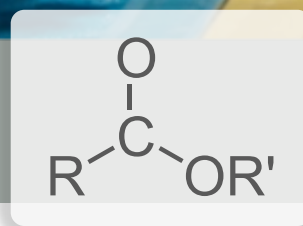


Lectoraat Kunststoftechnologie

Lange-duur eigenschappen van composieten

Literatuurstudie



Colofon

Titel: Lange-duur eigenschappen van composieten - Literatuurstudie

Publicatie nummer: LKT-CE-108157-2107

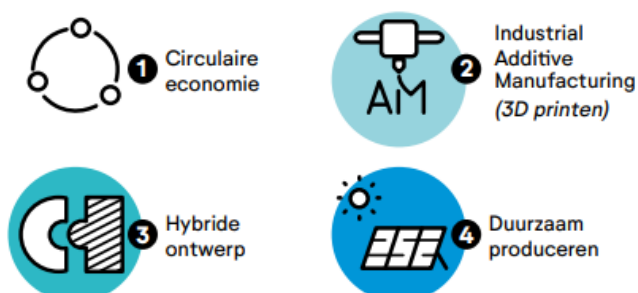
Publicatie datum: September 2021

Auteurs: Dr. Ir. N.P. Boks
Dr. M.D.C. Topp
Dr. Ir. A. ten Busschen

Subsidieverstrekker: Regie-orgaan SiA, Provincie Overijssel

Fotografie: Rechter inzet voorblad, Liz West gebruikt onder licentie CC BY 2.0, bewerkt: gekleurd

Onderzoekslijnen:



Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.

Deze publicatie wordt uitgebracht door het Lectoraat Kunststoftechnologie, een praktijkgerichte onderzoeksgroep op Hogeschool Windesheim die zijn basis heeft in Engineering & Design. Zoals passend bij lectoraten in combinatie met de gebruikte subsidieregeling, is het onderzoek uitgewerkt tot een TRL niveau van maximaal 7: demonstratie systeemprototype in operationele omgeving. Het werk is zo opgeschreven dat het na-werkbaar is, maar bedrijfsspecifieke data is soms weggelaten.



Voorwoord

De ontwikkeling van de methode van hergebruik van thermoharde composieten door het Lectoraat Kunststoftechnologie heeft een oplossing gegeven voor de circulariteit van deze materialen. De industrialisatie van deze methode begint vorm te krijgen maar er komen ook vragen. Een belangrijke vraag is wat de lange-duur prestatie is van producten gemaakt van hergebruikt composiet. Uiteraard is dat voor dit relatief nieuwe materiaal nog niet uit de praktijk bekend. Echter, van thermoharde composieten die gemaakt zijn van nieuwe (virgin) grondstoffen is hierover wel meer bekend. Deze worden inmiddels zo'n 70 jaar gebruikt. Om die reden is vanuit het lectoraat deze literatuurstudie uitgevoerd om in elk geval van deze virgin composieten te weten wat er bekend is over het lange-duur gedrag en welke mechanismen hierbij een rol spelen.

De resultaten van deze literatuurstudie is ook gebruikt als voorbereiding voor de indiening van een onderzoeksaanvraag om de lange-duur-prestatie van producten van hergebruikt composiet te onderzoeken.

Dr. Ir. Albert ten Busschen
Associate Lector, Lectoraat Kunststoftechnologie, Windesheim
Zwolle, 6 september 2021



Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Inleiding	5
Degradatiemechanismen van composieten van polyester	6
Degradatie van polyesters	6
Degradatie van composieten van polyesters	7
Conclusie	7
Literatuuronderzoek naar effect van water op polyester materialen	8
Versneld inzicht in de lange-duur eigenschappen van kunststoffen	9
Korte inleiding in tijd-temperatuur superpositie	9
Tijd-temperatuur superpositie bij polyester composieten en andere polymeren	10
Concluderende opmerkingen	11
Hergebruik van polyester composieten	11
Literatuurlijst	12
In samenwerking met	13



Inleiding

Vezelversterkte composieten van polyesterhars die in buitentoepassingen gebruikt worden, staan bloot aan allerlei weersinvloeden. Hierbij moet gedacht worden aan UV-straling, verschillende temperaturen maar ook water.

Van polymeren, waar polyesters één klasse van zijn, is bekend dat zij onder invloed van deze externe invloeden kunnen degraderen en daarmee hun (mechanische) eigenschappen kunnen verliezen.

