

Stork Fokker ontwerpt casco voor lichtgewicht bus

Lijmverbindingen in een autobus

Luit Zwaneveld, Stork Fokker

Stork Fokker te Hoogeveen heeft het casco voor een lichtgewicht bus ontworpen. Hierin zijn veel sandwichconstructies en lijmverbindingen verwerkt. Een artikel over de bijzondere problemen die moeten worden opgelost voordat een dergelijke bus de weg op kan.

1. Theorie en praktijk

Door de opdrachtgever en projectcoördinator APTS is de eerste autobus van een serie van dertien samengebouwd in begin 2002. Tijdens de testritten blijkt de bus aan tal van criteria voor gebruik te voldoen. In onbeladen toestand heeft de autobus alle testronden doorlopen, in vol beladen toestand is men nog bezig het vereiste testtraject af te leggen. Een vrijgave voor de inzet in het openbaar vervoer wordt nog dit jaar verwacht. In dit artikel staan lijmverbindingen in een lichtgewicht constructie centraal.

Na een toelichting op de keuze voor sandwichconstructies en lijmverbindingen (paragraaf 2) wordt per onderdeel van de samen te bouwen constructie-elementen ingegaan op: producteisen, eventuele problematiek rond toleranties en uitzettingsverschillen alsmede de gekozen oplossingen (paragraaf 3 tot en met 8). Bij het beschrijven van de verschillende technische aandachtspunten is tevens gebruik gemaakt van de ervaringen die in 1998 zijn opgedaan met de ontwikkeling van een lichtgewicht casco voor het 'Project Innovatiebevordering Rotterdam'.



APTS-voertuig.

2. Keuze voor sandwichconstructie en lijmverbindingen

In het voor het stadsverkeer zo kenmerkende *stop and go* verkeer is het totaalgewicht van de autobus van belang. Mede door het feit dat bij deze specifieke autobus alle wielen bestuurbaar zijn en er slechts twee banden per as gemonteerd konden worden, werd de wens om hiervoor

een lichtgewicht casco te bouwen steeds duidelijker. Stork Fokker werd gevraagd om een voorstel te doen. Een lichtgewicht constructie is te ontwerpen indien alle delen van de constructie krachten doorleiden en tevens maximaal worden belast. Er dient ook te worden voorkomen dat constructies plaatselijk moeten worden verzwaaard op plaatsen waar via bevestigingsmiddelen belastingen worden doorgeleid. Bij buigende belastingen is de sandwichconstructie een goede keuze. Immers bij een buigbelasting worden de krachten in hoofdzaak langs de buitenste vezels geleid en de kern, die niet zo hoog wordt belast, kan dan worden uitgevoerd met een zwakker materiaal dat bij voorkeur licht van gewicht is. Voor alle vlakke delen is een aluminium plaat als huid voor de sandwich gekozen omdat in het casco deze constructiedelen de meeste buigende belastingen opnemen. Daarnaast is binnen Fokker Hoogeveen de expertise voor de vervaardiging van deze elementen inmiddels ruim dertig jaar aanwezig. Vanwege de vormvrijheid zijn alle enkelvoudig gekromde elementen en drie dimensionale vormdelen vervaardigd met een glasvezel gevulde hars laminaat (GVK) als huid van de sandwich.

De verbindingsmiddelen tussen de constructiedelen dienen de belasting, vanwege de gewenste licht gewicht constructie, zo egaal mogelijk te verdelen. Lijmen blijkt voor de licht gewicht autobussen een goede oplossing te zijn. Het samenbouwen van alle constructie elementen kent een verscheidenheid aan eisen die elk apart dienen te worden beschouwd. Bij het bespreken van de lijmverbindingen zijn de volgende deelgebieden te onderscheiden:

