

R1093

Onderzoeksprojecten

NIL project:
HOOGTEMPERATUURSOLDEREN

DIFFUSIELASSEN VAN
IN100 AAN IN 100



Nederlands Instituut
voor Lastechniek

Krimkade 20
2251 KA Voorschoten

Vestiging Apeldoorn (Onderzoek)
Postbus 541 7300 AM Apeldoorn

Auteur: H.H. van der Sluis - TNO-MI
C.C.J. Kaasschieter - TNO-MI

doc.nr.: TC-I-A-540/94

Maart 1994

Rapport

TC-I-A-540-94

DIFFUSIELASSEN VAN IN-100 AAN IN-100

Bestemd voor:

Het Nederlands Instituut voor Lastechniek

Krimkade 20

2251 KA VOORSCHOTEN

Aan de voorzitter en de leden van de NIL-Subcommissie TC-I-A

"Hoogtemperatuursolderen"

Samengesteld door: ir. H.H. van der Sluis en ing. C.C.J. Kaasschieter

Namens de werkgroep "Diffusie Verbinden" bestaande uit:

J.H.F.G. Lipperts	ABB	C.C.J. Kaasschieter	TNO-MI
G.H.M. Gubbels	CTK/TNO	H.H. van der Sluis	TNO-MI
K.M. Broek	ECN	M. de Wit	KSLA
W.H. Brouwer	FOM Amsterdam	M. Oosterveld	KSLA
W. Kersbergen	FOM Rijnhuizen	G.A. Kool	NLR
Chr. van Stiphout	Hardingscentrum Hauzer	S. van Heusden	Philips Nat.lab
C.A.M. Siskens	Holland Ind. Ceramics	R.J. Zaalberg	Thomassen
J. Kamans	Holec	P.Th.H. Steege	V.S.C.

Datum : Maart 1994

Opdrachtnummer : 33.2.1059

Oplaag : 45

Dit rapport is het resultaat van onderzoek uitgevoerd door TNO-Metaalinstituut in opdracht van het Nederlands Instituut voor Lastechniek.

SAMENVATTING

Het diffusiëren van IN100 aan IN100 zonder gebruik te maken van een toevoegmateriaal is onderzocht.

Het diffusiëren is uitgevoerd in de vacuümoven bij een temperatuur van 1150°C en een tijdsduur van 2 uur.

Het blijkt dat IN100 goed aan IN100 is te verbinden bij drukken van 3-5 MPa; de sterkte waarde van de verbindingen bedragen 63-70% van die van het basismateriaal, zowel in uitgangstoestand als in als gediffusielaste toestand; in het laatste geval is een na warmtebehandeling noodzakelijk.

Samenvatting

	Inhoud	Pagina
1	INLEIDING	4
2	MATERIAAL	10
3	UITVOERING VAN HET ONDERZOEK	11
4	RESULTATEN EN BESPREKING	13
4.1	Mechanisch onderzoek	13
4.2	Metallografisch onderzoek	14
5	CONCLUSIE	20
	LITERATUUR	21

1 INLEIDING

Theorie

Diffusielassen is een verbindingsproces dat in de vaste fase geschiedt. De twee te verbinden oppervlakken worden gedurende een bepaalde tijd onder druk bij verhoogde temperatuur in contact gebracht, tot de binding tot stand is gekomen.

De laszone komt niet tot smelten tijdens het verbindingsproces, zodat de binding dezelfde mechanische eigenschappen heeft als het uitgangsmateriaal.

De lasdruk is zodanig laag dat geen of minimale macroscopische vervorming optreedt.

Mechanisme

Voor intermetallisch contact moet de afstand tussen de contactvlakken in de orde grootte liggen van de afstand tussen de roostervlakken, zodat de Coulombkrachten voor aantrekking kunnen zorgen.

Een oppervlak kan nooit op atomaire schaal vlak zijn. Worden twee te verbinden oppervlakken met elkaar in contact gebracht, dan zal hiertussen, naast een paar contactpunten, een groot aantal onregelmatige holten ontstaan.

Zijn de contactpunten vrij van oxides en andere verontreinigingen, dan zal een metaalverbinding worden gerealiseerd.

Vervolgens zullen de nog niet verbonden oppervlakken op interatomaire afstand van elkaar gebracht worden door plastische vloeï, zodat ook hier metaalbindingen kunnen ontstaan.

Hieronder zullen drie mo'ellen worden beschreven, aangeduid met de namen van de onderzoekers.

Hamilton

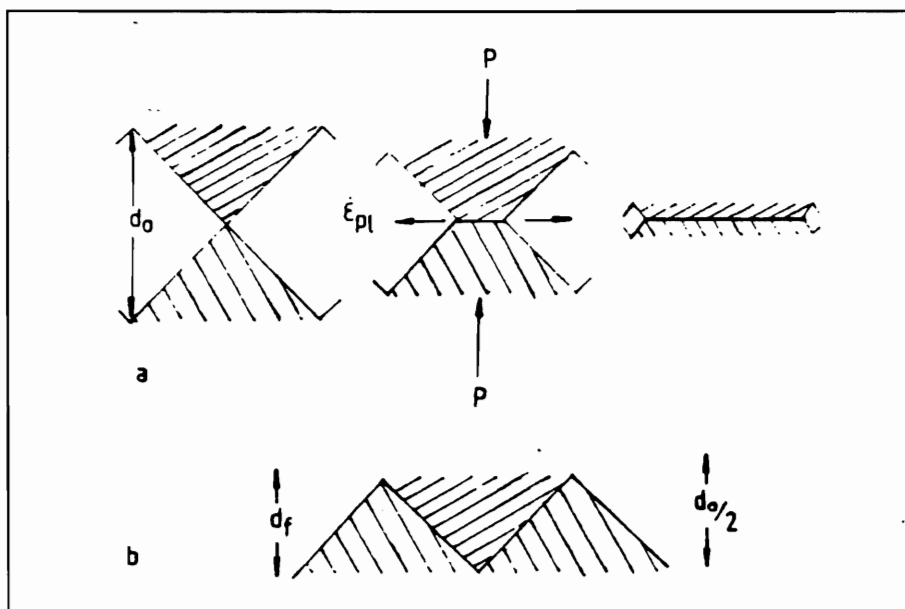
Hier worden de te verbinden oppervlakken opgebouwd beschouwd uit driehoekige oppervlakteruwheden, die bij de toppen aan weerszijde puntcontact maken (figuur 1).

