

Testsystem til ultraaccelereret vejrpåvirkning (UAWS) I: Design og funktionelle overvejelser

Af Henry K. Hardcastle, Atlas Material Testing Technology LLC; Gary J. Jorgensen, National Renewable Energy Laboratory og Carl E. Bingham, National Renewable Energy Laboratory.

Denne artikel er tidligere blevet udgivet i sin helhed i *CoatingsTech*, August 2010, "Ultra-Accelerated Weathering System I: Design and Functional Considerations."

Introduktion

Metoder til ultraaccelereret vejrægthedsstest adskiller sig væsentligt fra de tidligere tidstro (ikkeaccelererede) og "moderat accelererede" testmetoder. Ved vejrpåvirkning i realtid eksponeres prøveemnerne direkte for vejrlig som det vil være ved slutbrugen eller for værst tænkelige miljømæssige betingelser som de vil være ved slutbrugen. Ikkeaccelererede eksponeringer i realtid foretages i det sydlige Florida eller Arizona på prøveemner som er monteret på stativer der vender direkte mod solen.



Figur 1: Testsystem til ultraaccelereret vejrpåvirkning (UAWS), opstillet i Arizona.

Moderat accelererede teknikker accelererer typisk UV-strålingseksponeringer mellem 2 og 10 gange i forhold til realtids-eksponeringer i det sydlige Florida. Et historisk gennemsnit for 5° global eksponering i det sydlige Florida er ca. 300 M J/m² UV (295-385 nm) pr. år. Et gennemsnit for moderat accelereret (~2X lysintensitet) kunstig xenoneksponering iht. SAE J2527 ^[1] er ca. 1040 M J/m² UV (295-385 nm) pr. år. Et historisk gennemsnit for moderat accelereret naturlig eksponering iht. ASTM G90 ^[2] er ca. 1500 M J/ m² UV pr. år.

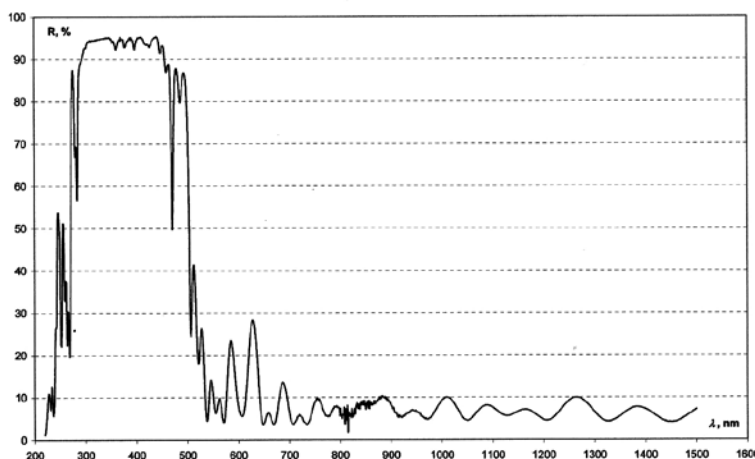
Med teknikkerne til ultraaccelereret vejrpåvirkning forsøger man at øge UV-strålingseksponeringen pr.

tidsenhed drastisk i forhold til hvad man kan opnå med moderat accelererede teknikker. Men en så kraftig intensitet afføder en afgørende begrænsning: materialeeksponeringstemperaturen er en co-variabel for den øgede lysintensitet, og moderat accelererede teknikker har været begrænset af mange materials maksimale tilladelige eksponeringstemperatur ^[3,4]. Derfor skal de ultraaccelererede metoder have en alternativ prøvetemperaturstyring som ikke ses ved tidstro eller moderat accelererede teknikker.

Målet for UAWS-projektet var ikke blot at eksponere materialer for høj lysintensitet. Det er forholdsvis nemt at øge eksponeringens lysintensitet ved at flytte prøveemnerne tættere på de kunstige lyskilder og bruge afstandsloven, eller at eksponere materialer for flere lyskilder hhv. for flere reflekterede billeder af solen. Den virkelige udfordring ved dette projekt var at eksponere prøveemnerne for ultrahøje lysintensiteter der efterlignede det naturlige solspektrum uden at brænde eller smelte testmaterialerne eller på anden måde forårsage urealistiske termiske skader.

