

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FORȚELE LA DEFORMAREA INCREMENTALĂ

Prof. dr. ing. Valentin OLEKSIK¹, Prof. dr. ing. Radu BREAZ¹, Prof. dr. ing. Gabriel RACZ¹,
Prof. dr. ing. Octavian BOLOGA¹, Prof. dr. ing. Paul Dan BRÎNDAȘU¹

¹ Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, România

REZUMAT. Lucrarea de față își propune realizarea unui studiu comparativ referitor la forțele care apar în procesul de deformare incrementală. Lucrarea prezintă avantajele procedurii de deformare incrementală, un stadiu actual în domeniu și aparatura experimentală folosită la determinarea forțelor din proces. Pentru studiul comparativ referitor la forțele din procesul de deformare autorii au ales două materiale metalice: un oțel OL52 și un aliaj de aluminiu (A6061). Forma finală a pieselor a fost de trunchi de piramidă. Au fost utilizați doi pași verticali (0,25 și 0,5 mm). Au fost determinate forța verticală și o forță orizontală

Cuvinte cheie: deformare incrementală, cercetări experimentale, forțe, materiale, pas vertical

ABSTRACT. The present paper proposes a comparative study regarding the forces that occur in the incremental forming process. The paper presents the advantages of the process, the state of the art and the experimental layout used. For the comparative study regarding the forces in the incremental forming process the authors had chosen two different metallic materials: a structural steel (OL52) and an aluminum alloy (A6061). The desired shape of the parts was frustum of pyramid. Two different values of the vertical step were chosen (0.25 and 0.5 mm). The vertical force and one horizontal component were determined.

Keywords: incremental forming, experimental researches, forces, materials, vertical step

1. INTRODUCERE

Procedeele neconvenționale de deformare a materialelor metalice au devenit din ce în ce mai utilizate în industria auto, aviaică, producătoare de aparate medicale și bunuri de larg consum. Producerea reperelor caracteristice acestor industrii este limitată la o varietate redusă de forme și în consecință procedeele convenționale de deformare care necesită utilizarea unui set complex de scule (placă activă, poanson, inel de reținere) devin costisitoare [2]. Procesul de deformare incrementală a tablelor metalice reprezintă o metodă modernă de deformare plastică la rece cu aplicabilitate de dată relativ recentă și aflată într-un stadiu relativ incipient ca urmare a lipsei unor rezultate obținute prin cercetări sistematice.

La procesul de deformare incrementală a tablelor, procesul de deformare se realizează de către un poanson care urmează o traiectorie programată, suprafața piesei rezultând ca o înfășurătoare a pozițiilor succesive ale poansonului. Astfel, la procedeul de deformare incrementală, poansonul are o mișcare incrementală pe direcție verticală continuu, iar placa activă efectuează o mișcare

plană, într-un plan paralel cu planul inițial al semifabricatului (fig. 1.1).

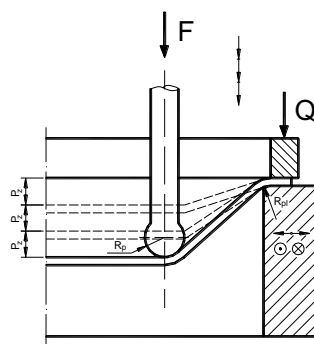


Fig. 1.1. Schema procedurii de deformare incrementală.

Flexibilitatea procedurii este mare întrucât cu același poanson și aceeași placă activă, în funcție de mișcările impuse elementelor active, utilizând aceeași mașină-unelte se pot obține o multitudine de forme cave. Prin acest procedeu se pot realiza cu ușurință piese de formă complexă și de dimensiuni mari pentru care matrițele convenționale sunt dificil de realizat. Avantaje decurg și din posibilitatea implementării prelucrării pe mașini cu comandă numerică (CNC) [8].

2. STADIUL ACTUAL

Principalele caracteristici esențiale ale procedelor de deformare incrementală sunt:

- modificarea formei piesei afectează în fiecare etapă de prelucrare doar o mică parte din volumul piesei;

- etapele de prelucrare prezintă în multe cazuri similarități de natură cinematică și geometrică;

- zonele individuale ale piesei intră des, în unele cazuri chiar foarte des, în contact cu sculele.