De lastijd wordt berekend door de rek, nodig voor oppervlaktecontact tussen de ruwheden, te delen door de gemiddelde vervormingssnelheid [1].

Het model is verbeterd door het oppervlak te beschouwen als een kort golfig oppervlakteruwheidspatroon gesuperponeerd op een langer golfig oppervlakteruwheidspatroon. Het lang golfig patroon is bepalend voor de bindingstijd. Het bindingsproces valt in twee stappen onder te verdelen:

- 1) reductie in hoogte van het lang golfig ruwheidspatroon tot de hoogte van de overblijvende holten gelijk is aan die van het kort golfig oppervlakteruwheidspatroon;
- 2) grensvlakdiffusie wordt verondersteld als overheersend mechanisme voor het verdwijnen van de holten in het tweede stadium.

De totale bindingstijd wordt als de som van de twee opvolgende stadia genomen.



Figuur 1 Stadia van het bindingsproces volgens Hamilton [1]

- a) Eerste stadium: plastisch vloeien van het oppervlakteruwheidspatroon.

p = druk

$\dot{\epsilon}_{pl}$ = vervormingssnelheid door plastische vloeï

d_0 = hoogte van lang golfig oppervlakteruwheidspatroon

- b) Einde van het tweede stadium.

d_f = hoogte van kort golfig oppervlakteruwheidspatroon.

Derby en Wallach

Het model van vlakke vervormingstoestand dat Hamilton beschreef, is door Derby en Wallach nog verder verfijnd. Zij gingen er namelijk vanuit dat het diffusiebindingsproces gelijk is aan druksinteren.

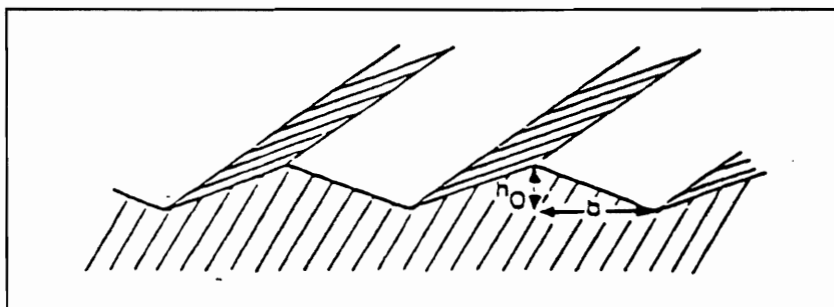
Het oppervlak bestaat hier uit driehoekige ribbels, die ontstaan zijn na een oppervlakte-voorbehandeling, zoals schuren (figuur 2) [2].

Ook hier wordt het bindingsproces in twee stappen verdeeld, met als verschil met het voorgaande model, dat nu wel beide stadia gelijktijdig verlopen (figuur 3).

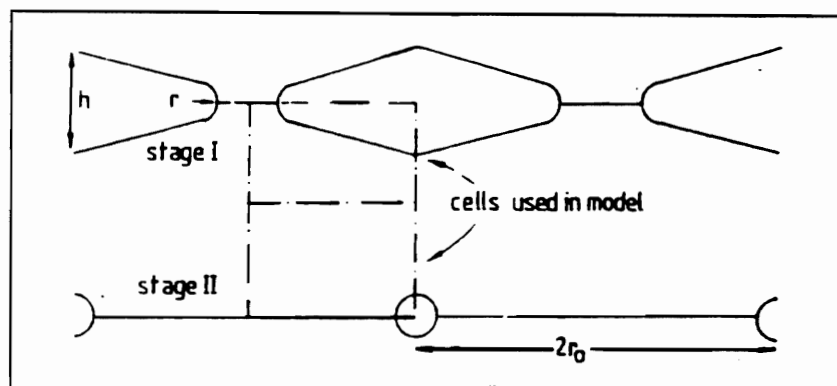
De twee stadia zijn:

- 1) Het plastisch vloeien van de ribbels.
- 2) Het sinteren van cilindrische holten.

Gedurende het beginstadium van het bindingsproces is de kromtestraal dicht bij de insnoering van de holte kleiner dan die van het holte-oppervlak dat verder afgelegen ligt van de insnoering. Door dit verschil in kromtestralen, zal massatransport van atomen optreden naar de insnoering toe. De holte zal een ronde vorm aannemen, zodat een kleiner oppervlak ontstaat. Het massatransport geschiedt door oppervlaktediffusie. Let wel, het volume van de holte neemt hierdoor niet af, omdat oppervlaktediffusie alleen maar materiaal kan redistribueren. De holten verdwijnen door grensvlak- en volumediffusie.



Figuur 2 Oppervlaktemodel volgens Derby en Wallach [2]



Figuur 3 Twee stadia model van het bindingsproces volgens Derby en Wallach [2]

Pilling en Ridley

Het mechanisme waarmee de holten in het contactvlak verdwijnen geschiedt in drie stappen [1] (figuur 4) :

1) Momenteaan plastisch vloeien

Als de lasdruk wordt aangebracht, zullen de contactpunten tussen beide oppervlakken niet in staat zijn de aangebrachte spanning te dragen. Het contactgebied zal daarom meteen groeien tot de spanning loodrecht op het contactvlak lager is geworden dan de vloeispanning. Dit wordt als startpunt van het bindingsproces genomen.