Systemet man har udviklet, er et udendørs accelereret apparat til vejrpåvirkning. Det skal i sig selv være tilstrækkeligt robust til at kunne bruges udendørs, og det skal kunne modstå vejrelementer med en høj grad af pålidelighed. Prøveemnerne skulle eksponeres for en lysintensitet der var cirka en størrelsesorden større end i konventionelle accelererede vejrægthedsapparater, så man kan undersøge stærkt accelererede eksponeringer og effekterne af betydeligt højere intensiteter. For at kunne opfylde kravene skulle apparatet have en direkte normal optisk koncentrationsfaktor på ca. 100:1 (defineret som forholdet mellem arealet af de stærkt reflekterende facetter og målområdet). Spejlfacetterne skulle have en høj spektralrefleksion i solens UV-spektrum og ikke i overdreven grad fordreje det reflekterede solspektrum.

Gerlock, Nichols og andre ved Ford Research har demonstreret de mulige konsekvenser af et unaturligt UV-spektrum på fotokemien ved nedbrydning af autolakker [5]. Temperatur er en afgørende begrænsning ved højintens vejrpåvirkning. Systemet kunne ikke varme prøverne excessivt op. Varmedeformation, overskridelse af den indledende glasovergang, smeltning, brænding og andre varme- og temperaturrelaterede effekter udgør ofte de største udfordringer for systemer til accelereret vejrægthedstest. Systemet der blev udviklet og brugt i denne artikel ses på figur 1.



Figur 2: Spejlfladens reflektansspektrum.

Struktur

Reflekterende facetter

De reflekterende facetter er systemets absolut vigtigste komponenter. Hver facet er påført en 96-lags selektiv reflekterende belægning. Den anvendte coatingteknologi er baseret på konventionel elektronstrålefordampning til aflejring af interferenscoatinger. Coatingen er et system bestående af flere kvartbølgeinterferens-reflektanspakker der hver især består af et vekslende lag materialer med høje og lave brydningsindekser. Det absolutte reflektansspektrum der opnås med denne proces, vises på figur 2.

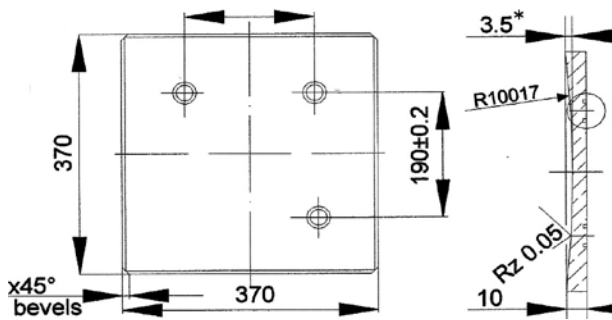
Den reflekterende interferensbelægnings vigtigste driftsegenskaber inkluderede 1) at den giver ekstremt høj reflektans i UV-delen af solspekret som er ansvarlig for fotonedbrydningen af testmaterialer, 2) at den dæmper de nær infrarøde (og langbølgede synlige) dele af solspekret og bidrager til den termiske belastning men ikke fotonedbrydningen af testmaterialer og 3) at den giver en robust reflekterende overflade til udendørs brug.

Den reflekterende 96-lags belægning blev strøget på 29 fokuseringselementer af K-8 borosilikatkronglas. Hver facet blev slebet (før coatingen blev påført), poleret til 10 meters radius og facetslebet langs kanterne. 3 fastgørelsespunkter til montering og justering blev slebet ind på bagsiden af hver facet. Figur 3 viser udformningen af de reflekterende facetter.

Monterings-/justeringsbeslag blev fastgjort til bagsiden af hver reflekterende facet. På den måde kunne hver enkelt facet fastmonteres stabilt på koncentratoren og justeres individuelt.

