

EFFECTUL CĂII DE DEFORMARE ASUPRA CURBELOR LIMITĂ PENTRU DEFORMĂȚII ȘI A CURBELOR LIMITĂ PENTRU TENSIUNI UTILIZATE LA SIMULAREA PROCESELOR DE DEFORMARE LA RECE A TABLELOR SUBȚIRI

V. Ungureanu

Universitatea Bacău, România

Notații: K -coeficient de rezistență; n -coeficientul de ecruisare; ϵ_0 – caracteristică de material în ecuația lui Swift; $\epsilon_{1,2,3}$ - deformațiile logaritmice în direcțiile longitudinală, transversală și cea a grosimii materialului; $\sigma_{1,2,3}$ – tensiunile reale în direcțiile longitudinală, transversală și cea a grosimii; $\bar{\epsilon}$ – deformația echivalentă; $\bar{\sigma}$ - tensiunea echivalentă; β – parametru care caracterizează deformațiile obținute; ρ_c - parametru care caracterizează starea de tensiune.

INTRODUCERE

Simularea numerică a operațiilor de prelucrare prin deformare plastică la rece prin metoda elementului finit, necesită criterii de oprire a calculului corespunzătoare momentului de apariție al stricțiunii în timpul desfășurării procesului de deformare. Primul criteriu de siguranță aplicabil pentru procesele de deformare la rece a materialelor metalice subțiri au fost curbele limită de deformare - în engleză: forming limit diagrams, (FLD)-introduse de Keeler și Goodwin în 1965 și 1968. În spațiul deformațiilor, curbele limită pentru deformații separă zonele în care procesele de deformare au loc fără apariția stricțiunii și ruperii de zonele în care ruperea are loc. Un neajuns important al curbelor limită pentru deformații (CLD) îl constituie faptul că acestea depind de calea de deformare, adică de succesiunea operațiilor de deformare. Arrieux și colaboratorii au propus un nou criteriu pentru apariția stricțiunii, și anume curbele limită pentru tensiuni - în engleză: forming limit stress diagram (FLSD)- în spațiul tensiunilor principale [1,2]. Utilizarea curbelor limită pentru tensiuni (CLT) este interesantă deoarece se presupune că ele nu depind de calea de deformare și, din acest motiv, ele ar putea fi utilizate pentru simularea și punerea la punct a tehnologiilor de prelucrare prin deformare plastică la rece a tablelor subțiri, pentru căi complexe de deformare.

În mod obișnuit, curbele limită pentru tensiuni au fost determinate pe două căi [2,3]: prin calcul pas-cu-pas de-a lungul traiectoriei experimentale de

deformare rezultate ca urmare a unor încercări de laborator; și pe cale analitică, prin folosirea modelului cu două zone al lui Marcineak [2].

Criteriul de plasticitate folosit cel mai des pentru scrierea programelor de calcul a fost criteriul quadratic al lui Hill dar a fost propus și criteriul non-quadratic al lui Hill și modelul "3G", [3].

În lucrare, autorul propune o metodă pentru determinarea curbelor limită pentru tensiuni prin utilizarea curbelor limită pentru deformații determinate experimental, a curbelor caracteristice reale determinate prin încercarea la tracțiune și a curbelor caracteristice reale determinate prin încercarea la compresiune a epruvetelor din materiale metalice subțiri.

Curbele limită pentru deformații au fost determinate prin măsurarea deformațiilor și detectarea momentului de apariție al stricțiunii prin analiza imaginilor numerice succesive ale epruvetelor supuse încercării cu ajutorul unui dispozitiv de tip Marciniak [4,5]. Iar curbele limită pentru tensiuni pot fi determinate prin corelarea valorilor obținute pentru deformațiile logaritmice la apariția stricțiunii cu tensiunile corespunzătoare, ținându-se seama de rezultatele încercărilor la tracțiune și compresiune a epruvetelor din table subțiri [6,7]. Pentru determinarea curbelor limită pentru tensiuni corespunzătoare unor căi complexe de deformare, au fost efectuate încercări corespunzătoare unor căi complexe: de exemplu, încercarea la întindere biaxială uniformă urmată de tracțiune simplă, sau încercarea la tracțiune urmată de încercarea la compresiune.

1. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A "CLD" ȘI "CLT"

Pentru obținerea diferitelor valori pentru deformațiile principale ϵ_1 și ϵ_2 , și a tensiunilor corespunzătoare, necesare pentru trasarea CLD și CLT, au fost utilizate epruvete având lățimi diferite cu valori între 60 și 200 mm supuse încercării prin metoda Marciniak cu un poanson cilindric cu

diametrul de 90 și 110 mm, având partea frontală plană.

Pentru a obține rezultate corecte, muchiile laterale ascuțite ale epruvetelor cu lățimi mai mici de 120 mm au fost rotunjite cu grijă, iar stratul de material ecruisat rezultat de la prelucrările mecanice a fost îndepărtat cu hârtie abrazivă pentru prevenirea rupei premature. Pentru epruvetele cu lățimi mai mari de 120 mm nu mai are importanță rotunjirea muchiilor laterale, însă conturul orificiilor realizate în contraepruvete trebuie, de asemenea, supuse operației de îndepărtare a stratului ecruisat și rotunjirii muchiilor ascuțite pentru a preveni, astfel, ruperea prematură a epruvetelor provocată de ruperea înainte de vreme a contraepruvetei.

Determinarea deformărilor a fost realizată prin utilizarea metodei bazate pe analiza distorsiunilor dintre imaginea digitală inițială și imaginea epruvetei imediat înainte de apariția stricțiunii. Pentru obținerea imaginilor numerice necesare, suprafața epruvetei a fost supusă operației de vopsire cu spray de vopsea de culoare albă și neagră pentru obținerea unei distribuții de puncte cu diferite nuanțe de gri. Imaginea inițială a epruvetei nedeforimate și imaginile corespunzătoare diferitelor grade de deformare au fost înregistrate numeric prin utilizarea unei camere CCD poziționată, prin intermediul unui suport, direct pe suprafața epruvetei. Prin analiza a două imagini, una fiind imaginea inițială a epruvetei iar cealaltă o imagine oarecare, prin utilizarea software-ului elaborat la Laboratorul de Mecanică Aplicată, ESIA-Annecy, Franța, au fost determinate deformările corespunzătoare.

Prin utilizarea procedurii prezentate mai sus, au fost determinate CLD pentru calea directă, calea complexă cu epruvete predeformate inițial la tracțiune și calea complexă cu epruvete predeformate inițial prin întindere biaxială uniformă pentru diferite materiale. CLD au fost determinate pentru epruvete orientate la 0, 45 și 90° față de direcția de laminare.

Punctele reprezentate pe diagrame au fost plasate în ordinea crescătoare a lățimii epruvetelor; acest lucru este în concordanță cu creșterea tensiunii principale σ_2 care acționează pe direcția transversală a epruvetei. Pentru trasarea CLD au fost folosite deformările logaritmice.

CLD obținute indică faptul că acestea depind puternic de calea de deformare. De exemplu, în figura 1 sunt prezentate CLD pentru aliajul de aluminiu 5182 pentru calea directă de deformare pentru epruvete orientate la 0, 45 și 90°; iar în figura 2, CLD pentru calea directă și căi complexe de deformare pentru epruvete orientate la 45° față de

direcția de laminare. Pentru calea complexă cu predeformare la tracțiune predeformarea realizată a fost egală cu 0,1; iar pentru predeformarea la întindere biaxială uniformă, predeformarea realizată a fost de 0,08 în ambele direcții ($\epsilon_1 = \epsilon_2$). Pentru toate diagramele se poate afirma că predeformarea la tracțiune uniaxială ridică curbele în zona deformărilor de întindere biaxială.

În general, curbele limită pentru deformății depind de direcția de laminare și de calea de deformare. CLD determinate pentru aliajul 5182 pentru cele trei direcții (figura 1) practic coincid, motiv pentru care, se poate considera ca acest material are o comportare izotropă.

Pentru determinarea curbelor limită pentru tensiuni, trebuie determinate tensiunile corespunzătoare deformărilor utilizate pentru trasarea curbelor limită pentru deformății.