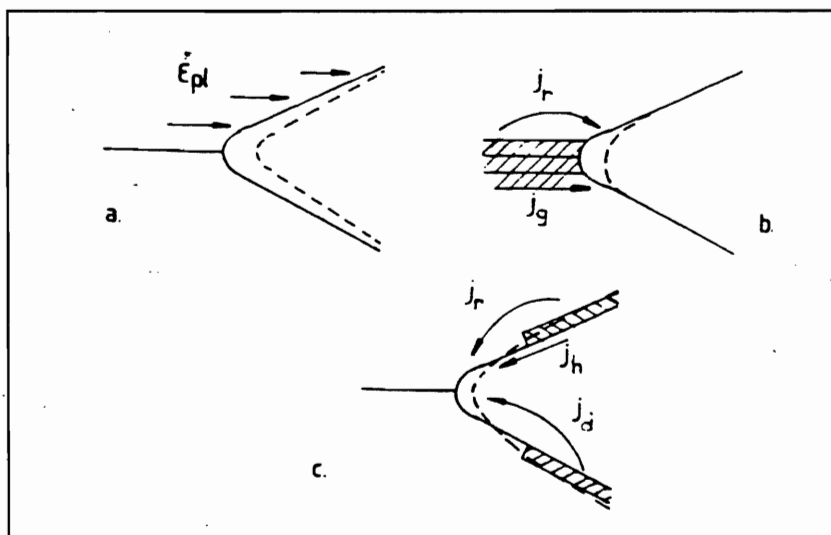
2) Tijdsafhankelijk plastisch vloeien

De spanning in het contactgebied veroorzaakt plastisch vloeien door kruip of door superplasticiteit. Door het plastisch vloeien wordt materiaal in de holten gedrukt, zodat het contactgebied wordt vergroot. Hierdoor zal de spanning in de bindingzone dalen, omdat de fractie van het gebonden oppervlak groter is geworden (figuur 4a). Het gevolg is dat de snelheid waarmee de holten door plastisch vloeien verdwijnen, afneemt in de tijd.

3) Diffusie

Door het aanbrengen van druk zal een normaalkracht op het contactvlak werken. Aangezien op een vrij oppervlak geen hoofdspanning kan bestaan, zal ten gevolge

van het drukverschil tussen het vrije oppervlak van de holten en het gebonden vlak, massatransport van atomen naar de spanningsarme holten optreden. Het massatransport wordt in het begin van deze fase overheerst door korrelgrensdiffusie. Naarmate het volume van de holten afneemt, wordt volumediffusie belangrijker. Diffusie geschiedt vanuit het grensoppervlak naar het holte-oppervlak (figuur 4b) of vanuit het rooster bij het holte-oppervlak (figuur 4c).



Figuur 4 Stadia van het bindingsproces volgens Pilling en Ridley [1]

- a) Tijdsafhankelijk plastisch vloeien
 $\dot{\epsilon}_{pl}$ = vervormingssnelheid door plastische vloeï
- b) Diffusie van grensvlak naar holte-oppervlak
 J_r = diffusie vanuit rooster
 J_q = diffusie vanuit grenslaagoppervlak
- c) Oppervlaktediffusie
 J_h = diffusie via holte-oppervlak
 J_d = diffusie via dampfase

OPZET

Op het gebied van het diffusieverbinden van metalen is er in het programma 1991-1993 onderzoek uitgevoerd naar het diffusiesolderen/lassen van moeilijk te verbinden metalen. Hierbij kan gedacht worden aan titaan en Ti6Al4V, en superlegeringen als A286 en IN100.

Superlegeringen zijn moeilijk lasbaar met behulp van smeltlasprocessen; de kans op het ontstaan van krimp- en/of warmtescheuren is groot. Ook zijn deze legeringen afhankelijk van het aanwezige Al- en Ti-gehalte, lastig in vacuüm te solderen.

Onderzoek uitgevoerd in het programma 1991-1993 naar het diffusiesolderen volgens het TLP Bonding-proces van legeringen als A286 en IN100 is voor laatstgenoemde niet succesvol verlopen ten gevolge van bevochtigingsproblemen (zie rapport TC-I-A-500-92); met de toegepaste nikkelbasissoldeersoorten konden geen geslaagde verbindingen worden verkregen.

Bij het diffusiessen van metalen spelen bevochtigingsproblemen (zoals optredende ontvochtiging) geen rol. De te verbinden materialen c.q. toevoegmaterialen komen tijdens het diffusiessen niet in de smeltfase. Uitgaande van deze optie kan onderzocht worden of bepaalde superlegeringen zich door middel van diffusiessen laten verbinden, zoals bijvoorbeeld hoog Al- en Ti-houdend IN100. In de literatuur werden slechts twee publicaties aangetroffen over het diffusiessen van IN100 aan Astroloy respectievelijk Udimet 700 [3]. Als lasparameters werden gegeven: 1150°C - 2 respectievelijk 3 uur - druk 2-4 respectievelijk 3-7 MPa, uitgevoerd in vacuüm, zonder gebruik van toevoegmateriaal. In het hier gerapporteerde onderzoek is voor IN100 aan IN100 van deze parameters uitgegaan.

2 MATERIAAL

Als te diffusielassen materiaal is IN100 toegepast; het gaat hier op een gemodificeerde versie van IN100. In onderstaande tabel 1 wordt de chemische samenstelling gegeven. Tevens zijn in deze tabel enige mechanische eigenschappen van dit materiaal opgenomen.

