

De toepassingsmogelijkheden van sandwichmaterialen in productiemiddelen

Citation for published version (APA):

Houben, F. J. T. (1992). *De toepassingsmogelijkheden van sandwichmaterialen in productiemiddelen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA1314). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

**DE TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN
VAN SANDWICHMATERIALEN IN
PRODUCTIEMIDDELEN.**

literatuuronderzoek (WPA-nr.: 1314)

Someren, maart 1992.

**F.J.T. Houben (253433)
Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit der Werktuigbouwkunde
Vakgroep WPA
Specifieke Productiemiddelen**

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	2
1. INLEIDING	3
2. SANDWICHMATERIALEN	4
3. DE DEMPENDE EIGENSCHAPPEN VAN SANDWICHMATERIALEN	7
3.1 SANDWICHCONSTRUCTIES ALS GELUIDDEMPER	7
3.2 SANDWICHCONSTRUCTIES ALS TRILLINGSISOLATOREN	10
3.2.1 Trillingsisolatie in het laag-frequente trillings- gebied	10
3.2.2 Trillingsisolatie in het hoog-frequente trillings- gebied	12
4. SANDWICHMATERIALEN IN MECHANISMEN	14
5. SANDWICHMATERIALEN IN ROBOTS	17
6. CONCLUSIE	20
LITERATUUROVERZICHT	21

De Toepassingsmogelijkheden van Sandwichmaterialen in Productiemiddelen.

SAMENVATTING

'De nieuwe generatie productiemiddelen' stelt steeds hogere eisen t.a.v. de te realiseren snelheden, resolutie en herhaalnauwkeurigheid. De grenzen aan de mogelijkheden van de conventionele materialen als staal en aluminium, lijken inmiddels bereikt te zijn; Veel ontwerpeisen zijn niet realiseerbaar vanwege de beperkingen opgelegd door de toegepaste materialen.

Doel van deze literatuurstudie is het analyseren van de mogelijkheden die sandwichmaterialen bieden om in bepaalde situaties de rol van de conventionele materiaalsoorten in productiemiddelen over te nemen.

De goede dempende eigenschappen van sandwichmaterialen maken deze materiaalsoort uitermate geschikt om als hoofdbestanddeel te dienen in trillingsisolatoren die gebruikt worden om machinecomponenten en complete machines te isoleren van de omgeving. Daarnaast vertonen gelaagde componenten (zoals gereedschapsschachten) een veel betere demping van trillingen dan dezelfde componenten uitgevoerd in conventionele materiaalsoorten.

Een grote toekomst voor sandwichmaterialen ligt vooral daar waar de beperkte dynamische eigenschappen van conventionele materiaalsoorten als staal en aluminium, het voldoen aan bepaalde ontwerpeisen onmogelijk maken. Zo vertonen de veel lichtere schakels van machinemechanismen en robots uitgevoerd in gelaagde composieten een veel beter dynamisch gedrag dan dezelfde schakels uitgevoerd in staal of aluminium, voornamelijk t.g.v. de superieure dempingseigenschappen en een hoge specifieke stijfheid. Bij toepassing van deze materialen kan de baannauwkeurigheid van een robotarm tijdens de beweging verhoogd worden, terwijl de 'settling-time' sterk verkort wordt.

Over de mogelijkheden van sandwichmaterialen in statisch belaste constructies kan op het moment nog weinig gezegd worden vanwege slechts beperkt voorhanden zijnde onderzoeksresultaten.

1. INLEIDING

Sinds de introductie van sandwichmaterialen in het 'Mosquito'-vliegtuig worden sandwichconstructies alweer bijna 40 jaar succesvol toegepast in de luchtvaartindustrie. De oorsprong van deze materialen ligt nog veel verder terug in het verleden: Leonardo da Vinci vermeldde al de mogelijkheden die sandwichconstructies te bieden hebben in een van zijn werken [1].

De laatste jaren groeit ook vanuit andere takken van de industrie de belangstelling voor sandwichmaterialen, vooral vanwege de vele voordelen die deze materialen bieden:

- een hoge stijfheid-massa verhouding
- een hoge demping-massa verhouding
- een hoge corossieweerstand
- een grote ontwerpvrijheid
- een hoge duurzaamheid
- een hoge vermoeiingssterkte
- een gemakkelijke bewerkbaarheid

Zo worden sandwichmaterialen tegenwoordig toegepast in scheepswanden, treincoupés, sneeuwski's, deuren, wanden, autocarrosserieën, koelcellen, etc.

Doelstelling van deze literatuurstudie is het analyseren van de mogelijkheden die sandwichmaterialen bieden om toegepast te kunnen worden in productiemiddelen als robots en productiemachines.

De eisen die 'de nieuwe generatie productiemiddelen' stellen zijn regelmatig niet te realiseren vanwege de beperkingen opgelegd door het dempend vermogen van trillingsisolatoren en/of door de conventionele materialen. De goede dempingseigenschappen van sandwichmaterialen beloven een goed trillingsisolerend gedrag en rechtvaardigen de veronderstelling dat trillingsisolatoren mogelijkerwijze uitgevoerd kunnen worden in sandwichmaterialen. In paragraaf 3 volgt een analyse van de mogelijke toepassingen van sandwichmaterialen als geluiddemper (§3.1) en als trillingsisolator (§3.2).

Zoals uit de opgesomde voordelen blijkt, levert de toepassing van sandwichmaterialen lichte constructies met een hoge stijfheid op. Componenten vervaardigd uit conventionele materialen hebben vaak een relatief groot massatraagheidsmoment t.g.v. de grote massa die vereist is om een zekere stijfheid te verkrijgen. Deze grote massatraagheidsmomenten stellen beperkingen aan de te realiseren versnellingen en vertragingen van de componenten. Op het eerste gezicht zijn sandwichmaterialen dan ook uitermate geschikt om conventionele materialen te vervangen in machinemechanismen en robotschakels die onderhevig zijn aan hoge versnellingen en vertragingen. Analyses van de mogelijkheden die sandwichmaterialen hebben om machinemechanismen en robotschakels te vervangen volgen respectievelijk in paragraaf 4 en 5.

We beginnen in paragraaf 2 echter met een inleidende algemene beschouwing over sandwichmaterialen.

2. SANDWICHMATERIALEN

Sandwichmaterialen kunnen grofweg onderverdeeld worden in 2 hoofdgroepen:

- de conventionele sandwichmaterialen; Een honingraat of schuimen drager met aan weerszijden een deklaag.
- de gelaagde composieten; Een stapeling van verschillende composietlagen.

Vooraf deze laatste groep sandwichmaterialen zal in de toekomst een grote rol gaan spelen in de diverse technische disciplines, voornamelijk vanwege de mogelijkheid om de eigenschappen van de afzonderlijke composieten te combineren in één constructiemateriaal.

