

Investigarea sudabilității cu fascicul laser a materialelor polimerice utilizând un material echivalent

Investigating the polymers weldability by using an equivalent material

Mariana ILIE^{1,3}, Simone MATTEĎ², Jean-Christophe KNEIP², Alexandru NICHICI¹

¹Universitatea „Polithenica” Timișoara, România

²Laboratoire Laser et Traitement des matériaux, IUT Le Creusot, Université de Bourgogne, Franța

³ISIM Timișoara, România

Cuvinte cheie

Sudare laser, împrăștierea luminii, polimer, modelare termică.

Keywords

Laser welding, light scattering, polymer, thermal modelling.

1. Introducere

Sudarea laser „prin transparență” a materialelor polimerice presupune: utilizarea unei configurații în care cele două materiale sunt suprapuse, existența unei componente transparente la lungimea de undă a sursei laser, ce permite trecerea radiației și concentrarea acesteia la interfață, și a unei componente absorbante, mediu propice inițierii fenomenelor termice necesare obținerii îmbinării (figura 1). Datorită conductivității termice scăzute a polimerilor, topirea sau înmuierea materialului se face într-un strat relativ subțire (0,5 mm), suficient însă ca sub acțiunea presiunii aplicate să se realizeze întrepătrunderea lanțurilor intermoleculare, obținându-se astfel o îmbinare cu o rezistență comparativă cu cea a materialului de bază.

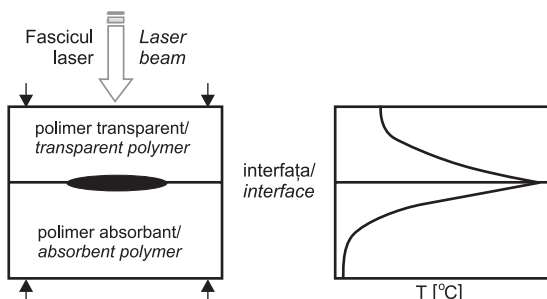


Figura 1. Configurația utilizată la sudarea laser prin transparență a materialelor polimerice/
Figure 1. Through-transmission laser welding of polymers.

Deoarece acest fenomen este foarte activ la temperaturi ce asigură o stare lichidă a materialului, temperatura la interfață trebuie să fie cuprinsă între temperatura de tranziție sticloasă sau temperatura de topire și temperatura de degradare a materialului [1].

În raport cu tehnicile convenționale de sudare, eficacitatea acestui procedeu este puternic condiționată de proprietățile optice ale celor două materiale implicate (reflectivitate, transparență, absorbivitate). În consecință, obținerea unei îmbinări de calitate depinde de o bună înțelegere a interacțiunii fascicul laser-materie bazată pe identificarea și modelarea fenomenelor optice și termice implicate.

1. Introduction

Through-transmission laser welding of polymers is a process in which an electromagnetic radiation of suitable wavelength is transmitted through a transparent component and absorbed into a second component situated underneath. The heat generated by absorption is transmitted to the transparent component by conduction. The bonding between the two components occurs by the interpenetration of the molecular chains in this area (Figure 1).

Since this phenomenon is very active in a “fluid” state of matter, the temperature at interface has to be between the temperature of solid-liquid transition and the initial temperature of degradation of the thermoplastic materials [1].

Comparing to the traditional welding techniques, the laser welding efficiency is strongly dependent on the materials properties. In consequence, obtaining a high-quality weld joint is conditioned by a good understanding of the material behavior under laser irradiation, based on a clear identification and modeling of the optical and thermal phenomena involved.

In modeling the optical behavior of the laser beam through a polymer, an extinction phenomenon has to be considered in which absorption and scattering effects can equally coexist or prevail to each other. Actually a linear behavior of the material is considered, so the laser beam attenuation into the irradiated materials is described by the well-known Beer-Lambert law. But for semi-transparent materials, in which radiation is mainly attenuated by multiple scattering, this approximation could lead to inaccurate results. In the present study, a numerical model based on the Mie theory and the Monte Carlo method is used to describe the laser beam attenuation through the semi-transparent polymer and its broadening at the exit. These data are used in a thermal model, for defining geometric and energetic characteristics of the heat source at the interface.

The thermal modeling of the laser-polymer interaction is based on a conductive and convective heat transfer [1] [2], but ignores the variation of the materials optical properties with the temperature. Since the accuracy of the numerical results depends on a good knowledge of the materials thermo-physical properties and their variation with the temperature, an experimental “calibration” of the model is often used in

Din punct de vedere optic, o radiație ce traversează un mediu va fi atenuată printr-un fenomen de extincție, în care absorbția și difuzia (în sensul de împrăștiere - scattering) pot avea aceeași pondere sau predomina, în funcție de proprietățile optice ale mediului. Prin absorbție radiația este transformată în energie termică, în timp ce prin difuzie are loc o redistribuire a acesteia în spațiu datorită neomogenității mediului.