Tabel 1 Samenstelling en eigenschappen van IN100 MOD (PWA 1073 (SSP))

	Chemische samenstelling in gewichtsprocenten											Mechanische eigenschappen			
	Cr	Co	C	Ti	Al	Mo	V	Zr	B	Ni	W	R _M (MPa)	R _{0,2} (MPa)	A (%)	Z (%)
Opgave DMVS/Klu	12,4	18,5	0,07	4,3	5	3,2	0,8	0,06	0,02	rest	-	-	-	-	
Opgave NLR (*)	12,4	18,5	0,07	4,32	4,98	3,2	0,78	0,06	0,02	rest	-	1600	1130	22	22
TNO-MI analyse	12,03	20,13	0,07	4,54	3,65	3,3	0,7	0,05	0,021	rest	0,15	1565	-	-	-

* korrelgrootte ASTM 12-14

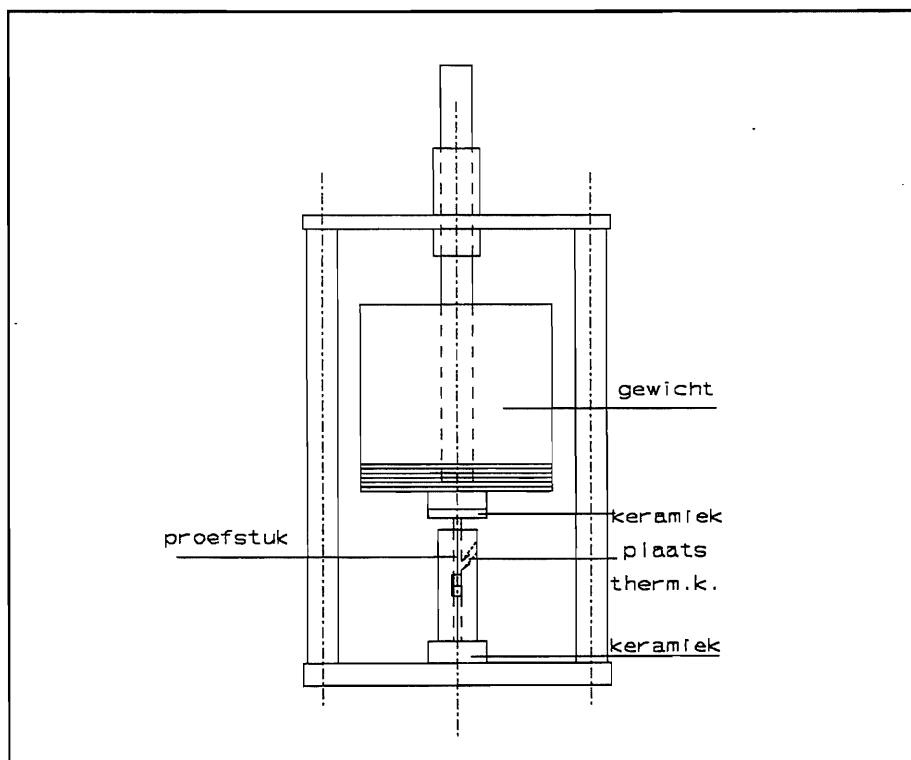
Het materiaal toegepast in het onderzoek werd verkregen uit een turbineschijf (disk), ter beschikking gesteld door DMVS/Klu.

3 UITVOERING VAN HET ONDERZOEK

Voor het uitvoeren van diffusielasproeven op IN100 zijn eerst proefstaafjes vervaardigd, die uit een turbineschijf van IN100 zijn gehaald. De gevolgde procedure luidt als volgt:

- eerst zijn er stroken van ca. 5 mm breed in tangentiële richting uit het dunne tussenschot van de schijf geslepen; hieruit zijn staafjes van ca. 15 mm lang gehaald;
- de ruwe staafjes van ca. 15 mm lang zijn vervolgens vierkant geslepen op 3 mm;
- één van de einden van de staafjes is over ca. 5 mm rond geslepen op 3 mm;
- uiteindelijk zijn de uiteinden van de staafjes in een mal vlak- en haaks geslepen, waarbij het te verbinden vlak is gepolijst op 6 μm (vlakheid < 1 μm).

Voor het diffusielassen in een vacuümoven is een hulpgereedschap gemaakt, zodat de staafjes zo goed mogelijk in lijn worden belast (figuur 5). Door het gewicht te variëren kon de gewenste oppervlaktedruk worden geregeld. De twee staafhelften werden met behulp van twee blokjes met daarin een groef van 3 mm breed en 1,5 mm diep en een uitsparing in het midden bij elkaar gehouden, zodat de te lassen einden zo centrisch mogelijk tegenover elkaar kwamen te liggen. Door een thermokoppel in een gat in één van de blokjes te plaatsen, kon de temperatuur van de staafjes worden gemeten. Met behulp van Al_2O_3 -plaatjes werden de proefstaafjes thermisch geïsoleerd.



Figuur 5 Diffusielasopstelling voor de vacuümoven

Alle diffusielasproeven van IN100 aan IN100 zijn uitgevoerd op 1150°C gedurende 2 uur.

De hierbij gebruikte lascyclus was:

25°C / min ↑ naar 1000°C → 10 min constant houden

25°C / min ↑ naar 1150°C → 2 uur constant houden

25°C / min ↓ naar 500°C → daarna snelkoelen.

Het bij deze proeven aanwezige vacuüm was $2 \cdot 10^{-5}$ mbar bij het bereiken van de 1150°C.

Na het uitvoeren van een aantal diffusielasproeven met een druk van 7 MPa, waarvan het resultaat slecht was vanwege het onvoldoende vlak zijn en de opgetreden vervorming van de proefstaafjes, is een aantal diffusielasverbindingen gemaakt, waarbij de aandrukkracht zo gevarieerd werd dat de bijbehorende vlaktedruk 5 en 3 MPa bedroeg.

Om het gediffusielaste materiaal weer zo goed mogelijk in de uitgangstoestand te krijgen is na het diffusielassen een warmtebehandeling uitgevoerd, namelijk:

- op 980°C gedurende 4 uur (stabiliserend gloeien)
- gevolgd door 760°C gedurende 24 uur (precipitatie harding).

