

Lijmen van kleine onderdelen (1)

J.A. Poulis, J.C. Cool en
E.H.P. Logtenberg.

Het verbinden van kleine onderdelen door lijmen leidt nogal eens tot te-leurstellingen door een voortijdig falen van de verbinding.

In tegenstelling tot wat te dikwijls gedacht wordt, is het construeren van een kwalitatief goede lijmverbinding een vrij ingewikkelde zaak, waarbij naast praktische ervaring enige kennis van de fysische en chemische processen die bij het lijmproces een rol spelen onontbeerlijk is.

In een drietal artikelen zal worden ingegaan op deze schijnbaar simpele, moderne verbindingstechniek. In dit artikel zal worden ingegaan op de belangrijkste grootheden waarmee men rekening moet houden wanneer men een lijmverbinding verkiest boven andere bevestigingsvormen.

Het tweede artikel behandelt op de invloed van reiniging van de substraten op de uiteindelijke hechtingssterkte. Het laatste artikel gaat in op de optimalisatie van kleine cilindrische verbindingen door de resultaten van spanningsanalyse in de lijmnaad te vergelijken met experimentele resultaten.

Miniaturisering

Door de vakgroep Instrumenten van de Technische Universiteit Delft wordt sinds enkele tientallen jaren wetenschappelijk onderzoek verricht ten behoeve van de ontwikkeling van lichtere en beter bedienbare kinder-prothesen en ortheses, zie figuur 1. Door de verdergaande miniaturisering van de onderdelen, zie figuur 2, worden de verbindingen ook steeds kleiner. Door de steeds nauwere toleranties van de onderdelen en het gebruik van kunststofonderdelen bleek lassen en solderen niet meer mogelijk en was lijmen vaak het enige alternatief. De verlijming van de geconstrueerde verbindingen, zie figuur 3, bleek echter niet betrouwbaar en de lijmverbindingen bezweken vaak

al tijdens een van de eerste tests. Omdat dit soort miniatuurverbindingen steeds vaker zal worden toegepast als gevolg van de verdergaande miniaturisering in de ontwerpen van veel precisieprodukten was een structurele oplossing van dit probleem gewenst. Daarom is een vierjarig promotieonderzoek uitgevoerd naar het verlijmen van heel kleine roestvaststalen cilindrische onderdelen, zie figuur 4. Doelstelling was een optimalisatie van de sterkte van de verbindingen en het verbeteren van de reproduceerbaarheid.

Opbouw van een gelijmde verbinding

Een lijmverbinding is opgebouwd uit twee substraatdelen, van metaal of kunststof, die met elkaar verbonden zijn door een laag lijm. Door zijn vorm

lijkt de constructie, zie figuur 5, veel op een sandwich

Feitelijk blijkt de sandwich uit meer dan drie lagen te bestaan, die allemaal een essentiële schakel zijn in het hechtingsproces. Daarbij bepaalt de zwakste schakel de sterkte van het totale systeem.

Voor een nadere beschouwing dienen drie termen te worden gedefinieerd: cohesie, adhesie en grenslaag.

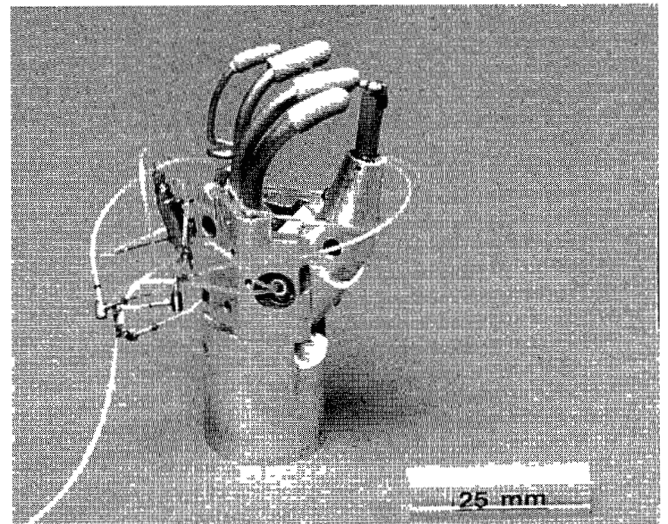
Cohesie is de aantrekkingskracht tussen moleculen van één en hetzelfde materiaal.

Adhesie is de kracht die optreedt tussen twee verschillende materialen.

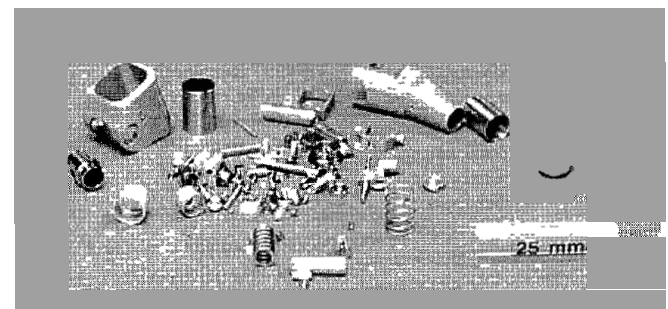
De grenslaag (of interface) is het gedeelte van de verbinding dat de scheidingslaag vormt tussen de lijmlaag en het substraat (bijvoorbeeld roestvaststaal), dus de plaats waar de adhesiekrachten optreden.

De interpretatie van het begrip grens-

Figuur 1. Een goed voorbeeld van de gecompliceerdheid van een elektropneumatisch bestuurd kunsthand voor kinderen, ontwikkeld aan de TU Delft.