Het principe van een conventionele sandwichbalk is vergelijkbaar met dat van een I-balk ([2], [3], [4]): De deklagen vormen de flenzen en nemen de buigbelastingen op (één laag staat onder druk, de andere onder trekspanning), terwijl de honingraat drager de functies van de rib overneemt: het opnemen van schuifspanningen - veroorzaakt door externe belastingen - en het voorkomen van buiging van de deklagen ten opzichte van elkaar (Fig.1). De analogie gaat niet in zijn geheel op: De drager is van een andere materiaalsoort dan de deklagen, terwijl de drager zich over de gehele breedte van de sandwichconstructie uitstrekt, dit in tegenstelling tot de rib van een I-balk.

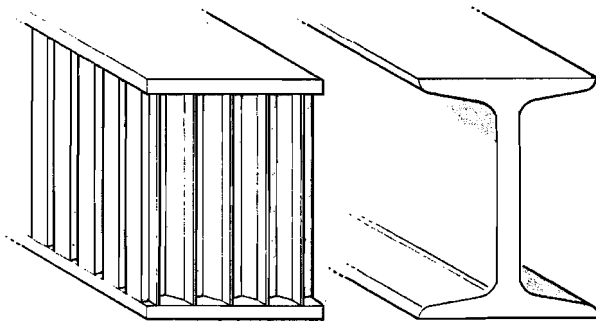


Fig.1 De analogie tussen een sandwichbalk en een I-balk [3].

Bij het optreden van geconcentreerde belastingen is het raadzaam de plaat lokaal te verstevigen. Zo kunnen in een enkele sandwichplaat dragers met verschillende dichtheden toegepast worden. De drager kan ook lokaal gevuld worden met schuim of lokaal vervangen worden door een rib. Een overzicht van de mogelijkheden biedt Fig.2.

Fig.3 toont mogelijkheden om een sandwichpaneel aan de rand te versterken: De deklagen worden versterkt door het aanbrengen van een extra laag in gebieden waar hoge spanningen optreden (o.a. toegepast in de bladen van

De Toepassingsmogelijkheden van Sandwichmaterialen in Productiemiddelen.

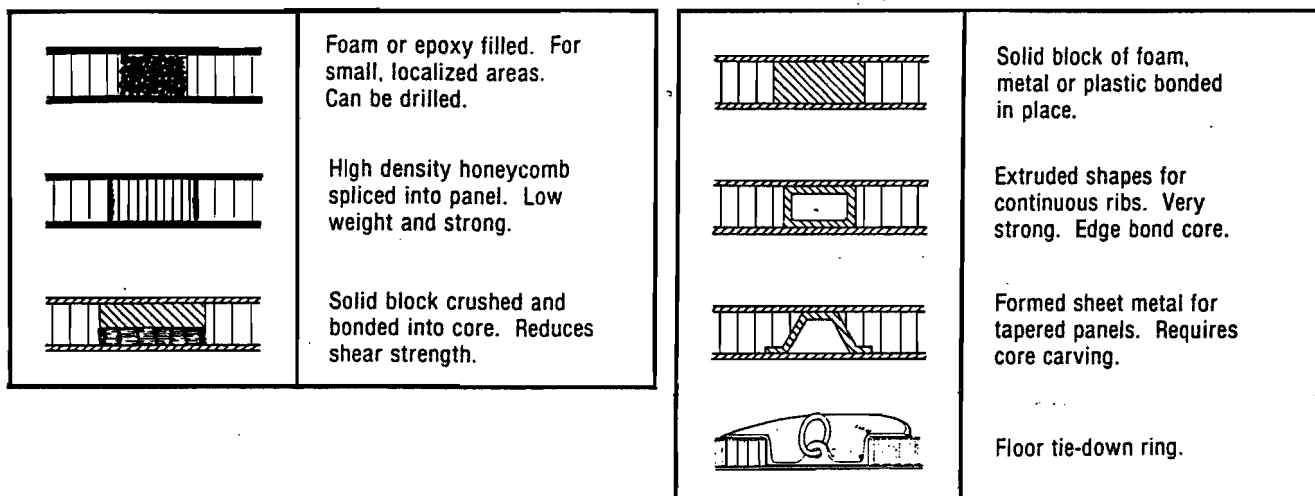


Fig.2 Locale paneelverstevingen bij geconcentreerde belastingen [2].

helicopter-propellers). Het aanbrengen van dergelijke plaalementen kan in de vervaardiging geïntegreerd worden of in een later stadium plaatsvinden, terwijl ze zowel in- als uitwendig aangebracht kunnen worden.

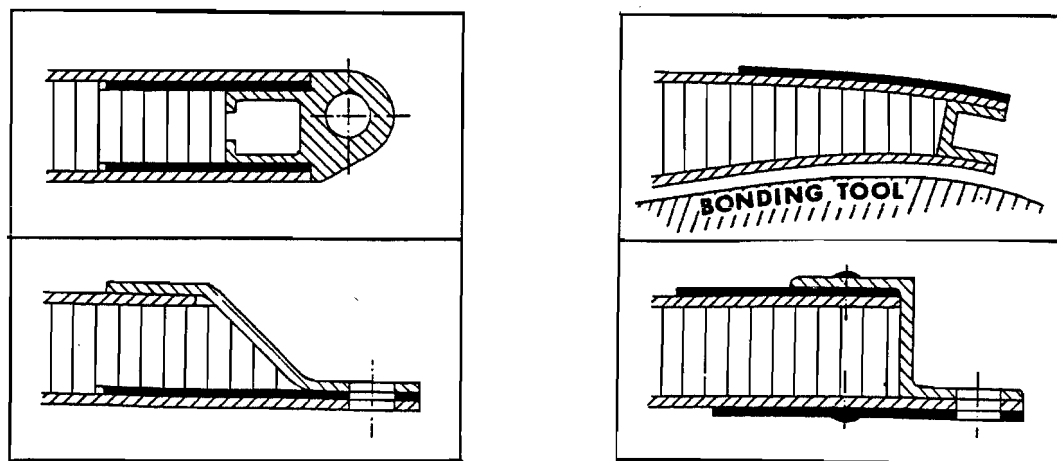


Fig.3 Randverstevingen bij sandwichpanelen [2].

De Toepassingsmogelijkheden van Sandwichmaterialen in Productiemiddelen.

Onderdeel van het ontwerp van een sandwichconstructie is de afwerking van de randen. Deze omrandingen kunnen een grote variëteit aan functies hebben, te weten:

- een bijdrage leveren aan de totale structuur (bijv. randversteving).
- eenvoudige verbindingen met andere panelen mogelijk maken.
- snelle demontage mogelijk maken.
- de paneelranden beschermen tegen beschadigingen.
- een decoratieve functie.

Bij de selectie van de afwerkingsvorm moet rekening gehouden worden met de vervaardigingsmethode van de sandwichplaat: Kan de afwerking geïntegreerd worden in de vervaardiging of moet de afwerking in een later stadium uitgevoerd worden. Zo is de integratie van de afwerking in de vervaardiging van vlakke sandwichplaten (verwarmde plaatpersen) doorgaans een probleem terwijl bij de vervaardiging van golvende sandwichplaten (vacuümzuiger) het aanbrengen van een omranding eenvoudig tegelijkertijd kan plaatsvinden [3].