Deze warmtebehandeling is uitgevoerd in een luchtoven, waarbij de staafjes in een dichte houder onder argon zijn geplaatst.

4 RESULTATEN EN BESPREKING

4.1 Mechanisch onderzoek

Op een aantal diffusielasverbindingen van IN100 aan IN100, die met verschillende proefdrukken zijn gemaakt en vervolgens een extra warmtebehandeling hebben ondergaan, zijn trekproeven uitgevoerd. Tevens zijn trekproeven uitgevoerd op twee vierkante staafjes van 3 mm uit het uitgangsmateriaal, die in het midden zijn rond geslepen op 3 mm; één van de staafjes heeft een diffusielas- en een warmtebehandeling ondergaan.

De resultaten van de trekproeven zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: Resultaten diffusieverbindingen van IN100 aan IN100

Proef nr	Proef-druk (MPa)	Dia-meter (mm)	Oppervlak (mm ²)	Fmax (N)	Rm (MPa)	Bijzonderheden
1	7	3,00	7,07	7400	1051	proefstaaf vervormd
2	5	2,90	6,60	6730	1019	
3	5	2,97	6,92	7030	1015	breukvlakonderzoek (REM)
4	5			-	-	voor preparaat
5	3			-	-	voor preparaat
6	3	2,78	6,07	7300	1202	
7	3	2,84	6,33	6300	955	
U	-	3,00	7,07	11060	1565	in uitgangstoestand
G	-	2,69	5,68	8920	1570	als gediffusielast en warmtebehandeld

Opmerking: De diffusielasproeven zijn uitgevoerd bij 1150°C / 2 uur.
Na het diffusielassen zijn de trekproefstukken warmtebehandeld, namelijk: 980°C / 4 uur + 760°C / 24 uur.

Bij een uitgeoefende druk van 7 MPa tijdens het diffusielassen blijkt na afloop ontoelaatbare vervorming van het proefstuk te zijn opgetreden (proef nr 1). Bij het verlagen van de druk naar 5 respectievelijk 3 MPa treedt dit probleem niet op. Weliswaar liggen de sterkte waarden voor een druk van 5 MPa ca. 6-10% lager dan bij een druk van 7 MPa. De spreiding in de sterkte waarden bij een druk van 3 MPa is groter dan die bij een druk van 5 MPa: 10% ten opzichte van 4%.

Opvallend is dat de sterkte van IN100 in uitgangstoestand weinig afwijkt van die in als gediffusielast + warmtebehandeld. De gevonden sterkte waarden voor de bij 3 respectievelijk 5 MPa gediffusielaste verbindingen zijn 70 respectievelijk 63% van die van het IN100 in uitgangstoestand, c.q. in gediffusielaste toestand.

4.2 Metallografisch onderzoek

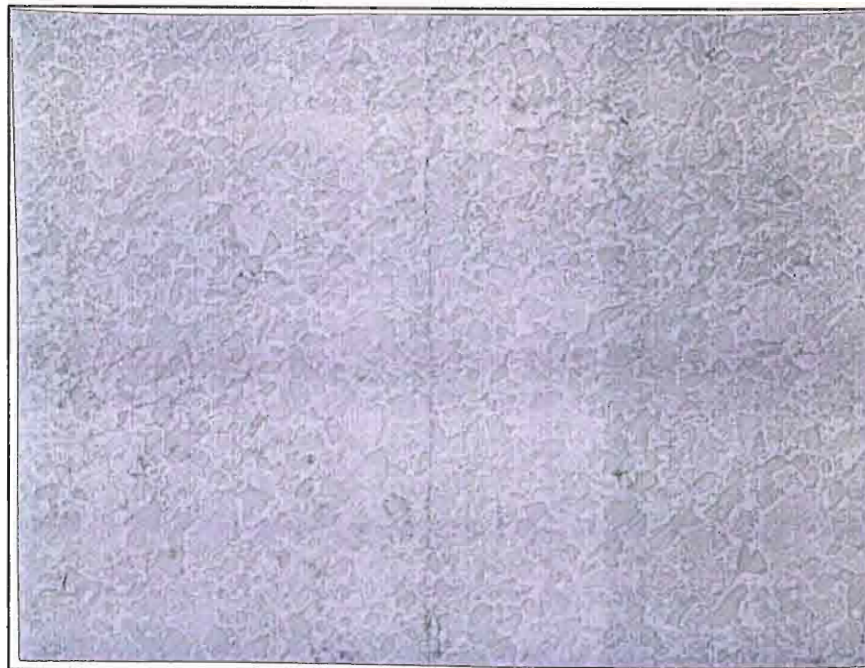
De resultaten zijn weergegeven in de figuren 6 t/m 8.

In figuur 6a wordt de langsdoorsnede van een IN100-IN100-verbinding van proefstaaf 4 getoond ($V=1000\times$). De diffusie naad is nog duidelijk herkenbaar, hoewel plaatselijk de indruk wordt gewekt dat het materiaal van de twee proefstaafenden "in elkaar" is gegroeid. Een detail van de lasnaad wordt in figuur 6b getoond ($13\times$ grotere vergroting). In de twee fasenstructuur van het basismateriaal is op het grensvlak mogelijk nog een andere fase aanwezig. Naast enkele poriën is hierdoor het grensvlak nog herkenbaar. Getracht is deze twee fasen met behulp van de rasterelectronenmicroscopie te onderzoeken. Dit REM-onderzoek toonde aan dat de in laag reliëf staande fase (donker) een verlaagd Cr- en Co-gehalte bevat ten opzichte van de in hoog reliëf staande fase (licht), hetgeen uit figuur 6c en 6d blijkt. In de naad (grensvlak) wordt ten opzichte van het basismateriaal een verhoogd Ti-gehalte gevonden, zie figuur 6e. Uiteraard wordt er ook O, Ni, Cr, Co, Al en Mo aangetroffen, maar gezien het feit dat de fase in het grensvlak klein is (ca. $0,1\ \mu\text{m}$) ten opzichte van de electronen bundel van de REM, kunnen deze elementen ook tot het ernaast liggende deel behoren.