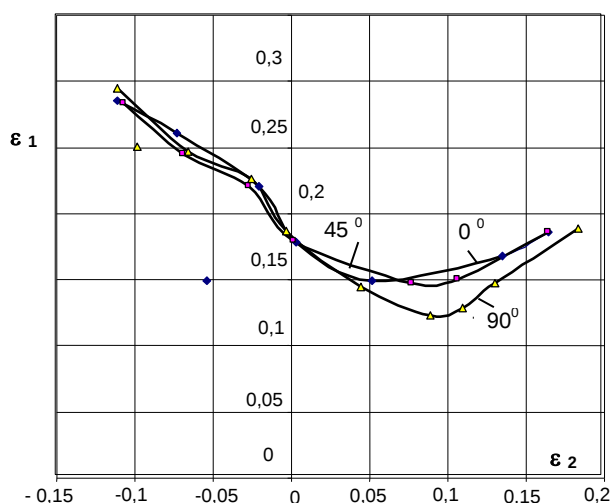


Figura 1. CLD pentru calea directă de deformare pentru aliajul de aluminiu 5182.

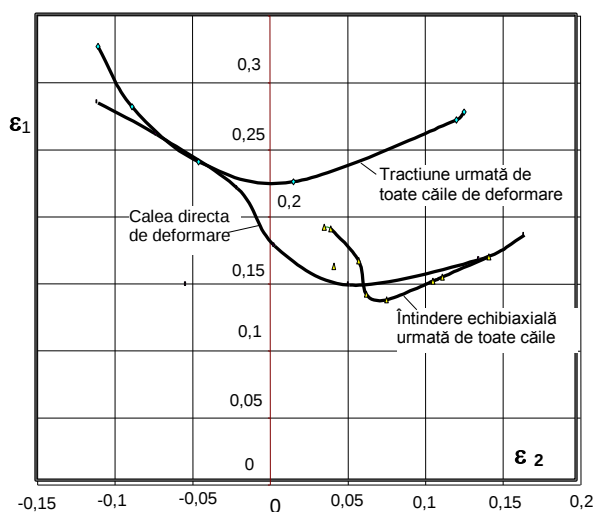


Figura 2. CLD pentru calea directă și complexă de deformare pentru aliajul de aluminiu 5182.

deformare pentru aliajul de aluminiu 5182.

Pentru aceasta, au fost efectuate încercări la tracțiune pentru determinarea curbei caracteristice reale, încercarea la compresiune [6] utilizată pentru înlocuirea întinderii biaxiale uniforme, încercarea cu predeformare la tracțiune urmată de încercarea la compresiune și încercarea cu predeformare la întindere biaxială uniformă urmată de încercarea la tracțiune uniaxială. Predeformațiile utilizate au fost identice cu cele utilizate pentru căi complexe de deformare la determinarea CLD.

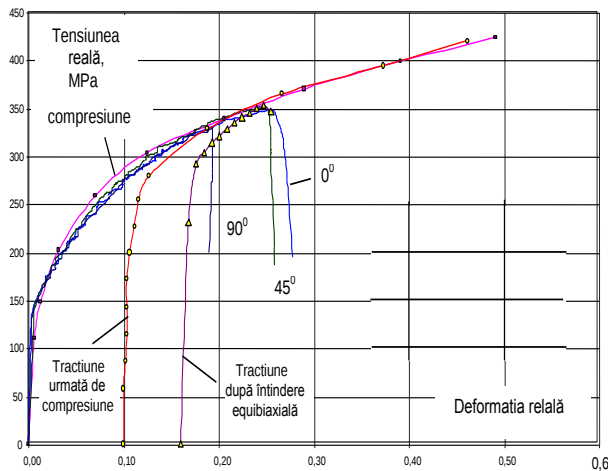


Figura 3. Incercări la tracțiune, compresiune și căi complexe de deformare pentru aliajul 5182.

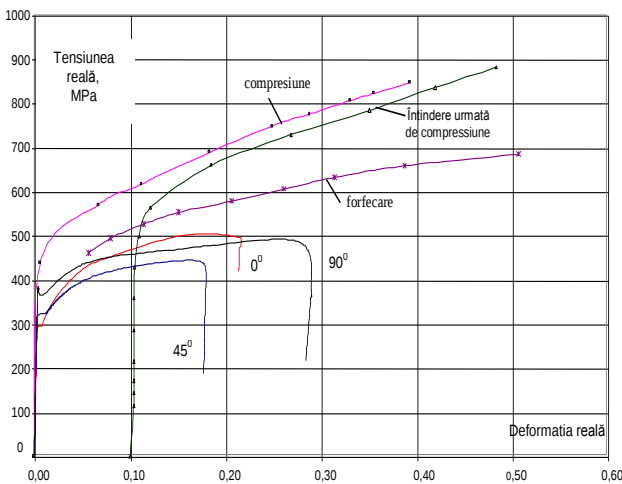


Figura 4. Incercări la tracțiune, compresiune și căi complexe de deformare pentru aliajul TIMET.