Procesele de deformare incrementală se pretează doar la producția de serie mică și chiar unicat. Acest tip de producție induce pretenții mari în întreg sistemul de producție.

Primele lucrări științifice, referitoare la tehnica deformării incrementale a tablelor metalice, în urma cercetărilor efectuate în Japonia și Coreea de Sud. În anul 1994 Matsubara și alții au determinat prin metode experimentale mărimea incrementului de deformare pentru ambutisarea unor piese sferice, eliptice și hiperbolice [9]. În anul 1996 Hasebe a analizat mărimea deformației locale pe baza curbilor limită de deformare [6]. Metoda elaborată se bazează pe calculul deformației specifice pe considerente pur geometrice și egalarea ei cu deformația specifică pe grosime, rezultată pe baza curbilor limită de deformare.

S-a realizat o analiză aproximativă a deformației pentru deformarea incrementală a tablelor metalice folosindu-se un poanson cu cap emisferic de către profesorul Hideo Iseki de la Tokyo Institute of Technology [8].

Hussain și colectivul au studiat deformabilitatea diverselor materiale la deformarea incrementală într-un singur punct și în două puncte dar și stabilirea curbilor limită de deformare specifice acestor procedee [7]. Capece și colectivul a identificat prin cercetări experimentale și simulări numerice unghiul maxim de înclinare al peretelui pentru piese de tip trunchi de con și trunchi de piramidă obținute prin deformarea incrementală într-un singur punct [3].

Attanasio studiază optimizarea traiectoriei poansonului la deformarea incrementală într-un singur punct utilizând două tipuri de traiectorii: una cu pas constant pe verticală și alta cu pas variabil [1]. Este prezentat impactul pe care îl au tipul traiectoriei poansonului și alți parametri ai procesului asupra preciziei pieselor obținute prin deformare incrementală. Yamashita și colectivul realizează simularea numerică a procedurii de deformare incrementală într-un singur punct pentru mai multe tipuri de traiectorii [10].

Cercetările experimentale legate de deformarea incrementală într-un singur punct s-au axat și pe determinarea forțelor din proces. Duflo și colecti-

vul analizează forțele la deformarea incrementală într-un singur punct și influența pasului, a diametrului poansonului, a grosimii materialului și a unghiului de înclinare a peretelui asupra acestora [4]. Filice și colectivul au subliniat importanța controlului procesului de deformare incrementală pe baza monitorizării forțelor din proces [5]. Lucrarea de față își propune continuarea acestor cercetări în domeniul determinării forțelor la deformarea incrementală într-un singur punct printr-un studiu comparativ pentru două tipuri de materiale (oțel și aluminiu) și două valori ale pasului pe direcție verticală (0,25 respectiv 0,5 mm).

3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE

Procesul de deformare incrementală a tablelor metalice a materialului reprezintă un proces de deformare complex la care, comparativ cu procedeele de ambutisare clasică, poansonul execută pe lângă mișcarea pe direcție verticală și o mișcare în plan orizontal, planul semifabricatului. Din această cauză, studiul variației forței la deformarea incrementală a tablelor metalice trebuie să cuprindă atât studiul componentei verticale cât și cel puțin a uneia dintre componentele forței ce acționează în planul orizontal.

Experimentele au fost efectuate în compania Compa S.A. pe o mașină de frezat cu comandă numerică (fig. 3.1). Mașina cu comandă numerică permite atât deplasarea poansonului pe direcție verticală cât și a plăcii active împreună cu masa dinamometrică, pe care aceasta este așezată, în planul semifabricatului.



Fig. 3.1. Matrița montată pe masa mașinii de frezat.

Pentru determinarea forțelor a fost utilizat un element elastic (masă dinamometrică) proiectată special pentru acest tip de deformare.

