Procesteknisk Institut
Afd. for Metallære
DTU

Elektriske modstandslegeringer

Legeringer med lav varmeudvidelseskoefficient

Torben Kjer

DANSK METALLURGISK SELSKAB
VINTERMØDET
1996

Elektriske modstandslegeringer
og
Legeringer med lav varmeudvidelseskoefficient

Abstract

This article gives an overview of electrical resistance alloys and alloys with low thermal expansion. The electrical resistance alloys comprise resistance alloys, heating alloys and thermostat alloys. The low expansion alloys comprise alloys with very low expansion coefficients, alloys with very low thermoelastic coefficients and age hardenable low expansion alloys.

Elektriske modstandslegeringer

Elektriske modstandslegeringer kan inddeles efter anvendelse i hovedgrupperne modstandslegeringer, varmeelementlegeringer og bimetallegeringer.

Modstandslegeringer

Hovedanvendelsesområdet for modstandslegeringer er til modstande til instrumenter og elektronik generelt. De primære krav til modstandslegeringer er:

Ensartet modstand
Stabil modstand (ingen ældningseffekter)
Reproducerbar temperaturkoefficient
Lav termoelektrisk potential mod kobber

Andre egenskaber af betydning for modstandslegeringer er:

Varmeudvidelseskoefficient
Mekanisk styrke og duktilitet
Korrosionsmodstand
Loddeegenskaber
Tilgængelighed og pris

De væsentligste anvendelser af elektriske modstande er til trådviklede modstande og potentiometre, modstandstermometre og ballastmodstande.

Præcisionsmodstande

Præcisionsmodstande skal have en så lille modstandstemperaturkoefficient som muligt i det temperaturområde, hvor de skal anvendes. Desuden bør de have så et så lille termoelektrisk potential overfor kobber som muligt, da kobber er det mest anvendte materiale til de elektriske forbindelser. Temperaturforskelle kan optræde mellem forskellige forbindelser mellem en modstand og forbindelsestråde og således forårsage en termoelementeffekt. Denne effekt er særlig kritisk i præcisionskredsløb.

Valg af materiale til en præcisionsmodstand afhænger af størrelse og varmeafgivelses-

karakteristik af det instrument, i hvilket den skal monteres. Temperaturafvigelser fra en specificeret temperatur kan medføre ændringer i modstanden og dermed påvirke stabiliteten og nøjagtigheden af instrumentet. Med en kendt temperaturændring kan ændringen af modstanden beregnes ud fra temperaturkoefficienten. Ved at vælge en modstand af et materiale med en relativt lav specifik modstand kan modstandens overflade gøres adskillige gange større end overfladen af en tilsvarende modstand af et materiale med en større specifik modstand. Følgelig vil varmeafgivelse og steady-state temperatur blive lavere og temperatureffekten blive mindre.

Legeringer til præcisionsmodstande har i de fleste tilfælde en specifik modstand fra 500 til 1400 $n\Omega \cdot m$. De materialer, der anvendes, omfatter legeringstyperne manganin, konstantan, nikkel-krom-aluminium legeringer og jern-krom-aluminium legeringer (Tabel 1).

En type præcisionsmodstande, der kræver lille temperaturmodstandskoefficient (mindre end $\pm\ 20 \cdot 10^{-6}/^{o}C$) og stor stabilitet, er referencemodstande. Ved særligt krævende anvendelser holdes en referencemodstand på en konstant temperatur lidt over stuetemperatur. Mange referencemodstande udviser en lineær ændring af modstanden med tiden, og en nøjagtig modstand kan således bestemmes ved interpolation mellem værdier bestemt ved kalibrering på forskellige tidspunkter.

Modstandstermometre

Modstandstermometre er modstande, hvis ændringer af modstand med temperaturen er stabile og reproducerbare i et specificeret temperaturinterval.

I modsætning til de fleste præcisionsmodstande, der skal have så lille modstandstemperaturkoefficient som muligt, er det en fordel, at modstandstermometre har en stor temperaturkoefficient. Modstandstermometre er normalt fremstillet af rene metaller f.eks. kobber, nikkel eller platin, som har modstandstemperaturskoefficienter på omkring $5000 \cdot 10^{-6}\ /^{o}C$ (Tabel 1).

For rene metaller er modstandstemperaturkoefficienten meget afhængig af renhedsgraden. Selv små indhold af urenheder eller legeringselementer nedsætter modstandstemperaturkoefficienten betydeligt.

Ballastmodstande

Ballastmodstande anvendes i elektriske kredsløb med det formål at opretholde en konstant strøm over et større tidsrum. I disse anvendelser må en ballastmodstand være i stand til at afgive varme på en sådan måde, at strømmen holdes konstant, selv om spændingen varierer over et stort interval. Modstande med en passende temperaturmodstandskoefficient kan afpasses således, at den opvarming, der sker ved strømgennemgangen, ændrer modstanden på en sådan måde, at strømmen i kredsløbet ikke ændrer sig selv ved store ændringer i spændingen over kredsløbet. Da ballastmodstande virker ved forhøjede temperaturer, er de mekaniske egenskaber af betydning. Materialer, der anvendes til ballastmodstande omfatter rent jern, rent nikkel og nikkel-jernlegeringer (Tabel 1).

