

Soldeerprocessen voor dunne plaat en buis

In deze publicatie wordt ingegaan op het verbinden van dunne plaat en buis met behulp van de diverse soldeerprocessen. Deze publicatie is er een uit een serie van vijf die naast de algemene publicatie (TI.03.13) tevens drie andere verbindingstechnieken behandelen, zoals lassen (TI.03.14), lijmen (TI.03.15) en mechanisch verbinden (TI.03.16).

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Indeling soldeerprocessen	1
3	Kenmerken van het solderen	2
4	Toepasbaarheid van het solderen	2
5	Apparatuur ten behoeve van het solderen	3
6	Voorbehandeling en voorbereiding	4
7	Soldeertechnisch construeren	4
8	Soldeerdetails	5
9	Solderen van dunne materialen	6
10	Soldeermaterialen	7
11	Activeren en beschermen van het te solderen oppervlak	7
12	Automatisering van het solderen	8
13	Kwaliteitsaspecten bij het solderen	9
14	Nabehandeling en nabewerking	9
15	Economische aspecten van het solderen	10
16	Arbo- en milieuaspecten van het solderen	10
17	Normering	11

1 Inleiding

Bij de afweging van de keuze van een geschikte verbindingstechniek voor dunwandige materialen kan solderen een optie zijn. Het solderen van constructiestaal, roestvast staal, koper en aluminium, vooral als dunwandige materialen, vindt dagelijks in ruime mate plaats. Hierbij kan men denken aan toepassingen in de automobiel-, (petro)chemische, voedingsmiddelen- en zuivelindustrie, koeltechniek, energie-opwekkingssystemen, rijwiel- en kantoormeubelindustrie, enz.

Solderen is het verbinden van (al dan niet onderling verschillende) metalen met behulp van een gesmolten toevoegmetaal met een lager smeltpunt of smelttraject dan de te verbinden metalen. Solderen is een verbindingstechniek die in het Midden-Oosten al enkele duizenden jaren voor de jaartelling in zwang was bij de vervaardiging van gouden of zilveren sieraden.

Edele metalen laten zich betrekkelijk eenvoudig door het gesmolten soldeer bevochtigen hetgeen wil zeggen dat het soldeer goed over het metaaloppervlak uitvloeit. Door capillair werking kan het soldeer dan in een nauwe spleet (0,05 - 0,2 mm), gevormd tussen de te verbinden delen, vloeien en deze vullen. Tijdens het afkoelen hecht het stollende soldeer zich aan de te verbinden delen en komt zodoende de verbinding tot stand.

Belangrijke voorwaarde voor bevochtiging is dat het te verbinden metaaloppervlak vrij is van vet, vuil en oxiden. Een geschikt vloeimiddel is in staat deze oxiden te reduceren aan het metaaloppervlak, terwijl vet en vuil met een ontvettingsmiddelen zijn op te lossen. Vloeimiddelresten zijn hygroscopisch en kunnen corrosie veroorzaken; grondig verwijderen van deze agressieve resten is dan ook noodzakelijk. De kans op achterblijven van vloeimiddelresten is in de praktijk van het zacht- en hardsolderen groot.

Solderen kan voor sommige metalen ook zonder vloeimiddelen worden uitgevoerd. Het solderen vindt dan plaats bij hoge temperatuur en in een beheerste atmosfeer: het z.g. hoogtemperatuursolderen. De beheerste atmosfeer, gevormd door een reducerend of inert gas of vacuüm, vervangt bij hoge temperatuur (>800 °C) de werking van het vloeimiddel. De kwaliteit van dergelijke gesoldeerde producten is vergelijkbaar met die van gelaste producten.

De warmte-inbreng speelt een belangrijke rol bij het lassen en solderen van dunwandige materialen. Vervorming ten gevolge van deze warmte-inbreng kan dan optreden in het materiaal. Wat dat betreft is solderen gunstiger dan lassen, vanwege de lagere warmte-inbreng. Om die reden is het zachtsolderen gunstiger dan het hard- of hoogtemperatuursolderen; een beperking is de lagere toelaatbare bedrijfstemperatuur van de verbinding.

De soldeerprocessen die in meer of mindere mate geschikt worden geacht voor het verbinden van dunne materialen zijn het bout-, vlam-, inductief-, weerstand-, laserstraal-, elektronenstraal-, infrarood-, soldeerbad-, zoutbad-, ultrasoon- en ovensolderen.

Het bout-, vlam-, inductief- en weerstandssolderen laten zich handmatig toepassen, terwijl laser- en elektronenstraal-, infrarood-, soldeerbad-, zoutbad- en ovensolderen meestal gemechaniseerd worden uitgevoerd.

Naast kwaliteitsverbetering en lagere loonkosten kan mechanisering ook een verbetering van de arbeidsomstandigheden opleveren.

2 Indeling soldeerprocessen

Men onderscheidt binnen het solderen het zacht- en hardsolderen. Heeft het soldeer een smeltpunt onder 450 °C, dan spreekt men van zachtsolderen, daarboven van hardsolderen.

Het solderen wordt uitgevoerd met behulp van een vloeimiddel. Wordt het hardsolderen uitgevoerd boven 800 °C in een beheerste atmosfeer, zijnde een reducerend of inert gas, of in vacuüm, dan spreekt men van hoogtemperatuursolderen.

De soldeerprocessen kunnen worden ingedeeld naar de wijze van verhitte van het werkstuk tijdens het solderen. Men onderscheidt:

- ▶ processen waarbij plaatselijke verhitte van het werkstuk wordt toegepast;
- ▶ processen waarbij het gehele werkstuk wordt verhit.

Tot de eerste categorie behoren het bout-, vlam-, weerstand-, inductief-, ultrasoon-, laser- en elektronenstraal-solderen. Onder de tweede categorie vallen het soldeerbad-, zoutbad-, infrarood- en ovensolderen. Afhankelijk van grootte en vorm van het werkstuk kunnen de eerste categorie processen ook als tweede categorie processen worden toegepast.

Varianten binnen deze processen worden gevormd door:

- a. de manier waarop het werkstukoppervlak tijdens het solderen wordt beschermd tegen oxidatie, opdat bevochtiging van het soldeer kan optreden;
- b. de wijze waarop het soldeer wordt toegevoerd of aangebracht op het werkstukoppervlak.

Ter verduidelijking het volgende:

Ad a. bescherming tegen oxidatie kan worden geboden door:

- ▶ een vloeimiddel toe te passen op het te solderen oppervlak of door het werkstuk in een bad met gesmolten vloeimiddel te dompelen;
- ▶ een beheerste atmosfeer, bijv. een reducerend of inert gas, of vacuüm. Verbijzonderingen van dit vloeimiddellessolderen zijn het solderen van koper 'aan-de-lucht' met koperfosforsoldeer, waarbij het fosfor de oxiden reduceert, en het vloeimiddellessolderen

ultrasoonsolderen van aluminium waarbij ten gevolge van de opgewekte trillingen oxidelagen 'loslaten'.

Ad b. afhankelijk van de aanbreng- of toevoerwijze onderscheidt men:

- ▶ vooraf aangebracht of tijdens het verhitten toegevoerd soldeer, het z.g. 'reflow' solderen;
- ▶ het verhitten van het werkstuk door gesmolten soldeer, dat zich in een bad bevindt, waarbij het werkstuk in het bad wordt gedompeld en zo van soldeer wordt voorzien.

Samengevat kunnen deze soldeerprocessen als volgt worden ingedeeld (zie tabel 1):

- ▶ Zachtsolderen: bout-, vlam-, inductief-, weerstand-, laserstraal-, infrarood-, oven-, soldeerbad- en ultrasoonsolderen;
 - ▶ Hardsolderen: vlam-, inductief-, weerstand-, laserstraal-, infrarood-, oven- en soldeerbadsolderen;
 - ▶ Hoogtemperatuursolderen: inductief-, laser- en elektronenstraal-, infrarood- en ovensolderen.
- (Meer details in de Procesomschrijvingen of de FME voorlichtingspublicaties VM 44 'Hard- en zachtsolderen 1, algemeen' en VM 82 'Hoogtemperatuursolderen').

3 Kenmerken van het solderen

Aan een gesoldeerde verbinding worden bepaalde eisen gesteld. Deze eisen kunnen liggen op het gebied van de mechanische of thermische belastbaarheid, de elektrische of warmtegeleidbaarheid, de corrosiebestendigheid, lekdichtheid en duurzaamheid van de verbinding. Aan deze eisen kan worden voldaan, mits een juiste keuze wordt gemaakt voor soldeer, soldeerproces en spleetvorm van de constructie, en voorop gesteld dat kennis van en ervaring met het solderen, kortom vakmanschap, aanwezig is. Solderen heeft, net als andere verbindingssystemen, een aantal kenmerken die als voor- of nadeel gelden.

Bij het solderen worden - in tegenstelling tot bij het lassen - de te verbinden werkstukdelen niet tot smelten gebracht. Dit heeft de volgende voordelen:

- ▶ een lagere warmte-inbreng in het werkstuk;
- ▶ daardoor lagere inwendige spanningen, waardoor minder kans op vervorming;
- ▶ geringere kans op het optreden van structuurveranderingen;
- ▶ en minder energieverbruik.

Door de capillaire werking van het soldeer is het mogelijk verbindingen op moeilijk bereikbare plaatsen in het werkstuk te maken. Met solderen is het mogelijk onderling verschillende materialen (bijv. metaal-keramiek) te verbinden, terwijl meervoudige verbindingen gelijktijdig te maken zijn (bijv. ovensolderen), zowel dun- als dikwandig.

