

Hoogtemperatuursolderen

vm 82

VNM

Hoogtemperatuursolderen

vm 82



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00
Telefax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: <http://www.fme.nl>

© Vereniging FME-CWM/augustus 2009 - 2^e druk

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
afdeling Techniek en Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon: 079 - 353 11 00
telefax: 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: <http://www.fme.nl>

Hoogtemperatuursolderen

toelichting

Voor u ligt de voorlichtingspublicatie "Hoogtemperatuursolderen". Deze publicatie is bedoeld voor allen die te maken hebben of te maken krijgen met de techniek van het hoogtemperatuursolderen. Daarbij moet worden gedacht aan bijvoorbeeld constructeurs, ontwerpers, lastechnici, werkvoorbereiders, enzovoorts.

Deze voorlichtingspublicatie is een update van de in 1992 verschenen eerste druk die indertijd onder auspiciën van de NIL-werkgroep van de Technische Commissie I-A Subcie Hoogtemperatuursolderen is opgesteld.

De updating was noodzakelijk, daar zich in de afgelopen jaren een groot aantal ontwikkelingen heeft voorgedaan op het gebied van soldeertechnieken.

Het Materials Innovation Institute (M2i), voorheen opererend als het NIMR (Netherlands Institute of Metals Research) heeft geld ter beschikking gesteld om deze nieuwe publicatie te laten opstellen en aan te passen aan de stand der techniek. De FME heeft de coördinatie daarvan op zich genomen en voor de aanpassing van de inhoud van deze voorlichtingspublicatie het NIL ingeschakeld.

samengesteld in 1992 door:

H.H. van der Sluis
K.M. Broek

v/h Instituut voor Produktie en Logistiek TNO (IPL)
Energieonderzoek Centrum Nederland ECN

aangepast in 2009 door:

H.H. van der Sluis (Adviseur NIL)

Als co-lezers hebben de leden van de NIL TC I-A Subcie Hoogtemperatuursolderen en Th. de Haan (Corus) een wezenlijke bijdrage geleverd.

Eindredactie: P. Boers (Vereniging FME-CWM).

samenstelling werkgroep 1992

K.M. Broek
P. Hanenburg
J. Kamans
G.A. Kool
H.H. van der Sluis
P.Th.H. Steege
G.W. Turk

Energieonderzoek Centrum Nederland ECN, Petten
Nederlandse Philips Bedrijven B.V., Acht
v/h Holec Systemen en Componenten B.V., Hengelo
Nationaal Lucht- en Ruimtevaart Laboratorium, Emmeloord
v/h Instituut voor Produktie en Logistiek TNO (IPL), Apeldoorn
v/h Vacuum Soldeer Centrum V.O.F., Diemen
v/h Drijfhout B.V., Amsterdam

technische informatie

Nederlands Instituut voor Lastechniek

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	088 - 400 85 60
- telefax	079 - 353 11 78
- e-mail	info@nil.nl
- website	www.nil.nl

informatie over en bestelling van VM-publicaties, Praktijkaanbevelingen en Tech-Info bladen

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	079 - 353 11 00
- telefax	079 - 353 13 65
- e-mail	info@fme.nl
- website	www.fme.nl

Inhoud

1 Inleiding	6	11 Aluminium en aluminiumlegeringen	38
1.1 Algemeen	6	11.1 Inleiding	38
1.2 Hoogtemperatuursolderen	6	11.2 Materiaalcombinaties	38
1.3 Lassen	7	11.3 Eigenschappen	38
1.4 Lijmen	7	11.4 Voorbehandelingen	39
1.5 Hardsolderen	7	11.5 Soldeermethoden	39
2 Principe en achtergrond	8	11.6 Soldeermaterialen	41
2.1 Definitie	8	11.7 Controle en nabehandelingen	41
2.2 Soldeermechanismen	8	11.8 Toepassingen	41
2.3 Materiaalkundige aspecten	9	12 Magnesium en magnesiumlegeringen	42
2.4 Voorwaarden voor bevochtiging	10	12.1 Inleiding	42
3 Atmosfeer	12	12.2 Materiaalcombinaties	42
3.1 Werking van beheerste atmosferen	12	12.3 Eigenschappen	42
3.2 Reducerende atmosfeer	12	12.4 Voorbehandelingen	42
3.3 Beschermende atmosfeer	13	12.5 Soldeermethoden	43
3.4 Vacuüm	14	12.6 Soldeermaterialen	43
4 Apparatuur	15	12.7 Controle en nabehandelingen	43
4.1 Indeling	15	12.8 Toepassingen	44
4.2 De retortoven	15	13 Koper en koperlegeringen	45
4.3 De vacuümoven	15	13.1 Inleiding	45
4.4 De transportbandoven	16	13.2 Materiaalcombinaties	45
4.5 Installaties voor inductiefsolderen	17	13.3 Eigenschappen	45
5 Constructieve aspecten	18	13.4 Voorbehandelingen	45
5.1 Naadvorm	18	13.5 Soldeermethoden	45
5.2 Oppervlaktegesteldheid	18	13.6 Soldeermaterialen	46
5.3 Spleetbreedte	19	13.7 Controle en nabehandelingen	46
5.4 Thermische uitzetting	20	13.8 Toepassingen	46
5.5 Spleetinstelling bij ongelijksoortige materialen	21	14 Koolstofstaal	47
5.6 Monteren en fixeren	21	14.1 Inleiding	47
5.7 Doseervormen	21	14.2 Materiaalcombinaties	47
5.8 Materiaalbeïnvloeding	22	14.3 Eigenschappen	47
6 Werkplaatstechnische aspecten	23	14.4 Voorbehandelingen	47
6.1 Voorbewerken	23	14.5 Soldeermethoden	47
6.2 Reinigen	23	14.6 Soldeermaterialen	48
6.3 Monteren	23	14.7 Controle en nabehandelingen	48
6.4 Solderen in ovens	24	14.8 Toepassingen	49
6.5 Nabewerken	25	15 Gietijzer	50
7 Kwaliteitsbeheersing	26	15.1 Inleiding	50
7.1 Inleiding	26	15.2 Materiaalcombinaties	50
7.2 Soldeerprocedure	26	15.3 Eigenschappen	50
7.3 Controle	26	15.4 Voorbehandelingen	51
7.4 Normen soldeermateriaal	26	15.5 Soldeermethoden	51
7.5 Keuren van verbindingen	27	15.6 Soldeermaterialen	51
7.6 Overzicht NEN-EN normen, hard- en hoogtemperatuursoldeernormen	28	15.7 Controle en nabehandelingen	51
8 Economische aspecten	29	15.8 Toepassingen	52
8.1 Overzicht	29	16 Roestvast staal	53
8.2 Opbouw productkosten	29	16.1 Inleiding	53
8.3 Opbouw soldeerkosten	30	16.2 Materiaalcombinaties	53
9 Veiligheid en gezondheid	31	16.3 Eigenschappen	53
9.1 Schadelijke stoffen	31	16.4 Voorbehandelingen	54
9.2 Afvalverwerking	31	16.5 Soldeermethoden	55
10 Soldeermaterialen	32	16.6 Soldeermaterialen	55
10.1 Inleiding	32	16.7 Controle en nabehandelingen	55
10.2 Zilverbasis-soldeersoorten	33	16.8 Toepassingen	55
10.3 Palladiumhoudende soldeersoorten	33		
10.4 Goudbasis-soldeersoorten	35		
10.5 Nikkelbasis-soldeersoorten	35		
10.6 Koperbasis-soldeersoorten	36		
10.7 Aluminiumbasis-soldeersoorten	36		

17 Nikkel- en superlegeringen; ODS-materialen	57	21 Keramiek	72
17.1 Inleiding	57	21.1 Inleiding	72
17.2 Nikkel- en superlegeringen	57	21.2 Materiaalcombinaties	72
17.2.1 Inleiding	57	21.3 Eigenschappen	72
17.2.2 Materiaalcombinaties	58	21.4 Voorbehandelingen	72
17.2.3 Eigenschappen	58	21.5 Soldeermethoden	73
17.2.4 Voorbehandelingen	58	21.6 Soldeermaterialen	74
17.2.5 Soldeermethoden	58	21.7 Controle en nabehandelingen	74
17.2.6 Soldeermaterialen	58	21.8 Toepassingen	74
17.2.7 Controle en nabehandelingen	59		
17.2.8 Toepassingen	59	22 Grafiet	76
17.3 ODS-materialen	60	22.1 Inleiding	76
17.3.1 Inleiding	60	22.2 Materiaalcombinaties	76
17.3.2 Materiaalcombinaties	61	22.3 Eigenschappen	76
17.3.3 Eigenschappen	61	22.4 Voorbehandelingen	76
17.3.4 Voorbehandelingen	61	22.5 Soldeermethoden	76
17.3.5 Soldeermethoden	61	22.6 Soldeermaterialen	76
17.3.6 Soldeermaterialen	62	22.7 Controle en nabehandelingen	76
17.3.7 Controle en nabehandelingen	62	22.8 Toepassingen	76
17.3.8 Toepassingen	62		
18 Titaan en titaanlegeringen	63	Literatuur	78
18.1 Inleiding	63	Trefwoordenregister	79
18.2 Materiaalcombinaties	63		
18.3 Eigenschappen	63		
18.4 Voorbehandelingen	63		
18.5 Soldeermethoden	63		
18.6 Soldeermaterialen	63		
18.7 Controle en nabehandelingen	64		
18.8 Toepassingen	64		
18 Hoogsmeltende metalen	66		
19.1 Inleiding	66		
19.2 Molybdeen	66		
19.2.1 Eigenschappen	66		
19.2.2 Voorbehandelingen	66		
19.2.3 Soldeermethoden en soldeermaterialen	66		
19.2.4 Controle en nabehandelingen	66		
19.3 Tantal	66		
19.3.1 Eigenschappen	66		
19.3.2 Voorbehandelingen	66		
19.3.3 Soldeermethoden en soldeermaterialen	67		
19.3.4 Controle en nabehandelingen	67		
19.4 Wolfram	67		
19.4.1 Eigenschappen	67		
19.4.2 Voorbehandelingen	67		
19.4.3 Soldeermethoden en soldeermaterialen	67		
19.4.4 Controle en nabehandelingen	67		
19.5 Niobium	67		
19.5.1 Eigenschappen	67		
19.5.2 Voorbehandelingen	67		
19.5.3 Soldeermethoden en soldeermaterialen	68		
19.5.4 Controle en nabehandelingen	68		
19.6 Toepassingen	68		
20 Hardmetaal	69		
20.1 Inleiding	69		
20.2 Materiaalcombinaties	69		
20.3 Eigenschappen	69		
20.4 Voorbehandelingen	69		
20.5 Soldeermethoden	70		
20.6 Soldeermaterialen	70		
20.7 Controle en nabehandelingen	70		
20.8 Toepassingen	71		

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Algemeen

Het hoogtemperatuursolderen is een geavanceerde verbindingstechnologie, waarmee naast processen als lassen en lijmen hoogwaardige verbindingen kunnen worden verkregen. De kwaliteit van de verbinding is hoger dan die van de reeds lang bestaande zacht- en hardsoldeertechnieken. Een veelgebruikte omschrijving voor solderen is het aan elkaar bevestigen van werkstukdelen met een gesmolten metaal(legering); het smeltpunt c.q. het smelttraject hiervan ligt lager dan dat van de niet-meetsmelende werkstukmaterialen. Ook het hoogtemperatuursolderen voldoet aan deze omschrijving.

Bij het solderen wordt een onderscheid gemaakt naar de werktemperatuur:

- ▶ zachtsolderen: beneden 450 °C;
- ▶ hardsolderen: boven 450 °C;
- ▶ hoogtemperatuursolderen: veelal boven 800 °C.

Het hoogtemperatuursolderen onderscheidt zich van het hard- en zachtsolderen, doordat géén gebruik wordt gemaakt van een vloeimiddel. De reducerende werking van het vloeimiddel, vóór en tijdens het solderen, wordt bij het hoogtemperatuursolderen verkregen door het toepassen van een gas of vacuüm. Doordat bij het solderen in ovens de procesparameters nauwkeurig instelbaar zijn, verkrijgt men goed reproduceerbare verbindingen. In een reducerend of beschermend gas of in vacuüm treedt geen oxidatie van het werkstukmetaal op; er hoeft daarom geen reiniging achteraf te worden uitgevoerd.

De ontwerper van een product zal in een vroeg stadium een keuze moeten maken uit een aantal verbindingstechnieken. Dit heeft invloed op onder meer de materiaalkeuze, de vorm van de verbinding en de maattoleranties van de

productonderdelen. In het onderstaande worden lijmen, lassen (TIG; MIG/MAG) en hardsolderen in het kort vergeleken met hoogtemperatuursolderen. Bovendien wordt in tabel 1.1 een vergelijkingsoverzicht van de vier genoemde technieken getoond. Hierdoor zal de lezer het hoogtemperatuursolderen globaal op zijn voor- en nadelen kunnen beoordelen.

1.2 Hoogtemperatuursolderen

Kenmerken:

- ▶ Er kunnen sterke verbindingen tot stand worden gebracht en de reproduceerbaarheid van het proces is hoog;
- ▶ er kunnen veel metalen aan zichzelf en aan andersoortige metalen worden verbonden. Ook metaal-keramiekverbindingen zijn mogelijk;
- ▶ de overlapverbinding verdient de voorkeur boven de stompe verbinding;
- ▶ door de gelijkmatige verwarming bij ovensolderen treden er weinig vervormingen op, kunnen er dik-dun-verbindingen worden gemaakt en is de maatnauwkeurigheid van de producten hoog;
- ▶ de grootte van producten wordt beperkt door de ovenafmetingen. Gangbare vacuümovens hebben een werkzame doorsnede van 1 meter en een hoogte of diepte van 1,5 meter;
- ▶ bij het solderen wordt van de zuigende werking van een nauwe spleet (capillair) gebruik gemaakt. De constructeur moet hiermee rekening houden bij zijn ontwerp;
- ▶ aan de voorbereiding dient de nodige aandacht te worden geschonken: reiniging, oppervlakteruwheid en maattolerantie van de spleet zijn van groot belang. Gereinigde productdelen dienen met handschoenen te worden aangepakt;
- ▶ de nabewerking van gesoldeerde producten is meestal gering of niet nodig;
- ▶ het is in het algemeen niet mogelijk om het product te zien tijdens het solderen. Alle procesparameters moeten daarom vooraf goed worden overdacht en ingesteld;
- ▶ het hoogtemperatuursolderen is uitermate aantrekkelijk

tabel 1.1 Vergelijking van enkele verbindingstechnieken

	HT-solderen	Lassen	Lijmen	Hardsolderen
maatvastheid	+	–	+	o
schoon en blank uiterlijk	+	o	+	–
toepasbaarheid op dun materiaal	+	o	+	o
dik-dun-verbinding	+	–	+	o
meerdere verbindingen in één procesgang	+	–	+	o
verschillende metalen aan elkaar	+	–	+	+
metaal-keramiekverbinding	+	–	+	–
sterkte van de verbinding	+	+	–	o
sterkte van de verbinding $T > 400\text{ °C}$	+	+	–	–
vacuümdichtheid van verbinding	+	+	–	–
prijs van verbinding bij massaproductie	+	o	+	o
reproduceerbaarheid	+	o	+	o
invloed op basismateriaal	o	–	+	o
corrosievastheid van verbinding	o	+	+	–
inspecteerbaarheid van verbinding	o	+	–	o
mogelijkheid voor grote constructies	–	+	+	o
hoeveelheid voorbereiding	–	o	–	o
toepasbaarheid op kunststoffen	–	–	+	–
aanschafkosten apparatuur	–	o	+	+

+ = goed; o = redelijk; – = slecht.
N.B.: kolom "lassen" betreft TIG en MIG/MAG.

voor serie- en massafabricage van kleine producten, voor producten met een ingewikkelde vormgeving of voor producten waarin meerdere verbindingen tegelijkertijd moeten worden gerealiseerd;

- ▶ de soldeerwerkplaats dient schoon te zijn (geen ver-spanende bewerkingen in dezelfde ruimte);
- ▶ het hoogtemperatuursolderen zal veelal bij een loon-bedrijf plaatsvinden, omdat de aanschaf van een oven een grote investering vergt. Ook aan de vakbekwaamheid van het personeel dienen zekere eisen te worden gesteld.

1.3 Lassen

In het onderstaande wordt uitgegaan van relatief schone en hoogwaardige smeltlastechnieken als TIG- en MIG/MAG-lassen.

Overeenkomst met hoogtemperatuursolderen:

- ▶ Goede sterkte van de verbinding.

Verschillen met hoogtemperatuursolderen:

- ▶ De materiaalkeuze voor producten is beperkt: staal, roestvast staal en aluminium zijn goed te lassen;
- ▶ bij het lassen treedt altijd een structuurverandering op in en naast de las;
- ▶ de stompe verbinding heeft de voorkeur boven de overlapverbinding; ook hoeklassen zijn goed mogelijk;
- ▶ door de lokale verhitting bij lassen is de vervorming in producten groter;
- ▶ dik-dun-verbindingen zijn moeilijk realiseerbaar;
- ▶ de toegestane toleranties van de naad zijn groot in vergelijking met solderen. Bovendien kan bij het lassen een grote spleet worden gevuld;
- ▶ de te lassen naad moet goed bereikbaar zijn voor de lastoorts; dit is een beperking ten opzichte van (hoogtemperatuur)solderen;
- ▶ aan de afmetingen van een product worden geen eisen gesteld, wel aan de dikte van de wanden: deze mogen niet te dik en vooral niet te dun zijn;
- ▶ de voorbereiding is bij lassen minder kritisch, zowel wat de reiniging betreft als de mechanische voorbereiding van de naad;
- ▶ de nabewerking kost meer aandacht. De omgeving van de lasnaad is vaak geoxideerd en soms zal de las moeten worden geslepen;
- ▶ het lassen kan in het eigen bedrijf plaatsvinden. De investeringen in lasapparatuur en afzuiginstallatie liggen op een aanvaardbaar niveau. Van het uitvoerend personeel wordt echter een hoge vakbekwaamheid vereist.

1.4 Lijmen

Overeenkomsten met hoogtemperatuursolderen:

- ▶ Verschillende materialen kunnen aan elkaar worden bevestigd;
- ▶ naadvorm: bij voorkeur overlapverbinding;
- ▶ dik-dun-verbindingen zijn mogelijk; meerdere verbindingen zijn gelijktijdig te maken; ingewikkelde vormen zijn ook mogelijk;
- ▶ een goede reiniging van de werkstukdelen is noodzakelijk;
- ▶ weinig of geen nabewerking;
- ▶ een schone werkplaats is vereist; voor sommige toepassingen is een stofarme ruimte noodzakelijk;
- ▶ ook hier worden zekere eisen aan de vakbekwaamheid van het personeel gesteld.

Verschillen met hoogtemperatuursolderen:

- ▶ De sterkte van een lijmvverbinding is gering. Deze ligt op het niveau van een zachtsoldeerverbinding;
- ▶ voor kunststoffen en composieten is lijmen veelal de aangewezen methode;
- ▶ lijmen veroorzaakt geen structuurverandering in het basismetaal;
- ▶ als technische keramiek wordt gebruikt vanwege de hoge temperatuurbestendigheid, dan is lijmen meestal niet zinvol, tenzij speciale (anorganische) lijmsorten worden gebruikt. Verhoging van de temperatuur leidt bij de organische lijmsorten tot een verlaging van de verbindingsterkte of zelfs tot ontleding;
- ▶ de instelling en handhaving van de spleetbreedte is eenvoudiger, evenals de fixatie van de productdelen;
- ▶ een lijmvverbinding kan meestal in eigen bedrijf worden gerealiseerd. De investeringen zijn laag; wel moet aan een goede afzuiging van schadelijke gassen worden gedacht;
- ▶ sommige hoogwaardige lijmvverbindingen moeten tot stand worden gebracht in een autoclaaf bij verhoogde temperatuur en druk.

1.5 Hardsolderen

Overeenkomsten met hoogtemperatuursolderen:

- ▶ Verschillende metalen zijn aan zichzelf en aan ander-soortige metalen te bevestigen;
- ▶ naadvorm: veelal overlap;
- ▶ dik-dun-verbindingen zijn mogelijk.

Verschillen met hoogtemperatuursolderen:

- ▶ De noodzaak om vloeimiddel te gebruiken. Daardoor ontstaan in de verbinding veelal vloeimiddelinsluitingen. Deze veroorzaken een lagere sterkte. Het gebruik van en achterblijven van vloeimiddelen verhoogt de kans op corrosie;
- ▶ bij een lage soldeertemperatuur zullen de structuurveranderingen in het productmateriaal beperkt blijven;
- ▶ verwarming met de vlam geeft:
 - vervormingen in het product door lokale verhitting;
 - een aangetast uiterlijk;
 - matige reproduceerbaarheid van de verbinding;
 - kans op plaatselijke oververhitting, waardoor de vloeimiddelwerking kan worden tenietgedaan;
 - dat door plaatselijke oververhitting structuuromzettingen kunnen ontstaan in het basismateriaal.
- ▶ de afmetingen van producten worden beperkt door de warmte-inhoud: grote stukken kunnen niet snel genoeg worden opgewarmd met de vlam. Verwarmen in ovens kan soms uitkomst brengen;
- ▶ in verband met de lagere sterkte is er een grotere overlapnaad nodig;
- ▶ de voorbereiding en reiniging zijn minder kritisch; de tolerantie op de spleetbreedte is meestal groter;
- ▶ het proces kan visueel worden gevolgd; de soldeerder kan de spleet desgewenst navullen met extra soldeer-materiaal;
- ▶ aan de werkplaats worden weinig eisen gesteld; hardsolderen kan desnoods in het veld plaatsvinden. In een afgesloten ruimte is een afzuiging noodzakelijk;
- ▶ bij handsolderen: goedkope apparatuur. Bij automatisch vlamsolderen: dure apparatuur.

Hoofdstuk 2

Principe en achtergrond

2.1 Definitie

Onder hoogtemperatuursolderen wordt verstaan:
Het verbinden van twee (of meer) materialen door middel van solderen bij hoge temperatuur in een beheerste atmosfeer, zonder gebruik te maken van een vloeimiddel.

Deze omschrijving vraagt om een nadere uitleg van de begrippen "hoge temperatuur" en "beheerste atmosfeer".

Het *temperatuurgebied* heeft als ondergrens 800 °C en als bovengrens 1300 °C. De bovengrens is een praktisch gegeven uit oogpunt van bestaande soldeerapparatuur, maar kan hoger liggen afhankelijk van het toegepaste soldeer en het te solderen werkstuk. Het vacuumsolderen van aluminium is een uitzondering: hier ligt de ondergrens bij ongeveer 600 °C in verband met het lage smeltpunt van aluminium.

De *beheerste atmosfeer* kan een reducerend of een inert gas zijn, terwijl het soldeerproces ook in vacuüm kan worden uitgevoerd.

De beheerste atmosfeer, in combinatie met de hoge temperatuur, vervangt de werking van het vloeimiddel. Hierdoor is er een aantal aantrekkelijke economische en kwalitatieve voordelen te behalen:

- ▶ het vloeimiddel hoeft niet te worden aangebracht;
- ▶ er is geen kans op het ingesloten raken van vloeimiddelresten. De vulgraad wordt hierdoor sterk verhoogd;
- ▶ er is geen kans op corrosie tengevolge van achtergebleven vloeimiddelresten;
- ▶ na het solderen is het werkstuk vrij van lastig te verwijderen vloeimiddelresten;
- ▶ het esthetisch uiterlijk van de verbinding is verbeterd.

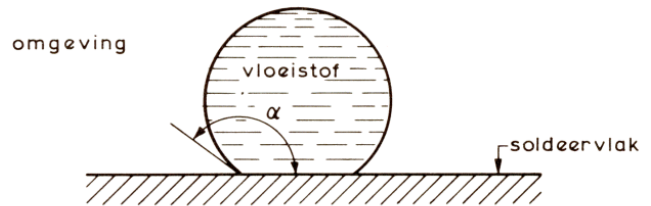
De afstand tussen de te solderen vlakken is een belangrijke parameter bij het soldeerproces. Bij het benoemen van deze afstand wordt onderscheid gemaakt tussen de situatie voor het solderen en na het solderen:

- ▶ voor het solderen wordt de *soldeerspleet* ingesteld op een bepaalde *spleetbreedte*;
- ▶ na het solderen is er sprake van een al dan niet gevulde *soldeernaad* met een bijbehorende *naaddikte*.

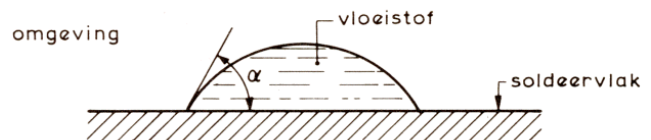
2.2 Soldeermechanismen

Alvorens aan te geven op welk principe het hoogtemperatuursolderen berust, zal eerst worden besproken welke stappen tijdens het soldeerproces in het algemeen moeten worden doorlopen:

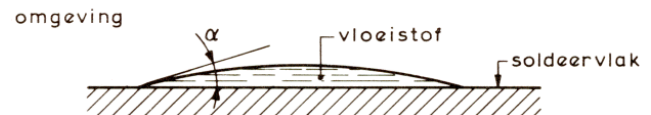
- a. Bij het tot stand brengen van een gesoldeerde verbinding dient bevochtiging op te treden. Bevochtiging is een wisselwerking tussen gesmolten soldeer en basismateriaal op voldoende hoge temperatuur, waardoor het soldeer kan uitvloeien op het basismateriaal. Het uitvloeien van het soldeer kan worden beoordeeld naar de vorm van de begrenzing van de vloeistoffilm (figuur 2.1). De bevochtighoek of contacthoek α is een maat voor het bevochtigend vermogen. Hoe groter de bevochtighoek, des te slechter is de bevochtiging en omgekeerd. Een druppel kwik op een glasplaat is een voorbeeld van "slecht bevochtigen". De bevochtighoek is hier 180 graden.



slecht : b.v. waterdruppel op een vet oppervlak



matig : b.v. druppel op een schoon oppervlak



goed : druppel op een voorbehandeld oppervlak

kleinere hoek α betekent betere bevochtiging

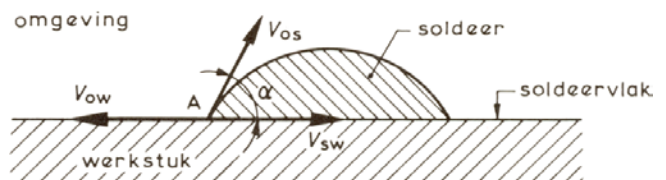
figuur 2.1 Bevochtiging

Het gedrag van een druppel soldeer op een metaaloppervlak wordt bepaald door het thermodynamisch evenwicht, dat met een vectordiagram kan worden weergegeven (figuur 2.2).

In het punt A van dit driedfasig systeem ontstaat een evenwicht, dat wordt beheerst door drie spannings-toestanden. Het evenwicht is bereikt wanneer:

$$V_{ow} = V_{sw} + V_{os} \cdot \cos \alpha \quad (2.1)$$

Hierin is V_{ow} de kracht die het soldeer over het werkstuk verspreidt.



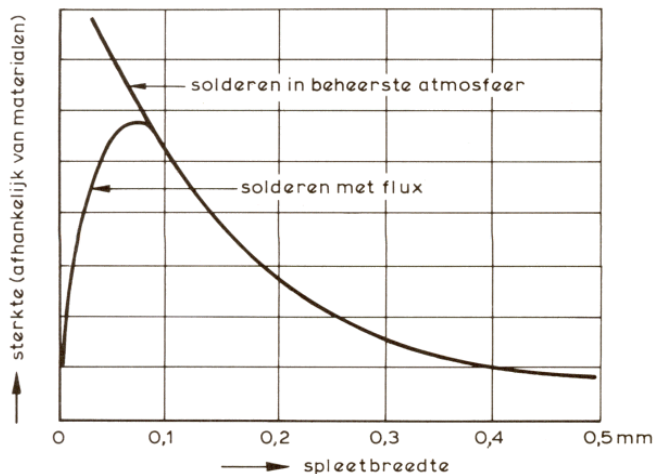
V_{os} = oppervlakspanning omgeving/vloeibaar soldeer

V_{ow} = oppervlakspanning omgeving/werkstuk

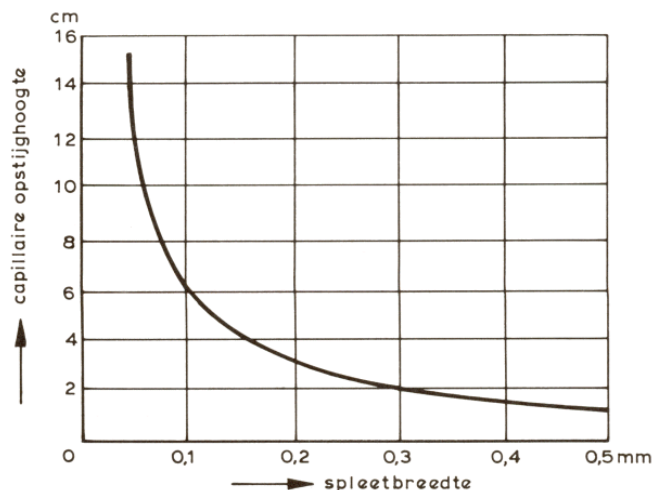
V_{sw} = grensvlakspanning vloeibaar soldeer/werkstuk

figuur 2.2 Vectordiagram van bevochtiging

- b. Vervolgens dient het gesmolten soldeer te vloeien in de soldeerspleet, hetgeen berust op *capillaire werking*. De afmeting van de spleetbreedte bij hoogtemperatuursolderen ligt in de orde grootte van 0,05 mm. De spleetbreedte is van het grootste belang voor de sterkte van de soldeerverbinding (figuur 2.3) en voor de capillaire werking (figuur 2.4).



figuur 2.3 Sterkte van de soldeerverbinding afhankelijk van de spleetbreedte



figuur 2.4 Capillaire opstijghoogte afhankelijk van de spleetbreedte

De capillaire opstijghoogte wordt gegeven door:

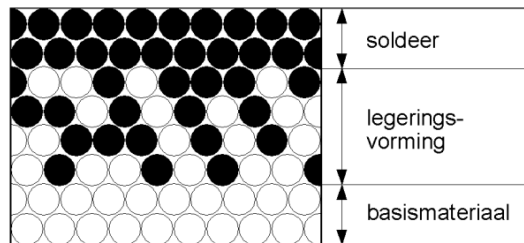
$$h = \frac{2 \cdot V_{os} \cdot \cos \alpha}{b \cdot \sigma_L \cdot g}$$

Hierin is:

V_{os} = oppervlaktespanning vloeibaar soldeer/werkstuk;
 α = contacthoek; b = spleetbreedte; σ_L = dichtheid vloeibaar soldeer en g = versnelling van de zwaartekracht.

Bij een gegeven combinatie van basismateriaal en soldeermateriaal is de spleetbreedte b de enige variabele. Bij kleiner wordende spleten neemt de stijghoogte relatief snel toe.

- c. Tenslotte wordt *hechting* tussen soldeer en basismateriaal verkregen, indien een soldeerbestanddeel (element) een legering of intermetallische verbinding vormt met een hoofdbestanddeel (element) uit het basismateriaal (figuur 2.5). Hierbij dient te worden opgemerkt, dat tengevolge hiervan de samenstelling van het toevoegmetaal zich kan wijzigen, waardoor de bevochtiging en het uitvloeien worden beïnvloed.



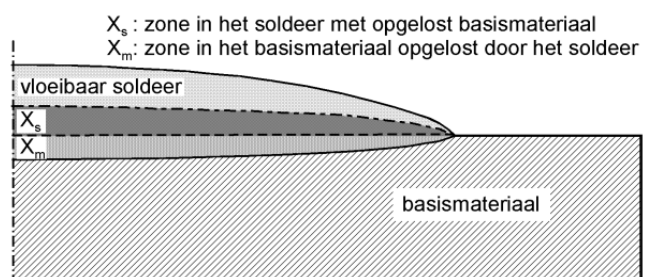
figuur 2.5 Legeringsvormen optredend tussen soldeer en basismateriaal

2.3 Materiaalkundige aspecten

De wederzijdse beïnvloeding van soldeer- en basismateriaal tijdens het soldeerproces kan aanleiding geven tot een aantal effecten omschreven als *erosie*, *penetratie* en *diffusie*. Deze effecten kunnen van invloed zijn, indien aan de gesoldeerde verbinding eisen worden gesteld omtrent lekdichtheid, corrosiebestendigheid of mechanische sterkte.

- a. Onder **erosie** wordt verstaan het in oplossing gaan van het vaste basismateriaal in het gesmolten soldeer (figuur 2.6). Tengevolge van de erosie vermindert de effectieve dikte van het basismateriaal, hetgeen vooral van invloed is op de sterkte van gesoldeerde dunwandige delen.

In feite is erosie een zogenaamde secundaire reactie die door diffusie wordt veroorzaakt. Door de diffusie ontstaat een verandering in de samenstelling van het basismateriaal, hetgeen een smeltpuntsdaling tot gevolg kan hebben. Dit leidt dan tot het oplossen van het basismateriaal in het soldeer, de erosie.



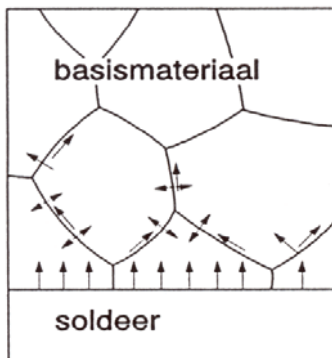
figuur 2.6 Aantastingsgedrag van vloeibaar soldeer

- b. **Penetratie** is het inlopen van vloeibaar soldeer tussen de korrelgrenzen van het basismateriaal. Het vloeibare soldeer veroorzaakt een inhomogeniteit in het basismateriaal. De samenhang tussen de korrels wordt verstoord.

- c. **Diffusie** kan op twee manieren plaatsvinden, namelijk door diffusie op de korrelgrenzen en door vaste stof diffusie (figuur 2.7).

Bij *korrelgrensdifusie* verplaatsen atomen uit het soldeer zich langs de korrelgrenzen van het basismateriaal. Van de twee diffusievormen is dit de snelste. De diffusiesnelheid van kleine atomen is in het algemeen groter dan die van grote atomen. Kleine atomen als borium dringen dan ook verder door in het basismateriaal en vormen intermetallische verbindingen op de korrelgrenzen.

Bij *vaste stof diffusie* lopen atomen uit het soldeer door de korrels van het basismateriaal. Dit proces verloopt aanmerkelijk langzamer dan korrelgrensdifusie.



figuur 2.7 Diffusie van elementen uit het soldeer in het basismateriaal via: korrelgrens (relatief snel); vaste stof (relatief langzaam)

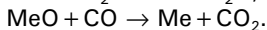
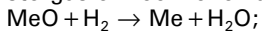
Doordat ook hier de diffusiesnelheid van grote atomen het kleinste is, zullen de grote atomen uit het soldeer niet of nauwelijks doordringen in de korrels van het basismateriaal.

2.4 Voorwaarden voor bevochtiging

Bevochtiging van het te solderen oppervlak treedt op, indien dit vrij is van vuil, vet en metaaloxiden.

Het vuil- en vetvrij zijn wordt verkregen door het reinigen van het oppervlak met bijvoorbeeld organische oplosmiddelen of (bij voorkeur) met alkalische reinigingsmiddelen. Het verwijderen van metaaloxiden tijdens het soldeerproces kan bij hoge temperatuur in een beheerste atmosfeer als volgt geschieden:

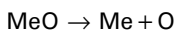
- a. door *reductie van de oxiden*, bijvoorbeeld door waterstofgas of koolmonoxidegas:



(MeO = metaaloxide; Me = metaal)

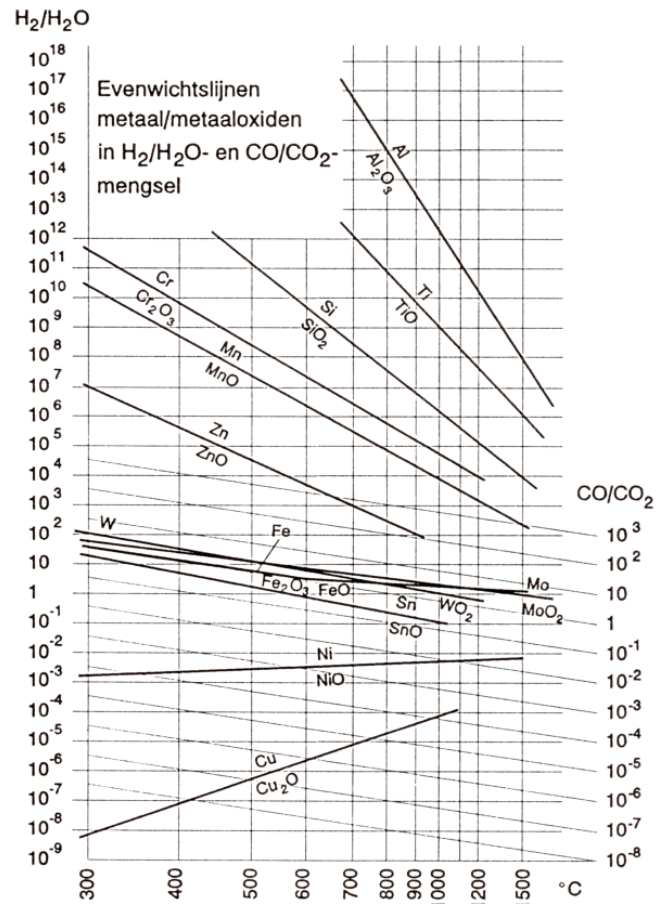
Hierbij dient het ontstane én aanwezige H_2O laag in concentratie te zijn, daar anders de reactie staakt of zelfs in omgekeerde richting gaat lopen. Met andere woorden: het gas dient een laag dauwpunt te hebben. Op deze wijze kan bijvoorbeeld de chroomoxidehuid van roestvast staal worden gereduceerd, waardoor roestvast staal bevochtigbaar wordt. Aluminium- en titaanhoudende staalsoorten of superlegeringen laten zich niet zonder meer onder reducerend gas solderen, in tegenstelling tot materialen als koper, nikkel, wolfram en molybdeen (figuur 2.8).

- b. door *dissociatie*. Dit is het bij hoge temperatuur ontleden van het metaaloxide:

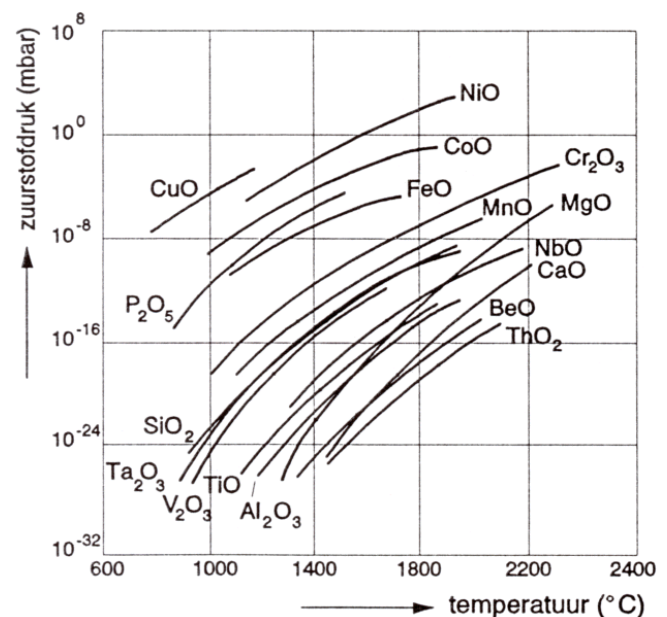


Deze dissociatie treedt op bij hoge temperatuur in vacuüm, bijvoorbeeld voor oxiden van koper, nikkel en ijzer (in ongelegeerd staal). Uit figuur 2.9 blijkt echter dat voor de meeste metalen hoge temperaturen en/of lage zuurstofpartiaaldrukken nodig zijn, om de dissociatie van het metaaloxide te laten optreden. Hieruit lijkt te volgen dat het solderen in vacuüm praktisch niet mogelijk is. Dat bepaalde metalen toch in vacuüm te solderen zijn, vindt zijn grondslag in de hiernavolgende mechanismen.

- c. door *verdamping* van de oxidehuid bij hoge temperatuur, indien het smelt- en kookpunt daarvan aanzienlijk lager liggen dan dat van het metaal zelf; dit is het geval voor bijvoorbeeld molybdeenoxide.



figuur 2.8 Evenwichtsdiagram voor metaal/metaaloxiden in twee gasmengsels:
- links: $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$
- rechts: CO/CO_2



figuur 2.9 Metaal/metaaloxide-evenwichtscurven in afhankelijkheid van de zuurstofpartiaaldruk en van de temperatuur

- d. door *diffusie* van de zuurstof uit de oxidehuid in het metaal; dit treedt op bij hoge temperatuur in vacuüm, bijvoorbeeld bij titaan.
- e. door het "*openspringen*" en "*afspringen*" van de oxidehuid bij hoge temperatuur. De oorzaak is een gevolg van een verschil in uitzettingscoëfficiënt tussen de oxidehuid en het basismateriaal; door het openspringen kan het vloeibare soldeer onder de oxidehuid dringen.
- f. door de *aanwezigheid van koolstof* in bijvoorbeeld gelegeerd gereedschapsstaal. Dat kan bij hoge temperatuur een reducerende werking op de oxidehuid hebben.
- g. door de zogenaamde "*getterwerking*" van metalen die zich in de beheerste atmosfeer bevinden, maar zelf niet aan het solderen deelnemen. De metalen "vangen" de zich in de beheerste atmosfeer bevindende zuurstof c.q. waterdamp en binden deze aan zich, waardoor de zuurstofdamp- respectievelijk waterdampspanning wordt verlaagd. Hierdoor vergemakkelijkt de ontleding van de oxidehuid en wordt oxidatie vermeden. Als voorbeeld gelden de lithiumhoudende zilverbasis- en de magnesiumhoudende aluminiumbasis-soldeersoorten.

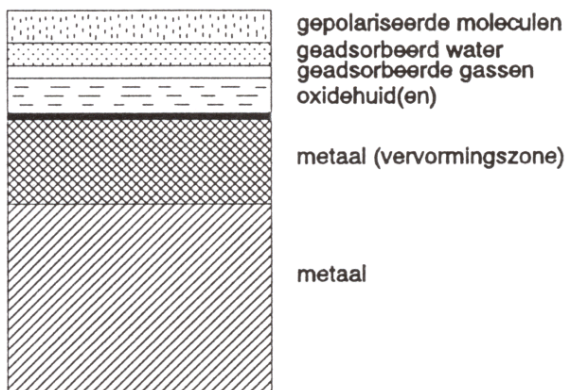
Dankzij de bovenstaande mechanismen is het mogelijk om metalen vloeimiddelloos te bevochtigen, zodat goede verbindingen kunnen worden gemaakt.

Hoofdstuk 3

Atmosfeer

3.1 Werking van beheerste atmosferen

In figuur 3.1 staat schematisch weergegeven hoe een nog te reinigen metaaloppervlak er uit kan zien. Bij verwarming zullen de lagen met geadsorbeerde moleculen veelal verdwijnen. Voor het uitvloeien van soldeer is echter een oxidenvrij oppervlak nodig. Door in een beheerste atmosfeer te verwarmen, kan de oxidelaag worden afgebroken. Er zijn verschillende mechanismen mogelijk; deze staan beschreven in hoofdstuk 2. De beheerste atmosfeer moet nieuwe oxidatie van het oppervlak voorkomen. Daartoe moet hij zuurstofvrij zijn en gevormde gassen, met name waterdamp, kunnen afvoeren.



figuur 3.1 Schematisch weergegeven opbouw van een nog te reinigen metaaloppervlak (doorsnede)

We kunnen drie soorten atmosferen onderscheiden:

- ▶ reducerend (componenten: waterstof, koolmonoxide);
- ▶ beschermend (stikstof, argon, helium);
- ▶ vacuüm.

Deze zullen in afzonderlijke paragrafen worden toegelicht. In tabel 3.1 wordt een overzicht gegeven van toepasbare atmosferen.

Dauwpunt

De zuiverheid van een gas wordt onder meer bepaald door het dauwpunt. Dit is de temperatuur waarbij de partiële druk van de in het gas aanwezige waterdamp, gelijk is aan de verzadigingsdruk. Beneden deze temperatuur zal er dus water condenseren. Een lager dauwpunt geeft aan dat het gas minder verontreinigd is met waterdamp. In een gas met een dauwpunt van -80 °C bevindt zich ongeveer 1 vppm (volume part pro million) waterdamp; gassen met een grotere zuiverheid zijn praktisch niet verkrijgbaar.

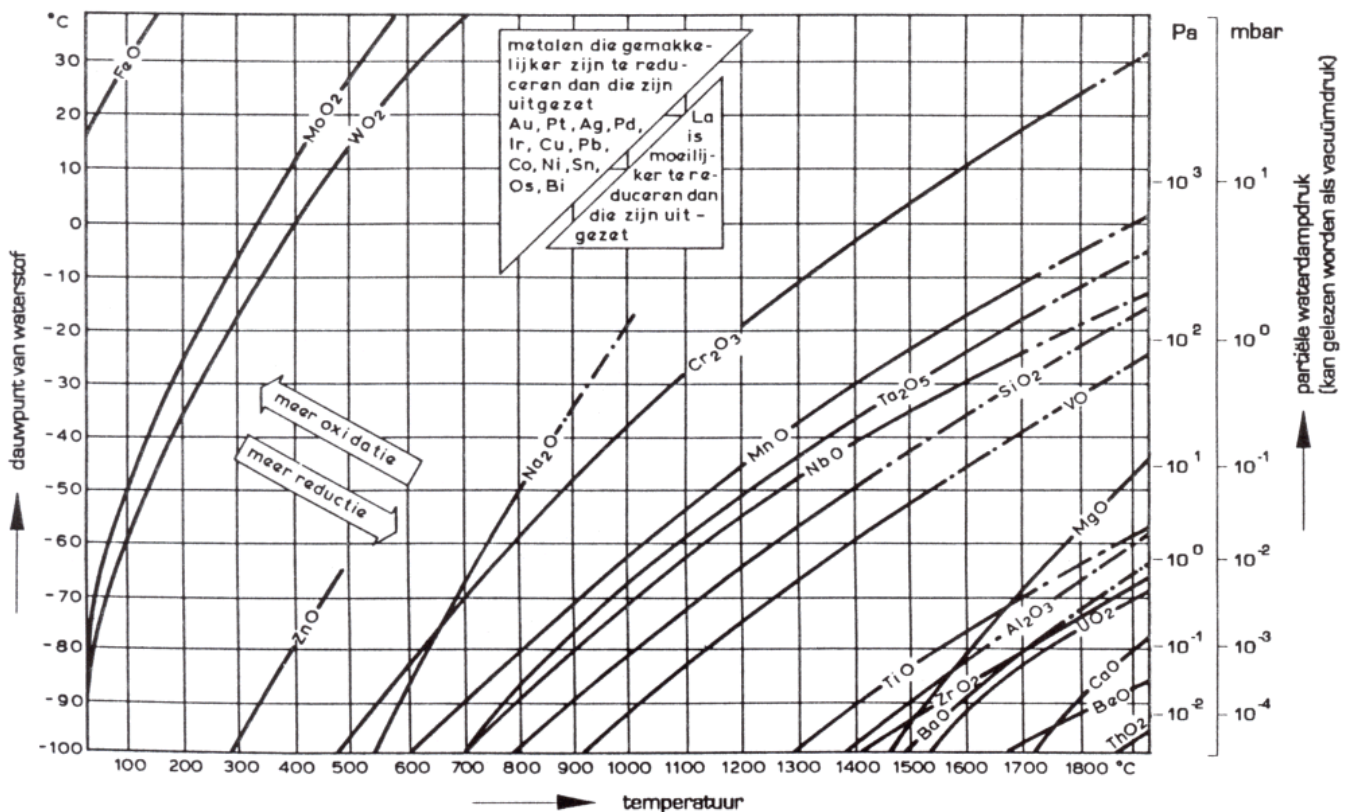
3.2 Reducerende atmosfeer

Een reducerende atmosfeer voorkomt niet alleen oxidatie van het basismateriaal en het soldeermateriaal, maar het kan ook metaaloxiden omzetten in het uitgangsmetaal. Bij een waterstofatmosfeer ontstaat hierbij waterdamp en bij een koolmonoxide-atmosfeer ontstaat kooldioxide. Of de reactie zal verlopen hangt zowel af van procesparameters (temperatuur, dauwpunt, gloeitijd) als van de stabiliteit van de oxiden. In figuur 3.2 is een aantal metaal/metaaloxide evenwichten in een zuivere waterstofatmosfeer weergegeven. Als een combinatie van dauwpunt en gloeitemperatuur rechts van de evenwichtslijn ligt, zal er reductie kunnen optreden. Het metaaloxide wordt dan omgezet in metaal. Links van de evenwichtslijn zal juist de oxidatie worden bevorderd. Het diagram geeft een maat voor de stabiliteit van de oxiden. De hierna volgende reeks elementen

tabel 3.1 Overzicht van soldeeratmosferen (vrij naar M.M. Schwartz, Brazing)

AWS-nr.	soldeeratmosfeer	dauwpunt (°C)	samenstelling (%)				soldeermateriaal	basismateriaal
			H ₂	N ₂	CO	CO ₂		
1	Exogas (laag H ₂)	+20	5-1	87	5-1	11-12	B _{Ag} , B _{CuP}	Cu, CuZn
2	Exogas (ontkolend)	+20	14-15	70-71	9-10	5-6	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{CuP}	Cu, CuZn, Ni Monel, ongelegeerd staal (C, 0,2%)
3	Exogas (gedroogd)	-40	15-16	73-75	10-11	--	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{CuP}	Cu, CuZn, Ni Monel, ongelegeerd staal
4	Endogas (gedroogd)	-40	38-40	41-45	17-19	--	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{CuP}	Cu, CuZn, Ni Monel, ongelegeerd staal
5	Kraakgas (gedissocieerd ammoniak)	-54	75	25	--	--	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{CuP} , B _{Ni}	Cu, CuZn, Ni Monel, ongelegeerd en laaggelegeerd staal, legeringen met Cr < 5%
6A	Stikstof	-68	1-30	70-99	--	--	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{CuP} , B _{Ni}	Cu, CuZn, Ni Monel, ongelegeerd staal
6B	Stikstof	-29	2-20	70-97	1-10	--	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{CuP} , B _{Ni}	Cu, CuZn, Ni Monel, ongelegeerd staal
7	Waterstof (gedesoxideerd en gedroogd)	-59	100	--	--	--	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{CuP} , B _{Ni}	Cu, CuZn, Ni Monel, ongelegeerd staal, Mo, W-, Cr-, Co-carbides, legeringen met Cr < 5%, Fernico
9	Edelgas (zuiver argon of helium)	--	--	--	--	--	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{CuP} , B _{Ni}	Cu, CuZn, Ni Monel, ongelegeerd en laaggelegeerd staal, Ti, Zr, Hf, W, Mo, legeringen met Cr < 5%
(10)	Grofvacuüm (1-1000 mbar)	--	--	--	--	--	B _{Ag} , B _{CuP}	Cu, ongelegeerd staal (C < 0,2%)
(10B)	Laagvacuüm (10 ⁻³ -1 mbar)	--	--	--	--	--	B _{Ag} , B _{Cu}	Cu, ongelegeerd en laaggelegeerd staal (Cr < 5%)
(10C)	Hoogvacuüm (10 ⁻⁶ -10 ⁻³ mbar)	--	--	--	--	--	B _{AlSi} ¹⁾ , B _{Ag} ¹⁾ , B _{Au} , B _{Ni} , B _{Ti}	Cr- en Cr-Ni-staal, Al, Ti, Zr, W, Mo, Nb, keramiek, superlegeringen, Fernico

1) Oppassen voor sterke uitdamping (deeldruk toepassen)



figuur 3.2 Metaal/metaaloxide evenwicht in zuivere waterstofatmosferen

is gerangschikt naar een afnemende stabiliteit van hun oxiden: La, Be, Zr, Al, Mg, Ti, Si, Nb, Ta, Mn, Cr, W, Mo, Fe, Ni, Co, Pb, Cu, Pd, Ag, Pt en Au.

De goede soldeerbaarheid van edelmetalen en koper berust dus op het instabiele karakter van hun oxiden. Het diagram kent enkele belangrijke beperkingen. Ten eerste geldt het voor een waterstofatmosfeer; voor andere milieus zullen er verschuivingen van de lijnen optreden. Een ander bezwaar is, dat er niet uit afgelezen kan worden of de reactie verloopt. Dit komt, doordat het diagram gebaseerd is op reacties die uit een enkele stap bestaan. Dat is niet altijd het geval en soms worden er stabiele tussenproducten gevormd. Ook het snelheidsverloop van de reactie kan niet worden afgelezen. Als algemene tendens valt uit figuur 3.2 af te leiden, dat de soldeerbaarheid van metalen toeneemt naarmate de temperatuur hoger ligt en het dauwpunt lager.

Bij het uitzoeken van de gewenste soldeertemperatuur moet men uitgaan van het meest stabiele oxide dat aanwezig is. Ook kleine hoeveelheden (denk hierbij aan 1 tot 2 procent) kunnen bevochtiging tegengaan. Zo zal het solderen van titaan- en aluminiumhoudende superlegeringen in zuiver waterstof (dauwpunt $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) praktisch niet uitvoerbaar zijn, want de reductietemperatuur ligt boven het smeltpunt van het basismateriaal. Ook bij de met titaan gestabiliseerde roestvaste staalsoorten ontstaan problemen.

Gassen en hun toepassingen

- In de praktisch voorkomende reducerende atmosferen zijn de actieve bestanddelen meestal koolmonoxide en/of waterstof. Beiden komen voor in exo- en endogas. Deze gassen worden gevormd in gasgeneratoren uit de onvolledige verbranding van aardgas of propaan.

Bij de productie van endogas moet warmte worden toegevoerd; bij exogas ontstaat warmte. Het hoge koolmonoxidegehalte zorgt bij endogas voor een opkolende werking van de materialen; exogas daarentegen kan ontkolend werken. Deze atmosferen voldoen voor verschillende soldeertoepassingen zoals blijkt uit tabel 3.1.

- Een mengsel van waterstof en stikstof ontstaat in een kraakinstallatie voor ammoniak. In dit milieu kunnen ook chroomhoudende basismaterialen worden bevochtigd.
- Zuiver waterstof heeft een hoog reducerend vermogen, waardoor het toepassingsgebied voor hoogtemperatuursolderen ruim is. Alleen hoogvacuüm biedt meer mogelijkheden door het lage gehalte aan waterdamp. Metalen als Ti, Zr, Hf, Ta en Nb (Cb) reageren bij voldoende hoge temperatuur met waterstof. Ook kan er atomaire waterstof worden opgelost in deze materialen, waardoor er gevaar voor waterstofbroosheid ontstaat.
- Als een bepaald basismateriaal niet in een van de genoemde reducerende milieus wordt bevochtigd, dan kan een plateerlaag van koper worden aangebracht. Een goudlaag kan ook, al is dat duurder. Indien er nikkelbasissoldeer wordt gebruikt kan het basismateriaal worden vernikkeld.

3.3 Beschermende atmosfeer

In een beschermende atmosfeer helpt het gas niet mee om metaaloxiden te reduceren. Door de aanwezigheid van minime hoeveelheden waterdamp kunnen oxidehuiden zelfs aangroeien. De toepassingen beperken zich dan tot het solderen van edelmetalen, koperlegeringen en ongelegeerd staal. Het beschermgas leent zich wel voor het solderen met vloeimiddel: dit verdampt minder snel en de standtijd wordt veel groter. Deze toepassing valt echter buiten het

kader van deze publicatie. Om de uitdamping van legeringselementen van basis- en soldeermateriaal tegen te gaan, kan beschermgas bij verlaagde druk worden toegepast (zie hiervoor § 3.4 onder "deeldruk").

