

Poedercoaten op plastics

Het elektrisch geleidbaar maken van kunststoffen



Lectoraat Kunststoftechnologie

Colofon

Titel:	Poedercoaten op plastic: Het elektrisch geleidbaar maken van kunststoffen
Publicatienummer:	LKT-RE-106950-1801
Datum:	Mei 2018
Auteurs:	Dr.Ir. N.P. Boks Dr. M.D.C. Topp
Subsidieverstrekker:	Green PAC (Green Polymer Application Centre)

Dit is een uitgave van Christelijke Hogeschool Windesheim. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoudsopgave

Introductie	2
Principe van geleidend maken van thermoplasten.....	3
Composieten van thermoplasten en carbon nano vezels	4
Composieten van thermoplasten en carbon black	5
Concluderend	7
Literatuurlijst.....	8

Introductie

Poedercoaten is een techniek om op producten een verlaag aan te brengen zonder gebruik te maken van oplosmiddelen. Deze techniek, die al ca. 60 jaar bestaat, wordt met name toegepast op producten met metalen onderdelen [1]. Voorbeelden hiervan zijn terug te vinden in de automobiel industrie, maar ook bij fietsen, witgoed en straatmeubilair worden poedercoatings toegepast om de producten een gewenste finish te geven. In de afgelopen jaren heeft het Lectoraat Kunststoftechnologie diverse onderzoeken gedaan naar de mogelijkheid van poedercoaten op thermoplastische kunststoffen. Dit literatuuronderzoek biedt een korte inleiding in de achtergronden van het poedercoaten op deze materialen.

Poedercoaten op plastic

In algemene zin bestaan poedercoatings uit bindmiddelen (bijvoorbeeld polyesters en epoxies), pigmenten, additieven als vulstoffen en crosslinking agents (ook wel uitharders genoemd) [2-4]. Het aanbrengen van een poedercoating op metalen gebeurt door middel van verschil in statische lading tussen het poeder en het substraat. In de volgende stap wordt het product, met daarop de droge poeder laag, in een oven geplaatst om het uitharden van de coating mogelijk te maken. Curing omstandigheden van 10 – 20 minuten bij temperaturen van 180 – 200 °C zijn hierbij niet ongevoel [1, 5]. In het geval van metalen is dit ook geen probleem, aangezien deze materialen bij de gebruikte temperaturen vormvast blijven.

In veel toepassingen wordt tegenwoordig gezocht naar meer duurzaamheid. Een goed voorbeeld hiervan is de automobiellndustrie waar steeds meer geprobeerd wordt metaal te vervangen door kunststof onderdelen. Hoewel deze materialen als grote voordeel hebben dat ze veel lichter zijn dan metaal, hebben zeker thermoplastische kunststoffen het nadeel dat ze minder goed bestand zijn tegen de hoge temperaturen die voor het uitharden van poedercoatings vaak nodig zijn. Onderzoek naar nieuwe coatings richt zich om die reden mede op het verlagen van de uithardingstemperatuur en inmiddels zijn cure-temperaturen in het gebied 120 – 150 °C onderzocht [6-8]. Dankzij deze ontwikkelingen is het mogelijk gebleken coatings aan te brengen op spaanplaat en MDF [9, 10] en PEEK composiet [11]. Verder hebben het Lectoraat Kunststoftechnologie en DSM aangetoond dat het mogelijk is om een poedercoating op polypropreen aan te brengen en uit te laten harden waarbij het substraat niet vervormde [12].

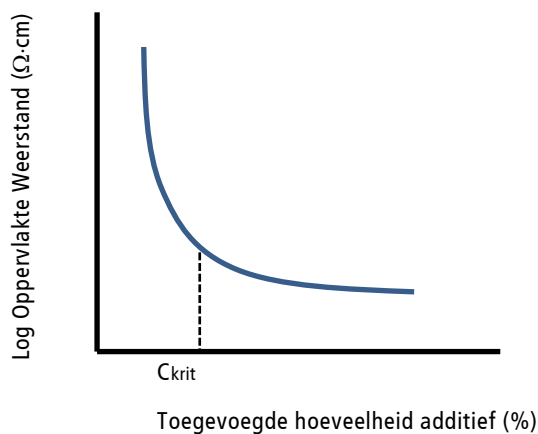
Een tweede uitdaging voor een goede coating op kunststoffen is de hechting tussen een poeder coating en het substraat. Hierbij is het vooral van belang te letten op de oppervlaktespanning van het substraat. Met name op polyolefinen is het moeilijk een goede hechting tussen substraat en coating te realiseren. Veelgebruikte technieken om hydrofiele groepen op het hydrofobe PP aan te brengen zijn plasma- en vlam behandelingen [13-15]. Recent onderzoek heeft aangetoond dat dit soort voorbehandelingen de coatingperformance op PP positief beïnvloeden [12, 16, 17].