Een nauwkeurige voorbereiding van de te verbinden werkstukdelen is een vereiste, hetgeen als een nadeel kan gelden.

Als bij het solderen vloeimiddelen worden toegepast, kunnen vloeimiddelinsluitingen en -resten optreden c.q. achterblijven, waardoor de verbinding wordt verzwakt, respectievelijk corrosiegevoelig wordt. Voor het verwijderen van vloeimiddelresten is vaak een nauwkeurige nabehandeling of nabewerking noodzakelijk. Is er gevaar voor het optreden van galvanische corrosie, dan moet het soldeer in ieder geval edeler zijn dan het werkstukmateriaal.

Daar het soldeer bij een lagere temperatuur smelt dan het werkstukmateriaal, zal bij verhoogde temperatuur de sterkte van een gesoldeerde verbinding snel afnemen.

4 Toepasbaarheid van het solderen

Op grote schaal vindt het solderen van dunwandige materialen als constructiestaal, roestvast staal, koper en aluminium plaats. Hierbij kan men denken aan toe-

passingen in de automobiel-, (petro)chemische, voedingsmiddelen- en zuivelindustrie, koeltechniek, energieopwekkingssystemen, rijwiel- en kantoormeubelindustrie, enz.

tabel 1 Indeling van soldeerprocessen naar smeltemperatuur en verhittingswijze

Indeling solderen (vrij naar DIN 8505 Teil 3)		
smeltemperatuur	verhittingswijze	proces
zacht-solderen < 450 °C	vast lichaam	boutsolderen
		bloksolderen
		rolsolderen
	vloeistof	soldeerbadsolderen
		golfsolderen
		sleepsolderen
		ultrasoonsolderen
		dampfase solderen
		vlamsolderen
	gas	heetgassolderen
		gasovensolderen
	straling	infraroodsolderen
		laserstraalsolderen
	elektrische stroom	inductiefsolderen
weerstandssolderen		
ovensolderen		
hard-solderen > 450 °C	vloeistof	soldeerbadsolderen
		zoutbadsolderen
	gas	vlamsolderen; gasovensolderen
	gasontlading	boogsolderen
	straling	infraroodsolderen
		laserstraalsolderen
	elektrische stroom	inductiefsolderen
		weerstandssolderen
ovensolderen in lucht		
reducerend gasovensolderen		
hoogtemperatuursolderen > 800 °C	straling	infraroodsolderen in reducerend gas
		infraroodsolderen in inert gas
		infraroodsolderen in vacuüm
		laserstraalsolderen in reducerend gas
		laserstraalsolderen in inert gas
		laserstraalsolderen in vacuüm
		elektronenstraalsolderen
		inductiefsolderen in reducerend gas
	elektrische stroom	inductiefsolderen in inert gas
		inductiefsolderen in vacuüm
		ovensolderen in reducerend gas
		ovensolderen in inert gas
		ovensolderen in vacuüm
		ovensolderen in vacuüm

De warmte-inbreng speelt een belangrijke rol bij het verbinden van dunwandige materialen met behulp van thermische verbindingssystemen, zoals lassen en solderen. Vervorming ten gevolge van deze warmte-inbreng kan dan optreden in het materiaal. Wat dat betreft is solderen gunstiger dan lassen, vanwege de lagere warmte-inbreng, en is binnen het solderen het zachtsolderen gunstiger dan het hard- en hoogtemperatuursolderen. Een andere beperking vormt de lagere toelaatbare bedrijfstemperatuur van gesoldeerde verbindingen, terwijl het optreden van corrosie een probleem kan zijn.

De soldeerprocessen die in meer of mindere mate geschikt worden geacht voor het verbinden van dunne plaatmaterialen zijn het bout-, vlam-, inductief-, weerstand-, laserstraal-, elektronenstraal-, infrarood-, soldeerbad-, zoutbad-, ultrasoon- en ovensolderen. Hierbij onderscheiden het bout-, vlam-, inductief-, weerstand-,

laser- en elektronenstraal- en ultrasoonsolderen zich van de overige processen, door een gerichte, plaatselijke warmte-inbreng. Bij de overige processen wordt het gehele werkstuk of product verwarmd. Dit laatst kan consequenties hebben voor bijv. de mechanische eigenschappen van het materiaal waaruit het werkstuk of product is vervaardigd.

Een ander onderscheid wordt gevormd door de wijze van activeren van het door soldeer te bevochtigen oppervlak. Bij het bout-, vlam-, inductief-, weerstand-, laserstraal-, infrarood-, soldeerbad-, zoutbad- en ovensolderen worden vloeimiddelen gebruikt; de na het solderen achterblijvende resten kunnen corrosie veroorzaken. Door het soldeerproces in een beheerste atmosfeer (reducerend of inert gas of in vacuüm) uit te voeren, wordt dit probleem voorkomen. Dit is ook het geval voor de processen die (naast met vloeimiddel) ook in een beheerste atmosfeer worden toegepast zoals inductief-, laserstraal-, infrarood- en ovensolderen; elektronenstraalessolderen wordt altijd in een beheerste atmosfeer (vacuüm) uitgevoerd.

Bij het solderen wordt veelal in de constructie met een soldeerspleet van capillaire afmeting gewerkt. Ten gevolge van de capillaire werking kan het solderen zowel in horizontale als verticale positie worden uitgevoerd. Het spleetbreedte gebied ligt in het algemeen tussen 0,05 - 0,2 mm; dit betekent dat nauwe toleranties op de voorbereiding zijn vereist. Bij voorkeur wordt als constructievorm de overlapverbinding toegepast, zowel voor plaat-plaat-, pijp-pijp- als complexere verbindingsgeometrieën.

Als kwaliteit van de gesoldeerde verbinding een belangrijke eis is, verdient het vaak aanbeveling het handmatig solderen te vervangen door een gemechaniseerd proces, bijv. door een soldeerautomaat of een transportbandoven. Uiteraard nemen de investeringskosten dan aanzienlijk toe; eenvoudige soldeerbouten of -branders zijn reeds voor enige honderden euro's aan te schaffen, terwijl geavanceerde vacuümovens een investering eisen die de vijfhonderdduizend euro overschrijdt. Daarbinnen ligt een heel gamma aan mogelijkheden. Een bijkomend voordeel is, dat gemechaniseerde soldeerprocessen vaak minder belastend zijn voor mens en milieu.

5 Apparatuur t.b.v. het solderen

De apparatuur die bij het solderen wordt toegepast, dient primair voor het verhitten van het te solderen materiaal tot soldeertemperatuur. Zoals eerder gezegd, kan men daarbij een onderscheid maken tussen apparatuur waarmee het te solderen werkstuk slechts plaatselijk of geheel wordt verwarmd. Het soldeer kan handmatig of machinaal worden toegevoerd.

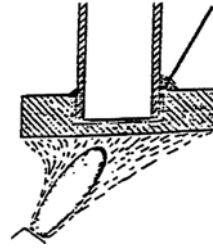
Het boutsolderen wordt gekenmerkt door plaatselijke warmte-overdracht aan het werkstuk door middel van een (voor)verwarmd blok of stift (zie figuur 1). Het voorverwarmen van de bout kan geschieden door een vlam of een oven. Het continu verwarmen van de bout is mogelijk, door een daarin aanwezig elektrisch verwarmings-element.



figuur 1 Boutsolderen

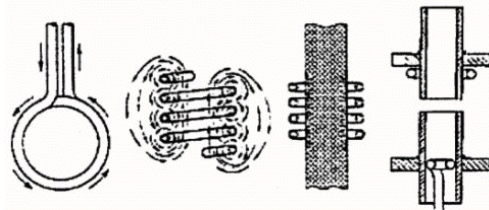
Het vlamsolderen kenmerkt zich door plaatselijke of gehele warmtetoevoer aan het werkstuk met behulp van een **brander** (zie figuur 2). Hierbij wordt gebruikgemaakt

van de verbrandingswarmte van een gasmengsel bijv. acetyleen-lucht of propaan-zuurstof. Het benodigde gas wordt betrokken via gascilinders of een leidingsysteem.



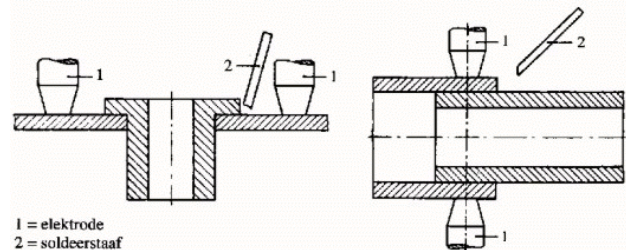
figuur 2 Principe van het vlamsolderen

Het inductiefsolderen wordt gekenmerkt door een snelle plaatselijke warmtetoevoer door middel van een **inductor** of **werkspoel** (zie figuur 3). De benodigde energie in de vorm van een snel wisselend elektromagnetisch veld, waarin het werkstuk wordt geplaatst, wordt opgewekt door een hoogfrequent wisselstroomgenerator.



figuur 3 Inductiefsolderen (principe en werkspoelplaatsing)

Het weerstandsolderen heeft als kenmerk een snelle, plaatselijke verwarming, hetzij door elektrische stroomdoorgang door het werkstuk bij plaatsing van twee **koperchroom elektroden** op dat werkstuk (directe verwarming; zie figuur 4), hetzij door warmte-ontwikkeling door twee **koolstofelektroden** (indirecte verwarming). De benodigde spanning voor de stroomdoorgang c.q. de warmte-ontwikkeling wordt opgewekt door een weerstandsoldeermachine respectievelijk een puntlasmachine.