Voorbeelden van beschermende atmosferen zijn:

- ▶ stikstof;
- ▶ argon;
- ▶ helium.

Stikstof is goedkoop, weinig reactief maar niet volkomen inert. Bij staal kan een oppervlakteverharding plaatsvinden door de vorming van ijzernitriden. De edelgassen argon en helium zijn wel inert maar veel duurder. Helium wordt in Europa weinig gebruikt vanwege de hoge prijs.

De gassen zijn in diverse zuiverheden verkrijgbaar, gecompriëerd in hogedrukcilinders. De zuiverheid is afhankelijk van de productiewijze en van de verontreinigingen die worden geïntroduceerd bij overslag, transport en opslag. Zonder speciale aandacht en maatregelen moet worden uitgegaan van een dauwpunt van $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Door goede overslagprocedures en met een zuiver product kan dit worden verbeterd tot gemiddeld $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nog hogere zuiverheden zijn mogelijk met speciale productie-, overslag-, transport- en opslagmiddelen. Dauwpunten van $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ zijn dan haalbaar, maar de kosten zijn echter hoog.

3.4 *Vacuüm*

Vacuüm heeft een hoger "reducerend vermogen" dan beschermgas. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van het dauwpunt. Een vacuüm van 10^{-3} mbar heeft een dauwpunt van maximaal $-74\text{ }^{\circ}\text{C}$ als het restgas volledig uit waterdamp bestaat. Het maximum bij 10^{-4} mbar is zelfs $-89\text{ }^{\circ}\text{C}$. In vacuüm bevindt zich formeel geen materie. Het lukt echter niet om een ovenruimte volledig gasvrij te krijgen. Altijd zal er sprake zijn van restgas. Het volgende voorbeeld onderstreept dit. Bij een druk van 10^{-6} mbar (10^{-4} Pa) zitten er in een kubieke millimeter 30 miljoen gasmoleculen. Bij atmosferische verhoudingen komt dit neer op 6 miljoen zuurstofmoleculen per mm^3 . Een te groot aantal zuurstofatomen in de atmosfeer zal tot nieuwe oxidevorming kunnen leiden.

Het vacuüm wordt vaak als volgt ingedeeld:

- ▶ grofvacuüm 1000 tot 1 mbar (10^5 - 10^2 Pa)
- ▶ laagvacuüm 1 tot 10^{-3} mbar (10^2 - 10^{-1} Pa)
- ▶ hoogvacuüm 10^{-3} tot 10^{-6} mbar (10^{-1} - 10^{-4} Pa)

Soms komt men op vacuümapparatuur nog de oude drukeenheid torr tegen; er geldt $1\text{ torr} = 1,33\text{ mbar} = 133\text{ Pa}$. Moeilijk te bevochtigen materialen als roestvast staal, superlegeringen en keramiek kunnen het beste aan de ondergrens van het hoogvacuümgebied (10^{-6} mbar) worden gesoldeerd. Het solderen van ongelegeerd en laaggelegeerd staal kan onder laagvacuüm gebeuren, terwijl voor koper grofvacuüm ook kan voldoen.

Deeldruk

Bij het solderen onder deeldruk wordt de atmosfeer bewust in het grofvacuüm gehouden. Doel hiervan is het tegengaan van de uitdamping van elementen met een laag smelt/kookpunt uit het soldeer- of basismateriaal. Soms is er sprake van tegenstrijdige belangen. Het basismateriaal vereist bijvoorbeeld een grofvacuüm en het bevochtigingsproces een hoogvacuüm.

Bij het solderen in deeldruk wordt gebruik gemaakt van een beschermend gas dat regelmatig wordt verversd. Een aantal elementen met een hoge dampspanning is in afnemende volgorde (eerst de snelst verdampende):

Hg, Cd, Zn, Sb, Ca, Pb, Mn, Ga, Ag, Sn.

Deze reeks geldt overigens voor de zuivere metalen. Bij elementen die in legeringen zitten, spelen ook andere factoren een rol bij de uitdamping.

Getters

Om de kwaliteit van het vacuüm te verhogen worden ook wel "getters" (gasbinders) toegepast. Dit zijn materialen die zuurstof kunnen opnemen (titaan, zirkoon). Door een dergelijk materiaal met een hoge affiniteit tot zuurstof in de ovenruimte te plaatsen, daalt het zuurstofgehalte in het restgas. De "getter" wordt veelal als een scherm om het te solderen object aangebracht. Het gebruik beperkt zich meestal tot kleine series en tot kleine producten.

Hoofdstuk 4

Apparatuur

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de meest gebruikte soldeerapparatuur voor productiedoeleinden. Het voert te ver om ook in te gaan op apparatuur voor speciale toepassingen of op specifieke laboratoriuminstallaties. Een overzicht van de productiemiddelen:

- a. retortoven;
- b. vacuümoven;
- c. transportbandoven;
- d. inductiefsoldeerapparatuur.

De verschillen in deze apparaten komen onder meer tot uiting in de productiewijze en in de wijze van verwarming.

Productiewijze

De productie in een retort- en vacuümoven verloopt discontinu. De ovens worden geladen, waarna het soldeerproces van start gaat. De productie in een transportbandoven is een continu proces. De te solderen producten worden voortdurend op de band geplaatst en door de oven getransporteerd. Het inductiefsolderen neemt een aparte plaats in. Hier wordt meestal één product per procescyclus gesoldeerd. De cyclustijd is echter zeer kort (tientallen seconden tot enkele minuten).

Verwarming

In de ovens (a, b en c) wordt het product geheel verwarmd. Bij inductiefsolderen (d) is het mogelijk om het product plaatselijk te verwarmen. Bij het verwarmen van producten in ovens spelen drie verschijnselen een rol:

1. warmte-overdracht door de gasstroom;
2. warmte-overdracht door straling;
3. warmtegeleiding in het product.

In gasgevulde retortovens en in transportbandovens spelen alle drie de verschijnselen een rol. Naarmate de temperatuur hoger wordt, zal de invloed van de straling groter zijn.

In vacuümovens speelt de warmte-overdracht door gas uiteraard geen rol, wel de twee andere verschijnselen. Bij inductiefsolderen is de warmtegeleiding in het product de belangrijkste factor bij de opwarming.

4.2 De retortoven

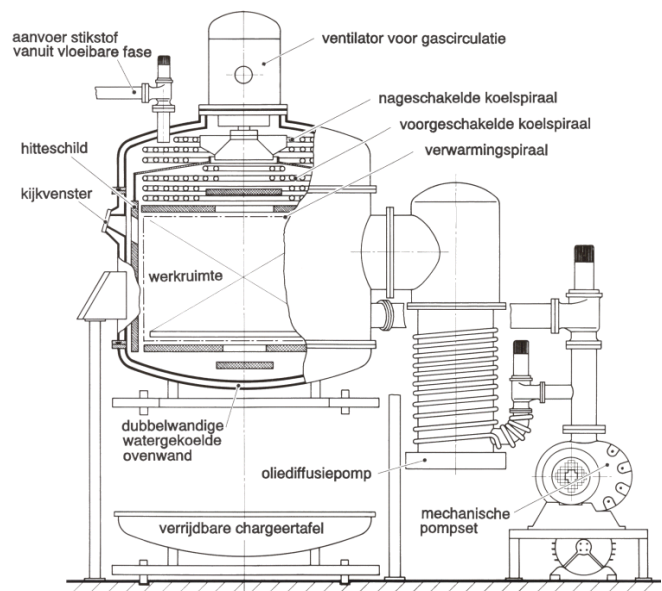
De goedkoopste productie-oven is de retortoven. De retort is een metalen vat, waarin de te solderen producten worden geplaatst. Tijdens de soldeercyclus is de retort van de buitenlucht afgesloten. Door een gastoevoer en een gasafvoer wordt de gewenste gasatmosfeer rond de producten gerealiseerd (bijvoorbeeld waterstofgas). Het vat wordt vervolgens verwarmd, bijvoorbeeld door het in een weerstandverhitte oven te plaatsen. Ook andere verwarmingsbronnen zijn evenwel denkbaar.

Als de retort met een vacuümpomp wordt leeggezogen, kan de oven dienst doen als vacuümoven. Naar de wijze van verwarming wordt dit dan een "warmewandvacuümoven" genoemd. De te behalen vacuümdruk is minder goed dan bij de hierna te bespreken "koudewandvacuümoven". De laagst haalbare waarde is ongeveer 10^{-3} mbar. Ook de te bereiken temperatuur wordt beperkt door het materiaal waarvan de retort is vervaardigd. Vaak betreft dit roestvast staal of een nikkellegering.

4.3 De vacuümoven

Vacuümovens worden ingedeeld naar het vacuümdrukgebied waarin zij werkzaam zijn. Zo kent men laagvacuümovens voor een vacuümdruk tot 10^{-3} mbar en hoogvacuümovens voor het drukgebied tussen 10^{-3} mbar en 10^{-6} mbar. Behalve aan de vacuümdruk worden bij hoogvacuümovens ook hogere eisen gesteld aan de "inlek" van de oven en aan de samenstelling van de "restgassen". Naast een grotere pompcapaciteit worden bij hoogvacuümovens daarom andere materialen gebruikt voor verwarming en isolatie. Een hoogvacuümoven is daardoor twee maal zo duur als een laagvacuümoven met gelijke nuttige werkkruimte.

In deze paragraaf staat de zogenaamde "koudewandvacuümoven" centraal (zie figuur 4.1). Deze bestaat uit een dubbelwandig watergekoeld vat. Bij laagvacuümovens is dit vat van koolstofstaal, terwijl bij hoogvacuümovens een roestvaststalen binnenwand gebruikelijk is. In het vat is de thermische isolatie aangebracht. Deze is bij laagvacuümovens veelal van grafiet. Hoogvacuümovens hebben stralings- en hitteschilderen van molybdeen respectievelijk roestvast staal.



figuur 4.1 Schematische doorsnede van een vacuümoven

Verwarming

Moderne vacuümovens worden elektrisch verhit met weerstandsverwarming. Kleine vacuümovens met een nuttige werkkruimte tot $0,3 \text{ m}^3$ hebben vaak alleen rompverwarming. Grotere vacuümovens hebben meerdere verwarmingssecties, bijvoorbeeld deksel-, romp- en bodemverwarming. De verwarmingselementen bestaan uit grafietstaven of uit molybdeendraad of -band.

Het werkgebied van vacuümovens ligt gewoonlijk tussen 600°C en 1100 à 1400°C . De ondergrens wordt bepaald door de slechte warmte-overdracht door straling bij lage temperaturen. De bovengrens hangt onder meer af van de ovenisolatie en van de toegepaste soort thermokoppels.

Het regelen van de temperatuur in de vacuümoven geschiedt met zogenaamde "regelkoppels". Deze thermoelementen zijn aangesloten op een temperatuurregelaar, die continu de gemeten temperatuur vergelijkt met de gewenste waarde volgens het ingestelde programma.

Vacuümsysteem

Het pompsysteem van een vacuümoven bestaat uit meerdere vacuümpompen, elk voor een ander drukgebied. Laagvacuümovens hebben veelal een tweetraps pompset. Met een draaischuifpomp of een zuigerpomp wordt een drukafname van atmosferisch tot ongeveer 1 mbar bereikt en met een rootspomp een drukafname van 1 mbar tot 10^{-3} mbar. Voor vacuümdrukken lager dan 10^{-3} mbar is een derde vacuümpomp noodzakelijk. Bij productievacuümovens is dit veelal een oliediffusiepomp, waarmee een vacuümdruk tot ca. 10^{-6} mbar haalbaar is.

Oliediffusiepompen hebben het nadeel dat oliedeeltjes in de werkruimte van de oven terecht kunnen komen. Door een watergekoelde "baffle" boven de diffusiepomp te monteren, wordt dit nadeel bestreden. Een nog betere oplossing is de zogenaamde "cryo-baffle", die met een temperatuur van 120 °C of lager vrijwel alle oliedeeltjes vangt en tevens dienst doet als vacuümpomp in het gebied van 10^{-4} tot 10^{-7} mbar. Ook worden tegenwoordig wel turbomoleculairepompen en cryogene pompen toegepast. Hiermee worden drukken van 10^{-6} mbar of lager behaald.

Koeling

Om een vacuümoven versneld af te koelen, wordt gebruik gemaakt van een beschermgas als stikstof of argon. De oven wordt na het beëindigen van het soldeerproces éénmalig gevuld met het koelgas. De hoeveelheid gas die wordt ingelaten kan vooraf worden ingesteld, bijvoorbeeld tot een druk tussen 0,1 en 1 bar wordt bereikt. Bij sommige ovens kan ook onder overdruk worden gekoeld, bijvoorbeeld bij 5 bar. Het koelgas kan via een warmtewisselaar met behulp van een ventilator langs de gesoldeerde producten worden geblazen. Ook de snelheid van de ventilator is veelal regelbaar.

Toepassing

Producten uit koolstofstaal, laaggelegeerd staal en gietijzer kunnen in een laagvacuümoven worden gesoldeerd. Producten uit roestvast staal, koper, hardmetaal, superlegeringen en keramiek dienen in een hoogvacuümoven te worden gesoldeerd. Voor het vacuümsolderen van aluminium zijn speciale vacuümovens noodzakelijk (zie hoofdstuk 11).

4.4 De transportbandoven

Het hoogtemperatuursolderen in transportbandovens is een continu proces, uitgevoerd in beschermgas (zie figuur 4.2). De te solderen producten worden op een transportband geplaatst en met een vooraf in te stellen snelheid door de

oven getransporteerd. De transportbandoven is hierdoor uitermate geschikt voor serie- en massafabricage. De doorlooptijd van de producten ligt in de praktijk tussen tientallen minuten en enkele uren. De grootte van de te solderen producten wordt beperkt door de doorlaatopening van de tunnel en door de maximale bandbelasting.

De transportbandoven kan als volgt zijn opgebouwd:

a. voorzijde

De producten worden aan de voorzijde van de oven op de transportband geplaatst. De transportband is vaak vervaardigd van hittebestendig roestvast staal of van een hoogwaardige nikkellegering. De snelheid van de transportband is afhankelijk van het product en het soldeerproces; de waarde ligt veelal tussen 3 en 40 cm/min. De transportband voert de producten de soldeertunnel in.

b. spoelpoort

In het eerste en in het laatste deel van de tunnel wordt een gas (bijvoorbeeld stikstof) ingebracht. Het "gas-scherp" dat hier ontstaat, zorgt voor een scheiding tussen de buitenlucht en het beschermgas in het verhittingsdeel (c.q. koeldeel).

c. verhittingsdeel

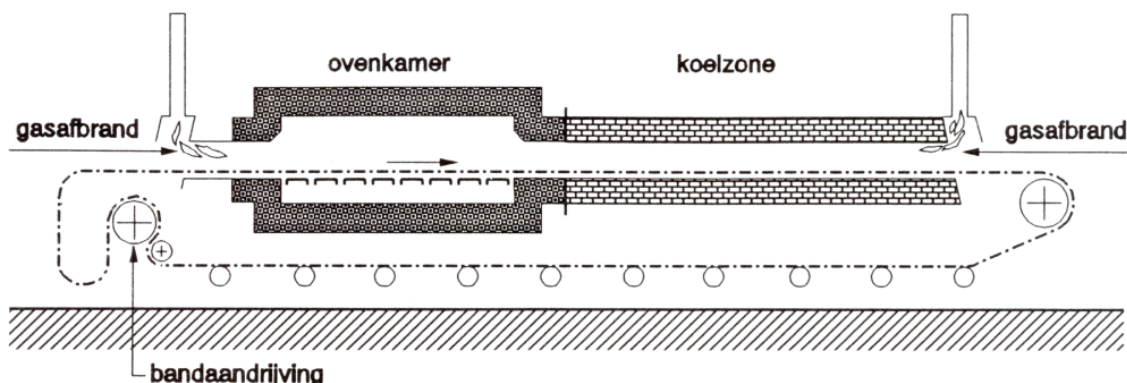
Het verhittingsdeel kan twee meter lang zijn. In dit gedeelte bevinden zich diverse verwarmingselementen. Deze elementen kunnen vaak afzonderlijk op een bepaalde temperatuur worden ingesteld. Hierdoor kan over de lengte van het verhittingsdeel een productafhankelijk warmteprofiel worden gecreëerd. In dit deel van de tunnel bevindt zich het beschermgas. Een overzicht van de meest gangbare gasatmosferen staat in hoofdstuk 3 (tabel 3.1). Het beschermgas wordt verbruikt en moet dan ook doorlopend worden verversd. Het afgewerkte gas wordt via twee "schoorstenen" afgevoerd. Deze afvoerplaatsen bevinden zich aan het begin van het verhittingsdeel en aan het eind van het koeldeel.

d. koeldeel

Na het verlaten van het verhittingsdeel van de tunnel, doorlopen de producten het koelgedeelte van de oven. Ook hier worden de producten tegen oxidatie beschermd door het beschermgas. De lengte van het koeldeel is in de regel groter dan het verhittingsdeel. Aan het eind van het koeldeel bevindt zich de uitgaande spoelpoort.

e. uitloop

De oven heeft een uitloop waar de afgekoelde producten ($T < 100$ °C) van de transportband kunnen worden genomen.



figuur 4.2 Transportbandoven zonder ovenretort

Om te voorkomen dat er vocht in het ovensysteem komt, wordt de transportbandoven meestal alleen voor reparaties volledig uitgeschakeld. Buiten de productie-uren wordt de temperatuur naar ongeveer 200 °C teruggebracht. Om de oven op een werkt temperatuur van 800 °C te brengen, moet met een opwarmtijd van enige uren rekening worden gehouden.

Toepassing

In transportbandovens kunnen materialen worden gesoldeerd als koolstofstaal, laaggelegeerd staal, roestvast staal, hardmetaal en koper. In deze ovens kan ook aluminium worden gesoldeerd, indien er een vloeimiddel wordt toegepast. Ook kunnen warmtebehandelingen als spanningsarm gloeien van roestvast staal of het harden van gereedschapsstaal in dergelijke transportbandovens worden uitgevoerd.

4.5 Installaties voor inductiefsolderen

Principe

Het inductiefsolderen berust op het ontwikkelen van warmte in het te solderen metaal. Een hoog- of middenfrequent generator wekt een snel wisselend magnetisch veld op in een watergekoelde koperen spoel. Hierdoor ontstaat door inductie een wervelstroom in het te solderen product. Deze (hoge) stroom ondervindt de gebruikelijke ohmse weerstand. Dit veroorzaakt een hoge warmte-ontwikkeling; via geleiding warmt het product hierdoor snel op. In magnetische materialen treedt bovendien warmte-ontwikkeling op door hysteresisverlies.

De indringdiepte van de elektromagnetische golf is gering (skin-effect), zodat de warmte-ontwikkeling voornamelijk plaatsvindt aan het productoppervlak ter hoogte van de spoel. Daarom speelt de warmtegeleiding een belangrijke rol bij het op soldeertemperatuur brengen van het product. De indringdiepte is onder meer afhankelijk van het materiaal en van de frequentie (tabel 4.1).

tabel 4.1 Indringdiepte bij inductiefverwarmen

materiaal	indringdiepte [mm]	
	10 kHz	500 kHz
koper (620 °C)	0,8	0,15
staal (620 °C)	2,2	0,38
staal (900 °C)	4,0	0,60

De belangrijkste voordelen van inductiefsolderen zijn:

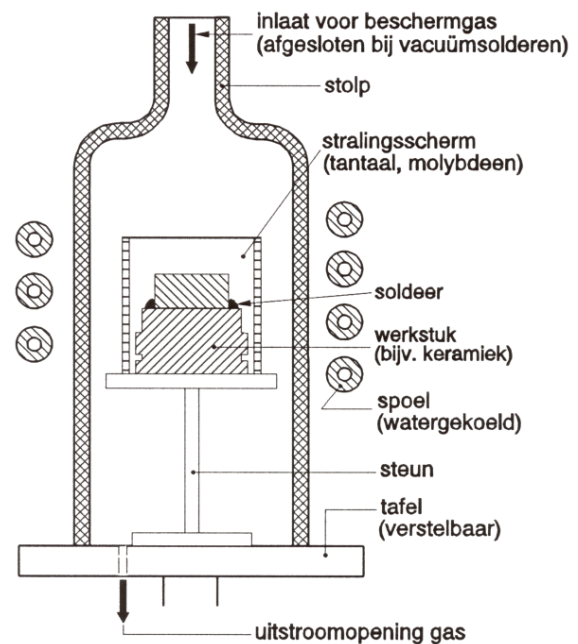
- plaatselijke verhitting van het product;
- korte cyclustijden;
- het soldeerproces is visueel te volgen.

De nadelen zijn:

- de vorm van het product kan een beperking zijn;
- meestal slechts één product per cyclus;
- per product moet een spoel beschikbaar zijn;
- lastige temperatuurmeting.

Apparatuur

Met inductieve verwarming is het dus mogelijk het te solderen product plaatselijk snel te verhitten, zowel onder beschermgas als onder vacuüm (zie figuur 4.3). De inductiespoel kan samen met het product gemonteerd zijn in een ruimte met een beheerste atmosfeer. Een andere mogelijkheid is om het product in een kwartsbuis met de beheerste atmosfeer te positioneren en de spoel om de kwartsbuis aan te brengen.



figuur 4.3 Opstelling voor inductiefsolderen met behulp van een stralingsscherm

Niet-elektrisch geleidende materialen kunnen via een omweg ook inductief worden gesoldeerd. Voor het maken van bijvoorbeeld keramiek-keramiekverbindingen, wordt om de te solderen delen een metalen cilinder geplaatst. Deze cilinder wordt inductief verhit, waardoor hij infraroodstraling gaat uitzenden. Hij fungeert hierdoor als verhittelement voor het te solderen product. Als materiaal voor deze "stralingsschermen" wordt meestal tantaal of molybdeen gebruikt.

Voor het opwekken van een snel wisselend magnetisch veld, maakt men gebruik van de apparatuur uit tabel 4.2.

tabel 4.2 Midden- en hoogfrequent generatoren

type	frequentiebereik [kHz]	vermogen [kW]
motorgenerator	1 - 10 ¹⁾	5 - 500
transistorgenerator	10	> 50
zendbuisgenerator	180 - 450 ²⁾	0,5 - 600

1) 10 kHz wordt toegepast voor solderen

2) Apparatuur voor hogere frequenties wordt eveneens toegepast voor solderen

Hoofdstuk 5

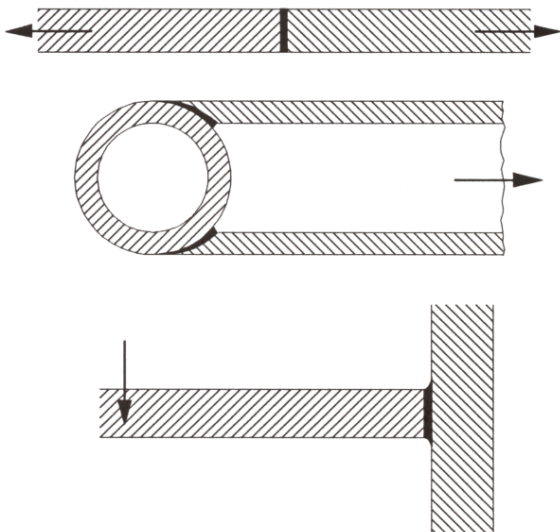
Constructieve aspecten

5.1 Naadvorm

De geschiktheid van een soldeerverbinding voor zijn functie in een constructie wordt in eerste instantie bepaald door de gekozen naadvorm in combinatie met de eisen die aan de naad worden gesteld. Naadvormen kunnen in drie hoofdgroepen worden verdeeld. Deze verdeling berust op het in hoofdzaak optreden van één van de volgende mechanische spanningen in het soldeer:

- trekspanning bij stompe verbindingen;
- schuifspanning bij overlapverbindingen;
- drukspanning bij ontlaste verbindingen.

Stompe verbindingen (figuur 5.1) worden toegepast daar waar over het algemeen geen hoge mechanische eisen aan de verbinding worden gesteld, maar bijvoorbeeld alleen de lekdichtheid of een goed metallisch contact van belang is. Bij goede procesbeheersing is voor stompe soldeerverbindingen een maximale sterkte haalbaar die circa 90 procent bedraagt van de sterkte van het toegepaste basismateriaal.



figuur 5.1 Voorbeelden van stompe verbindingen en belastingswijze

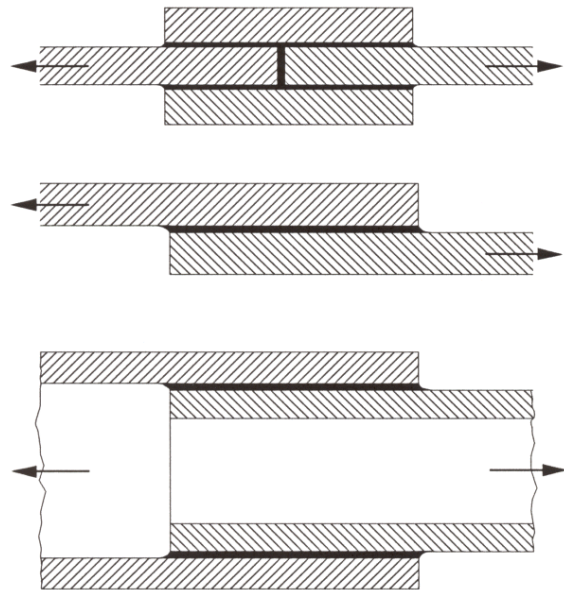
Overlapverbindingen (figuur 5.2) kunnen grotere krachten overbrengen. De sterkte van de verbinding wordt bepaald door de lengte van de overlap. Voor een gesoldeerde plaat-plaatconstructie kan deze als volgt berekend worden:

$$L = \frac{v \times F}{b \times \tau} \quad (5.1)$$

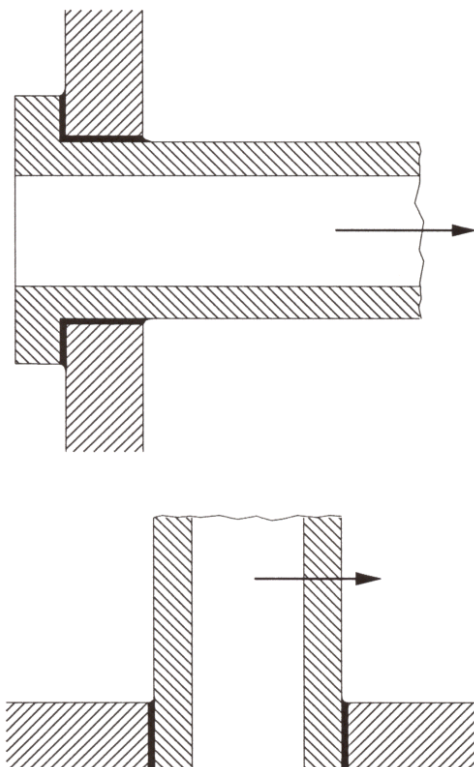
Waarbij:

- L = lengte van de overlap in mm;
- v = veiligheidsfactor (> 2);
- F = over te brengen kracht in N;
- b = breedte van de naad in mm;
- τ = schuifsterkte van het soldeer in N/mm².

Bij toepassing van *ontlaste verbindingen* (figuur 5.3) kan de constructeur uitgaan van de eigen sterkte van het basismateriaal na het soldeerproces. Het soldeer zit dan opgesloten tussen de basismaterialen, zodat de soldeernaad onder drukspanning staat.



figuur 5.2 Voorbeelden van overlapverbindingen en hun belastingswijze



figuur 5.3 Voorbeelden van ontlaste verbindingen en hun belastingswijze

5.2 Oppervlaktegesteldheid

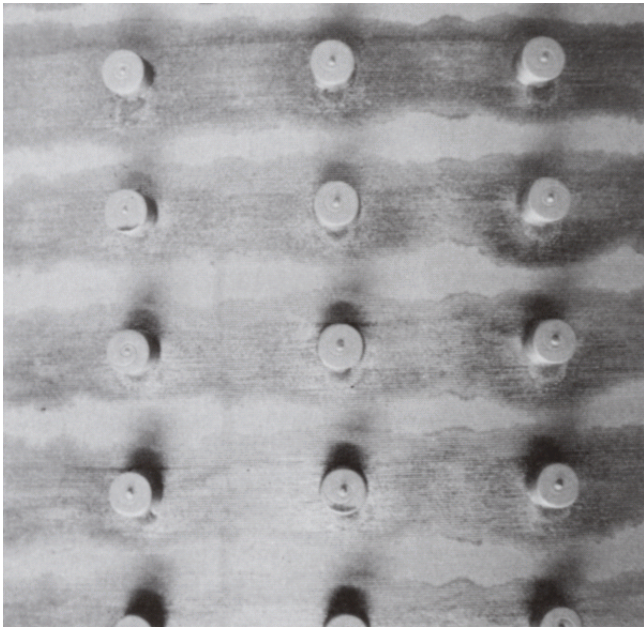
Naast de toegepaste naadvorm spelen ook de te stellen eisen aan de soldeervlakken een rol van betekenis. Hierbij zijn van belang:

- toegankelijkheid ten behoeve van reiniging;
- oppervlakteruwheid.

Bij het hoogtemperatuursolderen is de zuiverheid van de te solderen vlakken van wezenlijk belang. Deze vlakken moeten daarom goed toegankelijk zijn voor de middelen

die bij de vereiste reinigingsmethode worden gebruikt. Ook mogen er geen vloeistofresten achterblijven na bijvoorbeeld een ontvettingsbehandeling, waardoor bij verder opdrogen toch nog residuen ontstaan. Bij het solderen van producten die veel holten bevatten (bijvoorbeeld kleine draadgaatjes) welke niet goed zijn gereinigd, kan tijdens het soldeerproces de ovenatmosfeer negatief worden beïnvloed. Door het uitdampen van restanten van verontreinigingen ontstaat vertraging bij het afbreken van de oxidelaag op het productoppervlak of treedt zelfs opnieuw oxidatie op. Hierdoor wordt de bevochtiging van het soldeer op het basismateriaal negatief beïnvloed, waardoor een slechte spleetvulling ontstaat.

Slechte spleetvulling kan ook ontstaan door te grove bewerkingsgroeven dwars op de gewenste vloeirichting van het soldeer. Voor hoogtemperatuursolderen is een oppervlakteruwheid liggend in het gebied van 1 - 6 μm gebruikelijk. Een te glad oppervlak benadeelt het uitvloeigedrag, want de bewerkingsgroeven op het oppervlak gedragen zich als minuscule capillairtjes (zie figuur 5.4).



figuur 5.4 Het uitvloeien van soldeer over een oppervlak met groeven

5.3 Spleetbreedte

De gewenste spleetbreedte is afhankelijk van het basismateriaal, het soldeermateriaal en van de gekozen soldeertemperatuur. Als vuistregel geldt:

De gewenste spleetbreedte op soldeertemperatuur bedraagt bij hoogtemperatuursolderen 0,05 mm.

Het hoogtemperatuursolderen met grotere spleetbreedten dan de gebruikelijke wordt wel toegepast bij het zogenaamde *wide gap* solderen; de spleetbreedte op soldeertemperatuur ligt dan bijvoorbeeld op 0,5 of zelfs 2 mm (zie ook § 17.2.6 betreffende het solderen van nikkel- en superlegeringen en ODS-materialen). Er is sprake van grote(er) spleetbreedten bij:

- (te) ruime toleranties;
- grote uitzettingsverschillen;
- reparatiesolderen bijvoorbeeld van scheuren.

Voorts is het met *wide gap* solderen mogelijk slijtvaste, corrosiebestendige oppervlaktelagen aan te brengen.

De drie toegepaste '*wide gap*' soldeermethoden zijn:

- het solderen in het brede smelttraject van een soldeer; door de nog aanwezige vaste fasen in het deels vloeibare soldeer blijft het soldeer in de spleet 'staan'; in de praktijk blijkt dit lastig uitvoerbaar; beter verloopt dit:
- met een soldeer waaraan metaalpoederdeeltjes zijn toegevoegd waardoor het soldeer-poedermengsel zich gedraagt als een soldeer met een breed smelttraject;
- de spleet vullen met metaalpoederdeeltjes die vooraf tijdens het solderen onvolledig (poreus) aan elkaar worden gesinterd; vooraf geplaatst soldeer met een normaal (niet-breed) smelttraject vult de capillaire ruimten tussen de metaalpoederdeeltjes die zijn ontstaan tijdens het sinteren; bijvoorbeeld bij het reparatiesolderen van scheuren.

Het hoogtemperatuursolderen met kleinere spleetbreedten dan de gebruikelijke wordt wel toegepast bij het diffusiesolderen; de spleetbreedte op soldeertemperatuur is dan bijvoorbeeld 0,025 mm of kleiner (zie ook § 17.2.6 betreffende het solderen van nikkel- en superlegeringen en ODS-materialen). Een zo dun mogelijke naad is gunstig voor het diffusieproces. Er moet namelijk zoveel mogelijk toevoegmateriaal worden weggediffundeerd; in het uiterste geval diffunderen alle bestanddelen van het gesmolten toevoegmateriaal (meestal in folievorm vooraf aangebracht) in het basismateriaal, waarbij een zodanige verschuiving in de samenstelling van het toevoegmateriaal optreedt, dat dit tot stolling leidt. Dit proces wordt ook wel Transient Liquid Phase (TLP) Bonding genoemd. Met diffusiesolderen kan net als met het diffusielassen een continue verbinding tot stand worden gebracht. Echter in tegenstelling tot bij het diffusielassen zijn er lagere aandrukkrachten per oppervlakte-eenheid nodig (typische waarde 4 MPa). De naadvoorbewerking vraagt extra aandacht; het oppervlak moet bij voorkeur een lage ruwheid hebben, in tegenstelling tot bij het capillair solderen het geval is. Interne spanningen in het basismateriaal verbeteren het resultaat van het diffusieproces. De diffusiesoldeertemperatuur is doorgaans hoger dan de gebruikelijke soldeertemperatuur en bedraagt 80-90% van de smelttemperatuur van het basismateriaal. Deze soldeertechniek, die veel specifieke vakkennis vereist, is in principe geschikt voor fragiele, dunwandige constructies en/of materialen die niet goed lasbaar zijn zoals bijvoorbeeld de Al- en Ti-houdende superlegeringen of ODS-materialen.

In tabel 5.1 wordt voor enkele veel toegepaste basismaterialen en soldeermaterialen een aantal optimale spleetbreedten aanbevolen.

Opmerkingen:

- de samenstelling van de soldeermaterialen is volgens de AWS-codering (zie tabellen hoofdstuk 10);
- nikkel wordt weinig toegepast als constructiemateriaal. Het staat in deze tabel, omdat het vaak gebruikt wordt als deklaag voor moeilijk soldeerbare basismaterialen;
- koper wordt vanwege zijn lage smeltpunt niet gesoldeerd met de hoogsmeltende soldeermaterialen, zoals goudbasis-, koperbasis- en nikkelbasis-soldeersoorten;
- ongelegeerd en roestvast staal worden bij toepassing van zilverbasis-soldeermaterialen alleen met palladiumhoudende soorten direct (zonder deklaag) gesoldeerd;
- met superlegeringen worden moeilijk te bevochtigen nikkelbasislegeringen bedoeld (zie hoofdstuk 17);
- voor het verbinden van ongelijksoortige materialen moet, voor de toe te passen spleetbreedte, vaak een compromis worden gevonden. Zie voor deze categorie ook § 5.5.

tabel 5.1 Aanbevolen spleetbreedten op soldeertemperatuur

soldeermateriaal	spleetbreedte in mm				
	nikkel	koper	staal	RVS	superlegering
BAG-8	0,03 - 0,08	0,01 - 0,07	–	–	–
BVAg-32	0,02 - 0,05	0,01 - 0,05	0,02 - 0,07	0,02 - 0,07	–
BAu-4	0,02 - 0,05	–	0,01 - 0,05	0,01 - 0,05	0,02 - 0,06
BCu-1	0,01 - 0,05	–	0,00 - 0,05	0,01 - 0,05	0,01 - 0,05
BNi-5	0,01 - 0,06	–	0,02 - 0,10	0,02 - 0,08	0,02 - 0,08

5.4 Thermische uitzetting

Als een materiaal wordt verwarmd, zet het uit. Dat kan er toe leiden dat de op kamertemperatuur ingestelde spleetbreedte verandert. Dit zal met name een rol spelen bij het verbinden van ongelijksoortige materialen. Bij het construeren van een soldeerverbinding moet daarom worden berekend wat de afmetingen van de componenten zijn op soldeertemperatuur. Hiervoor is het nodig van de materialen de (thermische) lineaire uitzettingscoëfficiënt α of de lineaire uitzetting β te kennen.

Lineaire uitzettingscoëfficiënt α

De verlenging Δl van een materiaal met lengte l bij een temperatuurverhoging ΔT wordt gegeven door:

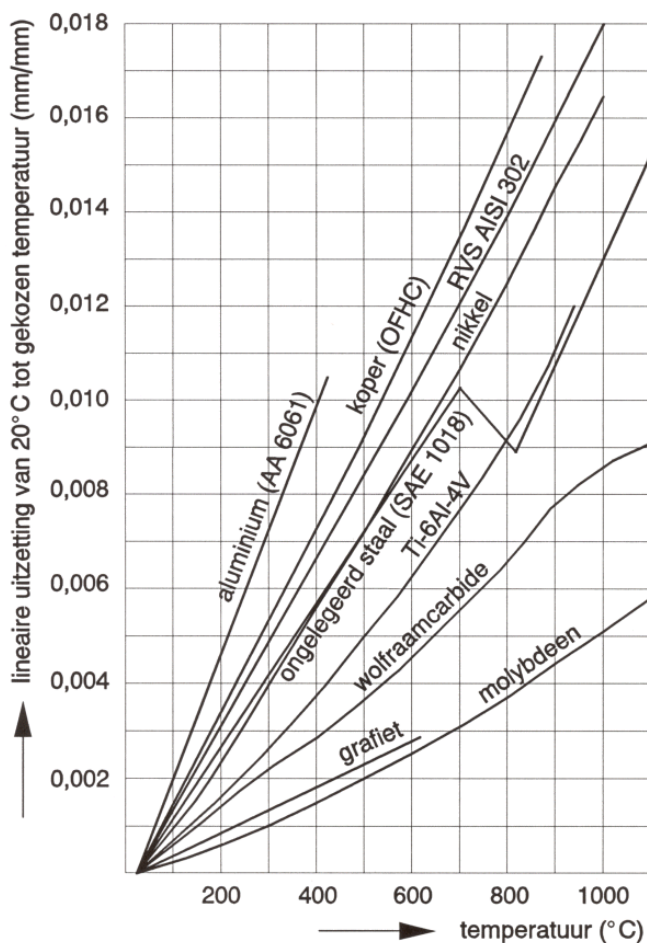
$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \quad (5.2)$$

Een nadeel hierbij is dat α slechts in een beperkt temperatuurgebied constant is. Daarom wordt er meestal met een gemiddelde α over een bepaald temperatuurtraject gerekend. Een andere mogelijkheid is om de verlenging met β te berekenen in formule 5.3.

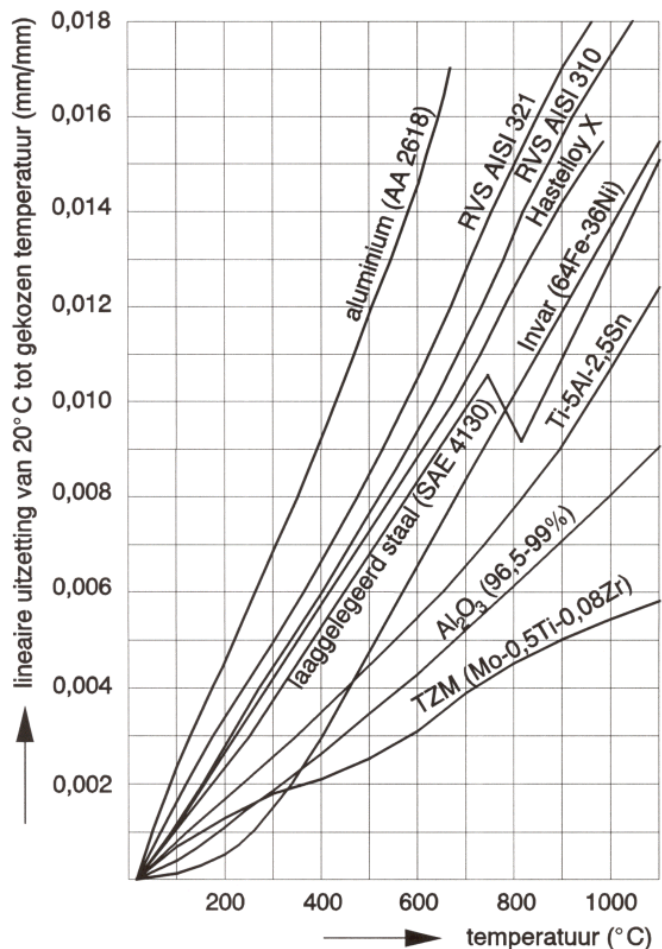
Lineaire uitzetting β

De lineaire uitzetting β van een materiaal wordt gegeven voor één bepaalde temperatuur. Uiteraard geldt hierbij de uitzetting ten opzichte van kamertemperatuur. De lineaire uitzetting kan ook in grafiekvorm worden gegeven, zodat hij voor vele temperaturen kan worden afgelezen. Zie hiervoor de figuren 5.5 en 5.6. De verlenging Δl van een materiaal met lengte l wordt gegeven door:

$$\Delta l = \beta \cdot l \quad (5.3)$$



figuur 5.5 Lineaire uitzetting β van diverse materialen (uitzetting ten opzichte van situatie bij kamertemperatuur) (vrij naar M.M. Schwartz, Brazing)



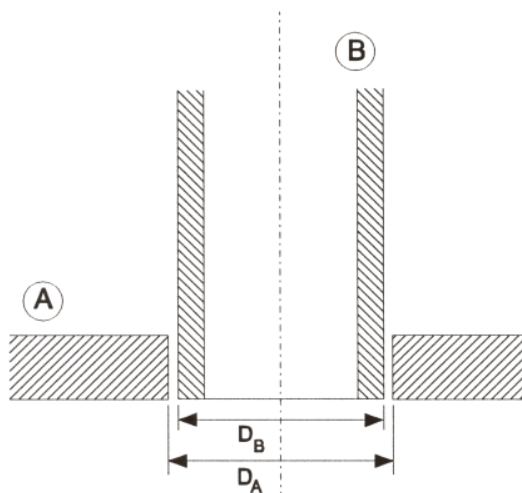
figuur 5.6 Lineaire uitzetting β van diverse materialen (uitzetting ten opzichte van situatie bij kamertemperatuur) (vrij naar M.M. Schwartz, Brazing)

Als voorbeeld wordt de verlenging van een stuk OFHC-koper met een lengte van 50 mm berekend, als dit stuk wordt opgewarmd van kamertemperatuur naar 800 °C. In figuur 5.5 wordt gevonden dat bij deze temperatuur voor OFHC-koper geldt: $\beta = 0,0155$ mm/mm. Ingevuld in formule 5.3 wordt dit:

$$\Delta l = 0,0155 \times 50 = 0,78 \text{ mm}$$

5.5 Spleetinstelling bij ongelijksoortige materialen

Bij het verbinden van materialen met verschillende uitzettingscoëfficiënten, zal de spleetbreedte veranderen bij temperatuurverhoging. In deze paragraaf wordt aangegeven hoe de spleetinstelling kan worden berekend voor een pijp-plaatverbinding. Deze is geschetst in figuur 5.7. Bij veel constructies is het gunstig als het materiaal met de grootste uitzettingscoëfficiënt aan de buitenzijde zit, in het geschetste geval materiaal A. Bij het afkoelen vanaf de soldeertemperatuur zal de buitenzijde meer krimpen dan de binnenzijde. De soldeernaad komt hierdoor onder een drukspanning te staan, hetgeen meestal gunstiger is dan een trekspanning.



figuur 5.7 Schets van een pijp-plaatverbinding

De gewenste spleetbreedte op soldeertemperatuur bedraagt volgens de eerder gegeven vuistregel veelal 0,05 mm. Bedenk dat in de figuur sprake is van twee soldeernaden. De in te stellen spleetbreedte op kamertemperatuur ($S_{20\text{ °C}}$) wordt gegeven door de formules 5.4 en 5.5.

$$S_{20\text{ °C}} = S_{\text{SOLD.}} - (\alpha_A - \alpha_B) \cdot \Delta T \cdot D_{\text{GEM.}} \quad (5.4)$$

$$S_{20\text{ °C}} = S_{\text{SOLD.}} - (\beta_A - \beta_B) \cdot D_{\text{GEM.}} \quad (5.5)$$

Met:

α = lineaire uitzettingscoëfficiënt;

β = lineaire uitzetting;

$D_{\text{GEM.}}$ = gemiddelde diameter van het gat: $(D_A + D_B)/2$;

$S_{20\text{ °C}}$ = "dubbele" spleetbreedte op kamertemperatuur;

$S_{\text{SOLD.}}$ = "dubbele" spleetbreedte op soldeertemperatuur;

ΔT = temperatuurverhoging ten opzichte van 20 °C;

A = het materiaal aan de buitenzijde;

B = het materiaal aan de binnenzijde.

In formule 5.4 en 5.5 is aangenomen dat D_A en D_B veel groter zijn dan S . De waarde voor $D_{\text{GEM.}}$ zal daarom vrijwel gelijk zijn aan die van D_A en D_B .

Voorbeeld

Een nikkelen pijp wordt in een flens van zuiver koper gesoldeerd. De pijp heeft een doorsnede van 50 mm. Er wordt gesoldeerd met BAg-8 (72Ag28Cu) op een temperatuur van 800 °C. Wat is de in te stellen spleet op kamertemperatuur?

Bij de oplossing wordt uitgegaan van een gewenste spleet op soldeertemperatuur van 0,05 mm. Dus $S_{\text{SOLD.}} = 0,10$ mm.

Uit figuur 5.5 volgen de waarden voor de lineaire uitzetting op 800 °C:

$$\beta_{\text{KOPER}} = 0,0155 \text{ mm/mm}$$

$$\beta_{\text{NIKKEL}} = 0,0125 \text{ mm/mm}$$

Verder geldt $D_{\text{GEM.}} = 50$ mm.

Deze gegevens worden ingevuld in formule 5.5:

$$\begin{aligned} S_{20\text{ °C}} &= 0,10 - (0,0155 - 0,0125) \times 50 \\ &= 0,10 - 0,15 = -0,05 \text{ mm} \end{aligned}$$

Op kamertemperatuur is dus een negatieve spleet gewenst. Vertaald naar de praktijk betekent dit dat er een nulspleet vereist is. Om na te gaan wat hiervan de consequentie is op soldeertemperatuur, wordt de waarde $S_{20\text{ °C}} = 0$ ingevuld in formule 5.5:

$$0 = S_{\text{SOLD.}} - (0,0155 - 0,0125) \times 50$$

Na omwerking volgt hieruit: $S_{\text{SOLD.}} = 0,15$ mm.

De werkelijke capillaire spleet op soldeertemperatuur is de helft hiervan: 0,075 mm. Deze waarde ligt op de bovengrens van de in tabel 5.1 aanbevolen spleetbreedte. Dat betekent dat bij deze constructie ervoor gezorgd moet worden dat de pijp goed gecentreerd is. Bij afwijkingen zal de spleet namelijk plaatselijk te breed worden.

5.6 Monteren en fixeren

De constructie moet zodanig worden opgezet, dat de losse onderdelen zichzelf in de goede positie houden tijdens het solderen. Dit kan bijvoorbeeld worden bereikt door het aanbrengen van pasranden aan de onderdelen. Soms kan gebruik worden gemaakt van technieken zoals hechtlassen, puntlassen, binden, centeren, enz.

Wanneer dit om bepaalde redenen niet mogelijk is, moet gebruik worden gemaakt van vaak gecompliceerde positioneer-/fixeermatten. Gebruik van zulke soldeermatten beperkt het aantal te solderen samenstellingen per charge.

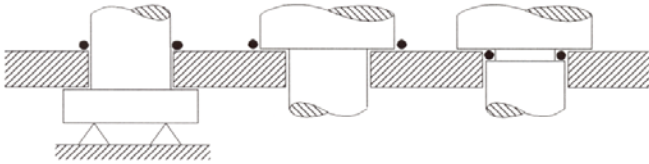
5.7 Doseervormen

Een specifiek punt waar de constructeur rekening mee moet houden, is het feit dat het soldeer vóór het uitvoeren van het soldeerproces dient te worden aangebracht. Het soldeer kan in verschillende vormen worden gedoseerd, zoals:

- ▶ draad;
- ▶ ringetjes (uit draad);
- ▶ folie;
- ▶ rivetjes (uit folie of dunne plaat);
- ▶ tape;
- ▶ poeder;
- ▶ pasta (poeder aangemaakt met een bindmiddel);
- ▶ bedekking (galvanisch of chemisch opgebracht);
- ▶ gesinterde vormdelen.

Draad en gesinterde vormdelen kunnen zowel uitwendig als in speciaal daarvoor aangebrachte groeven of kamertjes worden aangebracht. Voor het inwendig aanbrengen is een goed op de naad aansluitende en nauwkeurig om het

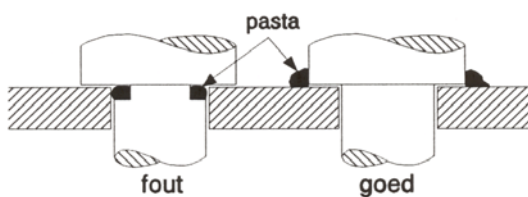
soldeer passende holte vereist. Het soldeer moet zo worden aangebracht dat tijdens het smelten de zwaartekracht meehelpt het soldeer uit de groef of kamer te doen lopen en de spleet te vullen (zie figuur 5.8).



figuur 5.8 Doserende van soldeer in draadvorm of in gesinterde vorm

Soldeer in de vorm van *folie* of *tape* wordt altijd tussen de te solderen vlakken geplaatst. De constructie moet zodanig in de oven kunnen worden geplaatst, dat de soldeer-naad ongeveer in het horizontale vlak ligt. Tevens moet een aandrukkkracht (gewicht) werkzaam zijn om de delen tijdens het solderen te laten "nazakken". Een voordeel van het werken met soldeer in folie- of tapevorm is het feit dat de soldeerspleet niet meer door middel van capillaire werking behoeft te worden gevuld. Deze soldeervorm vindt dan ook toepassing bij producten waar grote vlakken moeten worden verbonden, of die van minder goed te bevochtigen materialen zijn vervaardigd. Een nadeel van het gebruik van folie is, dat deze doseervorm geen navullend vermogen heeft. De soldeerspleet dient dus voor het gehele te solderen vlak voldoende planparallel te zijn. Het is ook gewenst dat de delen kunnen "nazakken" tijdens het solderen.

Bij gebruik van soldeer in de vorm van *pasta* of *poeder*, dat in het algemeen met een organisch bindmiddel wordt verwerkt, moet rekening worden gehouden met het vrijkomen van dampen. Deze dampen moeten goed kunnen worden afgevoerd. Daarom wordt deze doseervorm bij voorkeur niet in slecht afpompbare holten toegepast (zie ook figuur 5.9).



figuur 5.9 Aanbrengwijze van soldeer in pastavorm (fout/goed)

5.8 Materiaalbeïnvloeding

Door het solderen op hoge temperatuur kunnen er bij het basismateriaal verandering in structuur en eigenschappen optreden. De constructeur moet zich hiervan bewust zijn en zo nodig behandelingen voorschrijven die de gewenste eigenschappen behouden of herstellen. Enkele voorbeelden zijn:

► Koudverstevinging

Deze zal door hoogtemperatuursolderen geheel verdwijnen en is ook niet herstelbaar. Bij bijvoorbeeld koudgetrokken materiaal zal de rekgrens aanzienlijk kunnen dalen. Bij hoog belaste onderdelen moet hiermee terdege rekening worden gehouden. De in het materiaal aanwezige spanning zal vrijkomen en zal vorm- en maatveran-

dering van het gesoldeerde product tot gevolg hebben. Bij het solderen van precisie-onderdelen is het noodzakelijk voor het solderen eerst spanningsarm te gloeien en een nabewerking uit te voeren na het solderen.

► Korrelgroei

Bij de meeste laag-koolstofhoudende ongelegeerde constructiestaalsoorten zal door een soldeerbehandeling boven 1000 °C korrelgroei optreden. Wanneer hoge eisen worden gesteld aan de taaiheid, is het noodzakelijk na het solderen een normaal gloeibehandeling toe te passen.

► Hardingsverschijnselen

Wanneer "luchthardende" staalsoorten worden gesoldeerd, treden bij te snelle afkoeling ongewenste hardingsverschijnselen op. Hiermee moet rekening worden gehouden in het afkoeltraject na het solderen, door de afkoelsnelheid belangrijk lager dan de kritische afkoelsnelheid te houden. Voor sommige materialen is het nodig, indien deze nog moeten worden bewerkt, na het solderen een ontlaat- of zachtgloeibehandeling toe te passen. Natuurlijk kan ook gebruik worden gemaakt van het hoogtemperatuursolderen door deze behandeling juist te combineren met een hardings- c.q. veredelingsbehandeling.

► Zachtgloeieffect

Wanneer geharde of veredelde materialen hoogtemperatuur gesoldeerd worden, zullen deze in het algemeen hun specifieke eigenschappen verliezen.

► Precipitatieharding

Materialen die in precipitatiegeharde toestand worden aangeboden, zullen door de soldeerbehandeling deze eigenschap verliezen. Door een soldeersoort voor te schrijven met een soldeertemperatuur die overeenkomt met de oplosgloeitemperatuur, kan na de soldeerbehandeling bij een voldoende snelle afkoeling, opnieuw een precipitatiebehandeling worden uitgevoerd.

► Corrosiebestendigheid

Het hoogtemperatuursolderen van niet gestabiliseerde corrosievaste staalsoorten kan, vooral bij grote producten of ladingen met grotere massa's, leiden tot gevoelig worden voor interkristallijne corrosie. Alleen wanneer voldoende snel van een hoge temperatuur ($T > 900$ °C) kan worden afgekoeld naar een temperatuur lager dan 400 °C, is dit risico klein. Voor kritische toepassingen is het raadzaam gestabiliseerde soorten of laag-koolstofhoudende soorten (L-kwaliteiten) voor te schrijven.

Hoofdstuk 6

Werkplaatstechnische aspecten

6.1 Voorbewerken

Van groot belang is dat er, zeker bij gecompliceerde of kritische constructies, een goede communicatie is tussen constructeur, werkplaats en soldeerdeskundige. Tijdens de fabricage van onderdelen moet rekening worden gehouden met de in een later stadium uit te voeren soldeerbehandeling. Opmerkingen over de fabricagemethode met betrekking tot het solderen worden bij voorkeur op schrift gesteld. Dit kan in werkvoorschriften of in noten op de fabricagetekening. Kanten bij het bewerken mogen in principe niet gebroken worden om optimaal te kunnen profiteren van het capillaire effect. Breken leidt tot een vergroting van de opening op de plaats waar het soldeer moet worden opgezogen in de naad.

Bewerkingsspanningen

In het materiaal ontstaan door de ruwe voorbewerking spanningen, die tijdens het solderen tot ongewenste maten en vormveranderingen kunnen leiden. Dit kan op twee manieren grotendeels worden voorkomen:

- ▶ spanningsarm gloeien plus nabewerken;
- ▶ nabewerken met afnemende spaandiepte.

Spanningsarm gloeien betekent een extra warmtebehandeling die echter bij het verwerken van koudverstevigd materiaal voor nauwkeurige onderdelen altijd moet worden uitgevoerd.

Indien zachtgegloeid, warmverwerkt of veredeld materiaal wordt bewerkt, kan het na voorbewerken in een aantal sneden machinaal worden nabewerkt, waarbij steeds de volgende snede ongeveer dertig procent van de voorgaande snede bedraagt.