Het breukvlak uit een diffusie-lasverbinding is in een Raster Elektronen Microscopie (REM) onderzocht tot een maximum vergroting van $11.000\times$. Er is met name gelet op hechttingsfoutjes en op het breukuiterlijk.

Figuur 7a toont een overzicht van het breukvlak. Tijdens de trekproef is het materiaal vrijwel niet ingesnoerd. Op het breukvlak zijn geen hechtingsfouten gevonden. Slechts hier en daar zijn kleine holten te zien (figuur 7b). Deze blijken uit REM-onderzoek een verhoogd Ti-gehalte te bevatten.

De figuren 8a en 8b tonen de kenmerken van de overbelastingsbreuk bij hoge vergrotingen. Ook deze figuren bevestigen dat het materiaal overal goed gehecht heeft. De geringe plastische vervorming, geen duidelijke "dimples", laat zien dat in de verbinding weinig vervorming mogelijk was. In figuur 8a zijn ronde patronen te zien, waarschijnlijk zijn dit korrelgrenzen. Het is interessant om de grootte van deze korrelgrenzen te vergelijken met die uit het onderzoek van de microstructuur. Hiertoe kan de structuur uit figuur 6a worden vergeleken met die uit figuur 8a. Bedacht dient te worden dat de structuur in figuur 6a van een langsdoorsnede wordt gegeven, terwijl die in figuur 8a het breukvlak weergeeft dat een dwarsdoorsnede voorstelt. Bovendien wijken de vergrotingen onderling af: $V=1000x$ respectievelijk $V=1440x$. Ondanks het verschil in richting van de beide doorsneden lijkt textuur minder een rol te spelen.



Figuur 6a

Proefstuk 4

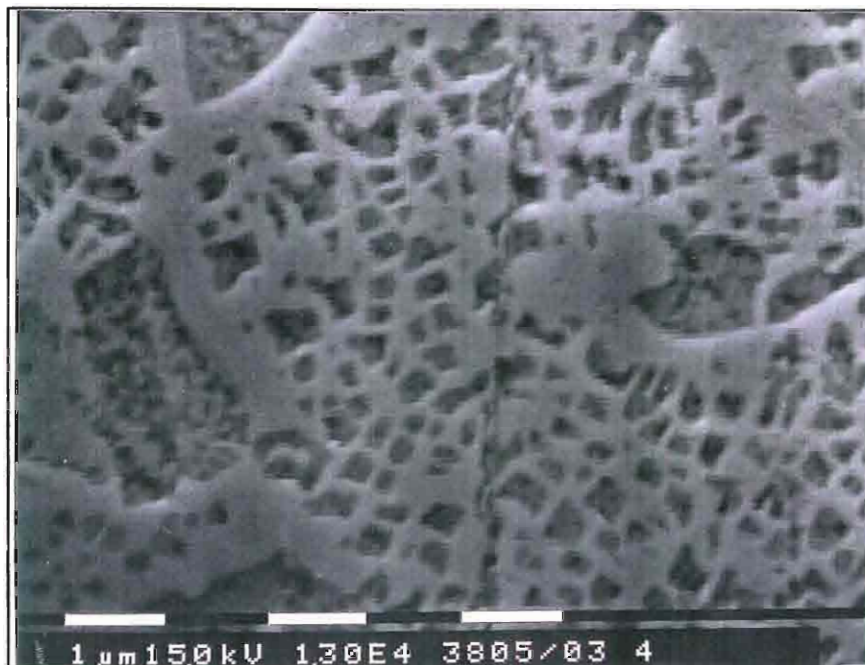
Materiaal: IN100 / IN100

langsdoorsnede

Proefdruk: 5 MPa

Fotonr H6973

V = 1000x



Figuur 6b

Proefstuk 4

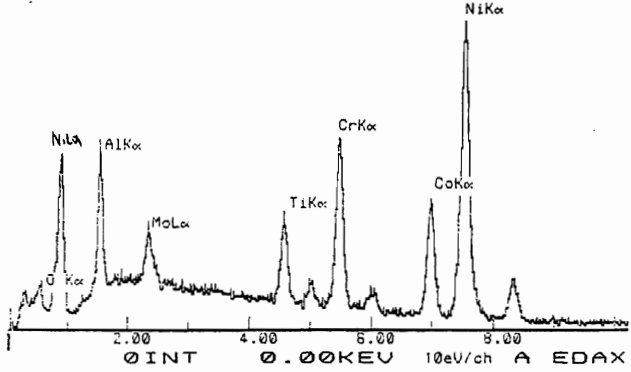
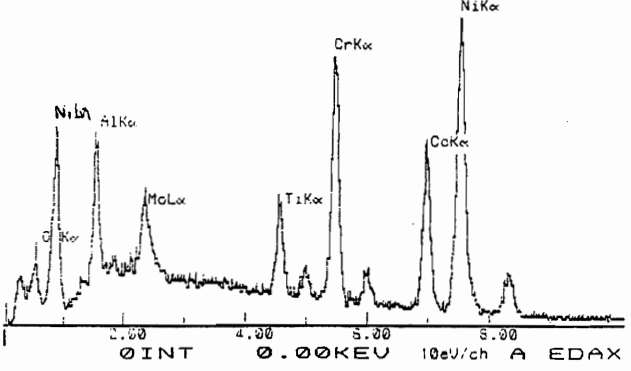
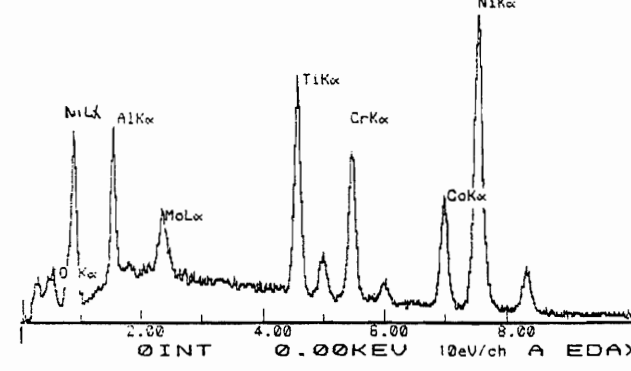
Detail figuur 6a