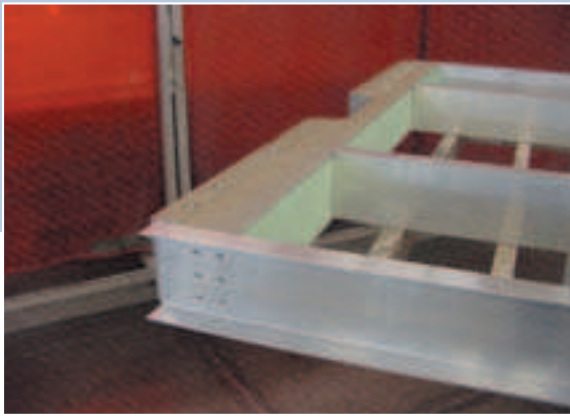
- vlakke onderdelen: vloer en dak (paragraaf 3);
- zijwandmodule (paragraaf 4)
- zijwandmodule aan vloer (paragraaf 5);
- zijwandmodulen onderling (paragraaf 6);
- zijwandmodule en stoelrails (paragraaf 7);
- kop van het voertuig en materiaalkeuze (paragraaf 8).

3. Vlakke onderdelen: dak en vloer

Producteisen Vlakke delen zoals de vloer en het dak zijn uitgevoerd als een raamwerk van aluminium extrusies, waarbij de tussenruimten zijn gevuld met schuim en aan de boven- en onderzijde afgesloten met aluminium platen als huidplaat.

Het dak leidt op zich weinig belasting door en kan zeer licht worden uitgevoerd. Het grote oppervlak wordt gevormd door de huidplaten en de gewichtswinst moet hier worden gezocht. Dunne huidplaten neigen tot plooivorming onder belasting en ook hierbij speelt de sandwichconstructie met zijn ondersteunende schuimkern een belangrijke rol om te voorkomen dat dit bezwijkgedrag kan optreden. Aan de lijm in het dak worden op product niveau geen specifieke eisen gesteld anders dan een gebruikstemperatuur van 90°C boven de motorruimte. Vooral de vloer moet veel buigbelasting opnemen. Tegelijkertijd mag de vloer daarbij, vanwege de bodemvrijheid

Voorrand vloer.



van de bus, niet teveel doorbuigen. Ook de vereiste minimale eigenfrequentie was mede reden om de constructie zo stijf mogelijk uit te voeren. De keuze van de lijmlaagdikte is van invloed op dit gedrag. De huidplaten moeten via de extrusies zo stijf mogelijk worden gekoppeld.

Oplossing Er is een epoxy lijm gebruikt met een hoge glijdingsmodulus die tot een dunne lijmlaag kan worden verwerkt. Om dit te bereiken wordt een verwarmde pers gebruikt die de 1-component lijm en laag visceus maakt en tevens tot volledige vernetting laat uitharden. De krachten die door deze lijmmaad worden opgenomen zijn in deze toepassing relatief laag, in de orde van grootte van 8 N/mm². Hiervoor is het voldoende om het aluminiumoppervlak te behandelen met een chemisch chromateerproces. Deze behandeling zorgt ervoor dat vocht en zout in de loop van de tijd niet de gelegenheid krijgen het oppervlak van het aluminium te corroderen en daarmee de verbinding te verzwakken.

Aangezien het casco deel uitmaakt van een gelede bus is er op de overgang tussen de rijtuigen een gebied te onderscheiden waar via de draaikrans op slechts één locatie alle krachten worden overgedragen. Tevens geldt in dit geval dat bij bezwijken de krachten niet via een andere route opgevangen kunnen worden. Daarmee kan een levensbedreigende situatie ontstaan. Hiervoor geldt dat een ruime marge op de veiligheidsfactor moet worden gezet. De gekozen lijm kan op afschuif tot 30 N/mm² worden belast en tot dit niveau zal ook de kracht naar het aluminium oppervlak doorgeleid moeten worden. Binnen de vliegtuigbouw wordt hiervoor het chroomzuur anodiseerproces toegepast, afgewerkt met een extreem dunne epoxy primerlaag. Het anodiseerproces wordt uitgevoerd in een bad met een geschikt elektrolyet onder invloed van een elektrisch potentiaalverschil. Hierbij vormt zich vanuit het basismateriaal aluminiumoxide dat zeer hecht is verbonden met de ondergrond.

