

Udvikling af og støbeegenskaber hos højtlegeret cerium-aluminium-legeringer

I et pilotprojekt er aluminium/cerium systemet blevet undersøgt med hensyn til legeringernes formodede gode mekaniske egenskaber ved høje temperaturer.

Forfatter: David Weiss, Eck Industries Inc. (Manitowoc, Wisconsin, USA).

Eutektiske aluminium-cerium legeringer (Al-Ce) har gode mekaniske egenskaber ved høje temperaturer og de har tilmed gode støbeegenskaber. Deres støbeegenskaber er lige så gode eller bedre end siliciumlegerede dog forringes de noget, når der tillegeres yderligere elementer. De almindelige Al-legeringer som indeholder Si, Mg og/eller Cu og som tillegeres Ce har bedre støbeegenskaber end Al-Cu legeringerne.

De traditionelle legeringselementer i aluminium tilsættes hovedsagelig for at forbedre de mekaniske egenskaber ved stuetemperatur. Ce stabiliserer disse egenskaber ved forhøjede temperaturer (200-400 gr C.). Den primære intermetalliske forbindelse, der dannes i den Aluminium rige del af tilstandsdiagrammet er Al₁₁Ce₃.

Typiske mikrostrukturer af en eutektisk Al-Ce fase ses på fig. 1 og 2. Mikrostrukturen i støbt tilstand viser et fint sammenhængende eutektikum imellem korn af ren aluminiumfase. Afstanden mellem lamellerne kan blive så lille som 100nm og udviser ingen fremherskende retning ved almindelig afkølingshastighed. Disse strukturer er stabile ved forhøjede temperaturer. De intermetalliske faser bevares og fastholdes i strukturen på grund af ceriums uopløselighed i aluminiummatrik-

sen. Dette at Ce er fastholdt i de intermetalliske faser forhindrer systemet i at mindske sin overfladeenergi ved diffusion og dermed på sædvanlig vis at forgrove matriksstrukturen.

Ideen med at anvende Ce som et primært legeringselement i området nær eutektisk sammensætning er ikke ny. Man har undersøgt virkningen af op til 4% Ce-tilsætning på størkningsinterval, volumenændringer under størkning og mikrostrukturen i Al-4,5% Cu legeringer. Mikrostrukturen og de mekaniske egenskaber er også blevet undersøgt i Al- 8%Ni legeringer med 16% Ce.

En undersøgelse skulle afsløre

om standard støberiprocesser kunne anvendes uden modifikationer på støbning af en Al-10Mg-8Ce legering. Resultatet var at normale nedsmeltning- og afgasningsprocedurer for Al-Si og Al-Cu kunne anvendes uden modifikationer ved støbning af Al-Ce legeringer. En pris på ca. 10 US\$ pr kg Ce vil ikke være prohibitiv for anvendelsen af Ce som legeringselement.

Støbeforsøg.

Tidligere udførte undersøgelser på Al-Ce- legeringer produceret ved pulversintring og varmsmedning viste lovende styrkeforhold ved

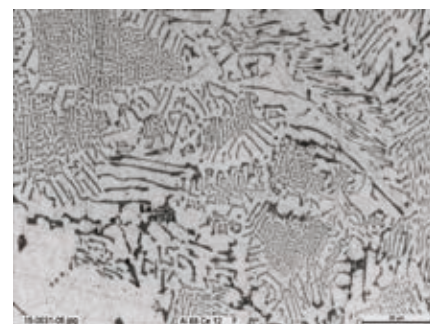
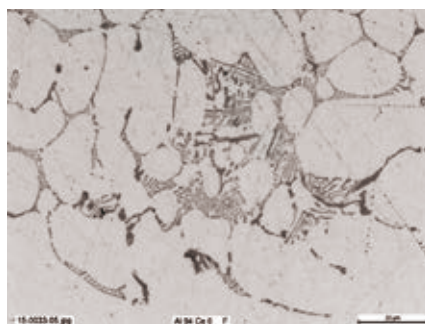


Fig. 1-2: Det venstre foto viser mikrostrukturen som støbt af en Al-Ce6 legering, og det højre mikrostrukturen som støbt af en Al-Ce12 legering.

Tabel 1: Sammensætningen for udgangslegeringen for Al-Ce testlegeringerne.

	Si	Fe	Total Others	Aluminum Remainder
P1520	0.11	0.17	0.09	

høje temperaturer op til 343 gr. C. Støbeegenskaberne af disse legeringer er ukendte. En gennemgang af fasediagrammet indikerer ved ca. 10% Ce en lovende eutektisk sammensætning til støbning. Fi. 3 viser det beregnede to-fase fasediagram for Al-Ce systemet.