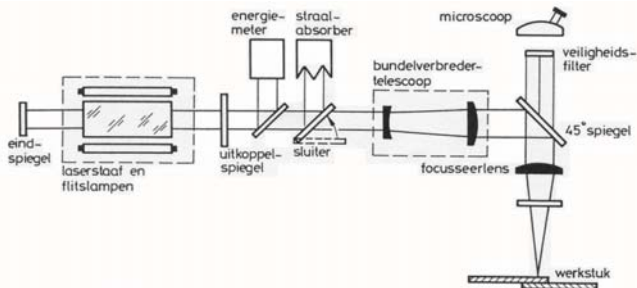


figuur 4 Principe van weerstandsolderen

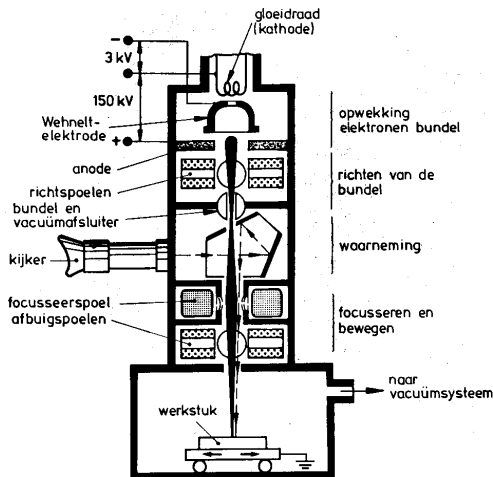
Het laserstraalsolderen kenmerkt zich door een snelle, plaatselijke verhitting van het werkstuk door een **coherente, monochromatische lichtbundel met hoge energiedichtheid**, opgewekt door een Nd:YAG of CO₂-laserbron. Geprogrammeerde sturing van de laserbundel maakt het snel en reproduceerbaar vervaardigen van een groot aantal verbindingen mogelijk (zie figuur 5).

Het elektronenstraalessolderen onderscheidt zich door snelle, plaatselijke verhitting van het werkstuk in vacuüm met behulp van een **gedefocusseerde elektronenbundel** opgewekt door een elektronenstraalessmachine. Geprogrammeerde sturing van de elektronenbundel maakt het snel en reproduceerbaar vervaardigen van een groot aantal verbindingen mogelijk (zie figuur 6).

Het infraroodsolderen kenmerkt zich door zowel plaatselijke als algehele verhitting van het werkstuk met behulp van z.g. kwartsstralers, die specifiek **infrarode (warmte)straling** genereren.

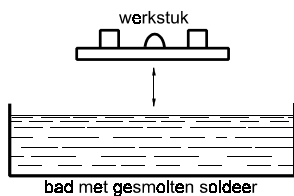


figuur 5 Principe van het laserstraalsolderen



figuur 6 Principe van het elektronenstraalsolderen

Het soldeerbad solderen wordt gekenmerkt door warmte-overdracht aan het gehele werkstuk door **gesmolten soldeer**, dat zich in een gietijzeren, hittevast stalen of keramische bak bevindt, waarin elektrische verhittings-elementen zijn aangebracht. Een vloeimiddellaag boven het gesmolten soldeer biedt bescherming tegen oxidatie (zie figuur 7).



figuur 7 Principe van het soldeerbad solderen

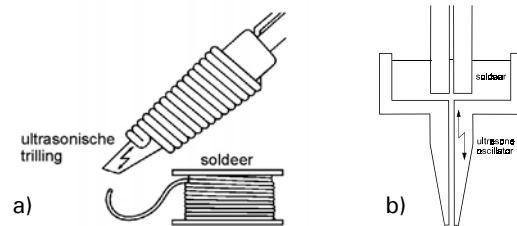
Het zoutbad solderen kenmerkt zich door warmte-overdracht aan het gehele werkstuk door het **gesmolten zout** (eventueel met toegevoegd vloeimiddel), dat zich in een keramische bak bevindt; de op een elektrische spanning aangesloten grafietelektroden in deze bak dragen zorg voor stroomdoorgang en dientengevolge warmte-ontwikkeling (zie figuur 8).



figuur 8 Principe van het zoutbad solderen

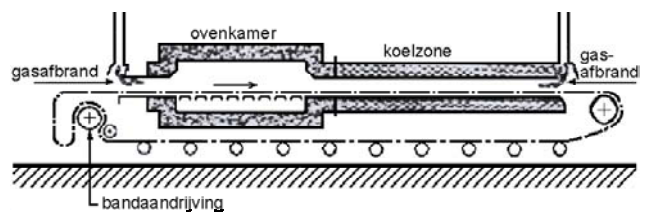
Het ultrasoondsolderen kan worden uitgevoerd zowel met behulp van een **elektrisch verhitte bout**, waarvan de **punt hoogfrequent ultrasoon trilt** en tevens het oppervlak plaatselijk verwarmt (figuur 9a), als in een **bad met ge-**

smolten soldeer, dat het gehele werkstuk verwarmt, terwijl in het bad met behulp van **transducers** hoogfrequente ultrasone trillingen worden opgewekt (figuur 9b).

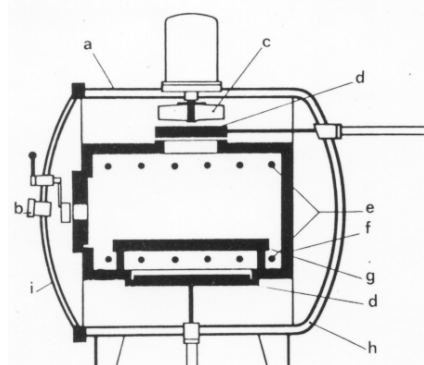


figuur 9 Werkingsprincipe van ultrasoondsolderen

Het ovensolderen kenmerkt zich door warmtetoevoer aan het gehele werkstuk, dat zich in een **(semi) afgesloten ruimte (de retort)** bevindt. De warmte-overdracht vindt plaats door straling, stroming en geleiding van de warmte die wordt ontwikkeld door het verbranden van gassen of die door elektrische verhitting ontstaat (zie figuur 10 en 11).



figuur 10 Principe van een transportbandoven



figuur 11 Schematisch overzicht van een kamervacuümo-ven (Toelichting: a.: vacuümvat; b.: kijkopening; c.: ventilator; d.: beweegbaar schot; e.: verwarmingselementen; f.: isolatie; g.: haard; h.: watergekoelde wand; i.: deur)

6 Voorbehandeling en voorbereiding

Te solderen delen eisen een nauwkeurige voorbereiding. Deze voorbereiding kan inhouden het op maat brengen van de te solderen delen, het scheppen van een juiste oppervlaktegesteldheid zoals ruwheid en vlakheid en het vet- en oxidevrij maken van de soldeerplaats.

Het op maat brengen kan geschieden door mechanische bewerkingen, zoals zagen, snijden en slijpen. Deze bewerkingen brengen spanningen in het materiaal, die tijdens het solderen kunnen leiden tot vormveranderingen en maatafwijkingen op de soldeerspleet. Vooraf spanningsarm gloeien kan dergelijke problemen voorkomen.

Door schuren, slijpen of polijsten kan een juiste ruwheid en vlakheid van het oppervlak worden verkregen; de na te streven oppervlakteruwheid ligt tussen 1 en 6 μm . Een te glad oppervlak leidt meestal tot bevochtigingsproblemen.

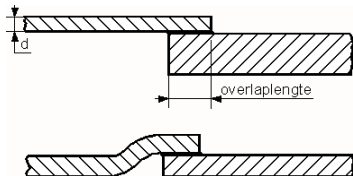
Het is noodzakelijk het te solderen oppervlak vooraf te ontdoen van vet, vuil en oxiden. Ontvetten geschiedt meestal met organische ontvettingsmiddelen (milieu-

problemen) of alkalische ontvettingsmiddelen en **niet** door het toegepaste vloeimiddel! Het vooraf verwijderen van (oude) oxidelagen kan door middel van beitsen worden uitgevoerd en verlicht de taak van het vloeimiddel of de beheerste atmosfeer.

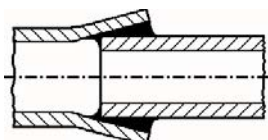
7 Soldeertechisch construeren

Bij het ontwerpen van te solderen constructies in dunne plaat- of pijpmaterialen moet met een aantal aspecten rekening worden gehouden, zoals de functionaliteit, bedrijfsomstandigheden en vervaardigingswijze. Deze aspecten bepalen in belangrijke mate de keuze van het werkstukmateriaal, het soldeer, de verbindingsmethode en de spleet- of naadvorm.

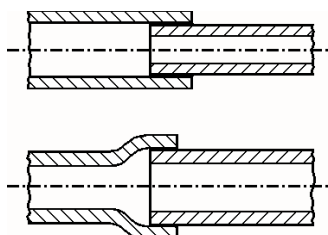
De meeste toegepaste spleet- of naadvorm bij het solderen is de overlapverbinding zowel voor de plaat-plaat-, pijp-pijp-, als pijp-plaatverbinding (zie figuren 12 t/m 15).



