

Varmebehandling af Aluminiumbronze med fokus på Nikkel-Aluminiumbronze.
DS/EN 1982:2008 (E) CC333G

Af
Uffe Andersen
Frese Metal- & Stålstøberi A/S
Indlæg ved FMV's årsmøde den 27. januar 2011

1.0 Indledning

Aluminiumbronze er betegnelsen for kobberlegeringer med varierende indhold af aluminium, nikkel, jern og mangan.

CC333G er den mest almindelige støbelegering som anvendes til offshore applikationer, hvor der er krav om god styrke og gode korrosionsegenskaber i forbindelse med havvand.

Legeringen har styrker og forlængelser som stål. Den kan varmebehandles for at opnå specifikke egenskaber herunder for at forbedre korrosionsegenskaberne.

Årsager til at der varmebehandles vil derfor typisk være for

- at fjerne spændinger
- at forbedre duktilitet
- at justere hårdhed, trækstyrke eller flydespænding
- at forbedre korrosionsegenskaber
- at forbedre slidegenskaber
- at reducere magnetisk permeabilitet

Varmebehandlingstyperne er de samme som kendes for stål:

- Udglødning
- Normalisering
- Bratkøling
- Hærdning eller termalhærdning

I det efterfølgende vil de forskellige metoder blive nærmere belyst, og hvad det specifikt er for mekanismer der ændres på i forbindelse med nogle de forskellige varmebehandlingsmetoder.

2.0 Aluminiumbronze og dets legeringselementer.

Aluminiumbronze er en fællesbetegnelse for en række kobber- aluminiumslegeringer med op til 14 % aluminium. Desuden indeholder kommercielle legeringer varierende mængde og indhold af andre legeringselementer, hvoraf de vigtigste er jern, nikkel, mangan og silicium. Hvilke legeringselementer der er tilsat og i hvilke mængder, afhænger af de egenskaber der skal fremmes.

2.1 Typiske egenskaber der kan opnås med Aluminiumbronzer

En lang række egenskaber ved Aluminiumbronze gør legeringerne anvendelige til en række formål i varierende omgivelser og miljøer.

- Høj mekaniske egenskaber, styrke, flydespænding og forlængelse. Nogle Aluminiumbronzelegeringer har egenskaber der er sammenlignelige med ståls.
- Exceptionelle korrosionsegenskaber i en række korrosive miljøer for visse Aluminiumbronzelegeringer – det gælder ikke alle, derfor er det vigtigt at vælge de legeringer der har de rette egenskaber.
- Gode egenskaber over for kavitationserosion på skibspropeller og løbehjul i pumper.
- God støbebarhed ved de almindelig kendte støbeprocesser, dvs. sandstøbning, centrifugalstøbning, kokillestøbning, præcisionsstøbning og strengstøbning.
- Høj grad af tryktæthed, hvis støbegodset er fejlfrit, idet et lille størkningsinterval kan fremme stor tæthed i mikro strukturen.
- Nogle legeringer er meget duktile og smedelige, og derfor velegnet til kold- eller varmforbejdning til plader, strips, stænger, wire og ekstruderede profiler
- Udpræget svejsbare – produkter kan repareres eller kombineres ved anvendelse af forskellige processer, eks. støbning af knudepunkter som sammenføjes med ekstruderede profiler.
- God bearbejdighed, – væsentligt bedre end rustfrit stål, og derfor billiger at bearbejde.
- Gode chok- og støddæmpningsegenskaber, - eftertragtet egenskab i motorer, skibe, broer og jernbaneapplikationer, dobbelt så gode som for stål.
- Gode udmattelsesegenskaber, - eftertragtet egenskab til skibspropeller og løbehjul
- Anvendelig til applikationer ved forhøjede temperaturer op til 400⁰ C, hvor en stor del af de mekaniske egenskaber bibeholdes ved sammenligning med andre kobberlegeringer.
- Anvendelige til applikationer ved lave temperaturer ned til – 40⁰ C, som gør nogle af legeringerne særdeles anvendelige til formål på olieplatforme og skibe, der opererer i arktiske områder.
- Gode egenskaber over for slidpåvirkninger som kendes i gear og legebøsninger, der arbejder ved lave hastigheder samt over for strømmende væsker ved relativt høje hastigheder.
- Lav magnetisk permeabilitet – især Cu-Al-Si- legeringerne
- Gnistfrit, og kan derfor anvendes til Non-Sparking Tools, - særdeles anvendelige til sikkerhedsværktøj og håndtering af eksplosiver.
- Smuk udstråling – anvendelig til ornamentale formål Verdens største Buddha figur skulle have været udført i Aluminiumbronz.

2.2 Effekt af legeringsselementerne.

For at være på det rene med de forskellige legeringernes egenskaber, og hvorledes de kan påvirkes i en bestemt retning, er det nødvendigt at forstå de enkelte legeringsselementers påvirkninger af egenskaberne samt kombinationen af den samtidig tilstedeværelse af andre legeringsselementer. En detaljeret beskrivelse af dette, rækker ud over indholdet i dette oplæg om varmebehandling, her vil derfor kun blive redegjort for nogle af de væsentligste.