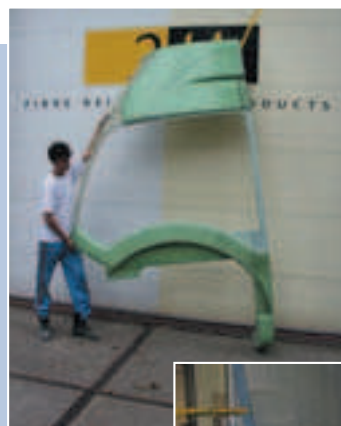
Er is in de sandwichconstructies van het dak dezelfde lijm gebruikt als bij de vloer om logistieke redenen.

4. Zijwandmodule

Producteisen De zijwandmodule dient zoveel mogelijk functies in zich te dragen. De optredende belastingen zijn in hoofdzaak schuifbelastingen tijdens torsie van de autobus, en compressie tijdens het doorbuigen van de vloer. Weerstand tegen aanrijdingen en het vormen van een voldoende stijf montagevlak voor de stoelrail is een volgende eis. Tevens moest de binnenzijde inclusief raampan en de buitenzijde geheel glad en spuitklaar worden geleverd.

Oplossing De zijwandmodule is een bouwelement gefabriceerd met een schuimkern omgeven door glasvezel gevulde polyester hars. Met behulp van sterkteberekeningen is de minimale dikte van het glaslaminaat

vastgesteld en zijn de eigenschappen voor de schuimkern geverifieerd. Er werd met opzet niet gestreefd naar een hoge vezel-volume verhouding hoewel dit voor het gewicht gunstiger zou zijn. De kosten voor hoge vezel-volume verhoudingen liggen hoger vanwege de vereiste productie methoden en er lag nog een eis voor bescherming tegen impact op de buitenzijde van de autobus. Deze laatste eis is vertaald naar dikte van de huid waardoor het glasvezel laminaat nu een dikte heeft van circa 3 mm. De wijze van produceren komt voort uit de eis dat zowel de buitenkant als de binnenkant, inclusief de raamomgeving van de bus, glad afgewerkt en spuitklaar moest zijn en dat bij de productie nauwelijks styreen mocht ontwijken. Het laatste geeft aan dat de gesloten maltechniek van toepassing is en uiteindelijk is gekozen voor RTM als productie techniek. Hierdoor is het mogelijk gebleken een netto product te fabriceren waarbij slechts een dun randje hars langs de omtrek moest worden verwijderd. De gekozen vezel-volume verhouding van 25% (=40% gewicht) bleek op meer aspecten invloed te hebben. Het kernmateriaal van PUR-schuim laat slechts een compressie toe van 2 bar zodat men de druk van de hars toevoer lager dan deze waarde moet instellen. De RTM hars is met zijn bijbehorende viscositeit ook bij deze lage druk in staat om het glasvezel pakket te benatten en volledig te doorstromen binnen de getijd. Deze druk zet tevens de mal minder onder spanning waardoor de uitwijkingen gering blijven en de mal een lange standtijd kent. De mal heeft daarom ook niet extreem stijf uitgevoerd te worden, hetgeen het gewicht en de kosten gunstig beïnvloed. De zijwandmodulen worden voor het schuren van de lijmlakken onderworpen aan een *post cure cycle* om het reststyreengehalte binnen het product te verlagen tot zo'n 0,5%. Deze waarde wordt aangehouden om zeker te stellen dat in de tijd gezien de lijmhchting op de lijmlakken niet door het later uittreden van styreen wordt verzwakt. Volgens harsleveranciers is er een voorkeur om het glasvezellaminaat direct aan een temperatuur van 90 °C bloot te stellen maar tot nu toe is dit niet aangedurfd. Wegens veronderstelde vormverandering van het met schuim gevulde product hebben we het proces uitgevoerd op 40°C gedurende 24 uren. Door deze *post cure* behandeling ver-



← Kop-zijwandmodule.