Stabilitet

Forhold, der har indflydelse på modstanden af en præcisionsmodstand, er formindskelse af indre spændinger med tiden, tids- og temperaturafhængige metallurgiske ændringer som f.eks udskillelse af en anden fase, korrosion eller oxidation.

Formindskelse af indre spændinger foregår over lange tidsrum selv ved stuetemperatur, og den hastighed, hvormed denne relaxation foregår, er større, jo større de oprindelige spændinger er. Til præcisionsmodstande anvendes varmebehandlede tråde. Ved fremstilling af modstande ved vikling eller anden proces må introduktion af nye spændinger holdes på et minimum. Færdigfremstillede modstande kan normalt kun varmebehandles ved lave temperaturer (tekstilisolerede tråde ved max. omkring 140 °C og emaljeisolerede tråde ved max. 220 °C).

Fig. 1 viser den relative ændring af modstanden af en manganinlegering ved stuetemperatur i et tidsrum på 1000 dage for tråde med forskellige deformationsgrader. Figuren viser, at en varmebehandling ved 140 °C i 48 timer i dette tilfælde praktisk taget eliminerer de indre spændinger.

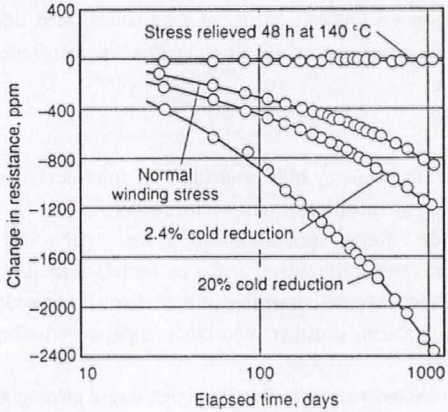

Fig. 1. Ændring af modstand ved ældning ved stuetemperatur af manganinmodstande i forskellige deformationstilstande (Ref.1).

For de fleste moderne, hermetisk forseglede præcisionsmodstande, som er varmebehandlet ved 140 °C, er den relative ændring af modstanden højst $10 \cdot 10^{-6}$/år eller i visse tilfælde højst $5 \cdot 10^{-6}$/år. De bedste 1 Ω modstande fremstilles af manganin på følgende måde: tråden vikles om en jernstang og varmebehandles ved ca. 500°C i 6 timer, hvorefter spolen uden at deformeres anbringes mellem to isolerende rør og lukkes hermetisk. De fleste af disse modstande udviser relative ændringer af modstanden på mindre end $1 \cdot 10^{-6}$/år.

Metallurgisk stabilitet

Alle modstandslegeringer er en-fasede, faste opløsninger. Eksempler på reaktioner, der kan ske med tiden, og som vil ændre modstanden, er orden-uorden reaktioner i 71Ni-29Fe

legeringer, klyngedannelse i kvaternære nikkel-krom legeringer og orden-reaktion i manganinlegeringer. Modstanden af disse legeringer vil derfor kunne påvirkes ved varmebehandling og afhænge af afkølingshastighed fra varmebehandlingstemperaturen. Under brugen vil virkningen af de nævnte metallurgiske reaktioner være en stigning i modstand af nikkel-krom legeringer, et fald for manganin og enten en stigning eller et fald for nikkel-jern legeringer.

Korrosion

Korrosion og/eller oxidation af en modstandstråd vil nedsætte tværsnitsarealet og derfor medføre en stigning i elektrisk modstand. Korrosion kan undgås ved at beskytte modstanden med et lag emalje eller polymer. En almindeligt forekommende årsag til korrosion er rester af flux efter lodning.

Loddeegenskaber

Metaller, der skal loddes, skal renses før fortinning, for at loddet kan væde overfladen fuldstændigt og give god elektrisk kontakt. For kobber-nikkel legeringer er dette relativt let, da disse legeringer ikke danner beskyttende oxidlag på overfladen. Nikkel-krom legeringer skal fortinnes umiddelbart efter rensning, før der dannes beskyttende oxidlag.

Hovedtyper af elektriske modstandslegeringer

De vigtigste typer elektriske modstandslegeringer er angivet i Tabel 1 og er følgende:

Radiolegeringer

Kobber-nikkel-modstandslegeringer af typen radiolegeringer har meget lave specifikke modstande (50 - 300 $n\Omega \cdot m$), som stiger med stigende Ni-indhold, og moderate modstandstemperaturkoefficienter, som falder med stigende Ni-indhold. De anvendes hovedsageligt til modstande, der leder relativt høje strømme og skal derfor hurtigt kunne afgive varme. Alle radiolegeringer kan loddes uden vanskelighed.

Manganinlegeringer

Kobber-mangan-nikkel modstandslegeringer af typen manganin anvendes til præcisionsmodstande med modstande på 100 $k\Omega$ og mindre. De specifikke modstande er moderate (omkring 500 $n\Omega \cdot m$), og modstandstemperaturkoefficienterne er lave ($\pm 15 \cdot 10^{-6}$ /°C).

Når modstande af manganin er passende varmebehandlet og beskyttet mod korrosion, er de meget stabile og den elektriske modstand varierer ikke mere end ca. $1 \cdot 10^{-6}$/år.

Manganinlegeringer er følsomme overfor selektiv oxidation, som kan ske under varmebehandling eller andre processer og som resulterer i et kobberrigt overfladelag på tråden. Dette overfladelag kan medføre en kraftig stigning i modstandstemperaturkoefficienten.

