

Contribuții teoretice și experimentale privind influența parametrilor acustici în procesul de sudare cu ultrasunete a materialelor compozite inteligente

GHEORGHE AMZA¹, ANTON HADĂR^{1*}, ZOIA APOSTOLESCU¹, GABRIEL GÎRLEANU¹, LIVIU ANTON²

¹ Universitatea Politehnică București, Facultatea IMST, Splaiul Independenței, Nr. 313, 060042, București, România

² Universitatea Politehnică Timișoara, Bdul. Mihai Viteazul, Nr. 1, 300222, Timișoara, România

This paper presents the possibilities of creating weldings for various products made of intelligent composite materials. The acoustical parameters and their influence on the quality of the weldings are analysed from the large domain of technological, mechanical and acoustical parameters of the welding process. Furthermore, the authors present the welding process of an intelligent car stop.

Keywords: intelligent composite materials, welding, acoustical parameters

Tehnologia de realizare a pieselor din materiale compozite inteligente prin asamblare prin sudare este deosebit de complexă deoarece trebuie să se țină seama de o serie de elemente legate de procesarea materialelor compozite inteligente și de parametrii tehnologici, mecanici și acustici care influențează procesul de sudare [1].

Procesarea materialelor compozite inteligente trebuie să ia în considerație următoarele: natura componentelor care formează materialele compozite inteligente; matricea materialelor compozite inteligente; elementele de ranforsare; senzorii sau sistemul de senzori folosiți; configurația geometrică a suprafețelor de îmbinat; dimensiunile de gabarit ale suprafețelor de îmbinat; proprietățile fiecărui element component al materialelor compozite inteligente și proprietățile sistemului în ansamblu; modul de obținere a materialelor compozite inteligente; rețeaua de distribuție a senzorilor; productivitatea cerută [2, 3].

Principalii parametri tehnologici ai procesului de sudare sunt: natura matricei materialelor compozite inteligente; natura elementului de ranforsare; starea suprafețelor de îmbinat; grosimea materialelor de îmbinat; condițiile cerute de rolul funcțional; metoda de sudare; numărul de concentratoare de energie acustică etc.

Parametrii mecanici cu influență deosebită asupra procesului de sudare sunt: forța statică de apăsare; presiunea locală de contact a suprafețelor de îmbinat; durata activării cu ultrasunete etc. Sinteza parametrilor procesului de sudare se prezintă în figura 1.

Parametrii acustici sunt legați de sistemul ultraacustic folosit și de instalația de sudare cu ultrasunete, aceștia fiind: tipul oscilației ultrasonore excitată în sistem; amplitudinea oscilațiilor; frecvența oscilațiilor; intensitatea energiei ultrasonore; densitatea de energie ultraacustică; dimensiunile, forma și materialul sonotrodului și a nicovalei acustice; factorul de formă al concentratorului de energie ultrasonoră; calitățile de reflexie și de absorbție ale reazemului; temperatura de încălzire prealabilă a sonotrodului etc.

A optimiza procesul de sudare cu ultrasunete a unui material compozit inteligent înseamnă a găsi o funcție obiectiv care să cuprindă toți factorii prezentați în figura 1

și a determina costul minim al procesului sau productivitatea maximă în condițiile unei calități deosebite a îmbinării sudate [6-8].

În majoritatea cazurilor, cercetarea influenței diferiților parametri asupra calității îmbinărilor sudate cu ultrasunete se face prin determinarea forței de rupere prin încercări de forfecare și întindere sub unghi de 45° și 90° față de planul îmbinării. Reproducibilitatea calității îmbinării se face cu ajutorul coeficientului de variație k_v , dat de relația:

$$k_v = \frac{\sigma}{N_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

în care: σ_m este abaterea medie pătratică a efortului la forfecare sau întindere;

N_m - valoarea mediei aritmetice a efortului de forfecare sau întindere, care se determină cu relația:

$$N_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n N_i \quad (2)$$

unde: n este numărul măsurătorilor individuale;

N_i - valoarea măsurătorilor individuale.

Abaterea medie pătratică σ_m se determină cu ajutorul relației:

$$\sigma_m = \frac{\sum_{i=1}^n (N_m - N_i)^2}{n - 1} \quad (3)$$

și valoarea ei este deosebit de semnificativă, deoarece eroarea de determinare este de $\pm 1,5\%$.

Influența parametrilor acustici asupra calității îmbinărilor sudate cu ultrasunete a materialelor compozite inteligente

Unul din factorii care determină calitatea îmbinării îl reprezintă apariția și dezvoltarea deformării plastice în straturile de material care se îmbină, asupra căreia o influență deosebită o au condițiile acustice de formare a îmbinării.

Diferitele condiții acustice pot fi produse de acțiunea asupra elementelor care se îmbină a diferitelor tipuri de oscilații: longitudinale, de forfecare, de încovoiere, torsionale și combinații ale acestora, a căror excitare în zona îmbinării se realizează printr-o proiectare, construcție și execuție specifică a sistemelor ultraacustice folosite pentru generarea și propagarea oscilațiilor ultrasonore.