Figuur 2. Een aantal onderdelen van de kunsthand van figuur 1. Door de nauwe toleranties van de onderdelen is het niet mogelijk deze te verbinden door solderen of lassen. Lijmen blijkt de enige oplossing.



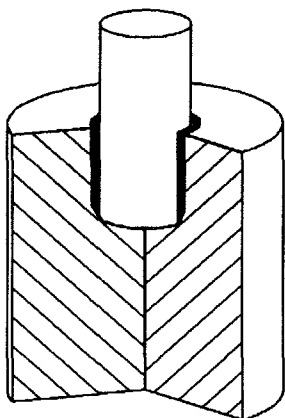


Figuur 3. De kwaliteit van kleine cilindrische lijmverbindingen is onderzocht aan deze modelverbindingen. De foto toont het te testmodel uitgevoerd in roestvast staal en een demo-model met een dop van perspex waarin de lijmlaag duidelijk zichtbaar is.

laag loopt nogal uiteen. De grenslaag zelf kan ook weer opgebouwd zijn uit diverse lagen. Soms worden oxydelagen of vetlagen aan het substraatoppervlak als deel van de grenslaag gezien. Vaak doelt men echter op dat deel van de lijmlaag dat grenst aan het te verbinden metaal waar de uitharding van de lijm vaak iets anders is dan in de rest. De kwaliteit van de grenslaag vormt een belangrijke schakel in de uiteindelijke sterkte en het lange-termijn gedrag van de verbinding.

Adhesie theorieën

Er bestaan nogal wat tegenstrijdige meningen over de manier waarop lijm aan



Figuur 4. Schets van de onderzochte verbinding.

een voorwerp hecht. In de literatuur kan men echter vier algemeen aanvaardde hoofdmechanismen onderscheiden:

- mechanische verankerings-theorie,
- elektronische theorie,
- adsorptietheorie,
- diffusie theorie.

Deze zullen in het kader kort worden uiteengezet.

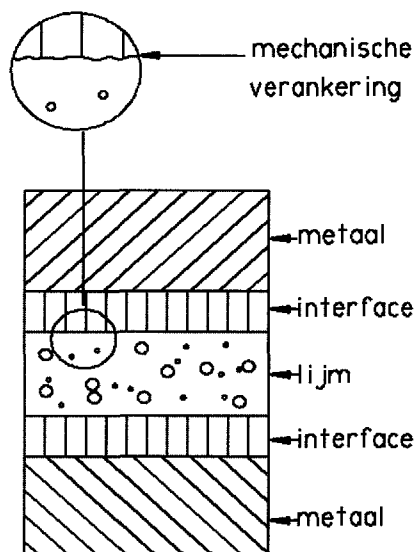
De hechting bij lijmen zal door één enkel mechanisme of een samenspel van mechanismen worden veroorzaakt.

De processen in de grenslaag blijken bij het lijmen bepalend te zijn voor de uiteindelijke hechtingskwaliteit. Een mechanisch stabiel en uitermate schoon oppervlak (zonder oxydelag) vormt de basis van een betrouwbare verbinding. Dit betekent dat bijzonder goede reiniging van het substraatoppervlak noodzakelijk is. Gezien het belang van deze oppervlakreiniging worden in een volgend artikel een aantal methoden op een rij gezet.

Een goede bevochtiging met lijm over het gehele oppervlak is van belang. Het ontstaan van lucht- en vuil-insluitels in de poriën van het oppervlak moet daarom zoveel mogelijk worden voorkomen.

Voor- en nadelen van lijmen

Bij de keuze voor een lijmverbinding in plaats van klassieke verbindingsvor-



Figuur 5. Schematische weergave van een lijmverbinding met een voorbeeld van mechanische verankerung

men als bijvoorbeeld lassen, solderen, krimpen, schroeven en nieten is er een aantal factoren dat overweging verdient. Dit betreft zowel de vele voordelen als nadelen welke verbonden zijn aan de keuze van een lijmverbinding.

Voordelen

In industriële productieprocessen is het aantal lijmverbindingen sterk toegenomen, in het bijzonder in de fijnmechanische industrie waar het accuraat positioneren van bijvoorbeeld elektronische en optische componenten in lopendebandproductie een grote vlucht heeft genomen. Voordelen van lijmverbindingen boven andere verbindingvormen zijn:

- gewichtsreductie,
- ruimere toleranties waardoor onderdelen goedkoper te produceren zijn,
- ruimtebesparing door simpele bevestiging en reductie van het aantal onderdelen,
- nieuwe constructieve mogelijkheden,
- lijmen hebben over het algemeen goede isolatie-eigenschappen,
- corrosiebescherming door de afwezigheid van metaal-metaalcontact,
- afsluiting tegen corrosieve gassen of vloeistoffen,
- verhoogde esthetische verschijning,
- materialen met chemisch zeer uiteenlopende samenstelling kunnen verbonden worden, zoals metaal aan kunststof,
- hogere flexibiliteit en betere demping,
- piekspanningen zoals die bijvoorbeeld optreden bij popnagelverbindingen kunnen worden vermeden,
- lagere produktiekosten door eenvoud van bevestigen en een verhoogde produktiesnelheid.