Masa dinamometrică (fig. 3.2) este constituită din placa inferioară (3) și superioară (2) între care sunt

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FORȚELE LA DEFORMAREA INCREMENTALĂ

montate cele două elemente elastice (1) și (4). Centrarea și fixarea lor se realizează cu ajutorul știfturilor (6) și șuruburilor (5). Placa de bază dispune de pene pentru centrarea pe masa deplasabilă, iar placa superioară de canale în formă de T, pentru centrarea și fixarea matriței experimentale.

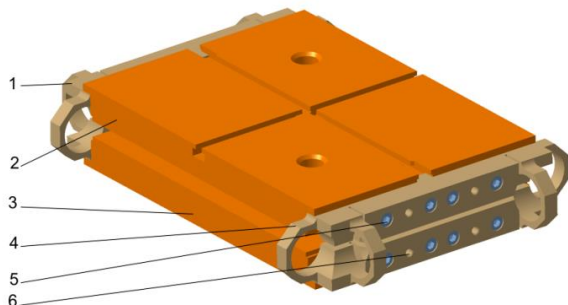


Fig. 3.2. Masa dinamometrică utilizată pentru determinarea forțelor.

Configurația elementului elastic este astfel aleasă încât să permită:

- evidențierea forțelor urmărite, cu o bună reproductibilitate;
- montarea numărului de traductoare necesar pentru realizarea unei punți complete în vederea obținerii sensibilității maxime, compensării temperaturii și erorilor de neliniaritate și histererezis;
- reducerea la maximum a zonei în care distribuția tensiunilor este neuniformă.

Avându-se în vedere recomandările din literatura de specialitate, s-a optat pentru un element elastic de formă complexă care permite evidențierea forțelor după trei direcții. Elementul este de tip inel, de formă circulară la interior și octogonală la exterior, constituit din două jumătăți identice unite printr-un element de rigidizare ce asigură și baza de așezare. Acest tip de element permite măsurarea atât a forțelor statice cât și a celor dinamice, între limitele impuse de frecvența proprie relativ redusă a inelului. Sensibilitatea elementului este relativ mare, putându-se utiliza patru sau chiar opt traductoare tensometrice rezistive pentru un singur inel.

Lipirea traductoarelor tensometrice s-a făcut în punctele în care se anulează momentele încovoietoare datorate forțelor verticale și orizontale, evitându-se astfel influențele reciproce ale punților de măsurare.

Etalonarea mesei dinamometrice s-a efectuat, prin încărcarea acesteia cu o forță pe direcție perpendiculară pe planul mesei, în domeniul 0...12 kN (fig. 3.3), și cu o forță pe direcție paralelă cu planul mesei, în domeniul 0... 6 kN (fig. 3.4), pe mașina de încercat la tracțiune/compresiune Instron 4303, cu capacitatea maximă de încărcare de 25 kN, controlată de computer printr-o interfață IEEE-488 și un software specializat.

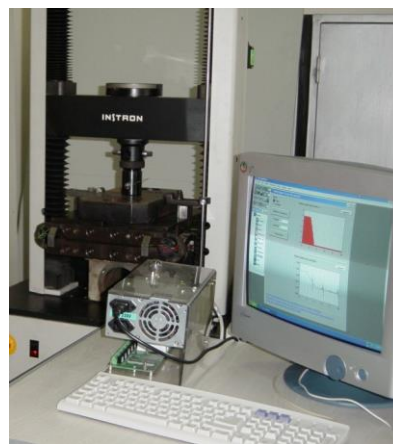


Fig. 3.3. Etalonarea mesei pe direcție verticală.



Fig. 3.4. Etalonarea mesei pe direcție orizontală.

Achiziția semnalelor de la timbrele tensometrice montate pe masa dinamometrică (deformațiile specifice) s-a realizat prin intermediul unui instrument virtual realizat în programul Matlab.

Etalonarea s-a efectuat în scopul determinării curbei de încărcare a mesei dinamometrice, cunoscând cu exactitate forța de încărcare introdusă de mașina de încercat la tracțiune/compresiune Instron 4303.