For at afprøve støbeegenskaberne for Al-Ce legeringer gennemførtes nogle foreløbige støbninger i en kokille til støbning af ASTM B108 prøvelegemer. Legeringen blev smeltet i 25 kg batches med metalsammensætninger vist i tabel 1. Metallet blev ikke afgasset og blev ved 750 gr. C hældt i en 400 gr. C forvarmet form.

Støbning af 750 gr. varme Al-Si-legeringer med 5% Si eller mere, som f.eks. A356 (AlSi5Cu1,2Mg0,5) eller A355 (AlSi5Mg0,5), i 400 gr. varme forme giver uden vanskeligheder gode prøvestænger. Støbning af prøvestænger i metal med lavere Si kræver varmere metal eller varmere form.

Støbeforsøgene viste, at op til 10% Ce blev prøvestængerne fuldstøbte og kvalitetsmæssigt på højde med stænger støbt i 5% Si-legeringer. Med 12% Ce aftog evnen til fuldstøbning, hvorfor temperaturen blev hævet til 775 gr. C for at opnå fuldstøbning.

Fig. 4 illustrerer, at med 16% Ce kunne fuldstøbning ikke opnås selv om temperaturene var øget til 425 gr C og 775 gr C for henholdsvis form og metal. Pilen indikerer metalhøjden i indløbet, som normalt er fyldt til toppen af formen – samme metalhøjde skulle også have i stigtappen.

Tabel 2: Mekaniske egenskaber (Mpa) for binær Al-Ce i "som støbt" tilstand

	Tensile, As Cast	Yield, As Cast	%E, As Cast
Al-16Ce	144	68	2.5
Al-12Ce	163	58	13.5
Al-10Ce	152	Test Error	8
Al- 8Ce	148	Test Error	19
Al- 6Ce	103	30	25

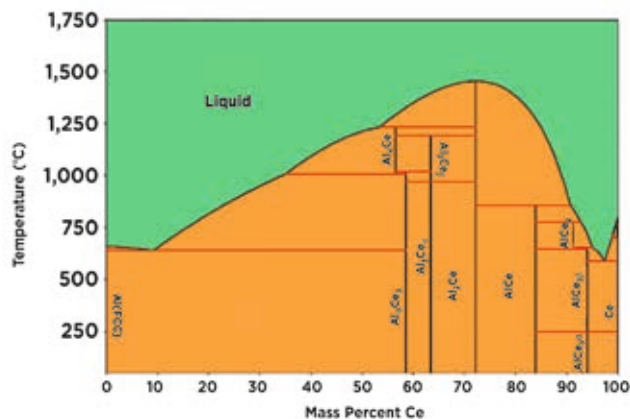


Fig 3: Det binære Al-Ce fasediagram.

Grunden hertil er den hastigt stigende smeltetemperatur for legeringer med Ce-indhold over det eutektiske. Ingen af prøvestængerne viste tegn på varmvævner.

En anden forsøgsrunde blev gennemført med samme materiale og samme metalbehandling, men denne gang udstøbt i en trinform og en form til bestemmelse af tilbøjelighed til varmvævner (Fig. 5-6). Støbeligheden af de undersøgte legeringer synes alt i alt at være på linie med de tilgængelige kommercielle legeringer. Til sammenligning blev der også støbt A206 (AlCu4,5) i Trinform og varmvævnsform. Sammenligningen viste at gods i A206-legeringen udviste større og mere udtalte makroskopiske defekter end det gods støbt i tilsvarende Ce-legering.

Eftersom støbeegenskaberne i den binære legering acceptable udstøbtes et kompliceret cylinderhoved i en 8% binær legering. Godset blev undersøgt for varmvævner og andre defekter. Ud over et par små koldtløbninger, som skyldtes en for lidt for lav støbetemperatur i forhold til den som anvendtes normalt, kunne godset godkendes.

Alt i alt udviste Al-Ce legeringerne gode til udmærkede støbeegenskaber. Dog de mekaniske egenskaber ved stuetemperatur var ikke gode nok til mange kommercielle anvendelser ligesom legeringerne ikke udviste nogen forbedringer ved varmebehandling. Trækstyrken øgedes generelt med øget Ce-indhold op til den eutektiske sammensætning. Flydespændingen øgedes også med stigende Ce-indhold i alle de testede legeringer.

Forlængelsesmåleren gled under måling af 8% og 10% legeringerne med fejlmåling til resultat (tabel 2).