Nadelen

In tegenstelling tot verbindingen met mechanische bevestigingsmiddelen wordt de kwaliteit van een lijmverbinding door een groot aantal factoren beïnvloed. Daarom is bij het ontwerp van een goede lijmverbinding ook enig elementair begrip van de diverse fysische en chemische processen die bij het lijmen een rol spelen onontbeerlijk. Een voorbeeld van de complexiteit is de relatie van lijmviscositeit met de oppervlakteruwheid van het substraat en

Lijmen van kleine onderdelen (1)

Adhesie theorieën

Mechanische verankeringstheorie

De hechting tussen lijm en substraat berust volgens deze theorie op het mechanisch verankeren (vastgrijpen) van de lijm in de onregelmatigheden van het substraattoepervlak. De ruwheid van zo'n oppervlak kan variëren van ruw met holten, kraters of groeven tot 'spiegelglad'. Wanneer de lijm maar dun genoeg is, worden de substraatporiën gevuld en wordt de lijm laag aldus mechanisch verankerd aan het oppervlak, zie figuur 6. Veel auteurs hebben inmiddels de relatie tussen substraatuwheid en hechtingssterkte van een lijmverbinding slaag aangetoond. Hoewel de beschrijving simpel is, blijkt de penetratie van de lijm in de poriën een proces dat van veel invloedsgrootheden afhankelijk is, zoals de ruwheid van het oppervlak (vorm, diameter en diepte van de poriën) en de lijmviscositeit (afhankelijk van de temperatuur). Bovendien zijn de poriën een verzamelpunt van vocht en vuil, hetgeen bij niet volledige reiniging juist een zwakkere verbinding op kan leveren doordat ze een zwakkere binding met het substraat hebben. Evenzo kunnen luchtinsluitels in de poriën de verbinding verzwakken.

Goede hechting berust volgens deze theorie dus op *het geheel met lijm bevochtigen van een ruw substraattoepervlak* dat vooraf goed gereinigd is.

Elektronische theorie

Wanneer de substraten uit andere materialen bestaan dan de lijm, is het mo-

gelijk dat er elektronenoverdracht tussen de beide materialen plaatsvindt op het moment dat deze met elkaar in contact komen. De materialen "kleven" dan op elkaar als twee tegengesteld geladen condensatorplaten of zoals het "kleven" van kunststoffolie aan papier. Dit mechanisme is echter zelden van toepassing en verklaart niet hoe de hechting van lijm aan metaal plaatsvindt.

Adsorptie theorie

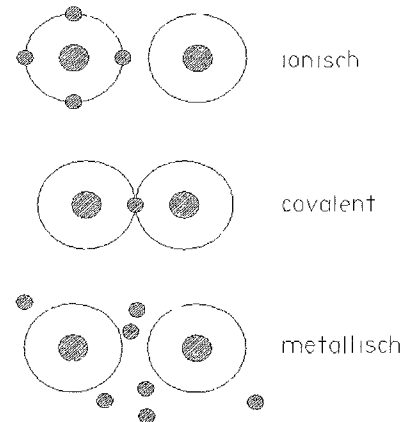
Dit is de meest aanvaarde adhesie theorie en wordt uitvoerig besproken in de literatuur. Deze theorie stelt dat: materialen hechten wanneer een goed moleculair contact bereikt is, vanwege de moleculaire krachten die tussen de oppervlakken optreden.

De moleculaire bindingskrachten zijn (ietwat willekeurig) ingedeeld naar sterkte in *primaire* en *secondaire krachten*, zie tabel 1. De primaire of chemische bindingen, zie figuur 7, kunnen worden onderverdeeld in ionische, covalente- en metaalbindingen:

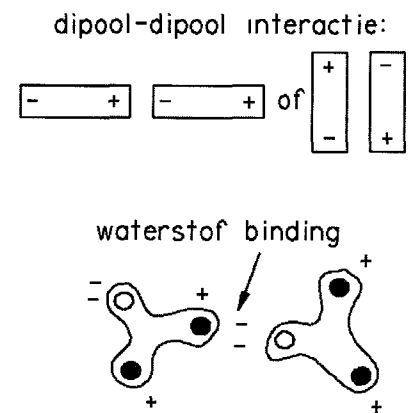
Ionische binding berust op de aantrekkingskracht tussen positief en negatief geladen atoomkernen

Covalente (of atoom-)bindingen verkeren in een toestand waarbij elektronen worden 'gedeeld' door twee atomen.

Polymeren zijn vaak opgebouwd uit covalent gebonden C, H, O, N en S-atomen. Hechting tussen lijm en primer komt vooral voort uit het reageren van lijm moleculen met primermoleculen onder vorming van covalente bindingen.



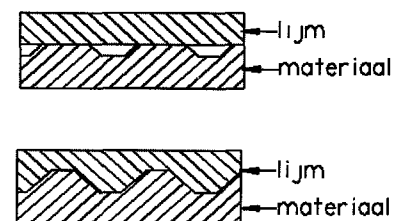
Figuur 6. Drie modellen met een simpele weergave van de verschillende mogelijke atomaire binding. De binnenste cirkels geven de atoomkernen weer, de buitenste cirkels de buitenste elektronen schil en de kleine stippen de elektronen.



Figuur 7. Principe van dipool-dipool interacties bij waterstofbindingen.

Type	Bindingsenergie (kJ/mol)
Primaire bindingen	
ionisch	590 - 1050
covalent	63 - 710
metallisch	113 - 347
Secondaire bindingen	
waterstofbruggen	10 - 30
Van der Waals bindingen	
permanente dipool - dipool	10 - 42
dipool - geïnduceerde dipool	4 - 21
London dispersie krachten	0,08 - 42

Tabel 1. De soorten aantrekkingskrachten die een rol kunnen spelen in het lijmproces tezamen met hun typische bindingsenergie



Figuur 8. Een typisch voorbeeld van mechanische verankering tussen lijm en substraat.