Det termoelektriske potential overfor kobber er meget lavt , normalt mindre end 2 μV/°C.

Konstantanlegeringer

Konstantanlegeringer har omtrent samme specifikke modstand som manganinlegeringer (omkring 500 nΩ·m), og har også meget lave modstandstemperaturkoefficienter, som kan holdes lavere end $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ /°C.

Det skal bemærkes, at de nævnte modstandstemperaturkoefficienter i tabel 1 er gældende for forskellige temperaturintervaller, og at konstantanlegeringerne har elektriske modstande, der varierer væsentligt mindre med temperaturen end manganinlegeringernes modstande. Dette er illustreret i Fig. 2, der viser, hvorledes temperaturfaktoren (forholdet mellem modstand ved en given temperatur og modstanden ved stuetemperatur) varierer med temperaturen fra -50 °C til 150 °C. Alle konstantanlegeringer indeholder Fe og Co udover Mn.

Konstantanlegeringer er betydeligt mere korrosionsmodstandsdygtige end manganinlegeringer.

På grund af konstantanlegeringers relativt høje termoelektriske potential overfor kobber (omkring -40 μV/°C ved stuetemperatur) anvendes disse legeringer hovedsageligt i vekselstrømskredsløb. Af samme grund anvendes konstantanlegeringer til termoelementmateriale.

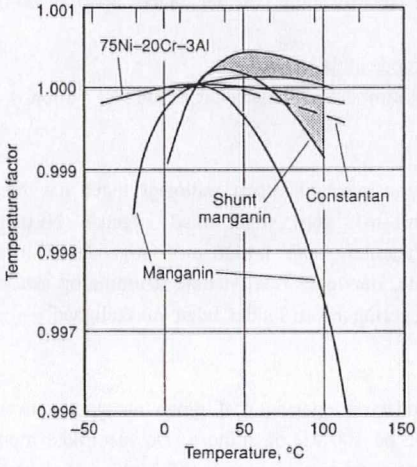

Fig. 2. Modstand af fire præcisionsmodstande som funktion af temperatur (Ref. 1).

Ni-Cr-Al-legeringer

Ni-Cr-Al-modstandslegeringer, der indeholder små mængder af Cu, Mn eller Fe, har en specifik modstand, der er 2-3 gange så stor som manganins specifikke modstand. Sammenlignet med manganin og konstantan er modstandstemperaturkoefficienten af Ni-Cr-Al-modstandslegeringer væsentligt mindre over et stort temperaturområde (se Fig. 2) og anvendes til trådviklede præcisionsmodstande med modstande omkring 100 kΩ.

Den høje modstand og den lave modstandstemperaturkoefficient opnås ved en varmebe-

Tabel 1. Typiske egenskaber af elektriske modstandslegeringer ved stuetemperatur og let forhøjede temperaturer (Ref.1).

Sammensætning (%)	Specifik modstand (nΩ·m)	Modstandstemperatur-koefficient (10^{-6}/°C)	Termoelektrisk potential mod kobber (μV/°C)
Radiolegeringer			
98Cu-2Ni	50	1400 (25→105 °C)	-13
94Cu-6Ni	100	700 (25→105 °C)	-13
89Cu-11Ni	150	450 (25→105 °C)	-25
78Cu-22Ni	300	180 (25→105 °C)	-36
Manganinlegeringer			
87Cu-13Mn	480	±15 (15→35 °C)	1
83Cu-13Mn-4Ni	480	±15 (15→35 °C)	-1
85Cu-10Mn-4Ni	380	±10 (40→60 °C)	-1,5
Konstantanlegeringer			
57Cu-43Ni	500	±20 (25→105 °C)	-43
55Cu-45Ni	500	±40 (-55→105 °C)	-42
53Cu-44Ni-3Mn	525	±70 (-55→105 °C)	-38
Ni-Cr-Al legeringer			
75Ni-20Cr-3Al-2(Cu,Fe,Mn)	1333	±20 (-55→105 °C)	1,0
72Ni-20Cr-3Al-5Mn	1375	±20 (-55→105 °C)	1,0
Ni-basis legeringer			
78,5Ni-20Cr-1,5Si	1080	80 (25→105 °C)	3,9
76Ni-17Cr-4Si-3Mn	1330	±20 (-55→105 °C)	-1
71Ni-29Fe	208	4300 (25→105 °C)	-40
Fe-Cr-Al legeringer			
73,5Fe-22Cr-4,5Al	1350	60 (25→105 °C)	-3,0
72,5Fe-22Cr-5,5Al	1450	20 (25→105 °C)	-2,6
81Fe-15Cr-4Al	1250	±50 (25→105 °C)	-1,2
Rene metaller			
Al	26,55	4290 (20 °C)	-3,4
Cu	16,73	4270 (0→50 °C)	0
Au	23,50	4000 (0→100 °C)	0,2
Fe	970	5000 (20 °C)	12,2
Ni	80	6000 (20→35 °C)	-22
Pt	105	3920 (0→100 °C)	7,6
Ag	16	4100 (20 °C)	-0,2
W	55	4500 (20 °C)	3,6

handling ved ca. 540 °C, der resulterer i en orden-uorden reaktion.

Stabiliteten af kvaternære Ni-Cr-Al-modstandslegeringer er fremragende, ($1 \rightarrow 10 \cdot 10^{-6}$/år).