Curbele obținute prin încercarea la tracțiune, compresiune și căi complexe de deformare (figura 3), indică faptul că aliajul de aluminiu 5182 se comportă aproape în manieră izotropă: curbele caracteristice reale la tracțiune și compresiune practic se suprapun. Curba obținută prin predeformare la tracțiune urmată de compresiune,

ține să se suprapună cu curbele obținute la tracțiune simplă și compresiune.

În contrast cu aliajul de aluminiu 5182, alte materiale, care au o comportare ortotropă, prezintă curbe de curgere diferite la tracțiune, compresiune și căi complexe de deformare. Un astfel de exemplu este prezentat în figura 4 obținut pentru aliajul de titan TIMET. Curbele caracteristice reale obținute prin încercarea la tracțiune, compresiune și căi complexe de deformare sunt foarte diferite. Acest fapt determină o complexitate mărită a formei și dispunerii curbelor limită pentru tensiuni.

Pentru determinarea tensiunilor principale necesare pentru trasarea CLT, se pot utiliza relațiile dintre tensiuni și deformății pentru obținerea tensiunilor corespunzătoare deformățiilor utilizate pentru trasarea CLD. Relația dintre tensiuni și deformății se poate scrie sub forma:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_2 - \epsilon_3} \quad (1)$$

Din legea constanței volumului $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$, avem:

$$\epsilon_3 = -(\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (2)$$

Introducând în (1) și ținând cont că în zona plană a epruvetei supuse încercării prin metoda Marciniak $\sigma_3 = 0$, obținem:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{2\epsilon_1 + \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \quad (3)$$

Deformația echivalentă poate fi scrisă astfel:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2} \quad (4)$$

Din (4), ținând cont de (2) avem:

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 + \epsilon_2^2} \quad (5)$$

Criteriul de plasticitate von Mises cere ca:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \pm 2 \cdot \bar{\sigma}^2 \quad (6)$$

Deoarece $\sigma_3 = 0$, din (6), tensiunea echivalentă poate fi scrisă astfel:

$$\bar{\sigma} = \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (7)$$

Pentru multe materiale, relația tensiune-deformație, inclusiv ecrusarea materialului, este descrisă de ecuația: $\sigma = K \cdot (\epsilon_0 + \epsilon)^n$, unde σ este tensiunea reală, ϵ deformația reală, K , n și ϵ_0 fiind constante care au valori diferite pentru diferite materiale și direcții de orientare în raport cu direcția de laminare. Pentru aplicațiile noastre această relație va fi utilizată în raport cu tensiunea echivalentă și deformația echivalentă, astfel încât:

$$\bar{\sigma} = K \cdot (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (8)$$

Pentru determinarea tensiunilor σ_1 și σ_2 , necesare pentru trasarea CLT, se pot utiliza valorile ε_1 și ε_2 de pe CLD obținute prin încercarea prin metoda Marciniak, pentru calculul deformației echivalente cu relația (5), iar tensiunea echivalentă poate fi determinată din relația (8). Apoi, din relația (3) punând

$$\frac{2 \cdot \varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_2} = \beta. \quad (9)$$

$$\text{obținem: } \sigma_1 = \beta \cdot \sigma_2. \quad (10)$$

Înlocuind în (7), avem:

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_2^2 (\beta^2 - \beta + 1),$$

$$\text{sau } \sigma_2 = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{\beta^2 - \beta + 1}}. \quad (11)$$

Valoarea tensiunii σ_2 se poate obține din (11), apoi, σ_1 rezultă din (10).

Parametrii K , n și ε_0 din ecuația (8) se pot determina, cu ajutorul unui program de calcul, pe baza curbelor caracteristice obținute prin încercarea la tracțiune aplicată unor epruvete orientate la 0, 45 și 90° față de direcția de laminare, și pentru încercarea la compresie [6].