Voordat een poedercoating echter kan hechten op een substraat, moet het goed kunnen worden aangebracht. Kunststoffen staan bekend om hun isolerende eigenschappen, waardoor geen voldoende verschil in statische lading kan worden gecreëerd tussen het polymeer en de droge poedercoating. Het gevolg is dat, na aanbrengen van het poeder, de droge laag niet stabiel op het substraat blijft liggen en mede daardoor geen goede coating ontstaat. Het is dus van cruciaal belang om de geleidbaarheid van kunststoffen zodanig te vergroten, dat een voldoende groot verschil in elektrostatische lading tussen poeder en substraat kan worden gerealiseerd. Om dit mogelijk te maken zal de oppervlakte weerstand van plastics moeten dalen van minimaal $10^{12} \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ tot in het gebied $10^1 - 10^6 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ [18]. Om dit te kunnen bereiken moet gebruik worden gemaakt van additieven die de gewenste mate van geleiding kunnen leveren. Bekende additieven die voor dit doeleinde worden gebruikt zijn grafiet [19-21], carbon black (CB) en carbon nano vezels (CNT's) [18, 22, 23].

In de komende secties zal eerst worden ingegaan op het werkingsprincipe achter geleidende kunststoffen. Vervolgens zal aandacht gegeven worden aan het toepassen van CNT's en CB als geleidende additieven voor kunststoffen.

Principe van geleidend maken van thermoplasten

Om een kunststof voldoende geleidend te maken, is een geschikt additief nodig. Na een goed mengproces is het additief, als bijvoorbeeld carbon black, gedispergeerd in een matrix van polymeer. Om de beste geleiding te realiseren, vormen de geleidende deeltjes idealiter een aaneengesloten netwerk. Een dergelijk netwerk wordt alleen gevormd als voldoende additief wordt toegevoegd. Wanneer de hoeveelheid additief wordt uitgezet tegen de elektrische oppervlakte weerstand is een afname zichtbaar (zie Figuur 1 voor een schematische weergave).



Figuur 1: Schematische weergave van de afname van de oppervlakte weerstand versus het percentage toegevoegd additief

In Figuur 1 is te zien dat de oppervlakte weerstand bij lage concentraties additief relatief hoog is. In deze situatie maken de deeltjes geen tot weinig fysiek contact met elkaar en vindt geleiding plaats via het principe van *tunneling*. De geleidende deeltjes liggen dicht genoeg bij elkaar om elektronen van het ene deeltje op het andere over te laten springen. De afstand tussen deeltjes waarbij dit mogelijk is, varieert per combinatie van additief en matrix waarin deze gedispergeerd is [20].

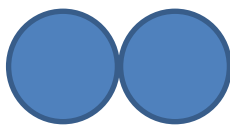
Doordat de concentratie toeneemt, zullen ook meer deeltjes fysiek met elkaar in contact komen en heeft dit een scherpe daling in oppervlakteweerstand tot gevolg. Vanaf een kritische concentratie (C_{krit}), die de percolatie drempel wordt genoemd, neemt de weerstand echter minder sterk af tot een plateau waarde bereikt wordt. Bij de percolatie drempel wordt een goed aaneengesloten netwerk van deeltjes gevormd. Het toevoegen van meer additief zal daarom geen grote verandering in geleiding (of oppervlakte weerstand) met zich meebrengen. Een juiste distributie van een geleidend additief is dus essentieel om een kunststof geschikt te maken voor een poedercoating.

Bij de meeste productieprocessen van thermoplastische materialen wordt gebruik gemaakt van extruders en spuitgietmachines. In deze machines wordt het kunststof naar een vloeibare/vervormbare toestand gebracht en worden additieven homogeen verdeeld in de kunststof massa. Door het toevoegen van geschikte mengelementen op de schroeven in de machines, is het mogelijk om in deze fase een goede distributie van geleidend additief in de matrix te realiseren. In een volgende stap in het proces, zal de kunststof echter altijd afkoelen en behoort kristallisatie, afhankelijk van het gekozen polymeer, tot de

mogelijkheden. Om een aaneengesloten netwerk van geleidend additief te realiseren, moet rekening gehouden worden met deze kristallisatie eigenschappen.

