



**ULBS**

Universitatea "Lucian Blaga" din Sibiu

FACULTATEA DE INGINERIE

# TEZĂ DE DOCTORAT

Studii și cercetări privind hidroformarea  
semifabricatelor cu pereți subțiri

- Rezumat -

Conducător Științific

Prof.univ.dr.ing.h.c. Octavian C. BOLOGA

Doctorand

ing. Radu VASILE

- Sibiu, 2016 -

Capitolul 1	Stadiul actual al cercetărilor privind deformarea plastică prin hidroformare .....	1
1.1	Generalități din contextul industrial și economic .....	1
1.2	Definiția și domeniile de aplicare ale procedurii de hidroformare	4
1.3	Comparație între procedeele convenționale și neconvenționale de deformare plastică .....	7
1.4	Clasificarea procedurii de hidroformare .....	13
1.4.1	Formarea cu ajutorul gazului.....	13
1.4.2	Hidroformarea semifabricatelor tubulare.....	17
1.4.3	Hidroformarea semifabricatelor plane .....	21
1.4.4	Procedee speciale de hidroformare.....	24
1.5	Avantajele și dezavantajele procedurii de hidroformare .....	27
1.6	Semifabricate utilizate în hidroformare.....	29
1.6.1	Materiale utilizate în hidroformare.....	29
1.6.2	Defectele pieselor hidroformate .....	34
1.6.3	Semifabricate „la temă” .....	35
1.7	Operațiile procedurii de hidroformare .....	37
1.8	Sistemul tehnologic de hidroformare .....	38
1.9	Hidroformarea și piața actuală .....	40
1.10	Costurile procedurii de hidroformare.....	42
1.11	Concluzii și direcții de cercetare .....	46
Capitolul 2	Cercetări teoretice privind hidroformarea semifabricatelor cu pereți subțiri .....	48

2.1	Metoda elementelor finite.....	48
2.1.1	Domeniul funcțiilor .....	48
2.1.2	Interpolarea .....	50
2.1.3	Proiecția $L^2$ .....	50
2.1.4	Sisteme de ecuații liniare .....	51
2.2	Mecanica solidelor .....	52
2.2.1	Ecuații statice de echilibru.....	52
2.2.2	Legea lui Hooke .....	54
2.2.3	Condițiile de frontieră.....	55
2.3	Ecuațiile elastice liniare .....	55
2.3.1	Formularea variațională .....	55
2.3.2	Aproximarea elementelor finite .....	57
2.3.3	Definirea inginerescă.....	57
2.4	Discretizarea de timp.....	60
2.4.1	Metode explicite și implicite .....	60
2.5	Proprietățile materialelor .....	62
2.5.1	Anizotropie.....	66
2.5.2	Sensibilitate la deformare .....	67
2.6	Deformații, legea volumului constant și procese generale .....	67
2.7	Criterii de plasticitate .....	69
2.8	Tensiunea și deformația efectivă .....	70
2.9	Defectele materialelor deformate plastic.....	73
2.9.1	Curba limită de deformare .....	74
2.10	Concluzii .....	75

---

Capitolul 3 Cercetări numerice privind hidroformarea semifabricatelor cu pereți subțiri .....	76
3.1 Modelul geometric supus analizei cu element finit al procedurii de hidroformare.....	79
3.2 Materialele cercetate numeric și experimental .....	81
3.3 Pre-procesarea și soluționarea analizei.....	87
3.4 Post-procesarea.....	92
3.5 Concluzii .....	94
Capitolul 4 Cercetări experimentale privind hidroformarea semifabricatelor cu pereți subțiri.....	96
4.1 Încercarea la tracțiune .....	97
4.1.1 Baza materială .....	97
4.1.2 Analiza rezultatelor încercării la tracțiune .....	100
4.2 Determinarea anizotropiei.....	116
4.2.1 Baza materială .....	116
4.2.2 Analiza rezultatelor de anizotropie .....	122
4.3 Determinarea curbelor limită de deformare .....	129
4.3.1 Baza materială .....	129
4.3.2 Analiza rezultatelor curbelor limită de deformare.....	137
4.4 Hidroformarea semifabricatelor cu pereți subțiri .....	139
4.4.1 Dezvoltarea standului experimental de hidroformare .....	139
4.4.2 Sistemul optic de măsurare a deformațiilor Argus .....	164
4.4.3 Traductorul de presiune .....	171
4.4.4 Analiza rezultatelor pieselor hidroformate .....	173

4.5	Concluzii .....	203
Capitolul 5 Concluziile cercetării privind hidroformarea semifabricatelor cu pereți subțiri .....		206
5.1	Rezumat.....	206
5.2	Principalele contribuții ale lucrării.....	209
5.3	Recomandări pentru viitoarele direcții de cercetare.....	211
Bibliografie.....		212
Anexa 1 .....		228
Anexa 2.....		236
Opis figuri .....		241
Opis tabele .....		251
Abstract .....		253
Curriculum vitae.....		257

**Cuvinte cheie:** hidroformare, deformare plastică, cercetări experimentale, simulare numerică, încercare la tracțiune, curbe limită de deformare

Cercetările teoretice, numerice și experimentale prezentate în capitolele precedente, urmăresc studiul, analiza și aprofundarea bazei de cunoștințe internațională privind procedeul neconvențional de deformare plastică la rece a semifabricatelor cu pereți subțiri prin hidroformare. Necesitatea abordării acestei tehnologii a rezultat din costurile ridicate și accesul scăzut al cercetătorilor, din companiile mici și mijlocii și din centrele de cercetare universitare, la tehnologii care să faciliteze realizarea viitoarelor prototipuri de produse. Procedeele clasice de deformare și costurile ridicate de adaptare a SDV-urilor pe utilajele clasice existente pentru a menține producția de serie mică sau unicat la standardele actuale sunt total ineficiente tehnic și economic.