Voor de theorie betreffende de berekeningen van sandwichbalken en -panelen wordt verwezen naar de literatuur ([2],[3]).

Bij de samenstelling van zowel conventionele als composieten sandwichmaterialen heeft men de beschikking over een grote variëteit aan mogelijke materiaalcombinaties. De toepasbaarheid van een combinatie in een bepaalde situatie is afhankelijk van de specifieke eigenschappen van de bewuste combinatie.

3. DE DEMPENDE EIGENSCHAPPEN VAN SANDWICHMATERIALEN

3.1 SANDWICHCONSTRUCTIES ALS GELUIDDEMPER

Sandwichmaterialen zijn uitermate geschikt om mechanische trillingen - die als geluidsbron optreden - te absorberen [5]. Op een grondplaat wordt een visco-elastische laag aangebracht bedekt door een afdeklaag (zie Fig.4). De visco-elastische laag is veel dunner dan de grondplaat, terwijl de dikte van de deklaag in de praktijk varieert tussen die van de visco-elastische laag en die van de grondplaat.

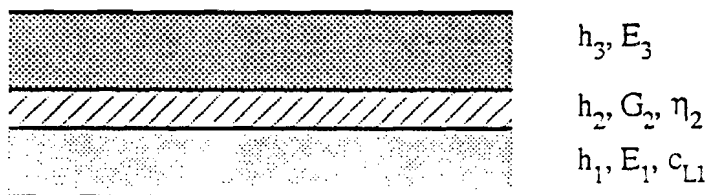


Fig.4 Geometrie- en materiaalparameters van een sandwichplaat [5].

De dempende werking berust op omzetting in de tussenlaag van de afschuivingsenergie in warmte. Wanneer namelijk de grondplaat van de sandwichconstructie in trilling wordt gebracht, vindt er in de visco-elastische tussenlaag afschuiving plaats. De trillingsenergie wordt hierbij omgezet in warmte, waardoor de trilling de deklaag niet of slechts verzwakt bereikt.

Bij een enkelvoudige plaat (drager bedekt door een visco-elastische laag zonder afdeklaag) wordt de dempende laag enkel belast op trek en druk. Aangezien bij trek en druk veel minder trillingsenergie in warmte omgezet wordt dan bij afschuiving zijn de dempende eigenschappen van enkelvoudige platen slechter dan die van sandwichplaten. Om met een enkelvoudige plaat toch een acceptabele demping te realiseren moet de dempende laag extra dik uitgevoerd worden. Dit impliceert echter een gewichtstoename van de totale constructie.

Om een indicatie te kunnen geven van het dempende vermogen van een sandwichplaat is als maat voor de demping de verliesfactor τ ingevoerd:

$$\tau = (\text{gedissipeerde energie}) / (\text{mechanische energie})$$

Deze verliesfactor is zowel frequentie- als temperatuurafhankelijk.

- de frequentie-afhankelijkheid

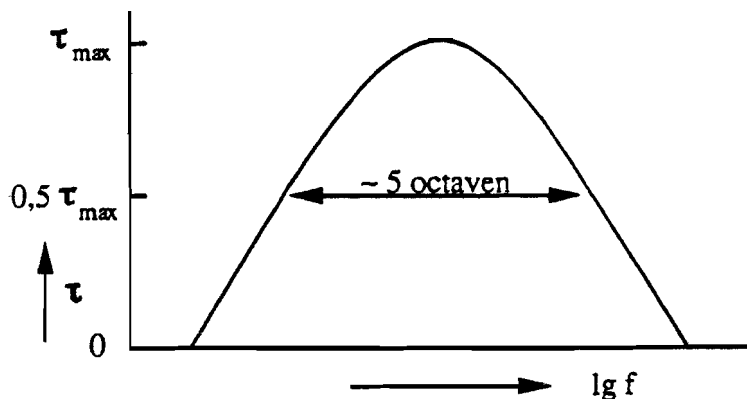


Fig.5 De verliesfactor τ als functie van de frequentie [5]

De verliesfactor τ is maximaal bij f_{max} . De ligging van f_{max} is te beïnvloeden door de keuze van het visco-elastische materiaal. De vorm van de frequentie-afhankelijke curve ligt daarentegen vast. Dit frequentieafhankelijke gedrag is principieel anders dan bij een enkelvoudige laag.

- de temperatuur-afhankelijkheid

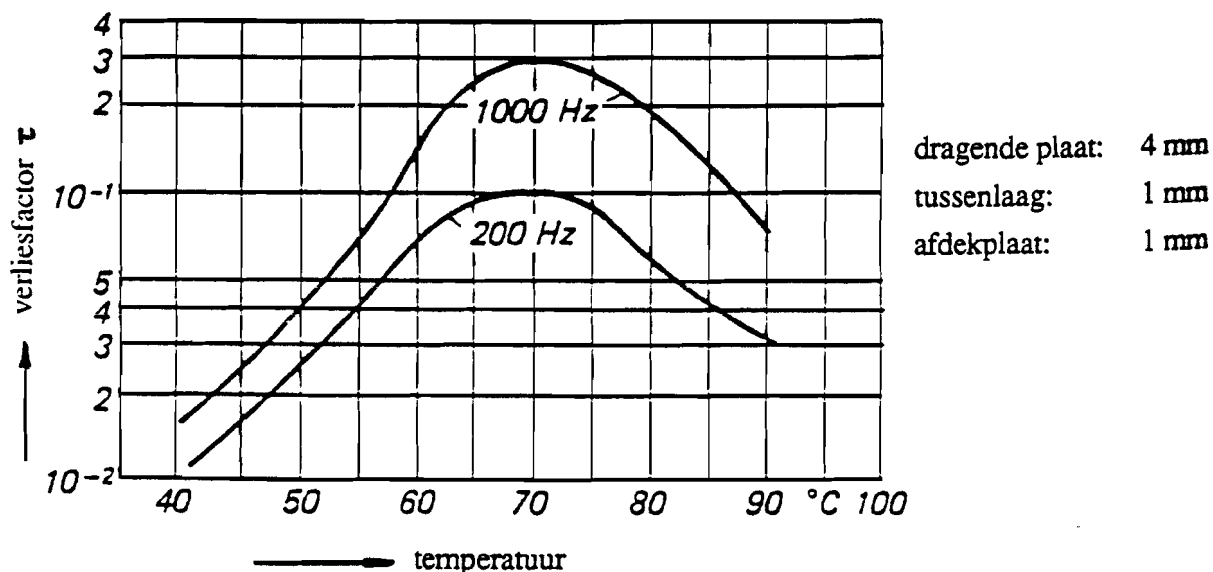


Fig.6 De verliesfactor τ als functie van de temperatuur [5].

De Toepassingsmogelijkheden van Sandwichmaterialen in Productiemiddelen

De temperatuurafhankelijkheid van de verliesfactor τ is een logisch gevolg van de toepassing van een visco-elastische tussenlaag.

