

UTILIZAREA MEF PENTRU COMPENSAREA ABATERILOR DE FORMĂ LA SUDAREA PRIN PUNCTE

ALEXANDRU Tudor - George¹, SCARLAT Cătălin²

Conducător științific: Prof.dr.ing Cristina PUPĂZĂ

REZUMAT: Sudarea electrică prin presiune prin puncte reprezintă cel mai răspândit procedeu tehnologic pentru asamblarea nedemontabilă a tablelor suprapuse. Sistemele de producție de concepție actuală utilizează soluții complexe pentru automatizarea tehnologiilor de sudare prin puncte, scopul fiind acela de a reduce ciclul de lucru și de a crește calitatea produselor finite. Deși există soluții pentru compensarea activă a erorilor de sudare, acestea se adresează producției în masă datorită costurilor mari pentru implementare și a complexității utilajului. Lucrarea de față propune o abordare interdisciplinară pentru compensarea erorilor de sudare apărute datorită abaterilor de formă. Soluția propusă are la bază metoda elementelor finite și utilizează fișiere de input parametrizate pe baza datelor de intrare existente. Conceptul este demonstrat prin intermediul unui studiu de caz privind compensarea abaterilor de formă la sudarea prin puncte a recipientilor din industria chimică.

CUVINTE CHEIE: compensare, sudare prin puncte, ANSYS, SAMCEF

1 INTRODUCERE

Sudarea prin presiune prin puncte reprezintă unul dintre cele mai productive procedee de asamblare nedemontabilă. Tehnologiile de sudare prin puncte se caracterizează printr-un grad ridicat de automatizare prin integrarea roboților industriali și a sistemelor automate (Botez, 2011).

Producția de masă și necesitatea reducerii ciclurilor pentru verificarea nedistructivă a îmbinărilor sudate au dus la dezvoltarea soluțiilor pentru compensarea activă a erorilor de sudare. Astfel de soluții integrează dispozitive fizice (senzori, tractoare și sisteme de măsurare) și virtuale (sisteme software de interfățare), având ca scop calibrarea în timp real a parametrilor regimului de sudare pentru a obține îmbinări sudate de calitate (Miller, 1989).

Din punct de vedere al specificului constructiv funcțional, utilajul folosit este de complexitate ridicată, dată de existența unei bucle de control în timp real. Dacă industria auto utilizează pe scară largă astfel de sisteme de compensare, în industriile unde producția este de serie mijlocie se optează pentru utilajul de bază folosit, compensarea erorilor fiind în general rezultatul experienței inginerilor implicați în proiectarea tehnologiilor de sudare și programarea / calibrarea aplicației. Din acest

¹ Specializarea Managementul Întreprinderilor Industriale Virtuale, Facultatea IMST; E-mail: tudor.alexandru@stud.imst.upb.ro

² Specializarea Robotica, Facultatea IMST;

interdisciplinară pentru compensarea erorilor apărute datorită abaterilor de formă. Soluția prezentată se bazează pe metoda elementelor finite, utilizând ca date de intrare informații provenite din rapoarte defectoscopice livrate de către beneficiar. În primă fază se va realiza citirea fișierelor CSV care includ date despre abaterile din zona de îmbinare. În a doua fază, aceste informații sunt preluate și introduse într-un fișier de input SAMCEF – ASEF sub formă de coordonate nodale. Scopul analizei este acela de a determina valoarea reacțiunilor nodale din zona planului de separație. Aceste valori sunt exportate în format ASCII utilizând modulul SAMCEF – FAC. Existând o relație între presiune și rezistență (Bridgman, 1917) și o variație a rezistivității pe planul de separație datorită temperaturii și presiunii de contact (Hamedi & Atashparva, 2016), datele referitoare la reacțiunile nodale sunt folosite pentru a calcula rezistivitatea din proximitatea fiecărui nod. Această redistribuție permite realizarea unei simulări realiste a procesului de formare a punctului de sudare prin rularea unei analize ANSYS Electric (studiul densității de curent și al disipării de căldură datorate efectului Joule-Lenz), SAMCEF MECANO Thermal (distribuția de temperaturi datorită transferului de căldură) și SAMCEF ASEF (deplasări și tensiuni considerând dilatația termică): Abordarea este prezentată prin intermediul unui studiu de caz privind compensarea abaterilor de formă la sudarea recipientilor din industria chimică, fiind realizate o serie de verificări analitice a rezultatelor pentru cazul nominal. Avantajele și dezavantajele

metodelor prezentate sunt discutate la finalul lucrării.

