	5.5
TOTAL	390						

UTS (SFM-60) trækprøvemaskine ved en træk hastighed på 8×10^{-4} (mm/mm)/sekund. En strain gauge forlængelsesmåler blev monteret på testprøverne. Efter at testen var gennemført blev flydespænding (0,2 % forlængelse), trækstyrken (UTS) og den plastiske forlængelse målt efter retningslinierne i ASTM B 557.

RESULTATER FRA TESTEN AF DIMENSIONSSTABILITET

Afprøvning af dimensionsstabilitet udføres ofte for at fastlægge et stykke varmbehandlet gods' følsomhed over for vækst efter længere tids udsættelse for forhøjet temperatur. Denne afprøvning er kritisk da en motorblok kan blive udsat for temperaturer fra 170 °C til 190 °C og elmotorer så meget som 150 °C.

Prøverne til dimensionsstabilitet er udført som cylindre, der er 150 mm lange og med en diameter på 15 mm. Et koordinat præcisionsmåleudstyr (CMM) blev brugt til at kontrollere dimensionerne. Prøverne blev derefter varmebehandlet ved 200 °C i 100 h. Efter varmebehandlingen blev prøverne målt med det samme præcisionsmåleudstyr (CMM). Ændring i længden blev registreret som en procentsats. Der blev anvendt 15 prøver fra 15 forskellige emner. Der blev ikke udtaget flere prøve fra hvert enkelt stykke gods, fordi, hvis der var variationer i analysen, varmebehandlingen eller variationer i mikrostrukturen, kunne påvirkningen fra disse forvride gennemsnitsværdien brugt til fastlæggelse af en blivende dimensionsændring. Denne fremgangsmåde, med at måle endimensionel ændring på et prøveemne udtaget fra et enkelt stykke

støbegods, gør det nemmere at identificere "fejlskud" og frasortere dette i mængden af målinger ved beregning af gennemsnit og standardafvigelse. Værdierne nævnt i dette arbejde er gennemsnitsværdier med 3σ standardafvigelse.

RESULTATER

Resultaterne af de mekaniske afprøvninger fra forsøg 1-6 og fra 7-9, udført henholdsvis som i fig. 1a og 1b, blev afbilledet som gennemsnit af 30 prøver med tilhørende $\pm \sigma$ i fig. 2-4. Resultaterne fra dimensionsstabilitetsprøverne ses i fig. 5.

Figureerne 2-4 viser hver for sig flydespænding (0,2-spænding / YS), trækstyrken (UTS) og plastisk forlængelse (PE) for de 9 forskellige former for varmebehandling anvendt i forsøget. Der blev udregnet linier med bedste-fit og R2 værdier for begge procesforløb #1 og #2 (med og uden sekundær opløsning). R2-værdierne synes at ligge mellem 0,99 og 0,97 for YS og UTS indikerende en vældig godt fit. R2-værdierne i fig. 4 for PE er noget mere spredt nemlig fra 0,98 til 0,83. Dette kan forklares ved det faktum, at PE-værdier ligger lidt mere spredt end værdierne for YS og UTS

De røde og gule pile i fig 2 – 4 repræsenterer en ekstrapolation mellem de to bedste fit for proces 1 og 2. I fig. 4 går den røde pil fra forsøg 5 (proces 1) til forsøg 9 (proces 2). 30 nye støbninger blev produceres og varmebehandlet i henhold til Proces 2 – med undtagelse af, at opløsnings-

tiden blev sat til 4,5 h og udglødningen blev foretaget ved 240 °C (forsøg 10). Med reference til fig. 2, 3 og 4 ses det, at YS, UTS og PE i forsøg 10 ligger imellem plottene for processerne 1 og 2, hvilket bekræfter at en vertikal ekstrapolering skulle være mulig.