Additieven zijn vooral gedispergeerd in de amorf fractie van een kunststof, met als gevolg dat het geleidend netwerk vooral in deze ongestructureerde fractie aanwezig is. Hoe meer kristallijn het materiaal is, hoe hoger de concentratie geleidend additief in de amorf fractie. Hierdoor ontstaat een geleidend netwerk makkelijker in een semi-kristallijn polymeer vergeleken met dezelfde concentratie additief in een 100% amorf materiaal [24, 25]. Daarnaast speelt ook de kristallisatie-snelheid, en daarmee de afkoelsnelheid in het productieproces, een rol. Zo kan het geleidende grafeen als nucleatiepunt fungeren bij het kristalliseren van PP. Wanneer PP snel afgekoeld wordt in de aanwezigheid van dit additief ontstaan relatief veel, maar kleine, sferulieten. Hierdoor worden de grafeen deeltjes niet de amorf fase ingedruwd om een geleidend netwerk te vormen, maar blijven juist relatief veel grafeen deeltjes ingebed in PP-kristallen met een hogere percolatie drempel als gevolg [23].

Een goede distributie van het additief is dus een belangrijke voorwaarde voor de totale geleiding van een product. Naast het verwerken en de keuze van het polymeer als matrix, speelt ook de vorm van het geleidend additief een belangrijke rol. Zo zijn er additieven als grafiet die in verschillende geometrieën kunnen voorkomen (zie figuren 2a en 2b). Voorbij de percolatiedrempel vormen bolvormige deeltjes vooral een punt-punt contact terwijl vlok-achtige vormen meer overlap vertonen en een groter contactoppervlak hebben.



Figuur 2a: bij fysiek contact tussen twee bolvormige deeltjes ontstaat een punt-punt contact



Figuur 2b: bij fysiek contact tussen twee vlokachtige deeltjes ontstaat een contact oppervlak

Doordat elektronen makkelijker kunnen stromen via een contactoppervlak dan via een punt-punt contact, heeft dat als resultaat dat vlokachtige geleidende deeltjes tot een veel betere geleidingseigenschap leiden [21]. Hieruit kan geconcludeerd worden dat deeltjes met een hogere aspect ratio (zoals 'vlokken' en vezels) gunstiger zijn om een polymeer geleidende eigenschappen te geven. Echter, bij dit soort geleidende additieven is het van belang om bij de productie van het geleidende plastic niet teveel oriëntatie van de hoge aspect ratio deeltjes te laten ontstaan. Wanneer dit wel gebeurt, ontstaat er geen goed doorlopend netwerk van geleidende deeltjes in het materiaal [26]. Daarnaast mag in deze gevallen de afschuivingsspanning tijdens het verwerken niet te hoog worden. Bij te grote afschuivingen worden vezels kleiner en ook dit hindert het vormen van een geleidend netwerk [22].

Composieten van thermoplasten en carbon nano vezels

Carbon nano vezels (CNT's) zijn te zien als holle buizen van alleen koolstof die worden onderverdeeld in enkelwandige- meerwandige buizen. Beide soorten hebben een diameter in de ordegrootte van nanometers en lengtes die duizenden malen groter kunnen zijn [27-29]. Eén van de eigenschappen die CNT's interessant maken voor thermoplasten, is de geleidende eigenschap van de CNT's.

Een literatuuroverzicht van Bauhofer en Kovacs [30] geeft een overzicht van 100 onderzoeken naar de percolatiedrempel van CNT's in diverse polymere matrices. Hierbij is niet alleen gekeken naar de verschillende soorten kunststoffen, maar ook naar bijvoorbeeld types CNT (afmetingen, enkel- of meerwandig, eventuele voorbehandelingen) en de wijze van verwerking. Uit deze opsomming blijkt dat de gevonden percolatiedrempel voor het totaal aan composietsystemen varieert van 0.035 wt% voor een type alkoxysilaan tot wel 50 wt% voor polyetheenoxide (PEO). Een belangrijke conclusie die naar aanleiding van

dit onderzoek getrokken werd, is dat de percolatiedrempel met name wordt beïnvloedt door het type kunststof dat gebruikt wordt en de wijze die gebruikt is om de CNT's te dispergeren in de matrix.