S-a determinat graficul forței, funcție de semnalul achiziționat [V], prin interpolarea liniară a dreptei care trece prin punctele de măsurare. S-au obținut ecuațiile de etalonare pe cele două direcții ale mesei dinamometrice/captorului de forță, de forma:

$$F_z = 2,07 \cdot V_1 - 2,89 \text{ [kN]}; \quad (3.1)$$

$$F_x = 2,85 \cdot V_2 - 0,381 \text{ [kN]}; \quad (3.2)$$

unde:

F_z este forța pe direcție perpendiculară pe planul mesei aplicată mesei dinamometrice;

F_x este forța pe direcție paralelă cu planul mesei aplicată mesei dinamometrice;

V_1 reprezintă tensiunea, în V, a semnalului achiziționat de la puntea tensometrică, corespunzătoare forței F_z ;

V_2 reprezintă tensiunea, în V, a semnalului achiziționat de la puntea tensometrică, corespunzătoare forței F_x ;

Sistemul de achiziție de date, este compus din patru module: traductoarele (captorul de forță pentru direcția z, captorul de forță pentru direcția x formate din timbrele tensometrice Hbm 350XY11) montate pe cele două inele ale mesei dinamometrice, modulele de condiționare a semnalului (MB-38 produs de Keithley Instruments Inc.), placa de conversie analog – digitală (KPCI 3108, Keithley Instruments Inc.) și un pachet software care controlează sistemul de achiziție și prelucrează datele culese. Cele două traductoare aflate în componența standului sunt conectate și alimentate, cu curent electric stabilizat, de la placa de conversie analog – digitală, prin intermediul modulelor de condiționare. Aceste module asigură selectarea factorului de amplificare a semnalului, a domeniului de măsurare și a filtrării semnalului achiziționat.

Placa de conversie analog – digitală are o capacitate de achiziție pe 16 canale cu frecvența de eșantionare cumulată de 100 ksamples/sec. Rata maximă de transfer se obține în cazul conectării pe magistrala PCI și este de 132MB/sec. Semnalele obținute sunt amplificate, prelucrate și transmise apoi, pe magistrala de date, plăcii de bază a computerului. Datele sunt preluate, arhivate, analizate și prezentate prin intermediul pachetului software specializat Matlab. Programul efectuează, pe lângă arhivarea datelor culese, o condiționare a semnalului (filtrare, scalare), o analiză a datelor (prelucrare statistică, măsurare) precum și o prezentare grafică a datelor pe display sau pe hârtie, prin intermediul unei imprimante. Datele culese sunt stocate pe medii magnetice de memorie.

Modulul de intrare de bandă largă pentru timbre tensometrice achiziționează date de la punți și semipunți de traductoare de acest tip cu rezistențe cuprinse între 300 Ω și 10 k Ω . Modulul asigură o tensiune de excitație de +10 V și furnizează la ieșire o tensiune cuprinsă între -5 V și 5 V. Banda de frecvență a acestui modul este de 10 kHz.

Sistemul de achiziție de date a permis înregistrarea simultană a valorilor aferente ambelor componente (F_z și F_x) ale forței de deformare, lucrându-se cu o frecvență de achiziție de 25Hz. Frecvența aleasă are o valoare destul de scăzută datorită faptului că și procedeul de deformare este un procedeu lent. Calculul valorilor reale ale componentelor forțelor de deformare s-a făcut cu ajutorul relației de interdependență dintre valoarea semnalului electric primit și mărimea forței, stabilită cu ajutorul curbelor de etalonare.

Semnalul achiziționat de la placa analog-digitală KPCI 3108 este prelucrat, filtrat și salvat prin intermediul unui instrument virtual creat de autor în programul Matlab, pachet software care însoțește placa de achiziție și care este dedicat achizițiilor de date. Instrumentul conține blocuri puse la dispoziția utilizatorului de către program care permit modificarea numărului de canale pe care se face achiziția, rata de achiziție, durata totală a achiziției, filtrarea datelor în scopul eliminării „zgomotului” inerent oricărei achiziții și salvarea datelor sub forma unor fișiere de tip text.

Instrumentul este conceput astfel încât să aibă patru module distincte: un modul de achiziție și vizualizare a datelor, unul de filtrare, unul de transformare a mărimilor electrice în mărimi mecanice și unul de salvare a datelor sub forma unor fișiere de tip text (ASCII).