La ora actuală, un mare număr de studii consideră că atenuarea radiației într-un mediu se face exponențial, conform legii lui Beer-Lambert, însă validitatea acestei legi este verificată doar în cazul mediilor în care absorbția este predominantă. În cazul mediilor difuzante, utilizarea acestei aproximații poate conduce la rezultate eronate.

În lucrarea de față, pentru a descrie comportamentul fasciculului laser într-un polimer semitransparent se utilizează un model numeric ce reunește teoria lui Mie și metoda Monte Carlo și care permite estimarea distribuției intensității fasciculului transmis. Aceste informații sunt utilizate pentru definirea caracteristicilor geometrice și energetice ale sursei termice la interfață.

Pentru modelarea termică a interacțiunii fascicul laser-polimer, se recurge la o abordare clasică bazată pe rezolvarea ecuația difuziei termice, sursa termică având un caracter volumic [1], [2]. Simularea procesului de sudare pe baza celor două modele este condiționată de o bună cunoaștere a proprietăților termofizice ale materialelor implicate, în special a legilor de variație a acestora cu temperatura. Pentru stabilirea unei echivalențe între sistemul real și sistemul modelat, în practică se recurge adesea la o calibrare a modelului pe baza măsurătorilor experimentale. În cadrul lucrării de față, această calibrare a fost realizată pe baza câmpurilor termice măsurate prin termometrie în infraroșu.

Modelarea comportamentului unui sistem oferă posibilitatea estimării parametrilor de proces optimi fără a implica o creștere a costurilor experimentale.

2. Determinarea materialului echivalent

Datorită materialelor de umplere, a pigmentilor, a elementelor de ranforsare introduse în matricea polimerilor în procesul de elaborare, aceste materiale pot induce o atenuare pronunțată a radiației laser ce le traversează.

Împrăștierea radiației laser într-un astfel de mediu poate fi modelată numeric pe baza unui cod ce reunește teoria lui Mie și metoda Monte Carlo. Prezentarea detaliată a acestui model optic este dată în referința [3]. În principiu, se aplică teoria lui Mie pentru cazul unei singure particule sferice obținându-se parametrii de împrăștiere: secțiunea transversală de împrăștiere ce definește „eficacitatea” particulei în a difuza radiația incidentă și funcția de fază numită și diagramă de difuzie și care, prin normalizare, indică probabilitatea ca un foton incident să fie difuzat pe o anumită direcție.

Trecerea către un ansamblu de particule, aleatoriu dispersate, se face pe baza unui calcul statistic, metoda Monte Carlo, ce constă în urmărirea traiectoriilor individuale pentru un număr mare de fotoni prin mediul considerat.

Acest model permite determinarea împrăștierii fasciculului laser într-un material semitransparent în condițiile în care se cunosc caracteristicile optice ale acestuia: diametrul particulelor difuzante, concentrația, indicele de refracție relativ ($n_{\text{particula}}/n_{\text{mediu}}$) și grosimea mediului.

Din punct de vedere practic însă, informațiile despre compoziția unui polimer dat nu sunt întotdeauna ușor accesibile. În consecință, obiectivul imediat a fost determinarea unui

establishing the equivalence between the simulated and the real behavior of the considered system. For this purpose, a contact free method such as the infrared thermography was used for surface temperature measurement.

Modelling the system behaviour offers the advantage of estimating optimal process parameters without increasing experimental costs.

2. The equivalent semi-transparent material

The real polymeric materials are often semi-transparent materials due to mineral fillers, additives or pigments introduced in their matrix, which can induce a strong scattering of the laser beam. For describing the laser beam behaviour in this case, a numerical model based on the Mie theory and Monte Carlo method is used. The principle and the main steps of this model are presented in detail in a previous work [3] together with its experimental validation. However, for having a general idea, some aspects of the algorithm are presented. By applying the Mie theory for a single, spherical particle two scattering parameters are obtained: the scattering cross-section which gives the probability of photon scattering per unit path-length and the phase function which normalised describes the probability density function for the scattering angles. The passage towards a collection of particles is realised by using the Monte Carlo method, in which the trajectories of numerous light rays (commonly called “photons”) are simulated probabilistically through the considered medium until they hit a predefined detecting area. Thus, for a particular medium with known scattering characteristics (particle diameter, relative refractive index n_p/n_m , particles concentration and the geometrical thickness of the medium) the numerical model gives the laser power distribution for the transmitted beam. In practice, however, this information is not always easy to obtain so the immediate objective was to investigate the behaviour of the different scattering media in order to determine an equivalent semi-transparent material which produces the same attenuation and broadening of the laser beam as the real one. By establishing a variation domain for each of the four factors mentioned above, and simulating systematically different combinations, an empirical model was obtained to describe the evolution of the transmitted beam in this domain. Using this empirical model and applying an inverse method based on the gradient algorithm, it is possible to determine the three first scattering factors if the transmitted intensity for three different thicknesses of the same material is known. The algorithm has as criterion the minimisation of the mean quadratic error between the values obtained with the optical model (Mie+Monte Carlo) and the ones predicted by the empirical model. A detailed description of this method is given in a previous paper [4].