2 STADIUL ACTUAL

O abordare privind simularea procesului de sudare prin puncte prin metoda elementelor finite este prezentată în (Nied, 1983). În acest caz, modelul de calcul este materializat prin elemente 2D axial simetrice, atât interfețele de contact dintre electrozi și table cât și planul de separație dintre componente fiind modelate utilizând elemente de contact 1D. Abordarea consideră toate caracteristicile de material ca fiind variabile cu temperatura. Simularea realizată este simplu cuplată electric – termic – static, solver-ul folosit fiind ANSYS. Efectul de răcire forțată este simulat prin impunerea unor temperaturi pe planurile exterioare ale electrozilor. Schimbul de căldură cu mediul ambiant este definit pe baza unui coeficient de convecție liberă, impus pe planurile exterioare ale tablelor. O altă abordare similară este prezentată în (Kobayashi & Mihara, 2014). În acest caz, solver-ul folosit este Abaqus, modelul de calcul fiind materializat prin elemente solide de tip hexaedre. Simularea utilizează condiții de simetrie pentru reducerea timpului de calcul, fiind studiat impactul variației parametrilor regimului de sudare asupra formei și dimensiunilor punctului de sudare.

Impactul variației modului de asamblare la sudarea prin puncte este prezentat în (Jaime s.a., 2004). Lucrarea prezintă o abordare numerică pentru proiectarea paletelor port-piesă care să minimizeze deplasările apărute în urma sudării. Principalele surse ale defectelor din sudare care pot fi minizate folosind această abordare sunt variațiile de asamblare apărute datorită paletelor port-piesă și variațiile induse de utilajul de sudare. Un aspect important evidențiat în această lucrare este faptul că abaterile de formă ale pieselor montate în palete port-piesă nu pot fi minimizezate din modul de prindere / localizare a acestora.

Rezistența de contact reprezintă un factor decisiv al calității asamblărilor prin sudare prin puncte (Wei & Wu, 2012). Starea de pregătire a suprafețelor, abaterile de formă, compoziția chimică a materialului semifabricatelor cât și starea și parametrii utilajului folosit afectând în mod decisiv valoarea rezistenței de contact.

Metode și dispozitive pentru compensarea erorilor la sudarea prin puncte sunt prezentate în diferite lucrări (Stiebel s.a., 1986), brevete (Kato s.a., 2006) și studii de caz industriale (Lennart s.a., 2006). Astfel de metode utilizează senzori și traductoare amplasate la nivelul electrozilor pentru

a prelua informații referitoare la starea deplasărilor în timp real. Datorită dinamicii procesului de sudare prin presiune prin puncte, la formarea nucleului topit apar reacțiuni în material care tind să suprimă efectul forțelor de strângere. Solidificarea punctului duce la creșterea reacțiunilor. Monitorizarea deplasării permite conectarea secundarului sursei de sudare până când valoarea reacțiunilor achiziționate de la electrozi devine negativă.

3 SUDAREA ELECTRICĂ PRIN PUNCTE

Conform standardului STAS 5555/2-80, sudarea prin puncte (vezi figura 1) se definește ca fiind sudarea electrică prin presiune, prin conducție, a două sau mai multe piese suprapuse strânse între electrozii de contact, sudare care se realizează între suprafețele în contact, în locurile prin care trece curentul electric (ASRO, 2008). Energia necesară pentru îmbinarea componentelor se realizează pe baza efectului Joule-Lenz produs de curentul electric care străbate doi electrozi. Punctul de sudură se obține sub formă lenticulară în planul de separație al componentelor.

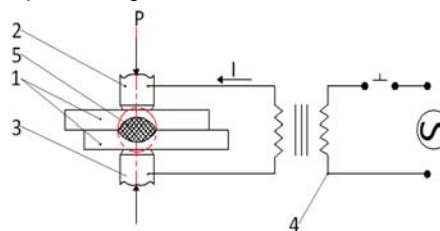


Fig. 1. Principiul sudării prin presiune prin puncte

1 = table suprapuse, 2,3 = electrozi, 4 = sursă de sudare, 5 = nucleu topit

3.1 Fazele procesului de sudare prin puncte

Orice operație de sudare prin presiune prin puncte se caracterizează prin 5 faze distincte (vezi figura 2):

1. Introducerea componentelor de sudat în poziția necesară de lucru: această etapă presupune alinierea și preluarea tuturor gradelor de libertate ale reperelor de sudat utilizând dispozitive specializate de prindere.

2. Coborârea electrodului activ și strângerea componentelor: această etapă presupune acționarea cleștelui de sudare de către unitatea informațională din poziția de 0 (poziția deschis) într-o poziție intermediară sau în poziția închis. Reglarea forței de apăsare se face în mod automatizat de către servo-sistemul de acționare a cleștelui de sudare.