Reinheid soldeervlakken

Van groot belang is dat de soldeervlakken niet worden verontreinigd met middelen die de bevochtiging nadelig beïnvloeden. In het algemeen is het reinigen van soldeervlakken met behulp van glaspapels of aluminiumoxide korrels nadelig. Gritstralen kan soms een oplossing bieden. Deeltjes die in het oppervlak achterblijven hebben een negatieve invloed op de bevochtiging. Door keuze van een goede beitsbehandeling kan dit veelal weer worden verbeterd.

6.2 Reinigen

Na de meeste verspanende bewerkingen is goed ontvetten van de onderdelen, en in sommige gevallen een lichte beitsbehandeling, voldoende.

Dit kan gebeuren door:

- ▶ spoelen in organische oplosmiddelen; of bij voorkeur
- ▶ spoelen in alkalische reinigingsmiddelen;
- ▶ ultrasoon reinigen in organische oplosmiddelen of alkalische reinigingsmiddelen;
- ▶ dampontvetten in organische oplosmiddelen;
- ▶ kathodisch/anodisch reinigen.

Vanuit milieu-oogpunt verdienen alkalische reinigingsmiddelen de voorkeur boven organische oplosmiddelen. Goed naspoelen met demiwater en drogen met bijvoorbeeld warme lucht zijn noodzakelijk.

Ter controle of het gereinigde, te solderen oppervlak schoon is, is een testmethode ontwikkeld om de mate van reiniging van het oppervlak vast te stellen. De testmethode berust op het al dan niet uitvloeien van een testinkt ten gevolge van de heersende oppervlaktespanning; de testinkt wordt met de daarvoor in de handel verkrijgbare speciale inktstiften op het gereinigde oppervlak aangebracht. De testmethode is gebaseerd op het vergelijken van materiaaloppervlakken die vooraf in verschillende (schoon en met bewerkingsoliën vervuild) condities verkeren, en waarvan na reiniging met waterig alkalische of organische oplosmiddelen de mate van schoon zijn door middel van oppervlaktespanningsbepalingen wordt vastgelegd (zie figuur 6.1): hoe groter de oppervlaktespanning, des te beter is de mate van schoon zijn.

De inktstiften worden geleverd in een range van meetwaarden van 30 mN/m tot en met 44 mN/m. De inktoplossingen van deze stiften bestaan uit diethyleenglycol en 2-methyl-2,4-pentadiol in verschillende mengverhoudingen. Oorspronkelijk zijn de stiften ontwikkeld voor het gebruik op kunststoffen in de drukkerijtechniek, maar op metalen voldoen de stiften goed. In de handel is ook speciale meetapparatuur in handzaam formaat waarmee met behulp van een camerasysteem de contacthoek kan worden opgemeten.

Aanbevolen wordt van uit oogpunt van arbeidsomstandigheden en zorg voor het milieu, waterige alkalische reinigingsmiddelen toe te passen, mits het water niet kan leiden tot extra dikke oxidelagen en daardoor tot een verminderde bevochtiging.

Echter, ook dampontvetten is, indien aan strenge eisen wordt voldaan, toegestaan. Hiermee zijn met alkalische reinigingsmiddelen vergelijkbare of betere resultaten te bereiken. Voordeel van dampontvetten is, dat dit reinigingsproces niet materiaalafhankelijk is.

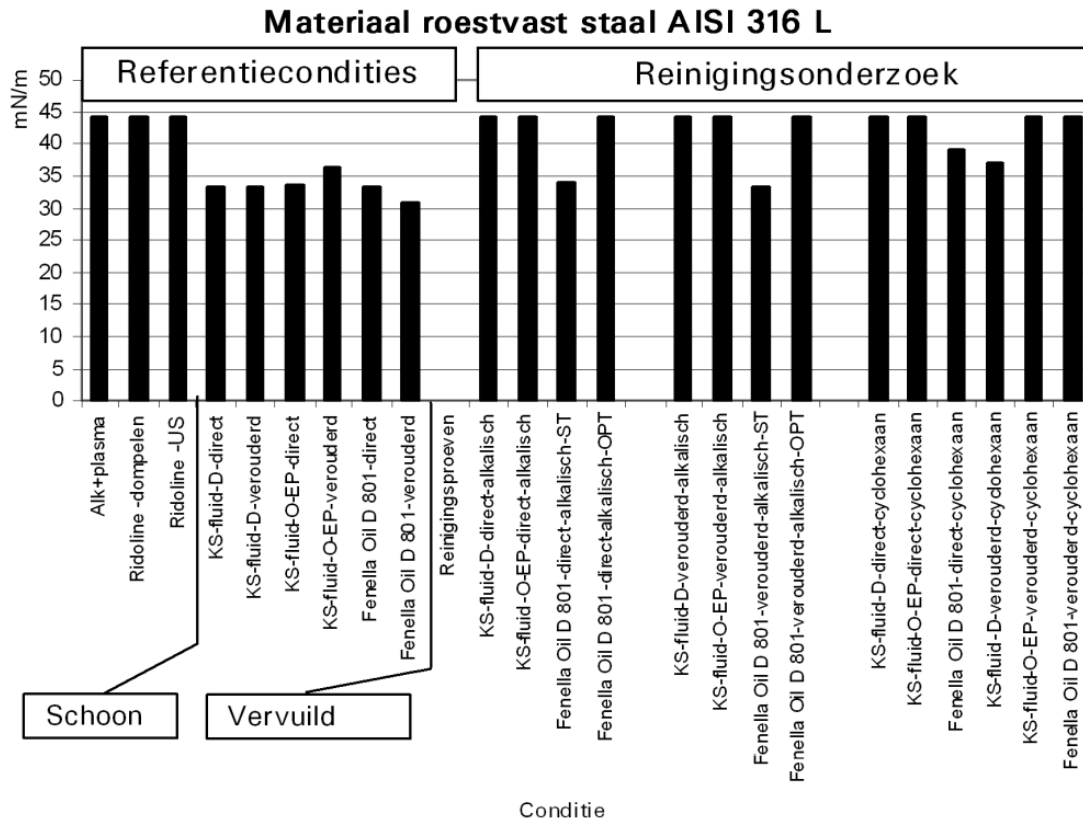
Na de ontvettingsbehandeling kan voor materialen die een hechte stabiele oxidehuid bezitten, beitsen toch nog noodzakelijk zijn. Hiervoor wordt verwezen naar de handboeken. In de meeste gevallen is een goede ontvettingsbehandeling echter ruimschoots voldoende.

De soldeervlakken moeten na de reiniging worden gevrijwaard tegen nieuwe verontreinigingen. Bij het beetpakken van kritische producten moeten schone niet pluizende handschoenen worden gebruikt, of men moet de soldeervlakken afdekken om deze te beschermen tegen aanraking. Ook tijdens opslag moeten de onderdelen worden beschermd tegen stof. De opslagruimte moet zodanig geconditioneerd zijn, dat roestvorming (door vocht) of andere aantasting tijdens de opslagperiode niet kan optreden. In sommige gevallen is het nodig dat onderdelen worden bewaard in een droogstoof.

6.3 Monteren

De montage van de onderdelen moet met zorg gebeuren ter voorkoming van beschadiging. Indien de onderdelen lang in een magazijn hebben gelegen, of als er twijfels zijn ten aanzien van de reinheid door gebruik van een minder goede verpakking, is het aan te bevelen de producten nogmaals te reinigen. Het is raadzaam om in de fase na de reiniging, zeker voor kritische onderdelen, schone, niet pluizende handschoenen te gebruiken bij het beetpakken en te werken in een stofarme ruimte.

Het soldeer wordt nu in zijn gewenste vorm aangebracht. Vormdelen zoals draad, ringetjes en folies dienen vóór de



figuur 6.1 Controle op de mate van reiniging van een RVS AISI 316L oppervlak door middel van bepaling van de oppervlakte-spanning met behulp van een testinkt.

Toelichting: Alk + plasma is ultrasoon reinigen met een waterige alkalische oplossing gevolgd door plasmareiniging; Ridoline-dompelen of US is dompelen c.q. ultrasoon reinigen in een waterig alkalisch oplosmiddel; KS-fluid O-EP en KS-fluid D zijn snij-/smeeroliën; Fenella Oil D-801 is een dieptrekolië/trekvet; direct = reinigen onmiddellijk na verontreinigen; verouderd = reinigen na ca. een maand opslag; ST = standaard reinigingsbehandeling (60 °C-5 min); OPT = optimale reinigingsbehandeling (> 60 °C->5 min); cyclohexaan is een organisch reinigingsmiddel voor dampontvetten.

montage te worden gereinigd. Bij het aanmaken van soldeer in pastavorm wordt poeder gemengd met organische bindmiddelen. Aanbevolen wordt milieuvriendelijke bindmiddelen te gebruiken die in het opwarmtraject restloos verdwijnen door thermische degradatie.

Het kunnen samenstellen en fixeren van de productonderdelen moet in eerste instantie worden bereikt door de maatvoering. Indien dit niet mogelijk is, worden speciale hechttechnieken of positioneermallen toegepast. Deze mallen hebben een beperkte levensduur en zullen mogelijk na iedere soldeercyclus moeten worden gecontroleerd op hun functioneren.

Delen van de mallen die in contact komen met het product of met het soldeer, moeten met een goed antivloeimiddel ("stop-off") worden behandeld. Hetzelfde geldt voor productdelen waarop het vloeibare soldeer niet mag uitvloeien langs de naad. Het antivloeimiddel kan door middel van stift of penseel worden aangebracht.

Na de montage zullen de samengestelde producten naar de oven moeten worden getransporteerd. Hierbij moet de positie van de onderdelen ten opzichte van elkaar gewaarborgd blijven. Ook de transportmiddelen moeten hierop zijn aangepast.

6.4 Solderen in ovens

Voor een beschrijving van de werkzaamheden bij het solderen wordt uitgegaan van de twee meest gebruikte oventypen, de vacuümoven en de transportbandoven.

Vacuümoven

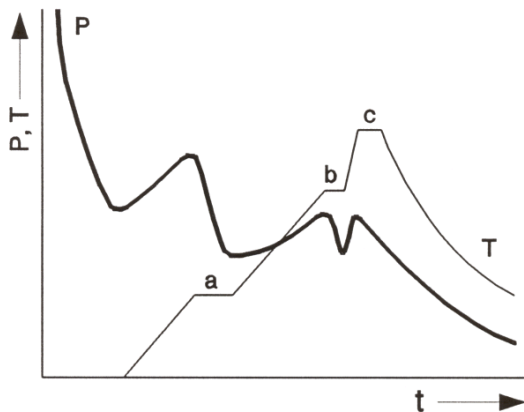
Na de montagewerkzaamheden worden de producten opgesteld op een frame van hittebestendig materiaal. Om tot een optimale vullingsgraad van de oven te komen, is vaak hulpgereedschap noodzakelijk. Het beladen frame wordt in de oven geplaatst.

Voor de temperatuurregistratie van het soldeerproces worden een of meer "werkstukkoppels" aangebracht. Als het niet mogelijk is om een dergelijk thermokoppel in het product aan te brengen, kan het in een "dummy-product" met een vergelijkbaar opwarm- en afkoelgedrag als het te solderen product worden gestopt.

Het gewenste temperatuurverloop van het soldeerproces wordt geprogrammeerd in de regelinstallatie van de oven.

Na het starten van de oven zuigen de vacuümpompen eerst de ovenruimte leeg tot een bepaalde vacuümdruk. Daarna wordt met vooraf ingestelde opwarmingsnelheid opgewarmd naar de uitdamptemperatuur (a), de doorwarmtemperatuur (b) en de soldeertemperatuur (c). Vervolgens wordt afgekoeld tot een temperatuur waarbij het soldeer volledig is gestold. Hierna kan eventueel versneld verder worden gekoeld.

De opwarmingsnelheid is afhankelijk van de vorm en de massa van de producten en van de vullingsgraad van de oven. Vaak wordt de opwarmingsnelheid verhoogd in het gebied waar het soldeer vloeibaar is. Een schematisch overzicht van het procesverloop wordt gegeven in figuur 6.2.



figuur 6.2 Het verloop van de temperatuur (T) en druk (P) in de tijd (t) bij het solderen in vacuüm.
punt a: uitdampstemperatuur
punt b: doorwarmtemperatuur
punt c: soldeertemperatuur

Er zijn drie momenten waarop de temperatuur constant blijft:

- op de *uitdampstemperatuur* (bijvoorbeeld 300 °C) kan het verwarmingsproces enige tijd worden stopgezet, om de opgelopen vacuümdruk weer te laten dalen. De verslechtering van het vacuüm wordt veroorzaakt door het vrijkomen van gassen, dampen, vocht van bindmiddelen en dergelijke;
- op de *doorwarmtemperatuur* krijgt de ovenlading de gelegenheid om inwendig dezelfde temperatuur aan te nemen als aan de buitenkant heerst. Deze temperatuur wordt 20 tot 50 °C onder het begin van het smelttraject van het soldeer gekozen;
- op de *soldeertemperatuur*, deze ligt vaak 50 °C boven het eind van het smelttraject van het soldeer. Zie voor bijzonderheden hoofdstuk 10.

Ook de afkoelsnelheid wordt vooraf geprogrammeerd. De maximale afkoelsnelheid neemt af bij lagere temperaturen. Bij kleine producten is deze snelheid boven 600 °C redelijk. Onder deze temperatuur verloopt de afkoeling in vacuüm relatief langzaam, zodat op een snellere methode moet worden overgestapt. Dat kan door de oven met een inert gas te vullen en voor een betere gascirculatie een ventilator in te schakelen. De juiste afkoelsnelheid en de gas-inlaattemperatuur worden door meerdere, soms tegenstelde eisen bepaald.

Enkele voorbeelden:

- om vervormingen in productdelen tegen te gaan, moet langzaam worden afgekoeld;
- om ongewenste korrelgroei in het productmateriaal tegen te gaan moet snel worden afgekoeld.

Sommige materialen vereisen een relatief hoge afkoelsnelheid, bijvoorbeeld gereedschapsstaal dat na het solderen direct gehard dient te worden. In dat geval moet de oven onder overdruk met beschermgas worden gevuld.

Transportbandoven

De te solderen productdelen worden vooraf op de gebruikelijk wijze gereinigd en van soldeer voorzien. In een enkel geval kan het toevoegen van bijvoorbeeld een ringetje soldeer worden gecombineerd met het op de transportband plaatsen van het product.

In de praktijk varieert de doorlooptijd van een product van tientallen minuten tot enige uren. Na het solderen worden de producten aan het eind van de transportband afgeno-

men. In het algemeen worden ze direct gecontroleerd en verpakt.

In hoofdstuk 4 is opgemerkt dat het verhittingsdeel diverse verwarmingselementen bevat. Hiermee is een productafhankelijk "temperatuurprofiel" in te stellen. Het zal duidelijk zijn dat het gewenste temperatuur-tijd-verloop van de te solderen producten wel geprogrammeerd, maar minder subtiel uitgevoerd kan worden dan bij de vacuümmoven.

Door het doorvoeren van een temperatuuropmeter (Datapaq[®]) kan het temperatuurprofiel van een product eenvoudig worden vastgelegd. Het meetinstrument bestaat uit een elektronische recorder, thermokoppels voor het product en een thermische barrière als isolatie, zodat tijdens de cyclus de elektronica wordt beschermd tegen oververhitting. Deze isolatie biedt voldoende lang weerstand tegen oververhitting (tot 800 °C maximaal 20 uur) en is daarmee geschikt voor bijvoorbeeld het solderen van aluminium in een oven. De thermische barrière kan overigens een bron zijn van vocht wat het soldeerproces nadelig beïnvloeden kan.

6.5 Nabewerken

Na het uitvoeren van de voorgeschreven soldeercyclus is het niet nodig de producten te reinigen zoals dit bij hard solderen met een vloeimiddel gebruikelijk is. Bij sommige reactieve materialen kan enige verkleuring in de afkoelfase van de soldeercyclus optreden. Indien dit bezwaarlijk is, kan een beitsbewerking worden uitgevoerd, mits het soldeermateriaal dit ook kan verdragen. Bij precisie-onderdelen kan het noodzakelijk blijken de nauwkeurigste maten na te bewerken.

Hoofdstuk 7

Kwaliteitsbeheersing

7.1 Inleiding

Voordat men overgaat tot kwaliteitsbeheersing, moet eerst de gewenste kwaliteit worden aangegeven. Onder kwaliteit verstaat men onder andere de eigenschappen, deugdelijkheid en hoedanigheid van de soldeerverbindingen. Kwaliteitsbeheersing wordt verkregen door het uitvoeren van passende werkwijzen en maatregelen, waarbij men streeft naar een kwaliteit die slechts binnen aanvaardde grenzen varieert. Naast een economisch verantwoorde productie vereist kwaliteitsbeheersing een zakelijk inzicht. Dit betekent dat men producten waaraan geringe eisen worden gesteld, anders benadert dan producten waaraan hoge eisen worden gesteld.

In Nederland bestaan nog geen officiële regels of codes ten aanzien van kwaliteitsbeheersing voor het hoogtemperatuursolderen. Door het ontbreken van Nederlandse normen op het gebied van het hoogtemperatuursolderen zoekt men vaak zijn toevlucht tot Europese normen; bijvoorbeeld normen ten aanzien van kwaliteitsborging, ovenspecificaties en inspecties.

Zo zijn in de Europese norm EN ISO 18279 (inmiddels ook uitgekomen als NEN-EN-ISO 18279:2004) hardgesoldeerde verbindingen ingedeeld in vier categorieën gebaseerd op twee criteria:

- ▶ de ontwerpisen;
- ▶ de gevolgschade bij het falen van de soldeerverbinding.

De categorieën zijn ingedeeld naar zeer strenge eisen, in categorie A tot geen speciale eisen, in categorie D. Per categorie is aangegeven welke onvolkomenheden nog toelaatbaar zijn.

Categorie A is bestemd voor toepassingen, waaraan de hoogste eisen worden gesteld. Het falen van de soldeerconstructie in deze categorie heeft ernstige schade en menselijk leed tot gevolg. Voor deze toepassingen dient een kwaliteitsplan te worden opgesteld, waarin alle voorkomende eisen stapsgewijs worden beschreven. Ook zijn procedures en specificaties noodzakelijk. Keuringen en inspecties moeten worden uitgevoerd door gekwalificeerd personeel. Kwaliteitsbeheersing is te onderscheiden in:

- ▶ kwalificatie van de soldeerprocedure;
- ▶ controle op de naleving;
- ▶ keuring.

Naast de kwaliteitsbeheersing dient ook de wijze van kwaliteitsborging te zijn vastgelegd, waar uit blijkt dat de parameters van de soldeerprocedure (kunnen) worden gecontroleerd. In dit verband kan worden verwezen naar twee Amerikaanse richtlijnen te weten ANSI/AWS B2.2-91 Standard for Brazing Procedure and Performance Qualification en AWS C3.6:1999 Specification for Furnace Brazing.

7.2 Soldeerprocedure

Een geregistreerde soldeerprocedure wordt opgesteld om de condities en variabelen van het soldeerproces vast te leggen. Dit heeft tot doel reproduceerbare producten te krijgen die voldoen aan de ontwerpisen. Een soldeerprocedure bevat in feite twee belangrijke punten, te weten:

1. De soldeertekening (kwaliteitsplan)
2. De soldeercyclus (ovenprogramma)

De soldeertekening bevat de volgende punten:

- ▶ het werkstukmateriaal;
- ▶ de geometrische details van de verbinding;
- ▶ de soldeernaadvorm (onder andere de materiaaldikte, overlap, spleetbreedte);
- ▶ de voorbehandeling (bewerkingsrichting, randen afbramen, oppervlakteruwheid);
- ▶ de oppervlaktereiniging (stralen, ontvetten, chemisch reinigen, vernikkelen, enz.);
- ▶ het soldeermateriaal (soort of chemische samenstelling, vorm, hoeveelheid, plaats en wijze van doseren);
- ▶ de nabehandeling (verwijderen van overtollig soldeer).

De soldeercyclus bevat de volgende punten:

- ▶ de atmosfeer (vacuümniveau, type beschermgas, kwaliteit van het beschermgas);
- ▶ de soldeercyclus (tijdsduur, doorwarmtemperatuur, soldeertemperatuur, opwarm- en afkoelsnelheid, instelling van de apparatuur);
- ▶ een aanvullende warmtebehandeling, zoals precipitatieharden of ontlaten.

De opgestelde soldeertekening en soldeercyclus dienen als document voor de afdelingen productie en kwaliteitszorg. De registratie van de soldeercyclus tijdens het uitvoeren van het soldeerproces is de vastlegging van de werkelijk toegepaste procesvariabelen. Bijstelling van zowel de tekening als de soldeercyclus kan volgen na het verkrijgen van (inspectie-)resultaten van gemaakte verbindingen. De eisen waaraan een gesoldeerd product moet voldoen, worden ook aangegeven in de soldeerprocedure, of in een kwaliteitsplan.

7.3 Controle

Het bedrijf dat, of de afdeling die het solderen uitvoert, dient tijdig met de opdrachtgever of toezichthoudende instantie te overleggen over goedkeuring van de soldeerprocedure en de controle hierop. De controle bij hoogtemperatuursolderen is gewoonlijk onder te verdelen in:

- ▶ kalibratie en controle van productie-apparatuur en meetmiddelen;
- ▶ certificering van personeel
- ▶ procesregistraties;
- ▶ keuringen en inspecties.

Kalibratie wordt periodiek uitgevoerd op thermo-elementen, temperatuurregelaars, temperatuurschrijvers, vacuümmeet- en registratie-apparatuur, gereedschap voor het meten van de ingestelde soldeerspleet en beproevingsapparatuur die gebruikt wordt voor het testen van soldeerverbindingen. Verder is controle nodig op de temperatuurverdeling binnen de oven en op de lektheid.

Werkprocedures worden voor het productiepersoneel omgezet en vastgelegd in werkinstructies ten einde de technische uitvoering te kunnen controleren. Productie- en kwaliteitsdocumenten worden beheerd door de kwaliteitsdienst en in de regel gedurende een periode van tien jaar bewaard of elektronisch opgeslagen.

Soldeerverbindingen kunnen zowel niet-destructief als destructief worden geïnspecteerd. Als norm voor deze inspecties kunnen normbladen als de eerder vermelde EN ISO 18279 of AWS C3.6:1999 gebruikt worden, of een door de kwaliteitsdienst opgesteld kwaliteitsplan.

7.4 Normen soldeermateriaal

Soldeermaterialen worden geproduceerd volgens natio-

nale of internationale (NEN, AWS, DIN, ISO) normen of volgens de specificaties van hun klanten. Veelal zijn de klantenspecificaties strenger dan de (inter)nationale normen. Nederland kent alleen normen voor zacht- en hard-soldeermaterialen. Bij het opstellen van een eigen specificatie voor de afnemer zal bijzondere aandacht moeten worden besteed aan de soort en het gehalte van de toegestane verontreinigingen. Het is zinvol om de fabrikant altijd om een analyse-certificaat te vragen. Binnen NIL-verband zijn aanbevelingen gedaan ten aanzien van soldeerbetal-specificaties.

7.5 Keuren van verbindingen

Er wordt volstaan met een korte toelichting op een aantal niet-destructieve onderzoeksmethoden:

Visueel onderzoek

Visuele inspectie is wellicht de meest toegepaste techniek bij de controle van soldeerverbindingen en zeer geschikt om een eerste indruk te krijgen. Wanneer het soldeermateriaal aan de binnenzijde of aan één zijde van de verbinding is gedoseerd en men na het solderen een homogene, defectvrije verbinding ziet aan de andere zijde, dan spreekt men gewoonlijk van een goede verbinding. Moeilijk toegankelijke verbindingen kunnen met een endoscoop worden geïnspecteerd. Na een visuele inspectie kan men besluiten tot een "inwendige" inspectie met andere technieken.

Penetrant onderzoek

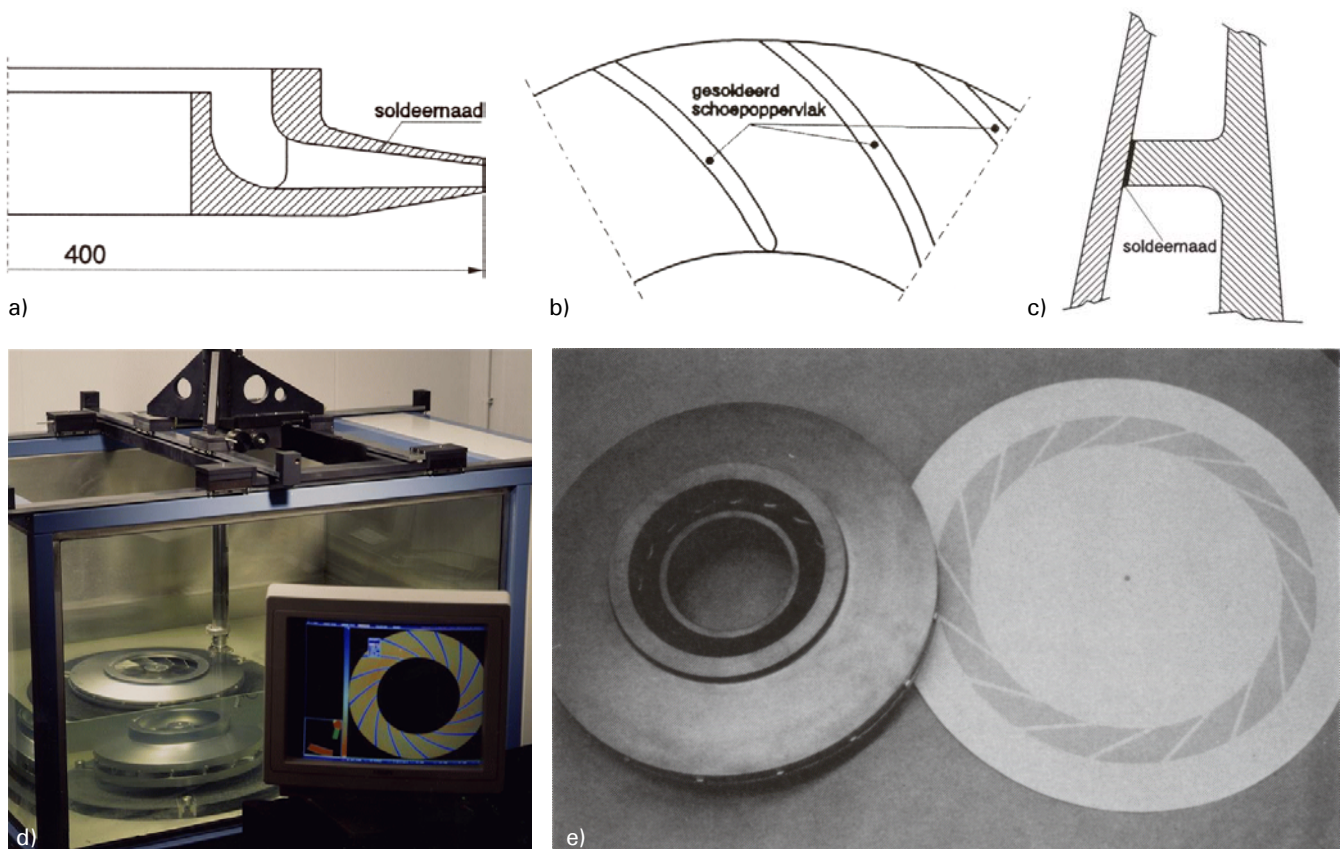
Scheuren en poreusheid kan men detecteren met "rode" en fluorescerende penetrant. De interpretatie van de aantekeningen is soms moeilijk in verband met onregelmatigheden aan het gesoldeerde oppervlak. Penetrant inspecties moet men vermijden indien verwacht wordt dat naderhand reparaties worden uitgevoerd. De resten zijn namelijk zeer moeilijk te verwijderen.

Ultrasoon onderzoek

De vorm en de toegankelijkheid van de soldeerverbinding bepalen in grote mate de toepasbaarheid van de ultrasoon-inspectietechniek. De reflectie van een gevulde gesoldeerde verbinding verschilt sterk van een niet-gevulde verbinding. Ultrasoon onderzoek kan zowel met de hand als automatisch worden uitgevoerd op constructies met wanddikten variërend van ongeveer 1 mm tot meer dan 50 mm. De inspectieresultaten, bijvoorbeeld vastgelegd op een "C-scan", geven een beeld van de plaats en de grootte van eventuele defecten (figuur 7.1). Van een "C-scan", een geschreven tweedimensionaal akoestisch beeld van de verbinding, kan het percentage hechting/niet-hechting worden bepaald.

Röntgenonderzoek

Röntgenonderzoek wordt op grote schaal toegepast bij het inspecteren van soldeerverbindingen. Een verbinding met een uniforme dikte en een relatief geringe materiaaldikte ten opzichte van de dikte van de naad, is gemakkelijk te inspecteren. Verschillen in de röntgenabsorptie



figuur 7.1 Ultrasoon-inspectie van een turbocompressorwaaier

- a) doorsnede van de waaier;
- b) bovenaanzicht van een gedeelte van het gesoldeerde schoepoppervlak;
- c) detail van de soldeernaad van een schoep in een turbocompressor;
- d) gemechaniseerde ultrasone hechtingscontrole van de gesoldeerde waaier (C-scan methode) (foto Bodycote-Diemen);
- e) turbocompressorwaaier en bijbehorend sonogram, het resultaat van gemechaniseerd US-onderzoek (foto Bodycote-Diemen)

tussen basis- en soldeermateriaal maakt de interpretatie van de röntgenfilms moeilijker. Films die twee zijden van een verbinding weergeven, bijvoorbeeld bij pijp-pijpverbindingen, moeten met extra zorg worden geïnterpreteerd. De beste resultaten worden dan met microfocus-röntgen-apparatuur verkregen.

Thermografie

Thermografie kan ook een mogelijkheid zijn tot niet-destructief onderzoek. Door aan één zijde te verwarmen en tegelijk het beeld vast te leggen aan de andere zijde is een inzicht te krijgen van de mate van hechting of vulling: waar hechting of vulling ontbreekt treedt een vertraging op in de temperatuurstijging.

Lekdichtheidsonderzoek

Bij lekzoeken kan men of de sterkte controleren (door afpersen) of de lekdichtheid (door de inlek te meten). Bij afpersen met een vloeistof past men een druk toe die gewoonlijk 1,5 keer de maximum bedrijfsdruk is. Bij het beproeven van de lekdichtheid kan de inlek van de gehele gesoldeerde constructie worden bepaald. Ook kan de locatie van een lek worden bepaald.

Voor het uitvoeren van niet-destructief onderzoek op soldeerverbindingen wordt verwezen naar onderstaande normen:

- ▶ NEN-EN 12799:2000/A1:2004 Niet-destructief onderzoek van hardgesoldeerde verbindingen;
- ▶ NEN-EN-ISO 18279:2004 Onvolkomenheden in hardgesoldeerde verbindingen.

Voorts kan worden verwezen naar de Amerikaanse richtlijn ANSI/AWS C3.8-90 Recommended Practice for Ultrasonic Inspection of Brazed Joints.

metalografisch en mechanisch onderzoek

Bovenstaande keuringsmethoden zijn niet-destructief. Soms is het nodig een product of werkstuk destructief te onderzoeken. Hierbij wordt een oordeel gevormd over de homogeniteit van de soldeernaad, de structuur en de sterkte van de verbindingen. Voor het uitvoeren van mechanisch onderzoek op de soldeerverbindingen wordt verwezen naar de volgende normen:

- ▶ AWS C3.2-82: afschuifsterkte;
- ▶ EN 12797: treksterkte;
- ▶ DIN 50115: kerftaaiheid;
- ▶ ISO 5187-1985: trek- en afschuifsterkte;
- ▶ NEN-EN-ISO 12797:2000/A1:2004: Destructieve beproeving van hardgesoldeerde verbindingen.

Voorts kan worden verwezen naar de Amerikaanse richtlijn ANSI/AWS C3.2-82 Standard Method for Evaluating the Strength of Brazed Joints in Shear.

7.6 Overzicht NEN-EN-(ISO) normen, hard- en hoogtemperatuursoldeernormen

NEN-EN 1044:1999 en (inmiddels ook uitgekomen als *NEN-EN 1044:2006:Ontw.en*)
Hardsolderen: Toevoegmaterialen.

NEN-EN 1045:1997 en
Hardsolderen: Vloeimiddelen voor hardsolderen; Indeling en technische leveringsvoorwaarden.

NEN-EN-ISO 3677:1995 en

Toevoegmaterialen voor zacht- en hardsolderen - Aanduiding.

NEN-EN 12797:2000/A1:2004 en

Hardsolderen: Destructieve beproeving van hardgesoldeerde verbindingen.

NEN-EN 12799:2000/A1:2004 en

Hardsolderen: Niet-destructief onderzoek van hardgesoldeerde verbindingen.

NEN-EN 13133:2000 en

Hardsolderen: Kwalificeren van de soldeerder.

NEN-EN 13134:2000 en

Hardsolderen: Goedkeuring van de procedure.

NEN-EN 14324:2004 en

Hardsolderen: Richtlijnen voor het toepassen van handgesoldeerde verbindingen.

NEN-EN-ISO 18279:2004 en

Hardsolderen: Onvolkomenheden in hardgesoldeerde verbindingen.

NEN-ISO 2553:1994 nl

Las- en soldeerverbindingen; Symbolische weergave op tekeningen.

NEN-EN 3917 t/m 3948:2001 en

Lucht- en ruimtevaart: Op nikkel gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen.

NEN-EN 3952 t/m 3958:2001 en

Lucht- en ruimtevaart: Op zilver gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen.

NEN-EN 3959:2001 en

Lucht- en ruimtevaart: Op kobalt gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen.

NEN-EN 3960 t/m 3962:2001/C1:2002 en

Lucht- en ruimtevaart: Op goud gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen.

NEN-EN 3963 t/m 3964:2001 en

Lucht- en ruimtevaart: Op koper gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen.

NEN-EN 3965:2001 en

Lucht- en ruimtevaart: Op titaan gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen.

NEN-EN 4085, 4103 t/m 4105, 4250:2001 en

Lucht- en ruimtevaart: Op nikkel gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen.

NEN-EN 746-5:2000 en

Industriële installaties voor warmtebehandelingsprocessen; Deel 5: Bijzondere veiligheidseisen voor zoutbadinstallaties.

Hoofdstuk 8

Economische aspecten

8.1 Overzicht

Er zal in veel gevallen niet alleen op technische gronden voor hoogtemperatuursolderen worden gekozen. De keuze moet ook in economische zin verantwoord zijn. In dit hoofdstuk wordt daarom getracht om de lezer een inzicht te geven in de verschillende kostenaspecten. We beperken ons tot het geven van een beknopt overzicht van de factoren waaraan moet worden gedacht bij het maken van een productcalculatie. Dit zijn:

- a. soldeermateriaal;
- b. hulpmiddelen;
- c. reiniging;
- d. montage en dosering;
- e. solderen;
- f. inspectie.

Deze punten worden in § 8.2 nader toegelicht. Met betrekking tot punt e wordt er in eerste instantie vanuit gegaan dat het solderen buiten het eigen bedrijf plaatsvindt. In dit geval zijn de soldeerkosten per product eenvoudig vast te stellen aan de hand van de offerte van het soldeerbedrijf.

Als het solderen in eigen beheer plaatsvindt, kunnen de kosten voor solderen nader worden opgedeeld in de volgende onderwerpen:

- e1. apparatuur (afschrijving en rente);
- e2. kosten voor onderhoud en (verwachte) kosten voor reparatie;
- e3. verbruik van elektrische energie en water;
- e4. verbruik van gasen;
- e5. loonkosten.

In § 8.3 wordt specifiek op deze posten ingegaan.

8.2 Opbouw productkosten

a. soldeermateriaal

De keuze van het soldeermateriaal zal in eerste instantie worden bepaald door de eisen die worden gesteld aan het gesoldeerde product. Vervolgens zal worden getracht de toegevoegde waarde aan het eindproduct, als gevolg van het soldeerproces, zo laag mogelijk te houden. Op deze wijze kan men ook in economisch opzicht concurrerend zijn met andere verbindingsmethoden.

Een vergelijking tussen de prijzen van enkele soldeermaterialen wordt gemaakt in tabel 8.1. Bij het capillair solderen wordt een spleet gevuld. Daarom staat in de laatste kolom ook de prijsverhouding voor een bepaald volume vermeld.

De hoeveelheid soldeermateriaal die per soldeerverbinding moet worden aangebracht is meestal gering, waardoor de toegevoegde waarde aan het eindproduct beperkt is. Dit geldt uiteraard in mindere mate voor het soldeermateriaal op edelmetaalbasis.

b. hulpmiddelen

De prijs van een hoogtemperatuur-soldeerverbinding wordt voor een belangrijk deel bepaald door de constructie van de te verbinden delen. Er is een groot verschil tussen een constructie die zelfcentrerend is gemaakt en een waarbij dure hulpmiddelen zoals centreermallen noodzakelijk zijn. Bij het gebruik van soldeermallen is ook de montage veelal duurder. De soldeermallen moeten niet alleen gefabriceerd, maar ook onderhouden worden (ze worden meeverwarmd en gekoeld bij iedere soldeercharge).

Mallen kunnen zowel van metaal als van keramiek zijn. Bedenk dat met name het bewerken van keramiek een kostbare zaak is. De mallen mogen door hun materiaal-samenstelling noch het soldeerproces, noch het te solderen materiaal beïnvloeden.

c. reiniging

De reiniging van de onderdelen en de soldeervlakken gebeurt (nog) veelal via dampontvetten. Als hiervoor apparatuur moet worden aangeschaft, dan spelen de afmetingen en de seriegrootten van de producten een belangrijke rol. Ook de aanschaf van een afzuiginstallatie mag niet worden vergeten.

Naast de apparatuur-afschrijving dienen de loonkosten en het verbruik van reinigingsmiddelen in de calculatie te worden verwerkt.

d. montage en dosering

Het samenstellen van de werkstukdelen is vaak een belangrijke kostenfactor. Dit geldt in iets mindere mate voor het doseren van het soldeermateriaal. Draad of folie is meestal eenvoudig aan te brengen. Voor het verwerken van pasta's is een al dan niet eenvoudige doseerinstallatie vereist.

e. solderen

Als het solderen bij een soldeerbedrijf plaatsvindt, wordt de prijs door de laatste vastgesteld. Als men veel en regelmatig soldeerwerk heeft, kan het aantrekkelijk worden om in eigen beheer te gaan solderen. In § 8.3 wordt nader ingegaan op de kostenopbouw bij het solderen.

Behalve door commerciële motieven, zal de vraagprijs van het loonbedrijf afhangen van de soort oven waarin moet worden gesoldeerd. Dit wordt bepaald door een combinatie van factoren:

- technische eisen;
- productafmetingen;
- seriegrootte;
- beschikbaarheid van de ovens.

tabel 8.1 Prijsverhouding van enkele veel gebruikte soldeermaterialen (zomer 2006)

soldeermateriaal	AWS-code	prijsverhouding ^{*)}		Opmerking: Soldeer bevat:
		massa	volume	
goudbasis	BAu-4	320	575	82% Au
palladiumhoudend	BVAg-32	200	240	25% Pd
zilverbasis	BAg-8	6	7	72% Ag
nikkelbasis	BNi-5	2	2	71% Ni
koperbasis	BCu-1	1	1	100% Cu

^{*)} geldt voor het gelijktijdig aanschaffen van grotere hoeveelheden van het soldeer

Bij een grote serie kleine producten liggen de prijsverhoudingen als volgt:

- retortoven, prijsfactor: 2
- hoogvacuümoven, prijsfactor: 3
- transportbandoven, prijsfactor: 1

In alle andere gevallen is er geen algemene richtlijn te geven, omdat die afhangt van vele andere zaken, zoals bijvoorbeeld de vulgraad van de oven.

Als het solderen extern plaatsvindt, dan moeten de samengestelde werkstukken worden getransporteerd. Daarbij dient aan twee zaken aandacht te worden besteed:

- goede fixering van de werkstukdelen ten opzichte van elkaar;
- bescherming tegen vervuiling van met name de soldeervlakken.

Deze twee punten zullen er vaak toe leiden dat de reiniging, montage en dosering aan het soldeerbedrijf worden toevertrouwd.

f. inspectie

Een visuele inspectie van enkele producten uit de ovenlading zal meestal door het soldeerbedrijf worden uitgevoerd. Bij een noodzakelijke inspectie van alle producten, zal de inspectietijd tot een prijsverhoging leiden.

Bij andere inspectievormen zoals ultrasoon onderzoek en röntgenonderzoek moet worden geïnvesteerd in opleidingen van het personeel en in apparatuur. Vaak zullen deze inspecties worden uitbesteed aan gespecialiseerde bedrijven.

8.3 Opbouw soldeerkosten

In § 8.1 is al een overzicht gegeven van de opbouw van de soldeerkosten. Hieronder volgt hetzelfde overzicht, nu uitgesplitst naar vaste en variabele kosten:

- Vast: e1. apparatuur;
e2. onderhoud en reparaties.
- Variabel: e3. elektrische energie en water;
e4. gassen;
e5. loonkosten.

e1. apparatuur

In hoofdstuk 4 wordt weergegeven welk soort apparatuur kan worden toegepast voor het maken van hoogtemperatuursoldeerverbindingen, zoals retortovens, vacuümovens, transportbandovens en installaties voor inductiefsolderen. Het type oven dat men kiest zal in veel gevallen afhankelijk zijn van de aard van de producten die men wil solderen. Daarnaast spelen de afmeting en de hoeveelheid van de gelijktijdig te solderen onderdelen een belangrijke factor bij het bepalen van de afmeting van een oven.

De *retortoven*, werkend met waterstof of waterstof/stikstofmengsels, is de goedkoopste oven. De aanschafprijs varieert van € 25.000 voor een kleine oven, tot € 100.000 voor een grote uitvoering (prijsniveau zomer 2006). Deze oven heeft over het algemeen een hoog energieverbruik en is lang niet voor alle soldeerprocessen toepasbaar.

De duurste oven in aanschaf is de *hoogvacuümoven*. In 2006 kost een oven met een nuttige inhoud van 0,5 m³ ongeveer € 500.000.

De *transportbandoven* is in aanschaf goedkoper dan de vacuümoven. Een transportbandoven met een nuttige doorlaat van 300 × 150 mm vergt een investering van ca. € 120.000 (prijsniveau 2006). Een extra kostenpost is de verwarming buiten de productie-uren. De temperatuur

wordt vaak op 200 °C gehouden om te voorkomen dat er vocht in de oven komt.

Het noemen van een richtprijs is voor *installaties voor inductiefsolderen* nog moeilijker dan bij voorgaande voorbeelden het geval was. Deze installaties verschillen onderling sterk in uitvoeringswijze, waardoor de investeringskosten kunnen variëren tot € 80.000.

e2. onderhoud en reparatie

De verwachte kosten voor onderhoud en reparatie moeten worden meegenomen in de gebruikstarieven. Bij het onderhoud horen ook de kosten voor testen van de oven, zoals de kalibratie van temperatuurrecorders en het meten van de inlek bij vacuümovens.

e3. verbruik van elektrische energie en water

De kosten van elektrische energie en water kunnen per ovencharge redelijk worden voorspeld. Om de kosten van waterverbruik te reduceren, is de aanleg van een gesloten koelwatercircuit te overwegen.

e4. gasverbruik

Bij verschillende processen van het hoogtemperatuursolderen wordt gebruik gemaakt van gassen. Deze gassen worden enerzijds gebruikt om gesoldeerde onderdelen versneld af te koelen en anderzijds om tijdens het soldeerproces dienst te doen als beschermgas of als reducerend gas. Bij vacuümovens wordt het gas, indien toegestaan, alleen gebruikt tijdens de koelcyclus.

Als koelmedium kan in principe ieder niet-oxiderend gas worden toegepast zoals argon, stikstof en helium. Gassen met het laagste molecuulgewicht (He, H₂) hebben de beste koelcapaciteit. Helium zal echter vanwege de hoge prijs weinig worden gebruikt en waterstof is explosief en daardoor gevaarlijk. In de praktijk worden daarom hoofdzakelijk zuivere stikstof en argon toegepast.

Het gasverbruik bij *retortovens* is minder dan bij een transportbandoven. Het gas in de retort wordt tijdens het soldeerproces langzaam ververst. De ordegrrootte van de gasstroom is vaak 3 m³/uur.

Een *vacuümoven* heeft een gering gasverbruik. Het gas wordt alleen voor de koeling gebruikt.

Bij *transportbandovens* heeft het gas zowel een reducerende als een verwarmende functie. De gasstroom ligt hier vaak rond de 5 m³/uur; dat is hoger dan bij retortovens. Desondanks draagt het gasverbruik slechts voor een gering deel bij in de totale kostprijs van het gesoldeerde product.

De opslag van de gasvoorraad en de distributie vraagt bij grote soldeerovens soms een vrij kostbare installatie. Denk hierbij aan voorraad tanks voor vloeibare stikstof of argon.

e5. loonkosten

Bij de batchgewijze productie met retort- of vacuümovens is de ovenoperator met name voor en na de soldeercyclus actief, namelijk bij het laden c.q. lossen van de oven. Tijdens de cyclus beperken zijn activiteiten zich tot het (af en toe) controleren van de voortgang van het proces. Bij de continue productie met een transportbandoven is er personeel nodig om de producten op de band te zetten en er weer af te halen na het solderen.

Hoofdstuk 9

Veiligheid en gezondheid

9.1 Schadelijke stoffen

Het is niet eenvoudig om in het kort alle noodzakelijke voorzorgsmaatregelen op te sommen die bij het hoogtemperatuursolderen noodzakelijk zijn. Bovendien veranderen van tijd tot tijd inzichten en wettelijke maatregelen. De te nemen maatregelen hangen sterk af van de uit te voeren soldeerprocedure. Belangrijke parameters zijn: de soort oven, het basismateriaal, straalmiddelen, het type soldeer, de vorm waarin het soldeer wordt toegepast (bijvoorbeeld pasta) en de fysische en/of chemische reinigingsmiddelen. De belangrijkste algemene voorwaarden zijn echter:

- ▶ een goede ventilatie en afzuiging ter plaatse van de werkhandeling, om de concentratie schadelijke dampen en stofdeeltjes beneden de WGW-waarden (v/h MAC)* te houden;
- ▶ beschermende kleding (onder andere handschoenen), zodat de huid en de ogen niet worden blootgesteld aan bijvoorbeeld agressieve straal- en oplosmiddelen of aan hitte.

De volgende punten spelen in de praktijk gewoonlijk een rol:

Bindmiddelen

De meeste soldeerbindmiddelen zijn brandbaar en bij het inademen schadelijk voor de gezondheid. Er zijn ook milieuvriendelijke soldeerbindmiddelen op waterbasis verkrijgbaar.

Vloeimiddelen

Bij hoogtemperatuursolderen worden vloeimiddelen in feite niet toegepast. Echter bij gebruik van bijvoorbeeld fluorhoudende vloeimiddelen bij het solderen van aluminium, ontstaan bij verhitting zeer schadelijke dampen.

Straal- en oplosmiddelen

Bij het nikkelgritstralen dient te worden gewaakt voor het inademen van nikkelstofdeeltjes kleiner dan 5 µm. Oplosmiddelen zijn in het algemeen schadelijk bij inademen en huidcontact (bijvoorbeeld aceton). Trichloorethyleen- en tetrachloorethyleendampen ontleden indien ze in contact komen met hete onderdelen. Er kunnen dan vrije halogeengassen ontstaan die zeer giftig zijn.

Stof

Met name de zeer fijne metaaldeeltjes, bijvoorbeeld nikkel-poeders, kunnen lange tijd in de omgevingslucht blijven zweven en zijn schadelijk na inademen. Een zorgvuldig omgaan met poeders en een goede afzuiging zijn dan ook noodzakelijk.

Beryllium

Beryllium en beryllium-koper worden gesoldeerd voor zeer speciale toepassingen. Beryllium is een uiterst giftig metaal. Alle contact met beryllium via mond en wondjes moet worden voorkomen.

Het solderen van beryllium of berylliumhoudende materialen moet worden afgeraden, omdat de soldeerinstallatie langdurig met berylliumstof kan worden verontreinigd.

Gassen

Mengsels van lucht met waterstof en/of koolmonoxide kunnen explosief zijn. Daarom zijn strikte veiligheidsmaatregelen nodig om te voorkomen dat er explosieve mengsels ontstaan. Bij het werken met ammoniak moet men zich realiseren dat dit gas giftig is.

Overigens kunnen ook inerte en quasi-inerte gassen als argon, helium en stikstof gevaar opleveren. Een te hoge concentratie in een werkruimte kan verstikking tot gevolg hebben. Bij lossen van een met koelgas gevulde oven, moet men dus liever niet voorover leunen boven de ovenruimte. Ook dient men de opslagplaats voor gassen goed te ventileren, zodat deze ruimte niet met gas wordt gevuld bij lekkage.

9.2 Afvalverwerking

Wettelijke verplichtingen zullen in toenemende mate gaan gelden voor het aanbieden of verwerken van afvalstoffen, zoals verontreinigde metaalpoeders, reinigingsmiddelen, enz. In de meeste gevallen is het aan te bevelen om de schadelijke afvalstoffen bij de leverancier in te leveren.

* WGW = Wettelijke grenswaarde; MAC = Maximaal Aanvaarde Concentratie

Hoofdstuk 10

Soldeermaterialen

10.1 *Inleiding*

Hoogtemperatuursoldeer onderscheidt zich ten opzichte van hard- en zachtsoldeer voornamelijk in zijn samenstelling (zuiverheid), waardoor het kan worden toegepast in reducerend gas, in beschermgas of in vacuüm. Voor de hoogtemperatuursoldeersoorten kan een onderscheid worden gemaakt in soldeer voor algemene toepassingen en soldeer dat geschikt is voor vacuümtoeepassingen.

De vacuümsoldeersoorten bevatten geen elementen met een hoge dampspanning, zoals bijvoorbeeld de elementen zink en cadmium. De hoogtemperatuursoldeersoorten kunnen naar hun hoofdelement(en) worden verdeeld in zes groepen, respectievelijk: zilver, zilver met palladium, goud, nikkel, koper en aluminium (zie ook de tabellen 10.3 t/m 10.8).

- De zilverbasis-soldeersoorten kunnen op vrijwel alle basismaterialen worden toegepast.
- De palladiumhoudende soldeersoorten worden vooral gebruikt voor het solderen van koper, koolstofstaal, gereedschapsstaal, nikkelbasislegeringen en hoogsmelende metalen.

- De goudbasis-soldeersoorten kunnen voor de meeste metalen worden gebruikt.
- De nikkelbasis-soldeersoorten worden gebruikt voor het solderen van gereedschapsstaal, nikkelbasislegeringen, roestvast staalsoorten en laaggelegeerde staalsoorten.
- De koperbasis-soldeersoorten zijn te gebruiken voor laaggelegeerde staalsoorten, roestvast staal, gereedschapsstaal, hoogsmeltende metalen, nikkellegeringen en gietijzer.
- De aluminiumbasis-soldeersoorten worden in het algemeen uitsluitend voor aluminiumlegeringen gebruikt. De eerder genoemde soldeersoorten zijn daarentegen meestal niet bruikbaar voor het solderen van aluminium.

Een zevende groep soldeermaterialen wordt gevormd door de niet-genormeerde typen. Deze worden besproken in de hoofdstukken van de basismaterialen waarop ze worden toegepast.

Een overzicht van de mogelijke soldeermaterialen geschikt voor het toepassen op bepaalde basismateriaalcombinaties wordt gegeven in tabel 10.1.

De edelmetaal-soldeersoorten zijn in vergelijking met de koperbasis- en nikkelbasis-soldeersoorten duur. De edelmetaal-soldeersoorten hebben echter een goede temperatuurbestendigheid bij hoge en lage temperatuur en een goede ductiliteit (vooral ten opzichte van nikkelbasis-soldeer).

tabel 10.1 Combinaties van basismaterialen met mogelijke soldeermaterialen

	aluminium en Al-legeringen	koper en Cu-legeringen	koolstofstaal, laaggelegeerd staal	gietijzer	roestvast staal	nikkel en Ni-legeringen	titaan en Ti-legeringen	Be, Zr, V	W, Mo, Ta, Nb	gereedschapsstaal	keramiek
aluminium en Al-legeringen	BAISi										
koper en Cu-legeringen	-	B _{Ag} , B _{Au} , B _{Ni} , B _{Cu} , B _{AgPd}									
koolstofstaal, laaggelegeerd staal	BAISi	B _{Ag} , B _{Au} , B _{Ni} , B _{AgPd}	B _{Ag} , B _{Au} , B _{Ni} , B _{Cu} , B _{AgPd}								
gietijzer	-	B _{Ag} , B _{Au}	B _{Ag} , B _{Cu}	(B _{Ag}), B _{Cu} , (B _{Ni})							
roestvast staal	BAISi	B _{Ag} , B _{Au} , B _{AgPd}	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni}	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , (B _{Ni})	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni}						
nikkel en Ni-legeringen	-	B _{Ag} , B _{Au} , B _{AgPd}	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni}	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{AgPd}	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni}	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni} , B _{Co}					
titaan en Ti-legeringen	BAISi	B _{Ag}	B _{Ag}	B _{Ag}	B _{Ag} , B _{Ti}	B _{Ag}	B _{Ag} , B _{AlMn} , B _{Au} , B _{Ti} , B _{AgPd}				
Be, Zr, V	-	B _{Ag}	B _{Ag}	B _{Ag}	B _{Ag}	B _{Ag}	B _{Ag}	B _{Ag} , B _{Au}			
W, Mo, Ta, Nb	-	B _{Ag}	B _{Ag} , B _{Cu}	B _{Ag} , B _{Cu}	B _{Ag} , B _{Cu}	B _{Ag} , B _{Cu}	B _{Ag}	B _{Ag} , B _{Au} , B _{AgPd}	B _{AgPd} , B _{Au}		
gereedschapsstaal	-	B _{Ag} , B _{AgPd}	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni}	B _{Ag} , B _{Au} , B _{AgPd} , (B _{Ni})	B _{Ag} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni}	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni}	-	B _{AgPd} ¹⁾	B _{AgPd} ¹⁾	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Ni}	
keramiek	-	B _{Ag} , B _{Au}	B _{Cu} , B _{Ag} , B _{Au}	B _{AgTi}	B _{Ag} , B _{Au} , B _{Cu} , B _{AgPd}	B _{Ag} , B _{Au} , B _{AgPd}	B _{Ag}	B _{Ag} , B _{Au} , B _{AgPd}	B _{Au}	B _{Au} , B _{Ni}	B _{Ag} , B _{AgTi} , B _{Au} , B _{AgPd} , B _{Cu}

Codering voor soldeermateriaal:

B _{Ag}	zilverbasissoldeer	B _{Au}	goudbasissoldeer
B _{AgPd}	palladiumhoudend zilverbasissoldeer	B _{Co}	kobaltbasissoldeer
B _{AgTi}	titaanhoudend zilverbasissoldeer ("actief soldeer")	B _{Cu}	koperbasissoldeer
B _{Al}	aluminiumbasissoldeer	B _{Ni}	nikkelbasissoldeer
B _{AlMn}	mangaanhoudend aluminiumbasissoldeer	B _{Ti}	titaanbasissoldeer
B _{AlSi}	siliciumhoudend aluminiumbasissoldeer		

1) B_{AgPd}-soldeer alleen voor Be, Co, Mo en Zr.

Het soldeer is veelal verkrijgbaar als staf, draad, poeder, pasta, tapes, folie of preforms. Soldeer in pastavorm heeft altijd een beperkte houdbaarheid. Het poeder en het bindmiddel zijn echter ook gescheiden leverbaar, waardoor de houdbaarheid wordt verlengd. Tevens is het mogelijk om verschillende typen bindmiddel voor specifieke toepassingen te verkrijgen.

Kenmerkend voor het hoogtemperatuursolderen is dat het soldeer altijd vóór het solderen naast of in de spleet wordt aangebracht. De laatste methode wordt toegepast als de te solderen oppervlakken relatief groot zijn.