2.2.1 Aluminium

Aluminium har markant indflydelse på de mekaniske egenskaber og på korrosionsegenskaberne, derfor er det ikke usædvanligt at specificere grænser for Aluminiumsindholdet i legeringen inden

for +/- 0,1 til +/-0,2 % . En styring af Al-indholdet kan i mange tilfælde betyde, at varmebehandling helt kan undgås. Fig. 2.2.1.1

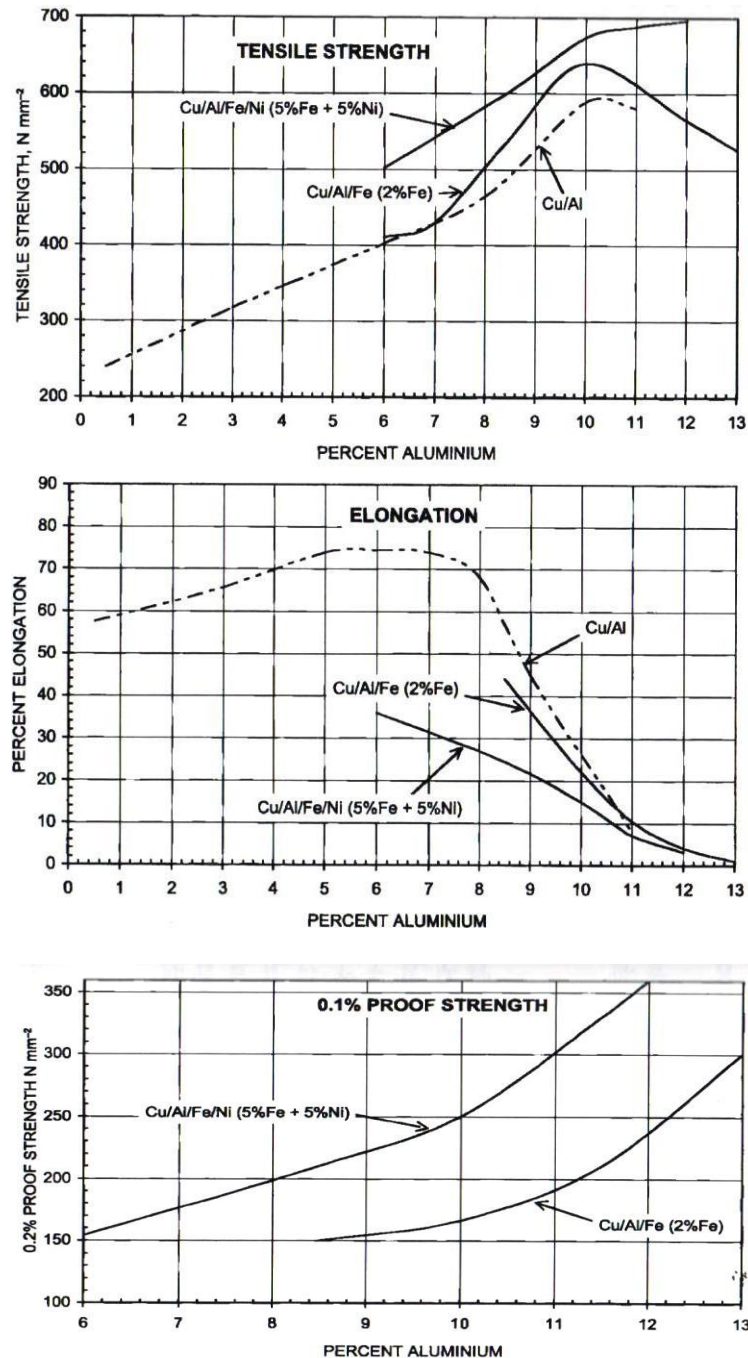


Fig. 2.2.1.1 Sammenhængen mellem mekaniske egenskaber og aluminiumsindhold i tre Aluminiumbronzlegeringer.

Det fremgår af figurene, at en binær legering bestående af Cu og Al med ca. 7 % Al har forlængelser på op til 75 % og styrke på ca. 400 N/mm². Øges Al-indholdet yderligere falder duktiliteten og ved 14 %, bliver legeringen sprød. Styrken stiger op til omkring 10 % Al, hvorefter den også aftager. Derfor er legeringer med over 14 % Al ikke relevante til konstruktionsformål. Korrosionsegenskaberne stiger i de binære legeringer med stigende Al indhold op til 8,2 % Al. Korrosionsegenskaberne skyldes at der dannes en hinde af aluminiumoxid på overfladen, som er

inaktiv og tæt. Op til 7,5 % Al opnås en ren homogen α -struktur, som derfor ikke lader sig ændre ved varmebehandling. Se fig. 2.2.1.2 der viser ligevægtsdiagram for systemet Cu-Al

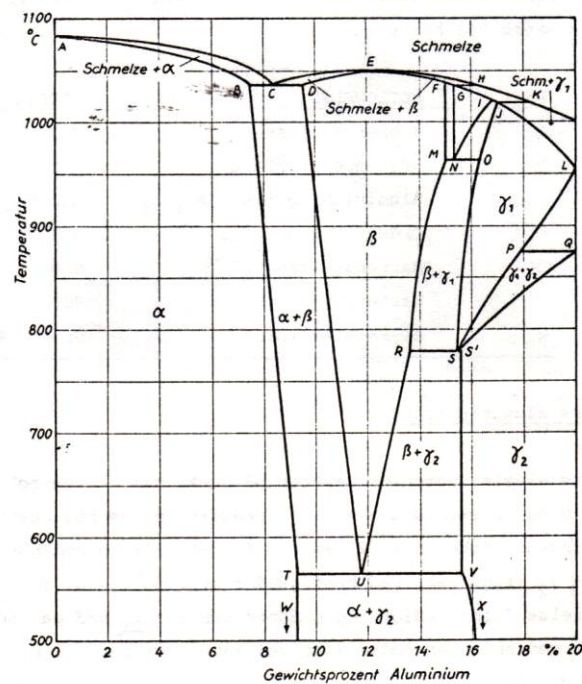
Duplexlegeringer
Ved indhold mellem 8 og 11 % Al fås ved høj temperatur en heterogen struktur af α og β faser. Ved varmebehandling spilles der netop på ændring af β -fasen.