Bij metallische binding worden de elektronen gedeeld door de gezamenlijke atoomkernen van het rooster

Waterstofbruggen en de meer algemene van der Waals bindingen worden beschouwd als secundaire krachten. Waterstofbindingen worden gekarakteriseerd door de aantrekkingskracht tussen twee ongelijke atoomkernen enerzijds en een kleine wolk van elektronen anderzijds. Dit soort binding bestaat slechts tussen niet-metalen als waterstof en zuurstof en is vaak een speciale vorm van dipool-dipool binding, zie figuur 8.

Een soortgelijke binding verklaart de uitstekende hechting tussen sommige lijnprimers en metalen. Er wordt een complex gevormd waarin het lijnmolecuul zich nestelt tegen het metaaloppervlak, zoals bij de hechting van fenollijm aan aluminium.

Van der Waals krachten worden verdeeld in permanente dipool-dipool interactie en London dispersiekrachten. De bindingsenergie is evenals bij de waterstofbruggen beduidend kleiner dan die van de primaire bindingen. De intermoleculaire krachten staan met hun bindingsenergie vermeld in tabel 1.

De hechtingsverbetering die ontstaat door het opruwen van het oppervlak kan volgens de adsorptietheorie slechts het gevolg zijn van het vergroten van het contactvlak tussen lijn en substraat.

Diffusietheorie

Bij deze theorie berust de adhesie tussen lijn en substraat op diffusie tussen de polymeerketens in de grenslaag, ervan uitgaande dat het substraat ook een polymeer is.

Met deze theorie kan de hechting bij het lijmen van zachte kunststoffen verklaard worden, zoals het lijmen van PVC met PVC-lijm. Het oplosmiddel weekt beide kunststofdelen op en laat ze daarna als het ware versmelten. Ook de hechting tussen lijn en primer berust ten dele op dit mechanisme.

de verwerkingstemperatuur enerzijds en de temperatuur met de droogtijd en de mogelijk daarmee gepaard gaande krimpspanningen anderzijds.

Daarnaast is kennis over het gedrag van de (vele) verschillende 'lijmfamilies' onontbeerlijk

Verder is uit experimenten van de auteur gebleken dat er een duidelijke relatie bestaat tussen de vulmethode van de lijmspleet, het volume van de in de lijn ingesloten luchtballen, de vorm van de lijmspleet en de hechtingsterkte. Dit betekent dat de methode van lijn-aanbrengen de kwaliteit van de verbinding eveneens beïnvloedt.

De meest in het oogspringende nadelen zijn:

- intensieve reiniging van de onderdelen is onontbeerlijk, Er bestaat echter geen eenvoudige methode om de reinheid te meten en te bewaken,
- afhankelijk van de soort lijn kost het vaak een dag of meer, voordat de lijn is uitgehard en de verbinding zijn uiteindelijke sterkte heeft bereikt,
- na het positioneren moet het onderdeel op zijn plaats gehouden worden totdat de lijn voldoende uitgehard is,
- er is een duidelijke temperatuurgrens (globaal 80 tot 200°C) waarboven de sterkte van de lijnverbinding onherstelbaar vermindert,
- vocht heeft vaak een sterk nadelig effect op de sterkte van de verbinding,
- soms is een goede hechting slechts te bereiken door het gebruik van primers of activatoren op het substraat oppervlak,
- de richting van de krachtlijnen in en rondom de verbindingsnaad zijn belangrijk en vereisen een goed doordacht ontwerp,
- lijn heeft een lage stijfheid ten opzichte van metaal,
- reactiekrimp - het krimpen bij het 'drogen' van de lijn kan leiden tot hoge interne spanningen,
- elastisch / plastisch gedrag, kruipgevoeligheid,
- het constant houden van alle productievariabelen tijdens het productieproces om reproduceerbare resultaten te verkrijgen,
- niet eenvoudig te demonteren en weer te monteren verbinding,
- testen van het verloop van de sterkte

van de verbinding in de tijd is onontbeerlijk; zowel de vorm als de grootte van de belasting op de verbinding moeten nauwkeurig nagebootst worden

Lijnkeuze

Nadat zorgvuldig is afgewogen of een lijnverbinding de juiste oplossing biedt voor de ondervonden constructieproblemen kan men een keuze gaan maken welke "lijmfamilies" in aanmerking komen. De belangrijkste factoren waarmee rekening gehouden moet worden zijn: de soort te verbinden materialen (metaal en/of kunststof), de belastingvorm(en), constructiestijfheid, omgevingsfactoren als temperatuur en vocht en luchtreinheid - dit geldt zowel voor, tijdens, als na het lijnproces - en tenslotte de produktiekosten en de veiligheidsmaatregelen. Figuur 9 laat zien dat er veel lijmen zijn, wat het maken van een keus niet eenvoudig maakt. Tabel 2 geeft een overzicht van de factoren die van belang zijn bij het ontwerpen en realiseren van een lijnverbinding.



Figuur 9. Er bestaan ontzettend veel soorten en merken lijn, de moeilijkheid is om bij iedere verbinding de juiste te kiezen.

Substraatmateriaal

Er zijn veel materialen die verlijmd kunnen worden zoals metalen, kunststoffen en andere materialen als glas, keramiek, hout, beton. Het bijzondere bij het gebruik van lijn is, dat deze heel verschillende materialen bijna probleemloos verbonden kunnen worden.