Med udgangspunkt i 8% Ce-legering blev der fremstillet yderligere 20 legeringer med forskellige tilsætninger af silicium, magnesium, kobber, zink, nikkel, titan, mangan eller jern. 8% legeringen blev valgt af økonomiske grunde, selvom højere Ce-indhold ville have givet bedre mekaniske egenskaber. Undtagen for magnesium så gjaldt det, at tillegeringer af disse elementer i mængder over 1% reducerede formfyldningsevnen, men mange af dem havde forbedrede mekaniske egenskaber. For de ternære Al-Ce-Mg legeringer øgedes flydespændingen med stigende Mg-indhold uden



Fig 4: 16% Ce-legering; Formen til trækprøvestøbning blev ikke fuldstøbt.

at støbegenskaberne forringedes. Dette gjaldt op til 10% Mg. De mekaniske egenskaber for 3 af disse legeringer er vist i tabel 3. Egenskaberne blev ved 260 gr C blev målt efter 30 min. stabilisering ved temperaturen. Dataene i tabel 2 og 3 er gennemsnitsværdier af 6 prøvestænger. Den maksimale standardafvigelse for træk- og flydespændinger var 4,4 Mpa. Forlængelserne blev afrundet til nærmeste hele procent, og ingen enkeltværdier afveg med mere end +/- 0,4% af de rapporterede værdier.

Et foreløbigt arbejde blev sat igang for at undersøge udviklingen af de mekaniske egenskaber efter udsættelse for forhøjet temperatur i længere tid. Efter at have været varmebehandlet ved 260 gr c i 336 timer blev der udført trækprøver ved stuetemperatur. Legering Al-Ce8-Mg10-F udviste en flydespænding på 144 Mpa, hvilket er 33% højere end den tilsvarende for Leg 354.0-T61 (leg. 354 har 9% Si og 1,5% Cu og 0,5Mg) efter 100 timers varmebehandling. Denne flydespænding efter 30 minutters varmebehandling er højere end den vist i tabel 3, hvilket indikerer nogen positiv effekt af langtids varmebehandling.

Pilotfremstilling.

Eftersom Al-Ce-Mg legeringerne har god støbelighed og gode mekaniske egenskaber blev det besluttet at gennemføre et pilotforsøg

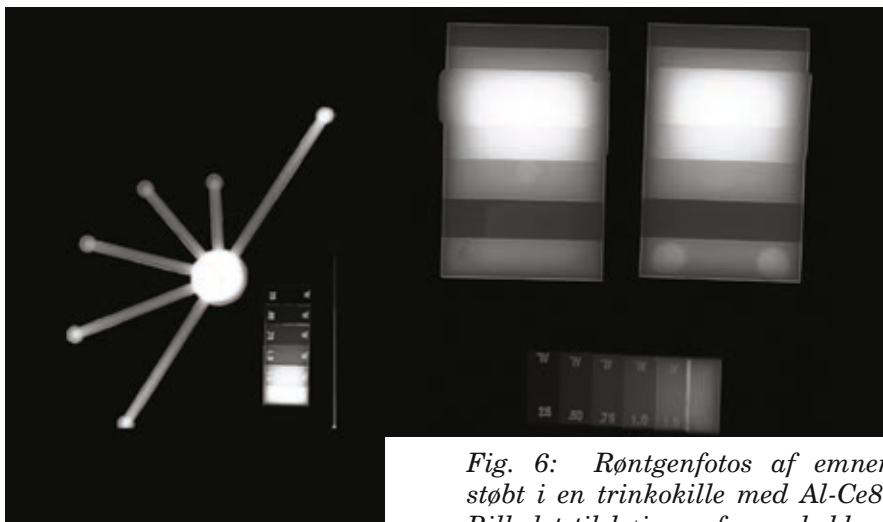


Fig. 5: Røntgenbilleder af gods med varmvæner støbt i Al-Ce8.



Fig. 7: Et velstøbt cylinderhoved i en 8% Ce binær legering.

Fig. 6: Røntgenfotos af emner støbt i en trinkokille med Al-Ce8. Billedet til højre er fra en kobberkokille.

med en batch på 320 kg Al-Mg10-Ce8. Som udgangslegering brugtas A535 med en sammensætning som vist i tabel 4.