RTM-mal met product. ↓





Zijwand monteren.

krijgt de polyester hars direct de uiteindelijk gewenste mechanische eigenschappen en is dan ook beter schuurbaar.

5. Zijwandmodule aan vloer

Producteisen De onderste helft van de module vormt samen met de vloer een U-vorm. Deze vorm kent een goede stijfheid mits de onderdelen onderling ook weer stijf zijn gekoppeld. De verbinding tussen de GVK modules en de vloer mag niet door een hoog flexibele lijm worden gevormd.

Oplossing Vanwege de grootte van de afschuifkrachten en het gevaar van pelkrachten tijdens bepaalde belasting gevallen werd op deze plaats een gemodificeerde 2-componenten epoxylijm gebruikt met een uitstekende hechting aan de GVK module. De aluminium randextrusie was reeds gechromateerd voor een optimale hechting en de modules behoeften slechts ontvet en geschuurd te worden.

Toleranties De zijwandmodule wordt in de randextrusie van de vloer geschoven zodanig dat de aangebrachte lijm niet wordt opgestroopt of weggedrukt. De gekozen lijm is mede door zijn tixotrope eigenschap in staat een spleet van 1 mm te overbruggen. Ofschoon het blijft gelden dat een lijmnaad bij voorkeur zo dun mogelijk dient te zijn, zeker als stijfheid in het geding is, laat de stijfheid van de zijwandmodule deze spleet toe. De zijwandmodule wordt aan de voet zowel aan de boven- als aan de onderzijde geschuurd en dit geeft voldoende mogelijkheid om de tolerantie op de spleet te garanderen.

Rijtuig drie modules.



6. Zijwandmodulen onderling

Producteisen De productie van de modules verlangt een lossingshoek langs de randen. De spleet tussen de modules wordt daardoor taps van vorm. Indien een stijve lijm in deze spleet zou worden toegepast dan worden de krachten eerst opgenomen in het dunste en meest stijve gedeelte. Dit gedeelte is zeer beperkt van oppervlak zodat er een niet te grote belasting mag optreden.

Oplossing Gezien de hiervoor beschreven situatie is de voorkeur gegeven aan een hoog flexibele lijm die in staat is de krachten nog meer te spreiden. De lage sterkte van dit soort lijmen (3 N/mm^2) is in dit geval geen probleem omdat het totale lijmpoppervlak tussen de modules groot is. Daardoor blijft de verbinding in stand ook bij grote belasting. Door de breedte van de lijmnaad van ongeveer 60 mm treedt tijdens compressie tussen de zijwandmodules een alzijdige druk op in de lijm die de lijmverbinding stijver maakt.

Toleranties De kopse wanden worden op de uiteinden van de vloer geplaatst en zijn daarmee direct gekoppeld aan de tolerantie op de vloer. De zijwanden vullen de ruimte op tussen de kopse wanden. Door het aantal spleten tussen de modules en tussen modules en kopse wand kunnen aanzienlijke tolerantie verschillen worden opgevangen zonder dat de krachtoverdracht en stijfheid hieronder heeft te leiden.

7. Zijwandmodule en stoelrails

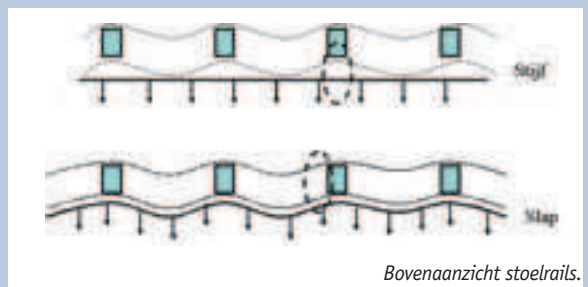
Producteisen De stoelen in het casco worden zonder afsteuning op de vloer aan de wand gehangen. Dit geeft een geheel vrij vloeroppervlak dat gemakkelijk te reinigen is. Wat de koppeling van de stoelrails aan de wand betreft heeft deze methode een aantal overwegingen tot gevolg.