3. Conectarea curentului de sudare la formarea și dezvoltarea nucleului topit prin pentru un timp determinat: această etapă duce

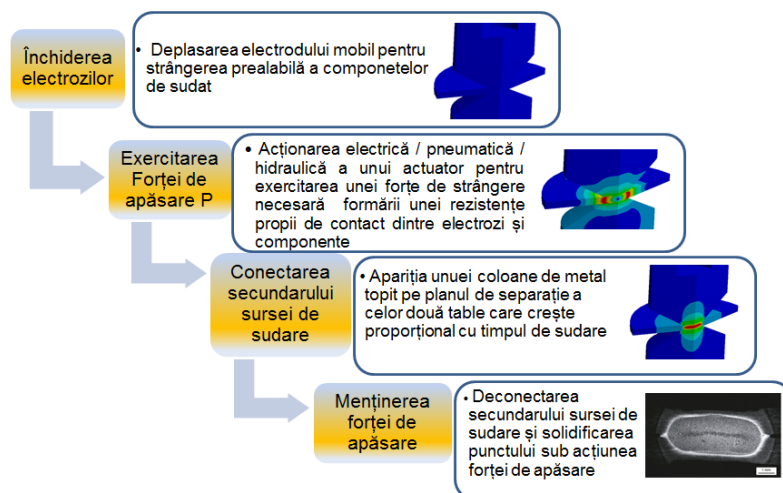


Fig. 2. Fazele procedului sudării prin puncte

conectarea sursei de curent la electrozii de sudare. Fenomenul are loc prin combinarea fenomenelor termomecanice și electrice.

4. Întreruperea curentului de sudare și solidificarea nucleului topit sub acțiunile forțelor exterioare: această etapă reprezintă etapa de solidificare a nucleului topit prin lipsa curentului de sudare și prezența forțelor de strângere, care previn expulzarea metalului topit și asigură solidificarea lentă a acestuia.

5. Ridicarea electrozului superior și evacuarea componentelor: această etapă reprezintă finalul unui ciclu de sudare. Cele 4 etape se vor repeta până la finalizarea numărului de puncte specificate prin tehnologie.

3.2 Utilajul folosit

Utilajul folosit pentru realizarea sudării prin puncte (vezi figura 3) în varianta de bază, se compune din robot industrial echipat cu End-effector de tip clește de sudare. Comanda axelor robotului se realizează prin intermediul unui controller. Reglarea și comandarea parametrilor regimului de sudare se realizează prin intermediul unui calculator de proces, acesta având rolul de a acționa electrozului mobil, de a menține conectat secundarul sursei de sudare și de a regla forțele de apăsare la intervalul de timp specificat. Comunicarea cu operatorul uman se realizează de la teach-pendant.

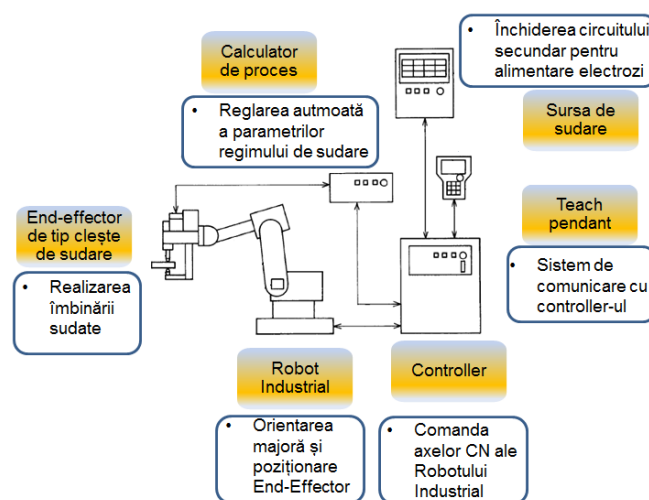


Fig. 3. Schemă constructivă privind utilajul folosit la sudarea prin puncte

4 STABILIREA PARAMETRILOR REGIMULUI DE SUDARE

Calitatea unei îmbinări sudate este dependentă de parametrii regimului de sudare stabiliți prin tehnologie. Aceștia definesc parametrii constructivi ai utilajului (diametrul electrozilor, unghiul la vârf, intensitatea de curent necesară, forța de apăsare) și parametrii care țin de semifabricat (lungimea de suprapunere, grosimea tablelor, distanța minimă dintre puncte, diametrul punctului). Există mai multe metode pentru stabilirea parametrilor regimului de sudare, cele mai cunoscute fiind metoda analitică, metoda tabelelor de echivalență și metoda elementelor finite.