* email: antonhadar@yahoo.com

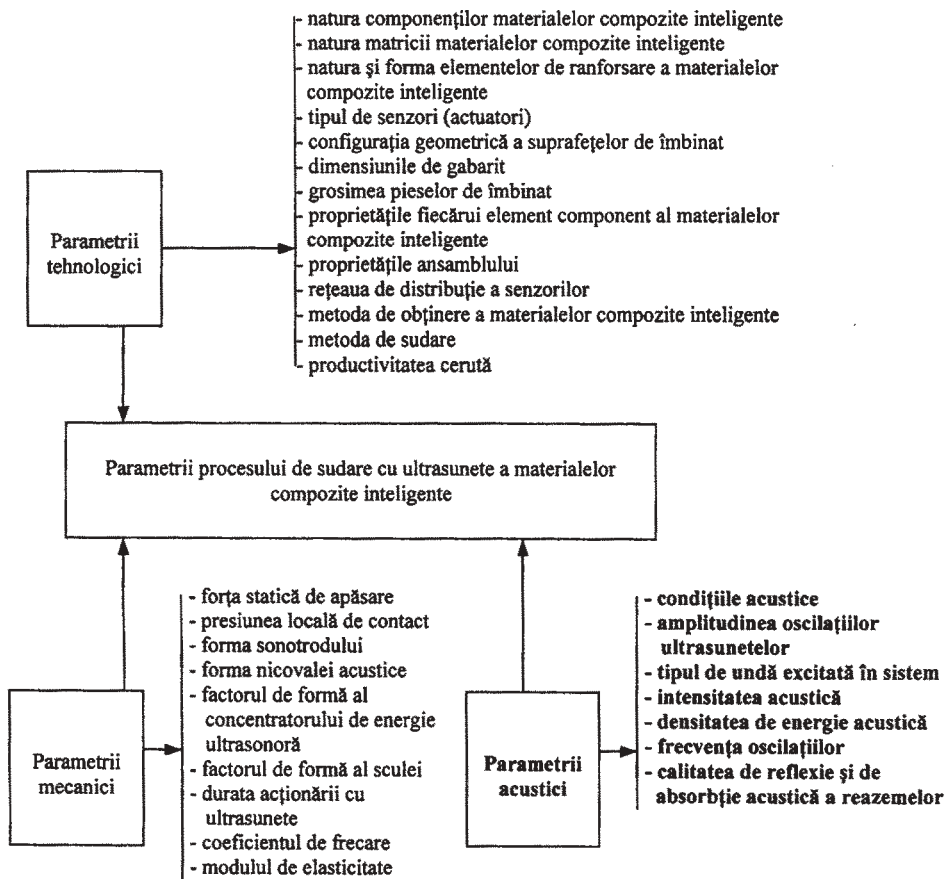


Fig. 1. Parametrii procesului de sudare cu ultrasunete a materialelor compozite inteligente

Cercetările experimentale întreprinse au demonstrat că, prin excitarea în sonotrod a undelor longitudinale, adică prin calcularea sistemului ultraacustic pentru frecvența de rezonanță a undelor longitudinale, rezistența îmbinării și coeficientul de variație k_v , depind în mod corespunzător de lungimea sonotrodului și de locul unde se aplică forța statică de apăsare.

Calitatea îmbinărilor sudate obținute cu sisteme în care se excită și propagă oscilații de încovoiere este mai scăzută decât a îmbinărilor realizate cu unde longitudinale, aceasta explicându-se prin variația mare a impedanței de intrare a sistemului la autoreglarea frecvenței [8-10].

Rezultatele experimentale obținute în cazul anumitor materiale compozite cu matrice polimerică au arătat că cele mai eficiente sisteme ultraacustice sunt cele în care se excită și se propagă oscilații de forfecare sau oscilații longitudinale-transversale, deoarece asigură cea mai bună distrugere și îndepărtare a straturilor de oxizi de pe suprafețele de îmbinat, reușesc să limiteze mai bine pătrunderea oxigenului în zona de contact, produc o deplasare complexă a materialului în zona de contact și creează condiții favorabile pentru realizarea unor îmbinări de cea mai bună calitate.

Influența amplitudinii oscilațiilor ultrasonore asupra calității îmbinărilor sudate

Procesul de formare a îmbinării sudate cu ajutorul oscilațiilor ultrasonore depinde în cea mai mare măsură de amplitudinea oscilațiilor sonotrodului A_s și de forța statică de apăsare P_s . Oscilațiile sonotrodului 1 se transmit materialului de îmbinat 2 și 3 (fig. 2) și nicovalei acustice 4, fiecare vibrând cu amplitudinile corespunzătoare îndeplinindu-se condiția:

$$A_s > A_{ps} > A_{pi} > A_n \quad (4)$$

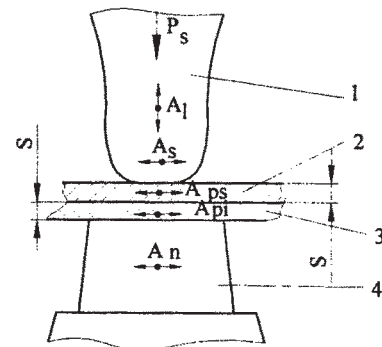


Fig. 2. Schema de vibrație în cazul sudării cu ultrasunete a materialelor compozite cu matrice polimerică: 1- sonotrod; 2- piesa superioară; 3- piesa inferioară; 4- nicovalea acustică