Koncentrator

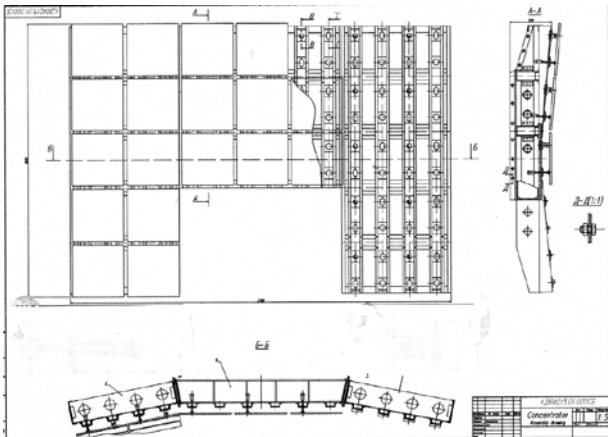
Koncentratoren, som er designet og konstrueret af "Institute for Laser Optical Technology", er den samlede gruppe af facetter der opsamler sollys og reflekterer og koncentrerer lyset på et målområde. Koncentratoren er designet til at holde facetterne i en position der ligner den konkave overflade på en 10-meters sfære. Spejlfacetternes bæreramme inkluderede designelementer der gav en radius på både vandrette og lodrette akser. De 29 reflekterende facetter blev herefter fastgjort til støttestrukturen ved hjælp af 3-punktsmonterings-/justeringsbeslagene. For at imødekomme støttestrukturens krumning og facetinterferens blev 4 af facetterne beskåret en anelse. Den deraf følgende kollektorkonstruktion ses på figur 4. Den fokuserede stråle i målfladen ses på figur 5.



Figur 3: Konstruktionen af det reflekterende element (enheder i mm).

Målområde

Hver af de reflekterende facetters 10-meters radius og støttestrukturens 10-meters konkave radius giver et fokuserende optisk system med en brændvidde på ca. 5 meter. For at kunne opnå den direkte normale koncentrationsfaktor på 100:1 blev prøveemner monteret ca. 2,5 m i retning af brændpunktet i forhold til kollektoren. For at imødekomme denne position blev der i målområdet konstrueret en støttearm som blev fastgjort til koncentratorstrukturen således at hele systemet kunne være på linje med og spore solen. I denne konfiguration gav dette et 150 x 150 mm firkantet målområde med ca. 100:1 direkte normal optisk koncentration.



Figur 4: Konstruktionen af kollektorens støttestruktur.

Støttearmen har en række faste tilslutningspunkter til forskellige prøvemontøringsbeslag som er placeret i 2,5 meters afstand fra reflektoren i retning mod fokuspunktet. Denne fleksible monteringsplatform har plads til et udvalg af prøvetilbehør, og er således egnet til forskellige materialer og monteringskonfigurationer, og opfylder krav til diverse forskningsprogrammer. Nogle af disse konfigurationer har indtil nu omfattet beslag til radiometriske instrumenter, såvel understøttet som ikkeunderstøttet prøvemontøring, prøveholdere der spændes fast på forsiden, luftkølede mål, monteringsoverflader med vandkølet bagside, flere målområdeholdere og specielt konstruerede prøvekamre. Tilførselsledninger der løber langs med støttearmen, forsyner målområdet med elektricitet, termoelementledninger til temperaturmåling, koldt vand og vakuum. Derudover er aksiale kompressorer

og stråledæmpningsled monteret på selve støttearmen. Denne fleksibilitet har stor betydning hvis man skal tage højde for de mange forskellige materialetyper der kan undersøges med de accelererede testprogrammer.

Koncentratoren og målområdets støttearm monteres på et ekstremt nøjagtigt, kommercielt tilgængeligt solsporingssystem der dagen igennem sikrer at koncentratoren vender vinkelret mod solen (systemet bruges ikke når det er overskyet. Det første apparat er installeret, og kører i øjeblikket på Atlas' DSET laboratorier (34° nord, 112° vest).