4.1 Metoda analitică

Metoda analitică presupune calculul parametrilor regimului de sudare plecând de la grosimea tablelor. În prima fază se determină diametrul electrodului:

$$d_e = 2 \cdot s + 3 \quad (1)$$

În funcție de diametrul electrodului se poate aproxima diametrul punctului folosind relația 2:

$$d_p = 1.3 \cdot d_e \quad (2)$$

Unghiul la vârf al electrodului se alege între 15 și 30°

$$\alpha = 15 \dots 30^\circ \quad (3)$$

Lungimea de suprapunere a tablelor se calculează pe baza diametrului electrodului:

$$L = 1.5 \cdot d_e \quad (4)$$

Intensitatea curentului de sudare ține cont de grosimea tablelor:

$$I_s = \frac{6500}{s} \quad (5)$$

Forța de apăsare și timpul de sudare se pot determina tot pe baza grosimii tablelor folosind relațiile 6 și 7

$$P = 750 \cdot s \quad (6)$$

$$t_s = 1.2 \cdot s \quad (7)$$

4.2 Metoda tabelelor de echivalență

Metoda tabelelor de echivalență este rezultatul experienței industriale. Pe baza rezultatelor obținute din producție au fost concepute tabele care oferă date referitoare la parametrii regimului de sudare. Acestea sunt

grupate după tipul clasei de calitate și tipul regimului de sudare (regim moale sau dur).

Un exemplu de valori pentru clasa I de calitate și regim de sudare moale se prezintă în figura 4:

Grosimea tablei de sudat s [mm]	Denumirea parametrului						
	Diametrul electrodului d _e [mm]	Diametrul punctului de sudură d _p [mm]	Unghiul față de semifabricat α [°]	Lungimea de suprapunere a tablelor L [mm]	Timpul de sudare t _s [sec]	Intensitatea de curentului de sudare I _s [A]	Forța de sudare P [daN]
0.8	6	4.4	30	6.5	0.10	700	200
1	6	5	30	8	0.16	800	250
1.2	8	5.5	30	14	0.2	1000	300

Fig.4. Fazele sudării prin puncte

4.3 Metoda elementelor finite

Probleme complexe ale stabilirii parametrilor regimului de sudare (configurații complexe, variații geometrice) se pot modela utilizând metoda elementelor finite (MEF).

Abordarea presupune simularea cuplată (vezi figura 5) a fenomenelor electrice – termice și mecanice.

Analizele electrice sunt folosite pentru a determina densitatea curentului și căldura nodală apărută datorită efectului Joule-Lenz. Analizele termice sunt folosite pentru a studia distribuția de temperaturi din electrozi și din baia de sudură pe când analizele statice pot fi utilizate pentru a determina tensiuni și deplasări.

Se pot rula simulări succesive pe baza modelelor parametrizate pentru a stabili o configurație optimă a parametrilor regimului de sudare.

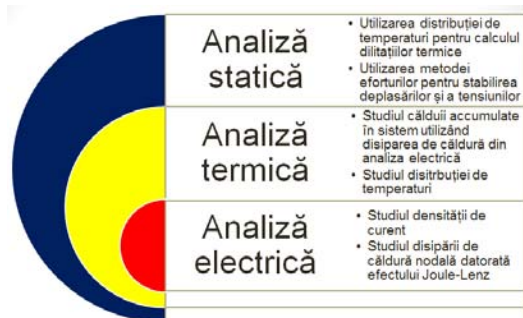


Fig.5. Utilizarea MEF pentru stabilirea parametrilor regimului de sudare

5 ABORDĂRI PENTRU COMPENSAREA ERORILOR

5.1 Compensarea utilizând sisteme pentru reglare în timp real

Compensarea erorilor la sudarea prin puncte presupune utilizarea unui sistem de reglare în timp real (vezi figura 6). Acesta utilizează traductoare de forță instalate la nivelul electrozilor pentru a achiziționa în timp real valoarea deplasărilor.

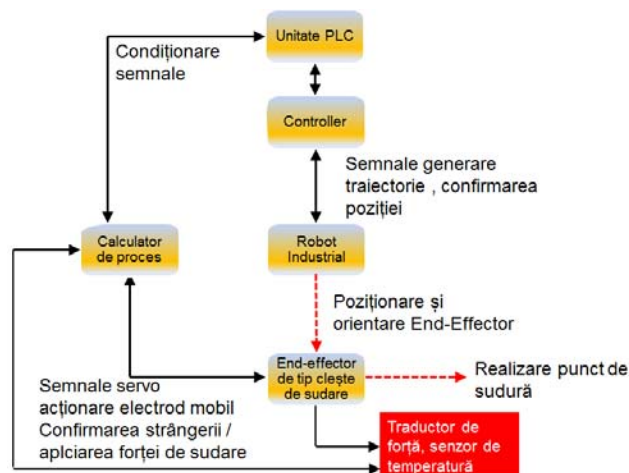


Fig. 6. Utilizarea principiului de reglare în timp real pentru compensarea erorilor la procesele de sudare prin puncte