The natural ABS (acrylonitrile butadiene styrene) is a complex mixture consisting of styrene-acrylonitrile copolymer, a graft polymer of styrene-acrylonitrile and polybutadiene and some unchanged polybutadiene rubber. The presence of these rubber occlusions (Figure2), with sizes from 0.1 to 1 μm , even beyond, makes it inhomogeneous from the optical point of view.

In order to determine an equivalent material for ABS, three different thicknesses plates were considered: 1.5, 2.1, 2.85 mm. By measuring the on axis transmitted intensity (in % from the incident one) for each plate and applying the inverse method, an equivalent material was determined with the following scattering characteristics: 0.46 μm particle diameter, a relative

material echivalent cu un comportament optic similar materialului real supus sudării laser.

În rezolvarea acestui aspect, s-au stabilit domenii de variație pentru toți cei patru factori enunțați, simulându-se apoi sistematic combinațiile dintre aceștia și determinând un model empiric ce descrie împrăștierea radiației în funcție de cei patru factori în acest domeniu. Utilizând acest model și aplicând o metodă inversă bazat pe metoda gradientului, se pot determina primii trei factori prin măsurarea intensității transmise prin trei grosimi de material, problema reducându-se la rezolvarea unui sistem de trei ecuații cu trei necunoscute. Metoda gradientului utilizează ca și criteriu, minimizarea erorii medii pătratice între valorile prezise de model pentru cele trei grosimi de material. Prezentarea detaliată a acestui model empiric și a metodei inverse este dată în ref. [4].

În cazul de față s-a dorit determinarea unui material echivalent pentru un ABS natural (acrilonitril butadien stirena) care este un polimer amorf bifazic constituit dintr-o fază continuă (copolimer de acrilonitril stiren sau SAN) și o fază discontinuă (noduli de polibutadienă). Aceste incluziuni de cauciuc (figura 2) cu dimensiuni cuprinse între 0,1 și 1 μm se constituie în centre de difuzie a radiației.

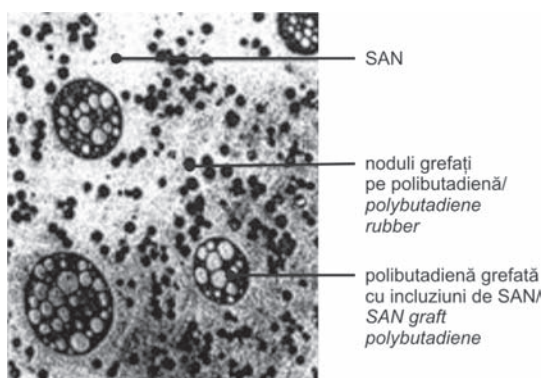


Figura 2. Imagine microscopică ABS [Techniques de l'ingénieur]/
Figure 2. Microscopic observation of ABS [Techniques de l'ingénieur]

Utilizând trei plăci de ABS natural cu trei grosimi diferite: 1,5; 2,1; 2,85 mm pentru care s-a măsurat intensitatea în axă a fascicului transmis (exprimată în procente din intensitatea în axă a fascicului incident I_t/I_i) s-au obținut următoarele valori: 28,94% pentru 1.5 mm, 16,55% pentru 2,1 mm și 10,8% pentru 2,85 mm. Aplicând metoda inversă, s-a determinat un material echivalent cu următoarele caracteristici: un diametru al particulelor de 0,46 μm, o concentrație masică de 0,44% și un indice relativ de refracție de 1,42. Introducând aceste date în modelul optic, s-a determinat distribuția intensității fascicului laser transmis corespunzător fiecărei plăci (figura 3). Fasciculul incident are un profil trapezoidal cu razele caracteristice $r_1=1,44$ mm și $r_2=3,11$ mm. În figura 3 se observă caracterul puternic difuzant al ABS-ului, toate cele trei profiluri ale fascicului transmis fiind Gaussiene.

3. Cuplarea modelului optic cu modelul termic

3.1. Aspecte teoretice

Pentru definirea sursei termice la interfața celor două materiale de îmbinat se ia ca punct de plecare fasciculul incident. Pentru

refractive index of 1.42 and 0.44% for the particles concentration. Using this data in the optical model, the laser power distribution at the exit of each plate was obtained (Figure 3).