Nomenclatuur

De genormeerde soldeersoorten worden in deze publicatie veelal aangeduid volgens de AWS-normering, zoals die is terug te vinden in de tabellen 10.3 t/m 10.8. Deze notering begint met de "B" van "Brazing"; voor soldeer voor vacuümtoepassingen wordt "BV" gebruikt. Naast de door AWS genormeerde soldeersoorten worden in deze publicatie ook de soldeersoorten volgens de Europese voornorm prEN 1044:2006 weergegeven. De wijze van noteren volgens deze norm van de soldeersoorten is als volgt: een lettercombinatie gevolgd door een nummer.

De lettercombinatie luidt voor:

- ▶ zilverbasis soldeersoorten: AG;
- ▶ palladiumbasis soldeersoorten: PD;
- ▶ goudbasis soldeersoorten: AU;
- ▶ nikkelbasis soldeersoorten: NI;
- ▶ koperbasis soldeersoorten: CU;
- ▶ aluminiumbasis soldeersoorten: AL;

Volgens de Europese voornorm prEN 1044:2006 kunnen met name aan de soldeersoorten AG401, PD101 t/m 106, PD201, PD203 en AU101 t/m 106 eisen aan de mate van verontreinigingen worden gesteld indien deze worden toegepast in vacuüm, hetzij als soldeer om mee in vacuüm te solderen, hetzij als product dat vacuüm soldeerverbindingen bevat. De grenzen van de toegestane mate van verontreiniging onderverdeeld in twee klassen, staan weergegeven in tabel 10.2. Soldeersoorten die qua verontreiniging in een van deze twee klassen vallen, moeten bij de typeomschrijving ervan naast de lettercombinatie en nummer met de hoofdletter V en het cijfer 1 (klasse 1) of 2 (klasse 2) worden aangeduid; bijvoorbeeld AG401V1, PD101V2, enz.

Opmerking: Klasse 1 geldt voor toepassingen waaraan de hoogste eisen worden gesteld, klasse 2 geldt voor toepassingen waaraan minder hoge eisen worden gesteld.

tabel 10.2 Verontreinigingsgrenzen voor enige zilver-, palladium- en goudbasis soldeersoorten

verontreiniging	grens in gewichtsprocenten (max.)	
	klasse 1	klasse 2
C ¹⁾	0,005	0,005
Cd	0,001	0,002
P	0,002	0,002 ²⁾
Pb	0,002	0,002
Zn	0,001	0,002
Mn ³⁾	0,001	0,002
In ³⁾	0,002	0,003
overige elementen met een dampdruk bij 500 °C > 1,3 × 10 ⁻¹⁰ bar ⁴⁾	0,001	0,002

1) Soldeer AG401 kan in overleg tussen klant en fabrikant een lager koolstofgehalte bevatten.

2) Voor het soldeer AG401, met max. 0,02%.

3) Uitgezonderd als de hoofdsamenstelling anders aangeeft.

4) Voorbeelden van dergelijke elementen zijn: Ca, Cs, K, Li, Mg, Na, Rb, S, Sb, Se, Sr, Te, Ti. Gezamenlijk mag de som van deze elementen (inclusief Cd, Pb, en Zn) niet meer dan 0,010% bedragen.

Bij niet-genormeerde soldeersoorten worden de belangrijkste elementen met hun gewichtspercentage in afnemende volgorde vermeld, gescheiden door koppelstreepjes. Bijvoorbeeld: 70Ti-15Cu-15Ni (dit soldeer bevat 70% titaan, 15% koper en 15% nikkel).

In de praktijk wordt ook wel gebruik gemaakt van de ISO-codering (volgens ISO 3677). Hierbij begint de aanduiding met een "B" (van "Brazing"), gevolgd door het hoofdelement met het gewichtspercentage. Daarachter komen de andere elementen in afnemende volgorde volgens hun gewichtspercentage, echter zonder vermelding van het gewichtspercentage; elementen met een gehalte lager dan 2% worden niet opgenomen. Tenslotte wordt afgesloten met de vermelding van het smeltpunt of smelttraject van het soldeer (°C). Voorbeeld: BTi70 Cu Ni 910-960 (dit is hetzelfde soldeer als hierboven).

10.2 Zilverbasis-soldeersoorten

Dit type soldeer kan voor vrijwel elk basismetaal worden gebruikt, mede vanwege zijn lage soldeertemperatuur (tabel 10.3). Het zilverbasissoldeer heeft een goede hitte- en oxidatiebestendigheid tot ongeveer 400 °C.

Het voordeel van zilverbasissoldeer is, zoals eerder genoemd, de lage soldeertemperatuur. Het soldeerproces kan daardoor kort zijn, waardoor thermische beschadiging als bijvoorbeeld rekristallisatie tot een minimum beperkt kan blijven. De relatief lage soldeertemperatuur brengt met zich mee dat de oxidehuid op het basismetaal moeilijk afbreekt, waardoor het soldeer slecht bevochtigt. Ter verbetering van de bevochtiging van het soldeer zijn elementen als bijvoorbeeld tin, mangaan, indium of nikkel toegevoegd.

Koper of nikkel uit het basismetaal kan tijdens het soldeerproces oplossen in het soldeer. Hierdoor stijgt de smelttemperatuur van het soldeer. Bovendien kan beïnvloeding van het basismetaal optreden (erosie). De corrosiebestendigheid van het basismetaal kan hierdoor afnemen. Dit kan worden voorkomen door met een folie te werken en/of een nikkelhoudend zilverbasissoldeer te gebruiken.

10.3 Palladiumhoudende soldeersoorten

Het palladiumhoudende soldeer valt voor de meeste legeringen onder de noemer zilverbasissoldeer. De reeks palladiumhoudende zilverbasis-soldeersoorten is echter belangrijk en omvangrijk genoeg om apart te worden genormeed (tabel 10.4). De toevoeging van palladium aan zilverbasissoldeer is ontstaan vanuit de bevochtigingsproblematiek bij het solderen van hoogsmeltende metalen als tantaal, niobium, molybdeen en wolfram met zilverbasissoldeer. Het palladiumhoudend soldeer is beter in staat bevochtiging te bewerkstelligen. Voor een goede bevochtiging is minimaal 5 procent palladium noodzakelijk.

Het palladiumhoudend soldeer heeft ten opzichte van het zilverbasissoldeer zowel een verbeterde oxidatie- en corrosiebestendigheid, als een betere sterkte bij hoge temperatuur (tot ongeveer 500 °C).

De lage dampdruk van de palladiumhoudende soldeersoorten maakt deze legeringen bij uitstek geschikt voor toepassingen in de vacuümtechniek.

Bij gebruik van een palladiumhoudend soldeer is de reactie met het basismetaal minimaal. Echter met koperlegeringen als basismetaal kan sterke erosie van het basismetaal optreden door het oplossen van koper. In dat geval wordt aangeraden een soldeer te gebruiken, waarbij het oplossen van koper leidt tot een verhoging van de liquidustemperatuur van het soldeer (bijvoorbeeld PD103; tabel 10.4).

De reeks van palladiumhoudende soldeersoorten is zodanig opgebouwd, dat een product in meerdere, opeenvolgende oencycli kan worden gesoldeerd. Voor elke nieuwe verbinding wordt een soldeertype gekozen met een lagere soldeertemperatuur.

Naast de palladiumhoudende zilverbasis-soldeersoorten is er een klein aantal palladiumbasis-soldeersoorten. Deze mangaan- en nikkelhoudende legeringen zijn vooral ontwikkeld voor hoge temperatuuroepassingen van hittebestendige producten. Ze hebben een goede corrosie- en oxidatiebestendigheid bij hoge temperaturen, gecombineerd met goede sterkte-eigenschappen.

10.4 Goudbasis-soldeersoorten

Goudbasis-soldeersoorten worden gebruikt voor de verwerking van onderdelen van elektronische vacuümbuizen, waar elementen met een hoge dampspanning ongewenst zijn. Daarnaast worden deze soldeersoorten toegepast op ijzer-, nikkel- en kobaltbasislegeringen, indien een hoge weerstand tegen oxidatie en corrosie is vereist. De oxidatie- en corrosiebestendigheid van goudbasis-soldeersoorten zijn aanmerkelijk beter dan van de zilverbasis-soldeersoorten.

Goud reageert nagenoeg niet met het basismetaal en is daarom bij uitstek geschikt voor het solderen van dunwandige componenten.

Goudbasissoldeer kan worden onderverdeeld in koper- en nikkelhoudende soldeersoorten (tabel 10.5).

Goudnikkelsoldeer heeft een beter bevochtigend vermogen dan goudkopersoldeer, doordat gesmolten nikkel een betere oplosbaarheid heeft voor zuurstof en koolstof dan koper. Metalen als molybdeen en wolfram worden niet bevochtigd door zilverkopersoldeer en slecht bevochtigd door goudkopersoldeer. Goudnikkel-soldeersoorten vloeien op beide metalen goed uit.

Het meest bekende en toegepaste goudnikkelsoldeer is BAu-4, dat een goede oxidatiebestendigheid heeft tot ongeveer 800 °C en daarom veel wordt gebruikt voor het solderen van hittebestendige legeringen als inconel, roestvast

staal, wolfram en molybdeen. Voor toepassingen bij hogere temperaturen zijn soldeermaterialen ontwikkeld met een hoger nikkelgehalte.

Voor de goudkoper-soldeersoorten is een kleine reeks ontwikkeld voor het stapsgewijs solderen van verschillende componenten tot één product (AU101-AU104; tabel 10.5).

10.5 Nikkelbasis-soldeersoorten

De nikkelbasis-soldeersoorten worden veel toegepast bij het hoogtemperatuursolderen (tabel 10.6). Hun aantrekkelijkheid wordt door technische en economische aspecten gevormd.

Als technische aspecten kunnen worden genoemd:

- ▶ hittebestendig (door nikkel);
- ▶ oxidatiebestendig (door chroom);
- ▶ een breed soldeertemperatuurgebied liggend tussen 900 - 1200 °C. Door toevoeging van smeltpuntverlagende elementen als borium, silicium of fosfor wordt een reeks van soldeersoorten met verschillende soldeertemperaturen verkregen. Naast smeltpuntverlaging verbeteren deze legeringselementen ook de bevochtiging;
- ▶ goede sterkte-, ductiliteit- en corrosie-eigenschappen. Voorwaarde hierbij is dat een optimale soldeertemperatuur, -tijd en -spleetbreedte worden gekozen. Dit voorkomt of beperkt het optreden van brosse, intermetallische verbindingen in de soldeernaad.

Nog een kanttekening moet worden gemaakt ten aanzien van de nikkelbasis-soldeersoorten. Deze betreft het aantastingsgedrag dat zij kunnen vertonen op het basismateriaal, veroorzaakt door (overmatige) diffusie van de smeltpuntverlagende elementen. In afnemende mate kunnen de in het soldeer aanwezige elementen borium, silicium en fosfor, erosie tengevolge van diffusie veroorzaken (zie § 2.3). Tevens kunnen de in het soldeer aanwezige elementen borium en koolstof, penetratie langs de korrelgrenzen van het basismateriaal veroorzaken. Dit aantastingsgedrag beïnvloedt op negatieve wijze de corrosie-eigenschappen (galvanische corrosie) van het basismateriaal.

tabel 10.5 Genormeerde goudbasis-soldeersoorten

norm	type	samenstelling in gewichtsprocenten						overige elementen (max.)	smelttraject of smeltpunt [°C]	soldeer-temperatuur [°C]
		Au	Cu	Ni	Fe	Co	Pd			
AWS A5.8/ A5.8M:2004	BAu-1	37,0-38,0	rest		–	–	–	Typen BAu-1 t/m BAu-6: ≤ 0,15	991-1016	1016-1093
	BAu-2	79,5-80,5	rest		–	–	–		891	891-1010
	BAu-3	34,5-35,5	rest	2,5-3,5	–	–	–		990-1010	1010-1072
	BAu-4	81,5-82,5	–	rest	–	–	–		949	949-1004
	BAu-5	29,5-30,5	–	35,5-36,5	–	–	33,5-34,5		1135-1166	1166-1232
	BAu-6	69,5-70,5	–	21,5-22,5	–	–	7,5-8,5		1007-1046	1046-1121
prEN 1044: 2006	AU101 ¹⁾	79,5-80,5	18,5-19,5	–	0,5-1,5	–	–	Typen AU101-AU106: Al 0,0010 P 0,008 Ti 0,002 Zr 0,002 Alle verontreinigingen samen ≤ 0,15	905-910	
	AU102 ¹⁾	62,0-63,0	37,0-38,0	–	–	–	–		930-940	
	AU103 ¹⁾	37,0-38,0	62,0-63,0	–	–	–	–		980-1000	
	AU104 ¹⁾	29,5-30,5	69,5-70,5	–	–	–	–		995-1020	
	AU105 ¹⁾	81,5-82,5	–	17,5-18,5	–	–	–		950	
	AU106 ¹⁾	74,5-75,5	–	24,5-25,5	–	–	–		950-990	
Speciaal voor vacuütoepassingen										
AWS A5.8/ A5.8M:2004	BVAu-2	79,5-80,5	rest	–	–	–	–	grade 1 ²⁾ grade 2 ²⁾ C 0,005 0,005 Cd 0,001 0,002 P 0,002 0,002 Pb 0,002 0,002 Zn 0,001 0,002	891	891-1010
	BVAu-3	34,5-35,5	rest	2,5-3,5	–	–	–		990-1010	1010-1072
	BVAu-4	81,5-82,5	–	rest	–	–	–		949	949-1004
	BVAu-7	49,5-50,5	–	24,5-25,5	–	0,06	rest		1102-1121	1121-1154
	BVAu-8	91,0-93,0	–	–	–	–	rest		1200-1240	1240-1247
	BVAu-9	34,5-35,5	rest	–	–	–	–		990-1010	1010-1060
	BVAu-10	49,5-50,5	rest	–	–	–	–		955-970	970-1020

1) Voor toepassingen in vacuüm, zie tabel 10.2.

2) Alle elementen met een hogere dampspanning dan 10^{-7} Torr ($1,33 \cdot 10^{-7}$ mbar) bij 500 °C zijn toegestaan tot 0,001% voor ieder afzonderlijk element voor grade 1 en tot 0,002% voor ieder afzonderlijk element voor grade 2. Het totaal van deze elementen (incl. Zn, Cd, Pb) is tot 0,010% toegestaan. Andere niet-hoogdampspanningselementen zijn in totaal toegestaan tot 0,01% voor grade 1 en tot 0,05% voor grade 2.

tabel 10.6 Genormeerde nikkelbasis-soldeersoorten

norm	type	samenstelling in gewichtsprocenten											smelttraject of smeltpunt [°C]	soldeer-temperatuur [°C]
		Ni	Cr	B	Si	Fe	C	P	Mn	Cu	W	overige elementen (max.)		
AWS A5.8/A5.8M: 2004	BNi-1	rest	13,0-15,0	2,75-3,50	4,0-5,0	4,0-5,0	0,60-0,90	≤ 0,02	–	–	–	Typen BNi-1 t/m BNi-13:	977-1038	1066-1204
	BNi-1a	rest	13,0-15,0	2,75-3,50	4,0-5,0	4,0-5,0	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–		977-1077	1077-1204
	BNi-2	rest	6,0-8,0	2,75-3,50	4,0-5,0	2,5-3,5	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–		971-999	1010-1077
	BNi-3	rest	–	2,75-3,50	4,0-5,0	≤ 0,5	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–	S 0,02	982-1038	1010-1077
	BNi-4	rest	–	1,50-2,20	3,0-4,0	≤ 1,5	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–	Al 0,05	982-1066	1010-1077
	BNi-5	rest	18,5-19,5	≤ 0,03	9,75-10,50	–	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–	Ti 0,05	1079-1135	1149-1204
	BNi-5a	rest	18,5-19,5	1,0-1,5	7,0-7,5	≤ 0,5	≤ 0,1	≤ 0,02	–	–	–	Zr 0,05	1065-1150	1149-1204
	BNi-5b	rest	14,5-15,5	1,1-1,6	7,0-7,5	≤ 1,0	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–	Co 0,10	1030-1126	1149-1204
	BNi-6	rest	–	–	–	–	≤ 0,06	10,0-12,0	–	–	–	Se 0,005	877	927-1093
	BNi-7	rest	13,0-15,0	≤ 0,01	≤ 0,10	≤ 0,2	≤ 0,06	9,7-10,5	≤ 0,04	–	–	en overige verontreinigingen samen 0,50	888	927-1093
	BNi-8	rest	–	–	6,0-8,0	–	≤ 0,06	≤ 0,02	21,5-24,5	4,0-5,0	–		982-1010	1010-1093
	BNi-9	rest	13,5-16,5	3,25-4,0	–	≤ 1,5	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–		1055	1066-1204
	BNi-10	rest	10,0-13,0	2,0-3,0	3,0-4,0	2,5-4,5	0,40-0,55	≤ 0,02	–	–	15,0-17,0	Voor type BNi-13	970-1105	1049-1204
	BNi-11	rest	9,0-11,75	2,2-3,1	3,35-4,25	2,5-4,0	0,30-0,50	≤ 0,02	–	–	11,0-12,75	geldt ook: Mo: 1,5-2,5 Nb: 1,5-2,5	970-1095	1049-1204
prEN 10444: 2006	BNi-12	rest	24,0-26,0	≤ 0,02	≤ 0,10	≤ 0,2	≤ 0,06	9,0-11,0	–	–	–		880-950	980-1095
	BNi-13	rest	7,0-9,0	2,75-3,50	3,8-4,8	≤ 0,4	≤ 0,06	≤ 0,02	–	2,0-3,0	–		970-1080	1095-1175
	NI101	rest	13,0-15,0	2,75-3,5	4,0-5,0	4,0-5,0	0,6-0,9	≤ 0,02	–	–	–	Typen NI101 t/m NI113:	980-1060	
	NI1A1	rest	13,0-15,0	2,75-3,5	4,0-5,0	4,0-5,0	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–		980-1070	
	NI102	rest	6,0-8,0	2,75-3,5	4,0-5,0	2,5-3,5	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–		970-1000	
	NI103	rest	–	2,75-3,5	4,0-5,0	≤ 0,5	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–	Al 0,05	980-1040	
	NI104	rest	–	1,5-2,2	3,0-4,0	≤ 1,5	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–	Co 0,1	980-1070	
	NI105	rest	18,5-19,5	≤ 0,03	9,75-10,5	–	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–	S 0,05	1080-1135	
	NI106	rest	–	–	–	–	≤ 0,06	10-12	–	–	–	Ti 0,05	875	
	NI107	rest	13,0-15,0	≤ 0,01	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,06	9,7-10,5	≤ 0,04	–	–	Zr 0,05	890	
	NI108	rest	–	–	6,0-8,0	–	≤ 0,06	≤ 0,02	21,5-24,5	4,0-5,0	–	Se 0,005	980-1010	
	NI109	rest	13,5-16,5	3,25-4,0	–	≤ 1,5	≤ 0,06	≤ 0,02	–	–	–	Overige elementen samen 0,5	1055	
	NI110	rest	10,0-13,0	2,0-3,0	3,0-4,0	2,5-4,5	0,40-0,55	≤ 0,02	–	–	15,0-17,0	Voor type NI113 geldt ook: Mo: 1,5-2,5 Nb 1,5-3,5	970-1105	
	NI111	rest	9,0-11,75	2,2-3,1	3,35-4,25	2,5-4,0	0,30-0,50	≤ 0,02	–	–	11,5-12,75		970-1095	
	NI112	rest	24,0-26,0	≤ 0,02	≤ 0,10	≤ 0,2	≤ 0,06	9,0-11,0	–	–	–		880-950	
	NI113	rest	7,0-9,0	2,75-3,50	3,8-4,8	≤ 0,4	≤ 0,06	≤ 0,02	–	2,0-3,0	–		970-1080	

riaal. Bovendien kan ook het sterkte- en ductiliteitsgedrag van de verbinding nadelig worden beïnvloed.

Uit oogpunt van economie zijn de nikkelbasis-soldeer-soorten vanwege hun betrekkelijk lage prijs aantrekkelijk. Dit betreft dan hoofdzakelijk de soorten die in poeder- of pastavorm worden geleverd. Tapes, preforms en folies (vooral de snelgestolde) zijn aanzienlijk duurder. Ter verbetering van de naadeigenschappen (sterkte, ductiliteit) worden met deze soldeersoorten diffusiegloeiningen uitgevoerd. Deze werken kostenverhogend. Bovendien moet gewaakt worden voor ongewenste korrelgroei in het basismateriaal.

De nikkelbasis-soldeersoorten worden veel toegepast op roestvast staal en nikkelbasislegeringen (superlegeringen). Ze worden in mindere mate gebruikt op koolstof- en laaggelegeerd staal, alsmede voor gereedschapsstaal en gietijzer. Door speciale toevoegingen als wolfram en mangaan worden onder meer betere kruipeigenschappen verkregen.

De fosforhoudende nikkelbasis-soldeersoorten worden wel toegepast bij nauwe soldeerspleten ("nulspleetsoldeer"). Deze soldeersoorten lenen zich ook voor nucleaire toepassingen. Zij bevatten namelijk niet het neutronenvangend element borium.

10.6 Koperbasis-soldeersoorten

Koperbasissoldeer wordt voornamelijk toegepast in de auto-industrie en in de elektrotechnische industrie, vooral

vanwege de lage prijs. Hierbij kan worden gedacht aan het solderen van laag- en hooggelegeerde staalsoorten en aan kopernikkel- en nikkellegeringen.

Koperbasissoldeer heeft een relatief hoge soldeertemperatuur (zie ook tabel 10.7). De structuur van het basismetaal kan daardoor tijdens het solderen sterk worden beïnvloed.

De maximale gebruikstemperatuur van de producten ligt ten opzicht van de edelmetaal-soldeerverbindingen veel lager (ongeveer 200 °C). Koperbasissoldeer heeft ook een beduidend minder goede corrosievastheid. De toepassingen zijn dan ook verbindingen waaraan voornamelijk mechanische eisen bij kamertemperatuur worden gesteld en minder hoge eisen aan de weerstand tegen corrosie en mechanische eigenschappen bij hoge temperatuur.

10.7 Aluminiumbasis-soldeersoorten

Er zijn weinig aluminiumbasis-soldeersoorten verkrijgbaar die geschikt zijn voor het vacuumsolderen van aluminium en aluminiumlegeringen. Als soldeersoorten kunnen worden genoemd: BAlSi-7 en BAlSi-11 (tabel 10.8). Deze typen bevatten naast aluminium de elementen silicium, ijzer, koper, mangaan, magnesium, zink en voor BAlSi-11 ook bismut.

Het element silicium zorgt voor smeltpuntverlaging (van 660 tot 577 °C voor 0 tot 12 procent silicium); ook de bevochtiging wordt door de desoxiderende werking van silicium verbeterd. Elementen als koper en zink beïnvloe-

tabel 10.7 Genormeerde koperbasis-soldeersoorten

norm	type	samenstelling in gewichtsprocenten					smelttraject of smeltpunt [°C]	soldeertemperatuur [°C]
		Cu	P	Pb	Al	overige elementen (max.)		
AWS A5.8/A5.8M:2004	BCu-1	≥ 99,90	≤ 0,075	≤ 0,02	≤ 0,01	0,10	1083	1093-1149
	BCu-1a	≥ 99,00	–	–	–	0,30 ¹⁾	1083	1093-1149
	BCu-1b	≥ 99,90	–	–	–	0,10	1083	1093-1177
	BCu-2	≥ 86,50	–	–	–	0,50 ²⁾	1083	1093-1149
	BCu-3 ³⁾	≥ 99,95	–	–	–	0,05	1083	1093-1149
prEN 1044:2006	CU101	≥ 99,90 ⁴⁾				≤ 0,04 uitgezonderd O en Ag	1085	
	CU102	≥ 99,95 ⁴⁾				≤ 0,3 uitgezonderd Ag	1085	
	CU103	≥ 99,00 ⁴⁾				≤ 0,30 uitgezonderd O	1085	
	CU104	≥ 99,90 ⁴⁾	0,015-0,040			≤ 0,60 uitgezonderd Ag, As en Ni	1085	
	CU105	rest ⁴⁾				2,5-3,5 Ni; 0,02-0,05 B; 0,15 uitgezonderd Ag	1085-1100	
	CU106	rest				0,8-1,2 Ag; 0,3 inclusief Bo 0,1 max.	1070-1080	
	CU201	rest ⁴⁾	0,01-0,04			Sn 5,5-7,0; Pb 0,02; Zn 0,05; Al 0,005; Cd 0,01; overige ≤ 0,1; totaal ≤ 0,4	910-1040	
	CU202	rest ⁴⁾	0,01-0,04			Sn 11,0-13,0; Pb 0,02; Zn 0,05; Al 0,005; Cd 0,01; overige ≤ 0,1; totaal ≤ 0,4	825-990	
Speciaal voor vacuütoepassingen:								
AWS A5.8/A5.8M:2004	BVCu-1x	≥ 99,99	–	–	–	Cd 0,002; P 0,002; Pb 0,002; Zn 0,002 ⁵⁾	1083	1093-1149

1) Behalve O aanwezig als koperoxide.

2) Geldt voor koperoxidepoeder en niet voor het organisch bindmiddel waarin het koperoxide als pasta aanwezig is.

3) Maximaal toegestane zuurstofpercentage is 0,001%.

4) Inclusief Ag.

5) Alle elementen met een hogere dampspanning dan 10^{-7} Torr ($1,33 \cdot 10^{-7}$ mbar) bij 500 °C zijn toegestaan tot 0,001% voor ieder afzonderlijk element voor grade 1 en tot 0,002% voor ieder afzonderlijk element voor grade 2. Het totaal van deze elementen (incl. Zn, Cd, Pb) is tot 0,010% toegestaan. Andere niet-hoogdampspanningselementen zijn in totaal toegestaan tot 0,01% voor grade 1 en tot 0,05% voor grade 2.

tabel 10.8 Genormeerde aluminiumbasis-soldeersoorten

norm	type	samenstelling in gewichtsprocenten									verontreinigingen	smelttraject of smeltpunt [°C]	soldeer- tempera- tuur [°C]
		Al	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Fe	overige ele- menten (max.)			
AWS A5.8/ A5.8M:2004	BAISi-2	rest	6,8-8,2	≤ 0,25	–	≤ 0,20	0,10	–	≤ 0,8	–	typen BAISi-2 t/m BAISi-11: afzonderlijke elementen max. 0,05; alle verontreinigingen samen max. 0,15	577-617	599-621
	BAISi-3	rest	9,3-10,7	3,3-4,7	≤ 0,15	≤ 0,20	0,15	–	≤ 0,8	Cr 0,15		521-585	571-604
	BAISi-4	rest	11,0-13,0	≤ 0,30	≤ 0,10	≤ 0,20	0,15	–	≤ 0,8	–		577-582	582-604
	BAISi-5	rest	9,0-11,0	≤ 0,30	≤ 0,05	≤ 0,10	0,05	≤ 0,20	≤ 0,8	–		577-599	588-604
	BAISi-7	rest	9,0-10,5	≤ 0,25	1,0-2,0	≤ 0,20	0,10	–	≤ 0,8	–		559-596	588-604
	BAISi-9	rest	11,0-13,0	≤ 0,25	0,10-0,5	≤ 0,20	0,10	–	≤ 0,8	–		562-582	582-604
	BAISi-11	rest	9,0-10,5	≤ 0,25	1,0-2,0	≤ 0,20	0,10	–	≤ 0,8	Bi 0,02-0,20		559-596	588-604
prEN 1044: 2006	AL101	rest	4,5-6,0	≤ 0,30	≤ 0,20	≤ 0,10	≤ 0,15	–	≤ 0,6	–	afzonderlijke elementen max. 0,05; alle verontreinigingen samen max. 0,15	575-630	
	AL102	rest	6,8-8,2	≤ 0,25	–	≤ 0,20	≤ 0,10	–	≤ 0,8	–		575-615	
	AL103	rest	9,0-11,0	≤ 0,30	≤ 0,05	≤ 0,10	≤ 0,05	≤ 0,20	≤ 0,8	–		575-590	
	AL104	rest	11,0-13,0	≤ 0,30	≤ 0,10	≤ 0,20	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,6	–		575-585	
	AL201	rest	9,0-11,0	3,0-5,0	≤ 0,10	≤ 0,20	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,6	–		520-585	
	AL301	rest	9,0-10,5	≤ 0,25	1,0-2,0	≤ 0,20	≤ 0,10	–	≤ 0,8	–		555-590	
	AL302	rest	9,0-10,5	≤ 0,25	1,0-2,0	≤ 0,20	≤ 0,10	–	≤ 0,8	Bi 0,02-0,20		555-590	

den het smeltpunt eveneens gunstig. Echter, naast dat silicium de ductiliteit nadelig beïnvloed, zijn de elementen koper en zink ongunstig voor de corrosiebestendigheid en is zink zelfs ongewenst bij het vacuümsolderen. Elementen als magnesium en bismut zijn bij het solderen in vacuüm gunstig vanwege het doorbreken van de oxidehuid van het soldeer en vanwege de zogenaamde “getter”werking (ze binden zuurstof af). Bij het vacuümsolderen van aluminium of aluminiumlegeringen is een soldeer met een laag, maar vooral kort smelttraject gunstig. Daarentegen is bij het inductief solderen een soldeer met een lang smelttraject gunstig, vanwege de betere visuele controle op het proces. Zo heeft soldeer BAISi-4 een smelttraject van 577-582 °C, terwijl BAISi-3 een smelttraject van 521-585 °C heeft. De beste soldeernaden worden verkregen met een soldeer met een kort smelttraject. Dan is de tijd dat het product op temperatuur wordt gehouden in het smelttraject, zo kort mogelijk. Erosie en penetratie worden dan tot een minimum beperkt.

Daar waar de toepassing het toelaat, wordt bij het vacuümsolderen gewerkt met een “clad-laag” of “cladding”. Het

soldeer bestaat uit een hoger smeltende kernlaag, vaak een AlMn-legering (AA 3003-serie) of een AlMgSiCu-legering (AA 6000-serie). Hierop bevindt zich aan één kant of aan weerskanten de cladding, bijvoorbeeld BAISi-2, BAISi-4, BAISi-5 en BAISi-7. De twee eerstgenoemde hebben overigens een goede corrosiebestendigheid.

Voor het vacuümsolderen van legeringen als AlZnCuMg (AA 7000-serie) en AlLiCuMg (AA 8000-serie) worden speciale AlGeSi-soldeersoorten ontwikkeld. Als soldeertemperatuur voor deze soorten wordt 535 °C aangehouden, bijvoorbeeld voor 66Al-30Ge-4Si. Ook voor het diffusiesolderen is dit type geschikt. Deze soldeersoorten zijn in folievorm en worden verkregen door het proces van snelle stolling (het zogenaamde flitsgieten). In ontwikkeling zijn aluminiumbasis-soldeersoorten als AlGeSi, AlGeY, AgGeAl, AlInY, AgAlIn, AlCuPd, AlCuGe en AlCuSnNi met als doel soldeertemperaturen rond 500 °C te bereiken.

Hoofdstuk 11

Aluminium en aluminiumlegeringen

11.1 Inleiding

Aluminium vormt, wegens zijn grote affiniteit tot zuurstof, aan de lucht een dunne, maar wel zeer dichte oxidehuid. Deze oxidehuid is zeer stabiel en slecht te verwijderen. Het smeltpunt van zuiver aluminium is 660 °C, dat van aluminium giet- en kneedlegeringen ligt tussen 500 en 640 °C. Het lage smeltpunt en het stabiele oxide maken aluminium tot een lastig te solderen materiaal. Desondanks is een aantal soldeerprocessen ontwikkeld, die het mogelijk maken uitstekende soldeerverbindingen te produceren. Met een maximale soldeertemperatuur van ca. 630 °C voldoet het solderen van aluminium echter niet aan de definitie van hoogtemperatuursolderen, hoewel van dezelfde principes wordt gebruik gemaakt.

Aluminium is in ongelegeerde toestand een week materiaal. De sterkte en rekgrenzen kunnen uitsluitend door koude versteviging worden verhoogd, die echter weer verloren gaan tijdens het soldeerproces. Door toevoeging van legeringselementen kunnen de sterkte en de rekgrenzen worden verhoogd met behoud van de corrosievastheid en de vormbaarheid. Een aantal aluminiumlegeringen is precipitatiehardend en dient na het soldeerproces aansluitend warmtebehandeld te worden. De belangrijkste legeringselementen zijn mangaan, magnesium, silicium, zink en koper; soms ook chroom (en titaan).

Een beperkt aantal aluminiumlegeringen is soldeerbaar. In tabel 11.1 zijn de soldeerbare aluminiumlegeringen opgenomen met bijbehorende chemische samenstelling en smelttraject. Aluminium en zijn legeringen zijn genormeerd en onder andere ondergebracht in de normen EN 573:2007, ISO 209:2007 en ISO 3522:2007.

11.2 Materiaalcombinaties

Zuiver aluminium, AlMn-, AlMg- en AlMgSi-legeringen met maximaal 2 procent Mg en Si zijn goed te solderen. Materiaalcombinaties van aluminium met andere materialen vereisen veelal speciale maatregelen. Soldeerverbin-

dingen tussen (roestvast) staal en aluminium zijn goed uitvoerbaar. Het is echter beter als het soldeervlak van het staal wordt voorzien van een nikkellaag of aluminiumcoating. Het gevaar van het ontstaan van brosse intermetallische fasen in de overgangszone tussen soldeernaad en basismateriaal is echter zeer sterk aanwezig. Deze soldeerverbindingen hebben lage mechanische waarden en zijn zeer gevoelig voor scheuren, indien schok of buiging in de soldeerverbinding optreedt. Ook zijn soldeerverbindingen tussen aluminium en koper of messing niet rechtstreeks mogelijk. Een tussenlaag van staal kan hier soms uitkomst brengen. Soldeerverbindingen tussen aluminium en magnesium zijn eveneens niet mogelijk.

In dit hoofdstuk worden enige richtlijnen besproken voor een aantal materiaalcombinaties. Het is echter raadzaam om in specifieke gevallen proefondervindelijk de beste soldeerprocedure vast te stellen, c.q. de soldeerfabrikant of leverancier te raadplegen.

11.3 Eigenschappen

De als gevolg van koude vervorming verkregen mechanische sterkte van zuiver aluminium gaat door het solderen verloren, daar de rekristallisatietemperatuur van 250-300 °C wordt overschreden. Ook bij precipitatiegeharde aluminiumlegeringen gaan de mechanische eigenschappen verloren, omdat de soldeertemperatuur de oplosgloeitemperatuur overschrijdt. Deze kunnen echter met een aanvullende warmtebehandeling worden hersteld. Soldeerverbindingen van aluminium en aluminiumlegeringen hebben een breuksterkte die varieert tussen 80 en 300 MPa.

In tabel 11.2 worden richtwaarden gegeven van de mechanische eigenschappen van enige aluminiumsoorten volgens EN 573:2007.

tabel 11.2 Mechanische eigenschappen van enige aluminiumsoorten

	Aluminium	AlMn1	AlMgSi1
R _m (MPa)	80	100-160	300
R _{0,2} (MPa)	30	80	240
Brinell hardheid	20	50	90
Rek A ₅ (%)	38	18	8

tabel 11.1 Chemische samenstelling en smelttraject van enige soldeerbare aluminiumsoorten (ASM Handbook)

type volgens AA-classificatie	soldeerbaarheid ¹⁾	chemische samenstelling in gewichtsprocenten ²⁾								smelttraject in °C
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	diversen	
1050	A	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	–	0,05	0,03 Ti; 0,05 V	645 - 655
1100	A	0,95 (Si + Fe)		0,12	0,05	–	–	0,10		643 - 655
3003	A	0,6	0,7	0,12	1,2	–	–	0,10		643 - 655
3004	B	0,30	0,7	0,25	1,2	1,0	–	0,25		630 - 655
3005	A	0,6	0,7	0,30	1,2	0,4	0,10	0,25	0,10 Ti	638 - 655
5005	B	0,30	0,7	0,20	0,20	0,8	0,10	0,25		632 - 655
5050	B	0,40	0,7	0,20	0,10	1,5	0,10	0,25		625 - 650
6053	A	0,7	0,35	0,10	–	1,3	0,25	0,10		575 - 650
6061	A	0,6	0,7	0,3	0,15	1,0	0,2	0,25	0,15 Ti	580 - 650
6063	A	0,4	0,35	0,10	0,10	0,7	0,10	0,10	0,10 Ti	615 - 655
6951	A	0,35	0,8	0,3	0,10	0,6	–	0,20		615 - 655
7005	B	0,35	0,40	0,10	0,45	1,4	0,13	4,5	0,04 Ti; 0,14 Zr	607 - 646
7072	A	0,7 (Si + Fe)		0,10	0,10	0,10	–	1,0		640 - 655
cast 443.0	A	5,3	0,8	0,6	0,50	0,05	0,25	0,50	0,25 Ti	575 - 630
cast 712.0	B	0,3	0,5	0,25	0,10	0,50	0,5	5,8	0,20 Ti	600 - 640

1) A = goed soldeerbaar met alle soldeerprocessen; B = redelijk soldeerbaar, doch kritische dan A.

2) Aluminium is in de tabel resterend element.

Opmerking: spuitgietlegeringen zijn niet soldeerbaar

De niet-hardbare aluminiumlegeringen worden alle gekenmerkt door een zeer goede corrosieweerstand. Deze corrosiebestendigheid kan nog verder worden verbeterd door de natuurlijke oxidelaag te versterken door anodiseren of fosfateren. Aluminium is niet bestand tegen loog en andere basische stoffen. De meest corrosiebestendige soldeerverbinding wordt vervaardigd met BA187Si 577-582 soldeer.

11.4 Voorbehandelingen

Voor het verkrijgen van een geslaagde soldeerverbinding is het van belang dat het soldeer het basismateriaal bevochtigt.

Voorwaarde is dat het te solderen oppervlak vrij is van verontreinigingen en dat de aanwezige oxidehuid dun genoeg is om (door het vloeimiddel) te worden afgebroken. In veel gevallen is het voldoende de werkstukken te ontvetten. Dit kan geschieden door middel van dampontvetting in middelen als trichloorethaan of perchloorethyleen. Vanwege hun schadelijke effecten op het milieu is het raadzamer alcohol of alkalische reinigingsmiddelen te gebruiken. Perchloorethyleen wordt in moderne reinigingssystemen onder vacuüm toegepast. Dit beperkt sterk het verlies van oplosmiddelen en is daardoor toegestaan. Door bijbehorende speciale containers en vulsystemen is ook het lekverlies tijdens transport en overslag sterk te reduceren, waardoor de belasting van het milieu acceptabel is.

Alkalisch ontvetten in verwarmde fosfaatbaden of met andere in de handel verkrijgbare ontvettingsmiddelen wint de laatste jaren steeds meer terrein. Naspoelen met water gevolgd door drogen in warme lucht is echter een noodzaak. Werkstukken waarbij hoge eisen aan de soldeernaad worden gesteld, vereisen een meer uitgebreide voorbehandeling. De oxidehuid op het soldeervlak dient mechanisch of chemisch te worden verwijderd. Borstelen met roestvaststaalborstels verdient de voorkeur boven schuren. Borstelen leidt meestal tot versmering van het oppervlak met vuil en oxides en is daardoor een beperkt toepasbare methode. Het scherp houden van de borstels is ook vaak een ander probleem. Reinigen door middel van gritstralen is ongeschikt voor een relatief zacht materiaal als aluminium. Beitsen van aluminium is een uitstekende doch omslachtige reinigingsmethode. Het voordeel is wel dat het gehele werkstuk wordt gereinigd, hetgeen het soldeerproces ten goede komt.

Een veelgebruikte beitsmethode voor aluminium is:

1. dompelen in een oplossing van 5% natriumhydroxide (caustic soda) in water bij een temperatuur van 70 °C. Per minuut gaat ca. 0,02 mm materiaal van het oppervlak in oplossing, zodat korte etstijden geboden zijn. Controle op dikte van de oxidelaag is mogelijk door oppervlakteweerstandsmeting;
2. spoelen in water en drogen in lucht;
3. passiveren gedurende 30 seconden in een oplossing van 30 - 50% salpeterzuur bij kamertemperatuur;
4. spoelen in water;
5. drogen in warme lucht.

Voor aluminiumproducten die zijn voorzien van een geplaatte soldeerlaag is de beitsbehandeling af te raden, daar de soldeerlaag snel oplost. Eenmaal gereinigde producten dienen schoon te blijven. Een zorgvuldige opslag tot het soldeerproces en het werken met pluisvrije katoenen handschoenen dragen hiertoe bij.

11.5 Soldeermethoden

Soldeerprocessen voor aluminium zijn veelal beschermd door een octrooi, waardoor toestemming van de octrooihouder nodig is alvorens tot toepassing ervan kan worden overgegaan. Achtereenvolgens worden de volgende processen besproken:

- *dompelsolderen* in een vloeimiddelbad (zogenaamd zoutbadsolderen);
- *ovensolderen in lucht*;
- *ovensolderen in een beschermend gas*;
- *ovensolderen in vacuüm*.

Ook hoogfrequent-inductiefsolderen in lucht met vloeimiddel wordt toegepast.

De genoemde processen vertonen veel overeenkomsten, doch ook een aantal belangrijke verschillen. De voorbereidingen voor het soldeerproces, zoals het reinigen, monteren en het aanbrengen van soldeermateriaal, is voor alle processen vrijwel gelijk. De temperatuurgelijkmatigheid op soldeertemperatuur is voor alle processen ± 3 °C. Deze nauwkeurigheid is in een vloeimiddelbad eenvoudiger te realiseren dan in een vacuümoven. Het belangrijkste verschil is het al dan niet gebruik maken van een vloeimiddel. Zo wordt bij het dompelsolderen in het gesmolten vloeimiddel gesoldeerd, terwijl bij vacuümsolderen in het geheel geen vloeimiddel wordt gebruikt.

Bij het solderen in een beschermend gas kan met veel minder vloeimiddel worden volstaan dan in lucht. De laatste jaren zijn niet-corrosieve vloeimiddelen ontwikkeld, waardoor het reinigen na het soldeerproces overbodig wordt.

De optimale spleetbreedte varieert niet alleen voor de verschillende processen, maar ook per gekozen overlappende, zodat proefsolderingen noodzakelijk zijn. Zo is een spleetbreedte van 50-200 μm gangbaar voor een overlap tot 6 mm. Bij grotere overlappenden kunnen de spleetbreedten oplopen tot 500 μm .

N.B. Het verschil in spleetbreedte komt, doordat bij grote overlappende het soldeer, tengevolge van opmenging met het basismateriaal, van samenstelling verandert, waardoor in een nauwe spleet stolling optreedt vóórdat de spleet volledig is gevuld. Bij het vacuümsolderen van aluminium wordt standaard een spleet van 50-100 μm aangehouden, hetgeen betekent dat kleine overlappenden worden toegepast.

Dompelsolderen

Bij het dompelsolderen (zoutbadsolderen) worden de producten voorverwarmd in een luchtcirculatie-oven bij een temperatuur van ca. 565 °C. Hierna wordt het product ondergedompeld in het vloeimiddelbad, met een temperatuur even boven de liquidustemperatuur van het soldeermateriaal (ca. 10 °C). Het vloeimiddel draagt de warmte over aan het product, beschermt deze, en lost de oxidehuid op. Enkele minuten is meestal voldoende voor het gelijktijdig maken van vele (bijvoorbeeld honderden) soldeerverbindingen. De dompeltijd moet proefondervindelijk worden vastgesteld, waarbij over het algemeen een tolerantie van $\pm 20\%$ toelaatbaar is. Na het uitlekken van het vloeimiddel moet met afschrikken van het product worden gewacht, totdat het soldeer volledig is gestold. Het chloridehoudende vloeimiddel is zeer agressief en dient grondig te worden verwijderd; er zijn echter ook minder agressieve vloeimiddelen (DIN EN 1045 FL 20).

Ovensolderen in lucht

Bij het ovensolderen worden de producten vooraf van vloeimiddel voorzien en wel over het gehele te solderen oppervlak. Het vloeimiddel wordt geleverd als een zeer fijn poeder, dat met water of alcohol wordt aangemaakt tot een pasta. Het is belangrijk dat de aanmaakvloeistof zoveel mogelijk verdampt vóór het solderen. Drogen in een oven bij 150 °C is de beste methode. De nog warme producten worden nu in de soldeeroven geplaatst, die reeds op soldeertemperatuur is. Het solderen geschiedt charge-gewijs in een kameroven of continu in een transportbandoven.

In 3-5 minuten bereiken de producten de soldeertemperatuur. Afhankelijk van gewicht en vormgeving varieert de soldeertijd van enkele minuten tot maximaal 20 minuten. Elke oven met een temperatuurgelijkmatigheid van ± 3 °C is in principe geschikt voor het solderen van aluminium. Voorkeur hebben elektrisch verwarmde ovens, waarin de lucht of het beschermend gas wordt gecirculeerd. De elektrische verwarmingselementen worden aangetast door het vloeimiddel, zodat deze bij voorkeur zijn afgeschermd. Fixatiegereedschappen kunnen vervaardigd zijn uit roestvast staal, grafiet of een nikkellegering (bijvoorbeeld Inconel). Het afkoelen van de producten geschiedt bij transportbandovens in de koeltunnel, zodat afschrikken in water niet mogelijk is.

Ovensolderen in een beschermend gas

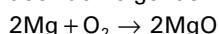
Bij het solderen in een beschermend gas zoals argon, stikstof of CO₂ is een dauwpunt van -55 °C aan te bevelen. Bij een hoger vochtgehalte tengevolge van waterdamp ontstaan soldeerfouten. Bij het gebruik van een niet-corrosieve vloeimiddel (bijvoorbeeld Nocolok®) behoeft het product na het solderen niet te worden gereinigd.

Ovensolderen in vacuüm

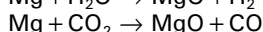
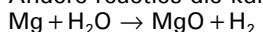
Bij het vacuümsolderen zijn de toelaatbare toleranties klein ($< 0,05$ mm). De onderdelen moeten hiertoe met hoge nauwkeurigheid worden vervaardigd, hetgeen extra eisen stelt aan de toegepaste gereedschappen.

Voor het vacuümsolderen van aluminium zijn speciale met magnesium gelegeerde soldeersoorten ontwikkeld, die als cladding op het basismateriaal zijn aangebracht. Van twee te verbinden oppervlakken is tenminste één geplaatst met soldeermateriaal. Op het soldeeroppervlak is echter altijd een oxidehuid aanwezig, die de bevochtiging van het soldeermateriaal belemmert (zie figuur 11.1a). Doordat aluminium driemaal zoveel uitzet als aluminiumoxide, zal tijdens het verwarmen de oxidehuid openbarsten (zie figuur 11.1b). Bij een vacuümdruk tussen 10^{-4} en 10^{-6} mbar zal door de lage zuurstofdruk het onderliggende aluminium niet opnieuw oxideren. Bovendien zal bij deze lage druk boven 400 °C het magnesium verdampen en de ovenruimte vullen.

De magnesiumdamp verlaagt de zuurstofdruk nog verder door de volgende reactie:

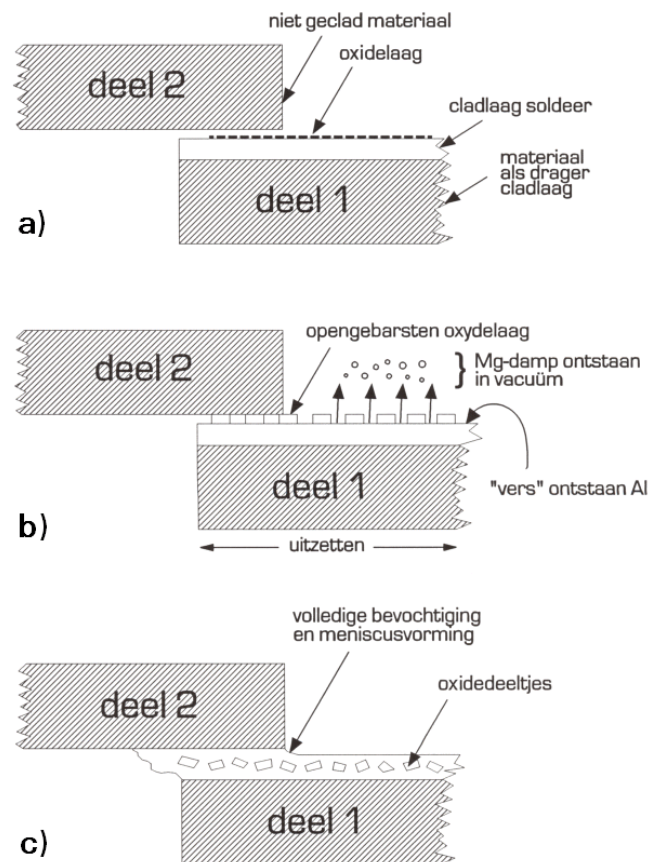


Andere reacties die kunnen plaatsvinden zijn:



Het magnesium treedt als "getter" op voor O₂, H₂O en CO₂. Bij verdere verhoging van de temperatuur smelt het AlMgSi-soldeer en bevochtigt de beide werkstukoppervlakken (zie figuur 11.1c).

Het toepassen van magnesium in de oven als *getter* leidt tot magnesiumafzettingen op koude plaatsen in de oven. Bij het wisselen van de lading onder atmosferische con-



figuur 11.1 Het soldeerproces met behulp van een "cladlaag"soldeer, in drie stappen uitgebeeld

ditie of openen van de oven voor onderhoud wordt de magnesiumlaag snel verzadigd met water. Dit water komt vaak weer vrij op ongewenste momenten, bijvoorbeeld vlak voor het vloeien van het soldeer als het magnesium op temperatuur begint te komen.

Een te dikke laag magnesium leidt tot ontoelaatbaar verslechteren van het vacuüm tijdens het solderen. Dit treedt vooral op tijdens warme periodes (zomers) wanneer het watergehalte van de lucht hoog is. De afpomptijd tot het inschakelen van de hoogvacuümpompen is vaak een goede indicatie of er (niet) teveel water is opgenomen.

Het verwijderen van het meestal poreuze magnesium is riskant in verband met het brandgevaar en stofexplosies. Hiervoor moeten speciale explosievrije stofzuigers en vonkvrij gereedschap worden toegepast. Bij het los krabben is "vuurwerk" nauwelijks te vermijden. Sluiten van de oven en vacuüm zuigen is de aangewezen methode om branden te blussen. Blusmiddelen voor metaalbrand of bluszout moeten beschikbaar zijn.

Het poreuze magnesium reageert met water uit de lucht. Hierbij komt waterstofgas vrij, wat kan leiden tot explosies. Ook opslagvaten kunnen spontaan exploderen; het vastzetten van deksels is dan ook niet aan te bevelen. De vaten moeten in een veilige opslag worden bewaard voor verdere afvoer. Het laten vallen van het magnesium afval kan spontane ontbranding veroorzaken (ook het laten vallen van een stukje magnesium van slechts een geringe hoogte (bijv. 30 cm) kan tot brandvlekken op de ondergrond leiden, zodat bij afvoer de afvalverwerker hiervoor expliciet moet worden gewaarschuwd.

Het bovengenoemde soldeerproces is zeer gevoelig voor kleine procesafwijkingen en wordt uitgevoerd in speciaal voor het solderen van aluminium ontwikkelde vacuüm-ovens.

11.6 Soldeermaterialen

Voor het solderen van aluminium komen vrijwel uitsluitend aluminiumbasislegeringen in aanmerking met 7-13% silicium. Voor het vacuümsolderen van aluminium is bovendien 1 tot 2% magnesium noodzakelijk. In tabel 11.3 zijn de belangrijkste soldeersoorten voor het solderen van aluminium en aluminiumlegeringen opgenomen. De soldeermaterialen zijn verkrijgbaar in draad, folie, poeder, pasta's of als cladding op plaat- en buismateriaal.

11.7 Controle en nabehandelingen

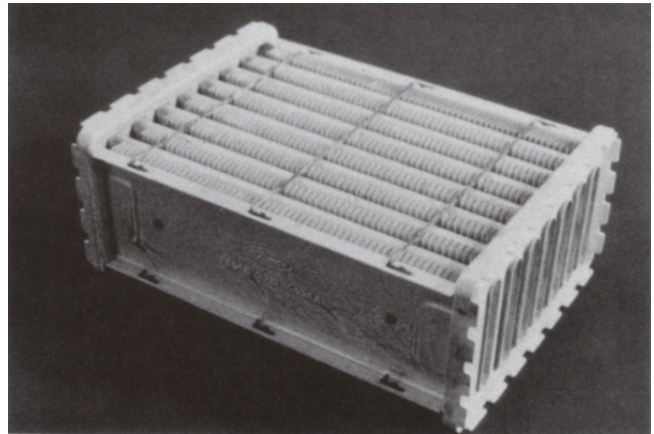
Na het soldeerproces is het noodzakelijk agressieve vloeimiddelresten te verwijderen door dompelen in heet water of commercieel verkrijgbare chemische baden. De volgende reinigingsprocedure wordt ook uitgevoerd: dompelen gedurende 5 minuten in een waterige oplossing met 10 vol.% HNO_3 en 0,25 vol.% HF bij 20 °C. Vervolgens goed spoelen met water en drogen met warme lucht.

Zowel het basismateriaal als het soldeermateriaal wordt aangeëtsd en vloeimiddelresten worden opgelost. Warmtewisselaars, koelers en dergelijke worden in toenemende mate van aluminium vervaardigd, waarvoor een afpersproef de belangrijkste controle is. Door een te hoge soldeertemperatuur of een te lange soldeertijd wordt het aluminium geërodeerd ("aangevreten") door het soldeermateriaal, hetgeen door visuele inspectie kan worden opgespoord. Scheuren in de soldeernaad door een te grote afkoelsnelheid komen visueel of met behulp van "penetrant" vloeistoffen aan het licht. Dunwandige producten laten zich uitstekend radiografisch onderzoeken en door middel van ultrasoon onderzoek.

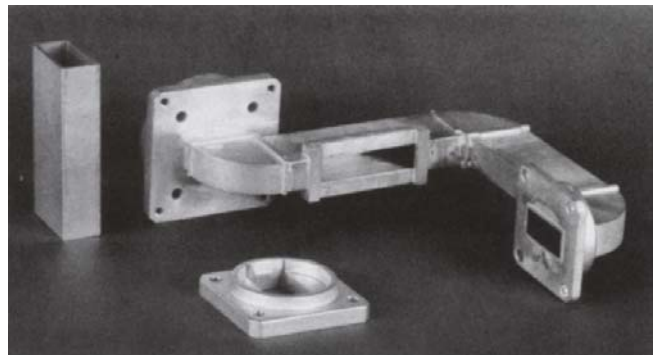
11.8 Toepassingen

Het solderen van aluminium en aluminiumlegeringen wordt onder andere toegepast voor:

- ▶ warmtewisselaars en koelers voor automobielen en vliegtuigen (figuur 11.2);
- ▶ hydraulische koppelingen;
- ▶ aluminiumbodems onder RVS-kookpannen;
- ▶ verwarmingselementen voor huishoudelijke toepassing;
- ▶ golfbuizen voor radartoepassingen (figuur 11.3).



figuur 11.2 Gesoldeerde aluminiumkoeler; toepassing uit de automobielenindustrie (foto Bodycote-Diemen)



figuur 11.3 In zoutbad gesoldeerde aluminium golfbuis voor radartoepassingen (foto Thales)

tabel 11.3 Aluminiumbasis-soldeersoorten

soldeer volgens		chemische samenstelling									soldeer- traject in °C	doseervorm	opmerking
EN-ISO 3677 ²⁾	AA classif. AWS A5.8/ A5.8M:2004	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	div.	overige elementen			
BAI91Si 577-613	4343 BAISi-2	91	7,5	0,25	–	0,2	0,8	0,1		0,15	599-621	cladding, folie	voornamelijk als cladding
BAI85SiCu 521-585	4145 BAISi-3	85	10	4	0,15	0,2	0,8	0,15	0,15 Cr	0,15	571-604	draad, folie	algemene toepassingen
BAI87Si 577-582	4047 BAISi-4	87	12	0,3	0,1	0,2	0,8	0,15		0,15	582-604	draad, folie, poeder	algemene toepassingen
BAI89Si 577-591	4045 BAISi-5	89	10	0,3	0,05	0,1	0,8	0,05	0,20 Ti	0,15	588-604	cladding	voornamelijk als cladding
BAI88Si 554-596	4004 BAISi-7	88	10	0,25	1,5	0,2	0,8	0,1		0,15	588-604	cladding	vacuümsoldeer
BAI86Si 562-582	– BAISi-9	86	12	0,25	0,3	0,2	0,8	0,1		0,15	582-604	cladding	niet toepasbaar als vacuümsoldeer vanwege te laag Mg-gehalte
BAI88Si 559-596	– BAISi-11	88	10	0,25	1,5	0,2	0,8	0,1	0,11 Bi	0,15	588-604	cladding	vacuümsoldeer
BAI75Si 515-560	4245 –	75	10	0,25	1,5	0,2	0,8			0,15	582-604	cladding	vacuümsoldeer

1) Samenstelling nominale waarden in gewichtsprocenten

2) ISO-aanduiding wordt verklaard in hoofdstuk 10 (nomenclatuur)

Hoofdstuk 12

Magnesium en magnesiumlegeringen

12.1 Inleiding

Magnesium en zijn legeringen behoren tot de lichtste constructiematerialen (ongeveer 33% lichter dan aluminium en 66% lichter dan titaanlegeringen). Het materiaal heeft goede eigenschappen, zoals hoge specifieke sterkte, lage dichtheid, goede verwerkbaarheid (bijvoorbeeld door gieten) en bewerkbaarheid (bijvoorbeeld door warmwalsen of verspanen). Tevens is magnesium een milieuvriendelijk materiaal, doordat het uitstekend geschikt is voor hergebruik (*recycling*).