For yderligere at styrke antagelsen af, at denne fremgangsmåde med ekstrapolation er brugbar, blev resultaterne af måling af YS, UTS og PE den permanente dimensionsændring i forsøg 5 og 9 med hver sin varmebehandling anvendt. Fig. 5 illustrerer størrelserne af den permanente vækst for et stykke gods behandlet i henhold til proces 2 og derefter 100 timers ophold ved 200 °C (forsøg 9 - opløsningsglødet og kunstigt modnet ved 240 °C) og gentaget to gange med støbt gods fra proces 1 (forsøg 5 – ingen ekstern/ekstra opløsningsglødning og modnet ved 255 o C). Den resulterende vækst viste sig meget tæt på at være lige store – 0,033 % til 0,036 % plus 3σ.

En sidste test til at verificere ekstrapoleringsprocessen blev foretaget ved at gennemføre endnu 30 tests som forsøg 5 i henhold til proces 1 og andre 30 tests som forsøg 9 i henhold til proces 2 og så plottede de opnåede mekaniske afprøvningsdata med 3σ intervaller. Fig. 6a, b, og c viser en rimelig konsistens med observationerne vist i fig. 2, 3 og 4.

DISKUSSION/VALIDERING

Processen beskrevet i denne undersøgelse har til hensigt at vise at det er muligt med signifikans at afkorte den nødvendige termiske efterbehandling af sandstøbt Cu-holdige Al-Si gods. Dette vil blive mere og mere vigtigt for den nordamerikanske støberiindustri muligheder så den kan konkurrere med oversøiske leverandører med hensyn til pris og leveringstid og samtidig ved hjælp af det leverede støbegods understøtte kundernes behov i implementeringen af deres CO₂ – reduktionsprogram.

Ved, efter en TSR-proces (Thermal Sand Removal) og T7 behandling, at udelade opløsningsprocessen i T7-behandlingen, kan man opnå de samme mekaniske egenskaber og permanente dimensionsændringer ved blot at justere modningstemperaturen.

Ud fra kurverne på fig. 3, 4 og 5 og ved at bruge ekstrapolationsmetoden, kan brugere nemmere bestemme hvad en ny ældningstemperatur skal være, hvis tiden for den totale opløsningsproces reduceres fra 10 timer til 2,5 timer.

Dette vil virke for andre Al-Si-Cu legeringer, men vil sandsynligvis ikke virke på andre legeringer i 3XX-serien.

Denne og tidligere undersøgelser har vist at de eneste ændringer i mikrostrukturen for 319-legeringer under opløsningsfasen er udviskning af sejgring i dendritterne, en gradvis forøgelse af Cu-indholdet i dendritterne, en brat reduktion i antallet af dislokationer samt en mindre reduktion af Al₂Cu andelen i det interdendritiske metal-fase. Mens tidligere undersøgelser indikerer, at dette spe-

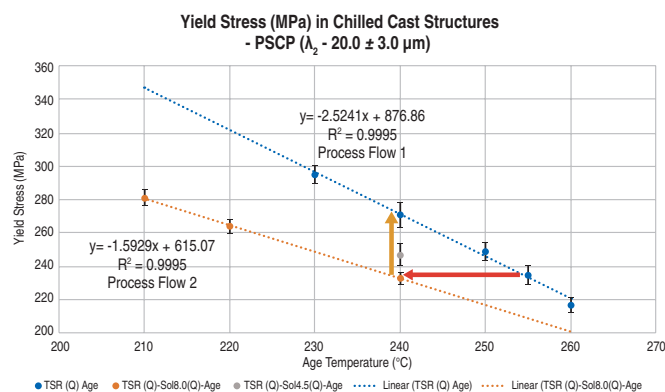


Fig. 2. Plot af flydespænding (YS) målt efter 8 forskellige varmebehandlinger. Hvert målepunkt er en gennemsnitssværdi med angivelse af tilhørende standard afvigelse.