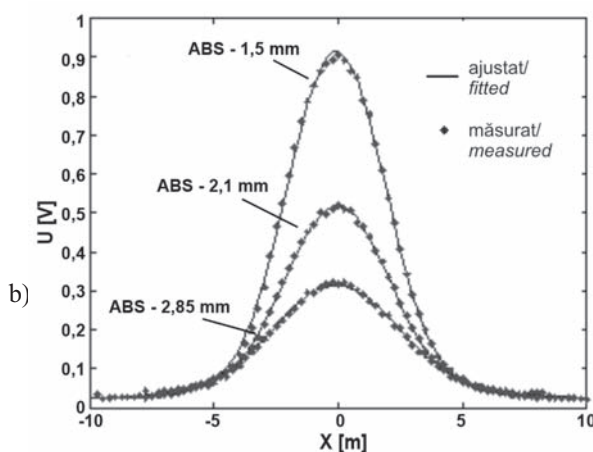
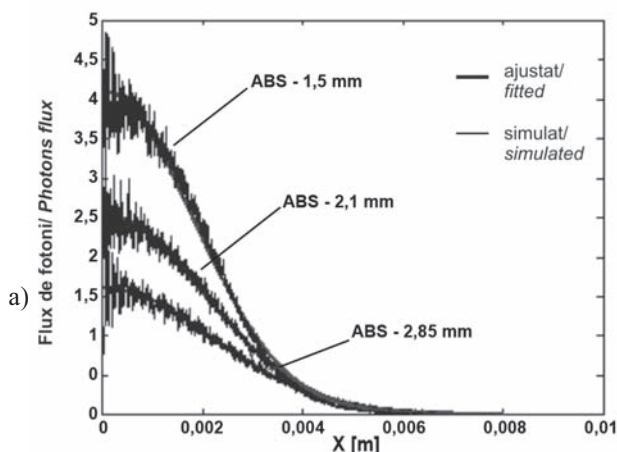


Figura 3. Distribuția intensității transmise măsurate (a) și simulate (b) corespunzătoare celor trei plăci de ABS/ Figure 3. The measured (a) and simulated (b) profiles of intensity distribution for the transmitted laser beam through ABS slabs and their approximations.

The incident laser beam has a trapezium shaped profile with characteristic radii $r_1=1.44$ mm and $r_2=3.11$ mm. As it can be seen from figure 3, all three transmitted beams have a Gaussian profile, the polymer acting like an optical filter. The attenuation values for each plate (the ratio I_t/I_i) were: 28.94% for 1.5 mm, 16.55% for 2.1 mm and 10.8% for 2.85 mm.

3. Coupling the optical and thermal models

3.1. Theoretical aspects

In order to define the thermal source at the interface of the two materials to be welded, one starts from the incident trapezium shaped beam for which the power density can be written as:

$$p = \begin{cases} p_i & r < r_1 \\ p_i \cdot \left(1 - \frac{r-r_1}{r_2-r_1}\right) & r_1 < r < r_2 \\ 0 & r > r_2 \end{cases}$$

o distribuție trapezoidală a intensității acestuia, se poate determina densitatea de putere corespunzătoare:

$$p = \begin{cases} p_i & r < r_1 \\ p_i \cdot \left(1 - \frac{r-r_1}{r_2-r_1}\right) & r_1 < r < r_2 \\ 0 & r > r_2 \end{cases}$$

Puterea totală este dată de:

$$P = \int_0^{r_1} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot p_i \cdot dr + \int_{r_1}^{r_2} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot p_i \cdot \left(1 - \frac{r-r_1}{r_2-r_1}\right) \cdot dr$$

Deci densitatea de putere în axă este:

$$p_t = \frac{3 \cdot P}{\pi \cdot (r_1^2 + r_2^2 + r_1 \cdot r_2)}$$

Din modelul optic obținem două intensități în axă (I_i, I_t) echivalente, corelate cu numărul de fotoni lansați sau detectați la ieșirea din mediul semitransparent. Densitatea de putere în axă pentru fasciculul transmis se poate:

$$p_t = p_i \cdot \frac{I_t}{I_i}$$

unde p_i este densitatea de putere în axă pentru fasciculul transmis.

În cazul unui mediu puternic difuzant, fasciculul laser transmis are un profil gaussian pentru care densitatea de putere este:

$$p_{tl}(r) = p_t \cdot e^{-\frac{2r^2}{r_i^2}} = \frac{3P}{\pi \cdot (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2)} \cdot \frac{I_t}{I_i} \cdot e^{-\frac{2r^2}{r_i^2}}$$

unde r_i este raza caracteristică a fasciculului gaussian transmis și $r = (x^2 + y^2)^{0.5}$.

Considerând o absorbție exponențială a radiației în componenta absorbantă sursa termică se poate scrie:

$$q_v(r, z) = \begin{cases} 0 & z < d_1 \\ p_{tl}(r) \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot (z-d_1)} & z > d_1 \end{cases}$$

unde d_1 este grosimea componentei semitransparente.

Pentru simularea evoluției câmpului de temperaturi în volumul materialelor iradiate, modelul a fost implementat într-un code de calcul cu element finit (COMSOL). Pentru simularea evoluției câmpului de temperaturi s-a utilizat ecuația generală a difuziei termice:

$$\vec{\nabla} [k(T) \vec{\nabla} T] + q_v = \rho \cdot c_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

unde $k(T)$ - conductivitatea termică, ρ - densitatea, și $c_p(T)$ - capacitate termică masică.

Schimbul de căldură între sistemul iradiat și mediul înconjurător se realizează conform relației:

$$-k(T) \cdot \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h(T) (T_\infty - T) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4)$$

unde \vec{n} vector normal la suprafață, h - coeficient de transfer de căldură, T_{amb} - temperatura ambiantă, T_∞ - temperatura externă, ε - emisivitate, σ - coeficient de emisie al corpului negru.