Formarea punctului duce la schimbări de fază care au loc în material (trecerea din starea solidă în stare lichidă). Datorită dinamicii procesului de sudare, în material apare o stare de deplasări care tind să expulzeze coloana de metal topit (vezi figura 7). După formarea punctului, deplasările manifestă o tendință descrescătoare. Această fază corespunde cu deconectarea secundarului sursei de sudare. Procesul de solidificare a punctului duce la apariția unor deplasări de valoare negativă. Forța de apăsare este menținută până când valoarea reacțiunilor devine nulă (punctul s-a solidificat).

Controlul timpului de sudare se realizează prin intermediul condiționării semnalelor între calculatorul de proces și unitatea PLC.

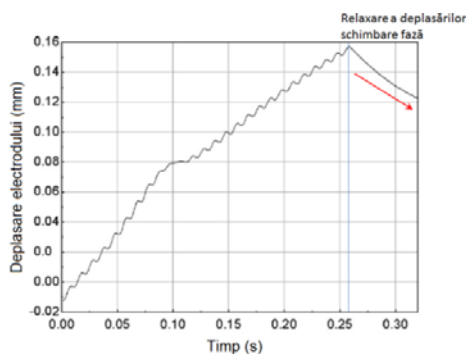


Fig. 7. Variația deplasărilor interpretate la nivelul electrodului fix

5.2 Compensarea utilizând MEF

MEF se poate utiliza pentru a simula evoluția reacțiunilor de la nivelul electrozilor pe parcursul unui ciclu de sudare considerând un model nominal, parametrizat pentru modificarea coordonatelor nodale corespunzătoare marginilor

reperelor de sudat. Utilizând un raport de măsurare în format CSV și un program pentru interpretarea acestuia, se poate procesa valoarea abaterilor, aceasta fiind adăugată la valoarea nominală a coordonatelor nodale. Spre exemplu, se citește valoarea coordonatelor raportate la un sistem de referință pentru ITEM25 ep 3. În modelul de calcul, punctul de măsurare corespunde coordonatelor unui grup compus din 3 noduri. Valoarea citită din fișierul CSV este CX - 126.868 și CY 921.575. Valoarea coordonatelor nodale este CX -126.867 și CY 921.4605. Rezultă noile coordonate (-126.867 ; 921.4605) care corespund unei abateri pe Y de 0.1145 mm. Fiecare 3 noduri corespund unui element 2D de tip triunghi. Modificarea coordonatelor marginilor reperelor de sudat duc la o aproximare cât mai apropiată de realitate a profilului de sudat. În figura 8 se prezintă la o scară exagerată diferența dintre forma nominală din calcul și forma reală obținută în urma procesării fișierului CSV.



Fig. 8. Modelul nominal și modelul actualizat pe baza fișierului CSV – factor de amplificare x100

Simulările realizate, condițiile la limită și încărcările impuse sunt prezentate în tabelul 1.

Tipul simulării	Caracteristici de material	Condiții la limită	Încărcări	Rezultate
Analiză statică SAMCEF ASEF	Modulul lui Young (MPa) Coeficientul lui Poisson	Contact fără frecare între electrod – piesă și pe planul de separație	Forța de sudare	Reacțiuni nodale – redistribuția eforturilor în zona planului de separație
Analiză cuplată Electric – Termic – Static (ANSYS Electric – SAMCEF MECANO Thermal – SAMCEF ASEF)	Rezistivitate ($\Omega \cdot \text{mm}$) Densitate (tone/mm^3) Conductivitatea termică ($\text{W}/\text{mm}^\circ\text{C}$) Căldura specifică ($\text{J}/\text{tonă}^\circ\text{C}$) Modulul lui Young (MPa) Coeficientul lui Poisson Coeficientul de expansiune termică ($^\circ\text{C}^{-1}$)	Contact nodal pe bază de rezistivitate echivalentă dependent de temperatură pe planul de separație Caracteristici de material dependente de temperatură	Intensitatea curentului de sudare la electrodul mobil Coeficientul de convecție liberă impus pe marginile reperelor de sudat Temperatură pe planurile exterioare ale electrodului	Densitatea de curent Încălzirea Joule Distribuția de temperaturi Deplasări și tensiuni

Modelul de calcul se poate pre-procesa utilizând ANSYS Mechanical și ANSYS CAE Interface for SAMCEF. În figura 9 se prezintă un model de discretizare. Acesta utilizează elemente 2D de tip triunghi cu formulare 2D Axial simetric.