Ensartethed i målområdet

Atlas Testing Services Arizona fremstillede en serie fluxkort der skulle karakterisere sigtet og fluxfordelingen hos UAWS. En 355 x 460 mm flammesprøjtet aluminiumsplade blev brugt som mål. Fluxkortlægningsystemet bestod af et kamera, en linse og en plade til registrering af billeder sammen med Beamview software fra Coherent. På figur 6 ses systemets bedømmelse af målsensartetheden.

Billedet til venstre på figur 6 er en konturtegnning af målet, og viser billedets styrke i forhold til fluxintensiteten. Den hvide firkant er det nominelle 150 x 150 mm målområde til prøveemnerne. Til højre ses et 3D-billede. Med alle facetter afdækket repræsenterer dette den fulde 100X af UV-spektret. Med Beamview-softwaren var standardafvigelsen for ensartetheden af intensiteten inde i boksen $\pm 4,6\%$ af gennemsnittet.



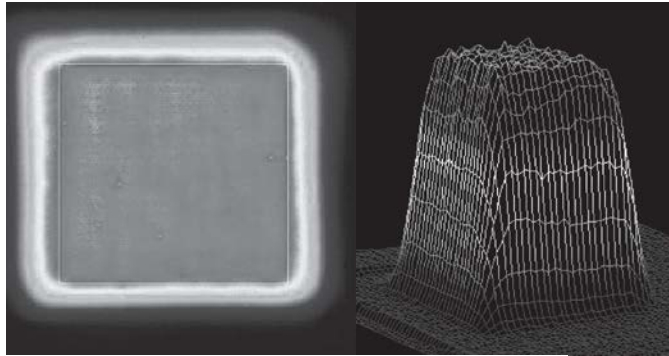
Figur 5: Reflekterende facetter, kollektorstruktur og fokuseret stråle i målområdet.

Funktion

Radiometri

Ændringer i materialet måles typisk som en funktion af lyseksposering. Materialenedbrydende adfærd karakteriseres som regel som en nedbrydningskurve hvor ændrede egenskaber vises på y-aksen og UV-strålingseksposering på x-aksen. Radiometri er typisk en central del af forvitningsundersøgelser, og skal gennemtænkes omhyggeligt og korrekt.

Den direkte normale UV-bestrålingsstyrke ganget med facetternes UV-refleksion ganget med antallet af facetter ganget med koncentrationsfaktoren for hver facet bruges til at beregne bestrålingsstyrken i målområdet. Den øjeblikkelige bestrålingsstyrke ganget med eksponeringens varighed resulterer i strålingseksposeringen af prøveemnerne i 295–385 nm spektralområdet udtrykt i MJ/m².



Figur 6: Billeder fra målinger af flux-ensretningen.

Den generelle tilgang til korrekt håndtering af accelereret strålingseksposering er udviklet, foreskrevet og veldokumenteret af standardkommissionerne. Den eneste tilpasning der er nødvendig, er at gøre rede for koncentrationen i kraft af fokuseringsoptikken. Atlas og NREL (det nationale laboratorium for vedvarende energi) har allerede infrastrukturen til at anvende denne metode. Metoden er teoretisk set problemfri og verificeret via empiriske målinger.

Ud fra disse koncepter er det muligt at beregne den forventede strålingseksposering ved brug af UAWS og at sammenligne strålingsmængden i UAWS med ikkeaccelererede og moderat accelererede eksponeringsmetoder. Fx viser historiske observationer at laboratoriet i Arizona gennemsnitligt udsættes for 162 MJ/m² UV direkte normal strålingseksposering pr. år. Baseret på ovennævnte beregning med 28 facetter, en 0,95 UV-refleksion på 0,95 MJ/m² og en optisk koncentration på 4, kan apparatet give et årligt gennemsnit på ca. 17000 MJ/m² UV i målområdet.