Ved langsom afkøling fra størkningstemperatur (1- til 2⁰ C/min) dekomponeres β -fasen i en eutektoid fase bestående af α og γ_2 . γ_2 -fasen er en aluminiums rig fase med den støkiometriske sammensætning Al₄Cu₉

Ved afkølingshastigheder over 50⁰ C/min. forhindres denne omdannelse fuldstændigt, og omdannelsen $\beta \rightarrow \beta_1$ finder sted ved temperaturer over ca. 500⁰ C. Ved temperaturer under 500⁰ C sker en omdannelse af β_1 til β' med en martensitisk struktur. Se fig. 2.2.1.3 der på skematisk vis gengiver disse omdannelser.

Kommercielle heterogene Aluminiumbronzer indeholder sjældent mere end 11 % Al, på grund af, at fasen γ_2 er en sprød fase, men der findes legeringer med mellem 11 og 13 % Al til applikationer, hvor der stilles krav til høje slidegenskaber og hvor den lave duktilitet ikke er af afgørende betydning.

Fig. 2.2.1.2 viser del af ligevægtsdiagrammet for Cu-Al legeringer. (Efter P.B.Ludwigsen Dansk Metallurgisk Selskab 1977)



Punkt °C	A	B	C	D	E	F	G	H
Al %	0	7,5	8,5	9,5	12,4	14,95	15,25	16,0
Punkt °C	I	J	K	L	M	N	O	P
Al %	16,9	17,1	18,0	20,0	15,1	15,45	16,4	17,8
Punkt °C	Q	R	S, S'	T	U	V	W	X
Al %	20,0	19,6	(15,6)	9,4	11,8	15,6	9,4	16,2

Fig.2.2.1.2Ligevægtsdiagram for Cu-Al

Fig. 2.2.1.3 viser en skematisk fremstilling af β – omdannelsen fra 565⁰C hos Cu-Al-legeringer ved afkølingshastigheder på hhv. 2⁰C/min. og hhv. 50⁰C/min. (Efter P.B.Ludwigsen DMS 1977)

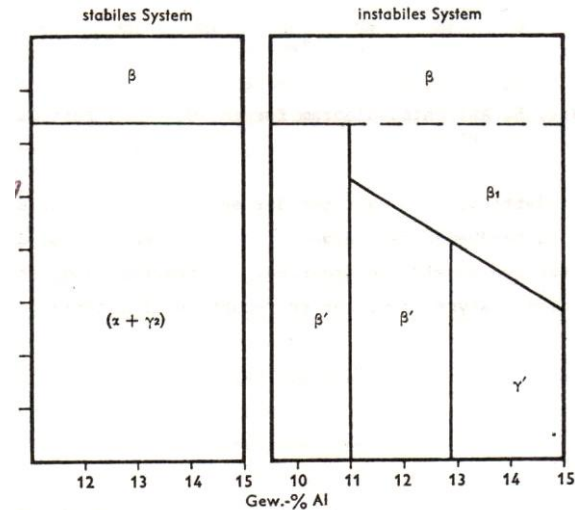


Fig. 2.2.1.3. Skematisk fremstilling af β - omdannelsen hos en Cu-Al duplexlegering ved afkølingshastighed på $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (stabile system) og tilsvarende ved $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$. (metastabile system)

2.2.2 Tilsætning af jern til CuAl-legeringerne

Tilsætning af jern, Fe op til ca. 3 % har en kornforfinende effekt. Ved tilsætninger af Fe op til ca. 2% øges trækstyrken og duktiliteten, mens flydespændingen forbliver den samme. Dette kan tilskrives den kornforfinende effekt. Tilsættes fra 3 til 5 % Fe sker der en yderligere stigning i både trækstyrke og flydespænding, og duktiliteten falder markant. Fe er med til at fastholde de mekaniske egenskaber ved forhøjede temperaturer. I praksis, hvor Fe tilsættes som det eneste legeringselement ud over Al, tilsættes max 4 % Fe.

På samme måde som ved den binære Cu-Al legering, sker der et dyk i trækstyrken ved 10 % Al ved legeringer med både Cu-Al-Fe repræsenteret. Det sker på samme måde, på grund af strukturændringen fra den rene α struktur til en blandingsstruktur af α og β , og de deraf efterfølgende faseomdannelser, der finder sted ved afkøling fra højtemperaturområdet. Ved langsom afkøling, kan disse legeringer blive meget sprøde.

Fe op til ca. 3 % forbedre chok egenskaberne samt øger hårdhed, slidegenskaberne og udmattelsesegenskaberne.

Fe indsnævrer samtidigt styrkningsintervallet.

Cu-Al-Fe legeringerne er ikke det bedste valg, hvis korrosionsegenskaberne er i fokus.

