

# Bepaling van de thermische diffusiedikte van een deklaag door middel van fothermische infrarood-thermografie

## Inleiding

De functionaliteit en duurzaamheid van veel materialen wordt voor een niet onbelangrijk deel gerealiseerd door een gepaste deklaag. Deklagen worden gebruikt om te beschermen tegen corrosie en slijtage, om een goede glijding toe te laten, voor esthetische doeleinden, om het gevoel bij aanraking te optimaliseren, om de mate van bevochtiging te tunen, en voor nog vele andere redenen. Karakteriseren van de kwaliteit van de deklagen is daarom van groot belang.

De volledig optische aanpak van fothermische methoden maakt deze zeer populair en krachtig voor de thermische karakterisering van dunne lagen. De bandbreedte van de gebruikte optische excitatie is dermate hoog dat ze een tijdsresolutie mogelijk maken die ruimschoots voldoende is om warmtetransport te volgen over zeer korte afstanden, en dus om zeer kleine structuren te onderzoeken. Ruwweg wordt de afstand over dewelke warmte kan diffunderen in een tijd  $t$ , de zogenaamde thermische diffusielengte  $\mu$ , gegeven door  $\mu=(\alpha t)^{1/2}$ , met  $\alpha$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] de thermische diffusiviteit van het materiaal, die weergeeft hoe vlot warmte doorheen het materiaal kan diffunderen [1].

In dit artikel gaan we de haalbaarheid na van een fothermische techniek die erop gericht is de dikte van een deklaag op een substraat te bepalen en gebruik maakt van contactvrije infrarood (IR) thermografie of radiometrie. Aangezien de mogelijkheden, de beperkingen en de nodige experimentele parameters om dit te realiseren sterk afhangen van de thermische diffusiviteit van het deklaagmateriaal, werd deze ook experimenteel bepaald.

## Meetconcept

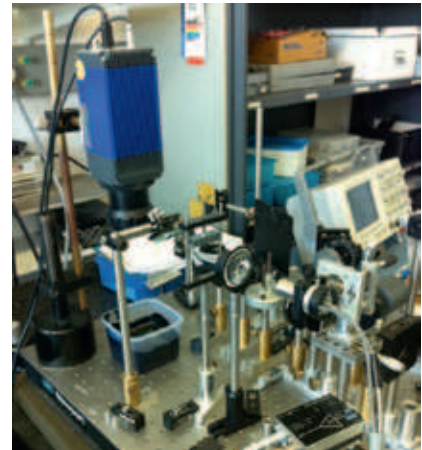
Om de thermische diffusiviteit van de deklaag (i.c. de verf) te bepalen hebben we het oppervlak van een 7cm 'ther-

misch dikke' laag belicht met behulp van een Coherent FAP System laser (30 Watt maximum vermogen) ingesteld op ongeveer 5 Watt vermogen en met een golflengte van 810 nm. Het licht werd afgebeeld op een strip (verder de 'laserlijn' genoemd) van 4mm breed en 12mm lang. Met 'thermisch dik' wordt bedoeld: voldoende dik, zodat op de tijdschaal van het experiment, de warmte, geproduceerd aan het sampleoppervlak, niet de tijd heeft om tot aan de onderkant van de verf te diffunderen.

In de gekozen experimentele aanpak werd de belichte strip opgewarmd wanneer het laserlicht werd aangezet, waarna de warmte graadueel begon te diffunderen vanuit de belichte zone. Een IR camera (CEDIP JADE UC J330R, 8-12 micron, 80mK@F/0.8@30C typisch, 14 bits, 320x240 pixels) met een sampling frequentie van 50 Hz registreerde de IR-straling afkomstig van het optisch toegankelijke deel van het sampleoppervlak rond de laserlijn, die evenredig was met de oppervlaktetemperatuur.