Uit het onderzoek van Bauhofer en Kovacs blijkt dus dat het soort polymeer een grote invloed heeft op de percolatiedrempel. Maar ook binnen een soort polymeer is kan er sprake zijn van grote spreiding. Zo kan de percolatiedrempel van CNT's in PP variëren van 0.07 – 18 wt% [30-32], voor PE 0.045 – 18 wt% [30, 31] en PC 0.1 - 5wt% [30, 33]. Verschillende grades van een polymeer kunnen dus verschillende percolatiedrempels opleveren. Uit een onderzoek is zelfs naar voren gekomen dat een batch-to-batch verschil van CNT's een grote impact kan hebben op de percolatiedrempel van het composiet [33].

Niet alleen het materiaal speelt een rol. Ook de gebruikte productiewijze heeft een invloed op de percolatiedrempel bij gebruik van CNT's. Wanneer een blend van polymeer/CNT bij hoge temperatuur tot een proefstuk wordt geperst, resulteert dit in een beter geleidend product dan wanneer voor spuitgieten wordt gekozen [34]. Bij het spuitgieten van een CNT/polymeer blend kan het voorkomen dat de oppervlakte een grotere elektrische weerstand heeft dan de bulk van het geproduceerde proefstuk [35, 36]. Afschuiving is hierbij van belang. Hoe hoger de afschuiving, hoe kleiner de elektrische geleiding. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het feit dat CNT's door hoge afschuiving georiënteerd worden en het moeilijker is om een geleidend netwerk te vormen. Vanzelfsprekend is in het spuitgietproces de injectiesnelheid een belangrijke parameter om de uiteindelijke geleidingseigenschap te beïnvloeden. Maar ook de verwerkingstemperatuur speelt hierbij een rol. Bij een hogere gebruikte verwerkingstemperatuur is gevonden dat de geleidbaarheid verbetert [35-38]. Ook de geometrie van de runners en de aansluitpunten kan een aanmerkelijke invloed hebben op de geleidbaarheid van het eindproduct [37]. Dit is een indicatie dat al tijdens het ontwerp van een product rekening gehouden moet worden met de mogelijkheid om dat product geleidende eigenschappen mee te geven.

Samenvattend kan gesteld worden dat processen waarbij een lage afschuiving (zoals bij persen het geval is) plaatsvindt, over het algemeen een beter geleidend product ontstaat. Wanneer processen worden gebruikt waar grote afschuifspanningen een rol spelen, zoals bij spuitgieten, dan moet geprobeerd worden met een zo hoog mogelijke verwerkingstemperatuur en een zo laag mogelijke inspuitsnelheid te werken. Echter, het blijft nodig om eerst voor elke combinatie aan polymeer en CNT de percolatiedrempel te bepalen.

Composieten van thermoplasten en carbon black

Carbon black is een veelgebruikt relatief goedkoop additief dat dient als vulstof in autobanden, pigment maar daarnaast ook over geleidende eigenschappen beschikt. Het is dus een interessant materiaal om isolerende thermoplasten geleidend te maken.

Als CB gebruikt wordt om thermoplasten geleidend te maken zijn percolatiedrempels van 5 – 12 gewichtsprocent additief in de matrix niet ongevoel [39, 40] en speelt de combinatie van CB en soort polymere matrix een belangrijke rol. Zo hebben de polariteit en de oppervlaktespanning van een polymeer een invloed op de percolatiedrempel maar lijkt die niet eenduidig te zijn [41]. Eén van de mogelijke oorzaken kan zijn dat de rol van het soort CB hierin moet worden meegenomen. In tegenstelling tot de verwachting bleek in een onderzoek van Cheah et al [40] dat de percolatiedrempel van CB in relatief polaire polymeren juist relatief laag was. Dit effect werd deels toegeschreven aan het gebruik van een meer polair soort CB ten opzichte van andere studies. Een ander belangrijk verschil werd gevonden in het dipoolmoment van de verschillende polaire polymeren met als resultaat dat de benutting van CB door deze polaire ketens makkelijker ging en daarmee voor een lagere percolatiedrempel zorgden.