Tråde af Ni-Cr-Al-legeringer er på markedet med diametre helt ned til 10 μm, hvilket gør det muligt at fremstille miniaturemodstande med ekstremt høje modstandsværdier.

Ni-Cr-Al-modstandslegeringer har bedre modstandsdygtighed overfor oxidation end andre kommercielle modstandslegeringer og kan i mange tilfælde anvendes uden beskyttende overfladelag.

Ni-basis-legeringer

80Ni-20Cr-type legeringer anvendes, hvor kravene til modstandstemperaturkoefficienten er mindre strenge. Andre lignende legeringer anvendes til specielle formål.

Rene metaller

Af de rene metaller, der er nævnt i Tabel 1, anvendes hovedsagelig Cu, Ni eller Pt til modstandstermometre på grund af disse metallers meget høje, positive modstandstemperaturkoefficienter.

Varmeelementlegeringer

Varmeelementlegeringer har mange anvendelser fra små husholdningsapparater til store industrielle ovne. Varmeelementerne er sædvanligvis enten åbne spiraler monteret med keramiske holdere eller lukkede varmeelementer, som består af spiralsnoet modstandstråd elektrisk isoleret fra kappen med varmebestandig isolation.

Driftstemperaturerne kan være så høje som 1300 °C i metalindustrien og 1700 °C i den keramiske industri.

De primære krav til varmeelementlegeringer er:

Høj smeltetemperatur
Høj elektrisk modstand
Reproducerbar modstandstemperaturkoefficient
God oxidationsmodstand
Modstandsdygtighed overfor kontamination

Andre egenskaber af betydning for varmeelementlegeringer er:

God krybestyrke
Høj emissionsevne
Modstand mod termisk chok
Modstand mod termisk udmattelse, hvilket vil sige:
Lav termisk udvidelseskoefficient og elasticitetsmodul
God styrke og duktilitet ved formgivningstemperatur

Hovedtyper af metalliske varmeelementlegeringer

De vigtigste typer metalliske varmeelementlegeringer er angivet i Tabel 2.

Tabel 2. Typiske egenskaber af varmeelementlegeringer (Ref.1).

Sammensætning (%)	Specifik modstand (nΩ·m)	Gennemsnitlig ændring i modstand fra 20 °C til 815 °C (%)	Termisk udvidelse fra 20 °C til 815 °C (μm/m·°C)
Ni-Cr og Ni-Cr-Fe legeringer			
78,5Ni-20Cr-1,5Si (80-20)	1080	6,3	17,6
68,5Ni-30Cr-1,5Si (70-30)	1180	7,6	-
60Ni-16Cr-22Fe-1,5Si	1120	7,6	17,6
35Ni-20Cr-43Fe-1,5Si	1000	20,6	-
Fe-Cr-Al legeringer			
83,5Fe-13Cr-3,25Al	1120	-	-
81Fe-14,5Cr-4,25Al	1250	16,5	12,2
73,5Fe-22Cr-4,5Al	1350	4,3	13,1
72,5Fe-22Cr-5,5Al	1450	2,8	14,0
Rene metaller			
Mo	52	366	-
Pt	105	257	10,1
Ta	125	243	-
W	55	396	4,6

Ni-Cr og Ni-Cr-Fe legeringer

Denne gruppe legeringer er den type varmeelementlegeringer, der kan anvendes til de fleste formål. Deres egenskaber gør, at de kan anvendes både ved relativt lave og relativt høje temperaturer i mange miljøer.

Den specifikke modstand af Ni-Cr og Ni-Cr-Fe legeringer er relativ høj (1000-1180 nΩ·m). Fig. 3 viser modstandens afhængighed af temperaturen for seks legeringer i denne gruppe. 35Ni-20Cr-45Fe udviser den største stigning i modstanden med stigende temperatur, og Ni-Cr legeringerne med de største Ni-indhold de mindste ændringer med temperaturen. For Ni-Cr legeringerne afhænger modstanden af afkølingshastigheden ved afkølingen fra den sidste varmebehandling efter fremstillingen. Den mindste ændring af modstanden findes hos modstandstråde med stort tværsnit, som er kølet relativt langsomt.

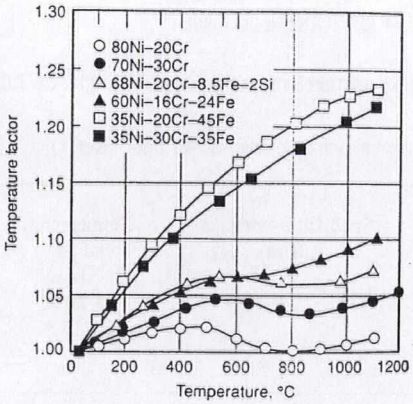

Fig. 3. Modstand af seks Ni-Cr og Ni-Cr-Fe legeringer som funktion af temperatur (Ref 1).

Fe-Cr-Al legeringer

Fe-Cr-Al legeringer har relativ høj specifik modstand (op til 1450 nΩ·m). Modstanden afhænger mest af Al-indholdet.