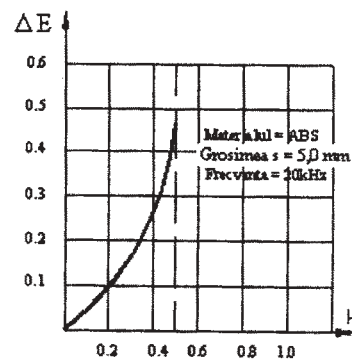


Fig. 3. Pierderea de energie ΔE , în funcție de coeficientul frecării uscate μ , la frecvența de 20kHz

Între sonotrod și piesa superioară 2 acționează o forță F_s de forma:

$$F_s = A_s \sin \omega t \quad (5)$$

iar între piesele 2 și 3, aflate în contact acționează și o forță de frecare F_f de forma:

$$F_f = A_s \sin \omega t \quad (6)$$

și forța statică de apăsare P_s .
Între aceste forțe există relația:

$$F_f \leq \mu P_s \quad (7)$$

Atâta timp cât $F_f \leq \mu P_s$, cele două materiale oscilează fără împăntrundere, aceasta apărând numai în momentul în care $F_f > P_s$ și pierderile de energie ΔE sunt cele mai mari (fig. 3). Experimental s-a determinat o valoare optimă pentru forța statică de apăsare $P_{s\text{opt}}$ de forma:

$$P_{s\text{opt}} = S_c \cdot \sigma_c^\circ \quad (8)$$

în care:

S_c este suprafața de contact sonotrod-piesa superioară;
 σ_c° - limita la curgere a materialului la temperatura de referință de 20°C.

Cunoscând forța de apăsare optimă se poate determina amplitudinea sonotrodului optimă, ținând cont că forța tangențială optimă $P_{t\text{opt}}$ ce apare are forma:

$$P_{t\text{opt}} = k \cdot \mu \cdot P_{s\text{opt}} \quad (9)$$

și conduce în zona sudurii la apariția unor tensiuni de deplasare τ_p de forma:

$$\tau_f = \tau_x \cdot \sin \omega t \quad (10)$$

Legătura între τ_x , A_{ps} și A_{pi} este de forma:

$$A_{ps} - A_{pi} = 10 \frac{\tau_x}{G} h + k \quad (11)$$

în care:

h este înălțimea zonei de deformare plastică;

G - modulul de forfecare;

τ_x - limita de curgere la forfecare în zona de îmbinare și are expresia:

$$\tau_x = \tau_s \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{m P_s}{3 \pi a^2 \tau_s} \right)^2} \quad (12)$$

unde:

m este un coeficient care depinde de construcția sonotrodului ($m = 0, 1, 2, 3$);

τ_s - limita de curgere la forfecare a materialului din care este confecționat sonotrodul;

a - coeficient care depinde de grosimea pieselor de sudat ($a = 1 \dots 3s$);

s - grosimea pieselor de sudat.

De exemplu, pentru materialele compozite inteligente cu matrice polimerică (ABS) s-a găsit următoarea relație de legătură optimă:

$$A_{ps} = 0,7 A_s; A_{pi} = 0,4 A_s; A_s = 3,3 \left(10 \frac{\tau_x}{G} h + k \right) \quad (13)$$

Influența amplitudinii asupra rezistenței la rupere a îmbinării sudate cu ultrasunete se prezintă în figura 4.

Se observă că, dacă amplitudinea vibrațiilor ultrasonice este redusă și rezistența îmbinării F_r este de asemenea

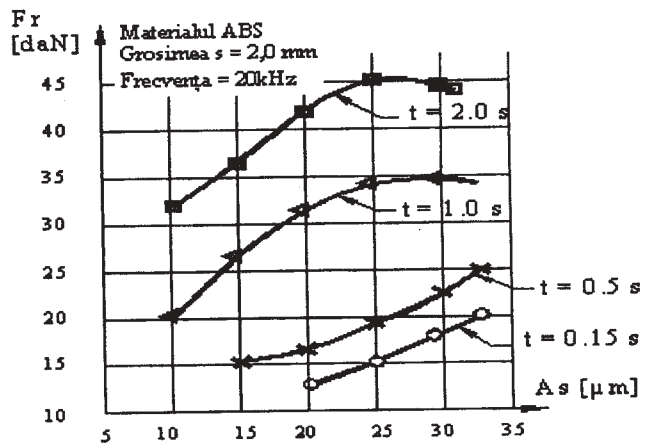


Fig. 4. Influența amplitudinii sonotrodului A_s asupra rezistenței la rupere F_r , la diferiți timpi de sudare.