Naast de polariteit van de materialen, is ook de structuur van CB een aspect om mee te nemen. In primaire vorm kan CB gezien worden als bolvormige deeltjes, maar doorgaans vormen deze deeltjes een aggregaat van grotere afmeting. Deze grotere deeltjes vormen al eigenlijk een deel van het conductieve netwerk dat later nodig is om een thermoplast geleidend te maken. Hoe complexer de structuur van het CB-startmateriaal, hoe makkelijker een geleidend netwerk te vormen is in het eindproduct, dus hoe lager de

percolatiedrempel is [41, 42]. Dit impliceert gelijk dat rekening gehouden moet worden bij het verwerken van CB/polymeer composieten. Hoe hoger de afschuifspanningen in het proces, hoe groter de kans dat de CB-aggregaten kapot gaan met een hogere percolatiedrempel tot gevolg [40, 41].

Een bekende oorzaak voor hoge afschuifspanningen is de viscositeit van het polymeer waarin CB gedispergeerd moet worden. Deze waarde wordt voor een groot deel bepaald door de molecuulmassa van de kunststof. In een studie naar composieten van polystyreen met CB bleek dat een de molecuulmassa van het kunststof van invloed is op de deeltjesgrootte distributie van CB in de matrix [43]. Een hoog molecuulgewicht van polystyreen zorgde voor een smalle distributie van deeltjesgrootte en de CB-deeltjes waren gemiddeld genomen ook kleiner dan wanneer de CB in polystyreen van laag moleculair gewicht werd gedispergeerd. In andere woorden, door het hoge molgewicht van polystyreen nam de viscositeit van het systeem toe en daarmee ook de afschuifspanningen tijdens het mengen. Het gevolg hiervan was dat de CB-aggregaten kapot werden gemaakt en er relatief kleine CB-deeltjes overbleven.

Een van de belangrijke parameters die tijdens het verwerken invloed heeft op de afschuifspanning is de verwerkingstemperatuur. Hoe hoger de verwerkingstemperatuur van de kunststof, hoe lager de viscositeit is en daarmee kan de hoeveelheid ingebrachte afschuifspanning gereduceerd worden. Dit werd teruggezien in blend-systemen van polybuteentereftalaat en poly(etheen-co-ethylacrylaat) met CB waar bleek dat de geleidbaarheid van de composieten het laagst was bij gebruik van een lage verwerkingstemperatuur [44]. Ook bij het verwerken van rubbers en CB is gezien dat bij een toenemende verwerkingstemperatuur de geleiding toenam [45]. Hierbij moet echter wel worden opgemerkt dat in sommige systemen bij hoge temperaturen degradatie kan optreden. Wanneer tijdens degradatie crosslinking optreedt, kan de viscositeit juist toenemen bij hoge temperaturen met een verminderde geleidbaarheid tot gevolg [46].

Wanneer gekeken wordt naar bijvoorbeeld processen als spuitgieten en extruderen, dan zorgt de roterende beweging van de schroef voor afschuifspanningen tijdens het mengen. Bekend is dat bij hogere afschuifspanningen de viscositeit van het polymeer af kan nemen, waardoor een betere distributie van CB mogelijk is. Dit leidt ertoe dat bij hogere omwentelingssnelheden de geleidbaarheid beter kan zijn [44]. Het is echter niet zo dat een hogere omwentelingssnelheid altijd tot betere geleidbaarheid leidt [45, 46].

Tijdens het mengproces in de extruder is er continu sprake van het afbreken van CB-aggregaten en het distribueren van CB door de matrix. Dit is een dynamisch proces dat zich bij verhoogde temperaturen afspeelt. Het blijkt dat de geleidbaarheid van een PMMA/CB composiet, bij verhoogde temperatuur, afhankelijk is van de afschuiving en de concentratie CB [47]. Wanneer geen afschuiving werd toegepast, nam de geleidbaarheid bij concentraties beneden de percolatiedrempel langzaam toe als gevolg van diffusie van CB-deeltjes door de matrix. Onder invloed van afschuiving werd eerst een toename van de geleidbaarheid gezien voordat, bij verdere toename in afschuiving, de geleidbaarheid sterk verminderde. Deze observatie werd toegeschreven aan enerzijds een betere distributie van CB onder invloed van afschuiving, waardoor de geleidbaarheid toeneemt. Echter, als de afschuiving te groot wordt dan heeft dit tot gevolg dat CB-aggregaten kapot worden gemaakt en daardoor ook het geleidend netwerk wordt verbroken. Wanneer de afschuifspanning weer werd weggelaten kwam de geleidbaarheid weer terug als gevolg van diffusie van CB-deeltjes. Deze observaties zijn wel afhankelijk van de hoeveelheid CB. Bij grotere concentraties kon de afhankelijkheid van afschuiving op de geleidbaarheid bij verhoogde temperatuur niet worden waargenomen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat afschuifspanningen inderdaad het geleidend CB-netwerk kapot kunnen maken, maar vooral als de CB-concentratie dicht bij de percolatiedrempel ligt.