Bij de keuze tussen enkelvoudige lagen en sandwichlagen kunnen een aantal overwegingen een rol spelen:

- enkelvoudige lagen:

- (+) Eenvoudig aan te brengen op oneffen oppervlakken en in holle ruimten (m.b.v. spray-technieken) en op bestaande constructies.
- (-) Om een hoge demping te realiseren is de relatieve gewichtstoename veel groter dan bij toepassing van sandwichlagen.
- (-) Door de sterkere toename van de buigstijfheid dan van de massa zakt de grensfrequentie. Daardoor neemt de geluidstralingsefficiëntie toe.

- sandwichlagen:

- (+) Hoge demping vraagt minder relatieve gewichtstoename dan in het geval van enkelvoudige lagen.
- (-) Het aanbrengen van sandwichlagen is vaak duurder en vraagt behoorlijk effen oppervlakken.

Een voorbeeld van sandwichmaterialen die op grote schaal toegepast worden als geluiddemper zijn de zogenaamde CLS (Constrained Layer Sandwich) metalen, samengesteld uit 2 metalen lagen met een visco-elastische polymeer als tussenlaag [6]. Bij het trillen van een van de deklagen vindt elastische deformatie plaats in de visco-elastische tussenlaag. Hierbij wordt de trillingsenergie omgezet in warmte zodat de trillingen gedempt zijn voordat ze de andere deklaag hebben kunnen bereiken. De temperatuurstijging t.g.v. de vrijgekomen warmte is verwaarloosbaar.

Deze sandwichpanelen zijn ongeveer 2 maal zo duur dan vergelijkbare metalen platen. Wanneer je echter de besparingen beschouwt als gevolg van het overbodig worden van allerlei geluiddempende maatregelen, blijken sandwichmaterialen economisch zeer efficiënt te zijn.

Lassen van de CLS platen behoort tot de mogelijkheden, mits het voorzichtig gebeurt, aangezien overvloedige warmte-toevoer de visco-elastische tussenlaag onherstelbaar kan beschadigen.

Tot nu toe worden CLS platen voornamelijk toegepast in de automobielin industrie. Vooral met het oog op de steeds strenger wordende wetgeving t.a.v. de maximaal toelaatbare geluidsemisatie, zijn de mogelijkheden voor gebruik van deze materialen in productiemachines zeer groot.

Hierbij kan gedacht worden aan:

- trilvoeders/aanvoergoten
- omkastingen; Mechanische trillingen veroorzaakt door de aandrijving (electromotor, compressor) en de overbrengingen (tandwiel-, riemoverbrengingen) kunnen gedempt worden zodat de geluidsemisatie van de omkasting naar de omgeving minimaal is. Dit levert tegelijkertijd een aanzienlijke gewichtsbesparing van de totale machine op.
- corrosiebestendige componenten; roestvrij stalen machineonderdelen kunnen vervaardigd worden van CLS materialen. Niet alleen worden trillingen gereduceerd; Eveneens nemen de materiaalkosten af aangezien de blootgestelde laag uitgevoerd wordt in het relatief dure roestvrij staal, terwijl de andere deklaag uit een relatief goedkope staalsoort kan bestaan.

3.2 SANDWICHCONSTRUCTIES ALS TRILLINGSISOLATOREN

In de machinebouw worden machineonderdelen maar ook complete machines geïsoleerd van de omgeving opgesteld. Zodoende wordt voorkomen dat trillingen uit de omgeving het machinegedrag negatief beïnvloeden, maar ook dat trillingen veroorzaakt door de machine(-component) zelf overgedragen worden aan de omgeving. Zo hebben isolerende tafels als doel het elimineren van relatieve bewegingen tussen de verschillende machinecomponenten op die tafel.

Ten aanzien van de trillingen en dus ook t.a.v. de te nemen isolerende maatregelen maken we een onderscheid tussen een laag-frequent trillingsgebied en een hoog-frequent trillingsgebied.

3.2.1 Trillingsisolatie in het laag-frequente trillingsgebied

In de meeste gevallen liggen de te isoleren trillingen in het laag-frequente trillingsgebied. De conventionele methode om dergelijke trillingen te isoleren is d.m.v. massieve granieten blokken. De nauwkeurigheidseisen die de machines van deze tijd echter stellen zijn dusdanig hoog dat het dempend vermogen van graniet in de meeste gevallen ontoereikend is. Daarnaast vormen de kolossale omvang en de enorme massa van de blokken een aanzienlijke belemmering bij het ontwerp t.a.v. de ondersteuning van de blokken en de afmetingen van de totale machine.

Een oplossing voor dit probleem is de toepassing van sandwichmaterialen bestaande uit een stalen honingraat kern tussen 2 stalen deklagen [7]. Dit soort demper is niet alleen stijver en stabielier dan de granieten blokken; Eveneens is inwendige demping en toepassing van pneumatische ondersteuning - om het totale dynamische gedrag te verbeteren - mogelijk. In tegenstelling tot graniet beschikken sandwichmaterialen wel over de eigenschappen om die stabiliteit te bieden die moderne machines vereisen om met gewenste nauwkeurigheid, resolutie en herhaalnauwkeurigheid te kunnen functioneren. Daarnaast zijn de sandwichtafels compacter en lichter dan de granieten blokken waardoor de 'handling' van de constructies vergemakkelijkt wordt. Ook de montage van machinecomponenten op de tafel is een stuk eenvoudiger.

De belangrijkste materiaaleigenschap m.b.t. het dempend vermogen is de stijfheid aangezien relatieve bewegingen tussen de verschillende machinecomponenten voorkomen dienen te worden. Het dempend vermogen van graniet is gebaseerd op de grote massa en dus het grote massastraagheidsmoment. Deze massa vormt echter tegelijkertijd het grootste bezwaar: Het verplaatsen en het ondersteunen van de kolossale zware constructie zijn voorname ontwerp-restricties. Een sandwichdemper van gelijke omvang weegt een factor 4 minder, terwijl de dynamische eigenschappen die van de granieten demper ruimschoots overtreffen.

Het is moeilijk voor te stellen dat in een granieten blok met een massa van enkele duizenden kg trillingen opgewekt kunnen worden. Toch is dit het geval: Massa die niet bijdraagt aan de dynamisch stijfheid verlaagt namelijk de eigenfrequenties van het systeem. Bij excitatie in het lage

De Toepassingsmogelijkheden van Sandwichmaterialen in Productiemiddelen.

frequentiegebied vertonen granieten blokken dan ook verschillende eigen-trillingen en dus relatief grote verplaatsingen.

In het geval van de sandwichdemper heeft de honingraat kern een hoge sterkte-massa verhouding en levert dan ook een stijvere en stabielere tafel op. Ten gevolge van de relatief lage massa van het sandwichmateriaal treden de eigenfrequenties alleen in het hoge frequentiegebied op, waardoor de trillingen en dus de verplaatsingen in het lage frequentiegebied beperkt blijven. Daarnaast vindt trillingsisolatie plaats t.g.v. de inwendige demping waarbij de trillingsenergie gedissipeerd wordt doordat de mechanische trillingen omgezet worden in warmte.