Lijnsoort

Voor het verlijmen van assen in gaten komen twee "lijmfamilies" in aanmerking: acrylaten en epoxies. Een van de voordelen van moderne acrylaten is dat zij kunnen hechten aan

Lijmen van kleine onderdelen (1)

Wijze van aanbrengen	Gemiddelde kracht	Standaard deviatie
Druppel lijm in dop	324 N	106 N
Lijm ingespoten via capillair	380 N	70 N

Tabel 2. Het ontwerp van een lijmverbinding is een procedure waarbij begin en einde sterk met elkaar verweven zijn zoals uit deze tabel blijkt.

enigszins olieachtige metalen oppervlakken. Deze eigenschap ontstaat door speciale toevoegingen in de primer of in de lijm zelf, die door de olie heen dringen of met de oppervlaktevontreinigingen reageren. Sommige acrylaten zijn gevoelig voor vocht. Zowel cyanoacrylaten als anaerobics behoren tot de acrylaatlijmen.

Cyanoacrylaten zijn eencomponentlijmen. De uithardingsreactie wordt geïnitieerd door een licht basisch oppervlak; waterdamp op het oppervlak is vaak al voldoende om de uitharding op gang te brengen. Door de lage viscositeit penetreert de lijm goed in de poriën van het substraatoppervlak en de lijm is daarom in staat een blijvende en sterke

ontwerpfase	substraat	<p>matériaal eigenschappen</p> <p>oppervlakte ruwheid</p> <p>lijmspleet</p> <p>substraatvorm</p>
	lijm	<p>houdbaarheid (shelf life)</p> <p>verwerkingstijd (pot life)</p> <p>één/twee component</p> <p>wel/niet spleetvullend</p> <p>vochtgevoeligheid</p> <p>verpakking</p>
	kosten	<p>arbeid</p> <p>instrumentarium</p> <p>reiniging</p> <p>lijm</p> <p>(chemisch) afval</p>
produktiefase	verwerkings methode	<p>handmatig /machinaal</p> <p>toxiteit/ huidgevoeligheid</p>
	te beheersen factoren	<p>luchtvochtigheid</p> <p>reinheid van de lucht</p> <p>pot life</p> <p>temperatuur</p> <p>benodigde aanbrengtijd</p> <p>totale uithardingsstijd</p> <p>afgassen van de lijm</p>
produkt gebruik	mechanische belasting	<p>afschuifsterkte</p> <p>treksterkte</p> <p>pelsterkte</p> <p>pulskracht bestendigheid</p>
	belasting door het milieu	<p>duurzaamheid</p> <p>uiterlijke verschijning</p> <p>vocht</p> <p>temperatuur</p> <p>chemicalien/ zouten</p> <p>UV-bestendigheid</p>

Het effect van twee verschillende aanbrengmethodes op de hechtsterkte en de standaarddeviatie van een geteste lijmverbinding.

verbinding te realiseren bij bijna alle soorten materialen. De uithardingsstijd wordt beïnvloed door de luchtvochtigheid, de soort en conditie van het substraatoppervlak en de breedte van de lijmspleet. Bij nauw aansluitende oppervlakken (0,05 mm spleet) bij 20°C wordt 20% van de uiteindelijke sterkte na ongeveer 5 min uitharden bereikt. Beperkingen in de toepasbaarheid van cyanoacrylaten zijn de sterkte op lange termijn en de snelle hechting, waardoor slechts kleine oppervlakken verlijmd kunnen worden. De uitgeharde lijm is slecht bestand tegen hoge vochtigheid en tegen temperaturen boven 70°C. De weerstand tegen stotende belasting en de pelsterkte zijn niet groot.

Een extra nadeel van het snelle uitharden is dat menselijke huid in een fractie van een minuut vastgeplakt zit. Beveiliging hiertegen en van de ogen vergt speciale aandacht bij de verwerking.

Anaerobe lijmen zijn een speciale soort acrylaten. Sinds de introductie is het aantal technische toepassingen enorm uitgebreid. Ze zijn vloeibaar en beginnen uit te harden als ze van de lucht worden afgesloten. Ze worden veel toegepast als moerborging, het op zijn plaats houden van lagers en voor het bevestigen van coaxiale delen. De weerstand tegen de inwerking van vocht is in het algemeen goed.

Epoxies zijn tweecomponentlijmen die in vele vormen beschikbaar zijn: pasta's, film, band, micro-verpakkingen en poeders. De eigenschappen kunnen speciaal aan het gebruiksdoel worden aangepast, zoals: viscositeit, hoge schuifsterkte, goede pelsterkte en schokweerstand, hittebestendigheid en hoge duurzaamheid. Vergeleken met andere lijmen zijn het uitstekende spleetvullers en beschermen tegen galvanische corrosie. Hoewel de optimale sterkte bereikt wordt bij uitharden op 80°C wordt ook een behoorlijke sterkte bereikt zonder extra verwarming. Ze scheiden nauwelijks vluchtige stoffen uit tijdens het uitharden en de hardingskrimping is gering. Voor een optimale bindingsterkte is een zeer schoon en droog oppervlak vereist. Epoxies worden vaak toegepast vanwege hun grote sterkte, hun spleetvullend vermogen, de ruime positioneerstijd (verwerkingstijd) en de geringe afscheiding van vluchtige stoffen.