Pentru reducerea timpului de calcul s-a considerat simetrie

The total power is given by:

$$P = \int_0^{r_1} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot p_i \cdot dr + \int_{r_1}^{r_2} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot p_i \cdot \left(1 - \frac{r-r_1}{r_2-r_1}\right) \cdot dr$$

The power density on the axis for the incident beam becomes:

$$p_i = \frac{3 \cdot P}{\pi \cdot (r_1^2 + r_2^2 + r_1 \cdot r_2)}$$

From the optical model, one obtains an entering and an outgoing equivalent intensities (I_i, I_t), correlated with the number of “launched” and “received” photons and their declared energies. The power density at the exit of the scattering medium can be written as:

$$p_t = p_i \cdot \frac{I_t}{I_i}$$

where p_i is the power density of the outgoing beam in the axis.

For a strong scattering medium, the transmitted laser beam has a Gaussian profile so the power distribution at the interface is:

$$p_{tl}(r) = p_t \cdot e^{-\frac{2r^2}{r_i^2}} = \frac{3P}{\pi \cdot (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2)} \cdot \frac{I_t}{I_i} \cdot e^{-\frac{2r^2}{r_i^2}}$$

where r_i is the Gaussian characteristic radius of the transmitted beam and $r = (x^2 + y^2)^{0.5}$.

By considering an exponential absorption into the second polymer, the heat source becomes:

$$q_v(r, z) = \begin{cases} 0 & z < d_1 \\ p_{tl}(r) \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot (z-d_1)} & z > d_1 \end{cases}$$

where d_1 is the thickness of the semi-transparent polymer.

The above model is employed in a finite element based code (COMSOL). The field of temperature in the two components to be assembled is determined by the resolution of the general heat conductivity equation:

$$\vec{\nabla} [k(T) \vec{\nabla} T] + q_v = \rho \cdot c_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

where $k(T)$ is the thermal conductivity, ρ the density, and $c_p(T)$ the specific heat capacity.

For shortening the computing time, a symmetry plane was considered. The total calculation time is set to be longer than the duration of the irradiation which allows us to compare the simulated and measured results during both phases: heating and cooling. For the heat transfer between the two elements and the surrounding medium the boundary condition can be written as:

$$-k(T) \cdot \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = h(T) (T_\infty - T) + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4)$$

where \vec{n} vector of the surface, h - the heat transfer coefficient, T_{amb} - medium temperature, T_∞ - external temperature, ε - material emissivity, σ - black body emission coefficient.

3.2. Experimental measurements

For experimental measurements a contact-free measurement technique as the infrared thermography was used. The IR camera was used to measure the thermal field on the back side of the irradiated materials. The camera is a FLIR ThermoCam

axială față de direcția de deplasare a fasciculului. Pentru simulare s-a considerat un timp mai mare decât timpul iradierii materialului astfel încât să se poată urmări și faza de răcire a acestuia.

S60 with a detection wavelength between 7.5 and 13μm, an acquisition frequency of 50 Hz and a macro lens which assures a spatial resolution of 100μm. As absorbing component, black

Tabelul. 1. Expresii utilizate în simularea numerică/ Table. 1. Expressions used in numerical simulation

	ABS	ABS/PC
Coeficient de absorbție/ Absorption coefficient [m ⁻¹]	257	19500
Conductivitate termică/ Thermal conductivity [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	$k = -6 \cdot 10^{-9} T^{-3} + 3 \cdot 10^{-8} + 0,19$	$k = -3 \cdot 10^{-4} T^{-3} + 0,19$
Căldură specifică / Specific heat capacity [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	$T \leq 77^\circ\text{C}$ $c_p = 6,24 \cdot T + 1274$ $77^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$ $c_p = 20,25 \cdot T + 200$ $T > 100^\circ\text{C}$ $c_p = 1,865 \cdot T + 1982,6$	$c_p = 7,8027 T + 894,51$

3.2. Măsurători experimentale

Măsurarea experimentală a câmpurilor de temperatură a fost realizată utilizând termometria în infraroșu. S-a utilizat o cameră în infraroșu Therna CAM, echipată cu un obiectiv microscopic ce asigură o rezoluție spațială de 100 μm. Camera are un domeniu spectral cuprins între 7,5 și 13 μm și o frecvență de achiziție de 50 Hz. Înregistrarea evoluției temperaturii s-a realizat pe fața opusă iradierii. Cuplul de materiale investigat a fost compus din:

- placa de ABS natural cu o grosime de 1,5 mm ca material semitransparent;
- placa de aliaj ABS/PC cu o grosime de 2 mm și un conținut de 11% negru de fum, ca material absorbant.

Emisivitatea plăcii absorbante a fost determinată comparând temperatura indicată de camera infraroșu și valoarea temperaturii la care a fost preîncălzită placa rezultând o valoare de 0,98.

Iradierea cu fascicul laser a cuplului de materiale a fost realizată fără deplasarea relativă fascicul - material. La fel ca și în cazul simulărilor, evoluția temperaturii pe fața opusă iradierii a fost înregistrată atât pe timpul încălzirii cât și în faza de răcire a materialelor.