Naast de dynamische eigenschappen speelt ook de statische stijfheid - oftewel de weerstand van de tafel tegen doorbuiging onder een statische belasting - een belangrijke rol. Op korte termijn is de statische stijfheid van graniet toereikend voor de meeste toepassingen. Het risico bestaat echter dat de granieten tafel onder het eigen gewicht gaat doorbuigen, waardoor op lange termijn stabiliteitsproblemen kunnen optreden (zoals een onjuiste positie van de afzonderlijke machinecomponenten t.o.v. elkaar). De veel lichtere honingraat tafels hebben daarentegen een hoge statische stijfheid en de waargenomen doorbuiging is in sommige gevallen minder dan 1% van de doorbuiging van een vergelijkbare granieten tafel.

Ook van invloed op de nauwkeurigheid van het systeem zijn de thermische vervormingen. Ten gevolge van temperatuurgradiënten is de tafel voortdurend onderhevig aan uitzetting en inkrimping, waardoor de vlakheid van de tafel en dus ook de ruimtelijke oriëntatie van de systeemcomponenten t.o.v. elkaar niet langer gewaarborgd zijn. De thermische stabiliteit van een sandwichmateriaal blijkt beter te zijn dan die van graniet. Hoewel graniet slechts langzaam reageert op veranderingen in temperatuur, zijn de uiteindelijke vervormingen veel groter dan die van sandwichmaterialen. Ook de tijd benodigd voor het stabiliseren van thermische effecten is bij graniet veel langer.

Voor toepassingen met zeer hoge eisen t.a.v. de nauwkeurigheid is de ondersteuning van de totale geïsoleerde constructie net zo belangrijk als de eigenschappen van de isolerende tafel zelf. Het gaat immers niet alleen om een geringe gevoeligheid van de tafel voor trillingen van de afzonderlijke machinecomponenten; Zeker zo belangrijk is een goede isolatie van de machine(-componenten) tegen trillingen uit de omgeving, die voornamelijk via de vloer binnenkomen. De lichte sandwichtafels kunnen eenvoudig ondersteund worden door kleine pneumatische isolatoren. Granieten tafels vereisen daarentegen veel zwaarder uitgevoerde isolatoren. De ondersteuning onderdrukken niet alleen de trillingen uit de vloer; Ook worden de eigentrillingen van de totale constructie gedempt.

In vergelijking met graniet hebben sandwichmaterialen ook nog een aantal ontwerprijkheden: Honingraat tafels kunnen eenvoudig in vrijwel elke vorm gezaagd worden. Voor boren en tappen is geen speciaal gereedschap vereist, terwijl honingraat panelen tot vrijwel elke gewenste configuratie samengesteld kunnen worden (bijv. tafels voorzien van verticale schotten). De tafel kan hierdoor geïntegreerd worden in het totale ontwerp van de machine, terwijl bij graniet alle machinecomponenten op één vlakke tafel

De Toepassingsmogelijkheden van Sandwichmaterialen in Productiemiddelen.

gemonteerd moeten worden. Deze integratie leidt in de praktijk doorgaans tot lichtere en compactere machines.

Samenvattend kunnen we stellen dat het gebruik van sandwichmaterialen in trillingsisolatoren leidt tot prestatieverbetering bij afnemende totale kosten, afmetingen en gewicht en toenemende ontwerpvrijheden. Dergelijke sandwichdempers zijn bij uitstek geschikt om toegepast te worden in optische meetsystemen, bedieningspanelen, halfgeleiderproductiemachines, gereedschapswerktuigen en in andere precisiemachines, waarbij hoge eisen gesteld worden aan de nauwkeurigheid.

3.2.2 Trillingsisolatie in het hoog-frequente trillingsgebied

In sommige gevallen bestaat de behoefte om gevoelige componenten te beschermen tegen trillingen met frequenties hoger dan 100 Hz. De standaard-technieken schieten in deze situaties te kort t.g.v. het optreden van golfeffecten. Om toch de gevoelige componenten te kunnen beschermen tegen hoog-frequente trillingen, wordt de toepassing van mechanische sandwichfilters geadviseerd [8]. Een dergelijk filter bestaat in feite uit een periodieke opeenstapeling van 2 verschillende lagen composiet met onderling grote verschillen in dichtheid en stijfheid (zie Fig.7).

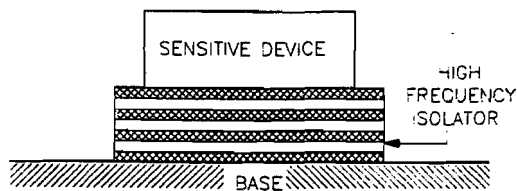


Fig.7 Schematische voorstelling van een hoog-frequente trillingsisolator uitgevoerd in gelaagde composieten [8].

De werking berust op golf-reflectie en de filter is het meest effectief wanneer er een groot verschil is tussen de impedanties van de verschillende composieten. In bepaalde frequentiegebieden worden de trillingsgolven snel verzwakt; Daarbuiten worden ze onverzwakt doorgegeven. Dit soort filters functioneert dan ook alleen binnen bepaalde frequentiegrenzen.

Fig.8 geeft een indicatie van het dempend gedrag van een dergelijk filter; In het hierboven beschreven frequentiegebied vindt een trillingsreductie plaats van maximaal 60 dB.

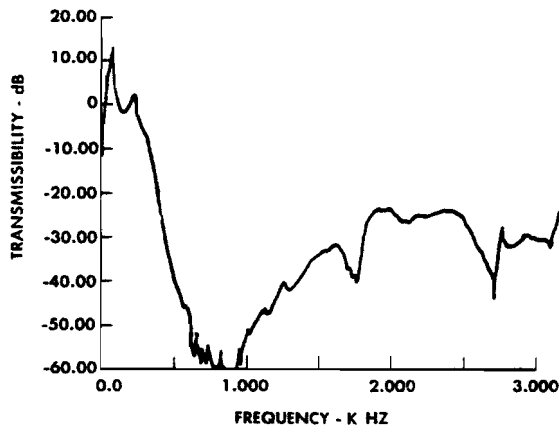


Fig.8 Trillingsisolatie als functie van de frequentie voor een willekeurig filter opgebouwd uit gelaagde composieten [8].

Het ontwerp van een dergelijk filter is vrij eenvoudig. Uitgaande van een bepaalde band waarin de frequenties liggen die gedempt dienen te worden, kunnen materiaalcombinaties geselecteerd worden met dusdanige eigenschappen en laagdiktes dat voldaan wordt aan één enkele eenvoudige relatie ([8], vergl.(17)). Met behulp van een tweede relatie ([8], vergl.(29)) kan - uitgaande van een gewenste verliesfactor τ - eenvoudig het aantal benodigde cellen (combinatie van de 2 materiaallagen) bepaald worden. Experimenten hebben aangetoond dat de theoretisch aangenomen verliesfactoren nauwkeurig overeenkomen met de in de praktijk gemeten waarden. Dit rechtvaardigt de vereenvoudiging die in de theorie gemaakt wordt, dat de mechanische filter opgebouwd is uit een periodieke opeenstapeling van 2 verschillende materiaallagen met oneindige afmetingen.