Een langdurige warmtebehandeling als annealen heeft een positief effect op de geleidbaarheid van composieten van thermoplasten en CB [47, 48]. Echter, in het geval van spuitgieten en extrusie is het vaak niet mogelijk om na de situatie van afschuiving (tijdens mengen in de extruder en inspuiten in de matrijs) het materiaal voldoende tijd afschuivingsvrij te laten staan en langzaam te koelen om de CB-deeltjes de tijd te geven zich te herstellen. Het is daarom belangrijk de percolatiedrempel van CB in een type kunststof te kennen, om na productie nog te kunnen beschikken over geleidende eigenschappen van het composiet. Voor commerciële doeleinden zal een compounder en/of producent dus moeten weten in welk verwerkingsproces het materiaal gebruikt zal worden [49].

Concluderend

CNT's en CB zijn geschikte additieven om een isolerende thermoplastische kunststof geleidende eigenschappen te geven. Echter, om dit te realiseren moeten meerdere aspecten, zowel met betrekking tot het additief, tot het polymeer en tot de verwerking, in overweging worden genomen.

Het literatuuronderzoek toont verder aan dat er nog geen eenduidige voorspelling te maken is van de minimale concentratie additief om een thermoplast geleidend te maken. Dit impliceert dat voor elke combinatie aan vuller/polymeer empirisch onderzocht moet worden wat de beste samenstelling additief/polymeer is om tot acceptabele geleidingseigenschappen te komen.

Niet alleen de combinatie aan materialen is belangrijk, ook de mate van afschuiving in het productieproces speelt een grote rol. Het is zaak om de hoeveelheid afschuiving tot een minimum te beperken. Voor nieuw te ontwerpen producten betekent dit dat hier al rekening mee gehouden moet worden bij het vormgeven van de matrijs waarin het product gespuits wordt.

Daarnaast is gebleken dat met name de verwerkingstemperatuur en de injectiesnelheid tijdens het spuitgietproces belangrijke parameters zijn die de overall eigenschap van geleidbaarheid beïnvloeden. Het is belangrijk bij bestaande producten, die men geleidend wil maken, de verwerkingstemperatuur zo hoog mogelijk te kiezen en de injectiesnelheid zo laag mogelijk.