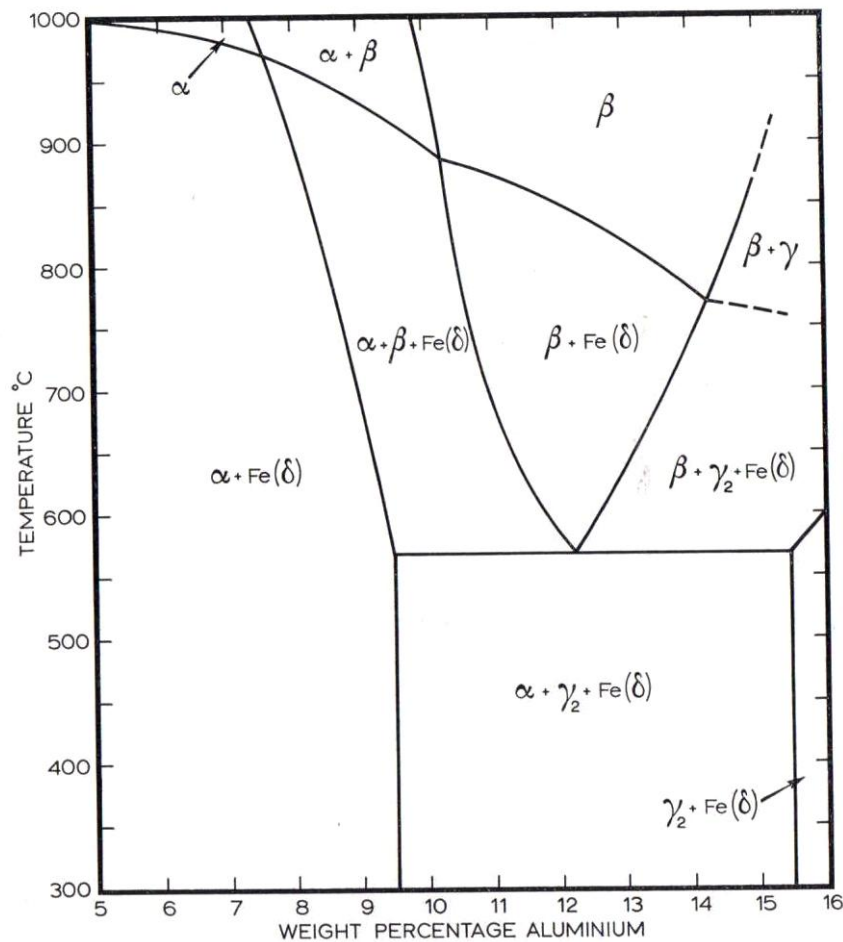


Fig. 2.2.2.1 Snit gennem ligevægtsdiagram for Cu-Al-Fe ved 3 % Fe (CDA publikation nr. 31)

2.2.3. Nikkel

Nikkel, Ni tilsættes altid sammen med Fe i aluminiumsbronze, hvor der er tale om at legeringen udsættes for korrosion. Ni forbedrer trækstyrke og flydespænding samtidigt med, at hårdheden øges, mens duktiliteten falder. Den kornforfinende effekt af Fe opretholdes ved tilsætning af op til 4- til 5 % Fe når Ni samtidigt er tilsat.

Op til 1% Ni forbliver opløst i Cu og reducerer risikoen for at β -fasen dekomponeres til $\alpha + \gamma_2$. Netop γ_2 er en sprød og ikke korrosionsfast fase.

Selvom Ni reducerer duktiliteten, er effekten af Al langt væsentligere for denne egenskab på samme måde som for de øvrige mekaniske egenskaber. Derfor er det nødvendigt at specificerer Al indholdet inden for snævre grænser for at opnå den bedste kombination af mekaniske egenskaber, korrosionsegenskaber og forarbejdningsegenskaberne. For eksempel er det almindeligt, at Al må specificeres inden for grænserne 9,5 +/- 0,2 % Al for støbte Cu-Al-Fe-Ni-Mn legeringer, for at kunne imødekomme standardernes krav til de mekaniske egenskaber. Se fig. 2.3.4.2

I de fleste støbte Aluminiumbronze legeringer specificeres Ni til at ligge mellem 4,5 og 5,5 % og altid med et højere indhold end Fe. I stangmateriale kan Ni varierer mere end i støbelegeringerne,

ofte mellem 1 til 3 % eller mellem 4 til 7 % Ni, afhængigt af hvilke kombinationer af egenskaber der ønskes fremmet.

For støbte legeringer er kombinationen med 4,0 til 4,5 % Fe sammen med 4,5 til 5,5 % Ni mest almindelig på grund af kombinationen mellem mekaniske egenskaber og korrosionsegenskaber. Af hensyn til korrosionsegenskaberne skal Ni ligge højere end Fe som nævnt.

Ofte specificeres $Ni > 0,2 + Fe$ indholdet, og $Al < 8,2 + Ni/2$

Fig. 2.2.3.1 sammenligner to ligevægtsdiagrammer for Aluminiumbronz med hhv. 5% Ni-5%Fe og tilsvarende uden tilsætning af NiFe. Man ser at udskillelsen af en γ_2 -fase rykker mod højere Al-indhold.

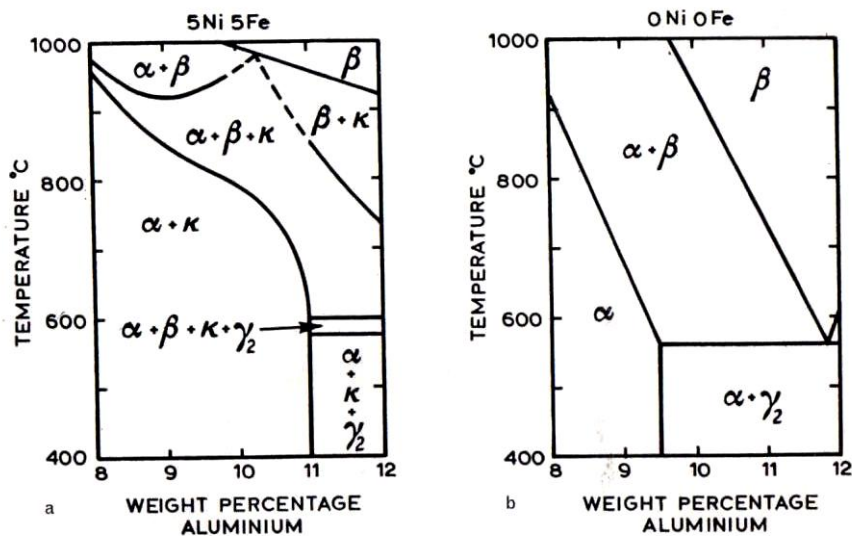


Fig. 2.2.3.1 Snit gennem ligevægtsdiagram for Cu-Al-Fe-Ni ved hhv. 5%Fe-5%Ni & 0%Fe-0%Ni (CDA publikation nr. 31)

Fe-indholdet har større effekt på de mekaniske egenskaber end Ni, som det fremgår af skema fig. 2.2.3.2