Concluderend kan gesteld worden dat gelaagde composieten bij uitstek geschikt zijn om als mechanisch filter te dienen in die situaties waarbij hoog-frequente trillingen optreden. Het ontwerpen van een mechanisch filter voor een bepaalde frequentieband wordt nu een relatief eenvoudig afweegproces, waarbij de laagdiktes, de celaantallen en de materiaalcombinaties dusdanig gekozen moeten worden, dat de te filteren frequentie midden in het gefilterde frequentie-gebied ligt.

In [9] wordt een gelaagde composiet behandeld die vanwege de superieure dempingseigenschappen regelmatig wordt toegepast in machinecomponenten: CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics). Zo blijkt dat bij het draaiproces het klapperen van de beitel beperkt kan worden door de beitelschacht uit te voeren in gelaagde CFRP.

4. SANDWICHMATERIALEN IN MECHANISMEN

De laatste jaren bestaat er een tendens naar steeds snellere en zeer nauwkeurige productiemachines onderdeel uitmakend van computergeïntegreerde productiesystemen [10]. Men streeft naar hogere productiesnelheden, lager energieverbruik, toename van de belastbaarheid, lagere akoestisch emissie en zeer nauwkeurige bewegingen. Duidelijk is dat deze vooruitstrevende gedachten niet gerealiseerd kunnen worden met de huidige constructiematerialen; De grenzen van de conventionele materiaalsoorten zijn bereikt. Volgens [10] wordt de responsie van machinecomponenten bepaald door de dempingseigenschappen en de specifieke stijfheid (stijfheid per eenheid van massa) van de bewuste onderdelen. Deze eigenschappen zijn afhankelijk van de gebruikte materialen. Bij materialen met hoge dempingscoëfficiënt en hoge specifieke stijfheid zijn de optredende vervormingen en spanningen minimaal; Trillingen - bijvoorbeeld t.g.v. grote versnellingen en vertragingen - zullen sneller verzwakt worden, waardoor de cyclustijd verkort kan worden. Uit de range aan beschikbare materialen blijken composieten over de gewenste materiaaleigenschappen te beschikken.

In [11] worden de resultaten gepresenteerd van een experimenteel vergelijk van de dynamisch eigenschappen van enerzijds mechanismen vervaardigd uit conventionele materialen en anderzijds mechanismen uitgevoerd in gelaagde composieten. De experimenten zijn uitgevoerd op vier-stangenmechanismen en krukdrijfstangmechanismen: mechanismen die frequent toegepast worden in productiemachines (Denk hierbij aan overzetten, grijpen, klemmen en andere repeterende bewegingen).

Zoals reeds beschreven is, hangt de dynamische responsie van een schakel o.a. af van de buigstijfheid van de dwarsdoorsnede van de schakel. Deze buigstijfheid is het product van de elasticiteitsmodulus E en het traagheidsmoment van de doorsnede I . Om nu een beeld te vormen van de invloed van de materiaalsoort op het dynamisch gedrag van een schakel hebben de verschillende schakels in de experimenten dezelfde lengte en dezelfde buigstijfheid EI . Hierdoor blijft de materiaalsoort over als enige variabele.

De geteste constructie-materialen zijn:

- staal
- aluminium
- 16-laags grafiet-epoxy AS-4/3501-6 [0] ¹
- 16-laags grafiet-epoxy AS-4/3501-6 [± 45] ²

Uitgaande van de elasticiteitsmoduli van de verschillende materialen zijn de dwarsdoorsneden van de schakels berekend, zodanig dat het product EI voor elke situatie dezelfde waarde heeft. Tabel 1 geeft een overzicht van de hieruit resulterende waarden voor de doorsnede-geometrie, de elasticiteitsmodulus, de specifieke stijfheid en de dempingscoëfficiënt.

¹ alle lagen dezelfde oriëntatie: onder 0° met de longitudinale as van de schakel.

² De lagen symmetrisch georiënteerd, afwisselend onder $+45^\circ$ en -45° met de longitudinale as van de schakel.

De Toepassingsmogelijkheden van Sandwichmaterialen in Productiemiddelen

	breedte [mm]	hoogte [mm]	E-modulus [MPa]	spec.stijfheid [MPa/kg]	dempingscoëff. [-]
staal	29.0	1.168	207	1.959	0.002
aluminium	16.3	2.02	71.1	6.049	0.0048
[0]	9.1	1.93	147.1	18.924	0.0018
[±45]	34.7	2.34	21.7	4.132	0.006

Tabel 1 Geometrie- en materiaaleigenschappen van de verschillende schakels [11]

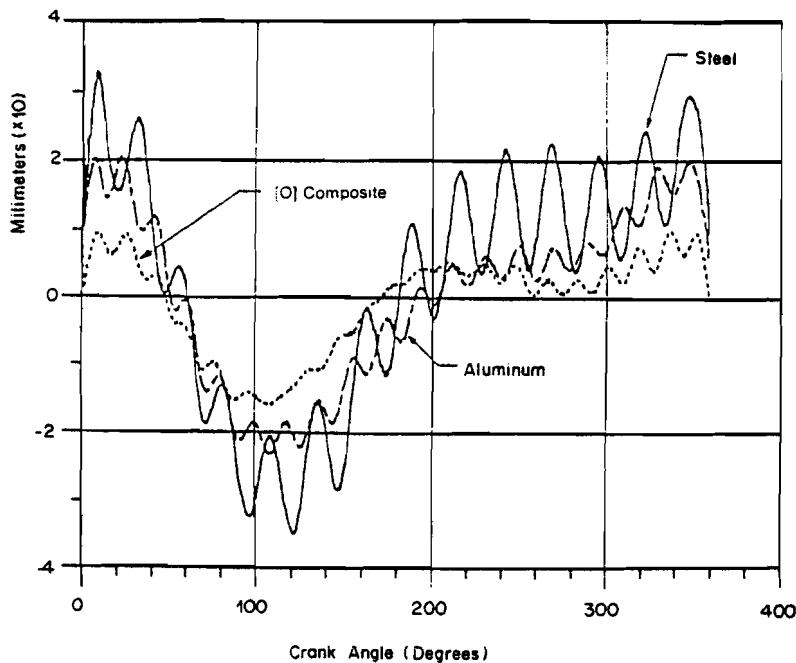


Fig.9 De doorbuiging van het midden van de koppelstang van het vier-stangenmechanisme als functie van de hoek van de aandrijvende schakel [11].

Uit Fig.9 blijkt dat de dynamische responsie van de composieten schakel uitgevoerd in de [0]-variant superieur is aan die van de stalen en aluminium schakels. Wanneer we de waarden uit Tabel 1 vergelijken met de resultaten in bovenstaande figuur kunnen we de volgende conclusie trekken: Hoe hoger de specifieke stijfheid, hoe kleiner de dynamische vervormingen.