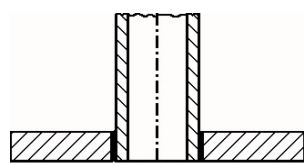
figuur12 Plaat-plaatverbinding



figuur 13 Pijp-pijpverbinding (niet capillaire spleet)



figuur 14 Pijp-pijpverbinding



figuur 15 Pijp-plaatverbinding

De toe te passen overlaplengte bij plaat-plaat- en pijp-pijpverbindingen kan met de volgende formules worden bepaald:

$$L = \frac{V \times R \times d}{T} \quad (\text{plaat-plaatverbinding})$$

$$L = \frac{V \times R \times d \times (D - d)}{T \times D} \quad (\text{pijp-pijpverbinding})$$

Hierin is :

L = overlaplengte (mm)

V = veiligheidsfactor (> 1)

R = trekspanning in de dunste of zwakste wanddikte (MPa)

d = dunste of zwakste wanddikte (mm)

T = afschuifsterkte van het soldeer (MPa)

D = afschuifdiameter (mm)

Bij kamertemperatuur is de overlaplengte voor zacht-soldeerverbindingen 3 - 4 maal de dunste of zwakste wanddikte, terwijl bij hard- en hoogtemperatuursoldeerverbindingen 2 - 3 maal de dunste of zwakste wanddikte in het algemeen wordt aangehouden.

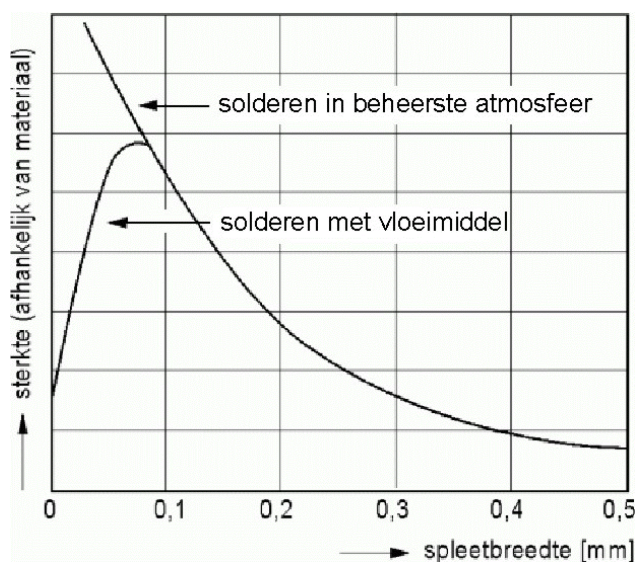
In de installatietechniek daarentegen worden voor de overlap in pijp-pijpverbindingen, afhankelijk van de pijp-diameter, lengtes aangehouden die een factor 10 à 20 groter zijn dan de pijpwanddikte.

Uiteraard zijn stompe verbindingen in principe mogelijk, zeker als er geen al te hoge eisen aan de verbinding worden gesteld qua sterkte of lekdichtheid. De stompe verbinding is echter geen gebruikelijk verbindingstype bij het solderen van dunne materialen. Stompe soldeerverbindingen op trek belast kunnen, indien de spleetbreedte klein is, bezwijken in het basismateriaal. Dit verschijnsel wordt veroorzaakt door het optreden van het verhinderen van vormverandering; echter bij toename van de spleetbreedte zal breuk in het soldeer ontstaan.

De sterkte van een soldeerverbinding hangt onder meer af van de intrinsieke sterkte van het soldeer, de microstructuur van het soldeer in de naad, de spanningstoestand waarin de verbinding verkeert en de soldeerspleetbreedte. Vaak raken bij zacht- en hard-soldeerverbindingen vloeimiddelresten in de naad ingesloten; deze resten benadelen de sterkte, terwijl zij ook de lekdichtheid op negatieve wijze kunnen beïnvloeden.

De sterkte van de soldeernaad in relatie tot de spleetbreedte wordt gegeven in figuur 16. Bij zeer kleine spleetbreedten speelt het ingesloten raken van vloeimiddelresten een negatieve rol, terwijl bij zeer grote spleetbreedten de sterkte wordt bepaald door de eigen, intrinsieke sterkte van het soldeer.

Het ingesloten raken van vloeimiddelresten is in de praktijk nauwelijks te voorkomen, waardoor de reproduceerbaarheid afneemt, tenzij flinke veiligheidsmarges worden genomen (zie ook de opmerking over de overlaplengte zoals deze wordt toegepast in de installatietechniek). Bij het vloeimiddelloos hoogtemperatuursolderen speelt deze problematiek geen rol; de reproduceerbaarheid is dan ook hoog.



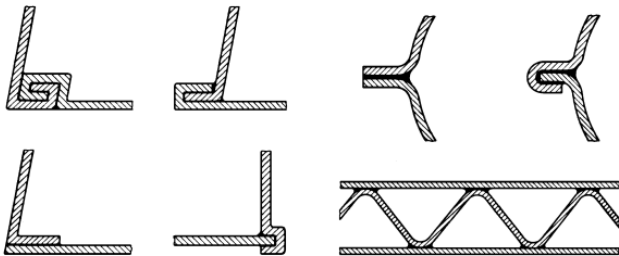
figuur 16 Sterkte van de soldeerverbinding afhankelijk van de spleetbreedte

8 Soldeerdetails

Zoals eerder aangegeven hangt de sterkte van een soldeerverbinding van een aantal aspecten af. Door toename van het soldeerooppervlak, zoals bij de overlapver-

binding het geval is, bouwt men een veiligheidsmarge in, waardoor de kans op falen in de soldeerverbinding wordt beperkt.

Om die reden past men bij verbindingen in dunne materialen, die in de praktijk sterk of lekdicht moeten zijn, vergroting van het soldeeroppervlak toe. Zo worden plaatranden omgefist vóór het solderen ter vergroting van het oppervlak, terwijl het soldeer ter sterkte en af-dichting fungeert. Zie ook de voorbeelden in figuur 17.



figuur 17 Voorbeelden verbinden van dunne plaat

Bij het solderen moet het gesmolten soldeer ongehinderd in de soldeerspleet kunnen vloeien. Als tijdens het verhitten naar de soldeertemperatuur vloeimiddelresten ingesloten dreigen te raken, of drukopbouw in de naad ten gevolge van ingesloten lucht door het dichtknijpen van de soldeerspleet kan ontstaan, zal dit een onvolledige vulling van de naad opleveren. Door een geschikte doseerplaats voor vloeimiddel en soldeer te kiezen, of door afstandsfolies in de naad te plaatsen, kunnen dit soort problemen voorkomen of beperkt worden.

9 Solderen van dunne materialen

Het beheersen van de procesparameters, zoals temperatuur, tijd, opwarm- en afkoelsnelheid, is van belang bij het solderen van dunwandige materialen. Dit is zeker het geval als hoge(re) soldeertemperaturen worden toegepast en er strenge eisen aan de deugdelijkheid van de verbinding worden gesteld (lekdicht, sterk, vormvast e.d.). Deze procesparameters kunnen het gedrag van het vloeibare soldeer en van het werkstukmateriaal op negatieve wijze beïnvloeden. Zo kan het soldeer het werkstukmateriaal aantasten ten gevolge van overmatige erosie-, penetratie- of diffusieverschijnselen. Ook moeten structuur- en vormveranderingen van het werkstukmateriaal worden voorkomen of beperkt.

Onder erosie verstaat men het in oplossing gaan van het werkstukmateriaal in het vloeibare soldeer. Ten gevolge van dit oplossen neemt de effectieve wanddikte af, hetgeen de sterkte en de lekdichtheid van het dunwandig materiaal negatief beïnvloed. Penetratie is het inlopen van vloeibaar soldeer op de korrelgrenzen, waardoor de samenhang tussen de korrels wordt verstoord. Door het vervolgens optreden van korrelgrens- en vaste stofdiffusie in de korrels kunnen intermetallische verbindingen op de korrelgrenzen en in de korrels ontstaan die de corrosiegevoeligheid en de kans op lekkage vergroten.

Structuurveranderingen van het werkstukmateriaal kunnen bestaan uit korrelgroei, hardings- of ontstevigingsverschijnselen, precipitatieharding e.d., terwijl vormveranderingen zich uiten in vervormingen ten gevolge van een te grote opwarm- of afkoelsnelheid, optredende spanningen of relaxerende restspanningen, fasetransformaties of verschillen in uitzetting. Ongelijkmatige verwarming van het werkstuk is vaak debet aan deze problemen.

Om bovengeschetste problemen bij het solderen van dunwandige materialen te vermijden, is het zaak de hoeveelheid soldeer te beperken, de soldeertemperatuur en -tijd zo laag c.q. zo kort mogelijk te houden en op verantwoorde wijze op te warmen en af te koelen.

In het kort wordt het solderen van onderstaande dunne materialen besproken. (Voor meer informatie wordt verwezen naar de FME voorlichtingspublicaties VM 45 en VM 82; voor de aangegeven processen wordt verwezen naar hoofdstuk 2 "Indeling soldeerprocessen").

Ongelegeerd staal

Ongelegeerd staal is in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

Organisch bekleed staal

Organisch bekleed staal is met geen van de beschreven processen soldeerbaar (tenzij op de soldeerplaats de bekleeding vooraf wordt weggenomen en plaatselijk wordt verhit).

Verzinkt staal

Verzinkt staal is vanwege de aanwezige zinklaag met alle beschreven zacht- en hardsoldeerprocessen met plaatselijke warmte-inbreng soldeerbaar. Bij gehele verwarming van het verzinkte staal zal de zinklaag smelten en verloren gaan. Verzinkt staal is met geen van de beschreven hoogtemperatuursoldeerprocessen soldeerbaar; vanwege smelten en sterke verdamping van de zinklaag wordt het proces verstoord.