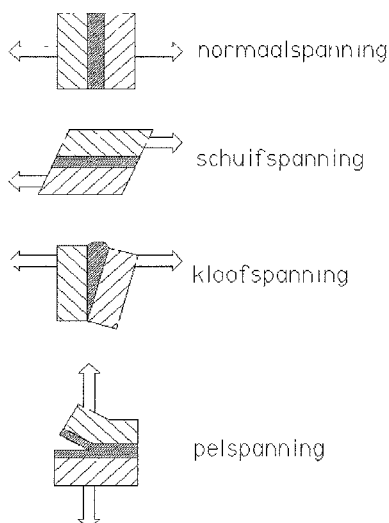
Belastingsvorm

Een groot dragend lijmooppervlak alleen is geen voldoende voorwaarde om een sterke lijmverbinding te creëren. Ook de wijze van belasten van de verbinding speelt een grote rol. Omdat een lijmverbinding slechts tegen afschuiving bestand is moet het ontwerp van de te verlijmen onderdelen daarop aangepast te worden. In figuur 10 zijn vier verschillende belastingsvormen weergegeven.

Het voorkomen van ongewenste krachten in de verbinding vereist soms een andere constructie dan die men zou toepassen om te solderen, zie figuur 11. Wordt met de belastingsvorm geen rekening gehouden, dan is het niet onmogelijk dat de verbinding slechts een kort leven beschoren is. De soort belasting is eveneens van belang: statisch, of dynamisch, met korte hoge krachtpulsen of langzaam opbouwende pulsen, en natuurlijk de opgelegde frequentie. Inmiddels zijn er nogal wat lijmvarianten in de handel verschenen met een wat meer rubber-achtig karakter (toughened) die beter bestand zijn tegen pulserende belastingen. Het uitvoeren van tests blijft echter aan te raden.

Duurzaamheid en omgevingsfactoren

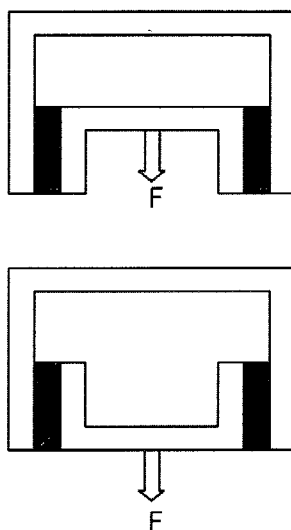
Over de duurzaamheid van een specifieke lijmverbinding is vaak niet voldoende informatie beschikbaar zonder dat er op uitgebreide schaal experimenten zijn uitgevoerd. Deze moeten dan



Figuur 10. De vier verschillende basistypen van belasting, welke uitgeoefend kunnen worden op een lijmverbinding: Normaal/ schuif/ kloof- en pelkracht.

wel van zodanige opzet zijn dat al de mogelijke omgevingsfactoren als de krachten, vocht, zuren en zouten overeenkomen (of zelfs geïntensiveerd zijn) ten opzichte van die in de praktijk. Vaak is dit een tijdrovende, en dus dure aangelegenheid. Voor veel verbindingen zijn er gelukkig min of meer standaard oplossingen beschikbaar waarmee reeds een ruime ervaring is opgedaan.

Een van de grootste boosdoeners voor een lijmverbinding is vocht. Onder invloed van vocht blijkt dat de lijm ontleedt of dat de hechting aan het grensvlak wordt geruïneerd. Bij blootstelling van de verbinding aan water, zal vocht altijd binnendringen, hetzij via de polymeer, hetzij bij de grenslaag. Ook zal de corroderende werking van het water op het substraatoppervlak de sterkte van de verbinding op langere termijn doen afnemen. De sterkte kan snel afnemen bij een combinatie van factoren zoals de inwerking van vocht met opgeloste zouten bij verhoogde temperatuur en bij een verbinding onder spanning. Tegenmaatregelen zoals het aanbrengen van speciale oppervlaktelagen kunnen dit proces vertragen, evenals speciale afdeklagen aan de buitenzijde van de lijmverbinding (verflaagje). De beste remedie is het volledig afsluiten van de verbinding van een vochtige omgeving door constructieve maatregelen. In het geval van figuur 4 zou het



Figuur 11. In tegenstelling tot soldeer- en lasverbindingen moeten lijmverbindingen op afschuiving worden geconstrueerd.

aanbrengen van een O-ring boven in het gat een goede bescherming tegen vocht kunnen geven.

Temperatuur

Over het algemeen is de temperatuursgevoeligheid van de lijmverbinding een wat minder ingewikkeld te doorgronden probleem dan die van vocht. Het temperatuursgebied waarin de lijm goed functioneert is meestal duidelijk aangegeven door de fabrikant. Snel optredende grote temperatuurschommelingen kunnen thermisch genduceerde spanningspieken doen ontstaan, die fatale haarscheurtjes in de lijmnaad kunnen veroorzaken. Vaak gemaakte fouten zijn het plaatsen van een zojuist gelijmde (maar nog niet uitgeharde verbinding) in een voorverwarmede oven of het verplaatsen van de verbinding uit een warme oven naar het koude laboratorium.

Lijmspleetvulling en luchtbelletjes

Tijdens het onderzoek naar de optimalisatie van de cilindrische lijmverbindingen zoals afgebeeld in figuur 4 bleek de vulling van de lijmspleet van grote invloed op de uiteindelijke hechtingsterkte. Oorzaak waren de in de lijmspleet aanwezige luchtbelletjes die een negatieve invloed hadden op de sterkte.

Nadat een tweecomponentenlijm de fabriek luchtbelvrij verpakt heeft verlaten zijn er bij de verwerking diverse momenten waarbij luchtbelletjes in de lijm kunnen ontstaan. Dit kan plaatsvinden:

- voor het mengen, bij het uit de verpakking nemen,
- tijdens het mengen van de twee componenten,
- tijdens het aan- of inbrengen van de lijm.