Til sammenligning indikerer tidstro observationer i Florida ca. 275 MJ/m² UV-strålingseksposering på en 45° sydvendt overflade på et enkelt år. Hvis man dividerer den potentielt gennemsnitlige årlige UV-eksponering i det ultraaccelererede apparat med den historiske gennemsnitlige årlige UV-stråling på 45° syd i det sydlige Florida (17000/275), får man en accelerationsfaktor på ca. 63. Baseret på disse antagelser synes det muligt på et enkelt år i det ultraaccelererede apparat at opnå hvad der svarer til 63 års 45° UV-strålingseksposering i det sydlige Florida. Lignende sammenligninger indikerer at det ville tage ca. 13-17 år at opnå den samme strålingseksposering for xenon iht. SAE J2527 (afhængigt af indstillinger og antagelser) som efter et enkelt år i et ultraaccelereret apparat. Ligeledes ville det tage ca. 13-14 års eksponering efter den gældende ASTM G90 (afhængigt af det historiske gennemsnit) at opnå samme strålingseksposering som efter et enkelt år i et ultraaccelereret apparat.

Eksponeringstemperatur

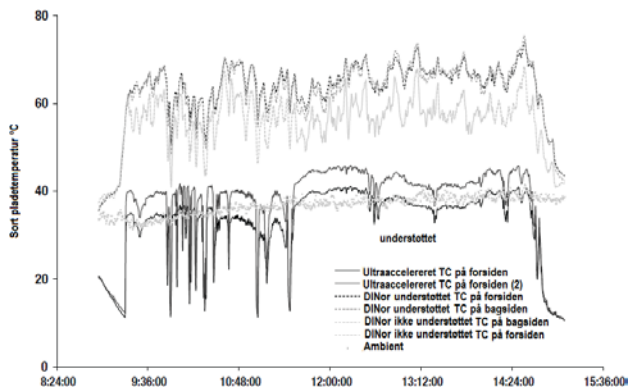
Eksponeringstemperaturer for prøveemner der udsættes for ultraaccelereret vejrpåvirkning, er en kompleks funktion af materialekarakteristikker og vejrlig. Derfor vil et prøveemnes faktiske temperatur under en ultraaccelereret eksponering afhænge delvist af materialet og delvist af eksponeringen.

UAWS' eksponeringstemperaturer for sorte belægninger blev sammenlignet med direkte normal (DiNor) naturlige eksponeringstemperaturer ved brug af "T"-varmeelementer som er svejset til ca. 150 x 100 x 0,76 mm store malede plader af autostål. Varmeelementerne blev svejset til de sorte pladers eksponerede overflade. Pladerne blev herefter sprøjtet med grunder samt en stærkt absorberende sort maling.

Nogle af pladerne blev monteret direkte vinkelret på solen med understøtning (monteret på krydsfiner) mens andre blev beskåret til ca. 75 x 55 mm og monteret i UAWS' måleområdet understøttet af en vandafkølet kølevalse. Afkølet vand blev cirkuleret til kølevalsen for at muliggøre konduktiv køling på bagsiden af den sorte plade. Kølevandet blev indstillet til systemets minimumstemperatur for at levere data om systemets mindste temperaturkapacitet sammenlignet med de sorte pladers naturlige eksponeringstemperaturer.

Pladerne blev sideløbende eksponeret for solen d. 18. maj 2009. Fuld ultraaccelereret styrke (28 facetter) blev brugt til at reflektere UV-lyset på den eksponerede sorte plade der sad monteret på en vandkølet kølevalse.

Temperaturer på sortmalede stålplader på ultraaccelereret med
konduktiv køling sammenlignet med direkte normale eksponeringer 18/05/09



Figur 7: Ultra-accelererede og direkte sorte plade-temperaturer.

Temperaturobservationerne ses på figur 7. Dataene indikerer at de sorte plader fra den ultraaccelererede eksponering har en temperatur der ligger tæt på luften og desuden et godt stykke under temperaturerne for sorte plader fra en direkte normal understøttet eksponering.