Prin compararea datelor experimentale cu cele numerice s-a realizat o calibrare a modelului, singurul grad de libertate fiind coeficientul de absorbție al plăcii de ABS/PC. Valoare pentru

carbon filled ABS-PC alloy plate of 2 mm thickness was used. Its emissivity was determined by comparing the indication of the IR camera and the known temperature at which the plate was preheated. The found value was 0.98.

The material couple was irradiated without moving the laser beam. The temperature field evolution on the back side of the absorbing polymer was recorded both during the heating as well as during the cooling phase.

By corroborating the experimental temperature profiles with the simulated ones a calibration of the numerical model was realised considering the absorption coefficients the only degree of freedom. The desired level of agreement with the experimental results was obtained for the values given in Table 1. Using these values, the simulated temperature profile follows the experimental one for all the IR measurements (Figure 4.) Since the accuracy of the numerical results depends on a good knowledge of the materials thermo-physical properties and their variation with temperatures, we considered the expressions presented in Table 1.

4. Simulation of the welding process

After the calibration, the model can be used to estimate the optimal process parameters which assure the desired temperature at the interface. For example, by realising an

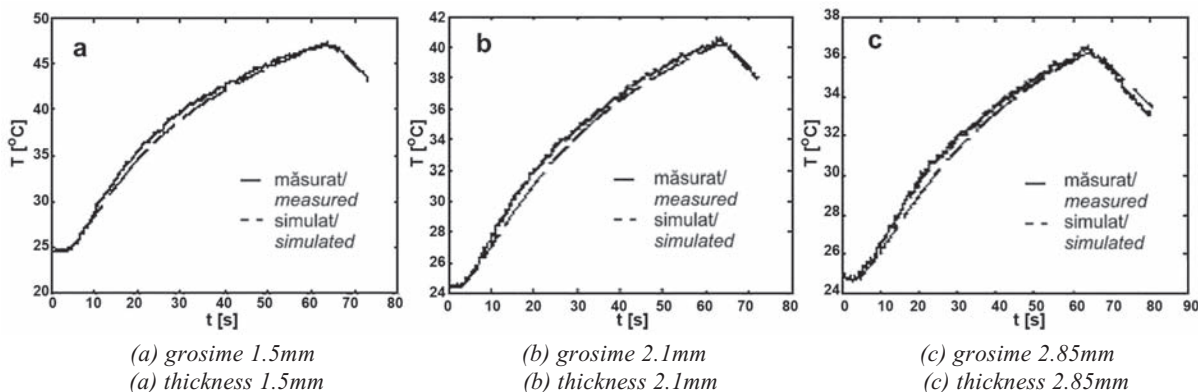


Figura 4. Evoluția temperaturii măsurate și simulate în cazul cuplului de materiale ABS- ABS/PC corespunzătoare celor trei grosimi ale plăcilor de ABS utilizând ca date de intrare pentru modelul termic caracteristicile fasciculului laser difuzat obținute prin simulare pe baza codului hibrid

Figure 4. Comparison between the simulated and measured temperature evolution in the center of the laser spot on the back side of the absorbing polymer for a laser power of 0.27 W.

care s-a obținut ajustarea celor trei curbe experimentale corespunzătoare celor trei grosimi (figura 4) este cea dată în tabelul 1. Deoarece este cunoscut faptul că acuratețea simulărilor numerice ale unor procese, depinde de o bună evaluare a proprietăților materialului și a variației acestora cu temperatura, în cazul de față s-au utilizat expresiile din tabelul 1, unele stabilite prin determinări proprii altele, preluate din literatura de specialitate.

4. Simularea procesului de sudare

După calibrarea modelului, acesta poate fi utilizat pentru estimarea parametrilor de proces optimi ce asigură atingerea temperaturii necesare la interfață. De exemplu, dacă se consideră un experiment factorial de ordinul I și se realizează simulări pentru combinațiile factorilor de influență, în acest caz puterea laser (15 și 19 W) și viteza de deplasare a fasciculului (3 și 6 m/s) se poate estima energia liniară ($E_l = P/v$ [J×m⁻¹]) necesară atingerii temperaturii dorite. Știind că ABS-ul natural are tranziția sticloasă în jurul valorii 105°C iar aliajul ABS/PC are prima tranziție în jurul valorii de 105°C iar cea de-a doua la 145°C, se pot estima parametrii de proces ce asigură atingerea unei temperaturi la interfață mai mare de 145°C fără a atinge totuși temperaturile de degradare (figura 5).

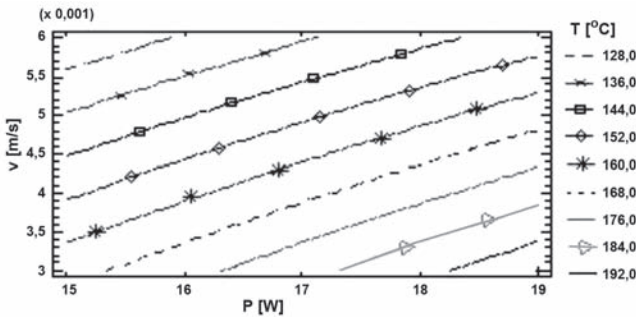


Figura 5. Linii de nivel constant ale suprafeței de răspuns/
Figure 5. Contours of estimated response surface.