%Cu	%Al	%Fe	%Ni	R_{mt} N/mm ²	$S_{0,2}$ N/mm ²	A_5 %	HB
Rest	9,4	2,7	5,2	602	263	20	149
Rest	9,4	3,2	3,1	618	247	25	143
Rest	9,4	4,1	3,8	641	231	23	152
Rest	9,4	4,6	3,7	657	247	25	156
Rest	9,4	4,8	5,1	649	278	19	163

Fig.: 2.2.3.2 Effekten på de mekaniske egenskaber i en Aluminiumbronzlegering med 9,4% Al af at varierer på Fe og Ni i sandstøbte prøvestænger

Komplekse Aluminiumbronzlegeringer med højt aluminiumindhold er duktile ved forhøjede temperaturer, og derfor velegnede til forarbejdning ved varmeprocesser, men hvis Al indholdet øges over 13% bliver legeringerne sprøde men samtidigt meget hårde, og er derfor egnet til applikationer hvor slidegenskaberne er afgørende, dog på betingelse af, at der kun er tale om rene trykpåvirkninger.

2.2.4 Mangan

Mangan, Mn har samme effekt som Al ved tilsætning til Cu, men effekten er kun 1/6.

Ved at tilsætte Mn til Cu-Al legeringer, øges hårdheden. Mn forbliver opløst i Cu.

Mn tilsættes først og fremmest for at afilte legeringen inden tilsætning af Al og som sådan forbedres støbeegenskaberne for Aluminiumbronzelegeringerne ved tillegering af Mn.

I de komplekse Aluminiumbronzelegeringer er der en kritisk grænse for tilsætning af Mn, denne grænse afhænger af Al indholdet. For legeringer med ca. 10 % Al er grænsen ca. 2 % Mn

Mn tilsættes for, som nævnt, at afilte legeringerne før tilsætning af Al, og giver en mere flydbar legering. Ved Mn indhold over 2 % i legeringer med 10 % Al nedsættes korrosionsegenskaberne, derfor specificeres ofte en øvre og nedre grænse for Mn på : $0,5 < \text{Mn} < 1,3$

% Cu	% Al	% Fe	% Ni	% Mn	R _{mt} N/mm ²	A ₅ %	HV Hårdhed
Rest	8,3	0,3	5,0	0,5	549	18	171
Rest	8,4	5,2	5,0	0,5	657	13	211
Rest	9,2	0,3	5,0	0,5	685	12	220
Rest	9,2	5,2	5,0	0,5	750	13	240
Rest	9,5	4,0	5,0	0,5	649	18	170
Rest	10,1	0,3	5,0	0,5	765	8	275
Rest	10,2	5,2	5,0	0,5	843	7	270
Rest	10,6	0,3	5,0	0,5	750	5	272
Rest	10,6	5,2	5,0	0,5	889	6	290

Fig.: 2.2.4.1 Effekten på de mekaniske egenskaber af Aluminiumbronzelegeringer ved at varieres Al og Fe med konstant Ni og Mn indhold i støbte trækprøvestænger.

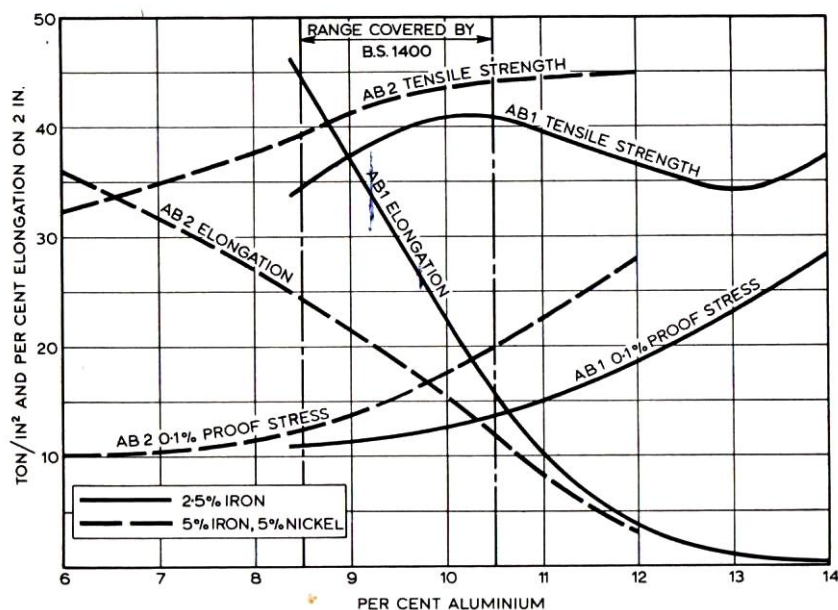


Fig. 2.3.4.2 Aluminiums indflydelse på de mekaniske egenskaber på sandstøbte Aluminiumbronzelegeringer (CDA publikation nr. 31)

3.0 Varmebehandling

Da en varmebehandling tager sigte på en ændring af strukturen eller dele af strukturen, vil det være hensigtsmæssigt at starte kapitlet med en opsummering af hvilke strukturer der kan forventes i de kommercielle Aluminiumbronzelegeringer.

Betragtes ligevægtsdiagrammet for Cu-Al fig. 2.2.1.2, og sammenholdes dette med den tidligere inddeling af Aluminiumbronzelegeringerne i tre kommercielle hovedgrupper som var:

1. Legeringer med mellem ca. 4 – til 7,5 % Al (De enfasede α -fase legeringer)
2. Legeringer med mellem ca. 8 – til 11 % Al tillegeret Fe op til 4 %.
3. Legeringer med mellem ca. 9 – 10,5 % Al tillegeret Fe op til 4,5 %, Ni op til 5,5 % samt Mn op til 2 %

Finder man, at der ikke er helt overensstemmelse mellem fasegrænserne og sammensætningen i vægtprocent af Al i hovedgrupperne, men det skyldes, at der i den kommercielle inddeling er skelet til de strukturer, der faktisk opnås under normale forhold, hvor ligevægtstilstanden aldrig opnås i praksis.