Semifabricatele au fost în număr de 4 pentru fiecare tip de material și au avut formă pătrată cu dimensiunile de 180x180 mm cu grosimea $g = 0.8$ mm. Astfel, fiecare experiment a fost repetat pentru eliminarea erorilor. A fost folosită o placă activă cu zona activă pătrată, cu raza de racordare de $R_{pl} = 6$ mm și cu latura pătratului $l = 80$ mm. Viteza de deformare a fost păstrată constantă pe durata experimentelor și a avut valoarea de 25 mm/min. Poansonul utilizat a avut o formă semisferică având o rază $R = 5$ mm. Pe parcursul procesului de prelucrare, pentru a diminua frecarea, poansonului i s-a aplicat o mișcare de rotație $n = 120$ rot/min. Tot cu scopul micșorării forțelor de frecare suprafața de contact dintre poanson și semifabricat a fost lubrifiată. Deoarece s-a urmărit determinarea simultană a două componente ale forței de deformare, una verticală și una orizontală, în planul semifabricatului, prelucrarea a constat în pătrunderea poansonului, la o distanță egală cu pasul pe direcție verticală, urmată de deplasarea în plan pe o traiectorie rectangulară a întregului sistem de măsurare (masa dinamometrică, placa activă). Traiectoria aleasă a condus la realizarea unui trunchi de piramidă cu latura mare $L = 40$ mm și cu o înclinare a peretelui vertical de 45° . Înălțimea totală a trunchiului de piramidă a fost de 24 mm.

Rezultatele cercetărilor experimentale pentru cele două forțe sunt prezentate în tabelul 1 și în succesiunea de figuri 3.5 ... 3.7.

Tabelul 1. Rezultatele cercetărilor experimentale

	Oțel		Aluminiu	
Pasul [mm]	0,25	0,5	0,25	0,5
Fz [N]	1497,45	1604,35	415,79	457,94
Fx [N]	523,62	551,93	143,60	132,57

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FORȚELE LA DEFORMAREA INCREMENTALĂ

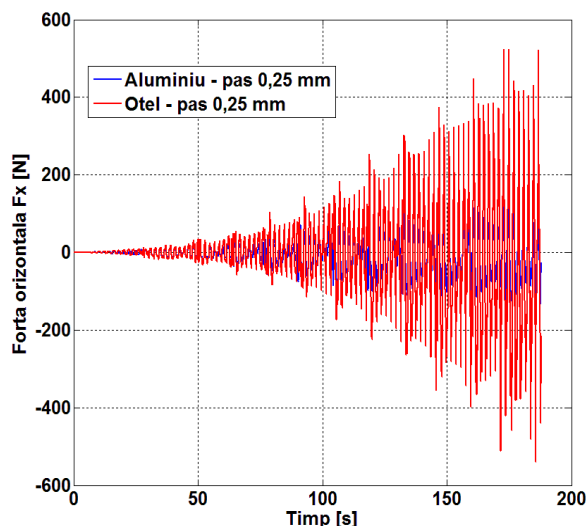


Fig. 3.5. Graficul de variație al forței orizontale F_x la prelucrarea cu un pas de 0,25 mm.

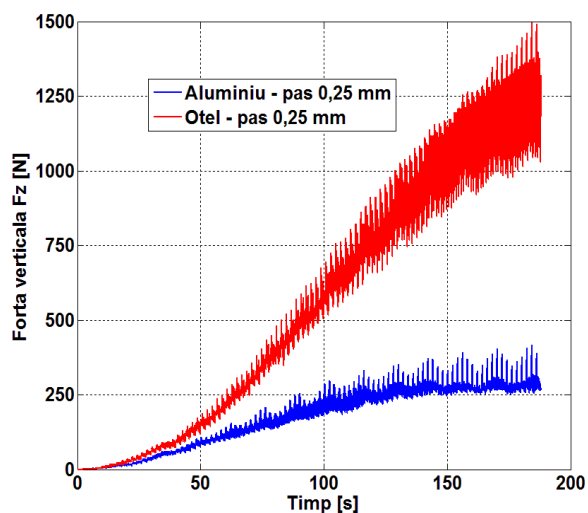


Fig. 3.6. Graficul de variație al forței verticale F_z la prelucrarea cu un pas de 0,25 mm.