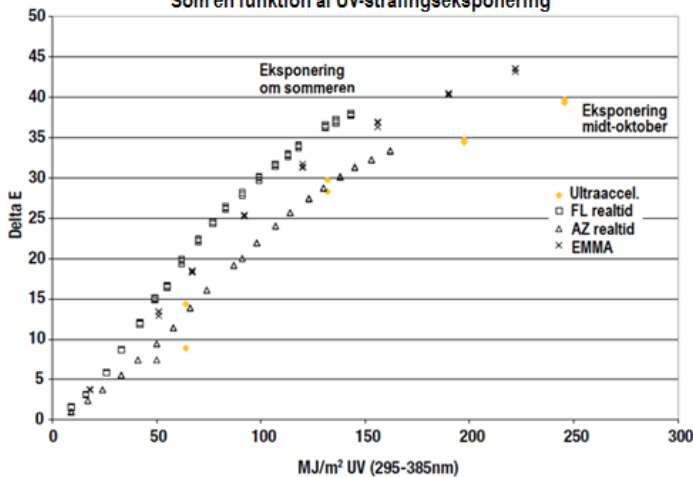
Korrelation og acceleration

Hver gang der bliver udviklet en ny teknik til vejrpåvirkning, er det første skridt typisk at vise korrelationen til udendørs eksponeringer i realtid samt accelerationsevnen. Til denne indledende korrelations- og accelerationsundersøgelse benyttede man det europæiske standardreferencemateriale ORWET der produceres af EMPA. ORWET er en tynd pigmenteret film på et aluminiumsunderlag, en maling af melaminharpiks med en Ciba-pigment. ORWET standardreferencematerialet er blevet stærkt præget til at ændre farve som en funktion af eksponering for UV-stråler, og er specielt designet til anvendelse som referencemateriale til test af metoder til vejrpåvirkning^[6]. Materialet ændrer hurtigt farve når det eksponeres for UV-stråling.

En simpel sammenligning mellem forskellige typer af eksponering med ORWET viser korrelation som en funktion af strålingseksponering og acceleration som en funktion af eksponeringstid (dage). Korrelationsdata indikerer hvor godt det nye apparat simulerer den naturlige nedbrydningsfunktion. Accelerationsdata indikerer hvor hurtigt apparatet udfører simuleringen. En specifik materialenedbrydningsfunktion afhænger i høj grad af materialekarakteristikkerne, og dermed er nedbrydningsfunktionerne for en model af et standardreferencemateriale muligvis ikke en indikation for andre materialer med andre karakteristika. Referencerne 7–13 viser eksempler på andre materialer udsat for ultraaccelereret eksponering.

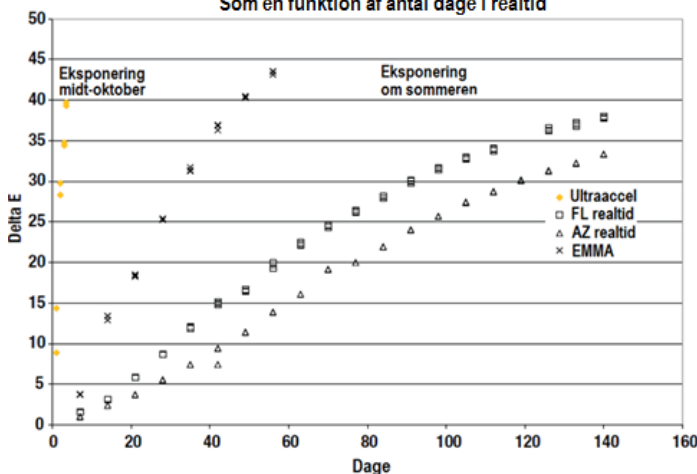
I sommeren 2008 blev ORWET-prøver eksponeret iht. ASTM G7-05 hos Atlas Testing Services' udendørs eksponeringslaboratorier i hhv. Florida (25° 52' N, 80° 52' V) og Arizona (33° 29' N, 112° 8' V). Prøverne var ikke understøttet, og var vendt 5° syd for at opnå realtidseksponering. Ekstra prøveemner fra det samme parti blev desuden udsat for naturlig moderat accelereret eksponering på testfaciliteterne i Arizona. Disse test var i overensstemmelse med

Sammenligning mellem ORWET-eksponeringer i hhv. det sydlige Florida, Arizona, EMMA og et ultraaccelereret apparat Som en funktion af UV-strålingseksponering



Figur 8

Sammenligning mellem ORWET-eksponeringer i hhv. det sydlige Florida, Arizona, EMMA og et ultraaccelereret apparat Som en funktion af antal dage i realtid



Figur 9

ASTM G90-05, og havde omtrent den samme starttid som realtidseksponeringerne. UV-eksponeringen blev målt i overensstemmelse med standarderne G90 og G7 ASTM. Ekstra prøveemner fra det samme parti blev i løbet af efteråret 2008 også eksponeret i UAWS-enheden som var opstillet på Atlas' testfaciliteter i Arizona.