Door de tijdsafhankelijkheid van het dynamisch veranderende temperatuurveld te fitten - in het bijzonder de breedte op halve hoogte,  $d(t)$ , rond de laserlijn (breedte  $d_0$ ) - met een eenvoudig theoretisch model, kon de thermische diffusiviteit  $\alpha_{\text{verf}}$  bepaald worden. In de praktijk hebben we niet de tijdsevolutie van het signaal van elke pixel gefit maar, equivalent daarmee, de evolutie van de temperatuur op verschillende afstanden van de laserlijn, langs lijnen parallel met de laserlijn. De fit hield ook rekening met de eindige breedte van de laserlijn zelf. De diffusie van warmte vanuit de warme zone werd rechtstreeks gevolgd, via  $d(t)$ , die rechtstreeks gerelateerd is aan de thermische diffusiviteit, via

$$d(t) = \sqrt{d_0^2 + \alpha_{\text{verf}} t} \quad d(t) = \sqrt{d_0^2 + \alpha_{\text{verf}} t}$$



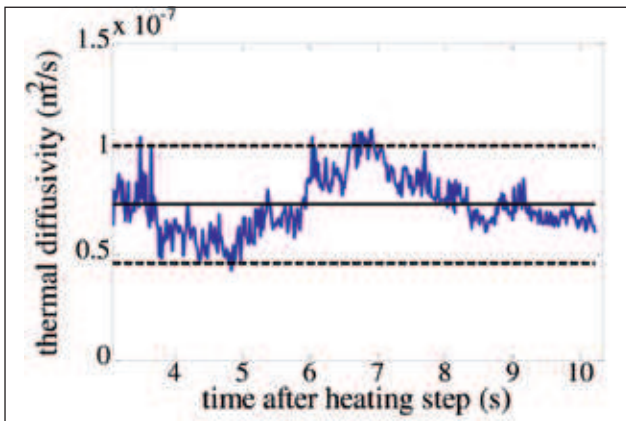
Figuur 1: Foto van de meetopstelling. Een opwarmende IR-laserbundel wordt via een optische fiber, een sferische en een cilindrische lens afgebeeld op het oppervlak van een donkerblauwe verf. De IR-camera bovenaan links volgt de evolutie van het temperatuurveld in de nabijheid van de laserlijn.

## Experimentele resultaten en analyse

Figuur 2 toont de evolutie van de temperatuur op de helft van het maximum van de uitdiffunderende warme zone. Tijdens de continue opwarming is er een constante verspreiding van warmte naar buiten toe, aan een tempo dat bepaald wordt door de thermische diffusiviteit. De experimentele gegevens liggen tussen twee curves die berekend werden voor diffusiviteiten die -30% en +30% afwijken van de best fittende waarde.

De gemiddelde waarde van de effectieve ogenblikkelijke thermische diffusiviteit in Figuur 2, berekend als  $\alpha_{\text{verf}}(t) = d^2(t) / d_0^2$ , komt ruwweg overeen met de thermische diffusiviteit van de verf, en werd bepaald op  $\alpha_{\text{verf}} = (0.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Zoals vermeld in de inleiding hebben we IR thermografie ook gebruikt om de dikte van een verflaag te bepalen. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 4. Verflagen (op een stalen substraat) met verschillende diktes werden belicht door



Figuur 2: Evoluitie van de effectieve thermische diffusiviteit,  $\alpha_{\text{verf}}^{\text{effectief}}(t)$ , bepaald uit de evolutie van  $d(t)$ , de ogenblikkelijke breedte op halve hoogte van de warme zone, volgens de uitdrukking  $\alpha_{\text{verf}}^{\text{effectief}}(t) = d^2(t) / d_0^2$ , waarin  $d_0$  de breedte is van de laserlijn.

een 4 Watt laserspot met 8mm diameter. De evolutie van het signaal van de warmste pixel van het IR thermografisch beeld tijdens en na 200ms belichting hangt monotoon af van de dikte van de verflaag. Doordat staal een hogere thermische diffusiviteit heeft dan verf, versnelt de aanwezigheid van het staal de afname van de temperatuur. Hoe dunner de laag, hoe sneller de warmte geproduceerd door de belichting het stalen substraat bereikt, waardoor de temperatuurevoluitie beïnvloed wordt. Het resultaat toont aan dat, mits kalibratie, het tempo van de temperatuurafname gebruikt kan worden om de verflaagdikte te bepalen op een contactvrije, volledig optische manier. Voor gelijkaardig werk over IR thermografische en andere fothermische methodes om de thermische eigenschappen van materialen en lagen (nm-mm diktebereik) te bepalen, verwijzen we naar [2],[3],[4],[5],[6] en referenties daarin.