Gealuminiseerd staal

Gealuminiseerd staal is vanwege de aanwezige aluminiumlaag met alle beschreven zacht- en hardsoldeerprocessen met plaatselijke warmte-inbreng soldeerbaar. Bij gehele verwarming van het gealuminiseerde staal zal de aluminiumlaag smelten en verloren gaan. Zo is gealuminiseerd staal met de beschreven hoogtemperatuursoldeerprocessen soldeerbaar, mits smelten en sterke verdamping van de aluminiumlaag wordt voorkomen. Dit is het geval indien geëigende aluminiumsoldeersoorten voor het solderen van aluminium worden toegepast.

Vertind staal (blik)

Vertind staal is vanwege de aanwezige tinlaag met alle beschreven zachtsoldeerprocessen met plaatselijke warmte-inbreng soldeerbaar. Bij gehele verwarming van het vertinde staal zal de tinlaag smelten en verloren gaan. Vertind staal is met geen van de beschreven hard- en hoogtemperatuursoldeerprocessen soldeerbaar; vanwege smelten en sterke verdamping van de tinlaag wordt het proces verstoord.

Verchroomd staal

Verchroomd staal is in principe met alle beschreven processen soldeerbaar, behalve met zoutbadsolderen.

Laaggelegeerd staal

Laaggelegeerd staal is in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

Austenitisch roestvast staal

Austenitisch roestvast staal is met uitzondering van het zoutbadsolderen in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

Aluminium

De aluminiumsoorten 1xxx, 3xxx en 6xxx zijn in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

De aluminiumsoort 2xxx is in principe met de beschreven zachtsoldeerprocessen soldeerbaar.

De aluminiumsoort 4xxx ($Si < 7\%$) is in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

De aluminiumsoort 4xxx ($Si \geq 7\%$) is vanwege het lage smeltpunt/-traject met geen van de beschreven processen soldeerbaar.

De aluminiumsoort 5xxx ($Mg < 1\%$) is in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

De aluminiumsoort 5xxx ($Mg \geq 1\%$) is vanwege het lage smeltpunt/-traject met geen van de beschreven processen soldeerbaar.

De aluminiumsoorten 7xxx Cu vrij en 7xxx Cu houdend zijn met uitzondering van de hoogtemperatuursoldeer-

processen (vanwege de aanwezigheid van zink in de legering) in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

Koper

De kopersoorten, koper zuurstofhoudend en zuurstofvrij, zijn met uitzondering van het zoutbadsolderen in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

N.B.: *Bij het solderen in waterstof (of ammoniak/waterstofmengsel) komt alleen koper zuurstofvrij in aanmerking; zuurstofhoudend koper ondervindt hinder van waterstofziekte (brosheid, scheuren).*

De kopersoorten koper-zink(messing) en koper-tin(brons) zijn met uitzondering van het zoutbadsolderen en de hoogtemperatuursoldeerprocessen in principe met alle beschreven processen soldeerbaar.

Samengevat leidt het bovenstaande tot het overzicht in tabel 2.

10 Soldeermaterialen

Afhankelijk van hun smeltpunt/-traject worden de soldeermaterialen als volgt ingedeeld:

- ▶ zachtsoldeersoorten met een smeltpunt/-traject onder 450°C;
- ▶ hardsoldeersoorten met een smeltpunt/-traject boven 450°C.

De hoogtemperatuursoldeersoorten worden gekenmerkt door een soldeertemperatuur die in het algemeen boven 800°C ligt. Zowel zacht-, hard- als hoogtemperatuursoldeersoorten kunnen voor het solderen van dunne materialen worden toegepast; uiteraard zal de keuze worden bepaald door de eisen die aan de verbinding worden gesteld.

Zachtsoldeersoorten zijn veelal legeringen op basis van elementen als gallium, bismut, indium, tin, cadmium, lood of zink, in volgorde van toenemend smeltpunt. De meest bekende soldeersoort is op tinbasis: tinlood (=verboden; alleen nog toelaatbaar voor elektronica-toepassingen), tinzilver, tinkoper, tinbismutzilver (als vervangers voor tinlood), tinantimoon(toepassing o.a. in de voedingsmiddelenindustrie) en tinzink. Dit laatste soldeer is met de zinkcadmium en zinkaluminiumsoldeersoorten geschikt voor het solderen van aluminium.

Legeringen op basis van aluminium, zilver, koper of nikkel zijn de belangrijkste hardsoldeersoorten. Aluminiumsoldeer wordt toegepast voor het solderen van aluminium, terwijl de (cadmiumvrije)zilversoldeersoorten vooral

toepassing vinden bij het hardsolderen van on- en laaggelegeerd staal, roestvast staal en koper/koperlegeringen. De koperhoudende soldeersoorten worden gebruikt voor het solderen van on- en laaggelegeerd staal, kopernikkel en nikkel; met koperfosforsoldeer kan koper vloeimiddeloor worden hardgesoldeerd. Nikkelsoldeersoorten worden wel toegepast om roestvast staal en hooggelegeerde staalsoorten te solderen.

De hoogtemperatuursoldeersoorten zijn vaak op basis van dezelfde elementen als de hardsoldeersoorten, echter elementen met een hoge dampspanning zoals zink en cadmium zijn taboe bij het solderen in vacuüm. Daarnaast worden soldeersoorten op basis van goud (bijv. goudnikkel) en palladium toegepast indien corrosiebestendige en/of vacuümdichte verbindingen zijn vereist. Voor meer informatie over soldeermaterialen wordt verwezen naar de FME voorlichtingspublicaties VM 44 en 82; voor normering van soldeermaterialen zie hoofdstuk 17 van deze publicatie.

11 Activeren en beschermen van het te solderen oppervlak

Ten einde het te solderen oppervlak geschikt te maken voor de bevochtiging van het soldeer moet het oppervlak naast vet- en vuil-, ook oxidevrij zijn. Bovendien moet dit oppervlak tijdens het verhitten naar de soldeertemperatuur oxidevrij blijven. Het activeren(= geschikt zijn voor bevochtigen) en beschermen(= geschikt houden voor bevochtigen) van het te solderen oppervlak kan op twee manieren geschieden:

- ▶ door een vloeimiddel te gebruiken;
- ▶ door een beheerste atmosfeer toe te passen.

Vloeimiddelen

Het gebruikte vloeimiddel moet aan een aantal eisen voldoen, te weten:

- ▶ werkzaam zijn in het temperatuurtraject van het toegepaste soldeer;
- ▶ een lager smeltpunt hebben dan het soldeer;
- ▶ door het gesmolten soldeer goed verdringbaar zijn;
- ▶ een goede thermische stabiliteit hebben;
- ▶ de vloeimiddelresten moeten goed verwijderd kunnen worden, zeker als de resten corrosie kunnen veroorzaken.

Vormen waarin vloeimiddelen worden toegepast, zijn:

- ▶ vloeistoffen, poeders, pasta's;
- ▶ als bekleding om een soldeerdraad of als kern in een soldeerdraad;
- ▶ fijnverdeeld in soldeerpoeder/-pasta's.

tabel 2 Overzicht van de soldeerbaarheid van diverse materialen

Materiaal	Soldeerbaar met alle processen?
Ongelegeerd staal	ja
Organisch bekleed staal	nee
Verzinkt staal	nee, behalve met zachtsoldeerprocessen, en hardsoldeerprocessen met plaatselijke warmte-inbreng
Gealuminiseerd staal	ja, mits geëigend soldeer wordt toegepast
Vertind staal (blik)	nee, behalve met zachtsoldeerprocessen met plaatselijke warmte-inbreng
Verchroomd staal	ja, behalve met zoutbadsolderen
Laaggelegeerd staal	ja
Austenitisch RVS	ja, behalve met zoutbadsolderen
Aluminium 1xxx,3xxx,6xxx	ja
Aluminium 2xxx	nee, behalve met zachtsoldeerprocessen
Aluminium 4xxx met Si < 7%	ja
Aluminium 4xxx met Si > 7%	nee
Aluminium 5xxx met Mg < 1%	ja
Aluminium 5xxx met Mg > 1%	nee
Aluminium 7xxx Cu vrij/houdend	ja, behalve met hoogtemperatuursoldeerprocessen
Koper zuurstofvrij/houdend	ja, behalve met zoutbadsolderen
Koperzink/kopertin	ja, behalve met zoutbad- en hoogtemperatuursoldeerprocessen

Het zal duidelijk zijn dat voor het zachtsolderen andere vloeimiddelen worden gebruikt dan voor het hardsolderen. Gezien de hogere soldeertemperatuur bij het hardsolderen dan bij het zachtsolderen, zal met name de thermische stabiliteit van het vloeimiddel in het eerste geval beter moeten zijn.

Vloeimiddelen voor het zachtsolderen zijn op een basis van:

- ▶ of anorganische zuren/zouten (bijv. zoutzuur/ammoniumchloride);
- ▶ of organische zuren/zouten (bijv. citroenzuur/ureum);
- ▶ of natuurlijke harsen.

De corrosiviteit van het vloeimiddel c.q. de vloeimiddelrest neemt in bovenstaande volgorde af; dit impliceert dat mildere vloeimiddelen stabiele oxiden (bijv. chroomoxiden) niet of moeilijk verwijderen. Deze vloeimiddelen kunnen in een waterige oplossing of met een organische voorbereiding worden geleverd.