Om een levensduur van een product in te schatten, is het dus belangrijk om inzicht te krijgen in welke mechanismen verantwoordelijk zijn voor de degradatie van het materiaal. Daarnaast is het nodig om een inschatting te maken van hoe lang het duurt voordat de eigenschappen zodanig verminderd zijn, dat het product niet meer aan de eisen voldoet.

Om meer inzicht te krijgen in deze materie is in de literatuur gezocht om antwoord te vinden op de volgende vragen:

- Welke degradatiemechanismen spelen een rol bij composieten van polyester?
- Welke mogelijkheden zijn tot nu toe gebruikt om een levensduur inschatting van deze composieten te maken?

In de literatuurstudie is gezocht naar informatie over composieten op basis van polyester maar daarbij zijn ook veel gegevens gevonden over composieten op basis van epoxy. Deze zullen in dit rapport niet worden behandeld maar daarover is wel veel te vinden in de bronnen die opgenomen zijn in de literatuurlijst.

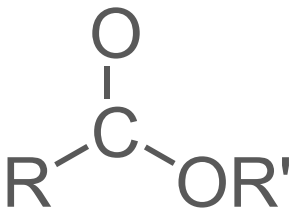


Degradatiemechanismen van composieten van polyester

Zoals de naam al zegt zijn composieten eigenlijk samengestelde materialen. In dit geval een kunststof hars en versterkingsvezels. Degradatie kan betrekking hebben op de afzonderlijke delen, of op het geheel. Met name de kunststof hars is gevoelig voor invloeden van buiten af en daarom zal eerst aandacht gegeven worden aan het degraderen van polyester en vervolgens aan het degraderen van het geheel.

Degradatie van polyesters

De vezelversterkte composieten die gebruikt worden voor bijvoorbeeld plezierbootjes zijn meestal gemaakt met polyesterharsen. Polyester is de verzamelnaam voor elk polymeer dat een zogenoemde ester-groep (zie Figuur 1) in de herhalende eenheid (monomeer) van de structuur heeft.



Figuur 1: structuurformule van een esterverbinding.

Hoe makkelijk een polyester via hydrolyse kan degraderen, hangt af van een aantal aspecten. Ten eerste is de chemische structuur van het polymeer belangrijk. Hoe complexer de structuur, hoe moeilijker de esterverbinding te benaderen is door een watermolecuul en hoe lastiger de hydrolyse zal plaatsvinden [1]. Daarnaast spelen de concentratie watermoleculen in de omgeving van het product (een lage relatieve luchtvochtigheid versus onderdampelen in een waterig milieu), de diffusiesnelheid van water in het materiaal, de concentratie opgeloste zouten, maar ook de temperatuur een rol [1].

Naast dat water direct in staat kan zijn om de polymeerketens van een polymeer aan te vallen, heeft water nog een effect op de kunststof. Omdat het watermolecuul klein is en het in de polymere matrix kan diffunderen, kan het ook dienen als weekmaker[1]. Dit houdt in dat watermoleculen zich tussen de polymeerketens bevinden en de afstand tussen de ketens kan vergroten en daarmee de onderlinge interactiekrachten van de ketens verminderen. Dit weekmakende effect zorgt voor een vermindering van mechanische eigenschappen [2].

In algemene zin is van kunststoffen bekend dat hun eigenschappen afhankelijk zijn van de (gebruiks)temperatuur (in relatie tot de Tg), maar ook van de tijd (denk bijvoorbeeld aan eigenschappen als kruip). Daarnaast speelt mee dat het proces van diffusie van water in een materiaal ook tijd kost. Het is dus goed voor te stellen dat naarmate de tijd vordert, het polymeer steeds meer aangetast wordt en daardoor eigenschappen worden beïnvloed.