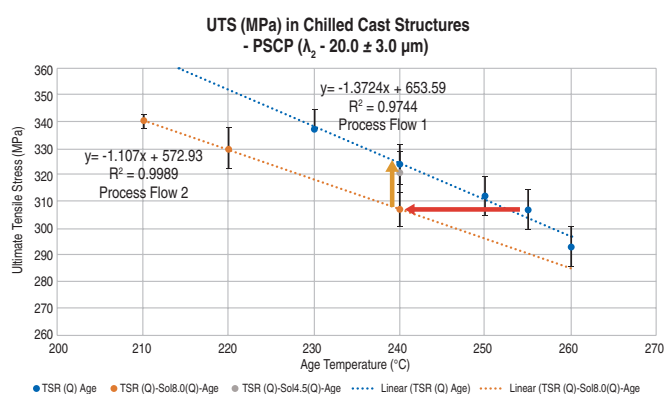


Fig. 3. Plot af trækstyrken (UTS) målt efter 8 forskellige varmebehandlinger. Hvert målepunkt er en gennemsnitssværdi med angivelse af tilhørende standard afvigelse.

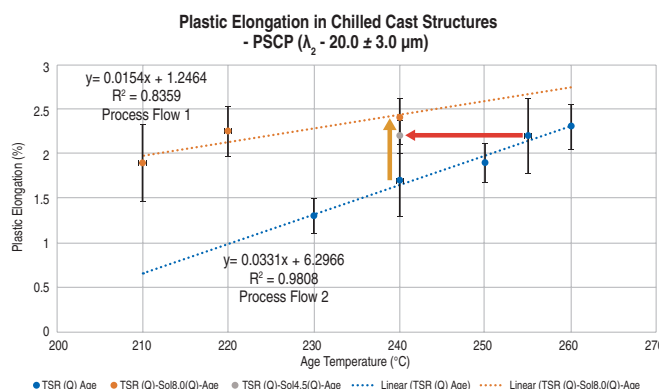


Fig. 4. Plot af plastisk forlængelse (PE) målt efter 8 forskellige varmebehandlinger. Hvert målepunkt er en gennemsnitssværdi med angivelse af tilhørende standard afvigelse.

cifikt kun finder sted for legering 2, så eksisterer der en sammenhæng mellem størrelsen af disse ændringer og en øget varighed af opløsningsfasen. Et vægtigt argument er sammenligningen af forsøgsstøbningerne, der kun blev underkastet 2,5 timers opløsningsbehandling under TSR-fasen, med dem der fik 2,5 timers TSR + yderligere 7,5 timers opløsning totalt 10 timer. En forøgelse af mod-

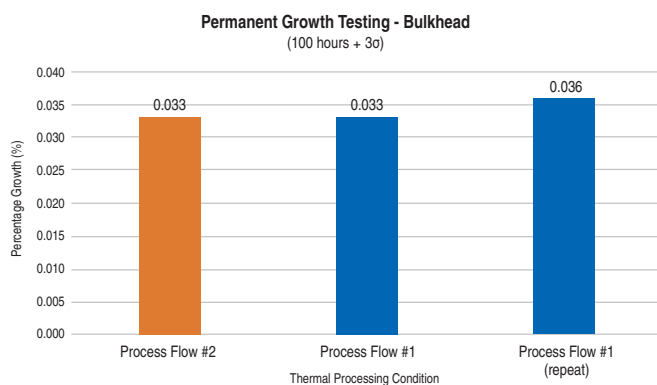


Fig. 5. Værdierne af den permanente volumenforøgelse ved T7 behandling (modning 240 °C) og den tilsvarende behandling (modning 240 °C) uden opløsningsglødning.

ningstemperaturen for en opløsningstid på 2,5 timer vil kunne give samme resultat på en prøve med en 10 timers opløsning og en lavere modningstid.

Det antages at prøverne med 10 timers opløsningstid vil have mere Cu opløst og en lavere dislokationstæthed i σ -Al dendritcellerne end de øvrige prøver med 2,5 timers opløsning under TSR-processen. Sejgring er af mindre betydning, eftersom tidligere undersøgelser har vist at den udlignes inden for de første 30 minutter af opløsningsfasen.