Literatuurlijst

1. T.A. Misev and R. van der Linde, *Powder coatings technology: new developments at the turn of the century*. Progress in Organic Coatings, 1998. **34**(1): p. 160-168.
2. *What is powder coating?* Beschikbaar op: <http://www.powdercoating.org/page/whatisPC>. Laatste bezoekdatum: 02-11-2017
3. M. Kunaver, et al., *The degree of dispersion of pigments in powder coatings*. Dyes and Pigments, 2003. **57**(3): p. 235-243.
4. M. Osterhold and F. Niggemann, *Viscosity-temperature behaviour of powder coatings*. Progress in Organic Coatings, 1998. **33**(1): p. 55-60.
5. R. Mafi, et al., *Cure characterization of epoxy and polyester clear powder coatings using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA)*. Progress in Organic Coatings, 2005. **54**(3): p. 164-169.
6. G. Merfeld, et al., *Development of low temperature curing, 120°C, durable, corrosion protection powder coatings for temperature sensitive substrates*. Journal of Coatings Technology and Research, 2005. **2**(8): p. 661-668.
7. M. Bosma, et al., *A new method for the quantitative determination and prediction of sag and levelling in powder coatings*. Progress in Organic Coatings, 2011. **72**(1): p. 26-33.
8. S.J. García, A. Serra, and J. Suay, *New powder coatings with low curing temperature and enhanced mechanical properties obtained from DGEBA epoxy resins and Meldrum acid using erbium triflate as curing agent*. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2007. **45**(11): p. 2316-2327.
9. G. Wuzella, et al., *Influence of thermo-analytical and rheological properties of an epoxy powder coating resin on the quality of coatings on medium density fibreboards (MDF) using in-mould technology*. Progress in Organic Coatings, 2014. **77**(10): p. 1539-1546.
10. M. Badila, et al., *Powder coating of veneered particle board surfaces by hot pressing*. Progress in Organic Coatings, 2014. **77**(10): p. 1547-1553.
11. A. Dupuis, et al., *Improving adhesion of powder coating on PEEK composite: Influence of atmospheric plasma parameters*. Applied Surface Science, 2015. **357**(Part A): p. 1196-1204.
12. T. Stobbe, et al., *Poedercoaten op kunststoffen*, Professorship for Polymer Technology, Windesheim University of Applied Sciences, Document nummer: LKT-RE104731-1501, 2015, Zwolle, 1-55
13. L. Carrino, G. Moroni, and W. Polini, *Cold plasma treatment of polypropylene surface: a study on wettability and adhesion*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **121**(2): p. 373-382.
14. X. Yan, et al., *Surface roughness and hydrophilicity enhancement of polyolefin-based membranes by three kinds of plasma methods*. Surface and Interface Analysis, 2015. **47**(4): p. 545-553.
15. S. Farris, et al., *The fundamentals of flame treatment for the surface activation of polyolefin polymers – A review*. Polymer, 2010. **51**(16): p. 3591-3605.
16. M. Keulen van, *Powder coating on three dimensional shaped plastic objects*, Professorship for Polymer Technology, Windesheim University of Applied Sciences, BSc Internship report, 2017, Zwolle, 1-35
17. G. Willemsen, N.P. Boks, and M.D.C. Topp, *Powdercoating on plastics; Effects of gas plasma on adhesion*, Professorship for Polymer Engineering, Windesheim University of Applied Sciences, MSc thesis, Document nummer: LKT-RE-106950-1704, 2016, Zwolle,
18. M.H. Al-Saleh and U. Sundararaj, *A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites*. Carbon, 2009. **47**(1): p. 2-22.
19. K. Nagata, H. Iwabuki, and H. Nigo, *Effect of particle size of graphites on electrical conductivity of graphite/polymer composite*. Composite Interfaces, 1998. **6**(5): p. 483-495.
20. J. Li and J.-K. Kim, *Percolation threshold of conducting polymer composites containing 3D randomly distributed graphite nanoplatelets*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(10): p. 2114-2120.
21. S.I. Heo, et al., *Influence of particle size and shape on electrical and mechanical properties of graphite reinforced conductive polymer composites for the bipolar plate of PEM fuel cells*. Advanced Composite Materials, 2006. **15**(1): p. 115-126.
22. G.G. Tibbetts, et al., *A review of the fabrication and properties of vapor-grown carbon nanofiber/polymer composites*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(7): p. 1709-1718.
23. K. Kalaitzidou, H. Fukushima, and L. Drzal, *A Route for Polymer Nanocomposites with Engineered Electrical Conductivity and Percolation Threshold*. Materials, 2010. **3**(2): p. 1089-1103.
24. J.-C. Huang, *Carbon black filled conducting polymers and polymer blends*. Advances in Polymer Technology, 2002. **21**(4): p. 299-313.
25. I. Chodak and I. Krupa, *"Percolation effect" and mechanical behavior of carbon black filled polyethylene*. Journal of Materials Science Letters, 1999. **18**(18): p. 1457-1459.