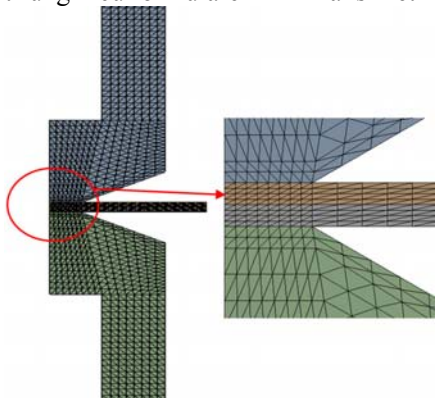


Fig. 9. Discretizare cu elemente 2D formulare Axial-simetric

6 STUDIU DE CAZ

Pe baza fundamentelor anterioare, în cele ce urmează se va prezenta un studiu de caz privind compensarea abaterilor de formă la sudarea recipientelor din industria chimică.

Un extras din desenul de ansamblu al reperului studiat este prezentat în figura 10:

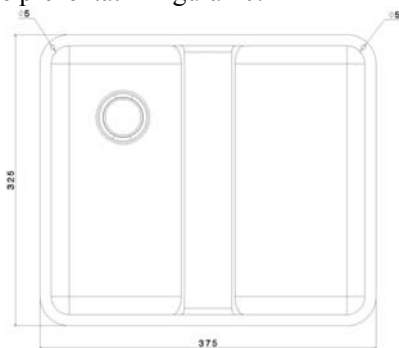


Fig. 10. Extras desen de ansamblu rezorvor

Vederea 3D izometrică a produsului este prezentată în figura 11.

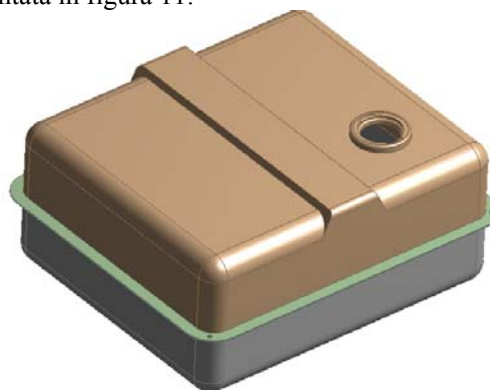


Fig. 11. Vedere 3D izometrică

Ansamblul reprezintă un rezervor asamblat prin sudare prin puncte utilizat pentru stocarea soluțiilor acide din industria chimică.

Confecționarea rezervorului presupune ambutisarea tablelor obținute din oțeluri aliate. Datorită defectelor apărute din procesul de ambutisare, planul de suprapunere al celor două repere care compun ansamblul vor prezenta o abatere de la planeitate (vezi figura 12).

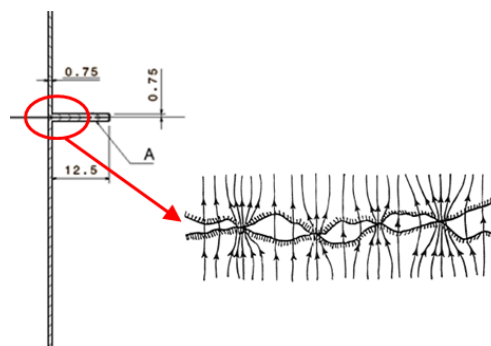


Fig. 12. Detaliu privind forma reală a profilului pe planul de separație

În primă fază se realizează citirea fișierului CSV pentru actualizarea formei reale a profilului. Noile valori sunt utilizate pentru a studia redistribuția eforturilor pe planul de separație (vezi figura 13).

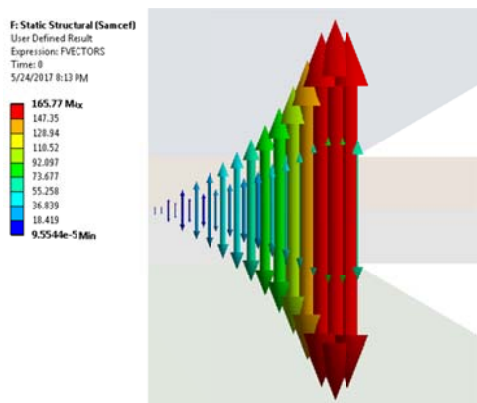


Fig. 13. Rezultatele reacțiilor nodale procesate la planul de separație

În urma analizei, rezultă un raport nodal (procentul de reacțiuni, vezi figura 14). Acesta este folosit pentru a recalcula valoarea rezistivității electrice ($\Omega \cdot \text{mm}$) de pe planul de separație (redistribuirea valorii nominale pe fiecare nod).