Disse legeringer har meget høj modstandsdygtighed overfor oxidation i luft, fordi der dannes et beskyttende overfladelag af temmelig rent Al_2O_3. Under normale driftsforhold vil nedbrydningen af overfladelaget og dermed fjernelsen af Al fra legeringen foregå relativt langsomt. Visse varmebestandige materialer kan reagere med Al_2O_3-overfladelaget ved temperaturer over ca. 1000 °C og må derfor ikke komme i kontakt med overfladelaget. Som understøtning af varmeelementer kan anvendes f.eks. meget rent Al_2O_3.

Trækstyrken af Fe-Cr-Al legeringer er temmelig lav ved høje temperaturer sammenlignet med de øvrige, nævnte varmeelementlegeringer. Tabel 3 angiver trækstyrkeværdier for varmeelementlegeringer ved forskellige temperaturer.

Levetiden af varmeelementer af Fe-Cr-Al legeringer begrænses af, at modstanden stiger med tiden på grund af kornvækst. Efter cykliske påvirkninger til høje temperaturer bliver disse legeringer sprøde i modsætning til Ni-Cr legeringer. De nyeste Fe-Cr-Al legeringer fremstilles pulvermetallurgisk, og disse har relativt høje trækstyrker ved høj temperatur og udviser ændringer af modstanden med tiden, som er af samme størrelse som for Ni-Cr legeringer.

Rene metaller

Sammenlignet med de nævnte modstandslegeringer har de rene metaller, der anvendes til varmeelementer, meget lave specifikke modstande (50 - 125 nΩ·m).

Metallerne Mo, Ta og W har relativt høje trækstyrker ved høj temperatur. Over 800 °C har disse metaller væsentlig højere trækstyrke end Ni-Cr, Ni-Cr-Fe og Ni-Cr-Al legeringerne ved samme temperatur.

Pt kan anvendes i luft op til 1500 °C på grund af den store modstand mod oxidation.

Mo, Ta og W kan ikke anvendes over henholdsvis 400, 500 og 300 °C i luft på grund af kraftig oxidation over disse temperaturer. De højeste temperaturer, som varmeelementer af disse metaller kan anvendes ved i vakuum eller i forskellige atmosfærer, er angivet i Tabel 4.

Tabel 3. Typiske værdier af højtemperaturtrækstyrke for udvalgte varmeelementlegeringer (Ref.1).

Varmeelementlegering	Trækstyrke (MPa) ved:			
	425 °C	650 °C	870 °C	1100 °C
Ni-Cr og Ni-Cr-Fe legeringer				
78,5Ni-20Cr-1,5Si (80-20)	715	620	170	75
68,5Ni-30Cr-1,5Si (70-30)	735	675	205	75
Fe-Cr-Al legeringer				
73,5Fe-22Cr-4,5Al	525	165	14	-
72,5Fe-22Cr-5,5Al	550	345	52	26
Rene metaller				
Mo	620	585	365	235
Ta	315	315	280	195
W	560	525	395	295

Ikke-metalliske varmeelementmaterialer

Af de ikke-metalliske varmeelementmaterialer, der er nævnt i Tabel 4, har SiC og specielt grafit væsentlig højere specifik modstand end de metalliske varmeelementmaterialer (grafit 9100 nΩ·m). For begge materialer falder modstanden med stigende temperatur. SiC har stor modstand mod oxidation og kan anvendes op til ca. 1600 °C i luft.

$MoSi_2$ og $MoSi_2$ med additiver har lave specifikke modstande ved stuetemperatur (omkring 300 nΩ·m) og meget kraftigt stigende modstand med stigende temperatur. Rent $MoSi_2$ er for sprødt til anvendelse til varmeelementer, men additiver reducerer sprødheden tilstrækkeligt. Varmeelementer af $MoSi_2$ med additiver fremstilles ved flydende fase-sintring, der resulterer i et praktisk taget massivt materiale. En fordel ved $MoSi_2$ er materialets store modstand mod termisk chok. Grunden til, at materialet kan anvendes op til omkring 1800 °C i luft, er, at der dannes et lag SiO_2 (kvartsglas) på overfladen, som beskytter mod yderligere oxidation.

Tabel 4. Anbefalede maximale driftstemperaturer for varmeelementlegeringer (Ref.1).

Sammensætning (%)	Omtrentligt smeltetemperatur (°C)	Maximum driftstemperatur i luft (°C)
Ni-Cr og Ni-Cr-Fe legeringer		
78,5Ni-20Cr-1,5Si (80-20)	1400	1150
68,5Ni-30Cr-1,5Si (70-30)	1380	1200
60Ni-16Cr-22Fe-1,5Si	1350	1000
35Ni-20Cr-43Fe-1,5Si	1380	925
Fe-Cr-Al legeringer		
83,5Fe-13Cr-3,25Al	1510	1050
81Fe-14,5Cr-4,25Al	1510	-
73,5Fe-22Cr-4,5Al	1510	1280
72,5Fe-22Cr-5,5Al	1510	1375
Rene metaller		
Mo	2610	400
Pt	1770	1500
Ta	3000	500
W	3400	300
Ikke-metalliske varmeelementmaterialer		
SiC	2410	1600
$MoSi_2$	-	1750
$MoSi_2$ + 10% keramiske additiver	-	1900
Grafit	3650	400

For Mo, Ta og W er de anbefalede atmosfærer:

1) vakuum (10^{-4} - 10^{-5} mm Hg)
2) hydrogen
3) delvis forbrændte kulbrinter med dugpunkt under 4 °C

I disse atmosfærer er de anbefalede maximale driftstemperaturer (°C):

Atmosfære	Vakuum	Ren hydrogen	Kulbrinter
Mo	1650	1760	1700
Ta	2480	Ikke anbefalet	Ikke anbefalet
W	1650	2480	1700

Bimetallegeringer

Bimetaller er kompositmaterialer, der ændrer geometri ved temperaturændringer, og de udnyttes til mange formål, fortrinsvis til måling og regulering. Bimetaller anvendes f.eks. i termometre, som termostat i strygejern og til beskyttelse mod overtemperatur i elektriske motorer, til automatisk regulering i kølevandssystemer og i blinkesystemer.