Fase	Fasekarakteristika
α	Kobberrig fase med op til 9,5 % Al i opløsning
β	Højtemperaturfase der dekomponerer ved 565 ⁰ C
γ_2	Aluminiumrig fase (Al ₄ Cu ₉) med stor hårdhed
β_1	Ordnet β -fase
β'	Martensit-fase
γ	Martensit-fase
κ , der forekommer som κ_I , κ_{II} , κ_{III}	Ni-Fe-Al-kompleks

Figur 3.0.1 Faser der typisk kan forekomme i kommercielle Aluminiumbronzelegeringer

Med stigende Al-indhold følger:

- α -fasen aftager
- β -fasen tiltager
- γ_2 -fasen tiltager

For at sikre omdannelsen $\beta \rightarrow \beta'$ kræves med stigende Al-indhold, en stigende afkølingshastighed.

Med stigende Ni-indhold følger:

- β -fasen aftager
- γ_2 -fasen aftager
- κ -fasen tiltager

Med stigende Fe-indhold følger:

- γ_2 -fasen aftager
- κ -fasen tiltager

Endvidere flytter det eutektoide punkt mod højere Aluminiumindhold ved stigende Fe-indhold

Fig. 3.0.2 viser skematisk faseomdannelserne i systemet Cu-Al-Fe-Ni

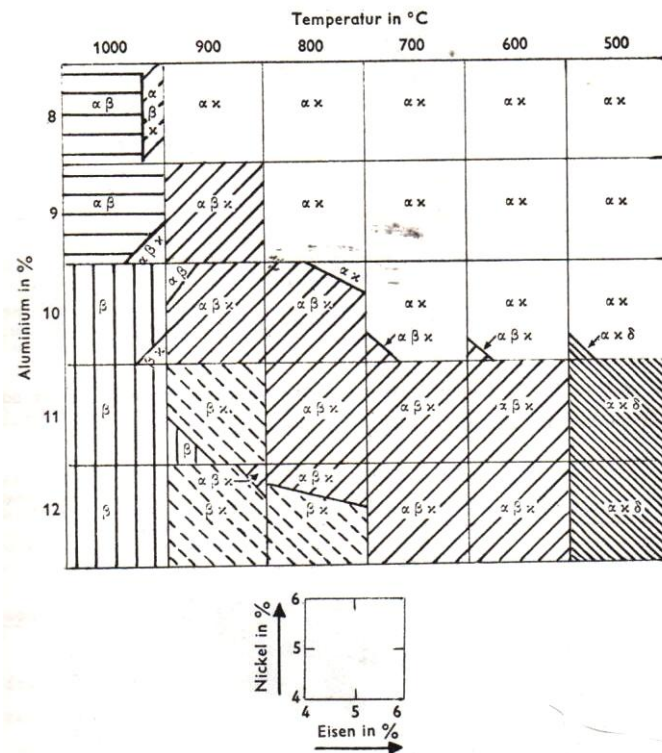


Fig. 3.0.2 Skematisk fremstilling af Cu-Al-Fe-Ni-systemet.
(Efter P. B. Ludwigsen, Dansk Metallurgisk Selskab, 1977)

Varmebehandlingen af de heterogene (flerfasede) Aluminiumbronzeelegeringer grunder på denne omdannelse der forekommer ved at bratkøle fra β området.

Ved anløbning af den fremkomne struktur i varierende tider, er det muligt at få dannet vidt forskellige strukturer, med vidt forskellige egenskaber med hensyn til hårdhed og dermed også styrke samt duktilitet, der falder med stigende hårdhed.

3.1 Former for varmebehandling

- Udglødning
- Normalisering
- Bratkøling
- Hærdning eller termalhærdning

3.1.1 Udglødning

En udglødning består af en opvarmning til en given temperatur, med en efterfølgende holdetid på temperaturen, som er lang nok til, at den nødvendige ændring af mikrostrukturen kan finde sted. Derefter følger et afkølingsforløb i en given hastighed.

Begrebet glødning anvendes også, selvom der er tale om en bratkøling fra holdetemperaturen, hvis formålet med varmebehandlingen overordnet er at forbedre duktiliteten på bekostning af trækstyrke, flydespænding og hårdhed.

Formålet med glødningen er således at få materialet i en mere duktil tilstand. Det kan være som følge af støbspændinger, afkølingsspændinger fra en bratkøling eller som følge af

kolddeformation, men der kan også være tale om en glødning der har til formål at opnå bedre korrosionsegenskaber eller slidegenskaber.

Ved glødningen sker en dekomponering af visse faser og en kornvækst fremmes.

Ved en fuld glødning ligger glødetemperaturen normalt over ca. 650°C , som er rekrySTALLISATIONSTEMPERATUREN.

Blødguldning af de støbte Cu-Al-Ni-Fe-Mn-legeringer kan foretages ved opvarmning til 800 til 850°C med efterfølgende afkøling i ovnen til 750°C og en holdetid på 2 timer. I dette område udskilles hovedparten af NiFeAl- κ -fasen i en α -matrix. Under 750°C kan der luftafkøles eller bratkøles, men luftafkøling er sædvanligt foretrukket.

Afspændingsglødning af de støbte Cu-Al-Ni-Fe-Mn-legeringer kan foretages ved opvarmning til mellem 400 - og 550°C , med en holdetid på omkring 30 til 60 min. efterfulgt af luftafkøling. Hvis dette ikke er tilstrækkeligt til at fjerne alle spændinger, kan der i stedet varmebehandles ved mellem 650 - til 750°C i 30 min efterfulgt af luftafkøling.

3.1.2 Normalisering

I den anvendte litteratur, tolkes begrebet normalisering ikke som vanligt, som en varmebehandling der bringer en uønsket struktur tilbage til en normaltstand. Begrebet bliver fortolket lidt bredere om ABZ legeringerne.