În modelul termic descris mai sus, între cele două componente de îmbinat este considerat un contact perfect. O abordare mai realistă trebuie să ia în considerare rezistența termică la interfață. Prezența unei lamele de aer între cele două componente va influența semnificativ transferul termic.

Modelarea unei astfel de lamele ale cărei dimensiuni sunt foarte mici comparativ cu grosimea celor două componente, ar necesita o discretizare spațială foarte densă, fapt ce mărește semnificativ timpul de calcul. În literatura există soluții mai simple însă incomplete [5]. În cazul de față s-a considerat un schimb de căldură la interfață preponderent prin conducție, convecția și radiația fiind neglijabile. Prin introducerea unui coeficient de schimb de căldură $h = K_{aer}/d$ condițiile la limită devin:

$$-k(T) \cdot \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = \frac{k_{aer}}{d} \Delta T_i$$

unde k_{aer} conductivitatea termică a aerului, d grosimea lamelei și ΔT_i căderea de temperatură la interfață.

Comparând evoluția temperaturii pe grosimea plăcilor în cele două cazuri, contact perfect și prezența lamelei de aer (figura 6), se observă o cădere de temperatură la interfață de aproape 40°C pentru o grosime a lamelei de 30μm. Din figura 7, se observă că această cădere de temperatură va fi cu atât mai importantă cu cât grosimea

experimental design and carrying out simulations for two values of the laser beam speed (3 and 6 m/s) and two values of the laser power (15 and 19 W), the necessary linear energy can be estimated. Knowing that the ABS has a glass transition temperature around 105°C and the ABS-PC alloy has two glass transition temperatures: one at 105°C and the other at 145°C, one can choose a linear energy ($E_l = P/v$ [J×m⁻¹]) that assures a temperature at the interface higher than 145°C and lower than the degradation temperature of the polymers (Figure 5).

In the model described thus far, a perfect thermal contact was assumed at the interface between the two components to be welded. A more realistic model has to consider the thermal contact resistance of interface. In general, between the joining parts, an air-filled gap exists which slows down or deteriorates the heat flow.

Since modelling the gap with a particular geometry would require a very dense mesh, which increases the computing time, a simpler solution was adopted [5]. Due to the very small thickness of the gap it can be considered that the heat transfer is made by conduction, thus convection and radiation are neglected. In order to model this phenomenon an equivalent heat transfer coefficient that produces the same effect was considered.

In this case the heat transfer at the interface is modelled as the heat transfer at the boundary with the difference that the heat transfer coefficient is given by $h = K_{aer}/d$ the boundary condition at the interfaces becomes:

$$-k(T) \cdot \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = \frac{k_{aer}}{d} \Delta T_i$$

where k_{air} is the heat conductivity of the air, d is the gap thickness and ΔT_i is the temperature drop over the air gap.

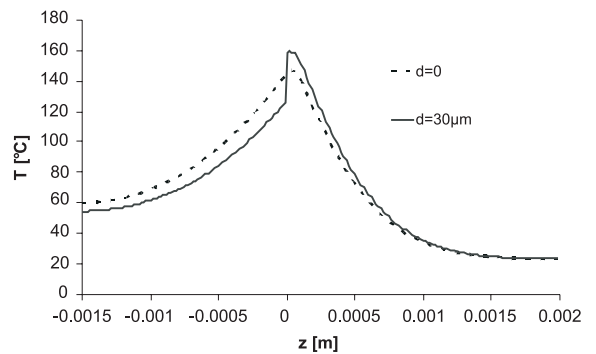


Figura 6. Evoluția temperaturii pe grosimea materialelor (interfața este situată la z=0) în cazul unui contact perfect la interfață d=0 respectiv cazul prezenței unei lamele de aer de 30μm între cele două componente/

Figure 6. Temperature evolution into the irradiated materials on z direction (the interface is located at z=0) by considering a perfect contact d=0, respectively a gap of 30μm between the joining parts.

Comparing the temperature evolution in the case of a perfect thermal contact at the interface with the case where an air-filled gap exists (Figure 6), a temperature drop at the interface is observed. The difference will increase with the gap thickness (Figure 7). For a gap width of 100μm, the temperature difference reaches 80°C, so it is obvious how its presence at the interface deteriorates the heat flow between the joining parts. The simulations were realised for a material couple formed by a 1,5 mm ABS slab as semi-transparent component and a 2 mm

interstițiului de aer va fi mai mare, atingând valoarea de 80°C pentru un interstițiu de 100μm. Datorită deteriorării transferului termic între cele două componente, ca urmare a efectului izolator al interstițiului de aer, temperatura în componenta absorbantă poate depăși temperatura de degradare a polimerului.