Der blev støbt mange emner med forme og modeller normalt anvendt til kommercielle produkter i legeringer af 200 (Al-Cu) og 300 (Al-Si-Cu) serierne (fig. 9 og 10). Indløbsforholdene blev ikke ændret før støbning af Ce-legeringerne. Kvaliteten af emnerne var acceptabel og på linie med dem støbt i de normale produktionslegeringer. Der blev fremstillet trækstænger af det normale produktionsmetal, som blev afprøvet for at se om dette svarede kvalitetsmæssigt til forsøgs materialet fremstillet i de mindre batcher. Trækspændingen af produktionsmaterialet var 3,5% større



Fig. 9: Topstykker støbt i grønsand med en Al-Ce-Mg legering



Fig. 10: Eksperimentel rotor-motor støbt i kemisk bundet sandform med en Al-Ce-Mg legering.

end trækspændingen for de tidligere forsøgsmelter, som kun blev smeltet under argon og med flussdække, men som ikke blev afgasset. Optisk mikroskopi ved 50x forstørrelse afslørede at det afgassede materiale havde et mindre oxydindhold end de tidligere forsøgsmelter. Der blev fremstillet 20 trækstænger ialt af legeringen fra pilotprojektet, som alle blev testet ved stuetemperatur. Som gennemsnitsværdier fandtes 235 Mpa for trækspænding og 192 Mpa for flydespænding samt 1% forlængelse.

Senere blev 250 kg legering holdt i diglen i 17 timer ved 750 gr. C. Mg-indholdet blev checket til 9,78% svarende til en reduktion på 3,1%. Dette smeltetab er mindre end forventet temperatur, tid og manglende beskyttelsesatmosfære taget i betragtning. Årsagen til denne bemærkelsesværdige Mg-stabilitet undersøges.

Økonomiske overvejelser.

Cerium er det hyppigst forekommende metal inden for gruppen de sjældne jordarter. Med en pris på ca. 65 kr pr. kg vil anvendelsen af Ce som legeringselement være inden for økonomisk rækkevidde ved en stor serieproduktion. Den færdigt legerede Ce-legering vil være konkurrencedygtig sammenlignet

Tabel 3: Mekaniske egenskaber (MPa) for tenære Al-Ce-Mg testlegeringe

Tensile	Yield	%E	Tensile			%E		
			260°C			260°C		
Al-8Ce-4Mg	189	107	3	No Test	No Test	No Test	No Test	No Test
Al-8Ce-7Mg	195	151	2	134	121	4		
Al-8Ce-10Mg	227	186	1	137	130	4		

Tabel 4: Sammensætning af udgangsmaterialet (A535) førtilsætning af Ce og Mg.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti
535	0.098	0.091	0.041	0.159	6.85	0.016

med andre højtydende Al-legeringer. En grafisk prissammenligning ses i fig. 11. Der er blevet støbt adskillige prøveemner og kompliceret gods med legeringer fra Al-Ce-systemet. Alle data og al erfaringer indtil dato indikerer at Al-Ce eller Al-Ce-Mg har støbeegenskaber svarende til 300 serien. Andre legeringstilsætninger forringede støbeligheden, men udviser til gengæld tegn på forbedringer med hensyn til andre ønskede materialeparametre. Anvendelsen af produktionsudstyr gav bedre mekaniske egenskaber af metallet end de der fandtes hos tidlige smelter. Dette skyldtes en mere effektiv fjernelse af oxyder og opløst brint. Den uventede tilsyneladende reducerede opløselighed af brint og stabiliseringen af Mg-indholdet i Al-Ce-Mg hidrørende fra Ce skal videre undersøges.

Artiklen er bragt i *Modern Casting* December 2017. Den er gengivet med venlig tilladelse af *American Foundry Society*. Oversættelse: Knud Bryndum

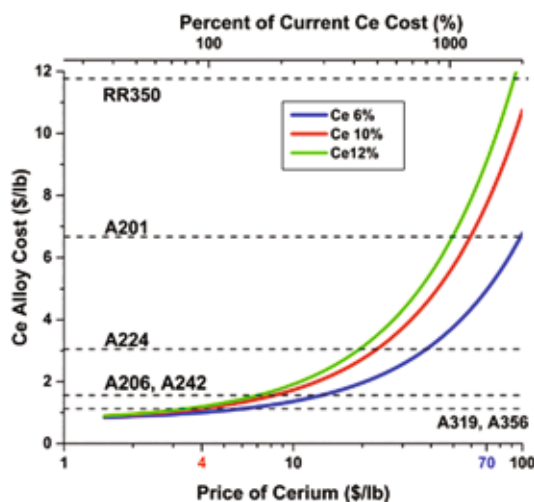


Fig. 11: Prisen for præfabrikeret Al-Ce legering er konkurrencedygtig sammenlignet med andre højtydende Al-legeringer, som vist her.