Voor het zachtsolderen van on-, laaggelegeerd en verzinkt staal worden vloeimiddelen op basis van zink- en ammoniumchloriden in een waterige oplossing toegepast, terwijl voor roestvast staal zoutzuur aan het vloeimiddel wordt toegevoegd. Vloeimiddelen met dezelfde samenstelling, maar in een organische voorbereiding, worden aangewend voor het zachtsolderen van vertind staal (blik); dit geldt eveneens voor koper en koperlegeringen. Elektrische en elektronische onderdelen worden alleen met natuurlijke harshoudende vloeimiddelen zachtgesoldeerd.

Vloeimiddelen voor het hardsolderen zijn op basis van hoogsmeltende zouten zoals borax, boraten, fosfaten, silicaten, chloriden, fluoriden e.d. en kunnen worden ingedeeld naar het werkteemperatuurgebied:

Werktemp. gebied	Samenstelling vloeimiddelen
550 - 800°C	boriumverbindingen en fluoriden
750 - 1100°C	boriumverbindingen (borax)
> 1000°C	o.a. boraten, fosfaten, silicaten
600 - 1000°C	o.a. chloriden, fluoriden

Ongelegeerd, laaggelegeerd en verzinkt staal kan worden gehardsoldeerd met zilversoldeer met een boriumverbindingen/fluoridenhoudend vloeimiddel; wordt een messing-soldeer(koperzink) toegepast op deze staalsoorten, dan wordt een boraxhoudend vloeimiddel gebruikt. Voor nikkel-soldeersoorten wordt op deze materialen een vloeimiddel gebruikt dat geschikt is voor > 1000°C. Voor het hardsolderen van roestvast staal worden chloridehoudende vloeimiddelen toegepast. Speciale vloeimiddelen op basis van chloriden en/of fluoriden worden aangewend voor het hardsolderen van gealuminiseerd staal, aluminium en aluminiumlegeringen; de enkel fluoridehoudende geven geen corrosieve resten.

Beheerste atmosfeer

De andere wijze van activeren en beschermen van het te solderen oppervlak is het toepassen van een beheerste atmosfeer. De beheerste atmosfeer wordt in principe gekenmerkt door het vrij zijn van zuurstof en waterdamp. Men onderscheidt drie soorten atmosferen:

- ▶ reducerend (bijv. H₂ of CO);
- ▶ beschermend/inert (bijv. Ar of He; soms ook N₂);
- ▶ luchtledig (vacuüm).

Het solderen in een beheerste atmosfeer is mogelijk door de afwezigheid van zuurstof en waterdamp en het toepassen van een relatief hoge temperatuur: hoogtemperatuursolderen.

Deze hoge temperatuur is noodzakelijk om de oxiden te ontleden; oxiden worden bij hoge temperatuur instabiel en reduceren tot metaal en waterdamp of dissociëren in metaal en zuurstof. Door de waterdamp c.q. zuurstof weg te nemen (afpompen) en het solderen uit te voeren in een beheerste atmosfeer, kan het blanke metaal door het gesmolten soldeer worden bevochtigd en het soldeer in de aldus gereinigde capillaire spleet vloeien. Bij

afkoeling stolt het soldeer en komt de verbinding tot stand; hechting treedt op, doordat op het grensvlak soldeer-basismateriaal - op atomaire schaal - onderling uitwisseling van elementen uit het soldeer en het basismateriaal plaatsvindt.

In de praktijk wordt dit proces nog weleens verstoord; de beheerste atmosfeer blijkt dan niet zo zuiver te zijn als bedoeld. Door inlek van het systeem, waarin het solderen wordt uitgevoerd, komt er toch zuurstof of waterdamp in voor. Het gevolg is dat het blanke metaal opnieuw oxideert of erger nog, dat de ontleding niet of niet volledig plaats vindt. Ook kunnen de reducerende of beschermende gassen een bron van onbedoelde verontreinigingen zijn. Het zijn nu eenmaal slechts technisch zuivere gassen die worden gebruikt: de aanwezigheid van verontreinigingen in het gas in de vorm van zuurstof of waterdamp is niet uit te sluiten.

De zuiverheid van een gas wordt aangegeven met het begrip dauwpunt: hoe lager het dauwpunt des te zuiverder het gas of de atmosfeer c.q. het vacuüm. In de praktijk blijkt dat het zeer kostbaar is technische gassen met een laag dauwpunt te maken; bovendien treden bij het transport van het gas van gastank of -cilinder naar het beheerste atmosfeersysteem (meestal een oven) onderweg lekken op, waardoor het dauwpunt aanzienlijk verslechterd. Kortom, roestvast staal (chromiumoxidehuid!) en koper bijvoorbeeld zijn in een reducerende resp. beschermende atmosfeer soldeerbaar als er aan de hoge eisen van zuiverheid van de atmosfeer op eenvoudige wijze kan worden voldaan.

Het blijkt dat het verkrijgen en behouden van een zuiver vacuüm met zeer lage zuurstofgehalten en een laag dauwpunt van het in het vacuüm aanwezige restgas, eenvoudiger te realiseren is. Afdichten en afpompen van het systeem blijkt gemakkelijker in de praktijk dan het lekvrij toevoeren van reducerend of beschermgas. Dit verklaart waarom het hoogtemperatuursolderen in vacuüm nog steeds in omvang en betekenis toeneemt. Desalniettemin wordt het hoogtemperatuursolderen onder reducerend gas en in mindere mate onder beschermgas nog veel toegepast. In tabel 3 wordt aangegeven in welke soldeeratmosfeer de verschillende materialen te solderen zijn.

tabel 3 Overzicht van te solderen basismateriaal in relatie met de soldeeratmosfeer

	soldeer-atmosfeer	dauwpunt °C	te solderen basismateriaal
a	Gedroogd N ₂ /H ₂ /CO gas	-40	Ongelegeerd staal, koper, messing
b	Gedisassocieerd NH ₃ -gas	-54	Idem als a. + laaggelegeerd staal (Cr < 5%)
c	Zuiver argon/helium	-60	Idem als b. + titaan, zirkoon, wolfram, molybdeen
d	Grofvacuüm (1000 - 1mbar)	-17(!)	Ongelegeerd staal, koper
e	Laagvacuüm (1-10 ⁻³ mbar)	-74	Idem als d. + laaggelegeerd staal (Cr < 5%)
f	Hoogvacuüm (10 ⁻³ -10 ⁻⁶ mbar)	-89	Idem als c. (uitgezonderd messing) + RVS, aluminium, superlegeringen, keramiek, gealuminiseerd staal, verchroomd staal

12 Automatisering van het solderen

Ter verhoging van de productie (serie-, massafabricage), ter vergroting van de reproduceerbaarheid of ter verbetering van de proceseconomie (vermindering loonkosten) en de arbeidsomstandigheden kan worden overwo-

gen het soldeerproces te mechaniseren, automatiseren of zelfs te robotiseren.

Uitgangspunt moet wel zijn dat het proces zich leent om gemechaniseerd, geautomatiseerd of gerobotiseerd te worden uitgevoerd. Anderzijds wordt een aantal beschreven processen, gezien de verhittingswijze, meestal niet handmatig uitgevoerd, bijv. het inductief-, laser- en elektronenstraal-, infrarood-, soldeer- en zoutbad- en ovensolderen, hetgeen impliceert dat deze processen vaak al geheel of gedeeltelijk gemechaniseerd worden uitgevoerd.

Van de nog niet genoemde processen zijn het vlam-, weerstand- en ultrasoonsolderen, zowel handmatig als gemechaniseerd, goed uitvoerbaar. Het boutsolderen is het enige proces dan niet gemechaniseerd wordt uitgevoerd.

Automatisering van het soldeerproces vergt in het algemeen de nodige hulpgereedschappen. Soldeermallen, fixatiegereedschap, doseerapparatuur, voor zowel soldeer als vloeimiddel, draaitafels, carrousels, transportbanden e.d. zijn voorbeelden van hulpgereedschappen en -middelen.

Wordt tot automatisering van het soldeerproces overgegaan, dan is het voor de processen met plaatselijke warmte-overdracht van belang, dat tijdens het solderen de positie van de soldeernaad ten opzichte van de verhittingsbron (brander, energiebundel) is gewaarborgd.

Meer flexibel zijn de processen waarbij het gehele te solderen werkstuk wordt verwarmd (oven, zoutbad e.d.).

Voorts is het aan te bevelen te komen tot standaardisatie van materialen en afmetingen. Een minder belangrijke rol spelen bij het capillair solderen aspecten als toegankelijkheid van de soldeernaad, en de naad- of spleetvorm. Wel is het aan te bevelen dat de mogelijkheid aanwezig is het soldeerproces vooraf of tijdens de bewerking te kunnen besturen, regelen of corrigeren, hetzij handmatig, hetzij mechanisch of elektronisch.

Vaak zal het product langs het soldeerproces worden bewogen. Dit stelt eisen aan de fixatie van de onderdelen ten opzichte van elkaar: afwijkingen in spleetbreedte vóór het solderen en verstoring van het stollen van het soldeer moeten worden voorkomen. Het valt dan ook te overwegen om in die gevallen waar dergelijke problemen kunnen optreden, het soldeerproces langs het product te voeren (bijv. laser- of elektronenstraalessolderen). Het hoeft - tot slot - geen betoog dat bij het gemechaniseerd uitvoeren van het soldeerproces hoge eisen worden gesteld aan een nauwkeurige voorbereiding.