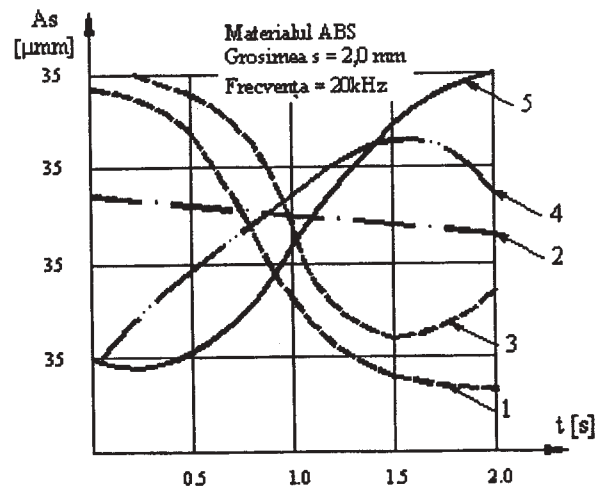


Fig. 5. Variația amplitudinii sonotrodului A_s , în timp pentru diferite tipuri de oscilații: 1- longitudinale; 2 - de forfecare; 3- de încovoiere; 4- longitudinale-torsionale; 5 - torsionale

redușă, iar la valori ale amplitudinii mai mici decât o valoare minimă $A_{s\text{min}}$, îmbinarea nu se mai produce. De amplitudinea oscilațiilor părții frontale a sonotrodului depinde și dozarea energiei acustice în zona de îmbinare, care trebuie să fie mai mare în primul stadiu de realizare a contactului intim între suprafețele de îmbinat. După crearea contactului fizic în etapa de formare a focarelor de interacțiune dintre suprafețele care se îmbină și creșterea suprafețelor lor de contact este necesar să se micșoreze amplitudinea oscilațiilor până la 50% din valoarea sa inițială pentru a preîntâmpina ruperea legăturilor care s-au format. În acest stadiu, întreaga energie acustică este cheltuită pentru grăbirea procesului de plastifiere și topire a materialului din zona îmbinării [12, 13].

Creșterea temperaturii în zona de contact mărește energia termică a atomilor fapt care favorizează procesul de transferare a materialului în microporii existenți, în dauna procesului de difuzie. Tipul de oscilație excitată în sonotrod este extrem de important nu numai din punctul de vedere al modalității de formare a îmbinării ci și a eficienței procedurii, de aceea au fost construite mai multe tipuri de sonotrode în care se pot excita oscilații longitudinale, de forfecare, de încovoiere, longitudinale-torsionale și torsionale. Prin urmare, variația amplitudinii în cele două stadii ale procesului de formare a îmbinării este de forma prezentată în figura 5, în funcție de tipul oscilației excitate și propagate în sonotrod (curbele sunt determinate experimental pe îmbinări suprapuse).

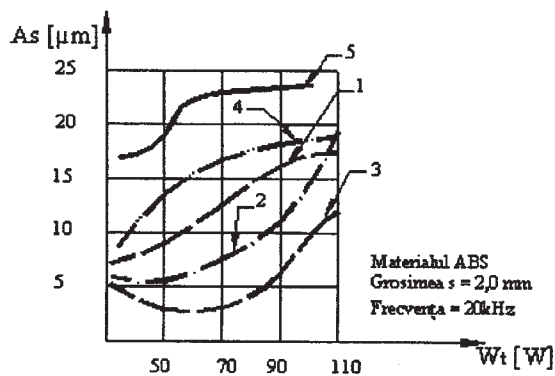


Fig. 6. Variația amplitudinii sonotrodului A_s , cu puterea de ieșire a transductorului W_t , pentru diferite tipuri de oscilații: 1- longitudinale; 2 - de forfecare; 3- de încovoiere; 4- longitudinale-torsionale; 5 - torsionale

Variația amplitudinii sonotrodului cu puterea de ieșire W_t a transductorului se prezintă în figura 6, unde se constată că, pe măsură ce puterea de ieșire crește, amplitudinea oscilațiilor sonotrodului crește în toate cazurile [11-13].

Experimental se constată că rezistența mecanică F_r , a îmbinărilor sudate cu ultrasunete are un optim pentru o anumită amplitudine și pentru un anumit tip de excitație în sistemul ultraacustic (fig. 7).