Nadeel is dat magnesium in tegenstelling tot aluminium en titaan geen afsluitende en beschermende oxidelaag aan het oppervlak vormt, waardoor het gevoelig is voor corrosie in een vochtige omgeving; de aanwezigheid van verontreinigingen als ijzer, koper en nikkel in de legering verslechteren de corrosiebestendigheid. Andere eigenschappen die de toepassing kunnen beperken zijn hoge thermische geleidbaarheid, grote uitzettingscoëfficiënt, lage smelttemperatuur en een hoog smeltpunt van de moeilijk reduceerbare oxidelaag. Bovendien is magnesium een *gettermateriaal* en neemt gemakkelijk gasen als zuurstof, stikstof e.d., maar ook water op.

Een nieuwe ontwikkeling op materiaalgebied is dat magnesium naast toepassing in magnesiumlegeringen ook meer en meer wordt toegepast in metaalmatrixcomposieten (MMC's). Deze MMC's bevatten in de matrix keramische (SiC, SiO₂, TiC, enz.) deeltjes of keramische (SiC, Al₂O₃), grafiet- of staalvezels. Deze MMC's hebben uitstekende mechanische eigenschappen, zoals sterkte, stijfheid, kruipsterkte e.d. en vaak een lage uitzettingscoëfficiënt. Een beperking vormt het feit dat de matrix uit laagsmeltend magnesium bestaat, waardoor de maximaal toelaatbare bedrijfstemperatuur relatief laag is.

De verbindbaarheid van magnesiumlegeringen en MMC's kan problemen opleveren. Weliswaar zijn deze materialen goed te verbinden d.m.v. klinken met aluminium of aluminium-magnesium klinknagels of lijmen, maar lassen of solderen vergen de nodige kennis en aandacht. Als lasprocessen worden TIG en MIG lassen toegepast, terwijl weerstandlassen eveneens mogelijk is. Zachtsolderen is alleen mogelijk op vooraf bekleed materiaal, terwijl hardsolderen wordt uitgevoerd met een agressief vloeimiddel dat na afloop moet worden verwijderd om corrosie te voorkomen. Hoogtemperatuursolderen is alleen mogelijk in inert gas en onder vacuüm; in waterstof solderen leidt tot opname van waterstof in het materiaal. Om korrelgroei te vermijden wordt aangeraden Zr-houdende legeringen te gebruiken en bij vacuümsolderen wordt afgeraden Zn-houdende legeringen toe te passen.

Magnesium en zijn legeringen worden aangewend voor productietechnische, chemische en elektrochemische doeleinden, in de vliegtuig-, scheeps- en raketbouw (ook MMC's). Ook in frames voor apparaten als fototoestellen, computers, laptops, veldkijkers, ladders, en voorts in handgereedschap en andere draagbare apparaten wordt dit materiaal veel toegepast. Spuitgietstukken worden in de autobouwbouw voor motoren en transmissies gebruikt.

N.B. In fijnverdeelde toestand is magnesium zeer brandbaar; met een opeenhoping van bijvoorbeeld draaikrullen moet dan ook zeer voorzichtig worden omgegaan. Magnesium brandt zowel in zuurstof als in stikstof; een magnesiumbrand mag nooit met water of zand worden bestreden, maar met koolzuursneeuw of gietijzerspanen. Een goed blusmiddel wordt gevormd door de combinatie van de zouten MgCl, KCl, NaCl en CaF. Een voorbeeld^{)} hiervan is de combinatie van zouten met een smeltpunt van 370 tot 450 °C. De werking van het zout is, dat dit het brandende magnesium afsluit van de omgeving.*

12.2 Materiaalcombinaties

Materialen behorend tot hetzelfde type magnesiumlegering, kunnen met elkaar door middel van hoogtemperatuursolderen worden verbonden. Bij combinaties van onderling verschillende materialen moet rekening worden gehouden met verschil in uitzettingsgedrag. Elementen als aluminium, zink en zirkonium in magnesiumlegeringen kunnen de soldeerbaarheid (lees: bevochtiging) beïnvloeden. Hoogtemperatuursolderen van magnesiumhoudende MMC's, hetzij aan zichzelf, hetzij aan andere metalen, is mogelijk indien laagtemperatuursoldeersoorten beschikbaar zijn, die ook bevochtigingsproblemen vanwege aanwezigheid van keramische deeltjes/vezels in deze MMC's, kunnen voorkomen. Het aanbrengen van een metallische deklaag biedt vaak uitkomst.

12.3 Eigenschappen

De sterkte van magnesium kan praktisch door koudvervorming niet worden opgevoerd. Voor sterktedoeleinden wordt magnesium dan ook altijd in gelegerde vorm toegepast.

Toevoeging van Zr aan de legering geeft korrelverfijning en verbetert de vervormbaarheid in hoge mate. Echter, de Zr-toevoeging belet de toevoeging van elementen als Al en Mn, die met Zr onoplosbare verbindingen vormen.

Er bestaan Zr-vrije en Zr-houdende legeringen (laatste zijn taaier, maar ook duurder). Verdere toevoegingen aan Zr-houdende legeringen zijn Zn, Th en Zn + ZA (ZA = zeldzame aarden als MischMetall met ca. 50% Ce). Legeringen met Zr zijn: MgZr als kneedlegering; MgZnZr, MgZnThZr en MgZnZAZr zowel giet- als kneedlegeringen. Zr-vrije legeringen bevatten meestal Al of Al + Zn. Legeringen zonder Zr zijn: MgAl en MgSi, als gietlegeringen; MgMn en MgAlZn zowel giet- als kneedlegeringen. Voorts bestaat de magnesiumlegering met 14% Li die bij kamertemperatuur goed plastisch vervormbaar is. Door precipitatieharding, door toevoegingen van Ag, Al, Cd of Zn, wordt de sterkte verdubbeld. Echter, deze legering kan bij kamertemperatuur snel oververouderen. In tabel 12.1 wordt de samenstelling van enkele soldeerbare magnesiumlegeringen gegeven.

12.4 Voorbehandelingen

Magnesiumlegeringen kunnen goed worden verspaand en warm vervormd, bijvoorbeeld door dieptrekken. Magnesiumlegeringen worden gewoonlijk aangeleverd met een conserveringsolie laag, een chromaat gecoat oppervlak of een met zuur gebeitst oppervlak.

^{*)} Emgesal flux van de firma Rheinkalk HDW (Duitsland)

tabel 12.1 Soldeerbare magnesiumlegeringen; samenstelling in gewichtsprocenten (vrij naar Brazing Handbook)

ASTM code	Al	Zn	Mn ¹⁾	Zr	ZA ²⁾	T _{sol} -T _{liq} [°C]	soldeergeb. [°C]
AZ10A	1,2	0,4	0,2	–	–	632-643	582-616
AZ31B	3,0	1,0	0,2	–	–	566-627	582-616
K1A	–	–	–	0,70	–	649-650	582-616
M1A	–	–	1,2	–	–	648-650	582-616
ZE10A	–	1,2	–	–	0,17	593-646	582-593
ZE21A	–	2,3	–	0,60	–	626-642	582-616

1) minimum Mn gehalte
2) ZA = zeldzame aarde

Olie, vuil en vet kunnen in een heet alkalisch bad of met behulp van damp- of oplosmiddelontvetten worden verwijderd. Conserveringsolie kan worden verwijderd door 20-30 min. koken in een 1% waterige sodaoplossing gevolgd door spoelen met warm water en drogen op 60-80 °C. Chromaat conversie coatings of oxiden moeten mechanisch of chemisch vóór het solderen worden weggehaald.

Als oppervlaktebehandeling kunnen voorts schuren (met aluminiumoxide doek of staalwol), ontvetten (5-10 min. dompeling in een 2-5% warme natronloogoplossing gevolgd door 2 min. dompeling in een ijzer(III)nitraat beitsoplossing) en beitsen (in 5-10% salpeterzuuroplossing of 10-15% chroomzuuroplossing in kokend water) worden toegepast. De te solderen delen moeten na afloop schoon en braamvrij zijn; tussen de reiniging en het solderen moet een periode van minder dan 5 uur liggen.

12.5 Soldeermethoden

Solderen in beheerste atmosfeer kan geschieden in droog, inert gas of in vacuüm, bijvoorbeeld in daarvoor ingerichte ovens met lage inlek en zeer geringe uitgassing. Bij het solderen onder vacuüm moet de druk tenminste 10⁻⁵ mbar zijn om de aanwezige verse magnesiumoxidehuid (t.g.v. de vooraf uitgevoerde oppervlaktebehandeling) te kunnen verwijderen om bevochtiging mogelijk te maken. Bij het solderen in vacuüm is de warmte-overdracht door straling onder 600 °C zeer slecht. Als remedie kan het opwarmen onder convectie in een droog, inert gas worden uitgevoerd; bij een temperatuur van ca. 50 °C onder de soldeertemperatuur wordt vervolgens dit gas afgepompt en vervangen door het vacuüm. Uiteraard is het in principe ook mogelijk het solderen in droog, inert gas uit te voeren. Tevens kan het solderen in analogie met aluminium in een zoutbad worden uitgevoerd, het z.g. dompelsolderen.

12.6 Soldeermaterialen

Voor het vacuümsolderen van AZ91C (magnesiumgietlegering bestaande uit 90 Mg-8,7 Al-0,7 Zn-0,2 Mn-0,3 Si-0,1 Cu; smelttraject 468-598 °C; soldeertemperatuur 430-460 °C) wordt een magnesiumbasissoldeer Mg-12Al-2Ca-0,8Zn toegepast.

Voor het zacht- of hardsolderen van M 1A (magnesium-kneedlegering bestaande uit 98,8 Mg-1,2 Mn en vooraf voorzien van een zilverlaag) in droog argongas worden de soldeersoorten op galliumbasis Ga-4Mg-4Cd-4Zn of Ga-26Zn-11Sn-4Mg-4Cd bij een soldeertemperatuur liggend tussen 150-600 °C, toegepast. De maximale afschuifsterkte bedraagt 58,8 MPa; de verbindingen zijn gevoelig voor atmosferische corrosie en moeten dan ook

worden beschermd door een fosfaat- of chromaatcoating (zie ook § 12.8). In tabel 12.2 worden enige soldeersoorten op magnesiumbasis gegeven. slechts enkele (laag Zn gehalte; geen cadmium bevattend) zijn geschikt voor vacuümsolderen.

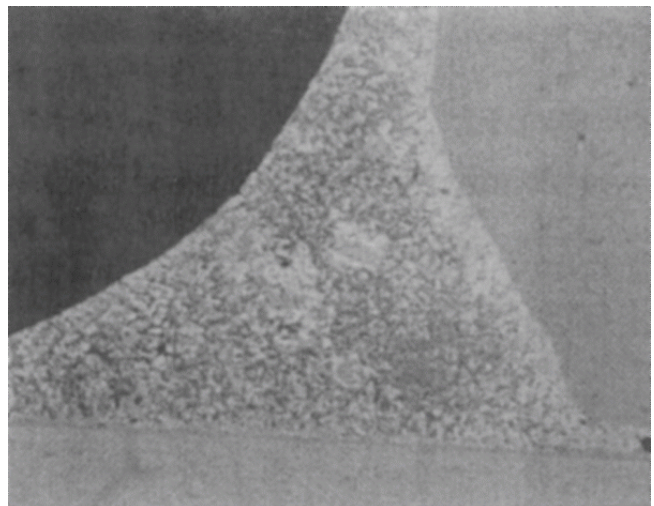
tabel 12.2 Chemische samenstelling van solderen voor magnesium in gewichtsprocenten (vrij naar Metalische Lotwerkstoffen)

Mg (%)	Al (%)	Zn (%)	Overige elementen (%)	T _{sol} (°C)	T _{liq} (°C)
rest	21-22	0,2-0,5	0,1-0,3 Mn; 25-26 Cd ¹⁾	–	415
73,9	25-27	1-1,5	0,1-0,3 Mn	–	435
72,5-75	2-2,5	23-25 ¹⁾		–	550...600
rest	12	5 ¹⁾	0,0002-0,0008 Be ²⁾	410	565
rest	12	–	11 Cd; 4 Ni ¹⁾	–	560...580
rest	9	2	> 0,15 Mn; ≤ 0,005 Ni 0,0002-0,0008 Be ³⁾	443	599
84-86	0,75...1	13...5 ¹⁾	–	–	600

1) geen vacuümsoldeer, maar vlam- of zoutbadsoldeer
2) overige: <0,30%
3) <0,05% Si; <0,05% Cu; <0,005% Fe; overige <0,30%

12.7 Controle en nabehandelingen

Nabewerking van de gesoldeerde verbinding is in het algemeen niet noodzakelijk. Voor hoogwaardige toepassingen van gesoldeerde verbindingen zal vaak een procedure-kwalificatie worden gevolgd, hetgeen kan inhouden dat destructief onderzoek (metallografisch, mechanisch) moet worden uitgevoerd op mee gesoldeerde proefstukken (dummies). Een voorbeeld van een microscopische doorsnede van een gesoldeerde verbinding van het composietmateriaal AZ91C/15 SiC p met een Mg12Al2Ca0,8Zn-soldeer wordt in figuur 12.1 gegeven. Naast visuele controle kan worden geëist dat de verbinding niet-destructief wordt onderzocht. Het resultaat wordt dan vastgelegd in zogenaamde sonogrammen. Ter verhoging van de corrosiebestendigheid kan o.m. een fosfaatdeklaag, een CrMn of CrAl conversie coating of een kunststof (epoxy-polyesteracryl) coating op het gesoldeerde werkstuk worden aangebracht. Ook zijn er MgO-CrO₃ coatings voor locale bescherming van de gesoldeerde verbinding.

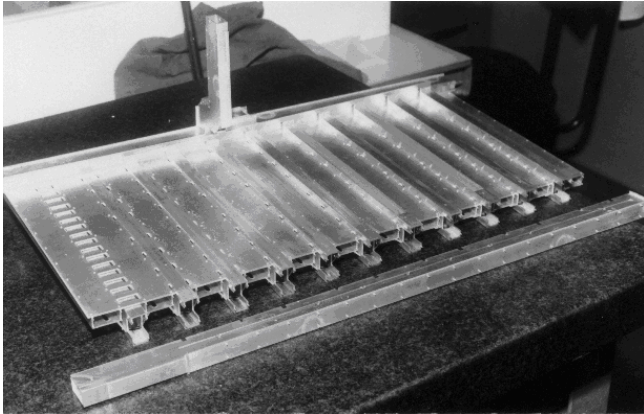


figuur 12.1 Voorbeeld van een gesoldeerde verbinding van het composietmateriaal AZ91C/15 SiC p met een Mg12Al2Ca0,8Zn-soldeer (foto Brazing Handbook)

12.8 Toepassingen

De belangrijkste toepassingen van gesoldeerde verbindingen van magnesiumlegeringen en MMC's zijn te vinden in:

- ▶ onderdelen toegepast in de vliegtuig-, raket- en automobielbouw;
- ▶ frames voor fototoestellen, computers, laptops, veldkijkers;
- ▶ handgereedschap;
- ▶ microgolf antennes (zie fig. 12.2).



figuur 12.2 Zoutbadsoldeerverbindingen in een M1A microgolf antenne (foto Brazing Handbook)

Hoofdstuk 13

Koper en koperlegeringen

13.1 Inleiding

Koper is een materiaalsoort met een breed toepassingsgebied; dit betreft in het bijzonder de elektrotechnische industrie. Het materiaal heeft naast een goede elektrische en warmtegeleidbaarheid, ook goede corrosie-eigenschappen. Koper of koperlegeringen leveren in een zwak tot matig corrosief milieu weinig of geen problemen op. Vanwege de hoge warmtegeleidbaarheid en de grote warmtecapaciteit is koper moeilijk te lassen, maar laat zich daarentegen eenvoudiger ovensolderen. Het is dan ook begrijpelijk dat solderen voor koper de meest toegepaste verbindingsmethode is.

Koper kunnen we met betrekking tot het solderen verdelen in 2 groepen, namelijk:

- zuurstofhoudend koper;
- zuurstofvrij koper.

Voor bepaalde soldeerprocessen is het van belang te weten met welke kopersoort men te doen heeft. Ook koperlegeringen als Cu Al, Cu Be, Cu Cr, Cu Ni, Cu Si, Cu Sn en Cu Te kunnen worden gesoldeerd. Onder bepaalde omstandigheden ook Cu Zn (geen vacuumsolderen).

13.2 Materiaalcombinaties

Het verbinden van materialen met een hoog koperpercentage geeft over het algemeen weinig problemen. Er moet wel op worden gelet dat wanneer één van de materialen een koperlegering is welke elementen bevat met een laag smeltpunt, deze niet bij elke willekeurige temperatuur en in iedere atmosfeer kan worden gesoldeerd.

Legeringen met laagsmeltende elementen of elementen met hoge dampspanning worden bij voorkeur niet in (hoog)vacuüm gesoldeerd.

Bij het solderen van koper aan staal of aan keramiek moet rekening worden gehouden met het "moeilijkst" te bevochtigen materiaal.

Bij zogenaamde dik-dun combinaties zal rekening moeten worden gehouden met de opwarmsnelheid. Verder zal rekening dienen te worden gehouden met het verschil in uitzettingscoëfficiënt.

Door het kiezen van de juiste constructie kunnen dikwijls materiaalcombinaties met verschillende uitzettingscoëfficiënten toch goede soldeerverbindingen opleveren. De goede ductiliteit van koper is hiervoor mede verantwoordelijk.

13.3 Eigenschappen

Koper heeft een lage rekristallisatietemperatuur. Het gevolg daarvan is, dat koper na een soldeerbewerking zich in zachtgegloeide toestand bevindt. Bij sterkteberekeningen van gesoldeerde constructies in koper, moet dan ook worden uitgegaan van volledig zachtgegloeid materiaal. De treksterkte van het soldeermateriaal is in veel gevallen groter dan dat van het basismateriaal. Bij het verwarmen of afkoelen van massieve stukken koper moet men er rekening mee houden dat dit egaal plaatsvindt. Gebeurt dit niet, dan ontstaan er inwendige spanningen die vervorming van het product en soms be-

schadiging van de soldeerverbinding tot gevolg kunnen hebben.

Als gevolg van het hoogtemperatuursolderen zullen ook de mechanische eigenschappen veranderen, zoals hardheid en treksterkte. De eigenschappen van precipitatiehardende legeringen kunnen na het solderen worden hersteld. Het solderen van zuurstofhoudend koper moet niet worden uitgevoerd in een waterstofhoudend beschermend gas. Bij verhoogde temperatuur zal namelijk de zuurstof in het koper met de waterstof reageren tot waterdamp. Dit veroorzaakt hoge drukken in het koper, hetgeen tot ernstige scheurvorming in het materiaal kan leiden (waterstofziekte).

Als moet worden gesoldeerd in waterstof, dan zal zuurstofvrij koper moeten worden toegepast.

13.4 Voorbehandelingen

Als algemene regel geldt dat de te solderen oppervlakken vrij moeten zijn van verontreinigingen en oxiden.

De manier waarop dit gebeurt, is mede afhankelijk van het eindproduct. Voor de minder kritische toepassing is het verwijderen van een eventuele oxidelaag door borstelen en schuren reeds voldoende. Vervolgens kan een behandeling met een ontvettingsmiddel plaatsvinden.

Voor de meer kritische toepassing kunnen de onderdelen chemisch worden behandeld in de vorm van beitsen. Moet het oppervlak glad zijn, dan kan na het beitsbad een behandeling met het polijstbad plaatsvinden.

Voordat met de chemische behandeling wordt gestart, moeten ook hier de onderdelen eerst vetvrij zijn.

Het beitsen kan plaatsvinden in een bad van de volgende samenstelling:

40	ml	H ₃ PO ₄	(fosforzuur)
15	ml	HNO ₃	(salpeterzuur)
1,5	ml	HCl	(zoutzuur)
20	gr	NH ₄ NO ₃	(ammoniumnitraat)
45	ml	H ₂ O	(demi water)

Spoelen 3 à 4 minuten bij een badtemperatuur van 35 °C.

Glansbad:

65	ml	CH ₃ COOH	(azijnzuur)
30	ml	H ₃ PO ₄	(fosforzuur)
5	ml	HNO ₃	(salpeterzuur)

Dompeltijd ½ à 1 minuut bij 25 °C.

Vervolgens de onderdelen spoelen in koud demiwater, warm demiwater (70 à 80 °C) en alcohol.

13.5 Soldeermethoden

In principe is iedere hoogtemperatuursoldeermethode geschikt voor het solderen van koper. Echter, het solderen van zuurstofhoudend koper in een waterstofhoudende atmosfeer is af te raden, in verband met de mogelijkheid van het optreden van waterstofziekte in het koper.

Ten aanzien van koperlegeringen ligt de keuze van soldeermethode enigszins ingewikkelder. Hierbij spelen effecten als dampspanning en smeltpunt van legeringselementen en een eventuele nabehandeling van het materiaal een bepalende rol bij de keuze van de soldeermethode.

Als soldeermethoden kunnen worden genoemd:

- ovensolderen;
- hoogfrequent-inductiefsolderen;
- infraroodstraling-solderen.

Deze soldeermethoden worden toegepast in een beheerste atmosfeer. Onderscheiden worden:

Solderen in vacuüm

Vacuüm is zeer geschikt om koper in te solderen, zowel zuurstofhoudend als zuurstofvrij koper.

Koperlegeringen met legeringselementen die een te hoge dampspanning hebben tijdens het solderen in vacuüm, dienen niet te worden toegepast. Het gaat hierbij met name om elementen als mangaan, lood, tin, en dergelijke. De mate van het vacuüm is mede afhankelijk van de toepassing. In de praktijk varieert de druk van 1 mbar tot 10^{-5} mbar.

Solderen in beschermend of reducerend gas

Het solderen van koper en koperlegeringen in een beschermend of reducerend gas geeft goede resultaten.

Als beschermgas wordt veelal argon, stikstof of helium toegepast. Als reducerend gas komt vooral waterstof, gekraakte ammoniak of een stikstof-waterstof mengsel in aanmerking.

(N.B. *Waterstofziekte kan optreden; zie hiervoor*)

13.6 Soldeermaterialen

Voor het solderen van koper en zijn legeringen is een breed scala van soldeermaterialen voorhanden. De toepassing van het eindproduct met de daaraan verbonden fysische eisen van zowel basismateriaal als soldeernaad, zijn dikwijls bepalende factoren bij de keuze van een soldeermateriaal.

Een veelvuldig toegepast soldeermateriaal is het BAg-8, eutectisch zilver-kopersoldeer met een smeltpunt van 780°C . Ook palladium-, tin- en indiumhoudend zilverkoperbasissoldeer wordt toegepast; soms ook goud(nikkel)- en nikkel(fosfor)soldeer.

Voor uitgebreide en gerichte informatie omtrent het toe te passen soldeermateriaal, is het naast hoofdstuk 10 "Soldeermaterialen" ook raadzaam de documentatie van de soldeerleveranciers te raadplegen.

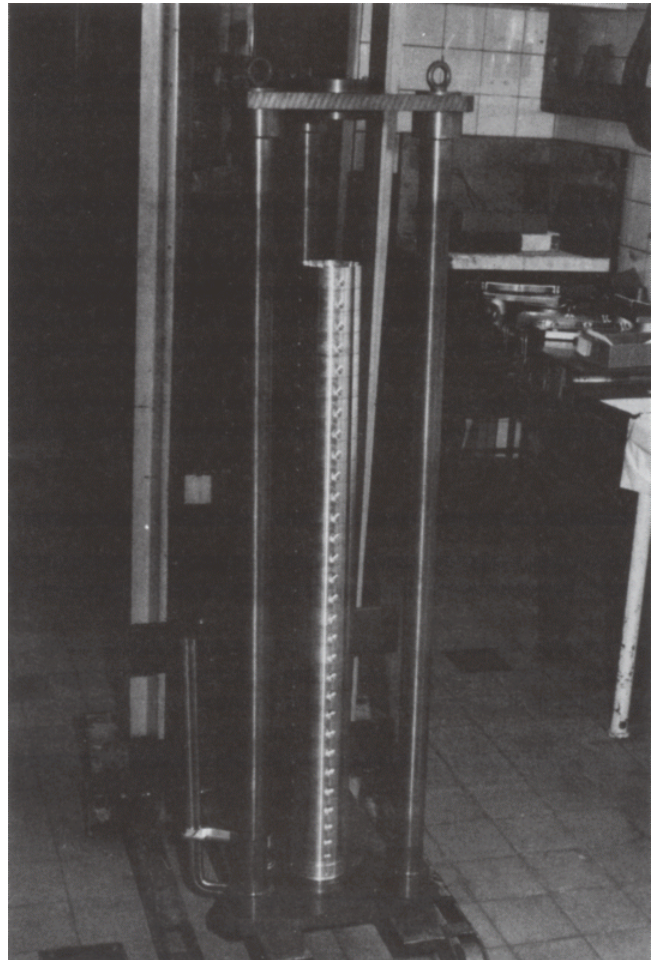
13.7 Controle en nabehandelingen

Bij een goed uitgevoerde capillaire verbinding is geen nabewerking nodig.

De controle beperkt zich over het algemeen tot een visuele beoordeling. Soldeernaadcontrole kan worden uitgevoerd met "penetrant" vloeistoffen. De kwaliteit van de verbinding kan niet-destructief worden bepaald met radiografisch of ultrasoon onderzoek. De lektheid kan worden gecontroleerd met de afpersproef of met halogeen- of heliumlektesten.

13.8 Toepassingen

- Apparatuur voor elementaire deeltjesversnellers (figuren 13.1 en 13.2).



figuur 13.1 Vacuümgesoldeerd onderdeel voor apparatuur toegepast in elementaire deeltjesversnellers (onderdeel opgesteld in soldeermal) (foto Philips)



figuur 13.2 Detail uit onderdeel van figuur 13.1 (foto Philips)

Hoofdstuk 14

Koolstofstaal

14.1 Inleiding

Over het algemeen zijn alle ongelegeerde en laaggelegeerde staalsoorten, zoals:

- ▶ constructiestaal,
- ▶ veredelingsstaal,
- ▶ automatenstaal,
- ▶ carboneerstaal,
- ▶ nitreerstaal,
- ▶ en gereedschapsstaal uitstekend te solderen.

Het zwavel- of loodhoudende automatenstaal is nog goed te solderen. Het is echter raadzaam om voor producten die zwaar worden belast, de sterkte van de soldeerverbindingen vooraf te bepalen. De soldeerverbinding kan als gevolg van deze toevoegingen aan het basismetaal aanmerkelijk aan sterkte verliezen of niet lekdicht zijn.

Massafabricagedelen met een gecompliceerde vormgeving worden steeds vaker door poedermetallurgie en sinteren vervaardigd. Een karakteristieke eigenschap van gesinterd metaal is de poreusheid van de structuur. Bij een poreusheid kleiner dan 8% wordt het metaal nog als dicht gekarakteriseerd. Gesinterde producten met een hogere poreusheid kunnen bij het solderen problemen geven, daar het werkstuk het vloeibare soldeer als een spons opzuigt. Een zeer korte soldeertijd of het toepassen van een soldeer met een breed smelttraject kan hier uitkomst brengen.

14.2 Materiaalcombinaties

Koolstofstaalsoorten kunnen onderling goed worden gesoldeerd.

Materiaalcombinaties van koolstofstaal met:

- ▶ hooggelegeerde staalsoorten,
- ▶ gietstaal en gietijzer,
- ▶ nikkellegeringen,
- ▶ koper of
- ▶ hardmetaal,

zijn met behulp van hoogtemperatuursolderen goed uitvoerbaar. Met verschil in uitzetting dient bij de constructie rekening te worden gehouden, speciaal bij het verbinden van hardmetaal (zie hoofdstuk 20). De keuze van het soldeerproces en van het soldeermateriaal wordt nu bepaald door de materiaalcombinatie.

14.3 Eigenschappen

Indien een product uit staal wordt vervaardigd, zijn de mechanische sterkte en lekdichtheid de belangrijkste kwaliteitseisen. De mechanische sterkte van een soldeerverbinding wordt door de volgende factoren bepaald:

- ▶ type soldeermateriaal;
- ▶ spleetbreedte;
- ▶ materiaalcombinatie;
- ▶ uitgevoerde warmtebehandeling;
- ▶ constructie van het product.

In tabel 14.1 zijn enige waarden vermeld van stomp gesoldeerde proefstaven (diameter trekstaven $\varnothing$ 14 mm).

14.4 Voorbehandelingen

Voor goede resultaten is het noodzakelijk, dat de te solderen oppervlakken vrij zijn van oxides en organische stoffen. Dit betekent in vele gevallen dat de werkstukken mechanisch moeten worden bewerkt. Ontvetten van de producten is vrijwel altijd noodzakelijk, zeker voor het solderen in vacuüm.

De vereiste ruwheid van de te solderen vlakken wordt gewoonlijk bereikt door verspanende bewerkingen als schaven, frezen, draaien of slijpen ($R_a = 1 - 6 \mu\text{m}$).

Al te gladde oppervlakken zijn even ongewenst als te ruwe oppervlakken. Genitreerde lagen dienen te worden afgeslepen, daar het soldeer slecht bevochtigt op deze oppervlakken. Met koper als soldeermateriaal worden de beste resultaten verkregen met spleten van 0 - 0,05 mm. Het voordeel van "nul-spleten" is, dat met klempassingen kan worden gewerkt, waardoor constructies zelffixerend zijn.

Voor de koperlegeringen als soldeermateriaal liggen de soldeerspleten tussen circa 0,05 - 0,12 mm.

De spleetbreedte heeft invloed op de capillaire werking tijdens het solderen, alsmede op de mechanische eigenschappen van de gesoldeerde verbindingen.

14.5 Soldeermethoden

De meest voorkomende atmosferen waarin koolstofstaal wordt gesoldeerd zijn:

- ▶ droge waterstof met een dauwpunt van -40°C ;
- ▶ vacuüm;
- ▶ menggas van stikstof en waterstof met een dauwpunt van -40°C ;
- ▶ exogas met een dauwpunt van $+10^\circ\text{C} / -10^\circ\text{C}$.

Zie ook tabel 14.2.

tabel 14.1 Mechanische eigenschappen van stompgesoldeerde koolstofstaalverbindingen

basismateriaal	soldeersoort volgens EN-ISO 3677 ¹⁾	treksterkte en rekgrens gesoldeerde koolstofstaalverbindingen spleetbreedte $\leq 0,05$ mm; trekstaven $\varnothing$ 14 mm			
		R_m [MPa] 20 °C	$R_{0,2}$ [MPa] 20 °C	R_m [MPa] 300 °C	$R_{0,2}$ [MPa] 300 °C
C60	BCu 1083	590	NB	470	150
C45	BCu94Sn 910-1040	680	390	NB	NB
C45	BCu98Ni 1083-1100	620	390	NB	NB
Fe510	BCu 1083	550	380	NB	NB
Fe360	BCu 1083	380	NB	NB	NB

NB = niet bekend
 1) ISO-aanduiding wordt verklaard in hoofdstuk 10 (nomenclatuur)

tabel 14.2 Enige soldeermaterialen voor toe te passen materiaalcombinaties en bijbehorende ovenatmosfeer

soldeersoort volgens EN-ISO 3677 ¹⁾	chemische samenstelling in gewichts-%					soldeertem- peratuur [°C]	toepassingen materiaalcombinatie	oven- atmosfeer ²⁾
	Ag	Cu	Sn	Ni	diversen			
BCu 1083	–	100	–	–		1120	staal, Ni en Ni-legering	ABCD
BCu98Ni 1083-1100	–	98	–	2		1120	hardmetaal	ABC
BCu97Sn 980-1070	–	97	3	–		1090	staal, Ni en Ni-legering	ABCD
BCu94Sn 910-1040	–	94	6	–		1060	staal, Ni en Ni-legering	ABCD
BCu90Sn 955-1000	–	90	10	–		1040	staal, Ni en Ni-legering	ABCD
BCu80Sn 800-890	–	80	20	–		970	Cu en Cu-legering	ABCD
BCu98Ag 1050-1080	2	98	–	–		1100	staal	ABCD
BCu70Ag 780-950	30	70	–	–		980	staal	ABCD
BCu86MnNi 970-990	–	86	–	2	12Mn	1080	hardmetaal	AC
BCu86MnNiAg 970-990	2	86	–	2	10Mn	1000	hardmetaal	AC
BCu87MnCo 980-1030	–	87	–	–	10Mn 3Co	1020	staal, hardmetaal	AC

1) ISO-aanduiding wordt verklaard in hoofdstuk 10 (nomenclatuur)

2) A = droge waterstof (dauwpunt –40 °C)

B = vacuüm

C = menggas stikstof-waterstof (dauwpunt –40 °C)

D = exogas (dauwpunt +10 °C / –10 °C)

Het solderen kan worden uitgevoerd:

- ▶ continu in transportbandovens met menggas;
- ▶ per charge in retortovens onder beschermgas;
- ▶ per charge in vacuümovens;
- ▶ stuksgewijs in hoogfrequent inductieve soldeerinstallaties onder vacuüm of beschermgas.

Het solderen in vacuüm wordt vaak onder deeldruk uitgevoerd (N₂, argon). Het solderen in een exogas, meestal verkregen uit aardgas of propaan, is verreweg het goedkoopst. Kleinere massafabricagedelen uit C-staal of laaggelegeerd staal met maximaal 1,5% Cr kunnen op economische wijze met kopersoldeer in een transportbandoven worden gesoldeerd. De onderdelen moeten zelffixerend zijn gemonteerd of met behulp van punt- of hechtglas worden gefixeerd.

In een menggasatmosfeer van stikstof en waterstof met een dauwpunt van –40 °C kunnen hoger gelegeerde staalsoorten worden gesoldeerd. Met een toenemend waterstofgehalte neemt de reducerende werking van het gas toe, echter ook de kostprijs. Ovens met menggas of droge waterstof zijn veelal transportbandovens. Ook in retortovens wordt onder menggas gesoldeerd.

Transportbandovens zijn vooral geschikt voor de productie van massafabricagedelen of serieproductie van lichtere delen. Vacuümovens zijn wat betreft de te solderen materialen universeel, doch worden meer ingezet voor het solderen van zwaardere machinedelen.

Bij de keuze van het soldeermateriaal dienen elementen met een hoge dampspanning te worden vermeden, zeker als in vacuüm wordt gesoldeerd. De staalsoorten worden afhankelijk van de samenstelling gesoldeerd bij een vacuümdruk van 20 tot 10^{–2} mbar en temperaturen tussen 1020 en 1130 °C.

Grotere werkstukken uit dunwandig materiaal (rijwielframes) worden met succes inductief gesoldeerd onder een beschermende gasatmosfeer (stikstof-waterstofmengsel).

14.6 Soldeermaterialen

Als soldeermaterialen voor het solderen van koolstofstaal zijn veelal soldeersoorten op koperbasis geschikt; echter koperzinksoldeer is ongeschikt voor toepassing bij het

vacuümsolderen. Koperbasis-soldeersoorten hebben vele goede eigenschappen, zoals:

- ▶ goed bewerkbaar;
- ▶ goedkoop, en verkrijgbaar in vele vormen;
- ▶ goede mechanische eigenschappen;
- ▶ bevochtigen goed op staal;
- ▶ goede geleiding voor elektrische stroom en warmte;
- ▶ geschikt voor toepassing bij lagere temperaturen.

Massafabricagedelen worden vaak gesoldeerd met soldeer-pasta of voorgevormd soldeermateriaal. De soldeer-pasta's zijn vervaardigd uit metaalpoeder en organische binders. Nikkelbasis-soldeersoorten worden gebruikt voor speciale toepassingen, bijvoorbeeld voor de materiaalcombinatie met roestvast staal of koper. Ook palladiumhoudende zilverkoper-soldeersoorten worden veel toegepast; soms ook goudnikkelsoldeer (echter duur).

Zie tabel 14.2 voor een overzicht van de meest gangbare koperbasis-soldeersoorten.

14.7 Controle en nabehandelingen

De meeste producten worden uitsluitend visueel gecontroleerd, al dan niet steekproefsgewijs. Bovendien bestaat bij massafabricagedelen de mogelijkheid van een destructieve test. Niet-destructieve methoden zoals röntgenen, ultrasoon en scheuronderzoek met "penetrant"vloeistoffen zijn voor soldeerverbindingen zeer bruikbaar.

Het is raadzaam in het ontwerp stadium rekening te houden met de controle van de soldeernaad.

Hoogtemperatuuresoldeerde producten behoeven in het algemeen geen nabewerking. Galvanische nabehandelingen als vernikkelen, cadmeren en dergelijke kunnen direct worden uitgevoerd. Hoogtemperatuuresoldeerde verbindingen hebben een hoge temperatuur ondergaan, waardoor de hardheid terugloopt en de producten achteraf moeten worden gehard.

Luchthardende staalsoorten worden tijdens het soldeerproces direct gehard, zodat na het solderen uitsluitend nog ontlaten dient te worden.

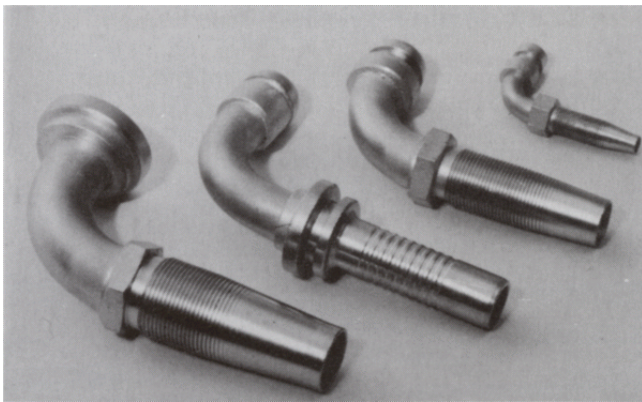
Producten die na het soldeerproces moeten worden gecarboneerd en gehard, dienen te worden ontkoperd in een zogenaamd stripbad. Het nitreren van met koper gesol-

deerde producten is niet mogelijk, daar de ammoniak-atmosfeer het koper aantast.

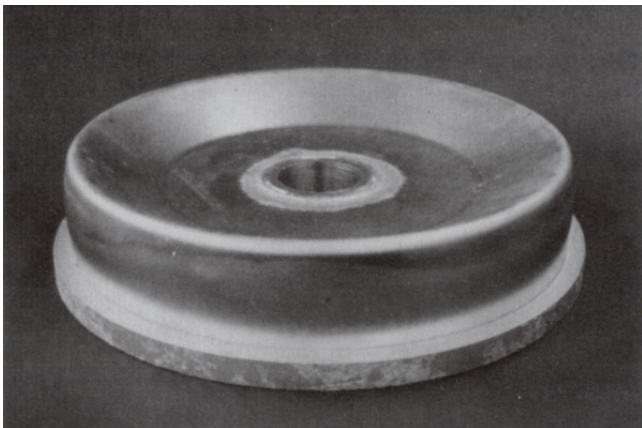
14.8 Toepassingen

Het hoogtemperatuursolderen van ongelegeerd en laaggelegeerd koolstofstaal wordt op grote schaal toegepast zoals voor:

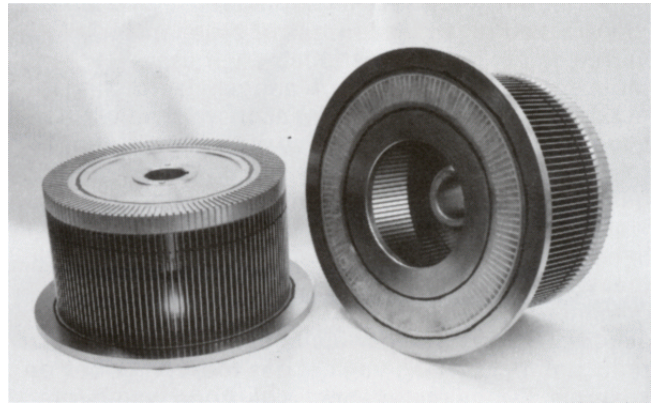
- hoge druk slangkoppelingen (figuur 14.1);
- kettingwielen;
- hefboomen en dergelijke voor de automobiellindustrie;
- matrijzen voor de kunststofindustrie;
- oliekoelers en andere warmtewisselaars;
- verspaningsgereedschap en messen;
- aandrijfwielen (figuur 14.2);
- rotoren (figuur 14.3).



figuur 14.1 Vacuüm gesoldeerde hogedruk slangkoppelingen (foto Bodycote-Diemen)



figuur 14.2 Gesoldeerd stalen aandrijf wiel, afmetingen $\varnothing 250 \times 50$ mm (foto Bodycote-Diemen)



figuur 14.3 Gesoldeerde vloeistalen rotor ($\varnothing 350$ mm) opgebouwd uit 123 onderdelen (foto Philips)

Hoofdstuk 15

Gietijzer

15.1 Inleiding

De algemene benaming gietijzer omvat een groep legeringen die in hoofdzaak bestaat uit ijzer en koolstof met daarnaast toevoegingen als silicium, mangaan, koper, nikkel, chroom en molybdeen. Het koolstofgehalte van deze materialen is groter dan 1,7% en onder andere hierdoor wordt de smelttemperatuur verlaagd tot ongeveer 1150 °C. Gietijzer kan worden ingedeeld naar de vorm van het vrije grafiet en de microstructuur van de grondmassa. Figuur 15.1 geeft schematisch een indeling van gietijzer weer.

Er zijn diverse redenen om onderdelen van gietijzer door middel van solderen te verbinden. Ingewikkelde gietconstructies kan men delen en daardoor beter gieten. De kwaliteitsbeheersing bij het gieten is dan groter, de onderdelen kunnen beter worden gereinigd en geïnspecteerd. Constructies zijn mogelijk met combinaties tussen gietijzeren staalsoorten; men kan een functionele materiaalkeuze maken. Het hardsolderen van gietijzer heeft echter in het verleden altijd problemen gegeven. De aanwezigheid van vrij grafiet en silicium in de structuur en aan het oppervlak beïnvloedt de bevochtiging van het vloeibare soldeer nadelig.

Om zilverhardsolderen in het temperatuurgebied tussen 650 en 900 °C mogelijk te maken, moet het grafiet uit het soldeervlak worden verwijderd. Dit is mogelijk met behulp van het "Kolene-E-Verfahren" (anodisch etsen in een H₂SO₄-oplossing).

Daarentegen is het hoogtemperatuursolderen van gietijzerproducten, aan zowel staal of andere gietijzerdelen, mogelijk zonder dat de soldeervlakken een speciale behandeling anders dan stralen en ontvetten moeten ondergaan.

15.2 Materiaalcombinaties

Hoogtemperatuursolderen biedt de mogelijkheid hoogwaardige verbindingen te realiseren met alle gietijzersoorten en onderlinge combinaties.

Zonder speciale maatregelen kan gietijzer of gietstaal worden gesoldeerd aan ongelegeerde en laaggelegeerde staalsoorten.

In combinatie met hooggelegeerde materialen bestaat het gevaar dat koolstof uit het gietijzer carbiden vormt met elementen als Cr, W, Mo en Ti, die een harde en zeer brose laag vormen op het grensvlak soldeer-basismateriaal. Gietijzer kan verder worden gesoldeerd aan koper en zelfs aan technische keramiek (ZrO₂), echter als gevolg van uitzettingsverschillen zijn de afmetingen van het te verbinden oppervlak begrensd.

15.3 Eigenschappen

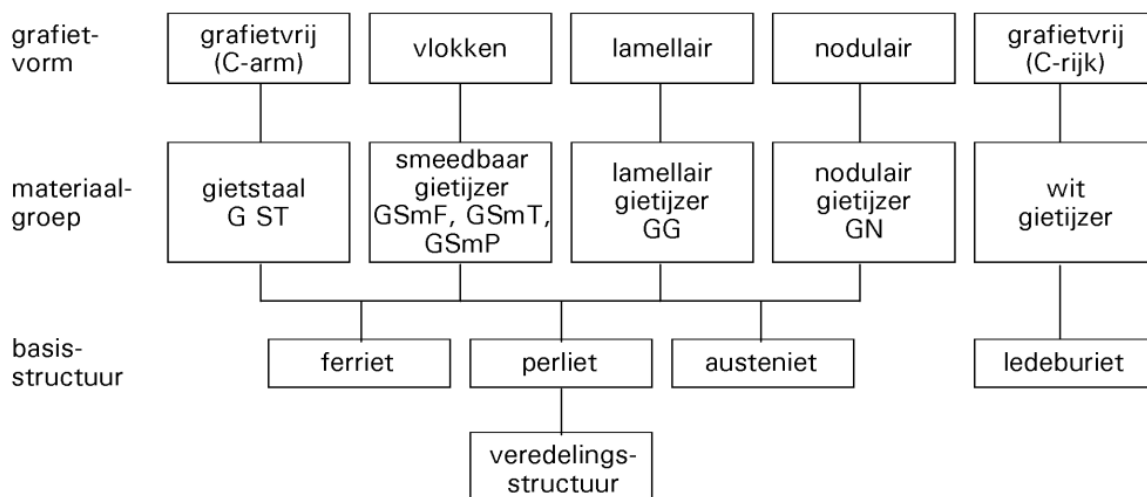
Gietijzer is lange tijd aangezien als materiaal van mindere kwaliteit. De ontwikkelingen van de laatste decennia hebben daarin echter verandering gebracht. In vele gevallen is het gebruik van gietijzer economisch voordeliger dan de toepassing van gesmede of gelaste constructies. Aan de chemische samenstelling van gietijzer worden geen aanvullende eisen gesteld; met uitzondering van het fosforgehalte. Dit dient ≤ 0,06% te zijn.

Bij verhitten van gietijzer boven 400 °C treedt ca. 0,5% groei op. Dit is een blijvende volumevergroting door het uiteenvallen van cementiet in ferriet en grafiet. Deze groei is afhankelijk van de chemische samenstelling. De elementen Cr en Mn stabiliseren de cementiet en gaan daardoor groei tegen. Door deze ongecontroleerde maatverandering hebben stompe soldeerverbindingen de voorkeur boven pen-gatverbindingen.

Lamellair gietijzer heeft door de aanwezigheid van grafietlamellen goede loopeigenschappen. De sterkte en rek van lamellair gietijzer zijn gering. De grafietlamellen doen niet mee aan de plastische vervorming en werken als inwendige kerven in de metallische grondmassa.

Nodulair gietijzer heeft mechanische eigenschappen die het op staal doen gelijken. Tabel 15.1 toont de mechanische eigenschappen van nodulair gietijzer. Zelfs stompe soldeerverbindingen in gietijzerconstructies betekenen geen verzwakking hiervan, mits van goede kwaliteit.

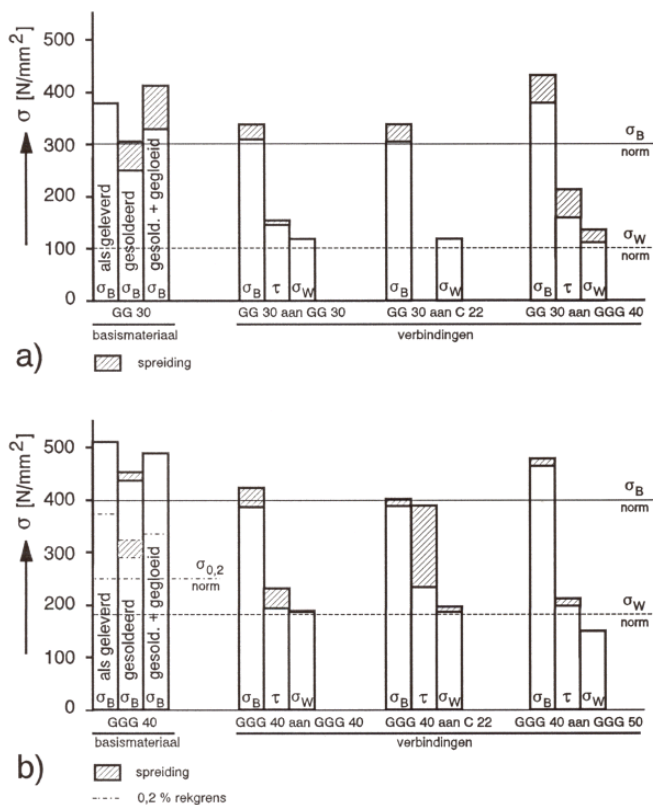
Figuur 15.2 geeft de mechanische eigenschappen van gesoldeerde verbindingen van GG 30 (a) respectievelijk GGG 40 (b).



figuur 15.1 Schematische indeling van gietijzer

tabel 15.1 Soorten nodulair gietijzer volgens EN 12797. De minimale mechanische eigenschappen zijn gegarandeerd voor los gegoten proefstukken

soort	structuur	minimale mechanische eigenschappen		
		R_m [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	A_5 [%]
GGG-35.3	ferriet	350	220	22
GGG-40.3		400	250	18
GGG-40		400	250	15
GGG-50	ferriet + perliet	500	320	7
GGG-60		600	380	3
GGG-70	perliet	700	440	2
GGG-80		800	500	2



figuur 15.2 Mechanische eigenschappen van gesoldeerde gietijzerverbindingen (a: GG 30; b: GGG 40)

15.4 Voorbehandelingen

De eerste bewerkingen aan gietstukken vinden plaats in de gieterij. De producten worden geslepen en gestraald, zodat de giethuid en de resten van vormzand worden verwijderd. Ook kunnen de onderdelen spanningsarm worden gegloeid. Ten behoeve van hoogtemperatuursolderen moet nog extra worden gestraald met een scherp straalmiddel uit staal, zodat het gehele oppervlak metallisch blank wordt. Ook inwendige ruimtes dienen grondig te worden gestraald. Nu kunnen de onderdelen worden bewerkt ten behoeve van het soldeerproces.

De vereiste voorbewerking van de soldeervlakken is gelijk aan die van staal ($R_a = 1 - 6 \mu\text{m}$). Gegoten metalen hebben over het algemeen microporiën. In deze poriën kunnen verontreinigingen zoals bewerkingsvloeistoffen achter blijven. Langdurig ontvetten in een dampontvettingsinstallatie is daarom noodzakelijk.

15.5 Soldeermethoden

Het hoogtemperatuursolderen van ongelegeerd gietijzer wordt vrijwel uitsluitend uitgevoerd in laagvacuümovens bij een vacuümdruk tussen 10^{-1} en 1 mbar. Voor hooggelegeerde gietijzersoorten is een vacuümdruk van ca. 10^{-3} mbar vereist. De soldeertemperatuur ligt voor koperbasis-soldeersoorten in het algemeen tussen de 1020 en 1110 °C. Om er voor te zorgen dat ook bij de soldeertemperatuur een spleetbreedte van 0 - 0,1 mm aanwezig is, mag het werkstuk tijdens het opwarmen niet vervormen. De opwarmingsnelheid is bij gietijzeren producten sterk afhankelijk van de grootte van de onderdelen. Tijdens het opwarmen kunnen grote temperatuurverschillen leiden tot spanningen boven de rekgrens van het basismateriaal, hetgeen blijvende vervorming tot gevolg heeft. Beneden de 600 °C is het gietijzer nog redelijk sterk, doch in een vacuümvoven heeft men dan te maken met een slechte temperatuurgelijkmatigheid. Boven 900 °C worden temperatuurverschillen snel kleiner, daar de warmte-overdracht door straling effectiever wordt.

De structuuromzetting bij 723 °C dient over het gehele gietstuk zo gelijkmatig mogelijk te geschieden, om de invloed van spanningen die tot blijvende vervormingen leiden zoveel mogelijk te beperken.

De soldeertijd is afhankelijk van de grootte van het werkstuk en varieert van 10 minuten voor kleine delen tot ca. 1 uur voor een gietstuk van 120 kg.

Bij het afkoelen spelen verschillende factoren een rol. Allereerst dient langzaam te worden afgekoeld tot ca. 900 °C om warscheuren te voorkomen. Vanaf 900 °C kan sneller worden afgekoeld, indien men bijvoorbeeld een perlitische structuur wenst. Bij een volledig langzame koeling ontstaat een ferritische structuur. In gietstukken met verschillende wanddikten kunnen diverse structuren ontstaan met onderling afwijkende hardheden.

15.6 Soldeermaterialen

Soldeersoorten met een soldeertemperatuur lager dan 1100 °C die voor staal geschikt zijn, kunnen over het algemeen ook voor gietijzer worden gebruikt. Soldeersoorten welke zijn gelegeerd met carbidevormende elementen zijn door de aanwezigheid van vrij grafiet in gietijzer ongeschikt. Op grond hiervan zijn de chroomhoudende nikkelbasis-soldeersoorten niet bruikbaar. Bovendien bevordert nikkel de grafietvorming aan het gietijzeroppervlak.

15.7 Controle en nabehandelingen

Een visuele controle van de gesoldeerde producten geeft veel informatie over de kwaliteit van de soldeerverbinding. Men let hier op het doorvloeien van het soldeer, het vormen van een gladde soldeermenisclus en de aanwezigheid van defecten aan het oppervlak.

Controles met "penetrant"vloeistoffen zijn minder geschikt wegens het poreuze karakter van het gietijzer (moeilijk te interpreteren).

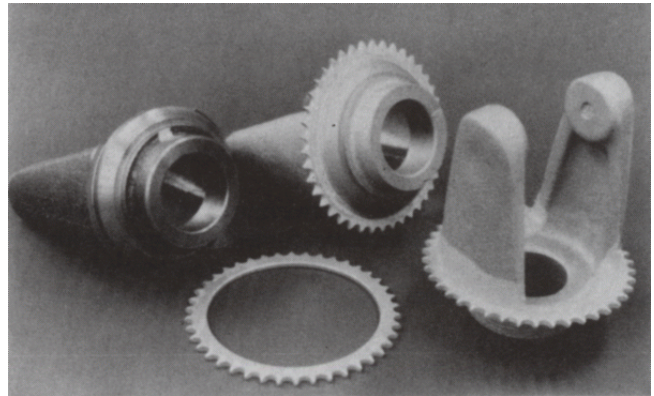
Een ruwe soldeermenisclus tekent met "penetrant"vloeistoffen dikwijls aan, als gevolg van de ontstane structuren van het soldeer.