Degradatie van composieten van polyesters

Composieten bestaan echter niet alleen uit hars/polymeer, maar ook uit vezels. Doordat het materiaal nu niet uitsluitend uit één fase bestaat, ontstaan grensvlakken met de vezels. Dat heeft als gevolg dat water in de matrix diffundeert en voor opzwellen van het materiaal zorgt. Daarnaast kan water via capillaire werking ook op het grensvlak van hars en vezel ophopen. Deze beide aspecten kunnen vervolgens voor delaminatie-effecten zorgen. De verbinding tussen de hars en de vezels wordt verbroken en daardoor kunnen de mechanische eigenschappen van het composiet als geheel slechter worden [1, 2]. Daarnaast kan de vezel zelf ook degraderen, afhankelijk van de affiniteit die de vezel heeft met water. Van vezels die gebaseerd zijn op cellulose (zoals natuurvezels) is bekend dat deze vocht kunnen opnemen waardoor deze gaan zwellen. De swelling van de vezels, die overwegend in de dikterichting van de vezels optreedt, kan resulteren in interne spanningen tussen de vezels en de kunststof waarin deze zijn ingebed. De spanningen kunnen zo hoog worden dat hierdoor ook breuk optreedt op het grensvlak tussen vezels en kunststof (microcracking).

Conclusie

Er spelen dus veel factoren een rol bij het tot stand komen van de eigenschappen van een composiet: de chemische structuur van de kunststof matrix, de gebruikte vezel, de gebruikstemperatuur, het (waterige) milieu waarin het materiaal zich bevindt en de tijd.

Als antwoord op de eerste vraag kan dus gesteld worden dat vezelversterkte composieten van polyester degraderen onder invloed van tijd, temperatuur en de vochtigheid van de omgeving. Diffusie van water zorgt met name voor een weekmakend effect, hydrolyse van het polymeer en eventuele delaminatie van het grensvlak tussen vezel en hars.



Literatuuronderzoek naar effect van water op polyester materialen

In het vorige hoofdstuk is benoemd wat de algemene factoren en degradatiemechanismen zijn die van belang zijn voor composieten van polyester. In dit hoofdstuk zal in meer detail worden ingegaan op de aspecten die van invloed zijn op de lange-termijn eigenschappen van polyester composieten die buiten gebruikt worden.

Zoals eerder benoemd is de chemische structuur van een polyesterhars belangrijk voor de gevoeligheid voor hydrolyse. Zo zijn de polyesterharsen gebaseerd op isoftaalzuur gevoeliger voor corrosie dan de op Bisphenol A gebaseerde vinyl esterharsen [3, 4]. Maar ten opzichte van polyester gebaseerd op isoftaalzuur is polyester gebaseerd op orthoftaalzuur gevoeliger voor hydrolyse. Maar naast het type hars, heeft ook de gebruikte vezelversterking een invloed op de wateropname van het composiet [3].

Bij de productie van composieten worden de harsen vaak in vloeibare toestand gecombineerd met een vezelpakket, waarna uitharding van het polymeer mogelijk wordt gemaakt. De keuze van het initiator/harder systeem, alsook de gebruikte temperaturen spelen een rol in hoe goed de uithardingsreactie kan plaatsvinden. Uit onderzoek van Alia *et al.* blijkt dat de Tg afhankelijk is van de gebruikte uithardtemperatuur en de tijd die het materiaal heeft doorgebracht in een klimaatkamer bij 80 °C en een relatieve vochtigheid van 95% [5]. De waarde voor de Tg is een indicator voor de vorming en dichtheid van een gecrosslinked netwerk van polymeerketens en is daarmee een indicator voor de eigenschappen van het materiaal. Als een polyester nog niet volledig is uitgehard, zou dit een effect kunnen hebben op de reacties die mogelijk zijn als het materiaal in contact komt met een vochtige/waterige omgeving. Zo bleek in een onderzoek waar een epoxy hars werd gebruikt, dat tijdens een verouderingsproef (bij 60 °C en verschillende luchtvochtigheden), de treksterkte van het materiaal eerst afneemt, dan toeneemt en vervolgens weer afneemt [6]. Hieruit werd geconcludeerd dat diffusie van water eerst voor een weekmakend effect zorgt. De gevonden toename in treksterkte werd toegeschreven aan een mogelijk verdere crosslinkreactie met behulp van de aanwezigheid van water, die alleen kan plaatsvinden als het materiaal oorspronkelijk niet voldoende was uitgehard. Ook in het geval van isoftaalester en vinylester bleek dat tijdens onderdompelen in water nog een uithardingsreactie plaatsvond [4].