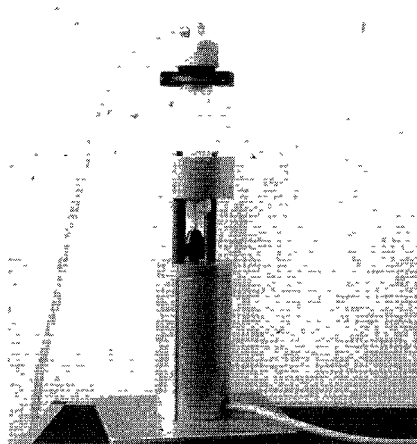
Bestaande lijmapplicatie en menginstrumenten, zoals statische mixers, hebben alle het nadeel dat bij het mengen luchtbelletjes in de lijm worden opgenomen. Zoals de figuur 12 laat zien zijn luchtbelletjes desastreus voor de vulling van de lijmspleet bij een microverbinding.

Luchtinsluitels ontstaan gemakkelijk door het overgieten, overscheppen en mengen van de lijmcomponenten. Om dit te voorkomen zijn een aantal maat-

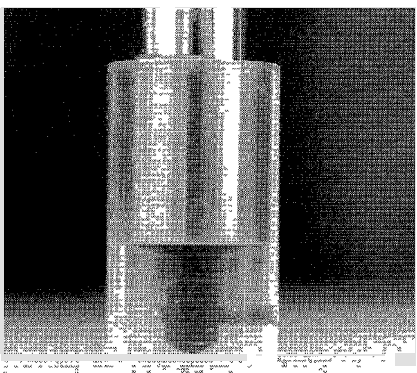
Lijmen van kleine onderdelen (1)



Figuur 12. Lucht insluitsels in de lijmlaag verminderen de sterkte beduidend. De staaf werd in de lijm gedrukt nadat eerst een druppel lijm in de dop was gedoseerd.



Figuur 13. Speciaal instrument om tweecomponenten lijm in een en dezelfde (wegwerphuls) te wegen, mengen en doseren zonder dat hierbij luchtinsluitsels in de lijm ontstaan. De mechanisch aangedreven roerder zit geheel in de lijm. Door dat de lucht boven de lijm met een vacuumpomp wordt afgezogen worden luchtinsluitsels tijdens het mengen voorkomen.



Figuur 14. De kans op luchtinsluitsels is gering bij lijmspleetvulling van onderaf.

regelen getroffen

Om te beginnen is een lijmmenginstrument, zie figuur 13, ontworpen op basis van bestaande (wegwerp) lijm-doseer hulzen. In een en dezelfde huls wordt de tweecomponentenlijm gewogen en gemengd waarna de lijm op de substraten kan worden gespoten. Tijdens het mengen met een mechanisch aangedreven roerder worden de luchtbellens verwijderd door de lucht uit de huls te pompen met een vacuumpomp. Daarna wordt op de onderzijde van de lijmhuls een doseernaald aangebracht waarmee de lijm vrijwel vrij van luchtbellens nauwkeurig aangebracht kan worden.

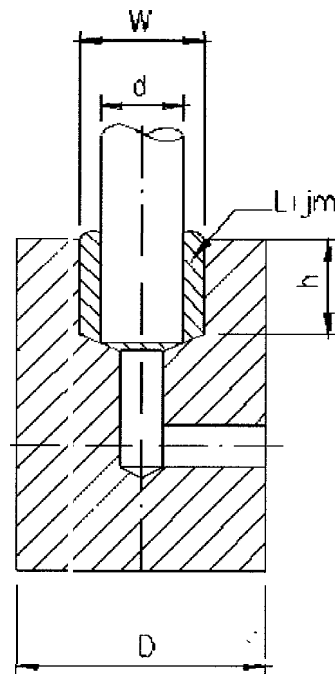
Aanvullend is in de dop een kanaal aangebracht om de lijm van onderaf in de lijmspleet te kunnen spuiten. De foto's laten duidelijk het verschil zien: Figuur 12 toont de luchtinsluitsels die ontstaan als de lijm in een blind gat geïnjecteerd wordt, waarna de te verlijmen staaf wordt ingebracht. Figuur 14 is het resultaat van het vullen via een injectie kanaal waarbij de aanwezige lucht door de opstijgende lijm uit de lijmspleet wordt verdreven.

De onderdelen, zie figuur 15, hebben de volgende afmetingen: staaf diameter $d=2,0$ mm, overlappende $h=2,5$ mm, en lijmspleetbreedte $(W-d)/2=0,10$ mm.

Tabel 2 geeft het experimenteel bepaalde verschil in sterkte van beide lijmvbindingen weer. Twee belangrijke effecten worden duidelijk bij het bestuderen van de cijfers. De hechtsterkte neemt toe wanneer er minder luchtbellens in de lijmlaag zitten, maar bovendien neemt de spreiding (standaard deviatie) af wanneer de lijmspleet beter gevuld is met lijm. In een industrieel productieproces betekent dit: een hogere reproduceerbaarheid en dus betere kwaliteit.

Verwerkingstijd

De verwerkingstijd (Engels: pot life) is de beschikbare tijd die tussen het aanbrenge van de lijm en het moment waarop de onderdelen gepositioneerd zijn en niet meer verschoven mogen worden. Onderdelen die met de 'familie' cyanoacrylaten – beter bekend als 'tien seconden' lijmen – verlijmd worden mogen niet meer verschoven worden nadat ze met elkaar in contact zijn gebracht. Verbeteren van de positie na het verlijmen is dan niet mogelijk. Dit



Figuur 15. De onderdelen hebben de volgende afmetingen: staafdiameter $d = 2,0$ mm, overlappende $h = 2,5$ mm en lijmspleetbreedte $(W-d)/2 = 0,10$ mm.

in tegenstelling tot tweecomponentenlijmen waarvan de verwerkingstijd kan oplopen tot een uur en soms zelfs langer.