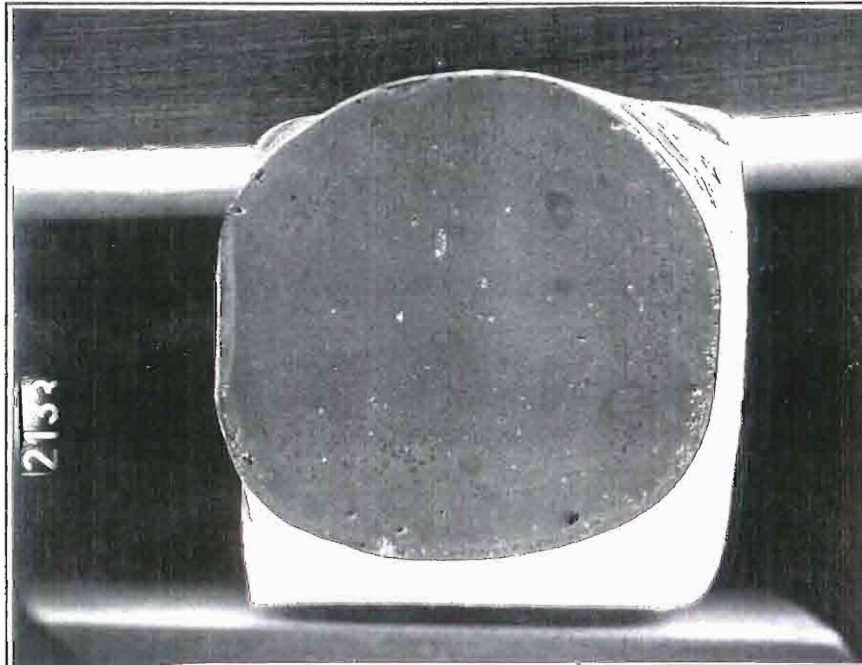
langsdoorsnede

REM-opname

Fotonr 3805

V = 13000x

<p>08-MAR-94 10:00:33 EDAX READY RATE= 5409CPS TIME= 30LSEC FS= 1402CNT PRST= OFF A =3805/03 C</p> 	<p>Figuur 6c</p> <p>Proefstuk 4</p> <p>Materiaal: IN100 / IN100</p> <p>Plaats uit figuur 6b donkere fase</p> <p>EDAX-analyse</p> <p>Opname 3805/03 C</p>
<p>08-MAR-94 09:53:49 EDAX READY RATE= 5351CPS TIME= 22LSEC FS= 875CNT PRST= OFF A =3805/03 D</p> 	<p>Figuur 6d</p> <p>Proefstuk 4</p> <p>Plaats uit figuur 6b lichte fase</p> <p>EDAX-analyse</p> <p>Opname 3805/03 D</p>
<p>08-MAR-94 09:49:24 EDAX READY RATE= 5301CPS TIME= 40LSEC FS= 1701CNT PRST= OFF A =3805/03 B</p> 	<p>Figuur 6e</p> <p>Proefstuk 4</p> <p>Plaats uit figuur 6b naad</p> <p>EDAX-analyse</p> <p>Opname 3805/03 B</p>