Temperaturændringen af bimetaller kan foregå ved varmeudveksling med omgivelserne, ved indirekte elektrisk opvarmning eller ved direkte opvarmning ved strømgennemgang, hvorved bimetallet selv virker som modstand. Det lag af metal, der har den største udvidelseskoefficient, kaldes det aktive lag. Det passive lag består i mange tilfælde af en Invarlegering.

De væsentligste egenskaber for bimetaller er varmeudvidelseskoefficient og elasticitetsmodul af de to metaller og til de anvendelser, hvor bimetallet selv virker som modstand, den specifikke modstand af bimetallet som helhed.

Et mål for størrelsen af geometriændringen pr. grad temperaturændring af et bimetal er flexivitet. Denne størrelse (som defineres i ASTM norm B 106) er proportional med forskellen mellem udvidelseskoefficienterne af de to metallag.

De geometrier af bimetalkomponenter, der er mest almindelige, er strimler, aksialspiraler, radialspiraler og skiver.

Til afbrydere og lignende findes bimetalller med forskellige specifikke modstande, men som ellers er ens med hensyn til andre relevante egenskaber. Dette gør det muligt at fremstille en serie afbrydere med samme størrelse og geometri og med forskellige modstande. Modstandene varieres i praksis ved at indlægge et lag kobber eller nikkel mellem det aktive og det passive lag. Bimetaller er på markedet med specifikke modstande fra omkring 30 nΩ·m til omkring 1700 nΩ·m. Eksempler på almindeligt anvendte bimetaller er vist i Tabel 5.

Tabel 5. Sammensætning og egenskaber af almindeligt anvendte bimetaller (Ref. 1).

Sammensætning (%)		Anvendelses-temperatur (°C)	Specifik modstand ved 24 °C (nΩ·m)	Flexivitet (μm/m·°C)
Aktive lag	Passive lag			
75Fe-22Ni-3Cr	64Fe-36Ni	-20 → 150	780	26,3
75Fe-22Ni-3Cr	Ni	-20 → 200	160	8,3
72Mn-18Cu-10Ni	64Fe-36Ni	-20 → 200	1120	38,5
67Ni-30Cu-1,4Fe-1Mn	60Fe-40Ni	120 → 290	565	16,6
66,5Fe-22Ni-8,5Cr	50Fe-50Ni	150 → 450	580	11,2

Bimetaller er på markedet i strimmel- eller pladeform i tykkelser fra ca. 0,1 mm til ca. 3,5 mm. Bimetaller vælges som regel på basis af i hvilket temperaturområde, de skal anvendes. De er tilgængelige i forskellige driftsområder fra ca. -185 °C til ca. 540 °C.

Legeringer med lav varmeudvidelseskoefficient

Legeringer med lav varmeudvidelseskoefficient har anvendelser, der omfatter stænger og målebånd til landmåling, lavudvidelsesdelen af bimetaller, forsegling mellem glas og metal, komponenter til elektronik, mekaniske komponenter i optiske målesystemer og beholdere og rør til flydende naturgas.

De vigtigste hovedtyper af legeringer med lav udvidelseskoefficient er følgende med hver sine specielle anvendelser:

Fe-Ni-legeringer
Fe-Ni-Cr-legeringer
Fe-Ni-Co-legeringer
Fe-Co-Cr-legeringer

Fe-Ni-legeringer

Afhængigt af Ni-indholdet har Fe-Ni legeringer varmeudvidelseskoefficienter, der varierer fra tæt på nul (Invarlegeringer) til ret høje (op til $20 \cdot 10^{-6}/°C$). Fig. 4 viser udvidelseskoefficienten ved stuetemperatur som funktion af Ni-indholdet.

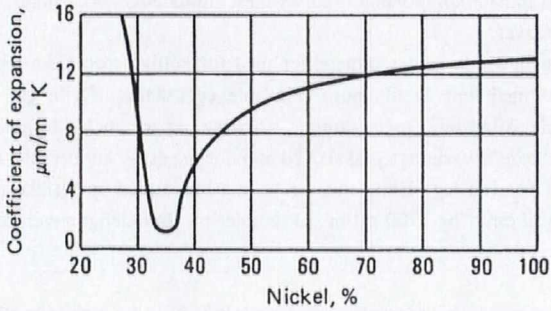

Fig. 4. Varmeudvidelseskoefficient ved 20 °C af Fe-Ni-legeringer som funktion af Ni-indhold (Ref.1).