Prin utilizarea relațiilor de mai sus, a rezultatelor încercărilor la tracțiune, compresie și valorile ε_1 și ε_2 din încercarea prin metoda Marciniak, au fost determinate CLT pentru câteva materiale metalice subțiri. Curbele limită pentru tensiuni astfel obținute, cu excepția aliajului de aluminiu 5182 (figura 5), prezintă un punct de tranziție caracterizat prin parametrul critic $\rho_c = \sigma_2 / \sigma_1$. Astfel, pentru table de aluminiu 1050 s-a obținut $\rho_c = 0,59$, pentru table din oțel marca Soldur $\rho_c = 0,45$ (figura 6), iar pentru table din aliajul de titan Timet a rezultat $\rho_c = 0,6$.

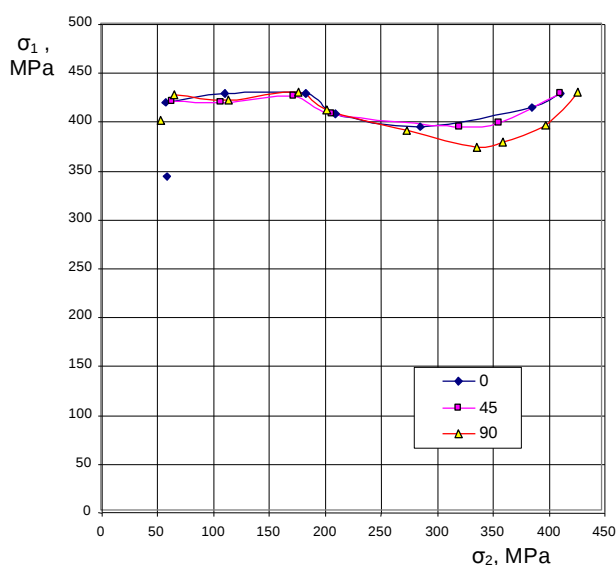


Figura 5. CLT pentru aliajul 5182.

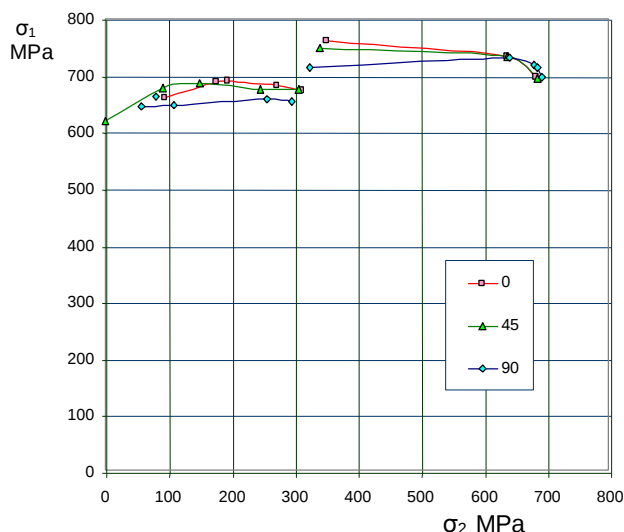


Figura 6. CLT pentru table de oțel marca SOLDUR 340.

Aceste rezultate indică o relație complexă între CLD, CLT, încercarea la tracțiune și compresie sau întinderea biaxială uniformă. Curbele limită pentru tensiuni determinate arată că, în general, presupunerea că acestea nu depind de calea de deformare este adevărată. Excepții pot să apară pentru materiale ortotrope la care curbele de curgere determinate prin încercarea la compresie este diferită de cea obținută pentru o cale complexă: tracțiune urmată de compresie (figura 4).

Ținând seama de rezultatele obținute în determinarea CLD și CLT, calea cea mai bună pentru simularea proceselor de prelucrare prin deformare plastică la rece este luarea în considerare a ambelor categorii de curbe. Calea de deformare descrie mai bine "istoria" procesului de deformare, în timp ce starea de tensiune indică mai bine ce se va întâmpla în continuarea procesului de deformare.

Încercările mecanice cum sunt încercarea la tracțiune, la compresie, forfecarea și alte încercări cum este încercarea prin metoda Marciniak, oferă informații importante despre comportarea materialelor metalice subțiri. Ele pot fi utilizate pentru determinarea CLD și CLT necesare pentru simularea proceselor de prelucrare prin deformare plastică la rece.