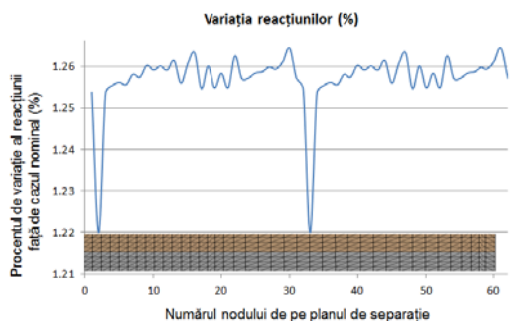


Fig. 14. Procentul de variație dintre reacțiile din cazul nominal și reacțiile obținute în urma considerării formei reale a profilului

Se rulează simularea cuplată și se post-procesează distribuția de temperaturi și deplasarea nodală (vezi figurile 15 și 16).

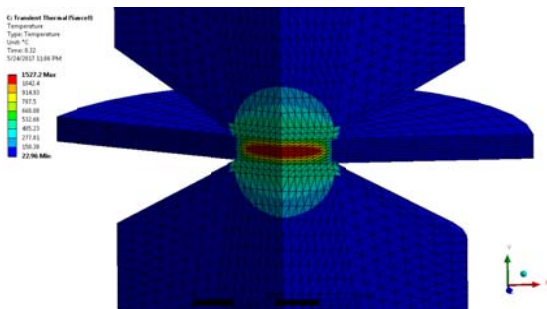


Fig. 15. Distribuția de temperaturi observată la momentul formării coloanei de metal topit (increment temporal = 0.32s)

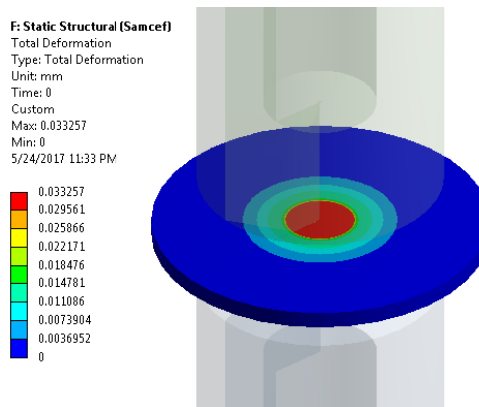


Fig. 16. Deplasarea nodală la interfața dintre electrodul mobil și semifabricat (amprentă)

Se realizează reprezentarea grafică a reacțiilor nodale în funcție de timp, pentru a fi studiate cele două inflexiuni ale graficului (vezi figura 17). Aceste puncte indică intervalele de timp dintre fazele de formare a punctului (conectare a secundarului sursei de sudare) și faza de solidificare a punctului (deconectarea sursei și menținerea forțelor de apăsare).

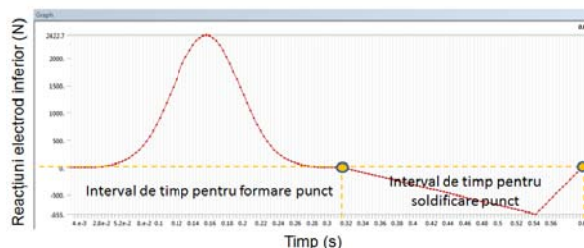


Fig. 17. Reacțiuni – variația în raport cu timpul post-procesare realizată pe planul inferior al electrozudului fix

Compensarea se realizează prin modificarea timpului de sudare nominal cu timpul de sudare modificat. În figura 18 se prezintă cu linie verde punctată prima inflexiune pentru cazul nominal și cu linie punctată portocalie inflexiunea obținută în urma considerării profilului real.

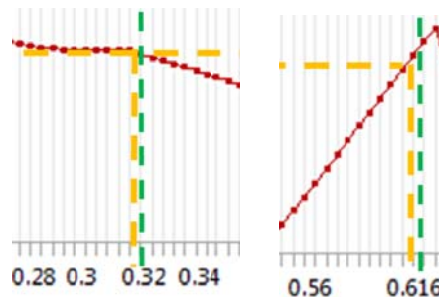


Fig. 18. Detaliu – studiul inflexiunilor pentru forma reală a profilului. (timpul nominal pentru formare punctului ~ 0.32s - 0.317 s cu abatere, timpul pentru solidificare ~ 0.616s – 0.636s cu abatere)