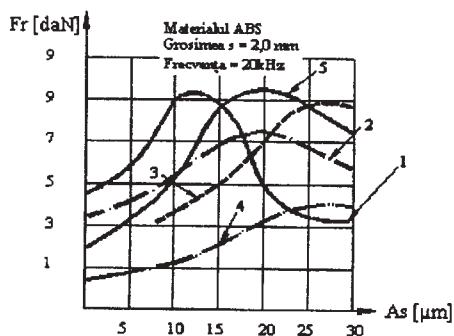


Fig. 7. Variația rezistenței la rupere F_r , a îmbinării sudate cu amplitudinea oscilațiilor ultrasonore a sonotrodului A_s , pentru diferite tipuri de oscilații: 1- longitudinale; 2 - de forfecare; 3- de încovoiere; 4- longitudinale-torsionale; 5 - torsionale

Experimental s-a constatat că, în cazul folosirii unor sisteme ultraacustice în care se propagă unde longitudinale amplitudinea optimă este de $12,5 \mu\text{m}$, în cazul propagării undelor de forfecare amplitudinea optimă este de $20 \mu\text{m}$, în cazul undelor de încovoiere este de $25,5 \mu\text{m}$, pentru undele longitudinal - torsionale este de $30 \mu\text{m}$ iar pentru undele torsionale este de $21 \mu\text{m}$.

Suprafața de contact S_k , dintre microneregularitățile în contact crește de asemenea cu puterea de ieșire a transductorului W_t (fig. 8), lucru ușor explicabil deoarece energia termică crește substanțial prin suprapunerea peste ea a energiei acustice [4, 5, 6].

În mod aproape analog crește și adâncimea de întrepătrundere h_p , a microneregularităților, care în final formează zona îmbinării sudate (fig. 9).

Problema determinării unor frecvențe optime pentru efectuarea sudării cu ajutorul ultrasunetelor a materialelor compozite inteligente se face ținând cont de amplitudinea oscilațiilor, intensitatea undelor ultrasonore, presiunea de contact, natura materialelor de îmbinat și grosimea acestora.

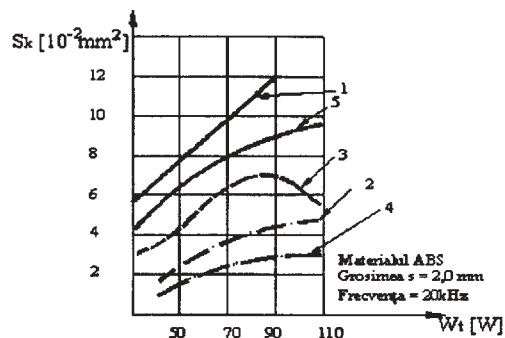


Fig. 8. Variația suprafeței de contact S_k , cu puterea de ieșire a transductorului W_t , pentru diferite tipuri de oscilații: 1- longitudinale; 2 - de forfecare; 3- de încovoiere; 4- longitudinale-torsionale; 5 - torsionale

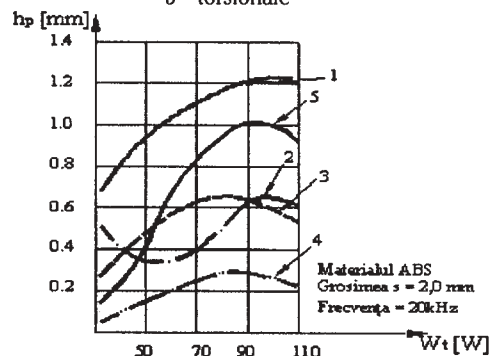


Fig. 9. Variația adâncimi de întrepătrundere h_p , cu puterea de ieșire a transductorului W_t , pentru diferite tipuri de oscilații: 1- longitudinale; 2 - de forfecare; 3- de încovoiere; 4- longitudinale-torsionale; 5 - torsionale

Influența frecvenței oscilațiilor ultrasonore asupra calității îmbinărilor sudate

Experimental s-a constatat că, cu cât frecvența ultrasunetelor este mai mare cu atât este mai mică amplitudinea oscilațiilor la o anumită putere de ieșire din transductor, ceea ce conduce la concluzia că există o anumită frecvență pentru care se obține o calitate foarte bună a îmbinării. Rezultatele experimentale obținute, demonstrează că există o frecvență optimă (fig.10) în funcție de natura materialului de îmbinat și puterea de ieșire a transductorului, cuprinsă în gama 19-40kHz.

Se constată că există o frecvență optimă de 25-30 kHz în cazul sudării unor materiale din clasa ABS, polistiren și polietilenă cu densitate mare și o frecvență optimă de 30 - 35 kHz în cazul sudării unor materiale din clasa policarbonaților sau policlorurii de vinil.

Influența intensității acustice asupra calității îmbinărilor sudate

Determinarea unei intensități acustice optime este o problemă destul de complexă, deoarece ea depinde nu numai de puterea de ieșire a sistemului ultraacustic și amplitudinea la vârful sonotrodului, ci și de natura oscilației care se propagă în sistemul ultraacustic, forma îmbinării sudate, mărimea suprafețelor în contact și natura materialelor de îmbinat.

Experimental se constată că, pe măsură ce densitatea de energie acustică crește, durata formării îmbinării scade și rezistența la rupere a îmbinării crește (fig. 11.) existând însă un optim, lucru explicabil deoarece dacă se depășește o anumită densitate de energie acustică, crește foarte mult energia termică în zona de contact și materialul începe să se distrugă.