**Figuur 7a**

Proefstuk 3

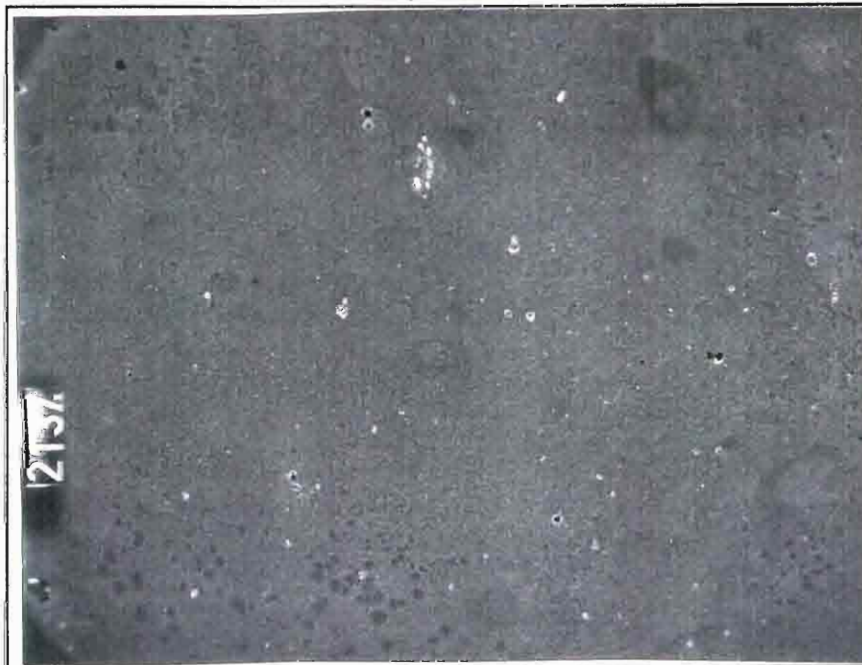
Materiaal: IN100 / IN100
breukvlak

Proefdruk: 5 MPa

Opname van NLR

Fotonr 2133

V = 22x

**Figuur 7b**

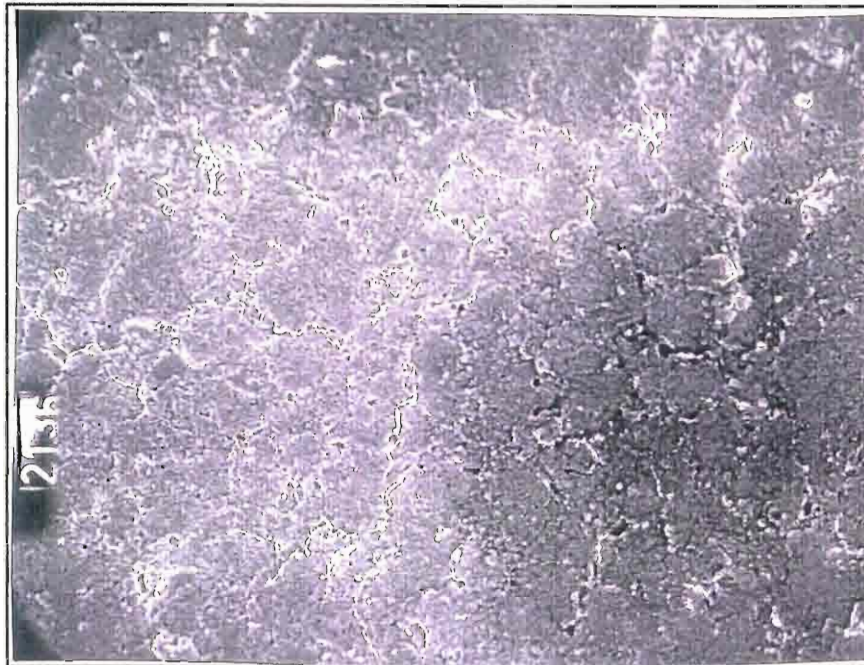
Proefstuk 3

Detail figuur 3a
breukvlak

Opname van NLR

Fotonr 2134

V = 50x

**Figuur 8a**

Proefstuk 3

Materiaal: IN100 / IN100

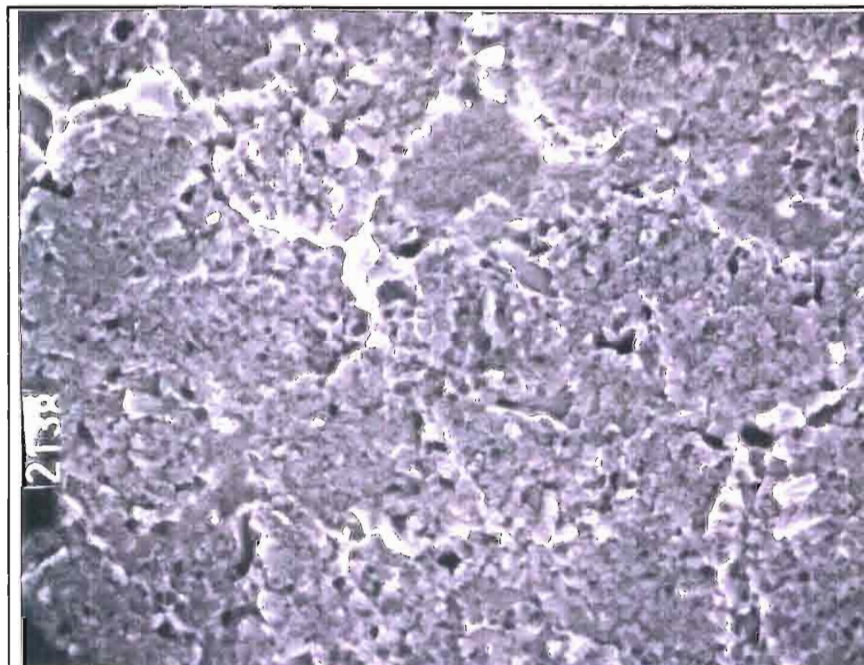
Breukvlak

Proefdruk: 5 MPa

Opname van NLR

Fotonr 2136

V = 1440x

**Figuur 8b**

Proefstuk 3

Detail figuur 4a

dwarsdoorsnede

Opname van NLR

Detail van overbelastings-
breuk

Fotonr 2138

V = 5760x

4 CONCLUSIE

Uit het onderzoek is aangetoond dat IN100 goed aan IN100 is te verbinden door middel van diffusielassen bij een temperatuur van 1150°C en een duur van 2 uur in een vacuümoven.

De toegepaste druk tijdens het diffusielassen is belangrijk: een druk van 7 MPa doet het proefstaafmateriaal ontoelaatbaar vervormen in tegenstelling tot een toegepaste lagere druk van 3 of 5 MPa.

Bij drukken van 3 of 5 MPa worden verbindingen verkregen met een sterkte (Rm) die 70-63% van de sterkte van het basismateriaal bedragen, ongeacht of dit de uitgangstoestand of de gediffusielaste toestand betreft; in het laatste geval is na diffusielassen wel een nawarmtebehandeling noodzakelijk.

Uit het REM-onderzoek zijn aanwijzingen gekomen dat Ti in verhoogde mate in de diffusielasnaad aanwezig is; ook zuurstof wordt aangetoond. Welke rol Ti op de hechting heeft, is niet eenduidig vast te stellen.

TNO-Metaalinstituut



ing. C.C.J. Kaasschieter

voor akkoord



ir. H.H. van der Sluis

5 LITERATUUR

1. J. Pilling, N. Ridley "Superplasticity in Crystalline Solids"; 1^o dr.; The Camelot Press Southampton 1989.
2. B. Derby, E.R. Wallach "Theoretical Model for Diffusion Bonding"; Mat. Science 16 (1982) page 49-56.
3. Y. Bienvenu et al. "The Metallurgy of Diffusion Bonding" en Diffusion Bonding Ed. R. Pearce, Cranfield (1987) page 33-43.
4. IA-421-93/OE (IIW doc.nr.) "Applications of Diffusion Joining in Industries in Germany"; W.G. Diffusion Welding; DVS 1993.