Med ekstrapolationen vist på fig. 2, 3, og 4 var konklusionen, at ved brug af kun 2,5 timer til opløsning krævedes en modningstemperatur på 255°C for at få samme dimensionsændring og mekaniske egenskaber som forsøgstøbningerne, der blev opløsningsglødet i 10 timer og påfølgende modnet ved 240°C (modningstiden var i alle tilfælde 5,5 timer og der blev brugt den samme ovn). Brugen af en højere modningstemperatur i proces 1 til at opnå de samme egenskaber som i proces 2, medfører, at lavere Cu-indhold i dendritterne og sandsynligvis den lavere dislokationstæthed betyder, at hvis proces 1 brugte 240°C som modningstemperatur i stedet for 255°C, så ville flydespændingen (YS) stige fra 238 Mpa til 275 Mpa (fig. 2), men forlængelsen falde fra 2% til 1,5% (fig. 4). Dette indikerer i tilfældet med proces 1, at materialet muligvis er tæt på maximal modningshårdhed, og for at opnå nøjagtig de samme overmodnede mekaniske egenskaber og dimensionelle stabilitet, må man anvende temperaturen 255 °C for at opnå den samme grad af overmoden tilstand i godset. I materialet, som havde fået 10 timers opløsning, vil der forekomme en samvirkende effekt af den mindre mængde af uopløst Al₂Cu-krystaller og eutektiske faser i det interdendritiske materiale. Dette forudsætter imidlertid, at små ændringer i mængden af Al₂Cu vil være af mindre betydning sammenlignet med virkningen af fjernelsen af sejgring, Cu-indholdet i dendritterne samt de krystallografiske defekter.

Væksten af prøverne for dimensionsstabilitet fra proces

1 (forsøg 5; 2,5 timers opløsning og modning ved 255 °C) og proces 2 (forsøg 9; 10 timers opløsning og modning ved 240 °C) må nærmest betegnes som værende den samme, indikerende at potentialet i videre modning og medfølgende permanent vækst vil være ens eftersom de begge næsten udviste samme maximale hårdhed. Garantikonsekvenser

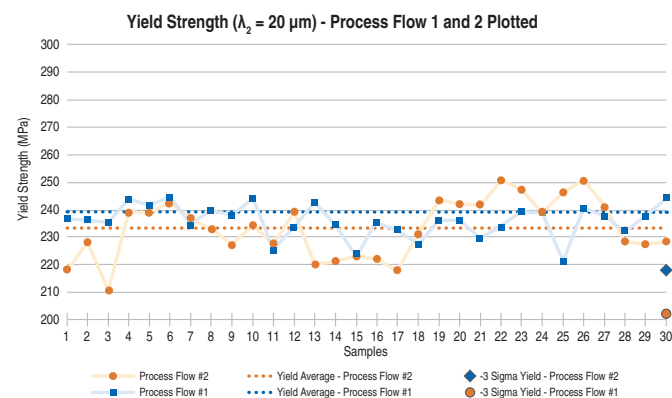


Fig. 6a. Plot af værdierne af flydespændingen (YS) af de 30 forsøg "repeat of trial 5" og "repeat of trial 9" jvf. tabel 3.

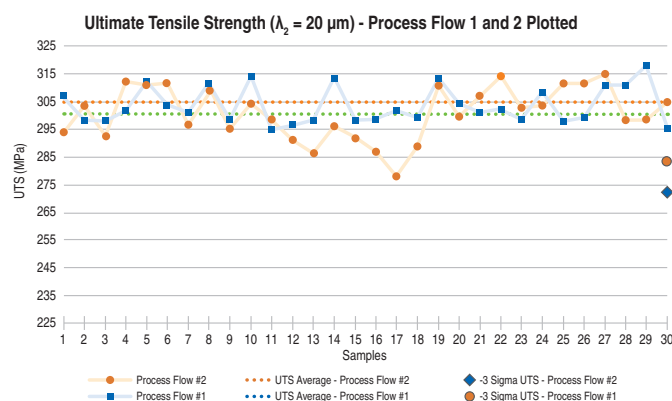


Fig. 6b. Plot af værdierne af trækstyrken (UTS) af de 30 forsøg "repeat of trial 5" og "repeat of trial 9" jvf. tabel 3.