Houdbaarheid

De houdbaarheid (Engels: shelf life) slaat op de tijd dat de lijm bewaard kan worden zonder dat de kwaliteit afneemt. Wanneer de lijm in een koelkast wordt bewaard is de houdbaarheid in de orde van een half jaar tot een jaar, afhankelijk van merk en type. Het regelmatig in- en uit de koelkast zetten kan de kwaliteit echter sterk doen teruglopen.

Toxicologie

Hoewel de meeste lijmen weinig problemen opleveren wat betreft hun giftigheid, heeft de aanbeveling (vooral in een continu productieproces) veiligheidsmaatregelen te treffen zoals het dragen van een veiligheidsbril en handschoenen tegen huidirritatie. Soms is het noodzakelijk om de omgevingslucht regelmatig te verversen waarvoor richtlijnen op de verpakking of bijsluiters staan aangegeven.

Verkrijgbaarheid

Hoewel deze titel in eerste instantie

nogal merkwaardig zal overkomen bij de lezer, zal een ieder die zich begeeft in 'het woud der lijmen en lijmfabrikanten' schrikken van het grote aanbod aan lijmen.

Gezien de investering in tijd en geld die men vaak gedaan heeft in het opbouwen van bepaalde lijmen is het belangrijk dat de verkrijgbaarheid nimmer een probleem vormt. De keuze voor een betrouwbare leverancier en een goed verkrijgbare lijm die voor lange tijd met zekerheid leverbaar blijft is aan te bevelen.

Slotopmerking

Het verlijmen van kleine onderdelen vergt bijzondere aandacht en zorg. Bij macroverbindingen normaal voorkomende onvolkomenheden kunnen een groot kwaliteitsverlies veroorzaken als gevolg van de kleine te verbinden oppervlakken. Extra aandacht verdient het aanbrengen van de lijm in de lijmspleet en het daarbij voorkomen van luchtin-sluitsels.

Ondanks het op de markt verschijnen van computerprogramma's, waarbij soms zelfs "uitgeklede" eindige elementen pakketten geleverd worden blijft het ontwerp van echt goede lijmverbindingen een zaak van experimenteren, testen en ervaring opbouwen. Nauwkeurig beheersen van de condities waaronder het verlijmen plaats vindt is van essentieel belang voor de kwaliteit en de reproduceerbaarheid.

Literatuur

[1] K.L. Mittal, The role of the interface in adhesion pheno-

mena, Polymer eng and science, 17(1977)7, pp 467-473

[2] D M Brewis, Surface analysis and pretreatment of plastics and metals, Appl science publishers Londen/New Jersey, ISBN 0-85334-992-4, 1982, pp 1-11

[3] E H P Lochtenberg, J J G Smits, Lijmen theorie en toepassing, de Constructeur, (1989)8, pp 24-28

[4] A J Kinloch, Adhesion and adhesives science and technology, Chapman and Hall, Londen/New York, 1987

[5] Kinloch, Durability of structural adhesives, W Brockmann, Steel adherends, A S Publishers Londen/New York, ISBN 0-85334-214-8, 1983

[6] B W Cherry, J Adhesion 2, 42, 1970

[7] A J Kinloch, The science of adhesion, part one, Surface and interfacial aspects, Journ of materials science 15(1980)

[8] W Brenner, Structural adhesives challenge mechanical fasteners, Mach Design, 24-01-1985, pp 61-64

[9] A Kwakernaak, Oppervlakbehandeling een randvoorwaarde voor een duurzame verbinding, Materialen, (1988)6, pp 8

[10] L Pauling, The nature of chemical bonds, Cornell University Press, New York 1960

[11] R J Schiekelman, Gehijmde metalen constructies, Agon Elsevier, Amsterdam/ Brussel, 1970

[12] J A Poulis, Small Cylindrical Adhesive Bonds, Delft University of Technology, Fac of Mech Eng, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, Holland, ISBN 90-370-0082-7, 1993

Auteursnoot

Dr J A Poulis en prof ir J C Cool zijn verbonden aan de Technische Universiteit Delft, Faculteit Werktuigbouw en Maritieme Techniek te Delft. Dr E H P Logtenberg is verbonden aan het Hechtings Instituut te Delft

Dit artikel is een zeer beknopte weergave van een deel van het werk dat beschreven staat in het proefschrift "Small cylindrical adhesive bonds". Het proefschrift is te verkrijgen door overmaking van fl 40,- op postgironr 3195292 tnv J A Poulis te Leiden, onder vermelding van naam, adres en de opmerking "Proefschrift"

Je zal maar sterk gehecht zijn aan iets



Als je gehecht bent aan iets, dan wil je dat graag zo aantrekkelijk mogelijk. Het moet een sterke, lichte en degelijke verbinding zijn. Geschikt voor vrijwel alle materialen en zo uit de verpakking aan te brengen, zonder afwegen, mengen, verwarmen, langdurig klemmen, geknoei of verspilling. Met Loctite lijmen dus. Innovatief en economisch. De eenvoudige, snelle en betrouwbare bevestigingstechniek.

Maak gebruik van de technologische voorsprong, die Loctite heeft!

Bel voor meer informatie: 076-42 23 33.

LOCTITE®

VAST... EN ZEKER!



Loctite Nederland b.v.

Essendonk 5, 4824 DA Breda,
tel. 076-42 23 33, fax 076-42 24 19