Normalisering er i denne kontekst en form for glødning efterfulgt af luftafkøling, hvor kornvækst begrænses. Resultatet der opnås, bliver et kompromis mellem duktilitet og trækstyrke.

En normalisering, vil ofte blive gennemført ved en temperatur på 675°C med en holdetid på fra 2 til 6 timer på temperaturen efterfulgt af luftafkøling.

Normaliseringen resulterer i en ændring af mikrostrukturen, ved at der sker en omdannelse af γ_2 -fasen til κ fase og en sverroidisering af Al, således at dannelsen af et Al-netværk i strukturen forhindres og legeringen bliver immun over for afaluminisering. Dette er grunden til, at netop denne varmebehandling ofte gennemføres for at forbedre legeringens korrosionsegenskaber.

Normalisering anvendes ofte for at reducere spændinger, samtidig med at kornvækst holdes på et minimum

3.1.3. Bratkøling og hærkning

Bratkøling i vand eller olie, anvendes efter en varmebehandling ved høj temperatur med efterfølgende holdetid på temperaturen til en ønsket omdannelse kan finde sted. Den efterfølgende bratkøling har til formål at fastlåse eller fastfryse en del af den varmebehandlede tilstand ved anvendelsestemperaturen.

Formålet med bratkølingen er at øge hårdheden eksempelvis for at forbedre slidegenskaberne eller forbedre styrken på bekostning af duktiliteten. Bratkølingen gennemføres ofte fra hærde temperaturer på over 880°C og holdetider på et par timer på temperaturen. Efter bratkøling følger i nogle tilfælde en anløbning, hvor der igen sker en opvarmning til under rekrySTALLISATIONSTEMPERATUREN med en holdetid på denne temperatur og en efterfølgende bratkøling. En typisk varmebehandlingssekvens kan se ud som følger:

Opvarmning til 880 - 900°C med holdetid på 2 timer på temperaturen

Bratkøling til stuetemperatur i vand. Hårdhed 230 - 240 HV₅

Anløbning ved 425 - 750°C med holdetid på 2 timer på temperaturen

Bratkøling til stuetemperatur.

Ved holdtemperatur på 450⁰C i to timer efterfulgt af bratkøling fås en struktur bestående af α-β med få κ udskillelser. Hårdheden omkring 200 HV₅

Ved holdtemperatur på 600⁰C i to timer efterfulgt af bratkøling fås en struktur bestående af α-matrix med delvis omdannet β struktur med κ udskillelser. Hårdheden omkring 180 HV₅

Ved holdtemperatur på 750⁰C i to timer efterfulgt af bratkøling fås en struktur bestående af α-matrix med udskillelser af κ_I, κ_{II} og κ_{III} Hårdheden omkring 175 HV₅

Typiske mekaniske egenskaber der kan forventes i en kompleks Aluminiumbronzeelegering CuAl10Fe5Ni5Mn1 før og efter en varmebehandling er se fig. 3.1.3.1

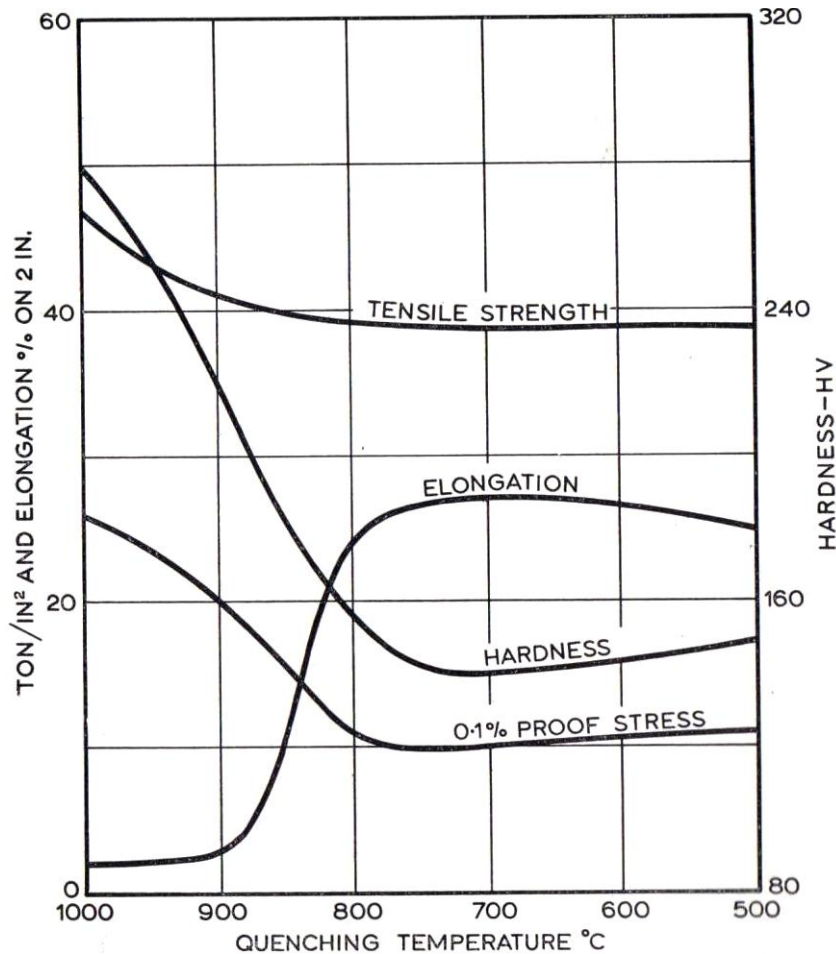


Fig. 3.1.3.1 Mekaniske egenskaber af en 80-10-5-5 Cu-Al-Fe-Ni legering efter langsom afkøling fra 1000⁰C til forskellige temperaturer med efterfølgende bratkøling. (CAD publikation No.31)