In een ander onderzoek zijn composieten, gemaakt met een vinylester-hars, gedurende drie maanden ondergedompeld in zoet water en zeewater bij temperaturen tot 25 °C [7]. Uit dit onderzoek bleek dat zowel de temperatuur als het soort water van invloed zijn op de tijd die watermoleculen nodig hebben om in het materiaal te diffunderen en verzadiging te bereiken. Bij hogere temperatuur (25 °C) wordt sneller verzadiging bereikt dan bij lagere temperatuur (2 °C). Daarnaast bleek dat o.a. de diffusie-coëfficiënt en maximale waterconcentratie in het materiaal het hoogste zijn wanneer het materiaal in contact was met zoet water. Bij kniktesten bleek dat als het materiaal blootgesteld was aan water het een lagere weerstand tegen knikken had, waarbij het grootste effect zichtbaar was bij onderdompelen in zoet water bij 25 °C. Ook bij epoxy-hars werd gezien dat zoet (gedemineraliseerd) water voor meer wateropname zorgde dan zout water [8]. Echter, hier bleek dat juist zout water een schadelijkere invloed had op de mechanische eigenschappen dan conditionering in zoet water. Het is dus mogelijk dat de afhankelijk van het type hars, de chemische degradatie, het zwellen en het mechanisch losraken van de verbinding tussen vezel en hars anders verloopt in zoet water vergeleken met zout water.

Het produceren van composieten kan door verschillende technieken gerealiseerd worden. Zo hebben Tual *et al.* gekeken naar verouderingseffecten van carbon-epoxy composieten die met behulp van pre-pregs, resin transfer moulding, en vacuüminfusie geproduceerd zijn en concludeerden dat de productietechniek van invloed is op de diffusiesnelheid van water in het materiaal [9]. Ook merkten zij op dat de dikte van het materiaal relatief weinig invloed heeft op de diffusie kinetiek, maar dat juist porositeit en het vezelpercentage belangrijke parameters zijn. Het is hierbij interessant om op te merken dat de verzadigingswaarde van water in een proefstuk wel afhankelijk kan zijn van de dikte van een proefstuk. Zo bleek bij een glas/vinylester composiet geen afhankelijkheid van dikte op verzadiging te zijn, maar was die bij een glas/isoftaal-polyester wel aanwezig [3].

In de bovenstaande onderzoeken zijn de onderzoeken uitgevoerd waarbij de proefstukken doorgaans ondergedompeld zijn in water. Bij gebruik van polyesterboten voor pleziervaart zal een deel van het materiaal (boven de waterlijn) niet constant in contact zijn met water, maar wel blootstaan aan weersinvloeden. Deze weersinvloeden (temperatuur, UV straling en regen) kunnen echter samen wel bijdragen aan verslechtering van eigenschappen als gevolg van degradatie [10]. Belec *et al.* lieten zien dat een weekmakend effect door water werd gevolgd door hydrolyse van het polymeer onder invloed van UV-licht in combinatie met het aanwezige water [11]. In dat geval is sprake van een opeenvolging van degradatiemechanismen.

Uit de genoemde onderzoeken (die geen uitputtende samenvatting van de literatuur zijn), blijkt dat het type hars en de specifieke omstandigheden waar het materiaal zich in heeft bevonden en de tijdsduur belangrijk zijn voor de verandering in mechanische eigenschappen. Hoewel in sommige onderzoeken de proefstukken daadwerkelijk maanden de tijd hebben gehad om in een waterig milieu [7, 11] of andere natuurlijke omstandigheden [10] te verouderen, is het in de praktijk wenselijk om versneld inzicht te krijgen in hoe de materiaaleigenschappen in de tijd veranderen. Een veelgebruikte methode om dit voor kunststof-materialen mogelijk te maken is een techniek die bekend staat als de *tijd-temperatuur superpositie methode*. Daar wordt in het volgend hoofdstuk verder op in gegaan.

Versneld inzicht in de lange-duur eigenschappen van kunststoffen

Polymeren zijn materialen die bestaan uit lange ketens van aaneengeschakelde monomeren. Afhankelijk van hoe lang de ketens zijn (vertaald in het molecuulgewicht), de temperatuur waarbij gemeten wordt, maar ook de tijdschaal van de meting zal een polymeer verschillend verouderingsgedrag laten zien. Eén belangrijke techniek is die van de tijd-temperatuur superpositie.