7 VERIFICAREA REZULTATELOR

Rezultatele pot fi verificate doar pentru cazul nominal, în lipsa unor date experimentale. Se utilizează modelul analitic pentru a compara rezultatele obținute pentru diametrul punctului și timpul de sudare. Se poate realiza, de asemenea și o comparație a rezultatelor cu cele obținute în literatura de specialitate (Hou s.a., 2007) pentru adâncimea amprentei și temperatura în baia de sudare la formarea punctului (vezi tabelul 2):

Tabelul 2.Compararea rezultatelor

Parametru	MEF	Analitic/Literatura specialitate	ϵ (eroare)
Diametrul punctului	7.41m m	7.5 mm	-1.3%
Timpul de sudare	0.608 s	0.6 s	+1.3%
Adâncime amprentă	0.038 mm	Între 0.02 .. 0.04 mm	Se află în interval
Temperatura din baia de sudare	1492° C la 0.17 s	1499 la 0.17 s	-0.46%

8 CONCLUZII

Lucrarea a prezentat o abordare inovativă pentru utilizarea instrumentelor de simulare prin metoda elementelor finite la compensarea erorilor apărute datorită abaterilor de formă în cazul sudării prin puncte. Conceptul a fost materializat prin intermediul unui studiu de caz. Avantajele folosirii acestei metode le reprezintă reducerea costurilor și a complexității utilajului de sudare. Dezavantajul principal este acela al problemelor de convergență care pot apărea datorită neliniarității analizelor realizate. Autorii doresc să continue cercetările prin implementarea fizică a soluției cu subsistemul informațional al unei celule flexibile de fabricație dedicată operațiilor de sudare prin puncte.

9 MULȚUMIRI

Realizarea lucrării a fost posibilă mulțumită inginerilor Dorinel Constantin și Badea Ion – ASSYSTEM România, care au contribuit la formarea competențelor necesare lucrului cu solver-ul LMS SAMCEF, pe parcursul unui stagiu de formare.

10 BIBLIOGRAFIE

[1]. ASRO (2008), *Sudare electrică prin presiune Sudarea în puncte a aluminiului și a aliajelor de aluminiu: Sudabilitate, sudare și încercări [standard]*, Asociația de Standardizare din România
[2]. Botez, I., Alexandru, M., Sârbu I., Alexei, B. și Victor J. (2011), *Sudarea electrică*, Editura Tehnica-info, Chișinău, ISBN 978-9975-63-296-6.

[3]. Bridgman P.W. (1917), "The Electrical Resistance of Metals under Pressure.", *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* 52, no. 9 (1917): 573-646. doi:10.2307/20025699, 573-646. doi:10.2307/20025699.
[4]. Hamedi, M. și Atashparva, M. (2016), "A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding", *Welding in the World*, 1-22.
[5]. Hou, Z., Soo Kim, I., Wang, Y., Li, C., și Chen C., (2007), "Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process", în: *Journal of Materials Processing Technology* 185 (2007) 160-165.
[6]. Kato, T., Koichi, O., și Soichi, A., (2006), "Spot Welding System And Method of Controlling Pressing Force of Spot welding Gun", în: *US007002095B2*, United States Patent Office.
[7]. Kobayashi, T. and Mihara, Y., (2014), Numerical simulation of nugget formation in spot welding
[8]. Miller, R.K. (1989), *Industrial Robot Handbook*, Springer US.
[9]. Nied, H. (1984), "The finite element modeling of the resistance spot welding process.", *Weld. J.* 63, no. 4, 123-133
[10]. Stiebel, A., Ulmer, C., Kodrack, D., și Holmes, B., "Monitoring and Control of Spot Weld Operations", în: *SAE Technical Paper 860579, 1986*, doi:10.4271/860579.
[11]. Sundstedt L., Muller C., și Olofsson A. . (2006). *Spot ON Accurate spot welds with equalizing software* disponibil la: https://library.e.abb.com/public/24a5088fe6fcc107c125712600322b9d/47-51%201M610_ENG72dpi.pdf
Accesat la data: 11.05.2017
[12].Camelio, J.A., Hu, S.J. și Ceglarek, D.J.,(2002), "Impact of fixture design sheet metal assembly variation", în: *ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 133-140.
[13].Wei, P.S. și Wu, T.H., (2012), "Electrical contact resistance effect on resistance spot welding", în: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11), 3316-3324.

11 NOTAȚII

Următoarele simboluri sunt utilizate în cadrul lucrării:
 d_c = diametrul electrozudului [mm];
 d_p = diametrul punctului [mm];
 α = unghiul la vârf [°];
 L = lungimea de suprapunere [mm];
 I_s = intensitatea curentului de sudare [A];
 P = forța de apăsare [daN];
 t_s = timpul de sudare [s];