Valorile au fost obținute pentru un cuplu de materiale ABS-ABS/PC, cu o grosime a plăcii de ABS de 1,5 mm și 2 mm pentru aliajul ABS/PC, o putere laser de 8W și o viteză relativă de 1mm.s⁻¹.

5. Concluzii

În lucrarea de față, s-a urmărit estimarea sudabilității materialelor polimerice cu fascicul laser în cazul unui cuplu de materiale, ABS ca polimer semitransparent și ABS/PC ca polimer absorbant, în funcție de proprietățile lor optice și termice. Pentru caracterizarea împrăstierii fasciculului laser în ABS s-a determinat, pe baza unui model numeric ce reunește teoria lui Mie și metoda Monte Carlo, un material echivalent ce produce aceeași atenuare. Astfel, a fost posibilă obținerea caracteristicilor geometrice și energetice ale fasciculului laser la interfața celor două materiale. Utilizând aceste date ca elemente intrări într-un model termic, bazat pe ecuația generală a difuziei căldurii, s-a estimat evoluția câmpului de temperaturi în volumul pieselor de asamblat, facilitând identificarea parametrilor de proces adecvați obținerii unei îmbinări sudate de calitate.

Bibliografie/ References

- [1] Joly G., Assemblage des thermoplastiques par soudage, Techniques de l'ingénieur, Traite Plastiques et Composites, AM 3760, p.1-14
- [2] Knipe J.C. et al. Heat transfer in semi-transparent materials during laser interaction, Journal of Materials Processing Technology, 2004, Vol. 155-156, p.1805-1809
- [3] Ilie M, Kneip J.C., Mattei S, Nichici A, Roze C, Girasole T, Laser beam scattering effects in non-absorbent inhomogenous polymers, Optics and Lasers in Engineering, Elsevier Ltd., S. U. A., vol.45, 2007, p. 405-412
- [4] Ilie M., Kneip J.C., Mattei S., Nichici A., Through-transmission welding of polymers: effects of particles on laser beam scattering, 25th International Congress on Applications of Lasers and Electrono-Optics, ICALEO 2006, Laser Institute of America, LIA Pub#:599, 2006, Scottsdale, AZ USA, Vol. 99, p.355-361
- [5] Yovanovich, M.M. et al, Calculating the interface resistance, Electronics cooling, 1997, www.electronics-cooling.com

ABS/PC slab as absorbing one. The process parameters were: P=8W and v=1 mm.s⁻¹.

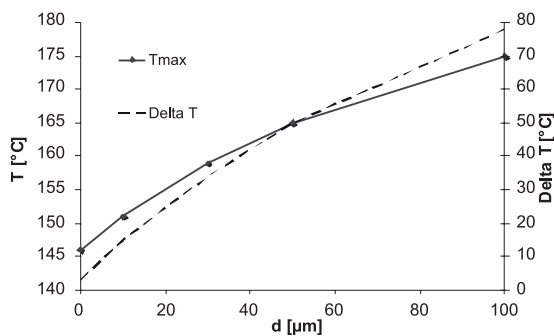


Figura 7. Evoluția temperaturii maxime la interfață T_{max} și a diferenței de temperatură între cele două componente ΔT în funcție de grosimea lamelei de aer./

Figure 7. Evolution of the maximum temperature at the interface T_{max} and the temperature drop ΔT as a function of gap thickness.

For higher values of the air gap thickness, due to the temperature increasing into the absorbing part it is possible to overcome its degradation temperature, thus deteriorating the material.

5. Conclusion

In the present paper, the polymers weldability was investigated according to their thermal and optical properties. In order to describe the laser beam scattering into semi-transparent polymers, an equivalent material is determined, which will produce the same attenuation of the laser beam as the real one. The result of this model is used to define the heat source profile and its magnitude at the interface, required for further numerical simulations of the welding process using the finite element method, in order to predict materials weldability. An extended model which accounts for the presence of the air-filled gap at the interface was also realised. Its influence on the maximum temperature and the temperature drop at the interface was shown.

Modelling the system behaviour permits an efficient prediction of the weld quality for a range of laser speeds and powers reducing the experimental time and concentrating the efforts in optimizing the process.

Experimental measurements made on natural ABS samples, used as semi-transparent material, and ABS-PC alloy sheets used as absorbent part, confirmed our modelling results.

BID-ISIM – Sudarea și Încercarea Materialelor

- 16 ani de apariție trimestrială neîntreruptă
- distribuită în 34 de țări
- inclusă în baze de date internaționale
- inclusă în cataloage de rezumate internaționale



BID-ISIM – Welding and Material Testing

- 16 years of continuous quarterly publication
- Delivered in 34 countries
- Included in international data bases
- Included in international catalogues of abstracts

Revista a fost clasificată de către Consiliul Național al Cercetării Științifice din Învățământul Superior CNCSIS în categoria B+.

Informații despre modalitatea de publicare pot fi găsite pe site-ul revistei: www.bid-isim.ro

The journal was classified by the National University Research Council (CNCSIS) in the B+ category.

Information on the publishing modality can be found on the journal web site: www.bid-isim.ro.