Korte inleiding in tijd-temperatuur superpositie

Eén karakteristieke eigenschap van een polymeer is de relaxatiemodulus. Deze modulus wordt bepaald door een materiaal een bepaalde rek te geven en vervolgens de spanning over tijd te meten. Door het visco-elastische gedrag van polymeren zal na verloop van tijd de spanning in het materiaal dalen. Hoe deze spanning precies daalt is afhankelijk van de temperatuur waarbij gemeten wordt, maar in het algemeen kan gesteld worden dat dit relaxatieproces sneller gaat bij hogere temperaturen doordat de polymeerketens dan meer beweeglijkheid hebben. Het is dus mogelijk om verschillende spannings-rek grafieken te produceren bij verschillende temperaturen. Omdat nu in feite steeds hetzelfde moleculaire proces gemeten wordt, is het mogelijk om een zogenoemde *mastercurve* te produceren. Hiertoe wordt één gemeten grafiek als referentie genomen en alle andere grafieken worden nu horizontaal naar links of rechts geschoven om de lijn “passend” te maken. De mate waarin een grafiek naar links of naar rechts verschoven moet worden wordt de “*shift factor*” genoemd. Een heel bekend voorbeeld van het produceren van een mastercurve is die van polyisobuteen [12]. Deze aanpak, waarin gesteld wordt dat de snelheid waarmee een proces verloopt uitwisselbaar is met de temperatuur waarbij gemeten wordt, wordt de tijd-temperatuur superpositie techniek genoemd. Deze techniek wordt veel ingezet bij onderzoek naar lange-termijn eigenschappen bij polymeren, om op deze manier versneld inzicht te krijgen in de levensduur van materialen.



Tijd-temperatuur superpositie bij polyester composieten en andere polymeren

Om een inschatting te maken van de lange-termijn eigenschappen van polymeren kunnen twee aanpakken gebruikt worden. Allereerst kunnen proefstukken gedurende meerdere maanden of jaren in een natuurlijke omgeving worden gelegd en na afloop gekarakteriseerd worden. Dit is echter een tijdrovende methode en daarom wordt vaak gebruik gemaakt van klimaatkamers die op hogere temperaturen worden ingesteld. Zoals in de inleiding benoemd wordt hierbij aangenomen dat tijd en temperatuur uitwisselbare parameters zijn.

Een onderzoek met epoxy hars liet zien dat de tijd-temperatuur superpositie (TTS) een goed beeld gaf van het kruipgedrag van zowel droog referentie-materiaal als proefstukken die 2 maanden bij 60 °C geconditioneerd zijn. In deze studie konden de resultaten van het droge referentiemateriaal gebruikt worden om het gedrag van in vochtige omstandigheden geconditioneerd materiaal te voorspellen [13]. Hierbij moet wel worden genoteerd dat dit geldt voor temperaturen onder de T_g en dat hier alleen gekeken is naar de hars zonder de aanwezigheid van versterkende vezels. Nosrati *et al.* concludeerden dat door middel van TTS een goede mastercurve te produceren is dit en mogelijkheden biedt voor lange-duur voorspellingen [14]. Er zijn dus aanwijzingen dat TTS toepasbaar is in composieten.

Het kunnen toepassen van TTS is echter wel aan voorwaarden gebonden. Eén van die voorwaarden is dat alle factoren die aan relaxatie bijdragen (of aan de karakteristieke eigenschap die wordt gemeten) dezelfde afhankelijkheid van de temperatuur hebben [15]. Een ander potentieel probleem kan ontstaan als bij lagere temperaturen een ander degradatiemechanisme dominant is, vergeleken bij hogere temperaturen [16]. Zo werd bijvoorbeeld voor silica gevuld polychloropreen gevonden dat de degradatie in het proefstuk niet homogeen was en dat met betrekking tot de modulus en de breukspanning TTS geen goede voorspelling mogelijk maakte. [17]. Het is echter interessant om op te merken dat in het voorgaande voorbeeld, wel goede verbanden werden gevonden voor de rek bij breuk. De verklaring die hiervoor wordt gegeven, is dat deze laatste parameter bepaald wordt door het oppervlak van het proefstuk. Dit geeft aan dat goed gekeken moet worden naar de factoren die een materiaaleigenschap bepalen en in hoeverre die eenduidig te beschrijven zijn via één (degradatie)mechanisme.

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat TTS in sommige gevallen een goede aanzet kan geven om de lange-duur eigenschappen van materialen in te schatten. Wat opvalt in de aanwezige literatuur, is dat veel van de gebruikte materialen en/of omstandigheden goed gedefinieerd zijn.