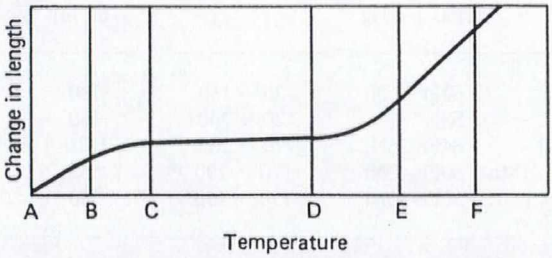

Fig. 5. Længdeændring af en typisk Invar som funktion af temperatur (Ref. 1).

Legeringen, der indeholder 36% Ni, har den laveste varmeudvidelseskoefficient og kaldes Invar eller Invar 36. Invar og lignende Fe-Ni-legeringer har kun meget lave udvidelseskoefficienter i et begrænset temperaturområde. Fig. 5 viser principielt, hvordan længdeændring varierer som funktion af temperatur af Invar. Kun i temperaturområdet fra C til D er udvidelseskoefficienten lav. Ved lave og høje temperaturer er udvidelseskoefficienten høj og af omtrent samme størrelse som af rent Fe ($11{,}7 \cdot 10^{-6}/°C$) og Ni ($9 \cdot 10^{-6}/°C$).

Invar er ferromagnetisk ved stuetemperatur og paramagnetisk ved høj temperatur. I temperaturområdet D til E mister Invar sin ferromagnetisme. Temperaturen D stiger med stigende Ni-indhold.

Varmebehandling og kolddeformation påvirker udvidelseskoefficienten af Invar. Tabel 6 viser eksempler på inflydelsen af varmebehandling af Invar.

Varmebehandlingen foretages normalt ved omkring 800 °C. Når legeringen bratkøles fra denne temperatur, formindskes udvidelseskoefficienten; men den er ikke stabil og vil ændres med tiden. Almindeligvis spændingsudglødes ved 350 - 400 °C og ældes ved omkring 90 °C i et eller flere døgn.

Tabel 6. Virkning af varmebehandling på udvidelseskoefficienten af Invar (Ref. 1).

Tilstand	Varmeudvidelseskoefficient ($\mu m/m \cdot °C$)	I temperaturområde
Smedet	1,7	17 → 100 °C
Smedet	3,1	17 → 250 °C
Bratkølet fra 830 °C	0,6	18 → 100 °C
Bratkølet fra 830 °C	2,5	18 → 250 °C
Bratkølet fra 830 °C og anløbet	1,0	16 → 100 °C
Bratkølet fra 830 °C og anløbet	2,4	16 → 250 °C
Kølet fra 830 °C til 20 °C på 19 h	2,0	16 → 100 °C
Kølet fra 830 °C til 20 °C på 19 h	2,9	16 → 250 °C

Kolddeformation formindsker udvidelseskoefficienten af Invar. Følgende data er for to charger af Invar (Ref. 1):

Tilstand	Varmeudvidelseskoefficient ved stuetemperatur ($\mu m/m \cdot {}^{\circ}C$)
Direkte fra varmvalsning	1,4 (charge 1)
Direkte fra varmvalsning	1,4 (charge 2)
Varmebehandlet og bratkølet	0,5 (charge 1)
Varmebehandlet og bratkølet	0,8 (charge 2)
Bratkølet og koldtrukket mere end 70%	0,14 (charge 1)
Bratkølet og koldtrukket mere end 70%	0,3 (charge 2)

Det er muligt ved bratkøling, kolddeformation og langvarige varmebehandlinger at opnå udvidelseskoefficienter, der er tæt på nul, men med mindre materialet anvendes i et lille temperaturområde omkring stuetemperatur, er udvidelseskoefficienten ikke stabil.

Uafhængigt af behandlingen har Invar en en-fase austenitisk struktur.

Af alle Fe-Ni-legeringerne er Invar den legering, hvis elasticitetsmodul varierer mest med temperaturen. Legeringer med Ni-indhold på 29% og 45% har en termoelastisk koefficient på nul, d.v.s. at elasticitetsmodulet ikke varierer med temperaturen; men fordi små variationer i Ni-indholdet medfører stor variation i termoelastisk modul, anvendes i praksis i stedet Elinvar (en Fe-Ni-Cr-legering), når det termoelastiske modul skal være så lille som muligt.

Legeringer med større og mindre Ni-indhold end 36% har større udvidelseskoefficient end Invar og har anvendelser, hvor materialerne har termiske udvidelser, der svarer til andre materialers. Et eksempel er Fe-39% Ni, der har en udvidelseskoefficient som visse glastyper med lav termisk udvidelse.

En Fe-Ni-legering med 42% Ni (Invar 42), hvis gennemsnitlige udvidelseskoefficient fra 20 °C til 400 °C er ca. 6 $\mu m/m \cdot {}^{\circ}C$, anvendes til halvlederkomponenter, i bimetaller, i elektriske pærer til gennemføringstråde (med et Cu-overfladelag) og i sealed beam lygter.

Fe-Ni-legeringer med 43-47% Ni-indhold anvendes til glasgennemføringer og til understøtninger for glødetråde i elektriske pærer.

Fe-Ni-Cr-legeringer

Den vigtigste legering af denne type er Elinvar, hvis sammensætning oprindeligt var 36% Ni, 12% Cr og rest Fe. De nyeste typer har en sammensætning, som er ca. 34% Ni, 5% Cr, 2% W, 1% Mn, 1% Si, 1% C og rest Fe.