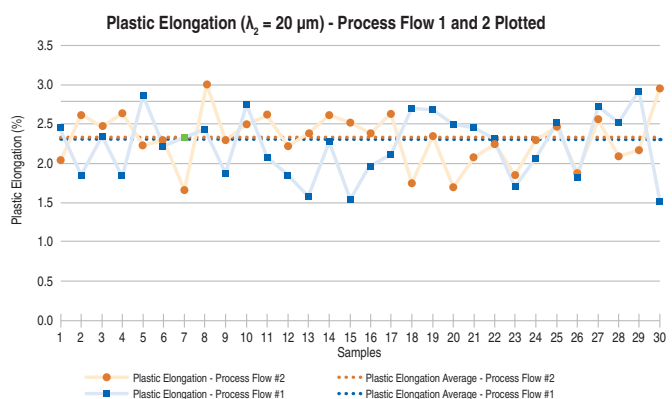


Fig. 6c. Plot af værdierne af plastisk forlængelse af de 30 forsøg "repeat of trial 5" og "repeat of trial 9" jvf. tabel 3.

En kunde indenfor automobilindustrien vil stille krav til, at varmebehandlingen optimeres, så der ikke kan forekomme variationer i en komponents mål, form, og funktionsduelighed. Garantiforpligtigelserne i forbindelse med et fejlbehæftet e-motorhus eller en motorblok er betydelige. Sådanne motorkomponenter kan ikke udskiftes uden at resten af motoren berøres. Regningen for fuld udskiftning af en motor kan løbe op i 7.000 – 12.000\$. Følgende er eksempler på garantikrav som følge af forkert varmebehandling.

1. Ændring i sejghed og flydespænding medfører at tendensen til gratdannelse ændres, hvilket igen kan afføde bekymring for at spåner kan kile sig fast i godsets hulheder og til sidst ende op i konstruktionen. Dette problem forstærkes, hvis godset har to eller tre leverandører og derfor må en kontrolfunktion implementeres (højere omkostninger til kvalitetskontrol) for at tage højde for forskellige tendenser til gratdannelse ved bearbejdning på grund af leverandørernes forskellige optimering af varmebehandlingen.

2. Flydespændingen (designparameter), trækstyrken og den plastiske deformation er størrelser der anvendes i spændingsmodellering til fastlæggelse af sikkerhedsfak-

torer, som skal tage højde for potentielle svagheder i støbegodset enten under drift eller i tilfælde af en kollision med køretøjet. Som vist tidligere af forfatterne vil ændring af materialets plastiske deformationsgrænse betyde at disse potentielle svagheder bliver følsomme for brud.

3. Hvis den permanente vækst i materialet efter en optimeret varmebehandling er forskellig fra den oprindelige vækst, kan dette føre til et farligt havari, hvis godset er en del af et motorkøretøj. Dette vil medføre garantikrav. En sådan fejl vil ikke blive bemærket ved samlebåndet, da en belastet brug af køretøjet ikke vil forekomme før det har kørt adskillige kilometer.

Resultatet skitseret i denne artikel viser, at man ved at udvikle grafiske afbildninger af mekaniske egenskaber, kan procesoptimere, så den samme kvalitet af støbegodset kan bibeholde, men til en lavere omkostning, hurtigere produktion og en reduktion i CO₂-aftryk.

Artiklen er bragt i *Modern Casting* February 2024. Den er gengivet med venlig tilladelse af American Foundry Society.

Oversættelse: Knud Bryndum

.....