De zijwandmodules die reeds gedefinieerd waren als een sandwichconstructie met GVK huiden, hebben een lagere stijfheid dan aluminium en de richting van de hoofdbelasting staat ook nog eens loodrecht op de wand. De constructie van de stoelrails zelf leidde in de richting van een aluminium extrusie vanwege de puntbelasting die vanuit de stoelen zou worden doorgeleid. De aandacht lag bij dit onderdeel vooral in de verbinding van deze twee constructies aan elkaar.

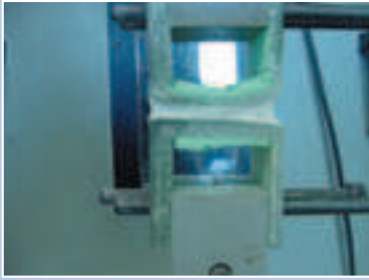
Oplossing Eerst werd de hoofdbelasting in dwarsdoor-



Stoelrails.



Bovenaanzicht stoelrails.



Koptrek-proef.

snede aangegeven waardoor meteen duidelijk werd dat een aluminium extrusie op een relatief slappe ondergrond met een pel-ongevoelige lijm moest worden bevestigd. Daarna werd de verbinding voorgesteld in extreme stijfheidsverschillen tussen de bouwelementen onderling in lengterichting. Als de stoelrail oneindig stijf is dan zal

onder belasting de onderlinge verplaatsing en daarmee de krachtdoorleiding zich concentreren op het omcirkelde gebied. Zodoende wordt een spreiding van krachten die we nastreven niet bereikt. Als we daarentegen de stoelrails oneindig slap veronderstellen dan zal de stoelrail onder belasting precies het opgedrongen contour volgen van de zijwandmodule. Hierdoor wordt weliswaar een zeer goede spreiding van de krachten bereikt, alleen wordt dan geen recht gedaan aan de stelling van een lichtgewicht constructie en bij deze configuratie bereiken de verplaatsingen een onacceptabel niveau. De uiteindelijke ontstane stoelrails heeft een stijfheid gekregen die een doorbuiging aan de zijwandmodule opdringt die de huden en het schuim kernmateriaal ook tijdens vermoeingscondities intact laat en waardoor de lijmnaad tussen de onderdelen niet hoger belast wordt dan duurttest data aangeven.

Toleranties De stoelrail wordt loodrecht op de zijwand gemonteerd waarbij de elastische lijm wordt uitgeperst tot de voorgeschreven lijmlaagdikte is bereikt. Een variatie in vlakheid van de zijwand is als enige van invloed op de lijmlaagdikte. De vlakheid is te bereiken binnen 0,6 mm en daarmee varieert de lijmlaagdikte tussen de 3 en 3,6 mm hetgeen voor deze toepassing, waarbij hoofdzakelijk koptrek voorkomt, niet voor problemen zal zorgen.

Uitzettingsverschillen Het gekozen glasvezelmateriaal en de vezel-volume verhouding zorgen ervoor dat de uitzettingscoëfficiënt van het GVK nagenoeg overeenkomt met die van aluminium (24 E-6). Hierdoor is het mogelijk de lange lengten stoelrails met een alleszins acceptabele dikte van de lijmlaag aan de zijwand te bevestigen. Toch dient men te beseffen dat juist tijdens het opwarmen of afkoelen er tijdelijk lengteverschillen kunnen blijven optreden die worden opgevangen binnen de dikte van de lijmlaag. Dit is mede een reden om geen 'harde' verbindingsmiddelen zoals bouten of trekknagels toe te staan. Tijdens lengteveranderingen van de stoelrails worden deze trekknagels gedwongen mee te gaan en dit heeft tot gevolg dat de nagel door de dunne GVK huid wordt geslept.