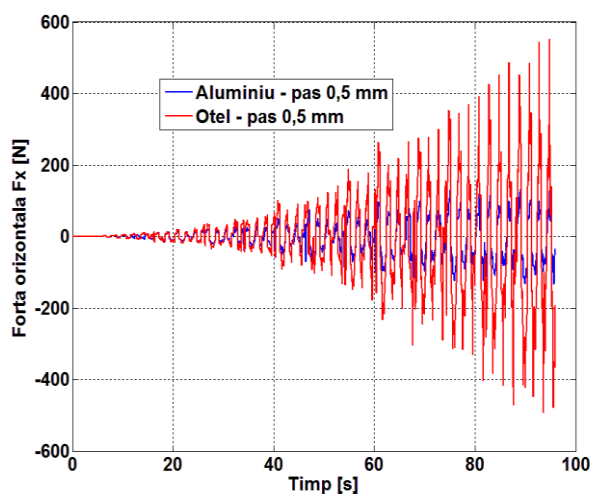


Fig. 3.7. Graficul de variație al forței orizontale F_x la prelucrarea cu un pas de 0,5 mm.

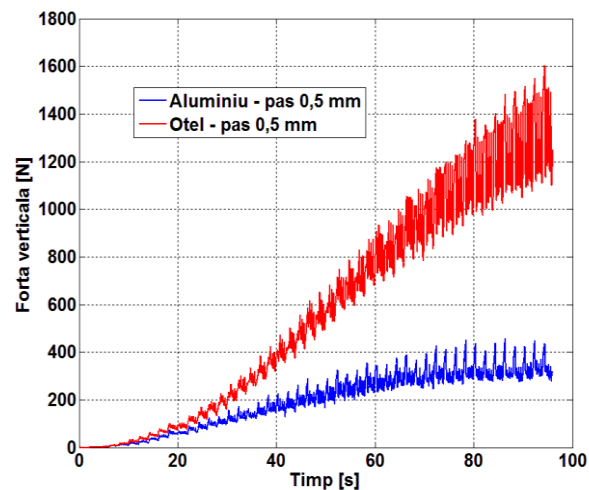


Fig. 3.8. Graficul de variație al forței verticale F_z la prelucrarea cu un pas de 0,5 mm.

4. CONCLUZII

Analizând datele din tabelul 1 și graficele prezentate în figurile 3.5...3.8 se pot trage următoarele concluzii:

- atât forța pe direcție verticală (F_z) cât și forța pe direcție orizontală (F_x) prezintă maxime locale în punctele în care se modifică direcția de deplasare a poansonului fie că e vorba de o pătrundere pe verticală sau de schimbarea direcției în plan;
- valoarea maximă a forței pe direcție verticală este de aproximativ 3 ori mai mare decât valoarea maximă a forței pe direcție orizontală;
- forțele necesare deformării incrementale în cazul oțelului sunt de peste 3 ori mai mari decât în cazul aliajului de aluminiu (pentru aceeași grosime);
- mărimea pasului influențează într-o mai mică măsură valoarea maximă a forțelor (7 ... 9%) atât în cazul forței verticale cât și în cazul forței orizontale.

FINANȚARE

Cercetările prezentate în această lucrare au fost finanțate prin contractul de cercetare nr. 1/AXA1/1.1.1.A/18.05.2018, Cod SMIS 2014+:121359; ID:P_34_469, „Dezvoltarea departamentului de cercetare al societății COMPA SA și obținerea unor rezultate inovatoare în domeniul industriei auto”

Beneficiar proiect: COMPA SA, Sibiu, str. Henri Coandă 8 - Proiect co-finanțat din Fondul European de Dezvoltare Regională prin Programul Operațional Competitivitate 2014-2020.