**Bedanking**

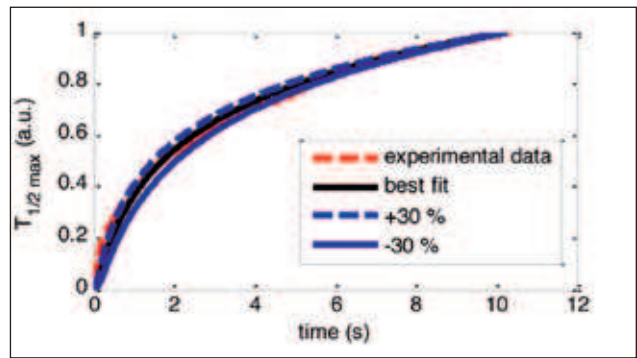
Dit werk werd financieel gesteund door KU Leuven, België (onderzoeksproject OT/11/064).

**Referenties**

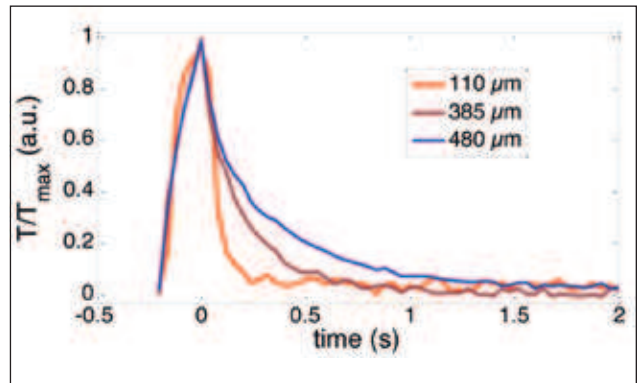
[1] CARSLAW, H. S. en JAEGER, J. C. Conduction of Heat in Solids, 2. Ed. Clarendon Press, London, 2003 , pp. 510. ISBN 0-19-853368-3  
 [2] "Thermal characterization of anisotropic media in photothermal

point, line and grating configuration", G. KALOGI-ANNAKIS, S. LON-GUEMART, J. RAVI, A. OKASHA, D. VAN HEMELRIJCK en C. GLORIEUX, J. Appl. Phys. 100, 063521 (1-12)(2006)

[3] "Thermal properties of paint coatings on different backings using a scanning photo acoustic technique", O. RAGHU en J. PHILIP, Meas. Sci. Technol. 17, 2945-2949 (2006)  
 [4] "A compact, portable wet paint thermal wave thickness monitor", JEFFREY P SARGENT en SIMON CHURCH, www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\_05\_14.pdf, laatst bekeken op 05/09/2016  
 [5] "Thermal diffusivity measurement of black and metallic graphite paint coatings", M.M. MOKSIN, I.V. GROZESCU, Z.A. WAHAB en W.M.M. YUNUS, Meas. Sci. Technol. 10, 7-10 (1999)  
 [6] "Investigation of thermal touch response of coated steel plates employing square wave excited photothermal infrared radiometry", PREETHY MENON, RAVINDRAN RAJESH, JICHUAN XIONG



Figuur 3: Evoluitie van de temperatuur op de helft van het maximum van de uitdiffunderende warme zone.



Figuur 4: Experimentele evolutie van het IR thermografisch signaal (genormaliseerd op zijn maximum waarde) tijdens en na een 200ms durende belichting. Het signaal, dat correspondeert met de warmste pixel van het IR camerabeeld in het midden van de laserspot, is ruwweg evenredig met de lokale temperatuur. Voor het gebruikte laser vermogen en de gebruikte afmeting van de laserspot was de maximale temperatuursverhoging van de orde van 10K.

en CHRIST GLORIEUX, Int. J. Thermophys. 2012, DOI: 10.1007/s10765-012-1240-y

**Auteurs**

Bert Verstraeten<sup>1</sup>, Jichuan Xiong<sup>1</sup>, Paul Lamsens<sup>2</sup>, Pascal Pollet<sup>2</sup> and Christ Glorieux<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorium voor zachte Materie en Biofysica, Department of Physics and Astronomy, KU Leuven, Celestijnenlaan 200D, B3001 Heverlee, Belgium

<sup>2</sup> Sirris, Celestijnenlaan 300 C, B3001 Heverlee, Belgium

**Voor meer informatie:**

KUleuven  
 Christ Glorieux