8. Kop van het voertuig en materiaalkeuze

In de kop van het voertuig bevinden zich twee zogenaamde A-stijlen op de overgang van de voorruit naar de zijruiten. Vlak hierachter bevindt zich de chauffeur die zich ook tijdens een ongeval veilig wil voelen. Het toepassen van alleen een glas- of ook koolstofvezelversterkte kunststof is hier niet toegestaan. Bij een botsing zoekt men naar een kreukelzone waarbij de constructie in staat is om over een zekere weglengte veel energie op te nemen. Indien een glasvezelconstructie aan een dwarsbelasting wordt onderworpen zal deze in eerste instantie veel energie kunnen opnemen; dit echter bij een zeer geringe weglengte. Daarna zijn alle vezels verbroken en schiet de belasting door. Om deze reden is besloten de chauffeur te beschermen met een RVS stalen buisconstructie die veel vervorming toestaat, en is omkleed met een glasvezel vormdeel. Een koolstofstalen buis had ook deze functie

kunnen vervullen, maar dan had deze buis additioneel een corrosie bescherming moeten krijgen en omdat aan deze buis wordt gelijmd had ook de hechting van de beschermende laag bewezen moeten worden. Dit gegeven gevoegd bij het feit dat koolstofstaal een uitzettingscoëfficiënt heeft van 12E-6 maakte dit staal niet favoriet. Het gekozen RVS staal heeft een coëfficiënt van 17E-6 en ligt veel dichter tegen dat van het GVK. Om de stijlen zo dun mogelijk te maken moest ook de GVK bekleding zo dicht mogelijk tegen de stalen buis aanliggen, waarmee de lijmlaag gedwongen was minimaal van dikte te zijn. Om deze



reden werd besloten de uitzetting van het GVK deel plaatselijk te beïnvloeden door het toepassen van extra uni-directionele glasvezels in de lengterichting van de buis. Glas heeft een coëfficiënt van 8E-6 en met een correcte bezetting van UD-glasvezels is het mogelijk de coëfficiënt van RVS voldoende te benaderen.

9. Tot slot

Door een zorgvuldige omschrijving van de producteisen en kennis van verschillende productiemethoden is het mogelijk een goede afweging en keuze te maken. Het blijft echter noodzakelijk om op deel niveau te testen voordat de productie start. Het is met name belangrijk om inzicht te verkrijgen in het bezwijkgedrag van de onderzochte verbindingen.

Met de opdracht van het casco voor Rotterdam is de verbindingmethode tussen de modulen onderling onderzocht. Ook de applicatie methode door middel van injecteren werd bewezen. De lijm mocht tijdens het uitharden absoluut geen volumekrimp vertonen, anders zal ze niet hechten aan het te verlijmen oppervlak of kan de lijm zelf gaan scheuren. Diverse proefstukken met een tweecomponenten PUR-lijm en MS-polymer zijn onder verschillende condities blootgesteld en getest. In de productie hebben de personen die de verlijming uitvoeren een proeve van bekwaamheid moeten afleggen.

Bij de testen op volle schaal komt pas ten volle naar vor-



ren dat elke stap in het ontwikkelings- en productieproces zijn nut heeft. Zoals in de inleiding is aangegeven heeft het casco de nodige testronden

afgelegd en tot op heden verlopen de testen zonder problemen.

Stork Fokker, Edisonstraat 1, 7903 AN Hoogeveen.

Telefoon 0528 – 285 323

Fax 0528 – 285 007

luit.zwaneveld@stork.com

www.storkwise/dut/fokkerspecialproducts.nsf

A-stijl. →

Injectie lijm. →