2.CONCLUZII

În cadrul lucrării, a fost analizat efectul căii de deformare asupra CLD și FLD. Au fost determinate

CLD pentru diferite căi de deformare și s-a stabilit faptul că forma și poziția lor depind mult de calea de deformare.

A fost propusă o metodă pentru determinarea CLT prin folosirea rezultatelor încercărilor la tracțiune și compresiune [7] și a CLD determinate experimental prin utilizarea încercării prin metoda Marciniak.

Pentru materiale izotrope CLD și CLT au un contur continuu iar comportarea acestor materiale este bine descrisă de către încercarea la tracțiune. Pentru materialele ortotrope curbele de curgere determinate prin încercarea la tracțiune și compresiune sunt diferite; iar CLD și CLT pentru aceste materiale prezintă un punct de tranziție caracterizat prin parametrul $\rho_c = \sigma_2 / \sigma_1$.

Presupunerea că CLT nu depind de calea de deformare este adevărată, cu excepția unor materiale care au proprietăți ortotrope accentuate, așa cum este aliajul de titan TIMET.

Recunoaștere: Această lucrare a fost efectuată cu sprijinul financiar al Comunității Europene în cadrul unui program Copernicus și C.N.C.S.I.S. România.

Bibliografie

1. **Arrieux, R., Boivin, M.,** Determination of the Forming Limit Stress Curve for Anisotropic Sheets. *CIRP Anals*, Vol. 16/1, 1987. pp. 195-198.
2. **Arrieux, R.,** Determination théorique et expérimentale des courbes limites de formage en contraintes. *Thèse d'Etat: I.N.S.A. de Lyon et Univ. Lyon I*, 1990.
3. **Haddad, A., Vacher, P., Arrieux, R.,** Numerical Determination of Forming Limit Diagrams of Orthotropic Sheets Using "3G" Theory of Plasticity. *Journal of Materials Processing Technology* 92-93 (1999) 419-423.
4. **Ungureanu, V., Panoschi, C.,** The Experimentally Determinated Forming Limit Diagram for Aluminum. *Modeling and Optimization in the Machines Building Field. MOCM-5. Romanian Academy, Branch Office of Iassy.* pp. 122-127. ISSN 1224 – 7480. 1999
5. **Ungureanu, V., Panoschi, C., Vacher, P. Haddad, A.,** The Application of the Numerical Strain Measuring Procedure for the Determination of the Forming Limit Diagram at

Necking for Aluminum Sheets. Modeling and Optimization in the Machines Building Field. MOCM-5. Romanian Academy, Branch Office of Iasi. 1999. pp. 116-121. ISSN 1224 – 7480.

6 **Ungureanu, V.** The Novel Technique for Uniaxial Compression Test of Sheet Metal Specimens and Some Experimental Results. *Modeling and Optimization in the Machines Building Field. MOCM-6. Romanian Academy, Branch Office of Iasi.* 2000. pp. 253-257. ISSN 1224 – 7480.

7. **Ungureanu, V.,** The Uniaxial Compression Test of Sheet Metal Specimens and Some Experimental Results. *Tehnologii Moderne Calitate Restructurare. TMCR 2001 vol. III. Universitatea Tehnica a Moldovei.* pp.195-198 ISBN 9975-9638-3-8 9 (vol. 3) Chisinau. 23-25 mai, 2001.

8. **Ungureanu, V.,** The Experimentally determined Forming Limit Diagram for Anisotropic Aluminium Sheets and of Some Aluminium Alloy. *Tehnologii Moderne Calitate Restructurare. TMCR 2001 vol. III. Universitatea Tehnica a Moldovei.* pp.199-202. ISBN 9975-9638-3-8 9 (vol. 3) Chisinau. 23-25 mai, 2001

9. **Ungureanu, V.,** The Experimental Way for the Determination of Forming Limit Stress Diagram. *Tehnologii Moderne Calitate Restructurare. TMCR 2001 vol. III. Universitatea Tehnica a Moldovei.* pp.191-194 ISBN 9975-9638-3-8 9 (vol. 3) Chisinau. 23-25 mai, 2001