Ultraaccelererede eksponeringsprøver blev monteret med understøtning af den samme køleblok som blev brugt til at opnå ovennævnte sorte pladetemperaturer. UV-strålingen blev målt som tidligere beskrevet i denne artikel. I løbet af eksponeringerne blev prøveremner fjernet periodisk, målt for farveændring (Delta E) og reflektans og sat tilbage for fortsat eksponering. På figur 8 ses korrelationsgrafen der viser farveændring som en funktion af UV-strålingseksponering og sammenligner de forskellige eksponeringstyper. På figur 9 ses accelerationsgrafen der viser farveændringen som en funktion af eksponeringens varighed i dage og sammenligner de forskellige eksponeringstyper.

Korrelationen der vises på figur 8, har en række betydelige konsekvenser. For det første er farveændringen hos belægningen på ORWET-standardreferencematerialet tilnærmelsesvis korrekt ved ultraaccelererede hastigheder sammenlignet med naturlig eksponering i Arizona. Dette er et imponerende resultat da den gængse opfattelse har været at organiske belægninger, pga. vanskeligheder forbundet med passende styring af prøvetemperaturen, ikke kunne testes realistisk og pålideligt ved mere end ca. 10 SUN. Følgelig kan meget forkortede testtider erstattes med langtids-eksponeringer ved lav intensitet som vist på figur 9. Referencerne 7-13 synes at indikere at ultraaccelereret test også er egnet til andre materialer. Hvis det er verificeret for specifikke materialekarakteristikker, giver ultraaccelereret vejrpåvirkning mulighed for meget kortere udviklingscykluser for nye produkter; og fabrikanter ville ikke være tvunget til at vente måneder eller år for at konstatere om potentielle coatingsystemer er tilstrækkelig holdbare når de eksponeres for UV-stråler. Dette kan give en afgørende konkurrencemæssig fordel og stærkt forbedrede nye produkter.

Resumé

Accelereret vejrpåvirkning skal indledes med realtidseksponering og eksponering for vejrpåvirkning ved vejrlig som det vil være ved slutbrugen eller ved værst tænkelige miljømæssige betingelser som de vil være ved slutbrugen. Uden sådan et grundlag for sammenligning med resultater fra accelereret vejrpåvirkning vil man stå tilbage med yderst tvivlsomme slutninger og uhensigtsmæssige ekstrapolationer. Derudover skal vejrpåvirkningsdata fra en række forskellige kilder bruges til at træffe vigtige beslutninger om et materiales vejrsæthed. Disse overvejelser er især vigtige da industrier kræver stadig større acceleration af materialevejrægtedstest.

Grundet industriens efterspørgsel har man i kommercielt øjemed udviklet et ultraaccelereret vejrpåvirkningssystem som gør det muligt at eksponere materialer for nye niveauer af UV-stråling. I systemet kan prøveemner på et enkelt år eksponeres for hvad der svarer til ca. 63 år 45° UV-stråling i det sydlige Florida (eller 56 års 5° UV-stråling i det sydlige Florida). Derudover kan ultraaccelererede eksponeringer udføres med brug af naturligt solspektrum mens materialetemperaturerne holdes på et niveau der passer til mange forskellige materialetyper.

UAWS er blevet installeret og anvendt med et godt resultat. De indledende data indikerer et potentiale til korrelation med realtids-eksponeringer ved ultraaccelererede nedbrydningshastigheder for visse materialer. Resultaterne berettiger til yderligere kontroleksponeringer med forskellige materialer samt systemændringer til indføring af fugt og andre vejrpåvirkningsvariabler, og disse planlægges for den nærmeste fremtid.