26. F. Du, J.E. Fischer, and K.I. Winey, *Effect of nanotube alignment on percolation conductivity in carbon nanotube/polymer composites*. Physical Review B, 2005. **72**(12): p. 121404.
27. T. Belin and F. Epron, *Characterization methods of carbon nanotubes: a review*. Materials Science and Engineering: B, 2005. **119**(2): p. 105-118.
28. R.H. Baughman, A.A. Zakhidov, and W.A. de Heer, *Carbon Nanotubes - the Route Toward Applications*. Science, 2002. **297**(5582): p. 787.
29. B.P. Singh, et al., *Effect of length of carbon nanotubes on electromagnetic interference shielding and mechanical properties of their reinforced epoxy composites*. Journal of Nanoparticle Research, 2013. **16**(1): p. 2161.
30. W. Bauhofer and J.Z. Kovacs, *A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(10): p. 1486-1498.
31. K. Lozano, J. Bonilla-Rios, and E.V. Barrera, *A study on nanofiber-reinforced thermoplastic composites (II): Investigation of the mixing rheology and conduction properties*. Journal of Applied Polymer Science, 2001. **80**(8): p. 1162-1172.
32. I. Alig, et al., *Conductivity spectroscopy on melt processed polypropylene–multiwalled carbon nanotube composites: Recovery after shear and crystallization*. Polymer, 2007. **48**(4): p. 1020-1029.
33. S. Pegel, et al., *Dispersion, agglomeration, and network formation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate melts*. Polymer, 2008. **49**(4): p. 974-984.
34. M. Wegrzyn, et al., *The influence of injection molding parameters on electrical properties of PC/ABS-MWCNT nanocomposites*. Journal of Applied Polymer Science, 2013. **130**(3): p. 2152-2158.
35. T. Villmow, et al., *Influence of injection molding parameters on the electrical resistivity of polycarbonate filled with multi-walled carbon nanotubes*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(3): p. 777-789.
36. J. Tiusanen, D. Vlasveld, and J. Vuorinen, *Review on the effects of injection moulding parameters on the electrical resistivity of carbon nanotube filled polymer parts*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(14): p. 1741-1752.
37. M. Mahmoodi, et al., *The electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of injection molded multi-walled carbon nanotube/polystyrene composites*. Carbon, 2012. **50**(4): p. 1455-1464.
38. P.F. Rios, et al., *Impact of injection-molding processing parameters on the electrical, mechanical, and thermal properties of thermoplastic/carbon nanotube nanocomposites*. Journal of Applied Polymer Science, 2011. **120**(1): p. 70-78.
39. H. Deng, et al., *Effect of melting and crystallization on the conductive network in conductive polymer composites*. Polymer, 2009. **50**(15): p. 3747-3754.
40. K. Cheah, G.P. Simon, and M. Forsyth, *Effects of polymer matrix and processing on the conductivity of polymer blends*. Polymer International, 2001. **50**(1): p. 27-36.
41. W. Zhang, A.A. Dehghani-Sanij, and R.S. Blackburn, *Carbon based conductive polymer composites*. Journal of Materials Science, 2007. **42**(10): p. 3408-3418.
42. *Specialty Carbons for polymer Compounds*. Beschikbaar op: http://www.imerys-graphite-and-carbon.com/wordpress/wp-app/uploads/2014/04/Polymer_compounds1.pdf. Laatste bezoekdatum: 02-11-2017
43. Y. Song, Y. Tan, and Q. Zheng, *Linear rheology of carbon black filled polystyrene*. Polymer, 2017. **112**(Supplement C): p. 35-42.
44. J.F. Feller, *Conductive polymer composites: Influence of extrusion conditions on positive temperature coefficient effect of poly(butylene terephthalate)/poly(olefin)–carbon black blends*. Journal of Applied Polymer Science, 2004. **91**(4): p. 2151-2157.
45. N.C. Das, T.K. Chaki, and D. Khastgir, *Effect of processing parameters, applied pressure and temperature on the electrical resistivity of rubber-based conductive composites*. Carbon, 2002. **40**(6): p. 807-816.
46. J.-F. Feller and É. Petitjean, *Conductive polymer composites (CPC): influence of processing conditions, shear rate and temperature on electrical properties of poly(butylene terephthalate)/poly(amide12-b-tetramethyleneglycol) – carbon black blends*. Macromolecular Symposia, 2003. **203**(1): p. 309-316.
47. J. Krüchel, et al., *Conductivity of polymethylmethacrylate filled with carbon black or carbon fibres under oscillatory shear*. Polymer, 2012. **53**(2): p. 395-402.
48. Y. Pan, et al., *Viscoelastic and electrical behavior of poly(methyl methacrylate)/carbon black composites prior to and after annealing*. Polymer, 2017. **113**(Supplement C): p. 34-38.
49. N. Probst, C. Van Bellinghen, and H. Van den Bergh, *Compounding with conductive carbon black*. Plastics, Additives and Compounding, 2009. **11**(3): p. 24-27.

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.

Deze publicatie bevat een literatuurstudie naar het geleidbaar maken van kunststoffen zodat deze gepoedercoat kunnen worden. Het verslag is onderdeel van een reeks onderzoeken naar de mogelijkheden om zowel thermoplasten als thermoharders te kunnen voorzien van een poedercoating. Door literatuuronderzoek en toegepast onderzoek te combineren hoopt het lectoraat bij te dragen aan industriële productie van gepoedercoate kunststoffen.

Green.PAC
Polymer Application Centre

FIBERNEERING



DSM
BRIGHT SCIENCE. BRIGHTER LIVING.

**VAN
WIJHE
VERF**