Echter, de precieze geschiedenis van veel producten (zoals bijvoorbeeld exacte blootstelling aan weersomstandigheden of ongewenste mechanische belastingen) is niet bekend, waardoor levensduuranalyses bemoeilijkt worden [18]. In een recente literatuuranalyse wordt gesteld dat door de grote verscheidenheid aan materialen, weersomstandigheden, belastingmogelijkheden faalmechanismen en hun onderlinge invloed op elkaar, het bijkans niet mogelijk is om één model te kiezen die de degradatie van vezelversterkte laminaten kan beschrijven [19].

Concluderende opmerkingen

Het doel van deze beknopte literatuur beschouwing was om antwoord te geven op twee vragen.

Allereerst was het van belang om te weten welke degradatiemechanismen een rol spelen bij composieten van polyester. Uit de literatuur is naar voren gekomen dat de opname van water zorgt voor een weekmakend effect van het polymeer, maar ook een hydrolysereactie kan starten. Daarnaast is het mogelijk dat via zwellen, of via capillaire werking en diffusie, ophopingen van water op het grensvlak van hars en vezel ontstaan, waardoor de onderlinge samenhang verloren gaat. Een delaminatie effect is dan het gevolg. Ook al heeft het onderzoek zich gericht op polyester-gebaseerde composieten, wel is naar voren gekomen dat epoxy-gebaseerde composieten zich anders gedragen met betrekking tot degradatie-mechanismen.

Ten tweede is gekeken naar welke mogelijkheden gebruikt worden om een levensduur inschatting te maken. De meest gebruikte techniek is om experimenten bij verhoogde temperatuur uit te voeren om zodoende degradatiemechanismen te versnellen. Echter, uit de literatuur blijkt ook dat een dergelijke tijd-temperatuur superpositie niet altijd toepasbaar is en dat het voorspellen van levensduur gecompliceerd wordt door een veelheid aan factoren.

Hergebruik van polyester composieten

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat veel factoren op het gebied van gebruikte materialen, productieprocessen en gebruiksomstandigheden van invloed zijn op de mechanische eigenschappen van een composiet. Producten die dus blootgesteld worden aan weersinvloeden zullen na verloop van tijd een verlies aan mechanische eigenschappen laten zien die moeilijk te voorspellen zijn.

Het lectoraat Kunststoftechnologie heeft een methode ontwikkeld om afgedankte composiet materialen te verkleinen tot vlokken en weer opnieuw te gebruiken in composiet-producten. Hiertoe worden bijvoorbeeld rompen van plezierboten of rotorbladen van windmolens eerst verkleind en vervolgens als versterkingsmateriaal gebruikt voor een nieuw composiet. In dit geval worden veel grensvlakken geïntroduceerd tussen de nieuwe (virgin) inbeddingshars en de hergebruikte composietvlokken. Het voorspellen van het lange-duurgedrag van dit nieuwe composiet wordt erg moeilijk omdat de precieze eigenschappen van deze vlokken niet bekend zijn waardoor inhomogene eigenschappen ontstaan. Dit wordt verder gecompliceerd omdat de nieuw gevormde grensvlakken tussen de vlokken en de hars bijdragen aan die inhomogeniteit. Deze aspecten beïnvloeden mogelijk de degradatie van het composiet en daarmee de lange-duureigenschappen.

Het is dus van belang om hier meer inzicht in te krijgen. Vanuit de literatuur is dit momenteel echter niet mogelijk omdat het een nieuw type composiet is [1, 19]. Daarom is het belangrijk om onderzoek te doen naar deze composieten die gebruik maken van hergebruikte end-of-life composietproducten.