Elinvar har en lav udvidelseskoefficient og et næsten konstant elasticitetsmodul over et stort temperaturområde. Sammenlignet med Fe-Ni-legeringer har Elinvar en termoelastisk koefficient, der er mindre følsom overfor små variationer i Ni-indholdet.

Fe-Ni-Cr-legeringer, der indeholder 42-48% Ni og 4-6% Cr, anvendes til glasforsegling, ikke alene på grund af deres passende udvidelseskoefficient, men også fordi et kromoxidlag

på overfladen forbedrer vædningen mellem glas og metal og frembringer en stærk glas-metalbinding.

Fe-Ni-Co-legeringer

Ved at erstatte en del af Ni-indholdet i Invar bliver legeringens udvidelseskoefficient lavere og mindre følsom overfor små variationer i varmebehandlingen. Disse Fe-Ni-Co-legeringer (Super Invar) har dog et mindre temperaturområde, hvor udvidelseskoefficienten er meget lav. Sammensætningen af Super Invar er nominelt 63% Fe, 32% Ni og 5% Co. Fig. 6 viser længdeudvidelse af Invar 36 og af Super Invar med den nævnte sammensætning i temperaturintervallet -60 °C til 200 °C.

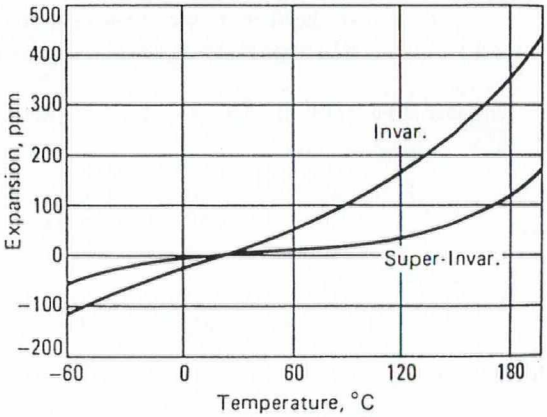

Fig. 6. Længdeændring som funktion af temperatur af Invar og Super Invar (Ref. 1).

En Fe-Ni-Co-legering med sammensætningen Fe - 29% Ni - 17% Co (Kovar) har en nominel udvidelseskoefficient på ca. 5 μm/m·°C og en temperatur D (Fig. 5) på ca. 450 °C. Kovar er velegnet til forsegling af borsilikatglasser.

Fe-Co-Cr-legeringer

En legering af denne type med sammensætningen ca. Fe-54%-Co-10% Cr har en meget lav og i visse tilfælde en negativ udvidelseskoefficient i temperaturområdet 0 °C til 100 °C. Denne legering har god korrosionsmodstand og omtales undertiden som rustfrit Invar.

Modningshærdelige legeringer med lav udvidelseskoefficient

Legeringer af Invar-typen (Fe-Ni legeringer) kan modningshærdes ved tilsætning af Ti. For at opnå den laveste udvidelseskoefficient skal Ni-indholdet forøges, da Ti reagerer med Ni og danner en intermetallisk fase under modningen. Flydespænding og trækstyrke kan forøges væsentligt som vist i Tabel 7. På den anden side stiger udvidelseskoefficienten noget.

Tabel 7. Mekaniske egenskaber af Fe - 42% Ni - 2,4% Ti-0,06% C (Ref.1).

Tilstand	Flydespænding (MPa)	Trækstyrke (MPa)	Brudforlængelse (%)
Opløsningsglødet	275	620	32
Opløsningsglødet og modningshærdet	825	1140	14
Opløsningsglødet, koldvalset 50% og modningshærdet	1140	1345	5

Legeringer af Elinvar-typen (Fe-Ni-Cr-legeringer) kan ligeledes modningshærdes ved tilsætning af Ti. Den termoelestiske koefficient kan varieres ved justering af varmebehandlingen. Tabel 8 viser mekaniske egenskaber af en Elinvar-legering.

Tabel 8. Mekaniske egenskaber af Fe - 42% Ni - 5,4% Cr - 2,4% Ti (Ref.1).

Tilstand	Flydespænding (MPa)	Trækstyrke (MPa)	Brud-forlængelse (%)	E-modul (GPa)
Opløsningsglødet	240	620	40	165
Opløsningsglødet og modningshærdet 3 h ved 730 °C	795	1240	18	185
Opløsningsglødet, koldvalset 50%	895	930	6	175
Opløsningsglødet, koldvalset 50% og modningshærdet 1 h ved 730 °C	1240	1380	7	185

Legeringer af denne type er specielt velegnede til komponenter i trykmåleinstrumenter (Bourdonrør, aneroidkapsler og fjedre) og til stemmegafler.

Legeringer af typen 38% Ni - 13% Cr - små mængder Nb, Ti og Al - rest Fe har i modningshærdet tilstand stor styrke og lav udvidelseskoefficient ved temperaturer op til 650 °C. De anvendes i flyindustrien i motorer, hvor høj styrke i forhold til vægt har medført vægtbesparelser.

Referencer

1. ASM Handbook, Vol.2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 1990.
2. Nikrothal Handboken, Aktiebolaget Kanthal, 73401 Hallstahammar, 1970.
3. Kanthal Handboken, Bulten-Kanthal AB, 73401 Hallstahammar, 1972.
4. Kanthal Bimetall Handboken, Aktiebolaget Kanthal, 73401 Hallstahammar, 1970.