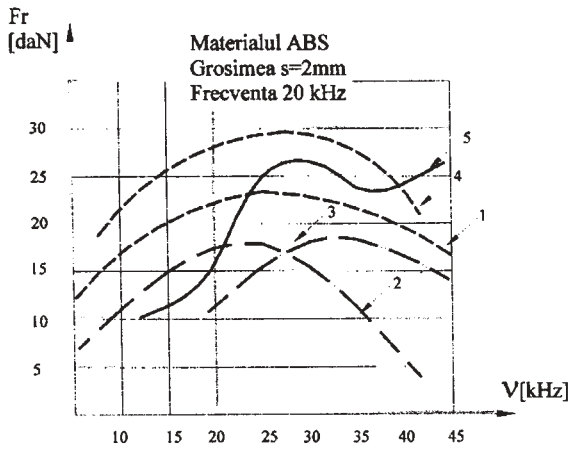


Fig. 10. Variația rezistenței la rupere a îmbinărilor sudate F_r , în funcție de frecvența v , a ultrasunetelor, pentru diferite materiale plastice: 1- ABS; 2-polistiren; 3 -policarbonat; 4 -policlorură de vinil dură; 5 - polietilenă cu densitate mare

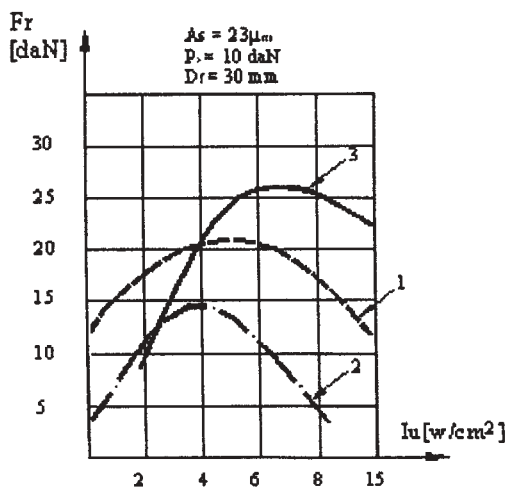


Fig. 11. Variația rezistenței la rupere a îmbinării sudate F_r , cu densitatea de energie acustică I_u , pentru diferite materiale plastice: 1-ABS; 2-polietilenă cu densitate mare; 3 - policarbonat

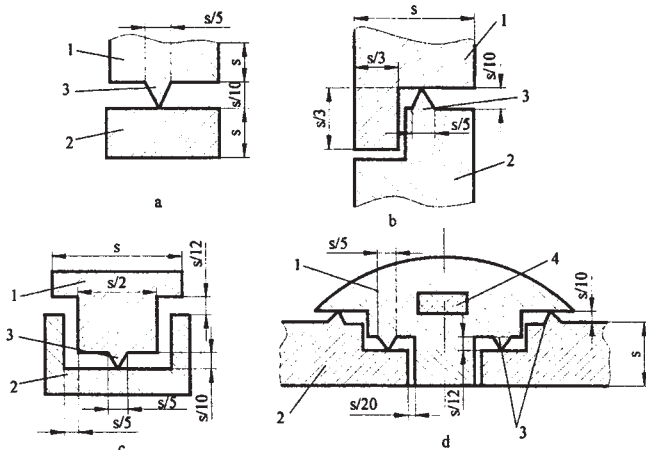


Fig. 12 . Tipuri de pregătire a zonei de contact în funcție de grosimea pieselor de sudat și presiunea statică locală de contact necesară: a-cu interval; b-în trepte; c-cu canal și pană; d-special; 1 - piesa superioară; 2- piesa inferioară; 3-concentrator de energie acustică; 4 -plăcuțe piezoceramice

Modul în care influențează densitatea de energie acustică este foarte diferit în funcție de natura materialului de îmbinat și de dimensiunile de gabarit ale îmbinării. Se observă că există întotdeauna un optim pentru densitatea de energie acustică în funcție de natura materialului,

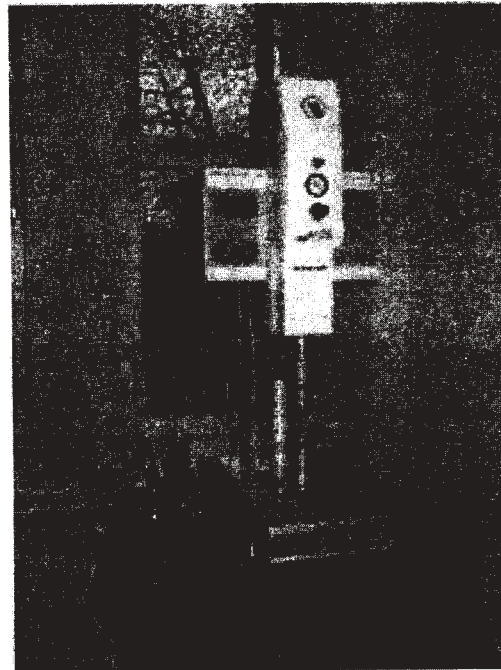


Fig. 13. Instalatia de sudat cu ultrasunete MECASONIC a materialelor compozite inteligente utilizată în experimentări

amplitudinea și forța statică de apăsare a sonotrodului în zona de îmbinat.