13 Kwaliteitsaspecten bij het solderen

Zoals bij andere verbindingstechnieken (lassen, lijmen, mechanisch verbinden) het geval is, is het bij het solderen mogelijk kwalitatief goede verbindingen te verkrijgen. Onder kwaliteit verstaat men het geheel aan deugdelijkheid en hoedanigheid van de gesoldeerde verbinding (functie, eigenschappen e.d.).

Het eisen van kwaliteit werkt meestal kostenverhogend, ook bij soldeerverbindingen. M.a.w. dit betekent dat producten waaraan geringe eisen worden gesteld, anders worden benaderd dan producten waaraan hoge eisen worden gesteld. In het algemeen valt het handmatig solderen in de eerstgenoemde categorie eisen, terwijl het gemechaniseerd solderen wordt toegepast als aan laatstgenoemde categorie eisen wordt gesteld. Hetzelfde onderscheid kan worden gemaakt voor het met vloeimiddel of in een beheerste atmosfeer solderen.

Bij industriële soldeerproducties zal men in het algemeen toch de volgende wijze van kwaliteitsbeheersing aanhouden:

- ▶ opstellen van een soldeerprocedurespecificatie;
- ▶ kwalificeren van deze specificatie;

- ▶ controle op de naleving van de soldeerprocedure;
- ▶ keuring van de producten of productiewijze.

(In de FME voorlichtingspublicaties VM 44 en VM 82 wordt uitgebreider ingegaan op deze aspecten).

De soldeerprocedurespecificatie bevat o.a. de soldeermethode, de geometrie van de verbinding, het soort soldeer, vloeimiddel of beheerste atmosfeer, de voor- en nabewerkingswijze, de soldeercyclus en het te solderen werkstukmateriaal.

De controle op de naleving van de soldeerprocedure behelst onder meer naast de controle op de procesuitvoering ook de controle op de soldeerapparatuur, de materialen en de inspectie van de verbindingen.

De keuring van producten kan voor gesoldeerde verbindingen op zowel niet-destructieve als destructieve wijze geschieden, hetgeen tevens tot een uitspraak over de productiewijze kan leiden.

Als niet-destructieve onderzoeksmethoden kunnen worden genoemd: voor oppervlakfouten, het visueel inspecteren en penetrantonderzoek; voor defecten in de soldeernaad, radiografisch en ultrasoon onderzoek (in sommige gevallen ook wervelstroom- en thermografisch onderzoek), terwijl voor de dichtheidscontrole de gangbare lektest- en lekzoekmethoden kunnen worden toegepast.

Metallografisch onderzoek geeft als destructieve onderzoeksmethode een beeld van de vulgraad, aanwezigheid van defecten in en de structuur van de soldeernaad. In afschuif- en trekproeven kan de mechanische sterkte van de gesoldeerde verbinding worden bepaald, zowel bij kamertemperatuur als bij andere beproevingstemperaturen (bijv. kruipproeven). Het dynamisch sterktegedrag van een gesoldeerde verbinding kan met behulp van vermoeiingsproeven worden bepaald.

Productkeuringen zijn veelal om praktische redenen niet destructief uitvoerbaar, tenzij steekproefsgewijs onderzoek wordt uitgevoerd. Door destructief onderzoek op met de productie mee gesoldeerde proefstukken (product dummy's) uit te voeren, kan een goed beeld worden verkregen van de kwaliteit van de producten of de gevolgde productiewijze.

Een belangrijk kwaliteitsaspect is de corrosiebestendigheid van gesoldeerde verbindingen. Daar per definitie een toevoegmateriaal wordt gebruikt met een van het basismateriaal afwijkende chemische samenstelling, is latent het risico voor galvanische corrosie aanwezig, tenzij een soldeer met een edeler samenstelling dan het basismateriaal wordt toegepast. In het geval dat met vloeimiddel wordt gesoldeerd, zoals bij zacht- en hard-soldeerprocessen gebruikelijk is, bepalen de achtergebleven hygroscopische vloeimiddelresten de gevoeligheid voor optreden van corrosie. Afdoende verwijdering van deze resten voorkomt problemen. Kortom, met een juist uitgevoerde soldering en nabehandeling zijn corrosiebestendige verbindingen te realiseren.

N.B.: *Bij verbindingen verkregen met hoogtemperatuur-soldeerprocessen speelt corrosie ten gevolge van vloeimiddelresten uiteraard geen rol.*

14 Nabehandeling en nabewerking

Uit oogpunt van corrosiegevoeligheid is het verwijderen van vloeimiddelresten na het solderen een noodzaak. Deze verwijdering moet bij voorkeur uiterlijk 12 - 24 uur na het solderen plaatsvinden. Vaak is afspoelen met of afschrikken in warm water vergezeld van borstelen en een afdoende remedie. Voor het verwijderen van vloeimiddelresten van zachtsoldeerverbindingen worden ook wel organische of alkalische oplosmiddelen gebruikt. Met beitsvloeistoffen (veelal zuren) worden de vloeimiddelresten van hardsoldeerverbindingen verwijderd; goed naspoelen met water is dan een vereiste.

Hoogtemperatuursoldeerverbindingen behoeven in het algemeen geen nabehandeling; soms moet overmatig uitgevloeid soldeer met een mechanische bewerking worden weggenomen. Dit kan ook het geval zijn voor zacht- of hardsoldeerverbindingen. Om overmatig uitvloeien van soldeer te vermijden, worden wel anti-vloeimiddelen toegepast. Resten van deze anti-vloeimiddelen moeten om esthetische redenen (met borstelen of stralen) worden verwijderd.

Een ongecontroleerde plaatselijke warmte-inbreng tijdens het solderen kan vervorming tot gevolg hebben; controle na afloop van het solderen is dan noodzakelijk. Ook aanwezige restspanningen in het te solderen materiaal kunnen tot vervorming leiden; door vooraf spanningsarm te gloeien, kan vervorming worden voorkomen of beperkt.

15 Economische aspecten van het solderen

In veel gevallen zal niet alleen op technische gronden, maar ook op economische gronden voor solderen worden gekozen. De keuze moet ook op deze gronden verantwoord zijn. In een beknopt overzicht wordt inzicht gegeven in de factoren die de kostprijs van een gesoldeerd product bepalen.

Hiertoe worden de volgende factoren in beschouwing genomen:

1. het soldeermateriaal;
2. de hulpmiddelen;
3. de reiniging;
4. de montage en dosering van soldeer/vloeimiddelen;
5. het soldeerproces;
6. de inspectie;
7. de loonkosten.

Punt 5 'het soldeerproces' kan verder worden onderverdeeld in de factoren:

- 5.1 de apparatuur (afschrijving/rente);
- 5.2 de onderhouds- en reparatiekosten;
- 5.3 het verbruik aan energie/gassen/water.

Bovenstaande factoren worden kort puntsgewijs toegelicht.

Ad. 1. het soldeermateriaal

De prijs van het soldeer kan, afhankelijk van het type, variëren tussen enkele eurocenten en tientallen euro's per gram. Daar de soldeernaad een volume heeft, is vooral de soortelijke massa van het soldeer van belang voor de kosten van het soldeer.

Ad. 2. de hulpmiddelen

Indien een te solderen constructie zelffixerend is, is een soldeertafel of een soldeermal (voor in een bad of oven) het enige benodigde hulpmiddel. Is de constructie echter niet zelffixerend, dan zijn hulpmiddelen als centerstag, centreermal, hechtglas e.d. nodig. Deze middelen eisen investeringskosten, hetgeen apparatuurafschrijving betekent.

Ad. 3. de reiniging

Grondig reinigen kan handmatig met (alkalische of organische) oplosmiddelen gebeuren. Bij grotere productie-aantallen zal vaak een ontvettingsinstallatie (dampontvetten) worden toegepast; afzuiging is dan noodzakelijk. De kosten lopen op van eenvoudig verbruiksgoed tot aanschaf van installaties (ontvetting en afzuigen) en nodig onderhoud.

Ad. 4. de montage en dosering van soldeer/vloeimiddel

Het samenstellen van werkstukdelen is vaak tijdrovend en dan ook een (loon)kostenfactor. Afhankelijk van het soldeerproces kan het soldeer en het eventuele vloeimiddel handmatig vooraf of tijdens het solderen worden aangebracht. Bij het gemechaniseerd solderen worden vaak doseerautomaten voor soldeer en vloeimiddel gebruikt, hetgeen wederom investeren en afschrijven betekent.

Ad. 5. het soldeerproces

Ad.5.1 de apparatuur

Afhankelijk van het gekozen soldeerproces kan de aanschaf van de benodigde apparatuur variëren tussen enkele honderden en vele tienduizenden euro's (voor een prijsindicatie per proces wordt verwezen naar de Procesomschrijvingen). Afschrijving en rente zullen afhankelijk van de productie-aantallen meer of minder van invloed zijn op de kostprijs.

Ad.5.2 de onderhouds- en reparatiekosten

Een bepaald percentage van de investeringskosten moet worden aangehouden voor onderhoud en reparatie van de soldeerapparatuur; dit geldt ook voor de eerdergenoemde hulpmiddelen en apparatuur/installaties.

Ad.5.3 het verbruik aan energie/gassen/water

De kosten van het verbruik aan energie hangen sterk samen met het toegepaste soldeerproces, de omvang van de en het aantal te solderen producten en de wijze van solderen (plaatselijk of geheel verhitten van het werkstuk). De benodigde energie kan worden verkregen door verbranding van gassen of betrokken van het elektriciteitsnet.