Producten die zijn nabewerkt, zijn daarentegen wel te testen met "penetrant"vloeistoffen. Het afpersen van producten is een veelvuldig toegepaste controle methode, doch deze controle geeft geen informatie over het hechtingspercentage (vulgraad van de naad).

Het röntgenen van gegoten werkstukken wordt veelal beperkt door de wanddikte van de gegoten producten. Het ultrasoon onderzoeken van lamellair gietijzer wordt bemoeilijkt door de grafietlamellen, want deze gedragen zich akoestisch als fouten. Nodulair gietijzer is beter te onderzoeken met deze methode.

15.8 Toepassingen

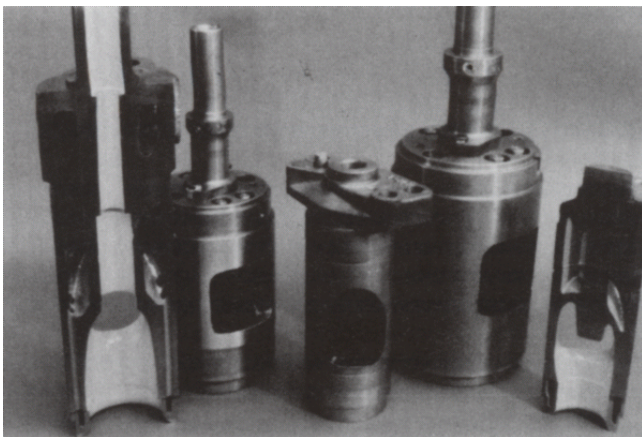
De belangrijkste toepassingen van het hoogtemperatuursolderen van gegoten producten zijn uitlaatklephuizen van dieselmotoren (zie figuren 15.3 en 15.4). In het algemeen kan worden gesteld dat het vacuümsolderen zich beperkt tot hoogwaardige gietproducten. Per product kunnen specifieke problemen ontstaan, die vooraf niet zijn te voorzien. Met prototypen dient men vooraf te onderzoeken of vacuümsolderen mogelijk is. Mede daardoor worden voornamelijk serieproducten gesoldeerd (figuur 15.5).



figuur 15.5 Gesoldeerde gietijzer-staalverbindingen zoals toegepast in serieproducten (foto Bodycote-Diemen)



figuur 15.3 In laagvacuüm met koper gesoldeerd uitlaatklephuis (rechts) en de onderdelen waaruit het uitlaatklephuis is opgebouwd (links (foto Bodycote-Diemen))



figuur 15.4 Serie gesoldeerde gietijzeren uitlaatklephuizen zoals deze worden toegepast in industriële dieselmotoren (foto Bodycote-Diemen)

Hoofdstuk 16

Roestvast staal

16.1 Inleiding

De staalsoorten, die tot de roestvaste worden gerekend, hebben alle gemeen, dat zij hun weerstand tegen aantasting, in het bijzonder ten opzichte van oxiderende milieus, ontleen aan het gelegeerd zijn met een hoog percentage chroom. De hoeveelheid chroom, die veelal gecombineerd met andere legeringselementen als nikkel, molybdeen, titaan aan zo'n staalsoort is toegevoegd, is zodanig, dat op het materiaal onder inwerking van zuurstof een gesloten oxidehuid wordt gevormd. Deze laag beschermt het onderliggende materiaal tegen verdere aantasting. De vorming hiervan vindt al plaats in normale atmosferische omstandigheden. Door zo'n oxidehuid, waarin ook de oxiden van andere sterk oxiderende legeringsbestanddelen als aluminium, titaan en silicium aanwezig kunnen zijn, wordt het hoogtemperatuursolderen sterk bemoeilijkt. Voor het goede verloop van een soldeerproces is het noodzakelijk dat de vorming van een oxidehuid wordt verhinderd of dat een gevormde laag wordt doorbroken. Dit laatste vereist dat in vacuüm of in een reducerende atmosfeer wordt gesoldeerd. Door middel van vernikkelen of verkoperen is het mogelijk het materiaal van een beter te bevochtigen laag te voorzien.

De keuze van het soldeer en de soldeermethode wordt in geval van toepassing bij roestvaste staalsoorten niet alleen bepaald door de gewenste sterkte of uit prijsoverwegingen, doch ook door de milieu-omstandigheden waaraan de constructie bij gebruik wordt blootgesteld. Hardsolderen en vooral hoogtemperatuursolderen zijn in veel gevallen naast lassen mogelijk, ook voor gebruik op hogere temperaturen.

De roestvaste staalsoorten zijn onder te verdelen in vijf groepen met ieder zeer specifieke eigenschappen. Deze groepen zijn:

- ▶ de ferritische chroomstaalsoorten (niet hardbaar);
- ▶ de martensitische en ferritisch-martensitische chroomstaalsoorten (hardbaar);
- ▶ de austenitische chroom-nikkelstaalsoorten (niet hardbaar);
- ▶ de precipitatiehardende (PH) roestvaste staalsoorten (hardbaar);
- ▶ de duplex staalsoorten.

16.2 Materiaalcombinaties

Binnen de eigen groep kunnen roestvaste staalsoorten, afgezien van een eventuele voorbehandeling, in de meeste gevallen zonder meer via solderen worden verbonden. In alle andere gevallen moet rekening worden gehouden met verschil in uitzettingscoëfficiënt.

Afgezien van het corrosiegedrag van de verbinding zijn roestvaste staalsoorten door middel van hoogtemperatuursolderen te verbinden met:

- ▶ roestvaste staalsoorten uit andere groepen;
- ▶ constructie- en gereedschapsstaalsoorten;
- ▶ nikkel en nikkellegeringen;
- ▶ koper en koperlegeringen;
- ▶ titaan en titaanlegeringen;
- ▶ wolfram en molybdeen;
- ▶ keramiek typen.

Moeilijk of niet te verbinden materialen zijn aluminium, magnesium en legeringen hiervan (zie tevens tabel 16.1: basismateriaal-soldeermateriaalcombinaties).

16.3 Eigenschappen

Fysische en mechanische eigenschappen

Hoogtemperatuursolderen geeft de mogelijkheid bij roestvast staal al of niet met andere materialen verbindingen te vervaardigen met goede elektrische en thermische geleiding, lage dampspanningen (voor vacuümdoeleinden), met hoge mechanische sterkte en taaiheid en zelfs met bestandheid tegen hoge temperaturen. De mechanische sterkte van een soldeernaad wordt behalve door het type soldeer, ook door de materiaalcombinatie in samenhang met de soldeertemperatuur en -tijd, de spleetbreedte en de naadvorm bepaald. Richtwaarden voor de sterkte bij statische belasting zijn weergegeven in tabel 16.2 voor austenitisch roestvast staal typen AISI 304/316.

Chemische eigenschappen

De corrosieweerstand van een soldeerverbinding wordt afhankelijk van het gebruiksmilieu zowel bepaald door de te verbinden materialen als door het te gebruiken soldeer en dient per geval te worden bekeken. Tengevolge van afdamping tijdens het solderen kan lokaal ontchorming van het roestvast staal optreden, wat nadelig is voor de corrosiebestandheid.

Metallurgische eigenschappen

Van de hoogtemperatuursoldeersoorten zijn vooral de

tabel 16.1 Basismateriaal-soldeermateriaal combinaties

RVS type	BAG-soldeer	BAU-soldeer	BNi-soldeer	BCu-soldeer
ferritisch	BAG-21 (AISI 430)	BAU-4 (AISI 446)		
martensitisch	BAG-21 (AISI 403, 410, 440A)			
austenitisch	BAG-8a BAG-19 BAG-21 (AISI 302, 303, 304, 316)	BAU-4 (AISI 302, 303, 304, 316, 321, 347)	BNi-1 t/m BNi-8 (AISI 304, 316, 321, 347)	BCu-1 ¹⁾ BCu-2 (AISI 304, 316, 321, 347)
precipitatiehardend	BAG-8a (17-4PH) BAG-19 (17-4PH, PH15-7Mo, AM350) BAG-18 (17-4PH)	BAU-4 (17-4PH)		

1) Boven 1000 °C van hoogvacuüm op deeldruk ("back filling") met argon overgaan om overmatig verdampen van BCu-soldeer te voorkomen (vrij naar M.M. Schwartz, Brazing)

tabel 16.2 Mechanische eigenschappen van gesoldeerde RVS verbindingen

RVS type AISI	soldeertype volgens		R _m [MPa]	R _{0,2} [MPa]	A ₅ [%]	proefstaafdiameter [mm]
	EN-ISO 3677 ¹⁾	AWS A5.8/A5.8M:2004				
304	BCu 1083	BCu-1	588	245	70	10
304	BAu82Ni 950	BAu-4	607	NB	NB	10
304	BAu82Ni 950	BAu-4	605	NB	NB	5
304	BAu82Ni 950	BAu-4	598	NB	NB	10 × 2
316	BAu82Ni 950	BAu-4	583	219	66	4
316	BNi83CrSiFeB 970-1000	BNi-2	550	226	44	4
316	BNi71CrSi 1080-1135	BNi-5	578	313	66	4

Spleetbreedte: 0,025 mm
NB = niet bekend
1) ISO-aanduiding wordt verklaard in hoofdstuk 10 (nomenclatuur)

nikkelhoudende het best bruikbaar. Chroomstaalsoorten zijn gevoelig voor aantasting in vochtige omstandigheden bij gebruik van nikkelvrije zilverbasis-soldeersoorten. Bij hoogtemperatuursolderen moet afhankelijk van de gebruikte staalsoort met een aantal nadelige verschijnselen rekening worden gehouden.

Ferritisch chroomstaal neigt tot korrelgroei bij hoge temperaturen, zodat hiervoor bij voorkeur geen hoogsmeeltende soldeermaterialen moeten worden gebruikt. Bij verhitting op hoge temperaturen dient de tijd zo kort mogelijk te worden gehouden.

Bij **martensitisch chroomstaal** kan men het harden combineren met het solderen, indien het soldeerproces hierop wordt afgestemd. Bij solderen beneden de omzettingstemperatuur gaat bij geharde delen de hardheid tezamen met de corrosievastheid achteruit.

De **precipitatiehardende staalsoorten** bieden de mogelijkheid om het solderen te combineren met het oplosgloeien, waarna achteraf de precipitatiebehandeling kan plaatsvinden.

Deze legeringen zijn evenals de austenitische gevoelig voor spanningscorrosie en zwavelbroosheid.

De **duplex staalsoorten** zijn soldeerbaar; echter, er moet worden geaccepteerd dat de structuur van het materiaal en daarmee de eigenschappen zich kunnen wijzigen. Sommige soorten bevatten stikstof, waardoor de bevochtiging nadelig kan worden beïnvloed.

Bij **austenitisch chroom-nikkelstaal** kunnen tengevolge van het soldeerproces verschillende corrosieverschijnselen optreden, namelijk:

- spanningscorrosie (interkristallijne penetratie);*
- carbide-precipitatie;*
- zwavelbroosheid.*

a. Spanningscorrosie

- Aanwezigheid van inwendige spanningen kan interkristallijne penetratie van gesmolten soldeermateriaal tot gevolg hebben, waardoor het basismateriaal bros wordt. Men kan dit vermijden door:
- ▶ de werkstukken van tevoren spanningsarm te gloeien;
 - ▶ een palladiumhoudend zilverbasissoldeer te gebruiken en de verhitting zo laag en zo kort mogelijk te houden om de penetratie te beperken;
 - ▶ gelijkmatig te verwarmen, waardoor tijdens het soldeerproces geen spanningen worden geïntroduceerd én rekening te houden met de invloed van soldeermallen.

Boven ongeveer 875 °C kunnen spanningen zover afnemen, dat bij hoger smeltende soldeersoorten dit ver-

schijnsel niet optreedt, indien niet al te snel wordt opgewarmd. Ook door het opbrengen van een niet-smeltende laag (bijvoorbeeld een nikkel- of koperlaag), indien zilverbasis-soldeersoorten worden toegepast, kan penetratie worden voorkomen. Dit is eveneens het geval bij het toepassen van een nikkelhoudend zilverbasissoldeer.

b. Carbide-precipitatie

Bij verblijf in het temperatuurgebied van 500 tot 900 °C vindt carbide-uitscheiding langs de korrelgrenzen plaats. Het materiaal wordt hierdoor gevoelig voor interkristallijne corrosie. Dit verschijnsel is bij het hoogtemperatuursolderen praktisch niet te onderdrukken.

De gestabiliseerde roestvaste staalsoorten (Ti- of Nb-houdende) vertonen dit verschijnsel niet. Het verdient de voorkeur om bij toepassing onder corrosieve omstandigheden deze kwaliteiten voor soldeerconstructies te gebruiken, indien niet snel kan worden afgekoeld.

(N.B. *Laag koolstofhoudende roestvaste staalsoorten (L-kwaliteit) kunnen soms toch aanleiding geven tot zeer fijne carbide-uitscheidingen op de korrelgrenzen.*)

c. Zwavelbroosheid

De aanwezigheid van nikkel in het staal maakt het gevoelig voor aantasting in zwavelhoudende milieus op hoge temperatuur. Verhitting in zwavelhoudende gasen moet worden vermeden, wegens de kans op NiS-vorming. NiS kan warmescheur gevoeligheid veroorzaken.

16.4 Voorbehandelingen

Uit het oogpunt van corrosie is het ongewenst naadvormen te kiezen waarbij spleten ontstaan, die niet of slechts gedeeltelijk door soldeer worden gevuld. Ook bij vacuümtoepassingen dient men aan de naadvorm grote aandacht te schenken.

Men moet ervoor zorgen dat de in de spleet aanwezige lucht niet door het soldeer in de naad wordt opgesloten. Dit kan tengevolge van drukverschillen en oxidatie het vloeien tegengaan, waardoor lekken in de gevormde verbinding kunnen ontstaan.

De spleetbreedte die moet worden aangehouden, wordt bepaald door het te gebruiken soldeer. Daar de spleetbreedte van invloed is op de sterkte van de verbinding, is het bij hoogtemperatuur-soldeerverbindingen van belang dat op de soldeertemperatuur de juiste spleetbreedten worden verkregen. Hierbij dient rekening te worden gehouden met bijvoorbeeld het grote verschil in uitzettingscoëfficiënt tussen de austenitische soorten ($\alpha = 19 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) en de ferritische en martensitische soorten ($\alpha = 12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

Voorbehandeling van de oppervlakken

- ▶ De te solderen oppervlakken dienen geheel vrij te zijn van olie, vet of vuil. Ze dienen van tevoren grondig te worden ontvet. De oxidehuid moet door middel van beitsen of mechanische voorbewerking (bijvoorbeeld borstelen) worden verwijderd. Ook kan reducerend gloeien in hoogvacuüm bij hoge temperatuur (1050 °C) worden toegepast.
- ▶ Oppervlakken met bewerkingsgroeven laten zich beter bevochtigen dan gladgepolijste oppervlakken; ook beitsen in een oplossing van HCl en HNO₃ (1:1) is bevorderlijk.
De ruwheid van de oppervlakken in de soldeerspleet dient bij voorkeur 1 - 6 µm te zijn.
- ▶ Indien wegens maatvoering of spanningscorrosie inwendige spanningen het soldeerproces kunnen beïnvloeden, dient men van tevoren spanningsarm te gloeien, zo nodig gevolgd door verwijdering van een daarbij gevormde oxidehuid.
- ▶ De moeilijke reduceerbaarheid van de oxidehuid bij roestvaste staalsoorten vereist het gebruik van een reducerende atmosfeer of vacuüm. De soldeerbaarheid kan worden vergemakkelijkt door soldeerplaatsen van tevoren te verkoperen of te vernikkelen (laagdikte ongeveer 10 µm).

16.5 Soldeermethoden

Roestvast staal wordt hoogtemperatuurgesoldeerd door middel van ovensolderen in een reducerende atmosfeer of in vacuüm. Daarnaast wordt ook wel inductief (onder beschermgas/vacuüm) gesoldeerd. De keuze van de methode hangt af van de materiaalcombinatie, het soldeer, de bijkomende warmtebehandeling, de seriegrootte, de afmetingen van de werkstukken en de gewenste kwaliteit.

Om oxidatie zoveel mogelijk tegen te gaan, maakt men gebruik van beheerste atmosferen bij het solderen. Bijvoorbeeld het gebruik van zeer droge waterstof (dauwpunt -80 °C of lager) of een vacuüm van $\leq 10^{-3}$ mbar; in alle gevallen indien de soldeertemperatuur boven 900 °C is.

De verwarmingsmethode dient zo te worden gekozen, dat het werkstuk gelijkmatig en daarbij zo snel mogelijk op soldeertemperatuur wordt gebracht. Hierbij dient men rekening te houden met het relatief geringe warmtegeleidingsvermogen van roestvast staal. Bij inductief verhitten moet men tevens bedenken dat de magnetische ferritische en martensitische staalsoorten tot aan ongeveer 800 °C sneller doorwarmen dan de niet-magnetische austenitische kwaliteiten.

16.6 Soldeermaterialen

Voor het hoogtemperatuursolderen zijn alle **zilverbasis-soldeersoorten** bruikbaar die zink- en cadmiumvrij zijn. Voorts worden aluminiumhoudende en koperfosfor-soldeersoorten niet geschikt geacht.

Met de **koperbasis-soldeersoorten** laten zich alle genoemde staalsoorten goed solderen. Door de dunvloeibaarheid van de koperbasis-soldeersoorten is een zeer geringe spleetbreedte noodzakelijk. Ook dient men de hoeveelheid soldeer goed te doseren, daar anders de kans bestaat dat het teveel aan soldeer uitvloeit naar plaatsen waar het niet gewenst is.

De **palladiumhoudende zilverbasis-soldeersoorten** zijn bruikbaar voor soldeerverbindingen tussen roestvaste staal-

soorten onderling of met andere materialen. In neutrale en chloridehoudende milieus hebben deze soldeersoorten goede corrosie-eigenschappen.

Afhankelijk van de soldeercyclus en toepassing (milieu) moet men een keuze maken voor een geschikt type roestvast staal. Mogelijk zijn typen met een laag koolstofgehalte en gestabiliseerde typen.

Bij voorkeur gebruikt men de **nikkelhoudende zilverbasis-soldeersoorten**, wat bij de ferritisch/martensitische chroomstaalsoorten zelfs noodzakelijk is ter voorkoming van grensvlakaantasting in vochtige milieus. Door vooraf te vernikkelen, kan men dit eveneens voorkomen. Een soldeer als BAg-19 kan worden gebruikt voor de precipitatiehardende (PH) staalsoorten, waarbij het oplosgloeien met het solderen kan worden gecombineerd. Ook BAg-8a en BAg-18 soldeer worden voor PH-roestvaste staalsoorten aanbevolen.

De **nikkelbasis-soldeersoorten** geven hittevastere verbindingen. Zij vereisen een hoge soldeertemperatuur, waardoor meestal ovensolderen in een goed vacuüm moet worden toegepast. Toegepast in brede soldeerspleten zijn zij minder taai dan de overige hoogtemperatuursoldeersoorten en kunnen tijdens het solderen hoogsmeltende fasen vormen, die het verder vloeien kunnen blokkeren. Bij lange naden is het daarom beter om brede spleten (0,1 tot 0,2 mm) gebruiken dan smalle (0,01 tot 0,10 mm), echter met het gevaar van het optreden van brosse fasen. De aanbevolen spleetbreedte ligt tussen 0,01 en 0,05 mm; dit impliceert solderen van korte naadlengten. Bijkomende voordelen van het toepassen van nauwe soldeerspleten zijn, naast betere mechanische eigenschappen, ook gunstige corrosie-eigenschappen, vooral in basische en laagchloridehoudende milieus.

De **edelmetaalbasis-soldeersoorten** worden meestal gebruikt voor speciale doeleinden. Ze geven sterke en taaiere verbindingen, die bijvoorbeeld goed bestand zijn tegen zwavelhoudende atmosferen en ze vertonen weinig neiging tot legeren met en penetratie in het moedermateriaal. De kostprijs van deze soldeersoorten is hoog. Dit is eveneens een factor, die naast andere factoren als bedrijfsomstandigheden, soldeermogelijkheden en toe te passen warmtebehandelingen, een rol speelt bij de keuze van een soldeer.

16.7 Controle en nabehandelingen

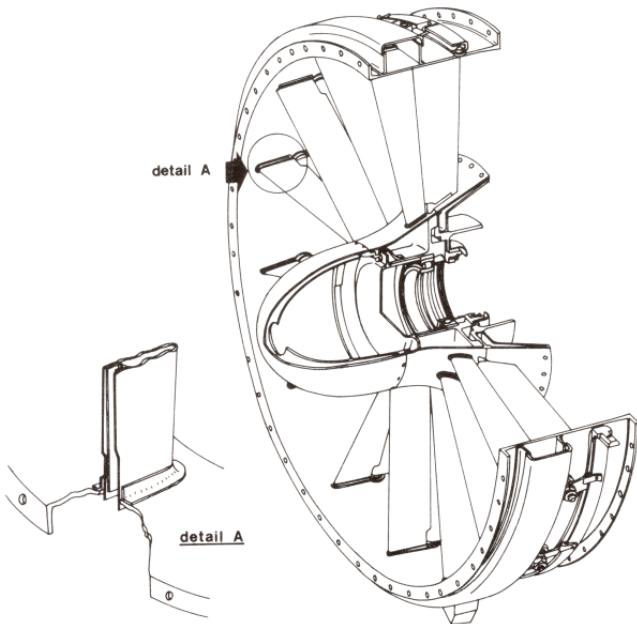
Een bij het solderen (plaatselijk) ontstane oxidelaag is ongunstig voor de corrosieweerstand en dient zo nodig mechanisch of chemisch te worden verwijderd (beitsen/pasiveren). Voor wat betreft de controle en de te volgen soldeerprocedurekwalificatie wordt verwezen naar wat gezegd is onder hoofdstuk 7.

16.8 Toepassingen

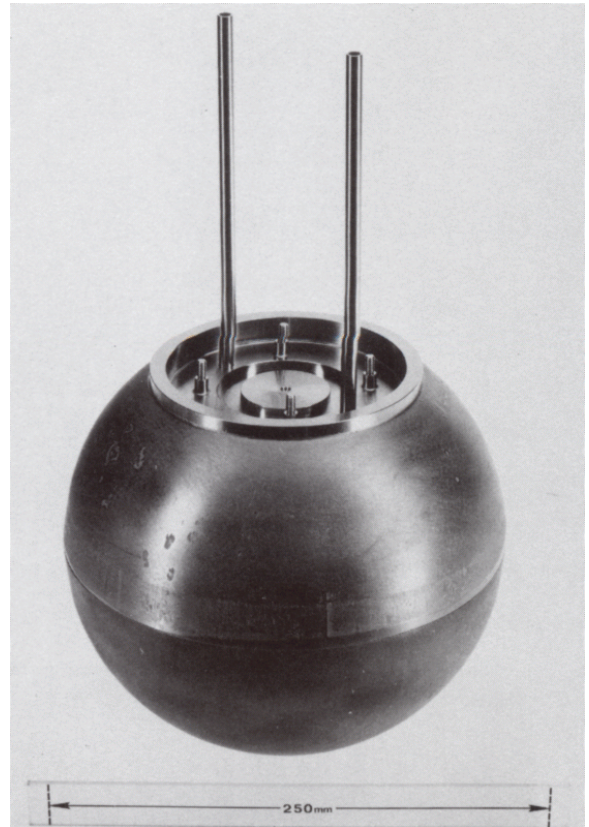
Er is een breed scala aan roestvaststalen producten aan te geven, waarop het hoogtemperatuursolderen wordt toegepast. Hieronder volgt een aantal voorbeelden:

- ▶ inlaatframe voor straalmotoren (figuur 16.1);
- ▶ brandstofverstuiver in de naverbrander van straalmotoren;
- ▶ golfgeleiderconstructies (figuur 16.2);
- ▶ vacuümkamers voor röntgendetectiesystemen (figuur 16.3);
- ▶ gasbranderkoppen;
- ▶ meetelementen ten behoeve van krachtopnemers (figuur 16.4);

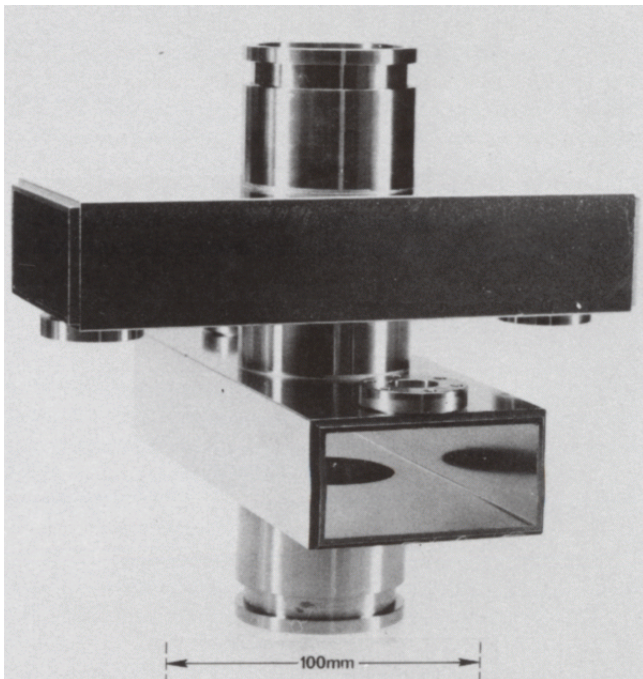
- ▶ warmtewisselaars voor CV-ketels, koudgasmachines en dergelijke;
- ▶ afsluiters;
- ▶ onderdelen voor sensoren, micro-schakelaars;
- ▶ leidwielen voor stoomturbines;
- ▶ turbocompressorwaaiers;
- ▶ pennenmengers;
- ▶ waaiers voor vloeistofpompen;
- ▶ thermokoppels (figuur 16.5).



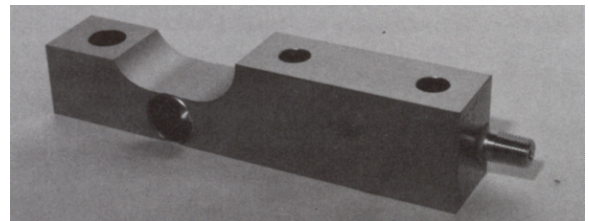
figuur 16.1 Inlaatframe voor straalmotoren, gesoldeerd in een waterstofatmosfeer (figuur DMVS)



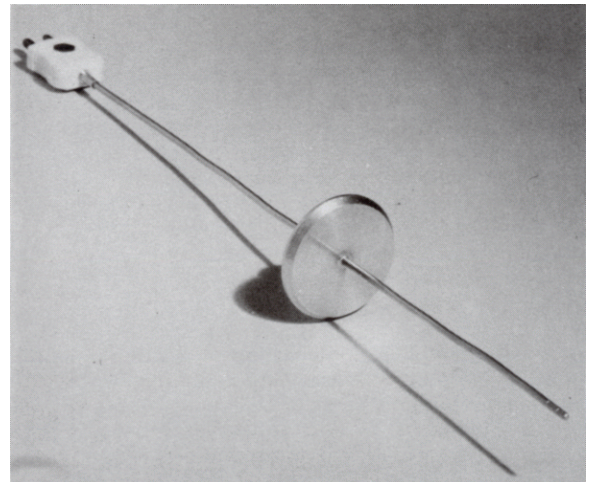
figuur 16.3 Vacuümkamer voor een röntgendetectiesysteem bestaande uit roestvaststalen onderdelen gesoldeerd met goudnikkelsoldeer (foto FOM)



figuur 16.2 In hoogvacuüm gesoldeerde golfgeleiderconstructie opgebouwd uit roestvast staal en koper (foto FOM)



figuur 16.4 Meetelement ten behoeve van krachtopnemers; aan het meetelement (mat. 17-4 PH) wordt een nok (met schroefdraad) gesoldeerd (foto Philips)



figuur 16.5 Thermokoppelmantel gesoldeerd in roestvaststalen houder; deze houder wordt daarna in een constructie gelast (foto TNO)

Hoofdstuk 17

Nikkel- en superlegeringen; ODS-materialen

17.1 Inleiding

De hier behandelde legeringen vinden toepassing in applicaties waar goede corrosie- en oxidatiebestendigheid en/of hoge mechanische eigenschappen gevraagd worden bij hoge temperaturen.

Deze legeringen zijn in te delen in:

- ▶ Oploshardende nikkellegeringen;
- ▶ Precipitatiehardende nikkellegeringen;
- ▶ Dispersiegeharde ijzer- en nikkellegeringen.

In dit hoofdstuk wordt met name ingegaan op de nikkel- en superlegeringen en de oxide-dispersiegeharde (ODS) legeringen.

17.2 Nikkel- en superlegeringen

17.2.1 Inleiding

Verscheidende legeringen uit de eerste groep (bijvoorbeeld Monels) hebben bijzonder goede corrosie-eigenschappen; andere (bijvoorbeeld Hastelloys) worden toegepast vanwege de zeer goede oxidatiebestendigheid bij hoge temperatuur. De precipitatiehardende legeringen hebben in het algemeen naast een hoge corrosie- en oxidatieweerstand ook zeer goede sterkte-eigenschappen bij hoge temperatuur.

In gasturbines duidt men gewoonlijk de legeringen in de "hete sectie" aan met superlegeringen. Onder superlegeringen verstaat men dan niet alleen nikkel-, maar ook kobalt- en ijzer-basislegeringen. Veelal worden de legeringen gebruikt als dunne plaat, teneinde sterke, lichte constructies te verkrijgen en als gietstuk voor loop- en leidschoepen. Tabel 17.1 geeft een overzicht van enkele veel gebruikte legeringen.

tabel 17.1 Nikkel- en superlegeringen

groep	legering	chemische samenstelling in gewichtsprocenten											toepassingen
		Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb/Ta	Al	Ti	Fe	C	andere elementen	
Ni-basis	Monel (plaat)	68								2,0		29,0 Cu/1,0Mn	chemische industrie
	Inconel 600 (plaat)	76,0	15,5							8,0	0,08	0,5 Mn/0,2 Si	chemische industrie
	Inconel 625 (plaat)	61,0	21,5		9,0		3,6	0,2	0,2	2,5	0,05	0,2 Mn/0,2 Si	chemische industrie
	Hastelloy X (plaat)	47,0	22,0	1,5	9,0	0,6				18,5	0,10	0,5 Mn/0,5 Si	constructie-onderdelen, verbrandingskamers
	Nimonic 80A (plaat)	76,0	19,5					1,4	2,4		0,06	0,3 Mn/0,3 Si/0,003 B/0,06Zr	chemische industrie
	Inconel X-750 (plaat)	73,0	15,5					0,7	2,5	7,0	0,04	0,5 Mn/0,2 Si	drukvalen
	Inconel 718 (plaat)	52,5	19,0		3,0		5,1	0,5	0,9	18,5	0,04	0,2 Mn/0,2 Si	constructie-onderdelen
	René 41 (smeedstuk)	55,0	19,0	11,0	10,0			1,5	3,1		0,09	0,005 B	gasturbine-onderdelen
	Waspaloy (smeedstuk)	58,0	19,5	13,5	4,3			1,3	3,0		0,08	0,006 B	gasturbine-onderdelen
	IN-100 (giet- of smeedstuk)	60	10,0	15,0	3,0			5,5	4,7		0,18	0,014 B/0,06 Zr/ 1,0 V	gasturbine-bladen en wielen
	IN-738 (gietstuk)	61	16,0	8,5	1,7	2,6	2,6	3,4	3,4		0,11	0,010 B/0,05 Zr	'hot-corrosion' bestand materiaal
	Mar-M 200 (gietstuk)	59	9,0	10,0		12,5	1,0	5,0	2,0		0,14	0,015 B/0,05 Zr/ 1,8 Hf	gasturbine-bladen en leidschoepen
	René 80 (gietstuk)	60	14,0	9,5	4,0	4,0		3,0	5,0		0,17	0,015 B/0,03 Zr	gasturbine-bladen en leidschoepen
Fe-basis	A-286 (plaat)	26,0	15,0		1,3			0,2	2,0	54,0	0,05	1,3 Mn/0,5 Si/ 0,015 B	gasturbine-onderdelen
	Discaloy (plaat)	26,0	13,5		2,7			0,1	1,7	54,0	0,4	0,9 Mn/0,8 Si/ 0,005 B	gasturbine-onderdelen
	Incoloy 825 (plaat)	41,8	21,5		3,0			0,15	0,9	30,0	0,03	1,0 Mn/0,50 Si/ 1,8 Cu	warmtewisselaars, condensors. spanningscorrosiebestendig materiaal
Co-basis	Haynes 188 (plaat)	22,0	22,0	39,2		14,0				3,0	0,10		Verbeterde oxidatie-weerstand t.o.v. Hastelloy X
	L605 (plaat)	10,0	20,0	52,9		15,0					0,05		gasturbine-onderdelen
	FSX-414 (gietstuk)	10	29,0	52,0		7,5					0,25		gasturbine-leidschoepen
	Mar-M 509 (gietstuk)	10	23,5	55,0		7,0	3,5		0,2		0,60	0,50 Zr	gasturbine-bladen en leidschoepen

Het basismateriaal van deze turbineschoepen (gietsukken) bevat gewoonlijk meer dan 4% Al + Ti. Deze snel precipiterende legeringen zijn zeer moeilijk te lassen. Scheuren ontstaan in het lasmateriaal of in de zone juist ernaast. Leidschoepen worden dan ook veelvuldig gesoldeerd, zowel tijdens fabricage, maar vooral tijdens reparatie. Legeringen met weinig Al + Ti (bijvoorbeeld 2%) zijn relatief gemakkelijk te solderen en/of te lassen. Voor deze laatste groep materialen wordt meestal op basis van fabricage-technische en/of economische overwegingen een keuze gemaakt; solderen dan wel lassen.

17.2.2 *Materiaalcombinaties*

Materialen, behorend tot hetzelfde type legering, kunnen zonder meer door solderen met elkaar worden verbonden. Bij combinaties van verschillende materialen dient men rekening te houden met de verschillen in uitzettingscoëfficiënt, maar ook met verschillen in de soldeerbaarheid van de legeringen. Verder kunnen nikkel- en superlegeringen door hoogtemperatuursolderen worden verbonden met keramische materialen. Ook hier moet men vooral letten op het verschil in uitzettingscoëfficiënt.

17.2.3 *Eigenschappen*

Het hoogtemperatuursolderen van precipitatiehardende (nikkel)legeringen moet - in tegenstelling tot de oploshardende legeringen - altijd plaatsvinden voor of in combinatie met de gewenste warmtebehandeling. Een belangrijk criterium voor de keuze van het soldeer is de maximaal toelaatbare bedrijfstemperatuur in verband met de sterkte en oxidatieweerstand van de soldeernaad. Ook moet men rekening houden met de stabiliteit van de microstructuur van het basismateriaal tijdens solderen. Een te hoog gekozen soldeertemperatuur kan bijvoorbeeld korrelgroei geven in (gewalste) materialen. Om deze reden wordt aanbevolen om bijvoorbeeld Inconel 718 niet boven 1040 °C te solderen.

17.2.4 *Voorbehandelingen*

In principe kunnen alle naadvormen worden toegepast. In de praktijk gaat de voorkeur bij zwaar belaste constructies echter uit naar een overlapverbinding. Dit houdt de spanningen laag in de soldeernaad tijdens bedrijf. De spleetbreedte, die moet worden aangehouden, wordt gewoonlijk bepaald door de hoeveelheid tijd en geld die men wil besteden en het te gebruiken soldeer. Aanbevolen wordt een spleetbreedte van ca. 40 µm om optimale eigenschappen te krijgen. De spleetbreedte heeft onder andere invloed op de sterkte van de verbinding. Hierbij moet men bedenken, dat de spleetbreedte op soldeertemperatuur wordt bedoeld. Veel borium- en siliciumhoudende nikkelbasis-soldeermaterialen geven brosse fasen in de naad, indien de spleetbreedte groter dan 100 µm wordt gekozen; dit in tegenstelling tot de edelmetaal-soldeermaterialen.

Voorbehandeling van de oppervlakken

- ▶ De oppervlakken van de soldeerspleet dienen een ruwheid te bezitten, die ligt tussen 1 en 6 µm ($R_a = 1 \dots 6$) en de soldeerspleet dient parallel te zijn met een max. afwijking van 30 µm.
- ▶ Indien hoge eisen worden gesteld aan de maatvoering of wanneer er kans is op spanningscorrosie, dan moeten de inwendige spanningen door spanningsarm gloeien worden weggenomen.
- ▶ De precipitatiehardende nikkel- en superlegeringen zijn gelegeerd met titaan en aluminium. Hierdoor is een zeer stabiel oxide aan het oppervlak aanwezig. Deze legeringen vernikkelt men gewoonlijk tot een laagdikte van 5...10 µm voor het solderen.

- ▶ Ook kan men het oppervlak intensief reinigen (chemisch of in een gasvormige fluor-waterstof atmosfeer), zodat een titaan- en aluminium-arm oppervlak ontstaat.

17.2.5 *Soldeermethoden*

Zuiver nikkel en de oploshardende legeringen soldeert men in ovens onder vacuüm of in een reducerende atmosfeer, bijvoorbeeld in droge waterstof. De precipitatiehardende legeringen die meer dan 1% Al + Ti bevatten, worden vrijwel uitsluitend in vacuüm gesoldeerd bij een druk van ca. $5 \cdot 10^{-4}$ mbar of lager. De oven moet dan ook zodanig worden gekozen, dat het gewenste vacuüm wordt bereikt; wanden en hulpstukken mogen geen bron zijn van veel uitgassen. De temperatuurregeling van de oven dient zeer nauwkeurig en betrouwbaar te zijn. Ter illustratie: enkele soldeersoorten worden toegepast tot ca. 50 °C beneden de smelttemperatuur van het basismateriaal. Dit geldt bijvoorbeeld voor BNi-5 met een soldeertemperatuur van 1175-1190 °C in combinatie met IN-738.

Nikkel- en superlegeringen worden in zachtgegloeide of oplosgegloeide toestand gesoldeerd met een hoogsmeltend soldeer. De soldeertemperatuur ligt boven de 900 °C en kan voor gietlegeringen zelfs 1190 °C bedragen.

17.2.6 *Soldeermaterialen*

Voor hoge temperatuur toepassingen worden meestal soldeermaterialen gebruikt op nikkel-, kobalt- en goudbasis (tabel 17.2). De zilverbasis- en koperbasis-soldeermaterialen hebben of een te lage soldeertemperatuur, of een te lage sterkte of corrosieweerstand bij hoge temperatuur en worden om die reden slechts bij uitzondering toegepast.

Nikkelbasis-soldeersoorten

Verbindingen met goede oxidatie- en corrosie-eigenschappen en sterkte bij hoge temperatuur kan men realiseren met nikkelbasis-soldeersoorten, indien op de juiste wijze wordt gesoldeerd. De nikkelbasis-soldeersoorten legeren sterk met het basismateriaal. De eigenschappen van de verbinding worden dan ook voornamelijk bepaald door het type soldeer, de spleetbreedte, de soldeertemperatuur en soldeertijd, alsmede de warmtebehandeling. Het soldeer BNi5 geeft verbindingen zonder brosse intermetallische fasen wanneer gesoldeerd wordt op 1190 °C gedurende 15 minuten bij een kleine spleetbreedte, bij voorkeur niet groter dan 25 µm.

Bij 'wide-gap' solderen (niet-capillair) gebruikt men gewoonlijk een soldeer met een groot smelttraject of een mengsel van soldeer en metaalpoeder. Bij voorkeur heeft het metaalpoeder ruwweg dezelfde samenstelling als het basismateriaal.

Edelmetaalbasis-soldeersoorten

Vergeleken met de nikkelbasis-soldeersoorten geven verbindingen met goudbasis-soldeersoorten een lagere hardheid, betere ductiliteit, minder interkristallijne aantasting en geen intermetallische fasen. De eigenschappen van de verbindingen zijn ook beter te voorspellen en minder afhankelijk van afwijkingen in spleetbreedte en warmtebehandelingen. De 82Au-18Ni en 72Au-22Ni-6Cr soldeermaterialen past men onder andere toe in compressoronderdelen van gasturbines. Deze soldeermaterialen worden toegepast in componenten met een grote spreiding in spleetbreedte. Tijdens bedrijf is het milieu corrosief en de temperatuur loopt op tot max. 500 °C. Vanwege de hoge kostprijs van goudbasis-soldeersoorten worden meer en meer goedkopere alternatieven gezocht, zoals in de nikkelbasis-soldeersoorten (nikkelchroom- en nikkelpalladiumtypen).

tabel 17.2 Soldeermaterialen voor nikkel- en superlegeringen

soldeer- type	AWS A5.8/ A5.8M:2004	chemische samenstelling in gewichtsprocenten										smelttraject	
		Ni	Cr	B	Si	Fe	C	P	Co	Au	andere elementen	sol.	liq.
Nikkel	BNi-1	bal.	13,0-15,0	2,75-3,50	4,0-5,0	4,0-5,0	0,6-0,9	0,02				980	1040
	BNi-1a	bal.	13,0-15,0	2,75-3,50	4,0-5,0	4,0-5,0	0,06 max.	0,02				980	1080
	BNi-2	bal.	6,0-8,0	2,75-3,50	4,0-5,0	2,5-3,5	0,06	0,02				970	1000
	BNi-4	bal.		1,5-2,2	3,0-4,0	1,5	0,06	0,02				990	1060
	BNi-5	bal.	18,5-19,5	0,03	9,75-10,50		0,10	0,02				1080	1135
	BNi-6	bal.					0,10	10,0-12,0				880	880
	BNi-7	bal.	13,0-15,0	0,01	0,10	0,2	0,08	9,7-10,5				890	890
	BNi-10	bal.	10,0-13,0	2,0-3,0	3,0-4,0	2,5-4,5	0,40-0,55	0,02			15-17 W	970	1105
Kobalt	BCo-1	16-18	18,0-20,0	0,7-0,9	7,5-8,5	1,0	0,35-0,45	0,02	bal.		3,5-4,5 W	1105	1150
Au-Ni	BAu-4	bal.								81,5-82,5		960	960
Au-Cu	BAu-2									79,5-81,5	bal. Cu	890	890
Au-Ni-Cr		22	6							72		975	1000
Ni-Pd		bal.	10,0-11,0	2,50-3,0	0,25-1,0	0,50 max.					35,5-36,5 Pd	820	960

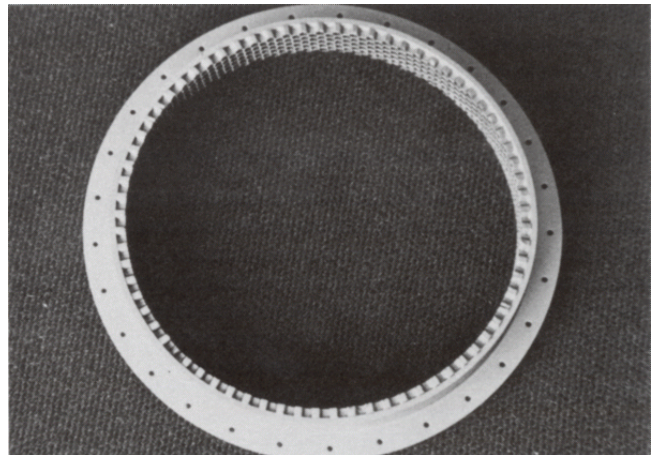
17.2.7 Controle en nabehandelingen

Goed uitgevoerde soldeerverbindingen vereisen geen mechanische nabewerking. Bij reparaties aan gasturbineschoepen wordt vanwege aërodynamische eisen echter dikwijls nageslepen om contouren te herstellen en om een zeer glad oppervlak te krijgen.

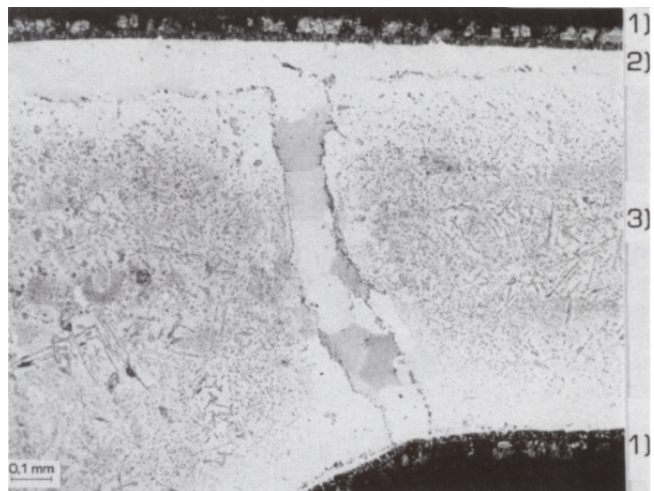
Voor belangrijk werk is een procedure-kwalificatie noodzakelijk, hetgeen met zich meebrengt dat door destructief onderzoek moet worden vastgesteld of de soldeernaad voldoende is gevuld. In sommige gevallen zal worden volstaan met een visuele inspectie, nadat men overtuigd is dat volgens specificaties en tekeningen is gewerkt. In andere gevallen zal niet-destructief onderzoek nodig zijn om de kwaliteit te waarborgen (zie hoofdstuk 7).

17.2.8 Toepassingen

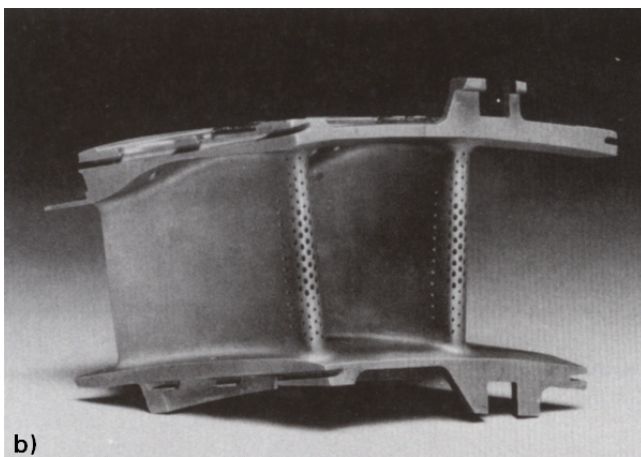
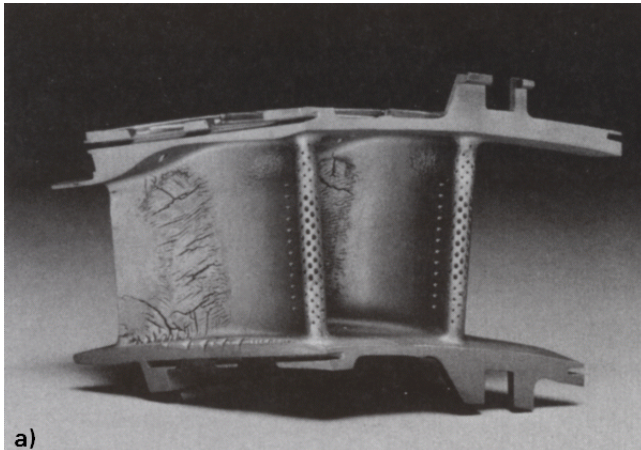
- ▶ Pipen voor warmtewisselaars uit NiCrFe-legeringen worden gesoldeerd in vacuüm met BNi-2.
- ▶ Zeer dunwandige honingraatdelen uit een nikkelbasislegering worden gesoldeerd in vernikkelde ringen (figuur 17.1).
- ▶ Gasturbine compressoronderdelen uit Inconel 718 voorzien van een galvanisch aangebracht nikkellaagje worden gesoldeerd met BAu-4 of met NiPd-soldeer.
- ▶ Gasturbine leidschoepen soldeert men na "halogeen" of "fluor-waterstof" reinigen met hoogsmeltende nikkelbasis-soldeersoorten, het soldeer al dan niet gemengd met een metaalpoeder (figuren 17.2 en 17.3).
- ▶ Onderdelen van straalmotoren voor gevechtstraaljagers (figuren 17.4 en 17.5).



figuur 17.1 Dunwandige honingraatdelen vacuüm gesoldeerd in een ring (foto Sulzer-Elbar)



figuur 17.2 Doorsnede van een soldeerreparatie in een gasturbine leidschoep (foto NLR)
1) coating
2) soldeer
3) basismateriaal



figuur 17.3 Gasturbine leidschoepen gerepareerd middels de "wide gap" soldeermethode (vergroting 0,5 ×). a) voor reparatie; b) na reparatie (foto's NLR)

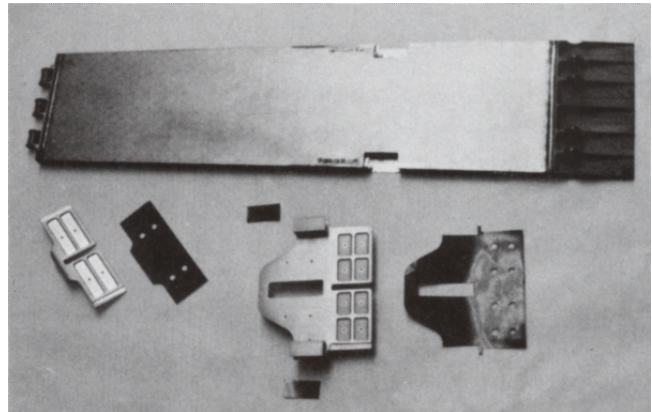
17.3 ODS-materialen

17.3.1 Inleiding

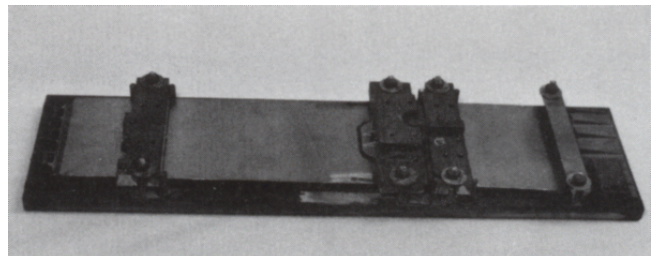
ODS (Oxide Dispersion Strengthened)-materialen behoren tot de P/M (Poeder Metallurgie) legeringen en zijn ontwikkeld om een hoge(re) bedrijfstemperatuur van hoge temperatuurinstallaties langdurig te kunnen toestaan met behoud van redelijke sterkten en kruipbestendigheid. Voor dit doel zijn er twee typen ODS-materialen beschikbaar, te weten een type op ijzerbasis en een op nikkelbasis (zie tabel 17.3).

tabel 17.3 Chemische samenstelling van ODS-materialen op nikkel- en ijzerbasis

ODS-materialen		chemische samenstelling						
groep	legering	Ni	Cr	Fe	Ti	Al	Y203	overige
Ni-basis	PM 1000	bal.	20	3	0,5	0,3	0,6	
	MA 954	bal.	19-23	2,5	0,3-0,6	0,2-0,5	0,5-0,7	
	PM 1500	bal.	30	3	0,5	0,3	0,6	
	MA 754	bal.	20	1	0,5	0,3	0,6	
	MA 6000	bal.	15	1,5	2,5	4,5	1,1	2Mo/4W
Fe-basis	PM 2000		19	bal.	0,5	5,5	0,5	
	MA 956		20	bal.	0,5	4,5	0,5	



figuur 17.4 Nikkelbasissoldeertape (donkere delen) wordt gebruikt om de diverse delen (boven: Waspaloy; onderlinks AISI 347 en middenonder Inconel 718) te solderen in vacuüm (foto Philips)



figuur 17.5 Onderdeel van een straalmotor (toegepast in gevechtstraaljagers) zoals aangegeven in figuur 17.4 en geplaatst in een soldeermal (foto Philips)

De nanodeeltjes in yttriumoxidevorm, waarmee de ODS-materialen zijn versterkt, zullen zich in een smelt uitscheiden uit de matrix en kunnen zich bij het stollen niet gelijkmatig herverdelen. Daarom is smeltlassen van ODS-materialen met behoud van structuur en eigenschappen niet goed mogelijk. Dit probleem treedt niet op indien deze materialen door middel van diffusielassen, wrijvingslassen of explosief lassen worden verbonden. Het nadeel is dat deze processen moeilijk toepasbaar zijn op meer ingewikkelde geometrieën.

Met het hoogtemperatuurvacuümsolderen bestaat meer vrijheid bij het verbinden van constructiedelen met een ingewikkelder geometrie. Een beperking vormt het feit dat de ODS-materialen op ijzer- en nikkelbasis naast chroom, elementen als aluminium en titaan bevatten, waarvan de oxiden de bevochtiging van het soldeer kunnen verhinderen, zoals ook voor sommige nikkel- en superlegeringen het geval kan zijn, (zie § 17.2). Ook de dispersiedeeltjes kunnen de bevochtiging daardoor negatief beïnvloeden.

N.B. Er zijn ook ODS-materialen op bijvoorbeeld koper-, molybdeen- of platinabasis; ook deze materialen zijn ontwikkeld voor hoge temperatuurtoepassing en bevatten evenals de ODS-materialen op ijzer- of nikkelbasis fijne nanodeeltjes in oxidevorm zoals bijvoorbeeld aluminiumoxide, zirconiumoxide of yttriumoxide. De soldeerbaarheid van dit type ODS-materialen wordt niet verder besproken, daar er nog geen ervaring mee is opgedaan.

17.3.2 *Materiaalcombinaties*

Materialen behorend tot hetzelfde type legering, kunnen met elkaar door middel van hoogtemperatuursolderen worden verbonden. Bij combinaties van onderling verschillende materialen moet naast het kruipgedrag van ODS-materialen rekening worden gehouden met verschil in uitzettingsgedrag; de soldeernaad en/of het niet of minder kruipvaste materiaal zal ten gevolge van dit verschil in uitzettingsgedrag ontstane spanningen moeten opvangen.

Afhankelijk van de aan- of afwezigheid van elementen als aluminium en titaan in het ODS-materiaal kan de soldeerbaarheid worden beïnvloed. Inmiddels is ervaring opgedaan met het solderen van de combinatie PM 2000 - IN 617 (=Ni-22Cr-12,5Co-9Mo-1,5Fe-1,2Al-0,3Ti-0,5Mn-0,5Si-0,2Cu).

17.3.3 *Eigenschappen*

Kruipvaste legeringen krijgen hun eigenschappen onder andere door precipitatie van deeltjes in de matrix die de beweging van dislocaties verhinderen. In precipitatiehardende legeringen worden de kruipeigenschappen verkregen door geschikte precipitaten die na een geëigende warmtebehandeling uitgescheiden worden. Bij een langdurige blootstelling aan hoge temperaturen zullen deze precipitaten groeien en zo uiteindelijk hun eigenschappen verliezen. Boven bepaalde temperaturen zullen de precipitaten zelfs weer in oplossing gaan.

ODS-materialen bevatten een homogene verdeling van fijne nanodeeltjes in oxidevorm zoals bijvoorbeeld yttriumoxide. De deeltjes lossen niet op in de matrix en vertonen geen coagulatie bij hoge temperaturen en verhinderen zo met name dislocatiebewegingen en korrelgroei. ODS-materialen behouden hun hoog temperatuur kruipeigenschappen tot zeer hoge temperaturen.

De ijzerbasistypen hebben ook nog een hoog aluminiumgehalte, waardoor een dichte, hechtende oxidelaag ontstaat. Door de toevoeging van aluminium (meer dan 3%) wordt de hoogtemperatuur corrosiebestendigheid verbeterd. Onder oxiderende condities wordt een stabiele aluminium(houdende) oxidehuid gevormd. Deze oxidehuid is ook onder reducerende condities stabiel. IJzerbasis ODS-materialen hebben dankzij het hoge aluminiumgehalte, naast hogere (kruip)sterkten ook een hogere oxidatiebestendigheid dan nikkelbasis ODS-materialen. IJzerbasis ODS-materialen kunnen langdurig temperaturen van 1000-1100 °C verdragen. Voor het vormen van de aluminium(houdende) oxidehuid worden de ijzerbasis ODS-materialen vaak voorgeoxydeerd.