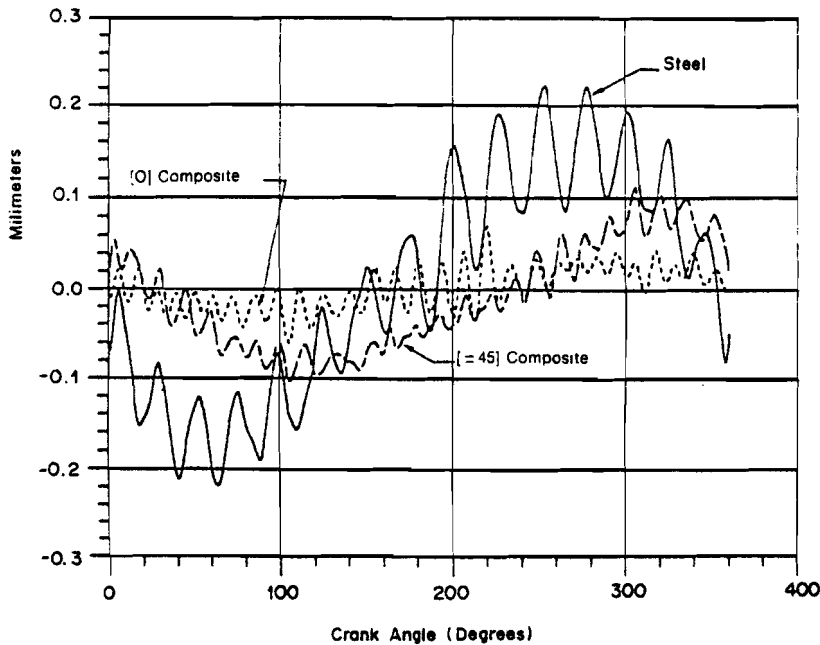


Fig.10 De doorbuiging van het midden van de aandrijfstang van een kruk -drijfmechanisme als functie van de hoek van de kruk [11].

Ook uit Fig.10 volgt de inverse relatie die bestaat tussen de specifieke stijfheid en de maximale vervormingen van de schakels.

Het gedrag van de composieten schakels kan nog verder verbeterd worden; Als we de eigenschappen van de beide gelaagde composieten met elkaar vergelijken (Tabel 1) zien we dat de specifieke stijfheid van de [0]-variant (18,924 MPa/kg) veel hoger is dan die van de [±45]-variant (4,132 MPa/kg). Ten aanzien van de dempingscoëfficiënt zijn de rollen echter omgedraaid (0,0018 resp. 0,006). Aangezien de meeste machinecomponenten materialen vereisen met zowel een hoge stijfheid als goede dempingeigenschappen, moet gebruik gemaakt worden van de mogelijkheid om beide variaties in één sandwichmateriaal te combineren. De ontwerper kan dus optimaal gebruik maken van de mogelijkheid om d.m.v. het manipuleren met de verschillende ontwerpvariabelen (laagdiktes, composieten, etc.) uiteindelijk een materiaal samen te stellen, waarvan de eigenschappen voldoen aan de gestelde eisen t.a.v. vermoeiingssterkte, stijfheid, sterkte, massa, demping, etc.

Conclusie van dit experimentele vergelijk is dat het dynamisch gedrag van mechanismen met schakels bestaande uit gelaagde composieten superieur is aan dat van mechanismen waarvan de schakels uitgevoerd zijn in de conventionele materialen staal en aluminium.

5. SANDWICHMATERIALEN IN ROBOTS

Over robots en flexibele manipulators kan in feite hetzelfde opgemerkt worden als over productiemachines: De eisen die heden ten dage aan robots gesteld worden zijn dusdanig hoog, dat conventionele materialen te kort schieten qua dynamisch gedrag ([10],[12],[13],[14]). In een poging om een acceptabele herhaal- en eindpuntnauwkeurigheid te realiseren wordt extra massa toegevoegd om de mechanische stijfheid van de componenten te vergroten en de trillingen te minimaliseren. De robotcomponenten worden daardoor onnodig zwaar en hebben een hoog massatraagheidsmoment. Het resultaat is een langzaam functionerende robot met relatief grote vervormingen t.g.v. het eigen gewicht. Daarnaast zijn sterke actuators noodzakelijk, terwijl enkel objecten niet zwaarder dan 5% van het robotgewicht gemanipuleerd kunnen worden.

Tegenwoordig bestaat er een grote internationale vraag naar 'high performance' robots die gekenmerkt worden door:

- hoge snelheden
- hoge eindpositienauwkeurigheid
- lage wrijving en dus lichte aandrijvingen
- lage gebruikskosten

Om toch aan de gestelde eisen tegemoet te kunnen komen vindt er op verschillende multi-disciplinaire terreinen onderzoek plaats. De accenten liggen hierbij voornamelijk op:

- het optimaliseren van het besturingssysteem
- het verbeteren van de elastodynamische eigenschappen van de gewrichten
- een optimaal ontwerp van de dwarsdoorsnede van de schakels
- het toepassen van nieuwe materialen

Bij de toepassing van nieuwe materialen moet gedacht worden aan robotarmen uitgevoerd in gelaagde composieten (Zie Fig.11). Zoals reeds vermeld is in de inleiding, vormt de ontwerprijheid één van de voordelen van sandwichmaterialen. Zo heeft de ontwerper bij de synthese van gelaagde composieten de beschikking over de volgende ontwerpvariabelen:

- de matrix-eigenschappen
- de vezel-eigenschappen
- de oriëntatie van de verschillende lagen
- de laagdiktes
- het aantal lagen
- de geometrische configuratie.

Door nu deze parameters optimaal op elkaar af te stemmen, kunnen materialen samengesteld worden, waarvan de (dynamische) eigenschappen superieur zijn aan die van de conventionele materialen. Gelaagde composieten kunnen dan ook gezien worden als een antwoord op de steeds hoger wordende eisen vanuit de industrie.

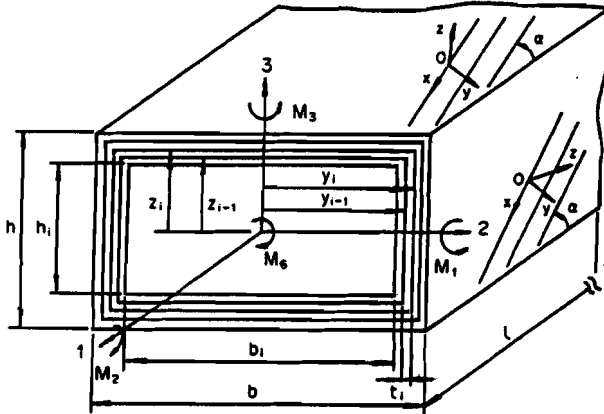


Fig.11 Dwarsdoorsnede van een robotarm uitgevoerd in gelaagde composieten [13].

Twee veel voorkomende eisen gesteld aan 'de nieuwe generatie robots' zijn:

1. Een minimale afwijking van de voorgeschreven baan van het TCP tijdens het doorlopen van die baan; Denk hierbij aan die specifieke situaties waarin het zeer nauwkeurig doorlopen van een vooraf geprogrammeerde baan de prioriteit heeft (lassen, ontbramen, slijpen, etc.).
2. Een korte 'settling-time' na stopzetten van de bewegingen; Het gaat hier vooral om bewerkingen waarbij tijdverlies zoveel mogelijk voorkomen dient te worden (puntlassen, snelle assemblage-handelingen, 'pick and place'-bewegingen, etc.).