Egenskab	Støbt tilstand	Varmebehandlet tilstand
Trækstyrke R _{mt} N/mm ²	680 N/mm ²	780 N/mm ²
flydespænding R ₀₂ N/mm ²	300 N/mm ²	440 N/mm ²
Tøjning A ₅ %	17 %	13 %
Hårdhed HV ₅	180 HV	210 HV

Fig 3.1.3.2 Typiske værdier for mekaniske egenskaber før og efter en varmebehandling af en støbt 80/10/5/5/1 Aluminiumbronzeelegering

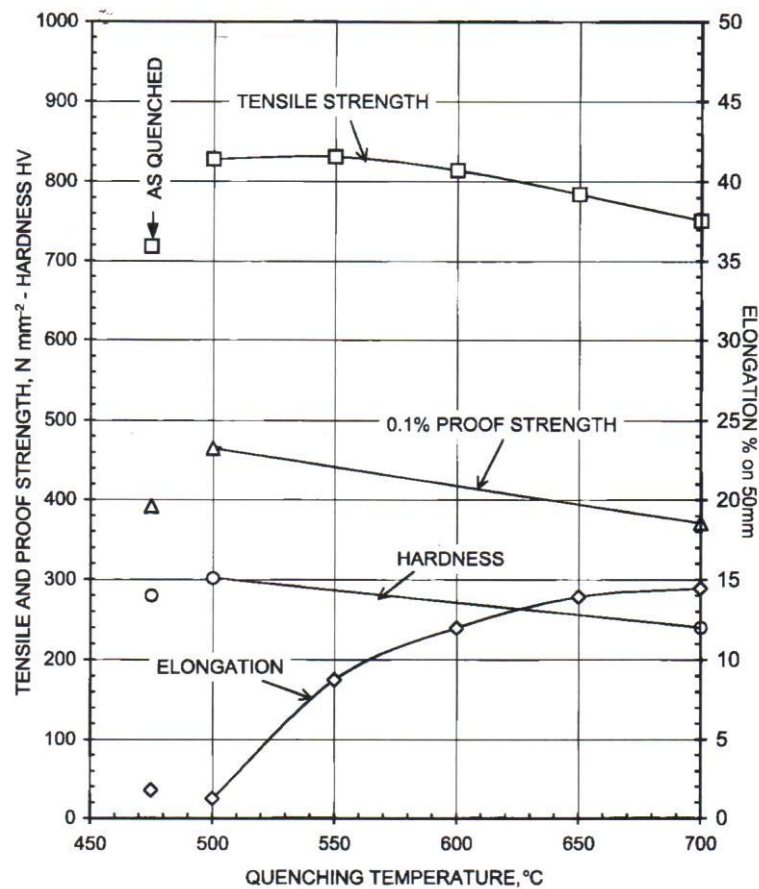


Fig. 3.1.3.3 Mekaniske egenskaber af en Aluminiumbronze CuAl10Fe5Ni5 Bratkølet fra 1000⁰C derefter opvarmet til forskellige temperaturer med en holdetid på temperaturen på 2 timer efterfulgt af luftafkøling

Det er kun i sjældne tilfælde, at de støbte komplekse Aluminiumbronzelegeringer varmebehandles for at øge de mekaniske egenskaber. Det normale er, at de anvendes ”as cast”. Egenskaberne ”as cast” kan dog forbedres hos sandstøbte emner ved en hurtig afkøling. I praksis kan det gøres ved at slå støbegodset ud så hurtigt efter støbning som det er forsvarligt af hensyn til kast og slagmærker. En langsom afkøling i sandformen vil resultere i en grovere udskillelse af κ -fasen, som vil resultere i faldende flydespænding og trækstyrke. En forceret afkølingshastighed på ca. 10⁰C/min vil optimere de mekaniske egenskaber

3.1.4 Hærdning eller termalhærdning.

Ved termalhærdning sker en kølingen fra opløsningstemperaturen ned til en given temperatur. Efter en holdetid på den givende temperatur, typisk omkring rekrytallisationstemperaturen, fortsættes afkølingen. For at undgå store spændinger mellem kerne og skal, kan kølingen fortsættes enten i luft eller forceret ved emner med enkel geometri.

3.2 Varmebehandling der tager sigte på at forbedre korrosionsegenskaberne.

Som nævnt i afsnittet under normalisering, kan en varmebehandling ved 675°C i 6 timer på temperatur med efterfølgende luftafkøling forbedre korrosionsegenskaberne. Det er af interesse, da langt den overvejende del af de komplekse Aluminiumbronzelegeringer anvendes til maritime formål. Det har i nogle tilfælde vist sig, at nogle emner har været udsat for betragtelig korrosionsangreb efter længere tid i saltvand. Den form for korrosion kan skyldes afaluminisering i forbindelse med tilstedeværelse af hhv. β – og γ_2 -fase i strukturen, hvorimod α -fasen er immun over for afaluminisering.

Omdannelse af β -fasen til $\alpha + \kappa_{III}$ – fase gør legeringen immun for afaluminisering, og det er netop dette forhold, der har fastsat grænsen for $\text{Al} < 8,5 + \text{Ni}/2$

4.0 Afslutning.

Formålet med denne gennemgang af Aluminiumbronzelegeringers varmebehandling og metallurgi, er at give et indtryk af de mange muligheder der er, og fantastiske egenskaber der kan opnås med disse legeringer.

Literaturhenvielse:

Harry Meigh: Cast and Wrought Aluminiumbronzes properties, processes and structures

P.B. Ludwigsen: Aluminiumbronzes Metallurgi og Varmebehandling, Dansk Metallurgisk Selskab 1977

P.J. Macken At al. The Aluminiumbronzes, Properties and Production Processes CAD-publikation No31.