De nikkelbasis ODS-materialen met een laag aluminium- en titaangehalte hebben hoge kruipsterkte bij hoge temperatuur en zijn oxidatiebestendig in oxiderende milieus. Door het chroomgehalte te verhogen (bijvoorbeeld in PM 1500; zie tabel 17.3) wordt de hot corrosion bestendigheid verbeterd. Tabel 17.3 geeft de samenstelling van enige ODS-materialen op nikkel- en ijzerbasis. Tabel 17.4 geeft de eigenschappen van enige ODS-materialen op nikkel- en ijzerbasis.

17.3.4 *Voorbehandelingen*

Voor het bewerken van ODS-materialen kunnen de conventionele bewerkingstechnieken worden toegepast. Met name Ni-basis ODS-materialen zijn gevoelig voor koudversteving. De bewerkingsschappen moeten hierop worden aangepast. Voor gladde oppervlakken met nauwe toleranties is high speed bewerkingsgereedschap nodig. Bij de

tabel 17.4 Eigenschappen van ODS-materialen op nikkel- en ijzerbasis

ODS-materialen		mechanische en corrosie/oxidatie eigenschappen
groep	legering	
Ni-basis	PM 1000	hoge warmsterkte en uitstekende "hot corrosion" en "low cycle fatigue" eigenschappen
	MA 954	
	PM 1500	uitstekende "hot corrosion" eigenschappen
	MA 754	goede warmsterkte en corrosiebestendigheid
	MA 6000	goede oxidatiebestendigheid
Fe-basis	PM 2000	
	MA 956	hoge warmsterkte en kruipsterkte tot 1350 °C
Ter toelichting: PM zijn Plansee materialen; MA zijn Inconel materialen		

naadvoorbewerking moet er voor het solderen rekening mee worden gehouden dat het soldeer over het algemeen een slecht bevochtigings- en spleetvulgedrag vertoont op ODS-materialen. Navullen van de spleet is daardoor moeilijk te realiseren, wat eisen aan de nauwkeurigheid van de spleet stelt.

Oppervlakken moeten voor het solderen vrij zijn van olie, verf en stof (krijt e.d.). Hoge aandelen aluminium- en/of titaanoxiden (in legeringen met > 1%) moeten worden voorberekt om deze te verwijderen, alvorens te solderen. Dit kan gebeuren door gritten of schuren (bijvoorbeeld met P320 of P500) of een beitsbewerking.

Bevat het oppervlak een te hoog aandeel aluminium- of titaanoxiden (> 1%), waardoor slechte bevochtiging kan optreden, dan moeten deze vooraf worden verwijderd. Dit kan met de al genoemde mechanische methode, of via vooroxidatie en natchemische weg (bijvoorbeeld m.b.v. het POCT-proces (POCT = Pre Oxidation Chemical Treatment)). Ook kan het oppervlak vooraf elektrolytisch worden vernikkeld met een 5-10 µm dikke nikkel laag. Fluor Carbon Cleaning (FCC; zie ook het in paragraaf 17.2.4 genoemde reinigen in fluor-waterstof atmosfeer) wordt wel genoemd als optie om het aluminiumoxide aan het oppervlak te verwijderen. Echter, met deze methode wordt gelijktijdig het Y₂O₃ aangetast, hetgeen ongewenst is. Hierdoor kan een etseffect tot op enkele tientallen micrometers ontstaan. Daarmee is FCC als reinigingsmethode ongeschikt voor ODS-materialen, versterkt met yttriumoxiden.

17.3.5 *Soldeermethoden*

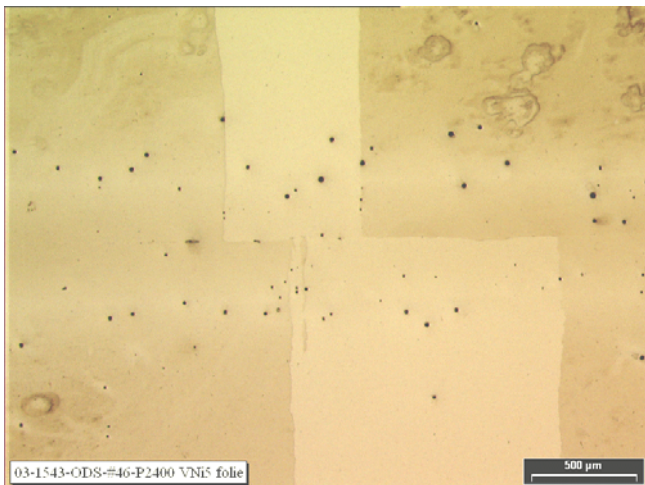
ODS-materialen op ijzer- of nikkelbasis worden gesoldeerd in vacuüm, hetzij in ovens, hetzij in inductief verhitte installaties. Het handhaven van het vacuüm (1 × 10⁻⁴ mbar of lager) en het voorkomen van inlek en uitgassing van werkstuk maar ook van ovenwand e.d., is daarbij van groot belang. Voor het solderen van hoog aluminiumhoudende ODS-materialen, is een vacuüm beter dan 1 × 10⁻⁵ mbar noodzakelijk. Voorts is voor ODS-materialen die dichtbij hun smelttemperatuur worden gesoldeerd een goede temperatuurmeting en -regeling van wezenlijk belang. De soldeertemperatuur ligt doorgaans tussen 1230-1315 °C [Schwartz, Brazing 2003]. Voor diffusiesolderen zijn de soldeertemperaturen hoger, tot ca. 1350 °C met diffusietijden van ongeveer een uur.

Verder moet er bij het solderen van hoog aluminiumhoudende ODS-materialen rekening worden gehouden met slecht vloeigedrag. Capillair solderen van deze materialen is slecht of niet uitvoerbaar. Daarnaast zal het Y₂O₃ in de legering het vloeigedrag negatief beïnvloeden. ODS-materialen met laag Ti en Al (minder dan 1%) zijn

met standaard soldeersoorten, zoals ook gebruikt worden voor het solderen van nikkel en nikkelbasis superlegeringen, goed te verbinden.

Een dergelijk standaard soldeer is geschikt als de soldeerverbinding in een thermisch lager belaste zone ligt met temperaturen tot 900-1000 °C. Als de soldeerverbinding ook hoog thermisch wordt belast, zal de zwakste schakel gevormd worden door de verbinding. Onder hoge temperatuur (boven 900-1000 °C) zal de verbinding dan bezwijken door overbelasting of kruip in de soldeernaad of over de interface met de basismaterialen. Dit omdat in de soldeernaad geen versteviging door dispersiehardten kan worden verkregen.

Vanuit constructief oogpunt moet dan ook eerst worden nagegaan of de verbinding buiten de heetste zone kan worden aangebracht. Als dit niet mogelijk is, kan een diffusiesoldeerverbinding worden toegepast om in de verbinding de hoogtemperatuur eigenschappen van het ODS-materiaal zo goed mogelijk te benaderen. Hiermee worden dan homogene verbindingen gerealiseerd. De soldeernaad wordt beperkt tot een korrelgrens (zie figuur 17.7). Omdat het een doorlopende korrelgrens is, kan verwacht worden dat de mechanische eigenschappen lager zijn dan van het basismateriaal, maar beter dan die van de soldeernaad [Schwartz, Brazing 2003].



figuur 17.6 Diffusiesoldeerverbinding in PM2000 (foto NIL TC I-A / ECN)

17.3.6 Soldeermaterialen

Voor hoge temperatuur toepassing worden soldeersoorten op basis van nikkel, kobalt of palladium toegepast. Voor toepassing op lagere temperaturen (tot 500 °C) en als lagere sterkten worden gevraagd (afschuifsterkte 75 MPa bij 400 °C) is een zilvertitaanbasistype toepasbaar. Voor het diffusiesolderen wordt het soldeer in folievorm toegepast.

In tabel 17.5 zijn van enkele soldeersoorten de samenstelling en het smeltpunt/-traject gegeven.

17.3.7 Controle en nabehandelingen

Voor ODS-soldeerverbindingen gelden vergelijkbare nabehandelingen als voor de nikkel- en superlegeringen. Nabewerking van de gesoldeerde verbinding is in het algemeen niet noodzakelijk. Wel kan het nodig zijn dat het

tabel 17.5 Samenstelling en smeltpunt/-traject van enkele soldeersoorten

soldeer	AWS A5.8/ A5.8M: 2004	gewichts %							T _s -T _i [°C]
		Ni	Cr	Si	Co	Pd	Ag	Ti	
Ni-basis	BNi-5	bal.	18,5-19,5	9,75-10,50					1080-1135
Co-basis	BCo-1	16-18	18-20	7,5-8,5	bal.				1105-1150
Pd-basis		39,5-40,5				bal.			1235
Ag-basis							bal.	4	950-960

gesoldeerde werkstuk wordt nageslepen om aan hoge gladheidseisen van het oppervlak te voldoen.

Voor hoogwaardige toepassingen van gesoldeerde verbindingen zal vaak een procedure-kwalificatie worden gevolgd, hetgeen kan inhouden dat destructief onderzoek (metallografisch, mechanisch) moet worden uitgevoerd op mee gesoldeerde proefstukken (dummy's). Naast visuele controle kan worden geëist dat de verbinding niet-destructief (ultrasoon onderzoek) of metallografisch wordt onderzocht. Het resultaat wordt dan vastgelegd in zogenaamde sonogrammen respectievelijk microscopische doorsneden. De vaak langgerekte kristalstructuur kan echter tot problemen leiden bij het uitvoeren van ultrasoon onderzoek. Hierop moet men bedacht zijn bij het uitvoeren van een dergelijk onderzoek.

17.3.8 Toepassingen

- ▶ leidschoepen voor gasturbines;
- ▶ brandstofinspuitmonden;
- ▶ brandermondstukken;
- ▶ honingraatstructuren;
- ▶ roeders voor de glasindustrie;
- ▶ thermokoppelmantels voor hoog temperatuur gebruik;
- ▶ componenten in verbrandingskamers en in chemische plants;
- ▶ spinringen voor de vezelproductie in de glas- en keramische industrie.

Hoofdstuk 18

Titaan en titaanlegeringen

18.1 Inleiding

Titaan behoort met zirkoon en hafnium tot de groep reactieve materialen, die met veel elementen makkelijk verbindingen aangaan. Titaan en zijn legeringen absorberen bij stijgende temperatuur gassen als zuurstof, stikstof en waterstof in toenemende mate en reageren daarmee. Hierdoor wordt het materiaal bros. Bij atmosferisch gebruik boven 500 tot 600 °C zal de opname van gassen dermate snel gaan, dat een langdurig gebruik niet aan te bevelen is.

Voor het solderen is men aangewezen op solderen in vacuüm of onder droog inert gas.

18.2 Materiaalcombinaties

Titaan vormt in combinatie met andere metalen veelal brosse intermetallische verbindingen. Dit is een belangrijke beperking; ook vele soldeersoorten geven dergelijke verbindingen. Betrekkelijk gunstig gedragen zich de titaanzilververbindingen. Om deze reden wordt zilverbasis-soldeer toegepast bij het verbinden van titaan aan andere metalen. Onder bepaalde omstandigheden kunnen dan ook titaan en titaanlegeringen gesoldeerd worden aan roestvast staal, koper, aluminium, keramiek en dergelijke.

18.3 Eigenschappen

Titaan wordt voornamelijk toegepast in twee vormen:

1. Min of meer zuiver titaan wordt gebruikt in bijvoorbeeld de chemische industrie, vanwege de grote corrosiebestendigheid. Deze ontstaat doordat er in lucht altijd een hechte oxidehuid op het materiaal aanwezig is (vergelijkbaar met aluminium); Ti met 0,2% Pd wordt steeds meer toegepast in de chemische industrie vanwege zijn bestandheid tegen spleetcorrosie.
2. De legering Ti-6Al-4V wordt gebruikt in de lucht- en ruimtevaartindustrie vanwege de gunstige sterkte/massa-verhouding. Deze wordt verkregen na een warmtebehandeling.

De bijna zuivere titaansoorten bestaan metaalkundig gezien uit één fase (alfa). Een hoge soldeertemperatuur zal ongewenste korrelgroei opleveren, daarom moet de temperatuur liefst onder de 900 tot 1000 °C blijven. De legering Ti-6Al-4V bestaat uit twee fasen (alfa-bèta). Door de fijne verdeling van de fasen ontstaat in de zachtgegloeide toestand een taai materiaal (zachtgloeitemperatuur: 705-790 °C). De soldeertemperatuur moet minimaal 50 °C onder de overgangstemperatuur van de bèta-fase blijven (overgangstemperatuur is ongeveer 1000 °C). Een warmtebehandeling met precipitatieharding levert een sterk materiaal op. Na het solderen zullen de sterkte en de structuur echter vergelijkbaar zijn met die van de zachtgloeitoestand. Het oplosgloeien vindt plaats tussen 955-970 °C. Voor het precipitatieharden worden twee temperatuurgebieden gegeven: 480-595 °C en 705-760 °C.

18.4 Voorbehandelingen

Als het materiaal een warmtebehandeling in lucht heeft ondergaan (bijvoorbeeld warmwalsen), dan zit op het

oppervlak een dikke oxidehuid die door mechanische bewerking of door stralen moet worden verwijderd. In andere gevallen is dat niet noodzakelijk; meestal wordt het materiaal in gebeitste vorm geleverd. Direct na de verwijdering zal weer een (zeer dunne) oxidehuid ontstaan. Deze zal echter bij het hoogtemperatuursolderen weinig problemen opleveren.

Oxidehuiden kunnen ook door middel van beitsen worden verwijderd. Een toe te passen oplossing bestaat uit 2 vol% geconc. (40%) HF, 30 vol% geconc. (65%) HNO₃ en 68 vol% water. Er wordt gebeitst bij kamertemperatuur tot de oxidehuid verwijderd is. Dit duurt veelal vijftien seconden tot een minuut.

Zoals gebruikelijk dienen de te solderen producten vuil- en vetvrij te zijn. Het ontvetten kan op praktische wijze plaatsvinden door middel van ultrasoon reinigen in aceton van 50 °C. Ook kunnen er alkalische zeep worden gebruikt. In de literatuur wordt soms gewaarschuwd voor het gebruik van chloorhoudende middelen in verband met spanningscorrosie. Andere bronnen spreken dit echter weer tegen.

18.5 Soldeermethoden

Bij verhoogde temperatuur kan titaan relatief veel zuurstof, stikstof en waterstof opnemen. Bij het verwarmen doet zich het verschijnsel voor, dat de zuurstof uit de oxidehuid wordt opgenomen door het materiaal zelf. Door nu te solderen in vacuüm of onder droog inert gas, wordt voorkomen dat er een nieuwe oxidehuid wordt gevormd. Een vacuüm beter dan 10⁻⁵ mbar is daarom aan te bevelen. Het dauwpunt van inerte gassen als argon en helium dient lager te zijn dan -54 °C.

Bij gebruik van stelgereedschap en binddraad dient eraan te worden gedacht, dat titaan met nikkel een laagsmeltend eutecticum vormt bij 940 °C. Vermijdt daarom bij hogere temperaturen contact met nikkel en met legeringen met een oxidehuid die veel nikkel bevatten (zoals sommige roestvaste staalsoorten). Breng hierop een anti-vloeimiddel aan als een direct contact onvermijdelijk is. Ook koolstofstaal wordt wel als stelgereedschap toegepast.

18.6 Soldeermaterialen

Te gebruiken zijn soldeermaterialen op aluminiumbasis, zilverbasis en titaanbasis. Deze staan genoemd in tabel 18.1. Ook andere hoofdelementen zijn mogelijk zoals goud, palladium en zirkoon.

De te behalen sterkte van de titaanverbinding met titaanen zirkoniumbasis-soldeersoorten wordt in tabel 18.2 gegeven. Bij de corrosie-eigenschappen wordt meestal gekeken naar atmosferische omstandigheden, zoals een zoutmilieu (zeewater) of een licht zuur milieu (pH > 3). Voor verbindingen van zuiver titaan in de chemische industrie worden overigens vaak hogere eisen aan de corrosievastheid gesteld, daar dan in andere, meer agressieve milieus wordt gewerkt.

De keuze voor een soldeer zal gebaseerd zijn op de sterkte en/of de bestandheid tegen corrosie van de verbinding, de soldeertemperatuur en de prijs. Voor veel toepassingen van zuiver titaan zal de corrosievastheid een rol spelen; voor toepassingen van Ti-6Al-4V zullen zowel de sterkte als de corrosieweerstand bij atmosferische omstandigheden van belang zijn.

tabel 18.1 Soldeermateriaal voor het verbinden van titaan en titaanlegeringen (naar W. Müller)

soldeertype	smeltpunt of smelttraject [°C]		soldeer-temperatuur [°C]
	T _{sol}	T _{liq}	
aluminiumbasis			
100Al (AA 1050)	660	660	700
97Al-1,2Mn (AA 3003)	643	654	685-710
zilverbasis			
95Ag-5Al	780	810	870-900
95,5Ag-4Al-0,5 Mn			930
65Ag-30Al-5Cu			680
72Ag-28Cu	780	780	830
68Ag-27Cu-5Pd	807	810	860
60Ag-30Cu-10Sn	602	718	< 770
68Ag-27Cu-5Sn			760-816
82Ag-9Pd-9Ga	845	880	930
titaanbasis			
restTi-(22...26)Ni-(11...17)Cu	≈ 910	≈ 910	
restTi-(33...38)Cu-(7...11)Fe	≈ 950	≈ 950	
64Ti-26Ni-10Cu			925
57Ti-28Ni-15Cu			950
50Ti-50Cu ¹⁾	955-965	955-965	
72Ti-28Ni ¹⁾	955-965	955-965	
70Ti-15Cu-15Ni	910	960	940-960 ²⁾
60Ti-20Cu-20Ni	920	935	940
48Ti-48Zr-4Be			1000-1050
43Ti-43Zr-12Ni-2Be	795	816	
overige			
82Au-18Ni	950	950	1000
87Pd-9Ag-4Si			738
restZr-(9...14)Cu-(8...12)Fe	860	880	
restZr-(10...15)Cu-(10...14)Ni	880	900	930
restZr-(27...32)Cu-(3...7)Ni	900	910	
63Zr-37Cu ¹⁾	930-940	930-940	
84Zr-16Fe ¹⁾	930-940	930-940	
83Zr-17Ni ¹⁾	960-970	960-970	
46Zr-46Ti-4Be-4V			1032
75Zr-19Nb-6Be			1050
80Zr-19Fe-3Be			1050
95Zr-5Be	980	980	1020

1) eutectische samenstelling

2) gevolgd door een diffusiegloeïing op 920 °C

tabel 18.2 Afschuifsterkte van soldeerverbindingen van titaan met titaanbasis- en zirkoniumbasis-soldeersoorten (naar W. Müller)

soldeertype	smelttemperatuur [°C]	afschuifsterkte [MPa] bij:			
		20 °C	200 °C	300 °C	400 °C
100Ag	960	197	141	121	108
72Ti-28Ni	955	290	266	258	206
50Ti-50Cu	955	364	336	258	214
83Zr-17Ni	960	305	280	225	203
63Zr-37Cu	930	344	304	224	197
84Zr-16Fe	935	337	311	208	195
65Ti-20Ni-15Cu	890	338	296	236	202
80Zr-10Ni-10Cu	–	308	267	216	206
70Zr-12Fe-18Cu	–	306	279	216	198

Aluminiumbasissoldeer

De twee genoemde aluminiumsoldeersoorten hebben een matige afschuifsterkte. Een voordeel kan de lage soldeer-

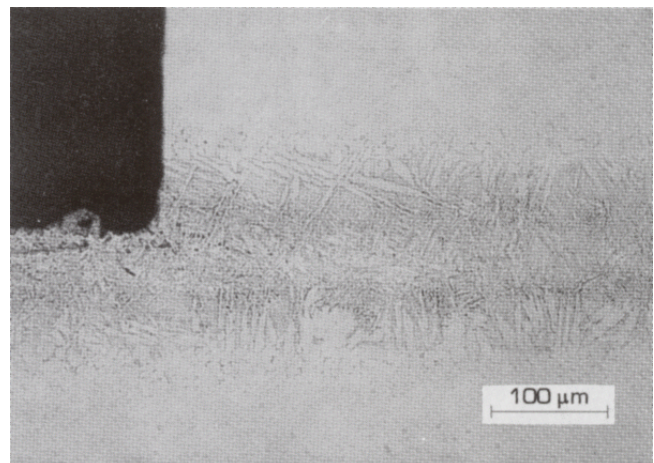
temperatuur zijn. De corrosiebestandheid in een zout milieu is redelijk.

Zilverbasissoldeer

Er zijn verschillende zilverbasis-soldeersoorten verkrijgbaar voor het hoogtemperatuursolderen van titaan. Veel soorten zijn gelegeerd met koper, waardoor de corrosie-vastheid achteruit gaat. Eutectisch zilverkoper 72Ag-28Cu heeft het voordeel dat het makkelijk verkrijgbaar is. De afschuifsterkte bij Ti kan 60 MPa bedragen. Het soldeer 82Ag-9Pd-9Ga heeft goede vloeieigenschappen. De verbindingen zijn sterker dan die van 72Ag-28Cu (90 MPa op Ti). De corrosievastheid is slecht.

Titaanbasissoldeer

Het foliesoldeer 70Ti-15Cu-15Ni wordt toegepast bij een soldeertemperatuur van 940 tot 960 °C, dat wil zeggen aan het eind van het liquidustraject (910-960 °C). Dit wordt gedaan om bij Ti-6Al-4V onder de overgangstemperatuur van de bètafase te blijven. Ook bij zuiver titaan levert dit een goede verbinding op ondanks de (te) hoge temperatuur. In beide gevallen ontstaat een typerende martensitische, naaldvormige diffusiestructuur (zie figuur 18.1). De corrosie-eigenschappen van de verbinding in een zout-oplossing en in een aangezuurde zoutoplossing (pH > 3) zijn goed voor zowel Ti als Ti-6Al-4V. Als aansluitend op het solderen een diffusiegloeibehandeling wordt uitgevoerd (4 uur op 920 °C), dan kan de sterkte van de verbinding zelfs nog toenemen. In de soldeermeniscus ontstaan dan echter poriën. Deze kunnen de corrosievastheid nadelig beïnvloeden.



figuur 18.1 Soldeerverbinding van Ti6-Al-4V met 70Ti-15Cu-15Ni-soldeer (foto TNO)

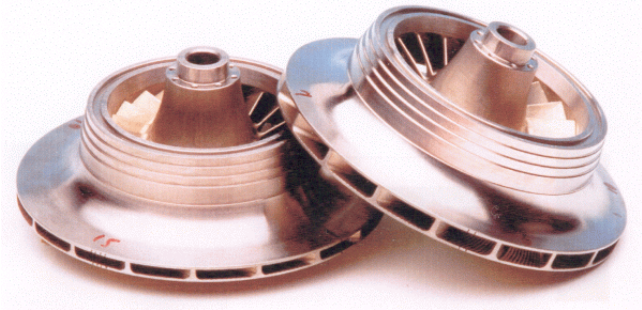
18.7 Controle en nabehandelingen

Visuele inspectie van gesoldeerde verbindingen van titaan of titaanlegeringen biedt mogelijkheden om de kwaliteit vast te stellen (verkleuringen, bevochtiging, meniscus-vorm). Voor kritische delen is niet-destructief onderzoek aan te bevelen (röntgen-, ultrasoon -, lekdichtheidsonderzoek). Daarnaast kan steekproefsgewijs destructief onderzoek (trekproef, structuuronderzoek) worden uitgevoerd.

18.8 Toepassingen

Titaan- en titaanlegeringen worden veelvuldig in de lucht- en ruimtevaart toegepast. Soldeerverbindingen vinden toepassing in honingraatsandwichpanelen, fittingen en

pijpen van hydraulische systemen. Ook de leidschoepen voor de inlaat van gasturbines, alsmede turbocompressorwaaiers (figuur 18.2) worden gesoldeerd. Uit oogpunt van sterkte- en corrosiegedrag wordt veelal de combinatie Ti-6Al-4V met Ti-Cu-Ni-soldeertype toegepast.



figuur 18.2 Vacuümgesoldeerde titaan turbocompressorwaaiers (foto Bodycote-Diemen)

Hoofdstuk 19

Hoogsmeltende metalen

19.1 Inleiding

Het lassen van hoogsmeltende metalen kan problematisch zijn. Hoogtemperatuursolderen kan dan uitkomst bieden. Echter, bepaalde voorzorgsmaatregelen moeten dan toch worden getroffen. Daarom worden enige aanwijzingen gegeven voor het hoogtemperatuursolderen van de hoogsmeltende metalen molybdeen, tantaal, wolfram en niobium.

19.2 Molybdeen

19.2.1 Eigenschappen

Ongelegeerd molybdeen rekristalliseert bij ongeveer 1175 °C. Door de toevoeging van legeringselementen, zoals titaan en zirkonium, wordt de rekristallisatietemperatuur verhoogd. Molybdeen begint reeds bij ca. 350 °C te reageren met zuurstof. Hierbij ontstaat MoO_3 , dat met MoO_2 een laag smeltend eutecticum vormt. De reactie met stikstof vindt pas plaats boven 1000 °C, terwijl molybdeen tot het smeltpunt bestand is tegen waterstof. Om deze reden wordt molybdeen bij voorkeur gesoldeerd in argon, waterstof of vacuüm.

19.2.2 Voorbehandelingen

De reiniging van het oppervlak dient onmiddellijk vóór het solderen plaats te vinden. De reiniging kan zowel mechanisch (stralen, schuren, slijpen) als chemisch (beitsen) zijn. De volgende beitsbaden worden met succes toegepast:

1. 95% H_2SO_4 , 4,5% HNO_3 , 0,5% HF, waaraan toegevoegd Cr_2O_3 (18,8 gram/liter);
2. 10% NaOH, 5% KMnO_4 , 85% H_2O , badtemperatuur: 60 tot 80 °C; badtijd: 5 tot 10 min; vervolgens
3. 15% H_2SO_4 , 15% HCl, 70% H_2O , waaraan toegevoegd chroomzuur (6 tot 10 gew.% per volume-eenheid).

19.2.3 Soldeermethoden en soldeermaterialen

Indien het solderen zorgvuldig geschiedt, wordt de ductiliteit van het molybdeen niet nadelig beïnvloed. De soldeerbaarheid kan worden verbeterd door het molybdeen te verkopen of te vernikkelen, waarna een diffusiebehandeling gedurende enige minuten in een waterstofatmosfeer bij 1000 °C moet worden uitgevoerd.

Voor het solderen in een argonatmosfeer wordt onder andere gebruik gemaakt van de volgende soldeermaterialen:

- 55Co-20Cr-15W-10Ni (smeltpunt 1390 °C), ook geschikt voor vacuüm;
- 80Ni-14Cr-6Fe (smeltpunt 1425 °C).

Bij het solderen in waterstof of in vacuüm wordt gebruik gemaakt van:

- zilverbasis-soldeermaterialen;
- kopernikkellegeringen;
- goud nikkel-soldeer;
- zilverpalladiummangaansoldeer;
- zuivere metalen, zoals platina en rhodium.

In tabel 19.1 wordt een overzicht gegeven van soldeermaterialen geschikt voor het solderen van molybdeen.

19.2.4 Controle en nabehandelingen

Controle op naadvulling kan visueel en met NDO-technieken plaatsvinden. Indien de constructie daartoe geschikt is, kan lektheidsonderzoek worden aanbevolen.

tabel 19.1 Soldeermaterialen voor het solderen van hoogsmeltende metalen (vrij naar L. Dorn)

basismetaleel type	soldeersoort	smelttraject $T_{\text{sol}} \dots T_{\text{liq}}$ [°C]
Nb, Ta, Mo	90Ag-10Pd ¹⁾	1000...1065
	82Cu-18Pd	1080...1090
	60Pd-40Ni	1238
	65Ag-20Cu-15Pd ¹⁾	850...900
	82Au-18Ni	950
	62Cu-35Au- 3Ni	980...1025
	65Pd-35Co	1120
	60Cu-40Pt	1200...1250
	54Ag-24Pd-21Cu ¹⁾	900...950
	95Cu-5Ni	1090...1120
Nb, Ta	100Ti	1672
	70Ti-30V	1630
	100Zr	1855
	78Zr-22Nb	1730...1740
	80V-20Ti	1720...1740
	65V-35Nb	1810...1890
	66Zr-34Ta	1645...1850
Mo, W	97,8Nb-2,2B	2100...2200
	97Nb-3B	2100...2200
	90Nb-10Ti	2370...2420
	80Nb-20Ti	2200...2260
	90Nb-10V	2260...2420
	80Nb-20V	2200...2350
	85Nb-15Ni	2200
	95Nb-5Ni	2260...2420
	75Ta-25V	2170...2340
	75Ta-25Pd	1990
W	100Nb	2468
	100Ag	960
	100Ni	1452
	100Ta	2996
	100Cu	1083

1) De zilverbasis-soldeersoorten kunnen tantaal doen verbrossen

19.3 Tantaal

19.3.1 Eigenschappen

Afhankelijk van de grootte van de koude deformatie rekristalliseert zuiver tantaal bij ongeveer 1200 °C. Door de toevoeging van legeringselementen kan deze rekristallisatietemperatuur zowel hoger als lager komen te liggen. Reeds bij betrekkelijk lage temperaturen worden alle gasen, behalve de edelgassen, door het tantaal opgenomen, waardoor het materiaal bros wordt. Indien bijvoorbeeld tantaal aan de lucht wordt verhit, bestaat reeds bij een temperatuur van ongeveer 250 °C het gevaar dat het materiaal bros wordt.

19.3.2 Voorbehandelingen

Voor het verwijderen van vuil en oxiden wordt aanbevolen om gedurende 0,5 tot 2 minuten, bij kamertemperatuur, te beitsen in het volgende beitsbad:

55 vol.% H_2SO_4 , 25 vol.% HNO_3 en 20 vol.% HF.

Een andere methode (in drie stappen) is:

1. oppervlak stralen met staalgrit;
2. onderdompelen in een HCl-oplossing om ijzerdeeltjes te verwijderen;
3. onderdompelen in een oplossing van 95% H_2SO_4 , 4,5% HNO_3 en 0,5% HF waaraan 18 g/l Cr_2O_3 is toegevoegd.

Onmiddellijk na het reinigen wordt de taai oxidehuid weer op het tantaal gevormd. Om deze reden wordt het oppervlak wel vernikkeld, waarna een diffusiebehandeling bij een druk van 10^{-3} mbar plaatsvindt bij ongeveer 1200 °C.

19.3.3 Soldeermethoden en soldeermaterialen

Vanwege de gevoeligheid voor gasen wordt tantaal uitsluitend in vacuüm, in argon of helium gesoldeerd. Voor het solderen van tantaal wordt onder andere gebruik gemaakt van zuivere metalen zoals platina, palladium, niobium en nikkel. Een bezwaar kunnen de zeer hoge smelttemperaturen zijn (respectievelijk 1790, 1539, 2468 en 1452 °C). Ook worden metalen als Ti, Zr en V als soldeer gebruikt, terwijl soldeersoorten op nikkelbasis eveneens toegepast worden, zoals:

- Ni-Cr-Si-B-soldeer;
- Ni-Cr-Si-soldeer.

Van goudbasis-soldeersoorten kunnen de goudkopersoldeersoorten worden toegepast (goudgehalte minder dan 40 procent). De zilverbasis-soldeersoorten kunnen niet worden gebruikt, omdat zij het tantaal bros maken. Zie ook de tabellen 19.1 en 19.2 voor andere soldeermaterialen.

tabel 19.2 Soldeermaterialen op hafnium- en niobiumbasis voor het solderen van tantaal (naar W. Müller)

Hf	Nb	andere elementen	T _{sol} [°C]	T _{liq} [°C]	T _{soldeer} [°C]
rest	–	15...20Ti 10...15V	1520...1577	1532...1593	–
rest	–	10...20Ti 5...7Mo	1632...1855	1638...1882	–
rest	–	7...10Mo 5...10Zr	1805...2000	1915...2010	–
rest	–	7...10Mo	1938...1955	1995...2038	–
rest	50	–	–	–	2275
rest	70	–	–	–	2375
rest	70	20Ta	–	–	2475
rest	50	40Ta	–	–	2500
–	70	30Ta	–	–	2575
–	50	50Ta	–	–	2600

19.3.4 Controle en nabehandelingen

Controle op naadvulling kan visueel en met NDO-technieken plaatsvinden. Afhankelijk van de constructie kan lek-dichtheidsonderzoek worden toegepast.

19.4 Wolfram

19.4.1 Eigenschappen

Wolfram is één van de hoogst smeltende metalen. Het materiaal vormt hoogsmeltende oxiden (WO₃ smeltpunt 1473 °C). Reductie in waterstof doet WO₂ vormen en ook W₂O₅. De overgangstemperatuur voor wolfram ligt, afhankelijk van de reksnelheid, legeringstoevoegingen, onzuiverheden, warmtebehandelingen en dergelijke, tussen 260 en 370 °C. Daarboven gedraagt het materiaal zich ductiel. Hiervan kan bij het bewerken gebruik worden gemaakt. De rekristallisatietemperatuur ligt tussen 1200 en 1650 °C.

19.4.2 Voorbehandelingen

Bij het bewerken van wolfram dient te worden gewaakt voor opname van koolstof; dit vormt carbiden. Bij het ontvetten met organische ontvettingsmiddelen dienen geen resten achter te blijven. Wolfram kan worden gebeitst in:

- een 20% KOH oplossing (kokend) door onderdompeling;
- een elektrolytische etsing in een 20% KOH oplossing;
- een chemische etsing in een oplossing van 50 vol.% HNO₃ en 50 vol.% HF;
- gesmolten NaOH;
- gesmolten NaH (natriumhydride).

Ter verbetering van de bevochtiging wordt wolfram vaak vernikkeld of verkoperd.

19.4.3 Soldeermethoden en soldeermaterialen

Wolfram kan worden gesoldeerd in vacuüm, in een argon- of heliumatmosfeer, terwijl ook een waterstofatmosfeer kan worden toegepast. Als soldeermaterialen kunnen zilverbasis-, nikkelchroombasis-, edelmetaalbasis- (Au, Pd, Pt) en reactieve metaalbasis-soldeersoorten (Ti, Be, Zr) worden gebruikt. Ook Ta-, Nb- en Mo-legeringen kunnen als soldeersoorten worden toegepast. Het is aan te bevelen een soldeermateriaal te kiezen dat wordt toegepast onder de rekristallisatietemperatuur (1200-1650 °C), teneinde de mechanische sterkte te behouden. Zie ook tabel 19.1 voor andere soldeermaterialen.

19.4.4 Controle en nabehandelingen

Naast visuele inspectie kan de vulling van de naad met andere NDO-technieken worden vastgesteld. Lekdichtheidsonderzoek leent zich voor daartoe geschikte constructies.

19.5 Niobium

19.5.1 Eigenschappen

De overgangstemperatuur van niobium ligt laag, namelijk tussen –200 en –75 °C. Dit betekent dat het materiaal bij kamertemperatuur en daarboven ductiel is. De rekristallisatietemperatuur ligt voor niobium tussen 985 en 1150 °C. Niobium vormt harde, brosse oxiden boven 205 °C. Dit element wordt evenals tantaal verbrost door waterstof bij betrekkelijke lage temperatuur; deze metalen verbrossen ook door stikstof bij hoge temperatuur.

19.5.2 Voorbehandelingen

Bij het bewerken dient te worden gewaakt voor opname van koolstof en inwerking van zuurstof en stikstof. Beitsen waarbij waterstofontwikkeling optreedt, dient te worden vermeden. Bij het ontvetten mogen geen organische ontvettingsmiddelen achter blijven.

Niobium kan als volgt worden gereinigd:

1. ontvetten;
2. onderdompelen in commercieel verkrijgbare alkalische reinigingsmiddelen gedurende 5 tot 10 minuten;
3. spoelen met water;
4. onderdompelen in 35 tot 40% HNO₃ gedurende 2 tot 5 minuten bij kamertemperatuur;
5. spoelen met leidingwater gevolgd door spoelen met gedestilleerd water;
6. met perslucht drogen.

19.5.3 *Soldeermethoden en soldeermaterialen*

Als soldeermaterialen kunnen worden genoemd:

- ▶ palladium en palladium-koper, zij gedragen zich beide erosief, maar zijn ductiel;
- ▶ titaan en Ti-Cr-V-Al, zij gedragen zich beide weinig erosief en zijn ook ductiel.

Het laatste soldeer is als een "wide-gap" soldeer te gebruiken (een soldeer om een brede niet-capillaire spleet mee te vullen). Ook V en Zr worden als soldeer toegepast. Gezien de reactiviteit van niobium met waterstof, zuurstof, stikstof en koolstof, kunnen als soldeeratmosfeer slechts vacuüm of argon of helium worden toegepast. Een laag dauwpunt is dan belangrijk, evenals een lage inlek. Zie ook tabel 19.1 voor andere soldeermaterialen.

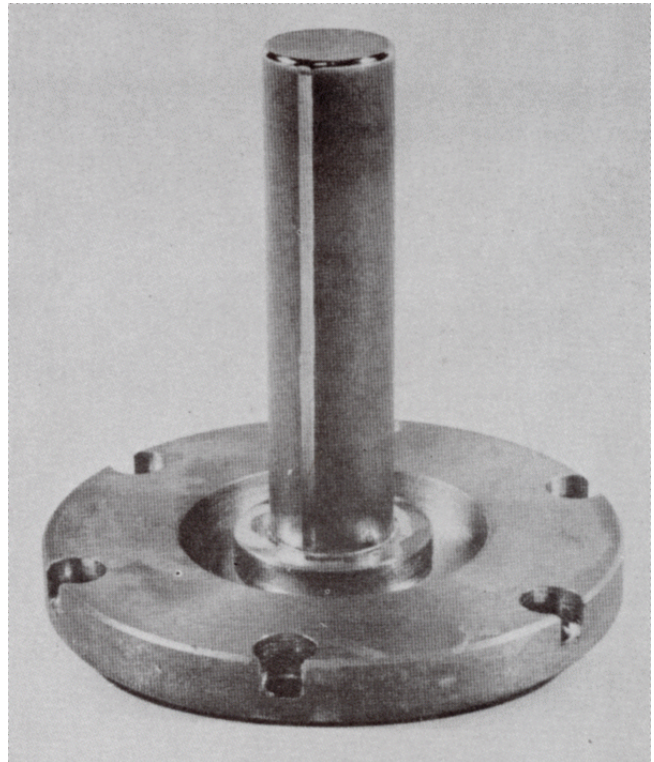
19.5.4 *Controle en nabehandelingen*

De naadvulling kan naast visuele inspectie met NDO-technieken worden vastgesteld. Zich daartoe lenende constructies kunnen op lekdichtheid worden onderzocht.

19.6 *Toepassingen*

Veel toepassingen worden gevormd door combinatie van hoogsmeltende metalen met andere materialen (onder andere keramiek). Enkele voorbeelden hiervan zijn:

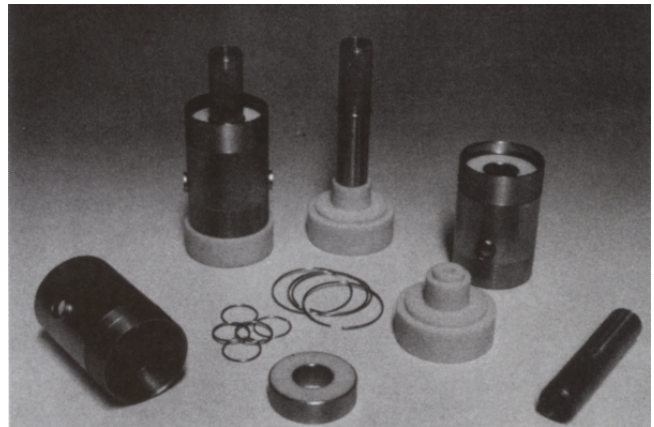
- ▶ onderdeel van een versnellingsbuis van een elektronenmicroscop, opgebouwd uit molybdeen en saffier en gesoldeerd met een zilverbasissoldeer (figuur 19.1);
- ▶ indirect verhitte kathodes toegepast in proefopstellingen ten behoeve van fundamenteel onderzoek (figuur 19.2);
- ▶ onderdeel van een elementaire deeltjesversneller gesoldeerd met koperbasissoldeer en vervaardigd uit niobium en Al_2O_3 -keramiek (figuur 19.3).



figuur 19.2 Indirect verhitte kathode; buis en kop zijn van wolframplaat (0,5 mm) en flens is van molybdeen. De constructie is HF-inductief gesoldeerd in vacuüm (foto FOM)



figuur 19.1 Onderdeel van een versnellingsbuis ten behoeve van een elektronenmicroscop, opgebouwd uit molybdeen en saffier en gesoldeerd met een zilverbasissoldeer (foto Philips)



figuur 19.3 Onderdeel van een elementaire deeltjesversneller (links van het midden) en diverse componenten waaruit dit onderdeel is opgebouwd. Materialen: Niobium en Al_2O_3 -keramiek en koperbasissoldeer (foto Philips)

Hoofdstuk 20

Hardmetaal

20.1 Inleiding

Hardmetaalsoorten zijn opgebouwd uit metaalcarbiden die worden bijeengehouden door een metallische binder. Fabricage en vormgeving vinden plaats door middel van poedermetallurgische processen zoals persen en sinteren. Deze metaalsoorten hebben een zeer hoge hardheid, warmvastheid en slijtvastheid en vinden dan ook veel toepassing als snijgereedschap of als constructie-onderdelen die een zeer hoge weerstand moeten bezitten tegen abrasieve slijtage, corrosie of hitte.

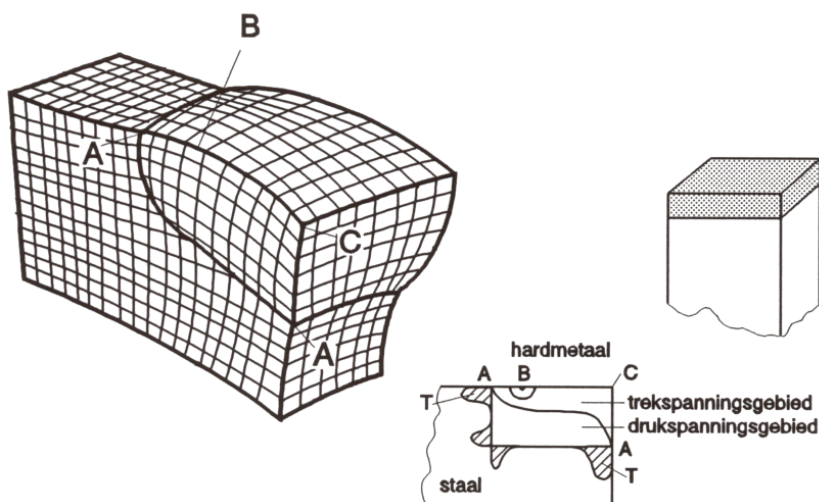
Het merendeel van de gangbare hardmetaalsoorten bestaat uit wolframcarbiden, soms met meer of minder titaan- en tantaalcarbiden, waarbij kobalt als binder dienst doet. Dit kobalt-aandeel ligt normaal tussen de 6 en 15-20 gewichtsprocenten.

Naast deze bestaan er ook soorten waarin zich titaan-, tantaal- of chroomcarbiden bevinden en waarin nikkel of hardbaar staal als binder wordt gebruikt.

20.2 Materiaalcombinaties

Het solderen van hardmetaal aan staal heeft als complicatie het grote verschil in thermische uitzettingscoëfficiënt. Hierdoor ontstaan bij grotere soldeeroppervlakken c.q. -lengten, na afkoeling zulke hoge spanningen, dat de soldeernaad losscheurt of in het ergste geval het hardmetaal breekt. Men moet streven naar één soldeervlak. Een eventueel noodzakelijk tweede vlak mag niet hoger zijn dan dertig procent van de hardmetaaldikte in die richting. Tot oppervlakken van ca. 100 mm² of lengten tot 10 mm zijn geen bijzondere maatregelen nodig. Daarboven moet de naadconstructie zodanig zijn, dat de genoemde spanning wordt afgebouwd. Dit kan constructief door in het staal onderbrekingen in het soldeervlak aan te brengen (zie ook figuur 20.1).

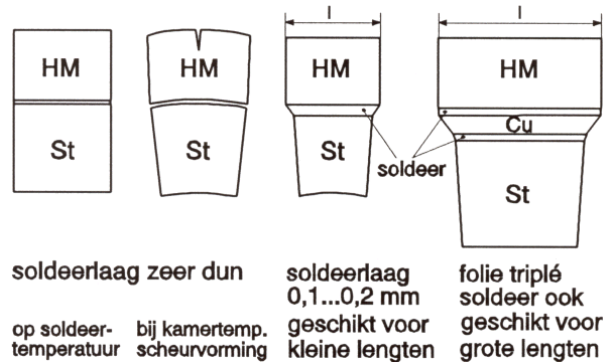
Een andere methode is het aanbrengen van een ductiele tussenlaag in de soldeernaad, zoals folie, gaas of band van koper, nikkel of fernico. In de handel zijn hiervoor speciale triplé-soldeersoorten verkrijgbaar.



figuur 20.1 Voorbeeld van spanningsafbouw door in het staal onderbrekingen op het soldeervlak aan te brengen

Voor het hoogtemperatuursolderen in vacuüm komen echter alleen die soorten in aanmerking, die vrij zijn van metalen met een hoge dampspanning, zoals bijvoorbeeld zink en cadmium.

Figuur 20.2 toont de invloed van de soldeernaaddikte op de gevoeligheid van scheurvorming in het hardmetaal.



figuur 20.2 De invloed van de soldeernaaddikte op de gevoeligheid van scheurvorming in het hardmetaal (HM) gesoldeerd op staal (St)

20.3 Eigenschappen

Doordat hardmetaal grotendeels uit carbiden bestaat, laat het zich minder goed door vloeibaar soldeer bevochtigen als de gebruikelijke staalsoorten. Daarnaast is de thermische uitzettingscoëfficiënt ongeveer de helft van die van ferritisch staal, waardoor bij deze materiaalcombinatie spanningen in de soldeernaad en de constructiedelen ontstaan. Dit kan leiden tot beschadiging van de soldeerverbinding of van het brosse hardmetaal.

20.4 Voorbehandelingen

Het sinterproces kan een nadelige invloed hebben op de bevochtiging van het soldeeropervlak tijdens het solderen. Om dit uit te sluiten moet het soldeervlak worden geslepen. Dit garandeert tevens een betere beheersing van de soldeerspleet.

In sommige gevallen kan in overleg met de hardmetaalfabrikant een zodanig sinteroppervlak worden verkregen, dat hierop rechtstreeks kan worden gesoldeerd.

De soldeervlakken moeten, voordat de soldeerbewerking wordt uitgevoerd, grondig worden ontvet. Ter beschikking zijn:

- ▶ organische oplosmiddelen;
- ▶ alkalisch ontvetten en vervolgens goed spoelen in demi-water.

Bij het solderen met zilverbasissoldeer van hardmetaal-soorten met een kobaltgehalte lager dan 8 procent, is het noodzakelijk het soldeervlak te bedekken met een goed hechtende koper- of nikkellaag. Het is aan te bevelen om met koper of nikkel bedekte producten voor het solderen een diffusiegloeibehandeling te geven: 10 minuten op 800-850 °C in vacuüm (10^{-3} mbar) of in waterstof. Door deze behandeling wordt de hechting van de opgebrachte laag gecontroleerd (slechte hechting geeft bobbel) en verbeterd.

20.5 Soldeermethoden

Wanneer hardmetaal aan hardmetaal wordt gesoldeerd, moet men er op letten dat niet te snel wordt opgewarmd of afgekoeld. Te snelle afkoeling van grotere delen veroorzaakt spanning in dit stijve en brosse materiaal, waardoor scheuren in de soldeernaad of het hardmetaal kunnen optreden. Om deze reden geeft een inductieve verhitting een groter risico op beschadiging van het hardmetaal dan een soldeerbehandeling in een oven, uitgevoerd onder beschermend gas of in vacuüm.

De bevochtiging van het hardmetaal door vloeibaar soldeer is afhankelijk van de gebruikte soldeersoort en -methode.

De carbiden in het hardmetaal hebben een geringe neiging tot reageren en worden daardoor minder goed bevochtigd door de gebruikelijke universele soldeersoorten. Dit is de reden, waarom speciaal voor hardmetaal ontwikkelde soldeersoorten elementen bevatten als mangaan samen met nikkel en/of kobalt. Daar ook mangaan een vrij hoge dampspanning heeft, zijn deze soorten minder geschikt om in hoogvacuümovens te worden gebruikt, tenzij men werkt met een "partieel druk". Het eerste deel van een dergelijke soldeerbehandeling wordt uitgevoerd onder hoogvacuüm ($p < 10^{-3}$ mbar). Vanaf 600-800 °C, voordat het soldeer smelt, vult men de oven met een reducerend of beschermend gas, waarvan de druk ligt tussen de 1 en 20 mbar (solderen onder deeldruk).

Hieronder volgt een samenvatting van de belangrijkste punten waarop moet worden gelet bij het solderen van hardmetaal aan staal.

- ▶ de verhouding in materiaaldikte tussen hardmetaal en staal moet ongeveer 1 : 3 bedragen;
- ▶ de te solderen oppervlakken moeten vlak zijn maar niet te glad;
- ▶ de productonderdelen moeten goed worden gereinigd en ontvet;
- ▶ afhankelijk van het hardmetaal en de toepassing moet de juiste soldeersoort worden gekozen;
- ▶ bij de constructie moet worden gestreefd naar één soldeervlak, een eventueel opstaand vlak mag maximaal 1/3 van de hardmetaaldikte zijn;
- ▶ de te solderen constructie moet gelijkmatig langzaam worden opgewarmd en langzaam worden afgekoeld.

20.6 Soldeermaterialen

De koperbasis-soldeersoorten hebben een verwerkings-temperatuur van 1000-1150 °C en kunnen in soldeerverbindingen hogere temperaturen en belastingen verdragen.

Ook heeft koper bij voldoende soldeernaaddikte op kamertemperatuur (0,1 - 0,2 mm) een betere ductiliteit dan de zilverbasis-soldeersoorten. Het gevaar is echter aanwezig, dat door de hogere soldeertemperatuur toch een grotere spanning in de naad ontstaat bij het afkoelen. Wanneer deze problematiek zich voordoet, kan nikkel of fernico band/folie als tussenlaag in de soldeernaad worden toegepast.

In tabel 20.1 is een aantal geschikte koperbasis-soldeersoorten vermeld met olopende soldeertemperaturen.

tabel 20.1 Koperbasis-soldeersoorten voor hardmetaal

soldeersoort	nominale chemische samenstelling in %						soldeertemperatuur [°C]
	Cu	Mn	Ni	Co	Pd	overige	
85Cu-15Mn	85	15					970-1000
86Cu-12Mn-2Ni	86	12	2				990-1020
87Cu-10Mn-3Co	87	10		3			1020-1050
100Cu	100						1090-1120
82Cu-18Pd	82				18		1090-1120
87Cu-2,5Mn-0,5Si	97		2,5			Si 0,5	1100-1130

Van de groep zilverbasis-soldeersoorten komen alleen de zink- en cadmiumvrije soorten in aanmerking. Bij gebruik van zilverkoperlegeringen moeten de soldeervlakken van het staal of hardmetaal met minder dan 8 procent kobalt, voorzien zijn van een goed hechtende nikkel- of koperlaag. De met mangaan, nikkel, palladium en/of kobalt gelegerde soorten kunnen ook op onbedekt hardmetaal en staal worden gebruikt. Bij de zilverbasis-soldeersoorten wordt eventueel koper als tussenlaag gebruikt. Door de lagere soldeertemperatuur zijn de energiekosten lager dan die bij de koperbasis-soldeersoorten.

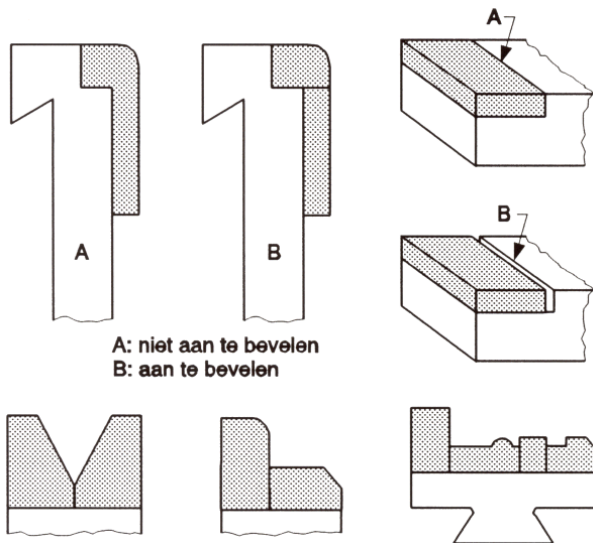
In tabel 20.2 is een aantal voor solderen van hardmetaal geschikte zilverbasis-soldeersoorten vermeld met olopende soldeertemperaturen.

tabel 20.2 Zilverbasis-soldeersoorten voor hardmetaal

soldeersoort	nominale chemische samenstelling in %						soldeertemperatuur [°C]
	Ag	Cu	Sn	Ni	Mn	ander	
60Ag-30Cu-10Sn	60	30	10				720-750
56Ag-26Cu-14In-4Ni	56	26		4		In 14	730-760
72Ag-28Cu	72	28					800-830
65Ag-20Cu-15Pd	65	20				Pd 15	900-930
40Ag-58Cu-2Ni	40	58		2			900-930
85Ag-15Mn	85				15		970-1000

Verder kunnen ook nikkelbasis- of edelmetaalbasis-soldeersoorten worden gebruikt. De constructie en de uitvoering van het soldeerproces moeten terdege door een soldeerspecialist worden bekeken. Soldeerverbindingen tussen hardmetaal en staal kunnen ondanks de reeds optredende eigenspanning aanzienlijke sterkten bereiken. Deze wordt echter steeds sterk beïnvloed door de constructie van het onderdeel en de geometrie van de naad.

Voorbeelden van productdeling om breuk tengevolge van spanning te voorkomen worden gegeven in figuur 20.3.



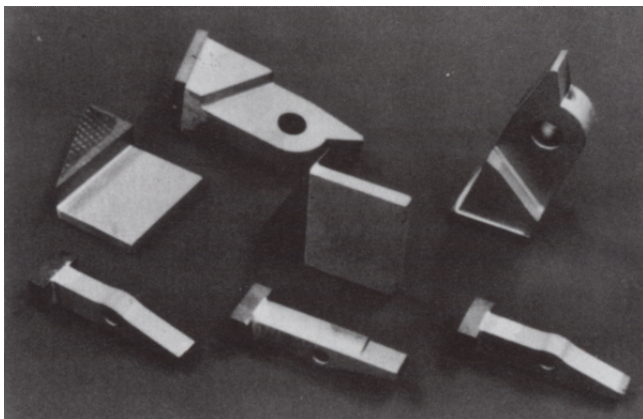
figuur 20.3 Voorbeelden van productdeling om breuk ten gevolge van spanning te voorkomen

20.7 *Controle en nabehandelingen*

Controle op hechting kan door middel van visuele inspectie en NDO-technieken worden uitgevoerd; vooral controle op kromtrekken van hardmetaal-staalverbindingen is belangrijk.

20.8 *Toepassingen*

In figuur 20.4 worden enkele voorbeelden getoond van gesoldeerde hardmetaal-staalverbindingen.



figuur 20.4 Enkele voorbeelden van vacuüm-gesoldeerde hardmetaal-staal verbindingen (foto Bodycote-Diemen)

Hoofdstuk 21

Keramik

21.1 Inleiding

Het toenemende gebruik van keramische materialen voor industriële toepassingen is te danken aan hun goede isolerende, slijt- en corrosiebestendige eigenschappen, alsmede de uitstekende eigenschappen bij hoge temperaturen. Het komt hierbij veelvuldig voor dat deze materialen moeten worden verbonden aan een metaal. De belangrijkste keramische materialen zijn: steatiet, de aluminiumoxiden, de zirkoniumoxiden, de siliciumnitriden, de siliciumcarbiden en de sialons (SiAlON).

Steatiet wordt veel toegepast voor elektronische onderdelen, vanwege de goede sterkte en de betrekkelijk lage kosten.