For yderligere information, kontakt Strenometer ApS på salg@strenometer.dk

Referencer

- [1] SAE J2527 "Accelerated Exposure of Automotive Exterior Materials Using a Controlled Irradiance Water Cooled Xenon-Arc Apparatus," 2003 SAE Handbook, vol. 1 Warrendale, PA, Society of Automotive Engineers, Inc., 2003.
- [2] ASTM G90-05 "Practice for Performing Accelerated Outdoor Weathering of Non-Metallic Materials Using Concentrated Natural Sunlight," 2005 Annual Book of ASTM Standards, vol. 14.02, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 2005.
- [3] USA patentno.: US 6,659,638 B1, "Dynamic Temperature Controlled Accelerated Weathering Test Apparatus", december 2003.
- [4] USA patentno.: US 7,454,990 B2, "Variably Controlled Accelerated Weathering Test Apparatus", november 2008.
- [5] Gerlock, J.L.; Peters, C.A.; Kucherov, A.V.; Misovoski, T.; Seubert, C.M.; Carter, R.O. III og Nichols, M.E. "Testing Accelerated Weathering Tests for Appropriate Weathering Chemistry: Ozone Filtered Xenon Arc." *Journal of Coatings Technology*, 75, nr. 936, 35–45 (2003).
- [6] "Accelerated Testing: Nature and Artificial Weathering in the Coatings Industry" by Ulrich Schultz, Vincentz Network, Hanover Germany, 2009, p. 138.
- [7] Jorgensen, G.; Bingham, C.; Netter, J.; Goggin, R.; Lewandowski, A. Chapter 11: "A Unique Facility for Ultra-Accelerated Natural Sunlight Exposure Testing of Materials". Bauer, D. R.; Martin, J. W., eds. *Service Life Prediction of Organic Coatings: A Systems Approach*; baseret på et symposium fra september 1997 symposium i Breckenridge, CO. ACS symposium serie nr. 722. Washington, DC: American Chemical Society, 1999, pp. 170-185.
- [8] Jorgensen, G.; Bingham, C.; King, D.; Lewandowski, A.; Netter, J.; Terwilliger, K.; Adamsons, K. Chapter 6: Use of Uniformly Distributed Concentrated Sunlight for Highly Accelerated Testing of Coatings. Martin, J. W.; Bauer, D. R., eds. *Service Life Prediction: Methodology and Metrologies; International Symposium on Service Life Prediction in Organic Coatings, 1999, Monterey, CA. ACS Symposium Series, Vol. 805. Washington, DC: American Chemical Society, 2002, pp. 100–118.*
- [9] Jorgensen, G.; Brunold, S.; Carlsson, B.; Heck, M.; Köhl, M.; Möller, K. Durability of Polymeric Glazing Materials for Solar Applications. Reichert, T., ed. *1st European Weathering Symposium on Natural and Artificial Ageing of Polymers, September 2003, Prague, Czech Republic. Karlsruhe, Germany. DWS Werbeagentur und Verlag GmbH, 2004, pp. 201–215.*
- [10] Jorgensen, G. J. Phenomenological Approach to Obtaining Correlations Between Accelerated and Outdoor Exposure Test Results for Organic Materials. *Journal of Testing and Evaluation*. Vol. 32(6), November 2004, pp. 494–499.
- [11] Jorgensen, G.; Terwilliger, K.; Bingham, C.; Milbourne, M. Durability of Polymeric Glazing and Absorber Materials, NREL Report No. CP-520 -37041, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2005.
- [12] Jorgensen, G. J.; Terwilliger, K. M.; Bingham, C. E. Durability of Polymeric Glazing and Absorber Materials, NREL Report No. CP-520 -39580, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2006.
- [13] Jorgensen, G. J. Optical and Mechanical Durability of Polymeric Materials for Solar Collectors. Society of Plastics Engineers, ANTEC 2007, pp. 2283–228..