Conținutul acestui material nu reprezintă în mod obligatoriu poziția oficială a Uniunii Europene sau a Guvernului României.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Attanasio, A, Ceretti, E, Giardini, C, Mazzone, L, *Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization*. Journal of Materials Processing Technology **197**, 2008, p. 59-67.
- [2] Bak, D, *Sheet metal forming eliminates dies*. Design News, Boston, 2001, Vol. **56**, p. 35-39.
- [3] Capece Minutolo, F, Durante, M, Formisano, A, Langella, A, *Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process*. Journal of Materials Processing Technology, **194**, 2007, p. 145-150.
- [4] Duflou, J, Tunçkol, Y, Szekeres, A, Vanherck, P, *Experimental study on force measurements for single point incremental forming*. Journal of Materials Processing Technology, **189**, 2007, p.65-72.
- [5] Filice, L, Ambrogio, G, Micari, F, *On-Line Control of Single Point Incremental Forming Operations through Punch Force Monitoring*. Annals of the CIRP **55** (1), 2006, p. 245-248
- [6] Hasebe, T, Shima, S, *Study of flexible forming by hammering*. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. **35**, 1994, p. 1323-1329.
- [7] Hussain, G, Dar, N U, Gao, L, Chen, M H, *A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming*. Journal of Materials Processing Technology, **187-188**, 2007, p. 94-98.
- [8] Iseki, H, Kato, K, Sakamoto, S, *Flexible and incremental sheet metal bulging using a path controller spherical roller*. Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. **58**, 1992, p. 3147-3150.
- [9] Matsubara, M, Tanaka, S, Nakamura, T, *Development of incremental sheet metal forming using elastic tools (principle of forming process and formation of some fundamentally curved shapes)*. JSME International Journal, Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design, and Manufacturing, Vol. **39**, No. 1, 1996, p. 156-163.
- [10] Yamashita, M, Gotoh, M, Atsumi, S.-Y, *Numerical simulation of incremental forming of sheet metal*. Journal of Materials Processing Technology, **199**, 2008, p.163-172.

Despre autori

Prof. dr. ing. **Valentin OLEKSIK**

Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, România

Valentin Oleksik este profesor la Universitatea Lucian Blaga din Sibiu. Este conducător de doctorat în domeniul Ingineriei Industriale. Domeniile sale de interes includ procedeele neconvenționale de deformare plastică, deformarea incrementală, simularea numerică folosind metoda elementului finit.

Prof. dr. ing. **Radu-Eugen BREAZ**

Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, România

Radu-Eugen BREAZ este profesor la Universitatea Lucian Blaga din Sibiu. Este conducător de doctorat în domeniul Ingineriei Industriale. Domeniile sale de interes includ automatizarea proceselor de producție, mașinile unelte cu comandă numerică și roboții industriali.

Prof. dr. ing. **Gabriel RACZ**

Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, România

Gabriel RACZ este profesor la Universitatea Lucian Blaga din Sibiu. Este conducător de doctorat în domeniul Ingineriei Industriale. Domeniile sale de interes includ caracterizarea materialelor metalice și nemetalice, simularea procedeelelor de deformare, hidraulica mașinilor și utilajelor și roboții industriali.

Prof. dr. ing. **Octavian BOLOGA**

Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, România

Octavian BOLOGA, președintele filialei AGIR Sibiu, este membru titular al Academiei de Științe Tehnice din România, președintele secției de Inginerie Mecanică. Este în prezent profesor emerit la Universitatea Lucian Blaga din Sibiu. A fost pe rând șeful Catedrei de Mașini și Utilaje și Directorul Departamentului de Mașini și Echipamente Industriale. Este conducător de doctorat în domeniul Ingineriei Industriale. Domeniile sale de interes includ deformare plastică a materialelor, injectarea materialelor nemetalice și istoria tehnicii.

Prof. dr. ing. **Paul Dan BRÎNDAȘU**

Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, România

Paul Dan BRÎNDAȘU este în prezent profesor emerit la Universitatea Lucian Blaga din Sibiu. A fost șeful Catedrei de Tehnologia Construcțiilor de Mașini. Este conducător de doctorat în domeniul Ingineriei Industriale. Domeniile sale de interes includ proiectarea sculelor așchietoare, generarea suprafețelor complexe și proiectarea ștanțelor și matrițelor.