Aluminiumoxiden worden toegepast waar hogere eisen worden gesteld en als duurdere materialen toelaatbaar zijn. De elektrische eigenschappen (met name de isolerende) zijn aanzienlijk beter dan van steatiet.

Zirkoniumoxiden, vooral de partieel gestabiliseerde typen (PSZ), worden toegepast vanwege hun ductiel gedrag ($T < 1000^\circ\text{C}$).

Siliciumnitriden en **siliciumcarbiden** vinden vooral toepassing in constructies die aan hoge belasting bij hoge temperaturen worden blootgesteld (bijvoorbeeld in automotoren). Sommige **sialon** typen hebben betere eigenschappen dan de siliciumnitriden en worden bijvoorbeeld ook toegepast in bewerkingsgereedschappen (bijvoorbeeld beitelpaten).

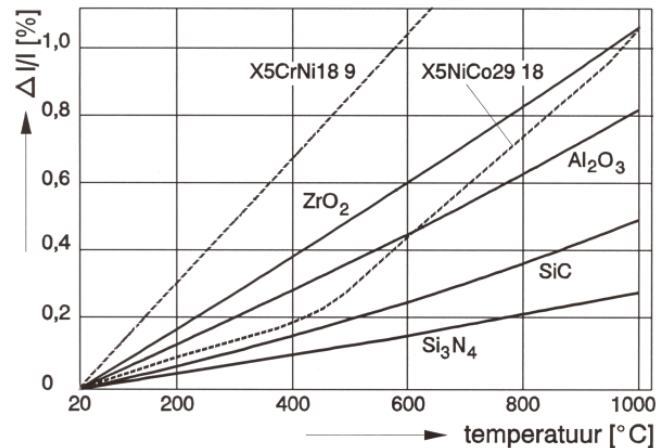
Afhankelijk van de fabricagewijze zijn bepaalde typen nitriden en carbiden beter metalliseerbaar (en vervolgens soldeerbaar) dan andere. Zo zijn de niet-vrije silicium bevattende HP- en HIP-typen beter soldeerbaar dan RB- en S-typen, die wel vrij siliciumhoudend zijn.

21.2 Materiaalcombinaties

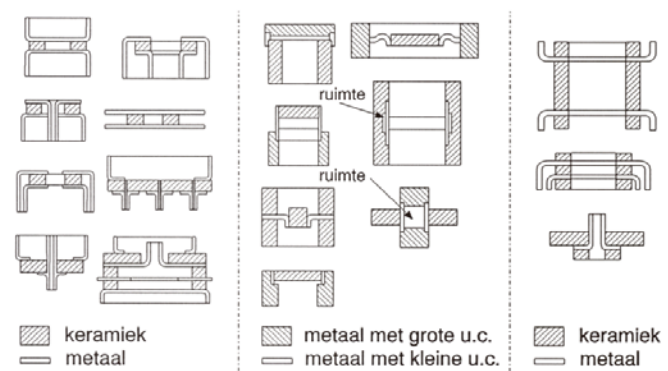
De keramische materialen worden niet zonder meer bevochtigd door soldeerlegeringen. Het vloeibare soldeer trekt zich samen op het keramische materiaal (ontvochtiging). Keramiek moet daarom eerst worden voorzien van een metalen hechtlaag. Een ander probleem is het grote verschil van de uitzettingscoëfficiënten van keramisch materiaal en de gebruikelijke metalen. Om een goede verbinding te verkrijgen moet het uitzettingsgedrag ongeveer gelijk zijn (figuur 21.1). Een metaal dat deze eigenschap bezit ten opzichte van aluminiumoxide is Kovar of Fernico (29% nikkel, 17% kobalt en 54% ijzer) of Ti-6Al-4V. Voor siliciumnitride, siliciumcarbide of sialon kunnen dat metalen als molybdeen, tantaal of wolfram zijn. Ook ductiele metalen met een grotere uitzettingscoëfficiënt als koper of nikkel kunnen worden toegepast.

Een andere voorwaarde voor het verkrijgen van bruikbare keramiek/metaalconstructies vormen de mechanische eigenschappen zoals de E-modulus, de poissonconstante en de rekgrens van het metaal alsmede hun invloed op het vervormingsvermogen van het metaal.

Voorts dienen de te verbinden keramiek/metaaldelen constructief qua geometrie op elkaar te zijn aangepast. Enkele voorbeelden van keramiek/metaalconstructies worden gegeven in figuur 21.2.



figuur 21.1 Lineaire uitzetting van enkele keramieksoorten en metalen



figuur 21.2 Voorbeelden van keramiek-metaalconstructies bedoeld voor soldeerverbindingen (figuur AWS)

21.3 Eigenschappen

In tabel 21.1 wordt een overzicht gegeven van de eigenschappen van de in de inleiding genoemde keramische materialen.

tabel 21.1 Eigenschappen van enige keramieksoorten ¹⁾

	Al ₂ O ₃ (99,7%)	ZrO ₂ ·Y ₂ O ₃ (PSZ)	SiAlON (β'-type)	Si ₃ N ₄ (HO)	SiC (SSiC)
soortelijke massa (kg/m ³)	3980	5780	3245	3200	3100
buigsterkte (MPa)	340	610	945	900	485
elasticiteitsmodulus (GPa)	320	200	290	310	410
breuktaaiheid (K _{IC}) (MPa ^{1/2})	4	10	7	7	4
uitzettingscoëfficiënt (× 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	8,0	10,6	3,0	3,2	4,3
warmtegeleidingscoëfficiënt (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	26	2	21	28	100
elektrische weerstand (Ω cm)	10 ¹⁴	10 ⁹	–	10 ¹³	10 ²

1) De opgegeven waarden zijn indicatief

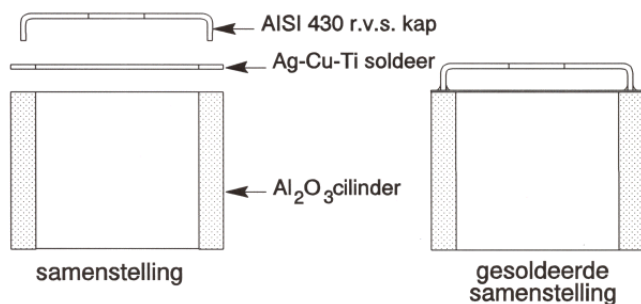
21.4 Voorbehandelingen

Keramisch materiaal is beter tegen druk- dan tegen trekspanning bestand. Daarom moet, voor zover mogelijk, het keramische deel in het metalen deel worden geplaatst.

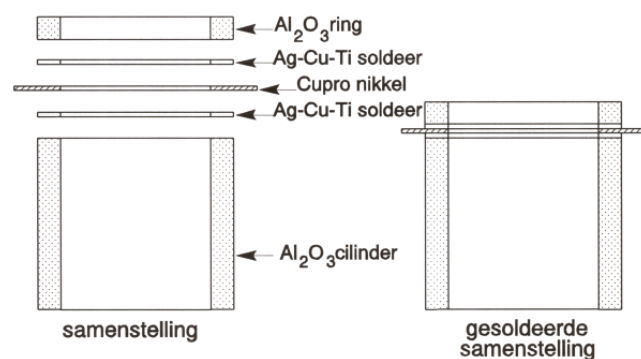
Stel dat de binnenzijde van een dergelijke constructie uit aluminiumoxide of zirkoniumoxide bestaat. Als voor de buitenzijde Kovar, Monel (CuNi), Ti6-Al-4V, AISI 430 of AISI 410 wordt gebruikt, dan zal dit na het solderen druk uitoefenen op het keramisch materiaal. De genoemde metalen hebben namelijk een grotere uitzetting bij hogere temperaturen. Voor siliciumnitride, siliciumcarbide of sialon kan als metalen deel molybdeen, wolfram of tantaal worden toegepast.

Als het metalen deel binnen het keramische materiaal wordt geplaatst dan moet de spleetbreedte zodanig worden gekozen, dat deze groot genoeg is om de uitzetting van het metaal te kunnen opvangen. In dit geval moet de soldeernaad een bepaalde minimale dikte bezitten om weerstand te kunnen bieden aan de krimpspanningen die tijdens het afkoelen ontstaan.

Naast het zogenaamde omtrek- of overlapsolderen, wordt ook wel het zogenaamde kops-solderen toegepast voor keramiek/metaalverbindingen (zie figuur 21.3). Behalve het keramische materiaal moet soms ook het metalen deel worden voorbehandeld. Kovar dient vóór het solderen spanningsarm te worden gegloeid, terwijl het ook dient te worden vernikkeld als een zilverbasisoldeer wordt toegepast, teneinde penetratie van het vloeibare soldeer te voorkomen.



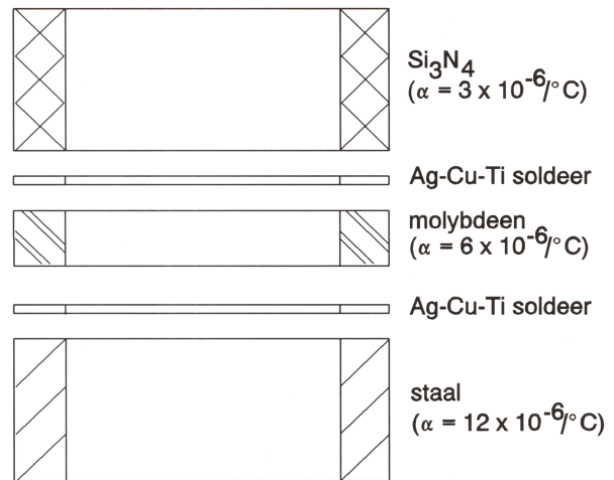
figuur 21.3a Kopse soldeerverbinding (figuur Wesgo)



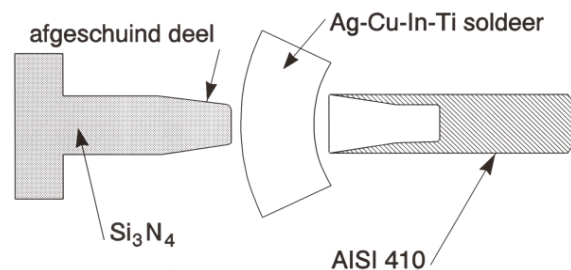
figuur 21.3b Sandwich type verbinding (figuur Wesgo)

21.5 Soldeermethoden

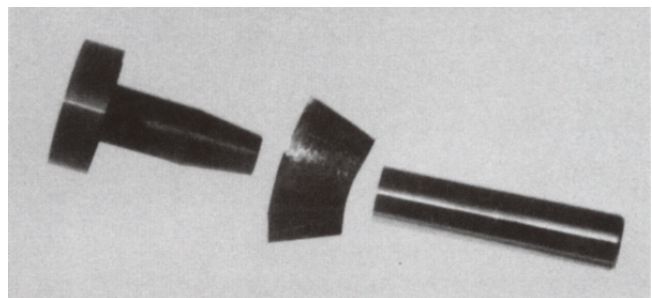
Keramisch materiaal wordt gesoldeerd in ovens met een reducerende atmosfeer of vacuüm. Voor de verbinding van keramisch materiaal aan metaal zijn verschillende methoden ontwikkeld en wel: metalliseren volgens de molybdeen-mangaanmethode en vervolgens solderen in een reducerende atmosfeer c.q. vacuüm of de actieve metaal-methode toegepast in vacuüm (N.B. *niet in een reducerende atmosfeer die waterstof- of stikstofhoudend is*).



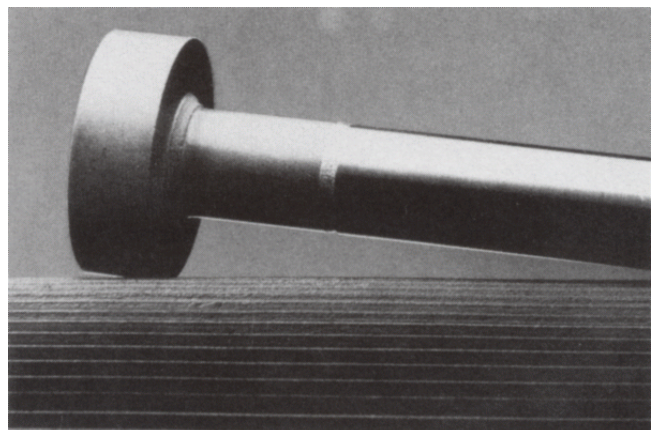
figuur 21.3c Sandwich type verbinding met overgangsstuk (figuur Wesgo)



figuur 21.3d Keramiek-metaalverbinding met afgeschuind deel (figuur Wesgo)



figuur 21.3e Vóór solderen (foto Wesgo)



figuur 21.3f Na solderen (foto Wesgo)

Molybdeen-mangaan procédé

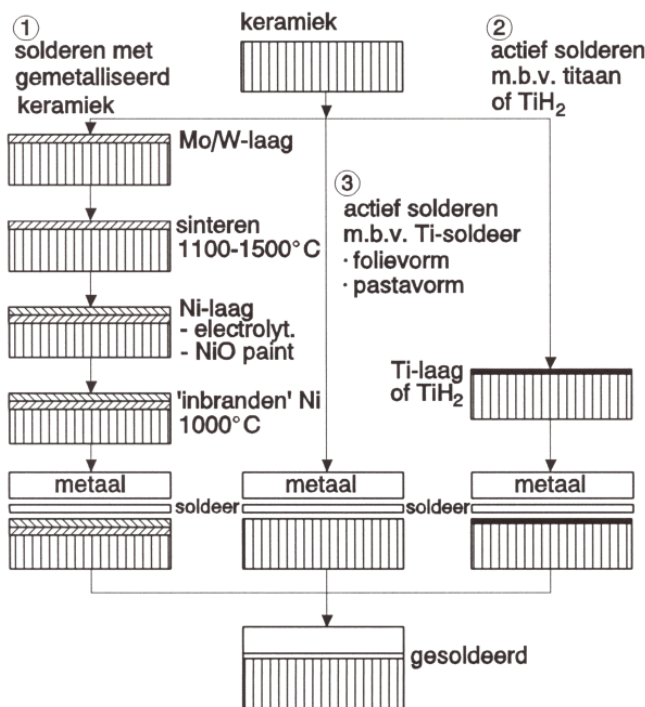
Deze methode van metalliseren wordt zeer veel gebruikt voor elektrotechnische toepassingen. Een dunne laag (10 tot 50 μm) van een fijn gemalen molybdeen-mangaanmengsel in suspensie wordt op het keramische materiaal aangebracht. Vervolgens vindt een warmtebehandeling plaats in een vochtige waterstof of andere reducerende atmosfeer bij ongeveer 1500 °C. De aldus verkregen metallische laag wordt vernikkeld of verkoperd en vervolgens bij circa 1000 °C ingestookt. Hierdoor wordt een goede bevochtiging door het soldeer mogelijk.

Ook molybdeen- of wolframhoudende pasta's worden tegenwoordig gebruikt. De laatste worden bij hogere temperatuur gemetalliseerd, terwijl de Mo-houdende pasta's al bij 1100-1150 °C worden toegepast in een natte stikstof/waterstofatmosfeer.

Actief metaalprocédé

Bij deze werkwijze wordt gebruik gemaakt van gevormd soldeer dat een actief metaal zoals titaan, zirkonium of hafnium bevat. Het soldeer wordt tussen het keramische en het metalen deel geplaatst, waarna in vacuüm wordt verhit. De soldeerlegering vormt een verbinding met het metaal, terwijl het actieve metaal een reactie tot stand brengt met het keramische materiaal, waardoor een verbinding met het soldeer ontstaat. Ook wordt de methode toegepast, waarbij een titaanhydridelaag op het keramische deel wordt aangebracht; vervolgens wordt het soldeer (zilverbasisstype) tussen metaal en TiH_2 -laag geplaatst (zie ook figuur 21.4).

In figuur 21.3 (a t/m f) wordt op schematische wijze weergegeven welke stappen worden doorlopen bij het solderen van keramiek-metaalverbindingen.



figuur 21.4 Drie manieren om keramiek-metaalverbindingen te vervaardigen

21.6 Soldeermaterialen

De keuze van het soldeer wordt bepaald door het fabricageproces en de gebruiksomstandigheden. Zo moet bijvoorbeeld voor vacuümtoepassingen het soldeer vrij zijn van bestanddelen met een hoge dampspanning, zoals zink, cadmium en lood. Bovendien moet het soldeer een voldoende hoog smeltpunt bezitten om weerstand te kunnen bieden tegen deformatie, spanningen en thermische behandelingen tijdens het verdere fabricageproces. Een soldeer dat aan deze eisen voldoet en vaak wordt toegepast is het eutectische zilverkopersoldeer (72Ag-28Cu). Dit soldeer bevochtigt de meeste metalen en legeringen zeer goed; voor de meeste toepassingen is de dampspanning van de componenten voldoende laag en het smeltpunt is meestal voldoende hoog. Ook worden zilverkoperpalladium-, goudkoper- en goudnikkelsoldeersoorten toegepast (zie hoofdstuk 10).

Tegenwoordig worden steeds meer de zogenaamde actieve soldeermaterialen toegepast. Dit zijn legeringen op basis van zilver en koper waaraan titaan is toegevoegd (zie § 21.5). In tabel 21.2 worden enige samenstellingen gegeven. In het algemeen worden deze titaanhoudende legeringen op soldeertemperaturen tussen 850-1050 °C toegepast.

tabel 21.2 Titaanhoudende zilverbasis-soldeersoorten

samenstelling gewichtsprocenten				T_{sol} [°C]	T_{liq} [°C]	T_{soldeer} [°C]
Ag	Cu	Ti	In			
60,75	23,5	1,25	14,5	605	715	760
70,5	27,5	2	–	780	795	820-860
72,5	19,5	3	5	730	760	850-950
70,5	26,5	3	–	780	805	850-950
64	34,2	1,8	–	780	810	850-950
96	–	4	–	970	970	1000-1050
62,25	27,0	1,25	9,5	–	–	770-800
91	6	3	–	875	917	970
98,4	–	0,6	1	948	959	1000-1050
64,8	25,2	10	–	780	805	850-950
90	–	10	–	970	970	1000-1050

Ontwikkeld zijn ook hoger smeltende Ti-houdende soldeermaterialen die op kopernikkelpalladiumbasis of goudpalladiumbasis zijn met respectievelijk smeltpunten liggend tussen 1150-1300 °C en 1240-1470 °C.

21.7 Controle en nabehandelingen

Visuele controle zal altijd worden uitgevoerd. Gesoldeerde keramiek-metaalverbindingen kunnen afhankelijk van de geometrie niet-destructief worden onderzocht (röntgenonderzoek; ultrasoon onderzoek; lekdictheidsonderzoek).

21.8 Toepassingen

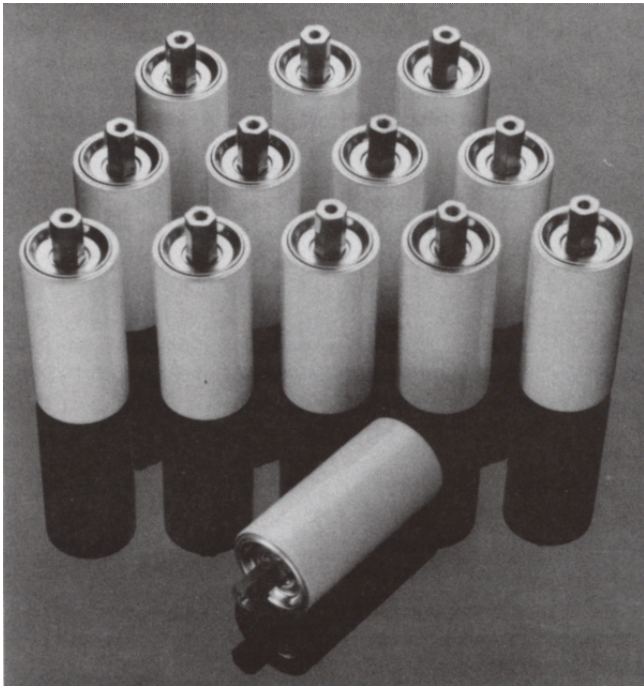
Bij de toepassingen kunnen worden onderscheiden die welke uit de elektrotechniek bekend zijn, en die welke voorkomen in de automobiellindustrie, de membraantechnologie (scheidingfilters), in de medische techniek en in de (petro)chemie.

Tot de eerste categorie behoren onder andere:

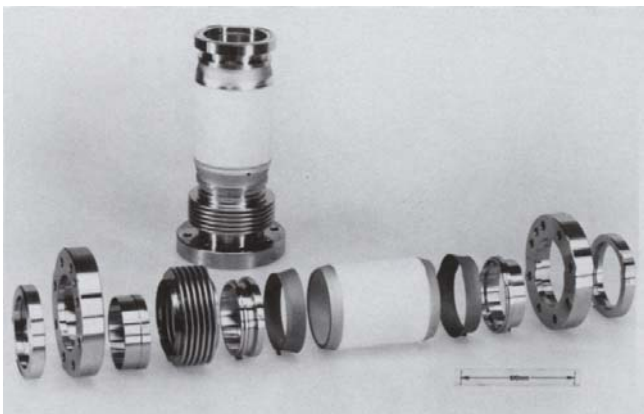
- ▶ vacuümschakelaars (figuur 21.5);
- ▶ isolatoren/doorvoeren (figuur 21.6);
- ▶ onderdelen ten behoeve van elementaire deeltjesonderzoek (figuur 21.7).

Tot de categorie technisch keramiektoeepassingen kunnen worden gerekend:

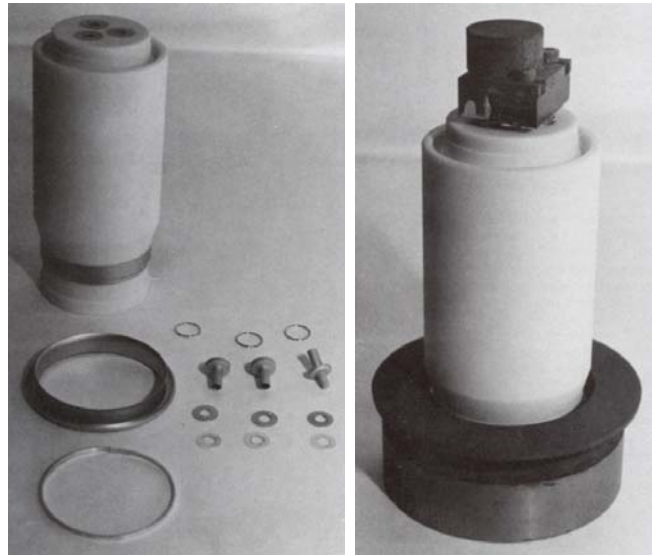
- ▶ turbocompressorwaaiers;
- ▶ membraanfilters;
- ▶ onderdelen voor procesreactoren;
- ▶ biokeramische producten.



figuur 21.5 Vacuümschakelaars opgebouwd uit gesoldeerde keramiek-metaalverbindingen (foto Eaton)



figuur 21.6 Een zogenoemd isolatiestuk ten behoeve van een pompstelling. Als soldeer wordt een zilverkoper type toegepast, terwijl naast keramiek en fernico diverse roestvaststaaltypen worden gebruikt (AISI 304, 309 en 316 typen) (foto FOM)



figuur 21.7 Keramiek (Al_2O_3)-metaalverbinding in een onderdeel ten behoeve van elementaire deeltjesonderzoek; links de samenstellende componenten en rechts het kant-en-klare product (foto Philips)

Hoofdstuk 22

Grafiet

22.1 Inleiding

Grafiet is een hoogsmeltend materiaal dat wordt toegepast vanwege zijn specifieke eigenschappen. Als moderator- of reflectormateriaal in nucleaire toepassingen, maar ook vanwege zijn goede smerende eigenschappen bij hoge temperatuur ($T_{\max} = 450\text{ °C}$). Mechanische of gelaste verbindingen zijn veelal onvoldoende of niet mogelijk. Solderen in een beheerste atmosfeer (vacuüm, inert gas) is een geschikte methode om betrouwbare grafiet-grafiet- en grafiet-metaalverbindingen te vervaardigen. Weliswaar dienen de nodige voorzorgsmaatregelen in acht te worden genomen. In dit hoofdstuk worden enige richtlijnen gegeven.

22.2 Materiaalcombinaties

Het verbinden van grafiet door middel van hoogtemperatuursolderen vertoont overeenkomstige problemen als bij het verbinden van keramisch materiaal worden ondervonden. In vergelijking met metalen is het bevochtigen van grafiet moeilijk; ook kan het verschil in uitzetting tussen grafiet en metaal nogal groot zijn ($\alpha_{\text{grafiet}} = 5 \times 10^{-6}/\text{°C}$). Dit laatste betekent dat indien men grafiet-metaalverbindingen wil solderen, men metalen dient toe te passen met overeenkomstige uitzettingscoëfficiënten (bijvoorbeeld tantaal, zirkonium, molybdeen). Ook is de kwaliteit van het grafiet van groot belang; vooral indien anisotropisch materiaal wordt toegepast, zoals bijvoorbeeld pyrolytisch grafiet.

Wil men grafiet solderen aan een materiaal met een grote uitzettingscoëfficiënt, dan dienen overgangslagen te worden toegepast. Dit is het geval voor gemetalliseerd grafiet aan een nikkellegering (bijvoorbeeld Hastelloy N met 17% Mo, 7% Cr en 5% Fe).

22.3 Eigenschappen

Grafiet is een makkelijk bewerkbaar materiaal. Het materiaal heeft een hoog smeltpunt/sublimatiepunt (circa 3490 °C) en behoudt zijn mechanische sterkte bij hoge temperatuur. Grafiet is echter niet ductiel en dient niet op trek te worden belast. Grafiet kan qua structuur sterk variëren in kristallisatiegraad, kristaloriëntatie en voorts in afmeting, alsmede hoeveelheid en verdeling van poriën in de microstructuur. Bevochtiging van grafiet wordt sterk beïnvloed door onzuiverheden, zoals bijvoorbeeld zuurstof of vocht aanwezig in het grafiet. Voor hoogtemperatuursolderen is een hoog zuiver grafiettype gewenst (soortelijke massa $1,81\text{ g/cm}^3$; totale poreusheid $<20\%$ en onzuiverheden $<20\text{ ppm}$).

22.4 Voorbehandelingen

Voor het solderen dient het grafiet scheurvrij te worden bewerkt. Vervolgens wordt het ultrasoon gereinigd in geïoniseerd water en uitgestookt in vacuüm bij 1200 °C .

22.5 Soldeermethoden

Grafietconstructies kunnen, afhankelijk van vorm en afmeting, zowel in ovens, als ook met behulp van installaties

voor inductiefsolderen worden gesoldeerd. Daar grafiet afhankelijk van het type (grade) bij 450 °C begint te oxideren, dient het solderen in een zuurstofvrije atmosfeer te worden uitgevoerd. Een vacuüm van $<10^{-4}\text{ mbar}$ of een hoog zuiver edelgas (Ar of He) is dan noodzakelijk als soldeeratmosfeer.

22.6 Soldeermaterialen

Metalen die sterke neiging hebben carbiden te vormen, kunnen, wanneer zij gesmolten zijn, grafiet bevochtigen. Op het grensvlak kan zich echter een harde, brosse carbide-laag vormen.

Als soldeersoorten kunnen worden genoemd de zilver-koper-titaanhoudende, bijvoorbeeld 71Ag-27Cu-2Ti in poedervorm of als foliesoldeer. Ook molybdeendisilicide, titaan en zirkoon bevochtigen grafiet. Voorts kunnen soldeersoorten die carbide-vormende elementen bevatten worden toegepast. Dit zijn:

48Ti-48Zr-4Be;
49Ti-49Cu-2Be;
35Au-35Ni-30Mo;
60Au-10Ni-30Ta;
54Ti-21V-25Cr;
43Ti-42Zr-15Ge;
47Ti-48Zr-5Nb.

Tevens worden de volgende soldeermaterialen toegepast:

68,8Ag-26,7Cu-4,5Ti;
72Ti-28Ni;
70Ti-15Cu-15Ni;
80Cu-10Ti-10Sn;
70Ni-20Cr-10Si;
65Ni-18Cr-8Si-9Ti.

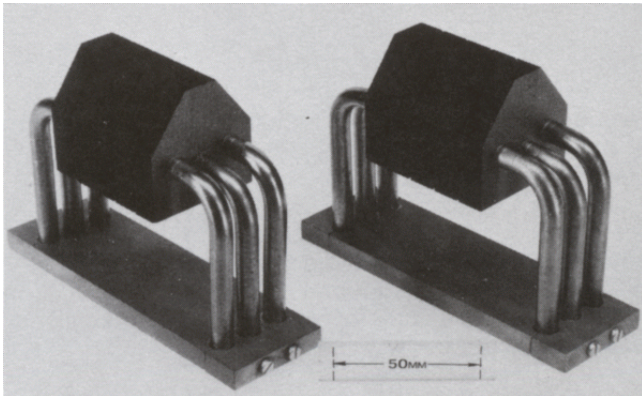
Tenslotte kan met nikkel geclad titaan worden vermeld.

22.7 Controle en nabehandelingen

Visuele inspectie op doorgloeien en scheuren, vooral bij grafiet-metaalverbindingen kan als controle worden genoemd. Verbindingen van hoog dicht grafiet kunnen op lektheid worden onderzocht. Ook röntgenonderzoek kan worden toegepast.

22.8 Toepassingen

Toepassingen van grafiet-grafiet- en grafiet-metaalverbindingen worden in de lucht- en ruimtevaart en in de nucleaire industrie aangetroffen. Ook voor onderzoek aan elementaire deeltjes worden grafiet-metaalverbindingen toegepast in de vorm van koolstof'targets' (zie figuren 22.1 en 22.2).



figuur 22.1 Twee watergekoelde koolstof'targets' ten behoeve van metingen aan elementaire deeltjes (pionen en muonen) vervaardigd van pyrolytisch grafiet (6-kantige blokken) en koperen (OFHC) buis (foto FOM)



figuur 22.2 Detail soldeerverbindingen pyrolytisch grafiet aan koperen buis (koolstof'target'; zie ook figuur 22.1) (foto FOM)

Literatuur

- [1] Brazing Handbook 5th ed.; AWS Miami USA 2007; ISBN 978-0-87171-046-8.
 - [2] Brazing Footprints; R.L. Peaslee; Wall Colmonoy Corporation 2003; ISBN 0-9724479-0-3.
 - [3] Brazing, 2th edition; M.M. Schwartz; ASM International 2003; ISBN 0-87171-784-5.
 - [4] High temperature brazing in controlled atmospheres; G. Sheward; Pergamon Press Ltd Oxford 1985; ISBN 0-08-026169-8.
 - [5] Vacuum Brazing; M.J. Fletcher; Mills & Boon Ltd London 1971; ISBN 0-08-026169-8.
 - [6] Hartlötten; L. Dorn u.a.; Expert Verlag Sindelfingen 1985; ISBN 3-88508-963-7.
 - [7] Metallische Lötwerkstoffe; W. Müller; DVS Verlag GmbH Düsseldorf 1990; ISBN 3-87155-125-2.
 - [8] Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusions-schweißen; DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1981; DVS-Berichte Band 69; ISBN 3-87155-374-3.
 - [9] Hochtemperaturlöten; DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1984; DVS-Berichte Band 92; ISBN 3-87155-397-2.
 - [10] Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusions-schweißen; DVS Verlag GmbH Düsseldorf 1989; DVS-Berichte Band 125; ISBN 3-87155-430-8.
 - [11] Hart- und Hochtemperaturlöten; DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1990; DVS-Berichte Band 132; ISBN 3-87155-437-5.
 - [12] Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusions-schweißen; DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1995; DVS-Berichte Band 166; ISBN 3-87155-471-5.
 - [13] Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusions-schweißen; DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1998; DVS-Berichte Band 192; ISBN 3-87155-498-7.
 - [14] Hoogtemperatuursolderen; NIL Den Haag, 1982.
 - [15] Hoogtemperatuursolderen van superlegeringen, keramiek en roestvast staal; NIL Den Haag, 1986.
 - [16] Ontwikkelingen in het hoogtemperatuursolderen; NIL Den Haag, 1989.
 - [17] Hoogtemperatuursolderen van hoogwaardige materialen; NIL Den Haag, 1992.
 - [18] Hoogtemperatuursolderen: veelzijdig en betrouwbaar; NIL Arnhem, 2000.
 - [19] Aluminium brazing handboek 3rd ed.; Aluminium Association Washington 1979.
 - [20] Aluminium fluxless vacuum brazing; Aluminium Association Washington.
 - [21] Joining Ceramics to Metals and Other materials; H.E. Pattee; WRC Bulletin 178, Nov. 1972.
 - [22] Ceramic Joining; M.M. Schwartz; ASM Int. Metals Park Ohio; 1990; ISBN 0-87170-373-4.
 - [23] BABS Third International Brazing & Soldering Conference "Conference Preprints" 29-31 October 1979 London England; c/o BNF Grove Laboratories Wantage England.
 - [24] BABS Fourth International Brazing & Soldering Conference "Innovations and Developments in Soldering and Brazing" 1-3 November 1983 London England; c/o BNF Grove Laboratories Wantage England.
 - [25] BABS Fifth International Brazing & Soldering Conference "High Technology Joining" 3-5 November 1987 Brighton England; c/o BNF Grove Laboratories Wantage England.
 - [26] BABS Sixth International Brazing & Soldering Conference "High Technology Joining" 3-5 September 1991 Stratford-upon-Avon England; c/o The Welding Institute Cambridge England.
 - [27] Fügen von Keramik, Glas und Metall; DVS-Verlag GmbH Düsseldorf; 1980; DVS Berichte Band 66; ISBN 3-87155-371-9
 - [28] Fügen von Keramik, Glas und Metall; Bauverlag GmbH Wiesbaden/Berlin; 1985; DKG e.v. BadHonnet; Band 1(1985) Heft 2; ISSN 0177-6983.
 - [29] Joining of Ceramics, Glass and Metal; e.d. W. Kraft; DGM Informations GmbH Oberursel; 1989; ISBN 3-88355-146-5.
 - [30] Bearbeitung, Fügen und Prüfung von Keramik; DVS-Verlag GmbH Düsseldorf; 1991; DVS Berichte Band 137; ISBN 3-87155-442-1.
 - [31] ASM Handbook (formerly 10th ed. Metals Handbook), Volume 2, 2^e druk 1992.
 - [32] Milieuvriendelijk reinigen bij hoogtemperatuursolderen, E.W. Schuring, ECN onderzoeksrapport ECN-CX-01-088; NIL rapport TC-I-A-705-01, NOVEM rapport onderzoeksprojectnummer 351340/4710 d.d. juni 2001.
 - [33] A.E. Shapiro, Brazing Magnesium Alloys and Magnesium Matrix Composites, Weld.J. 2004.
 - [34] Sirén, M., S.Holström, P.Auerkari, Brazing and joint properties of an Iron ODS alloy, Löt'98, DVS 192, p.80-84.
 - [35] Plansee informatieblad Dispersionverfestigte Hochtemperaturwerkstoffe.
- Tijdschriften waarin regelmatig over hoogtemperatuursoldeeronderwerpen wordt gepubliceerd zijn onder meer:
- Welding Journal
 - Welding & Metal Fabrication
 - Transactions of the Japan Welding Society
 - Lastetechniek
 - Schweißen und Schneiden
- Bedrijven die het hoogtemperatuursolderen in Nederland toepassen (lijst niet uitputtend):
- Bodycote Diemen (voorheen Vacuum Soldeer Centrum VSC),
 - Heat & Surface Treatment H&ST (v/h Philips Harderij),
 - Eaton (voorheen Holec),
 - Mamesta,
 - Mat-Tech
 - Modine
 - Pontus
 - Shell Lab.Amsterdam,
 - Sulzer-Elbar (voorheen Elbar),
 - Thales (voorheen HSA),
 - Thomassen Turbine Systems,
 - Turbine Support Europe,
 - ECN,
 - FOM,
 - NLR,
 - KLM.
- Websites (nationaal/internationaal) met informatie over het hoogtemperatuursolderen:
- NIL: www.nil.nl
 BvM: www.materialenkennis.nl
 AWS: www.aws.org
- Leveranciers op gebied van het hoogtemperatuursolderen (lijst niet uitputtend):
- Schöne Edelmetaal (voor specifieke HT-solderen: Degussa), www.schone.nl
 - Thessco (voorheen Drijfhout), www.thessco.nl
 - Tebunus
 - Innobraze (D) (voorheen Mahler)
 - Wesgo, (USA)
 - Wieland (D)

Trefwoordenregister

Hoofdstuk	
aantasting	6.2, 16.1, 16.3, 17.2.6
actief metaalprocédé	21.5
afkoelen	5.5, 11.5, 13.3, 15.5, 20.6, 21.4
afschuifsterkte	7.5, 12.6, 17.3.6, 18.6
afspringen oxidehuid	2.4
afvalverwerking	9.2
aluminium en -legeringen	10.7, 11
aluminiumbasis-soldeersoorten	2.4, 10.1, 10.7, 11.6, 18.6
antivloeimiddel	6.3, 18.5
apparatuur	1.1, 1.5, 4, 7.2, 7.3, 8.1, 8.2, 8.3, 13.8
atmosfeer	2.1, 2.4, 3, 4.2, 4.5, 7.2, 12.5, 13.2, 13.5, 16.1, 16.4, 16.5, 17.2.4, 17.2.5, 17.3.5, 21.5, 22.1, 22.5
AWS	3.1, 5.3, 7.1, 7.3, 7.4, 7.5, 8.2, 10.1, 17.3.6
bedrijfstemperatuur	12.1, 17.2.3, 17.3.1
beheerste atmosfeer	2.1, 2.4, 3.1, 4.5, 12.1, 13.5, 16.5, 22.1
beryllium	9.1
beschermende (gas)atmosfeer	3.3, 14.5
bevochtiging	2.2, 2.4, 3.2, 5.2, 6.1, 6.2, 10.2, 10.3, 10.5, 10.7, 11.5, 12.2, 12.5, 15.1, 16.3, 17.3.1, 17.3.4, 19.4.2, 20.4, 20.5, 21.5, 22.3
bewerkingsgroeven	5.2, 16.4
bewerkingsspanningen	6.1
bindmiddel	5.7, 6.3, 6.4, 9.1, 10.1
brosheid	3.2, 16.3
capillaire werking	1.2, 2.2, 5.7, 14.4
carbide-precipitatie	16.3
chromstaalsoort,	
austenitische	16.1, 16.3
duplex	16.1, 16.3
ferritische	16.1, 16.3, 16.6
martensitische	16.1, 16.3, 16.6
precipitatiehardende	16.1, 16.3, 16.6
circulatie	6.4, 11.5
cladding	10.7, 11.5, 11.6
constructieve aspecten	5
controle	7.1, 7.3, 7.5, 10.7, 11.4, 11.7, 12.7, 13.7, 14.7, 15.7, 16.7, 17.2.7, 17.3.7, 18.7, 19.2.4, 19.3.4, 19.4.4, 19.5.4, 20.7, 21.7, 22.7
corrosie, interkristallijne	5.8, 16.3
corrosiebestendigheid	2.3, 5.8, 10.2, 10.3, 10.4, 10.7, 11.3, 12.1, 12.7, 17.3.3, 18.3
cryo-baffle	4.3
cryogene pompen	4.3
dampdruk	10.3
dauwpunt	2.4, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 11.5, 14.5, 16.5, 18.5, 19.5.3
deeldruk	3.3, 3.4, 14.5, 20.5
dichtheidsonderzoek, lek-	7.5, 18.7, 19.2.4, 19.3.4, 19.4.4, 21.7
diffusie, korrelgrens-	2.3
diffusie, vaste stof-	2.3
DIN	7.4, 7.5, 11.1, 11.3, 11.5, 15.1
dissociatie	2.4
dompelsolderen	11.5, 12.5
doseervormen	5.7, 11.6
dosering (soldeer)	8.1, 8.2
draad	5.7, 6.3, 8.2, 10.1, 11.6
economische aspecten	8, 10.5
edelgas	3.3, 19.3.1, 22.5
eigenschappen, chemische	16.3
eigenschappen, fysische	16.3
eigenschappen, mechanische	10.6, 11.3, 12.1, 13.3, 14.4, 14.6, 15.3, 16.3, 16.6, 17.1, 17.3.5, 21.2
endogas	3.2
erosie	2.3, 10.2, 10.3, 10.5, 10.7
evenwicht	2.2, 3.2
exogas	3.2, 14.5
explosief	8.3, 9.1, 17.3.1
fixeren	5.6, 6.3
fluorreinigen	17.2.4, 17.2.8, 17.3.4
folie	5.7, 6.3, 8.2, 10.1, 10.2, 10.5, 11.6, 20.2, 20.6
frequentie (wisselstroom)	4.5
gasatmosfeer	4.2, 14.5
gassen	1.4, 3.1, 3.2, 3.3, 6.4, 8.1, 8.3, 9.1, 12.1, 16.3, 18.1, 18.5, 19.3.1, 19.3.3
getter(s)	3.4, 11.5, 12.1
getterwerking	2.4, 10.7
gezondheid	9
gietijzer	4.3, 10.1, 10.5, 14.2, 15
gietijzer, lamellair	15.3, 15.7
gietijzer, nodulair	15.3, 15.7
goudbasis-soldeersoorten	5.3, 10.1, 10.4, 17.2.6, 19.3.3

Hoofdstuk	
grafiet	4.3, 11.5, 15.1, 15.3, 15.6, 22
halogeen reinigen	17.2.8
hardingsverschijnselen	5.8
hardmetaal	4.3, 4.4, 14.2, 20
hardsolderen	1.1, 1.5, 6.5, 7.6, 12.1, 12.6, 15.1, 16.1
hechting	2.2, 7.5, 20.4, 20.7
hittebestendig	4.4, 6.4, 10.3, 10.5
hoogfrequent generator	4.5
hoogsmeltende metalen	10.1, 10.3, 19
hoogvacuümoven	4.3, 8.2, 8.3, 20.5
hulpmiddelen	8.1, 8.2
indringdiepte	4.5
inductiefsolderen	4.1, 4.5, 8.3, 10.7, 11.5, 13.5, 22.5
infraroodstraling-solderen	13.5
inlek	4.3, 7.5, 8.3, 12.5, 17.3.5, 19.5.3
inspectie, visuele	7.5, 8.2, 11.7, 17.2.7, 18.7, 19.4.4, 19.5.4, 20.7, 22.7
investering	1, 8.3
ISO	7.1, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 10.1, 11.1
kameroven	11.5
keramiek, aluminiumoxide	19.6, 21.1, 21.2, 21.4
keramiek, sialon	21.1, 21.2, 21.4
keramiek, siliciumcarbide	21.1, 21.2, 21.4
keramiek, siliciumnitride	21.1, 21.2, 21.4
keramiek, zirconiumoxide	15.2, 21.1, 21.4
kerftaaiheid	7.5
keuren van verbindingen	7.5
koeldeel	4.4
koeling	4.3, 8.3, 15.5
Kolene-E-Verfahren	15.1
koolstofstaal	4.3, 4.4, 10.1, 14, 18.5
koper en -legeringen	13, 16.2
koper, zuurstofhoudend	13.1, 13.3, 13.5
koper, zuurstofvrij	13.1, 13.3, 13.5
koperbasis-soldeersoorten	5.3, 10.1, 10.6, 14.6, 15.5, 16.6, 17.2.6, 20.6
korrelgroei	5.8, 6.4, 10.5, 12.1, 16.3, 17.2.3, 17.3.3, 18.3
kosten, variabele	8.3
kosten, vaste	8.3
kostprijs	8.3, 14.5, 16.6, 17.2.6
koudverstevinging	5.8, 17.3.4
kwaliteitsbeheersing	7, 15.1
lassen	1, 12.1, 13.1, 16.1, 17.2.1, 19.1
lektheid	2.3, 5.1, 7.3, 7.5, 13.7, 14.3, 19.5.4, 22.7
lekzoeken	7.5
lijmen	1, 12.1
loonkosten	8.1, 8.2, 8.3
magnesium en -legeringen	12, 16.2
materiaalbeïnvloeding	5.8
menggas	14.5
metaaloppervlak	2.2, 3.1
middenfrequentgenerator	4.5
molybdeen	2.4, 4.3, 4.5, 10.3, 10.4, 15.1, 16.1, 16.2, 17.3.1, 19.1, 19.2, 19.6, 21.2, 21.4, 21.5, 22.2, 22.6
molybdeen-mangaan procédé	21.5
monteren, montage	4.3, 5.6, 6.3, 8.1, 8.2, 11.5
naaddikte	2.1, 20.2, 20.6
naadvorm	1.4, 1.5, 5.1, 5.2, 7.2, 16.3, 16.4, 17.2.4
naadvulling	19.2.4, 19.3.4, 19.5.4
nabewerken	6.1, 6.5
NEN	7.1, 7.4, 7.5, 7.6
nikkel	2.4, 3.2, 5.3, 5.5, 7.6, 10.1, 10.2, 10.4, 10.5, 12.1, 15.1, 15.6, 16.1, 16.2, 16.3, 17, 18.5, 19.3.3, 20.1, 20.2, 20.4, 20.5, 20.6, 21.2, 22.6
nikkelbasis-soldeersoorten	5.3, 10.1, 10.5, 14.6, 15.6, 16.6, 17.2.6, 17.2.8, 19.3.3, 20.6
niobium	10.3, 19.1, 19.3.3, 19.5, 19.6
nomenclatuur	10.1
normen soldeermateriaal	7.4, 7.6
normen soldeerverbindingen	7.5, 7.6
nulspleet soldeer	10.5
ODS-materialen	5.3, 17
oliediffusiepompen	4.3
onderhoud(skosten)	8.1, 8.3, 11.5
ontvetten	6.2, 7.2, 8.2, 11.4, 12.4, 14.4, 15.1, 15.4, 18.4, 19.4.2, 19.5.2, 20.4
openspringen oxidehuid	2.4
oplosmiddelen	2.4, 6.2, 9.1, 11.4, 20.4
oppervlaktegesteldheid	5.2
ovens	1.1, 1.2, 1.5, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 6.4, 8.2, 8.3, 11.5, 12.5, 14.5, 15.5, 17.2.5, 17.3.5, 20.5, 21.5, 22.5
overgangstemperatuur	18.3, 18.6, 19.4.1, 19.5.1

Hoofdstuk		Hoofdstuk	
overlap(verbinding)	1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 5.1, 7.2, 11.5, 17.2.4	uitloop	4.4
oxidatie(bestendig)	1.1, 2.4, 3.1, 3.2, 4.4, 5.2, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 16.4, 16.5, 17.1, 17.2.1, 17.2.3, 17.2.6, 17.3.3	uitvloeien	2.2, 3.1, 5.2, 6.2, 6.3
oxiden, reductie van	2.4, 3.2, 19.4.1	uitzetting	5.3, 5.4, 5.5, 12.2, 14.2, 22.2
		uitzettingscoëfficiënt	2.4, 5.4, 5.5, 12.1, 13.2, 16.2, 16.4, 17.2.2, 20.2, 20.3, 21.2, 21.4, 22.2
palladiumhoudende soldeersoorten	5.3, 10.1, 10.3, 13.6, 14.6, 16.3, 16.6	ultrasoon onderzoek	7.5, 8.2, 11.7, 13.7, 14.7, 15.7, 17.3.7, 18.7, 21.7
pasta	5.7, 8.2, 9.1, 10.1, 11.5, 11.6, 14.6, 21.5		
penetrant	7.5, 11.7, 13.7, 14.7, 15.7	vacuüm	1.1, 2.1, 2.4, 3.1, 3.4, 4.5, 6.4, 10.1, 10.7, 11.4, 11.5, 12.1, 12.5, 13.2, 13.5, 14.4, 14.5, 16.1, 16.4, 16.5, 17.2.5, 17.2.8, 17.3.5, 18.1, 18.5, 19.2.1, 19.2.3, 19.3.3, 19.4.3, 19.5.3, 20.2, 20.4, 20.5, 21.5, 22.1, 22.4, 22.5
penetratie	2.3, 10.5, 10.7, 16.3, 16.6, 21.4		
poeder	5.7, 6.3, 9.1, 9.2, 10.1, 10.5, 11.5, 11.6, 14.6, 17.2.6, 17.2.8, 17.3.1, 22.6	vacuümoven	1.2, 4.1, 4.2, 4.3, 6.4, 8.2, 8.3, 11.5, 14.5, 15.5, 20.5
poreusheid	7.5, 14.1, 22.3		
precipitatieharding/-harden(d)	5.8, 7.3, 11.1, 12.3, 13.3, 16.1, 16.3, 16.6, 17.1, 17.2.1, 17.2.3, 17.2.4, 17.2.5, 17.3.3, 18.3	veiligheid	9
		ventilatie	9.1
prijsverhouding soldeermaterialen	8.2	verbindingen, keuren van	7.5
productiewijze	3.3, 4.1	verbindingen, ontlaste	5.1
productkosten	8.2	verbindingen, overlap-	1.2, 1.3, 1.4, 5.1, 17.2.4
		verbindingen, stompe	1.2, 1.3, 5.1, 15.2
reactieve materialen	6.5, 18.1	verbrossen	19.2.3, 19.5.1
reducerende atmosfeer	3.1, 3.2, 16.1, 16.4, 16.5, 17.2.5, 21.5	verbruik, elektrische energie	8.1, 8.3
reductie (van oxiden)	2.4, 3.2, 19.4.1	verbruik, gas	8.1, 8.3
reinen/reinigen	1, 2.4, 3.1, 5.2, 6.1, 6.2, 6.3, 6.5, 7.2, 8.1, 8.2, 11.4, 11.5, 12.4, 17.2.4, 17.2.8, 17.3.4, 18.4, 19.2.2, 19.3.2	verbruik, water	8.1, 8.3
		verdamping	2.4
rekristallisatietemperatuur	11.3, 13.3, 19.2.1, 19.3.1, 19.4.1, 19.4.3, 19.5.1	verhitten	4.5, 15.3, 16.5
reparatie	4.4, 7.5, 8.1, 8.3, 17.2.1, 17.2.7	vervorming(en)	1.2, 1.3, 1.5, 6.4, 11.3, 12.3, 13.3, 15.3, 15.5
restgassen	4.3		
retortoven	4.1, 4.2, 8.2, 8.3, 14.5	verwarming	12, 1.5, 3.1, 4.1, 4.2, 4.3, 4.5, 8.3
roestvast staal	1.3, 2.4, 3.4, 4.2, 4.3, 4.4, 5.3, 10.1, 10.4, 10.5, 11.2, 11.5, 14.6, 16, 18.2	vloeimiddel(en)	1.1, 1.5, 2.1, 3.3, 4.4, 6.5, 7.6, 9.1, 11.4, 11.5, 12.1
röntgenonderzoek	7.5, 8.2, 14.7, 15.7, 18.7, 21.7, 22.7	voorbehandeling(en)	7.2, 11.4, 12.4, 13.4, 14.4, 15.4, 16.2, 16.4, 17.2.4, 17.3.4, 18.4, 19.2.2, 19.3.2, 19.4.2, 19.5.2, 20.4, 21.4, 22.4
ruwheid, oppervlakte-	1.2, 5.2, 5.3, 7.2, 14.4, 16.4, 17.2.4		
		voorbewerken	6.1
schadelijk stoffen/gassen	1.4, 9.1, 9.2	vormdelen, gesinterde	5.7
soldeercyclus	4.2, 6.3, 6.5, 7.2, 8.3, 16.6		
soldeerkosten	8.1, 8.3	warmte-ontwikkeling	4.5
soldeermaterialen	5.3, 7.4, 8.2, 10, 11.6, 12.6, 13.6, 14.6, 15.6, 16.3, 16.6, 17.2.4, 17.2.6, 17.3.6, 18.6, 19.2.3, 19.3.3, 19.4.3, 19.5.3, 20.6, 21.6, 22.6	warmte-overdracht	4.1, 4.3, 12.5, 15.5
		warmtebehandeling	4.4, 6.1, 7.2, 7.6, 11.3, 14.3, 16.5, 16.6, 17.2.3, 17.2.6, 17.3.3, 18.3, 18.4, 19.4.1, 21.5
soldeermechanismen	2.2	warmtecapaciteit	13.1
soldeernaad	2.1, 5.1, 5.5, 5.7, 7.5, 10.5, 11.2, 11.4, 11.7, 13.6, 14.7, 16.3, 17.2.3, 17.2.4, 17.2.7, 17.3.2, 17.3.5, 20.2, 20.3, 20.5, 20.6, 21.4	warmtegeleidbaarheid	13.1
		waterstofbroosheid	3.2
soldeerprocedure	7.1, 7.2, 7.3, 9.1, 11.2, 16.7	waterstofziekte	13.3, 13.5
soldeerspleet	2.1, 2.2, 5.7, 7.3, 16.4, 17.2.4, 20.4	werkplaatstechnische aspecten	6
soldeertemperatuur	1.5, 3.2, 4.5, 5.3, 5.4, 5.5, 5.8, 6.4, 7.2, 10.2, 10.3, 10.5, 10.6, 10.7, 11.1, 11.3, 11.5, 11.7, 12.5, 12.6, 15.5, 15.6, 16.3, 16.4, 16.5, 16.6, 17.2.3, 17.2.4, 17.2.5, 17.2.6, 17.3.5, 18.3, 18.5, 18.6, 20.6, 21.6	wide-gap solderen	5.3, 17.2.6, 19.5.3
soldeertijd	11.5, 11.7, 14.1, 15.5, 16.3, 17.2.6	wolfram	2.4, 10.3, 10.4, 10.5, 16.2, 19.1, 19.4, 21.2, 21.4
soldeervlakken	5.2, 6.1, 6.2, 8.2, 15.1, 15.4, 20.4, 20.6		
solderen in ovens	1.1, 6.4	zachtgloeieffect	5.8
spanningsarm gloeien	4.4, 5.8, 6.1, 15.4, 16.3, 16.4, 17.2.4, 21.4	zilverbasis-soldeer(soorten)	2.4, 5.3, 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 16.3, 16.6, 17.2.6, 18.6, 19.2.3, 19.3.3, 19.4.3, 19.6, 20.4, 20.6, 21.4, 21.6
spanningscorrosie	16.3, 16.4, 17.2.4, 18.4	zoutbadsolderen	11.5
spleetbreedte	1, 2.1, 2.2, 5.3, 5.4, 5.5, 7.2, 10.5, 11.5, 14.3, 14.4, 15.5, 16.3, 16.4, 16.6, 17.2.4, 17.2.6, 21.4	zuurstofhoudend koper	13.1, 13.3, 13.5
		zuurstofvrij koper	13.1, 13.3, 13.5
spleetinstelling, aanbevolen	5.5	zwavelbroosheid	16.3
spoelpoort	4.4		
stof	6.2, 6.3, 9.1, 17.3.4		
straalmiddel(en)	9.1, 15.4		
stralingsschermen/-schilden	4.3, 4.5		
superlegeringen	2.4, 3.2, 3.4, 4.3, 5.3, 10.5, 17		
tantaal	4.5, 10.3, 19.1, 19.3, 19.5.1, 21.2, 21.4, 22.2		
tape	5.7, 10.1, 10.5		
temperatuur, doorwarm-	6.4, 7.2		
temperatuur, soldeer-	1.5, 3.2, 4.5, 5.3, 5.4, 5.5, 5.8, 6.4, 7.2, 10.2, 10.3, 10.5, 10.6, 10.7, 11.1, 11.3, 11.5, 11.7, 12.5, 12.6, 15.5, 15.6, 16.3, 16.4, 16.5, 16.6, 17.2.3, 17.2.4, 17.2.5, 17.2.6, 17.3.5, 18.3, 18.5, 18.6, 20.6, 21.6		
temperatuur, uitdamp-	6.4		
thermische uitzetting	5.3, 5.4, 22.2		
titaan en -legeringen	16.2, 18		
transportbandoven	4.1, 4.4, 6.4, 8.2, 8.3, 11.5, 14.5		
treksterkte	7.5, 13.3		
turbomoleculairepompen	4.3		



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

T (079) 353 11 00

F (079) 353 13 65

E alg@fme.nl

I www.fme.nl