Beide eisen zijn te vertalen in materiaaleigenschappen:

- ad 1. voldoende stijfheid
- ad 2. Voldoende demping

In [13] en in [14] zijn uitdrukkingen afgeleid voor de dempingscoëfficiënt Φ en de elasticiteitsmodulus E als functie van de diverse ontwerpvariabelen.

Het resultaat is nu een optimaliseringsprobleem dat afhankelijk is van de gestelde ontwerp-eis;

- ad 1. maximaliseren van $EI/\rho A$
- ad 2. maximaliseren van Φ

Deze optimaliseringsproblemen kunnen software-matig uitgevoerd worden; Uitgaande van initiële waarden voor de verschillende ontwerpvariabelen gaat men, door stap voor stap deze waarden aan te passen, streven naar een maximale waarde voor $EI/\rho A$ in geval 1 en voor Φ in geval 2, waardoor men uiteindelijk een optimaal robotontwerp (tenminste t.a.v. de gestelde eis) verkrijgt. Voor een praktijksituatie, waarbij uitgegaan is van ontwerp-eis 1, toont Fig.12 de verbeteringen van het dynamisch gedrag die bereikt worden tijdens dit iteratief proces.

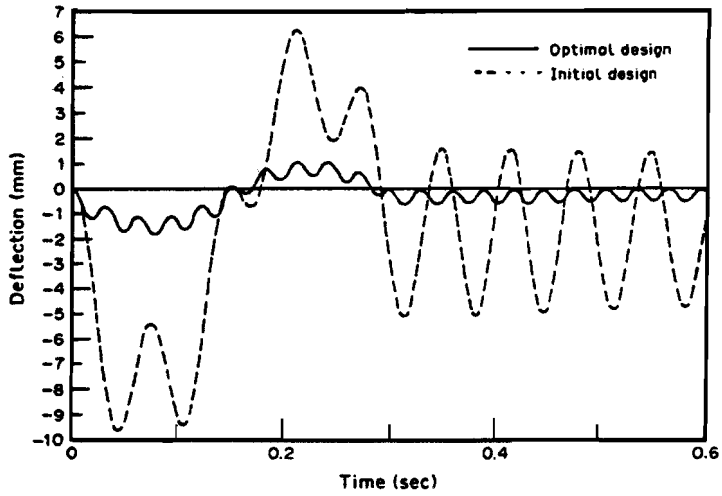


Fig.12 Afwijkingen van de geprogrammeerde baan tijdens doorlopen van die baan voor het begin-ontwerp en voor het uiteindelijke ontwerp [13].

6. CONCLUSIE

Sandwichmaterialen bieden vele mogelijkheden om toegepast te kunnen worden in productiemiddelen. Zo kunnen trillingsisolatoren uitgevoerd worden in gelaagde composieten of honingraat panelen vanwege de superieure dempings-eigenschappen. Daarnaast vertonen machinecomponenten vervaardigd uit gelaagde composieten veel minder trillingen dan dezelfde componenten uitgevoerd in de conventionele materiaalsoorten.

De kansen voor sandwichmaterialen liggen vooral daar waar de grenzen bereikt zijn van conventionele materialen als staal en aluminium (o.a. in machinemechanismen en robotarmen). In die situaties waar de dynamische eigenschappen van schakels uitgevoerd in laatstgenoemde materialen het voldoen aan de gestelde ontwerpeisen onmogelijk maken, is een grote toekomst weggelegd voor sandwichmaterialen, vanwege de goede dempingseigenschappen en een hoge specifieke stijfheid. Het superieure dynamische gedrag verkort de 'settling-time' van robotarmen, terwijl de baannauwkeurigheid tijdens het doorlopen van die baan toeneemt.

Over wat de mogelijkheden zijn van sandwichmaterialen in constructies belast door een statische kracht is weinig literatuur beschikbaar. Aannemelijk is in ieder geval wel dat het nadeel van stalen constructies - doorbuiging t.g.v. het eigen gewicht - niet geldt voor sandwichconstructies. Onderzoek op dit gebied is dan ook een vereiste, alvorens hierover uitspraken gedaan kunnen worden.

LITERATUURVERZICHT

- [1] Lingaiah, K., Suryanarayana, B.G., Strength and Stiffness of Sandwich Beams in Bending. In: Experimental Mechanics, v 31 n 1 (1991). p 1-7.
- [2] The Basics on Bonded Sandwich Construction, TSB 124. Hexcel, 1984.
- [3] Aeroweb Honeycomb Sandwich Design. Instruction Sheet No. AGC.33a (part 1), Ciba-Geigy Composites, 1979.
- [4] Ding, Y., Optimum Design of Sandwich Constructions. In: Computers & Structures, v 25 n 1 (1987). p 51-68.
- [5] Verheij, J. W., Basiskennis Geluidarm Construeren. Bijzondere Leerstoel Geluidarm Construeren, Delft, 1990.
- [6] Pennington, N., Noise-damping Sandwich. In: Modern Metals, v 43 n 1 (1987). p 12-22.
- [7] Filho, M., Better Vibration Control With Honeycomb-core Structures. In: Machine Design, v 62 n 24 (1990). p 79-82.
- [8] Sackman, J. L., Kelly, J. M., Javid, A. E., Layered Notch-filter for High-frequency Dynamic Isolation. In: Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, v 111 n 1 (1989). p 17-24.
- [9] Kono, K., Sakata, O., Kinoshita, Y., ASME, Design Engineering Division v 18-3. ASME, New York, 1989 (On the Damping Characteristics of CFRP Laminate Tool Shanks due to the Orientation of Carbon Fiber).
- [10] Thompson, B. S., Composite Laminate Components for Robotic and Machine Systems: Research Issues in Design. In: Appl Mech Rev, v 40 n 11 (1987). p 1545-1551.
- [11] Sung, C. K., Thompson, B. S., Crowley, P., Cuccio, J., An Experimental Study to Demonstrate the Superior Response Characteristics of Mechanisms Constructed with Composite Laminates. In: Mechanism and Machine Theory, v 21 n 2 (1986). p 103-109.
- [12] Choi, S. B., Thompson, B. S., Gandhi, M. V., Proc 1990 IEEE Int Conf Rob Autom, IEEE, Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, 1990. p 1450-1455 (Modeling and Control of a Single-link Flexible Manipulator Featuring a Graphite-epoxy Arm).
- [13] Sung, C. K., Shyl, S. S., A Composite Laminated Box-section Beam Design for Obtaining Optimal Elastodynamic Responses of a Flexible Robot Manipulator. In: Int J Mech Sci, v 32 n 5 (1990). p 391-403.
- [14] Sung, C. K., Thompson, B. S., A Methodology for Synthesizing High-performance Robots Fabricated with Optimally Tailored Composite Laminates. In: ASME J Mech Transm Aut Design, v 109 n 1 (1987). p 74-