Se constată că intensitatea acustică optimă este de $5,0 W/cm^2$ pentru ABS de $4,0 W/cm^2$ pentru polietilenă de mare densitate și de $7,0 W/cm^2$ pentru policarbonat.

Toți parametrii acustici sunt influențați în mare măsură de modul de pregătire al zonei de contact care urmează a se îmbina nedemontabil, mod de pregătire care modifică substanțial presiunea acustică și respectiv presiunea locală statică de contact.

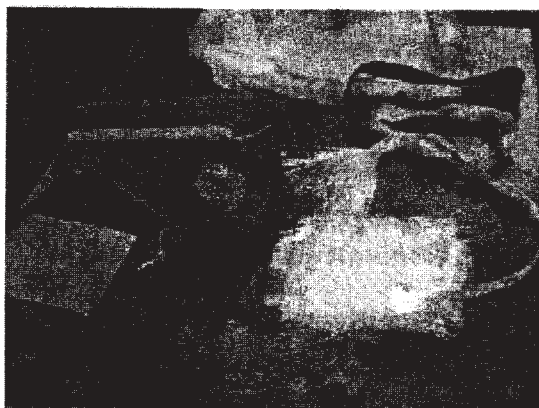
Presiunea locală statică de contact este în funcție și de configurația zonei de contact, de aceea, pentru a fi posibilă realizarea îmbinării, zona de contact are o anumită formă în primul stadiu corespunzător cu grosimea pieselor de sudat, configurația geometrică a zonei îmbinării și rolul funcțional al piesei (fig. 12). Se constată că acei concentratori de energie acustică necesari a fi prelucrați pe zona de contact realizează nu numai o concentrare rapidă a energiei termice în zonele locale ale îmbinării ci și o presiune statică de contact mult mai mare în aceste zone, presiune care scade pe măsură ce concentratorii se topesc sau se deformează plastic, crescând zona de contact.

Numărul, mărimea și distanțele la care se plasează acești concentratori de energie acustică și respectiv termică sunt în funcție de configurația geometrică a îmbinării și natura materialului de îmbinat. Modul de pregătire prezentat în figura 12d este special determinat pentru realizarea stopului auto inteligent sau al unei bare auto inteligente, care are rolul de a semnaliza acustic și optic apropierea la distanță periculoasă a autovehiculului.

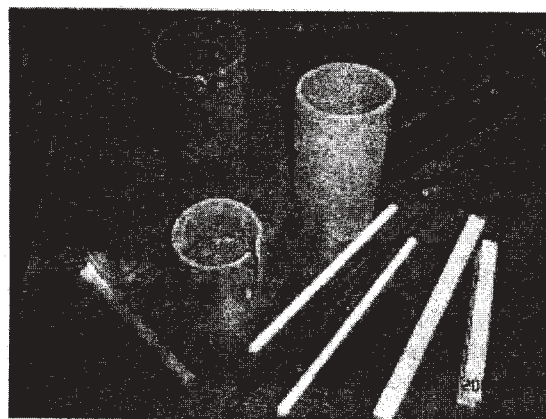
Experimentările au fost efectuate pe o instalație MECASONIC din catedra TMS (fig.13) pe diferite materiale compuse (fig.14, a, b) sau pe diferite produse .

Observație:

Pe lângă parametrii menționați și tratați mai sus, calitatea unei îmbinări sudate cu ultrasunete la materialele compozite inteligente mai depinde și de alți parametrii printre care se enumeră: natura materialului din care este confecționat sonotrodul; starea și calitatea suprafeței de



a



b

Fig. 14. Diferite materiale compuse utilizate în experimentări:
a- materiale compozite inteligente cu matrice polimerică termorigidă; b - materiale compozite inteligente cu matrice polimerică termoplastă

contact sonotrod-piesă; starea de curățire a zonei de îmbinat; natura materialului nicovalei acustice; starea și calitatea suprafeței nicovalei inferioare; starea fizică a zonei limită de contact a celor două materiale de îmbinat; natura mediului înconjurător în care se desfășoară procesul de sudare și alții [4, 5].

Concluzii

Realizarea de piese din materiale compozite inteligente prin asamblare prin sudare cu ultrasunete este o tehnologie deosebit de complexă deoarece trebuie ținut cont de o serie de elemente legate atât de procesarea materialelor compozite inteligente cât și de parametrii tehnologici, mecanici și acustici ce influențează în mod diferit procesul de sudare.