Ook worden voor ovensoldeerprocessen (soms) dure koelgassen gebruikt, terwijl water dan eveneens voor koeling wordt toegepast. Opslag van het gas in voorraadtanks en de distributie ervan vergt soms kostbare installaties. Ter beperking van het waterverbruik worden gesloten koelwatercircuits toegepast.

Ad. 6. de inspectiekosten

Soms kan worden volstaan met een visuele inspectie; de kosten zijn dan meestal laag. Echter, moeten de gesoldeerde producten radiografisch of ultrasono worden onderzocht, dan kunnen de andere flink toenemen. Ook lektesten en lekzoeken zijn vaak omslachtige en tijdrovende procedures, die kostenverhogend werken.

Ad. 7. de loonkosten

Vaak blijkt de post loonkosten veruit de meest kostprijsbepalende, vooral bij handmatig solderen. Mechanisering van het soldeerproces kan deze kosten doen verminderen; het is dan zaak de andere stappen zoals reiniging, montage, dosering van soldeer/vloeimiddel e.d. eveneens te mechaniseren.

16 Arbo- en milieuaspecten van het solderen

Bij het uitvoeren van soldeerwerkzaamheden kunnen emissies vrijkomen in de vorm van soldeerrook, gassen/dampen, straling en geluid, die de gezondheid van de soldeerder kunnen schaden. Bovendien blijven na afloop restanten (soldeer, vloeimiddelen) over, die bij onjuiste afvoer het milieu kunnen belasten.

Bij soldeerrook die schadelijk is voor de gezondheid, valt vooral te denken aan rook die lood- of cadmiumhoudend is. Ventileren en afzuigen naast het dragen van persoonlijke ademhalingsbeschermingsmiddelen (PABM) is dan nodig (zie hiervoor de SZW Arbobeleidsregel 4.9-2).

Bij onvolledige verbranding ontstaat het giftige koolmonoxidegas, zoals bijv. bij het vlamsolderen het geval kan zijn; ook kunnen zich bij het vlamsolderen giftige gassen als stikstofmono- en dioxiden (NO_x) vormen. Ventileren en afzuigen zijn dan noodzakelijk.

Daar bij de zacht- en hardsoldeerprocessen vloeimiddelen worden gebruikt, kunnen bij het solderen dampen ontstaan die schadelijk voor de gezondheid zijn. Ventileren en afzuigen zijn noodzakelijk.

Straling in de vorm van infrarode(warmte) en ultraviolette straling, alsook fel zichtbaar licht, treedt op bij het laser- en elektronenstralsolderen; deze straling is schadelijk voor de ogen. Bij het autogeen vlamsolderen met een gasflux treedt fel, hinderlijk licht op. Het dragen van oogbescherming in de vorm van brillen met donkere glazen, UV-brillen e.d. is noodzakelijk.

Ook bij soldeerprocessen kunnen geluidsniveaus optreden die de 80 dB(A)-grens overschrijden; voorbeelden zijn het ultrasoonsolderen en onder bepaalde omstandigheden het autogeene vlamsolderen, het ovensolderen (bijv. vacuümvovens) en het elektronenstralsolderen. Bij de laatste twee processen zijn vooral de vacuümpompen hier debet aan. Het dragen van oordoppen, oorkappen of otoplastieken is dan noodzakelijk.

Voor het milieu schadelijke afvalstoffen die bij het solderen vrijkomen, zijn met name de lood-, cadmium- of chroomhoudende soldeerrestanten en de fluoridehoudende vloeimiddelresten. Deze afvalstoffen moeten als gevaarlijk afval worden behandeld en afgevoerd.

Ter bevordering van het veilig werken, gelden de volgende voorzorgsmaatregelen:

- ▶ elektrische soldeerbouten en -pistolen moeten van randaarde zijn voorzien;
- ▶ bij vlamsolderen moeten aansluitingen, slangen en gascilinders regelmatig op lekkage worden gecontroleerd;
- ▶ bij inductiefsolderen moet de soldeerder geen metalen voorwerpen als ringen e.d. dragen, daar deze door de werkspoel worden opgewarmd;
- ▶ bij weerstandsolderen moet men bedacht zijn op hoge spanningen en stromen (pace makers!);
- ▶ bij laser- en elektronenstralsolderen moet oogbescherming worden gedragen;
- ▶ bij infraroodsolderen moet eveneens oogbescherming worden gedragen;
- ▶ bij soldeer- en zoutbadsolderen moet men bedacht zijn op spatten en dienen de werkstukken droog te zijn, voordat ze in het bad gebracht worden, om stoomexplosies te voorkomen;
- ▶ bij ultrasoonsolderen moet gehoorbescherming worden gedragen;
- ▶ bij ovensolderen met waterstofgas moet worden gecontroleerd op lekkages om explosies te voorkomen, terwijl bij het beluchten van vacuümvovens rekening moet worden gehouden met het zuurstofverdringende stikstof- of argongas.

Eten, drinken en roken moeten tijdens soldeerwerkzaamheden worden vermeden.

17 Normering

Op de website (www.nen.nl/servlet/shop.sv) van het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN) zijn soldeernormen te vinden. De belangrijkste worden hier weergegeven:

- ▶ NEN-ISO 9453:1994 en Zachtsoldeerlegeringen; Chemische samenstellingen en leveringsvormen
- ▶ NEN-ISO 9454-1:1994 en Vloeimiddelen voor zachtsolderen; Indeling en eisen; Deel 1; Indeling, etikettering en verpakking
- ▶ NEN-EN-ISO 9454-2:2000 en Vloeimiddelen voor zachtsolderen; Indeling en eisen; Deel 2; Prestatie-eisen
- ▶ NEN-(EN)-ISO 9455-1 t/m 16 Vloeimiddelen voor zachtsolderen; Beproevingsmethoden; Deel 1 t/m 16
- ▶ NEN 10068-2-20/44/54 Klimatologische en mechanische beproevingsmethoden voor elektrotechnische producten
- ▶ NEN-EN 1044:1999 en Hardsolderen; Toevoegmaterialen
- ▶ NEN-EN 1045:1997 en Hardsolderen; Vloeimiddelen voor hardsolderen; Indeling en technische leveringsvoorwaarden
- ▶ NEN-EN-ISO 10564:1997 en Materiaal voor hard- en zachtsolderen: Methoden voor monsterneming van zachtsoldeer voor analyse
- ▶ NEN-EN 12797:2000 en Hardsolderen; Destructieve beproeving van hardgesoldeerde verbindingen
- ▶ NEN-EN 12799:2000 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 14324:2002 Ontw. en Hardsolderen; Richtlijnen voor het toepassen van handgesoldeerde verbindingen
- ▶ NEN-EN-ISO 18279:2001 Ontw. en Hardsolderen; Onvolkomenheden in hardgesoldeerde verbindingen
- ▶ NEN-ISO 2553:1994 nl Las- en soldeerverbindingen; Symbolische weergave op tekeningen
- ▶ NEN-EN-ISO 3677:1995 en Toevoegmaterialen voor zacht- en hardsolderen; Aanduiding
- ▶ NEN-EN 3917 t/m 3948 en Lucht- en ruimtevaart ; Op nikkel gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen
- ▶ NEN-EN 3952 t/m 3958 en Lucht- en ruimtevaart ; Op zilver gebaseerde legeringen; Toevoegmaterialen voor hardsolderen
- ▶ NEN-EN 3960 t/m 3962 en Lucht- en ruimtevaart ; Legering op goudbasis; Toevoegmaterialen voor hardsolderen
- ▶ NEN-EN 3963 & 3964 en Lucht- en ruimtevaart ; Koper ;Toevoegmaterialen voor hardsolderen
- ▶ NEN-EN 4103 t/m 4105 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

N.B.: *In de normen over toevoegmaterialen voor hardsolderen zijn ook vaak de toevoegmaterialen voor hoogtemperatuursolderen opgenomen.*

Auteur

Deze voorlichtingsbrochure is tot stand gekomen, middels een samenwerkingsverband van de Federatie Dunne Plaat FDP), het Hechtingsinstituut, het Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL), het Netherlands Institute for Metals Research (NIMR), Syntens, TNO Industrie en de Vereniging FME-CWM.

De auteur, H.H. van der Sluis (adviseur TNO Industrie) werd ondersteund door een werkgroep bestaande uit: H.J.M. Bodt LPI (NIL), P. Boers (FME-CWM), A. Gales (TNO Industrie), H. de Kruijk (TNO Industrie), M. de Nooij (TNO Industrie), H. Poulis (Hechtingsinstituut), J. van de Put (Syntens).

Technische informatie:

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de auteur H.H. van der Sluis (tel.: 055-3661809)

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

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,
2713 HX ZOETERMEER
Correspondentie-adres: Postbus 190,
2700 AD ZOETERMEER
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41
Fax: (079) 353 13 65
E-mail: pbo@fme.nl
Internet: <http://www.fme-cwm.nl>

Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

Adres: Krimkade 20,
2251 KA VOORSCHOTEN
Telefoon: (071) 560 10 70
Fax: (071) 561 14 26
E-mail: info@nil.nl
Internet: <http://www.nil.nl>

© Vereniging FME-CWM/mei 2003

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 Technische Bedrijfskunde
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon 079 - 353 11 00
telefax 079 - 353 13 65
e-mail: pbo@fme.nl
internet: <http://www.fme-cwm.nl>



Netherlands Institute
for Metals Research