Literatuurlijst

1. Liu, T., X. Liu, and P. Feng, *A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects*. Composites Part B: Engineering, 2020. **191**: p. 107958.
2. Ansari, M.T.A., K.K. Singh, and M.S. Azam, *Fatigue damage analysis of fiber-reinforced polymer composites—A review*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2018. **37**(9): p. 636-654.
3. Kootsookos, A. and A.P. Mouritz, *Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites*. Composites Science and Technology, 2004. **64**(10): p. 1503-1511.
4. Visco, A.M., V. Brancato, and N. Campo, *Degradation effects in polyester and vinyl ester resins induced by accelerated aging in seawater*. Journal of Composite Materials, 2011. **46**(17): p. 2025-2040.
5. Alia, C., et al., *Characterization of the chemical structure of vinyl ester resin in a climate chamber under different conditions of degradation*. Polymer Degradation and Stability, 2018. **153**: p. 88-99.
6. Wang, M., et al., *The hygrothermal aging process and mechanism of the novolac epoxy resin*. Composites Part B: Engineering, 2016. **107**: p. 1-8.
7. Eslami, S., A. Honarbakhsh-Raouf, and S. Eslami, *Effects of moisture absorption on degradation of E-glass fiber reinforced Vinyl Ester composite pipes and modelling of transient moisture diffusion using finite element analysis*. Corrosion Science, 2015. **90**: p. 168-175.
8. Zafar, A., et al., *Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(6): p. 656-666.
9. Tual, N., et al., *Characterization of sea water ageing effects on mechanical properties of carbon/epoxy composites for tidal turbine blades*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015. **78**: p. 380-389.
10. Ariawan, D., et al., *Durability of alkali and heat-treated kenaf fiber/unsaturated polyester composite fabricated by resin transfer molding under natural weathering exposure*. Advances in Polymer Technology, 2018. **37**(5): p. 1420-1434.
11. Belec, L., et al., *Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015. **68**: p. 235-241.
12. Osswald, T.A. and G. Menges, *Part 3: Engineering Design Properties: Mechanical Behavior of Polymers*, in *Material Science of Polymers for Engineers (Third Edition)*, T.A. Osswald and G. Menges, Editors. 2012, Hanser. p. 339-422.
13. Krauklis, A.E., et al., *Time–Temperature–Plasticization Superposition Principle: Predicting Creep of a Plasticized Epoxy*. Polymers, 2019. **11**(11).
14. Nosrati, N., A. Zabett, and S. Sahebian, *Long-term creep behaviour of E-glass/epoxy composite: time-temperature superposition principle*. Plastics, Rubber and Composites, 2020. **49**(6): p. 254-262.
15. Dealy, J. and D. Plazek, *Time-temperature superposition-a users guide*. Rheol. Bull., 2009. **78**: p. 16-31.
16. Gillen, K.T., R. Bernstein, and M. Celina, *Challenges of accelerated aging techniques for elastomer lifetime predictions*. Rubber Chemistry and Technology, 2015. **88**(1): p. 1-27.
17. Le Saux, V., et al., *Limits in the validity of Arrhenius predictions for field ageing of a silica filled polychloroprene in a marine environment*. Polymer Degradation and Stability, 2014. **99**: p. 254-261.
18. Hulme, A., *Life prediction of polymers: model validation*. 2014. **3**: p. 256.
19. Vassilopoulos, A.P., *The history of fiber-reinforced polymer composite laminate fatigue*. International Journal of Fatigue, 2020. **134**: p. 105512.

In samenwerking met



Lange-duur eigenschappen van composieten

Literatuurstudie

Over het lectoraat Kunststoftechnologie

Het lectoraat Kunststoftechnologie stimuleert innovatie op het gebied van kunststofverwerking en -producten in het midden- en kleinbedrijf. Vanuit de onderzoeksprojecten, uitgevoerd door docenten van de technische opleidingen bij de Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven, vloeien nieuwe kennis en inzichten naar het Hoger Onderwijs én het bedrijfsleven.

Samenvatting

In deze literatuurstudie wordt onderzocht wat er bekend is over het lange-duurgedrag van thermoharde composieten. Omdat voor deze materialen in de meeste gevallen polyester als matrix wordt gebruikt is de studie hierop toegespitst. Uit de literatuurbronnen komt naar voren dat de inwerking van vocht veel invloed heeft op het lange-duurgedrag van deze composieten. Enerzijds leidt de inwerking van het vocht in de polyester tot zwellen en daarmee fungeert het als weekmaker. Daarnaast leidt de aanwezigheid van vocht ook tot hydrolyse van de polyester waardoor eigenschappen verminderen. Hierbij spelen de inwerktijd en de omgevingstemperatuur een belangrijke rol. Met theoretische modellen is er wel een verband aan te geven tussen het effect van tijd en temperatuur op de degradatie door hydrolyse. De inwerking van vocht kan ook plaatsvinden op het grensvlak tussen de versterkingsvezels en de matrix waardoor delaminatie kan optreden. De literatuurstudie laat zien dat het lange-duurgedrag van composieten wordt bepaald door een complex samenspel van de genoemde effecten.