Principalii parametri tehnologici ce trebuie optimizați în procesul de sudare cu ultrasunete a unor materiale compozite inteligente sunt: natura componentelor materialelor compozite inteligente, natura matricii materialelor compozite inteligente; natura și forma elementelor de ranforsare; tipul de senzori (actuatori); configurația geometrică a suprafețelor de îmbinat; dimensiunile de gabarit ale zonelor în contact; grosimea pieselor de sudat; proprietățile fizice, chimice și mecanice ale fiecărui element component al materialelor compozite inteligente; proprietățile întregului ansamblu; rețeaua de distribuție a senzorilor (actuatoarelor); metodele de obținere a materialelor compozite inteligente; metoda de sudare; productivitatea cerută etc;

Parametrii mecanici ai procesului de sudare cu ultrasunete care se impun a fi optimizați sunt:

amplitudinea oscilațiilor ultrasonore; frecvența oscilațiilor ultrasonore; tipul de undă excitată în sistemul ultraacustic; densitatea de energie acustică; intensitatea acustică; calitatea de reflexie și de absorbție acustică a reazemelor etc;

Calitatea unor îmbinări sudate cu ultrasunete a unui material compozit inteligent mai depinde și de alți parametri care nu au fost tratați în această lucrare, printre care se enumeră: natura materialului din care este confecționat sonotrodul; starea și calitatea suprafeței de contact sonotrod-piesă; starea de curățire a zonei de îmbinat; natura materialului nicovalei acustice; starea și calitatea suprafeței nicovalei acustice; starea fizică a zonei limită de contact a celor două materiale de îmbinat; natura mediului înconjurător în care se desfășoară procesul de sudare și alții;

Optimizarea procesului de sudare cu ultrasunete a unor materiale compozite inteligente presupune găsirea unei funcții obiectiv care să cuprindă pe cât posibil toți acești parametri tehnologici, mecanici și acustici, funcție obiectiv ce poate fi optimizată în sensul unui cost minim al prelucrării sau al unei productivități maxime.

Bibliografie

1. ALASKA, T. et al., Development of Advanced Composite Materials and Their Evaluation Techniques, Ed CMC Ltd, Tokyo, 1985
2. ZGÎRIAN, G., DEMETRESCU, I., GHEORGHIU, H., IOVU, H., HADĂR, H., ATANASIU, C., Rev. Chim. (București), **56**, nr. 7, 2005, p. 757
3. GHEORGHIU, H., HADĂR, A., CONSTANTIN, N., Analiza structurilor din materiale izotrope și anizotrope, Editura Printech, București, 1998, p. 174
5. AMZA GHE., Sisteme ultraacustice, Ed. Tehnică, București, 1989
6. AMZA, GH. NIȚOI D., MARINESCU M., BORDA C., Design and finite element method simulation of the tool cone for the ultrasonic metal machining, Conferința anuală internațională de Tehnologii neconvenționale - CITN 2000, Brașov 2-3 noiembrie 2000, I, p. 167, Ed. PRINTECH, Brașov, 2000
7. AMZA, GH., MARINESCU M., BORDA C., MINCĂ A., BUȚU L., Utilizarea instrumentației virtuale la monitorizarea procesării materialelor compozite inteligente, Revista Construcțiilor de Mașini, nr.2, București, 2004.
8. AMZA GH., MARINESCU M., BORDA C., MINCĂ A., Considerații privind utilizarea senzorilor cu fibră optică în monitorizarea realizării materialelor compozite inteligente, a-XII-a Conferință Științifică cu participare internațională TEHNOMUS XII; Suceava 2003.
9. AMZA, GH., MARINESCU M., NIȚOI D., AMZA C., Intelligent Composite Materials. Curing Simulation and Experiments - Conferința anuală internațională de Tehnologii Neconvenționale - CITN 2000 - Brașov 2-3 noiembrie 2000, I, p. 256, Ed. PRINTECH Brașov, 2000.
10. AMZA GH., MARINESCU M., POPOVICI V., MINCĂ A., BORDA C., Real-Time Monitoring the Cure Process of a Smart Composite Material - Buletinul Științific UPB, 2004
11. AMZA GH., MINCĂ A., MARINESCU M., BORDA C., Contribuții privind unele tehnologii de monitorizare a materialelor compozite inteligente a-XII-a Conferință Științifică cu participare internațională TEHNOMOS XII, Suceava 2003
12. COCHRAN, A., REYNOLDS P., HAYWARD, G., Progress in Stacked Piezocomposite Ultrasonic Transducers for Low Frequency Applications, Ultrasonic **36**, nr. 10, 1998, p. 969
13. HUSTON, D., MCDONOUGH W., FANCONI B., MOPSIK F., An Assessment of the State of the Art for Process Monitoring Sensors for Polymer Composites, NIST Report NISTIR 4514 U.S. Dept. Of. Commerce, Washington D.C., June 1, 1991
14. PAPADAKIS, E., Ultrasonic Instruments and Devices - Reference for Modern Instrumentation, Techniques and Technology, Academic Press New York, 2000 (ISBN 0125319517)
15. WARNOCK, M., LE CLAIR, R., Smart Autoclave Cure of Composites, Technomic 1992
16. *** Prospecte KLN MECASONIC

Intrat în redacție: 21.10.2006