Pentru abordarea corectă și actuală a temei tezei de doctorat autorul a dezvoltat și executat un concept unic de stand de hidroformare, de formă constructivă simplă și modulară, ca rezultat al îmbinării cunoștințelor de proiectare, a studierii conceptelor specialiștilor din domeniu și de îndeplinirea a obiectivelor cercetării.

În urma parcurgerii unei vaste baze de studiu după cum este exemplificată în bibliografie prin cărți, reviste și lucrări actuale ale specialiștilor din domeniu s-a materializat stadiul actual al hidroformării semifabricatelor cu pereți subțiri. În Capitolul 1 a fost prezentat contextual actual economic – politic – industrial în jurul luptei globale pentru energie. Prezentarea hidroformării ca și tehnologie cu domeniile de aplicare, diferențele față de tehnologiile convenționale și avantajele și dezavantajele acesteia a rezultat o vastă clasificare a tuturor ramurilor ale acestui procedeu, ramuri cercetate în literatura de specialitate. Au fost abordate teme privind materialele utilizate în hidroformare și limitele acestora supuse unor operații specifice pe utilaje specializate. Poziționarea acestei tehnologii în piața actuală și dorința de a continua dezvoltarea și răspândirea ei au creat obiectivele cercetării.

Pentru a îndeplini obiectivele propuse în Capitolul 1, au fost realizate cercetări teoretice privind hidroformarea semifabricatelor prin aprofundarea

mecanicii solidelor, a ecuațiilor caracteristice comportării elastice și plastice și a metodei cu element finit. Au fost prezentate proprietățile materialelor, modul de determinare și analiză a principalelor caracteristici de material, a criteriilor, limitelor și legilor care guvernează aceste proprietăți.

În urma fundamentării cercetărilor teoretice au fost prezentate simulările numerice prin metoda elementului finit în Capitolul 3. Pentru modelarea matematică cât mai precisă a comportării materialelor la procedeul de hidroformare se impune aplicarea metodei elementului finit. Prin urmare au fost prezentate posibilitățile și modul de realizare al analizelor cu element finit. A fost definit modelul geometric ce urmează a fi utilizat, prin definirea dimensiunilor, formei și parametri procedurii de hidroformare. În vederea desfășurării cercetărilor numerice și experimentale au fost definite materialele supuse cercetării și pașii analizei pentru a urmări comportarea acestor materiale la deformare plastică la rece prin hidroformare. Au fost studiate sursele de specialitate pentru a defini cât mai precis fiecare marcă de material prin proprietățile și caracteristicile specifice. Aceste proprietăți au fost comparate cu cele determinate prin testele realizate pe utilajele din dotarea Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice al Universității „Lucian Blaga” din Sibiu. Aceste teste și încercări au fost prezentate pe larg în Capitolul 4.

Cercetările experimentale evaluează capacitatea de deformare plastică a cinci materiale, de două grosimi, pentru care sunt determinate principalele caracteristici mecanice, limitele deformării și alte proprietăți intrinseci. Prin realizarea de încercări la tracțiune uniaxială pe epruvete standardizate au fost determinate proprietățile mecanice precum limita de curgere, tensiunea și deformația maximă, modulul lui Young ș.a., precum și parametri legați de proprietățile intrinseci ale materialului: coeficientul de ecrusare, coeficientul de rezistență și coeficienții de anizotropie plastică. Toate aceste date au fost determinate utilizând o mașină de încercat la tracțiune – Instron 5587 și un sistem optic de măsurare a deformațiilor – GOM Aramis.

De asemenea, au fost determinate curbele limită de deformare utilizând un dispozitiv de ambutisare modular și sistemul GOM Aramis, din dotarea aceleiași

centru de cercetare. Prezentarea comparativă a curbelor limită și a datelor de material obținute au definitivat modelul de cercetare pentru studiul materialelor prin hidroformare. Astfel a luat naștere conceptul standului de hidroformare, dezvoltat și executat de autor, destinat utilizării în special de către universități și de întreprinderile mici și mijlocii. Realizabil cu ajutorul utilajelor universale, a personalului calificat în prelucrări mecanice și montaj, cea mai mare parte a costurilor se îndreaptă spre achiziția materialelor și achiziția unui agregat hidraulic pentru generarea presiunii hidraulice. Pe lângă unicitate și construcție simplă, cea mai importantă caracteristică e cea a modularității standului, oferind posibilitatea schimbării sau adaptării de noi elemente active. De asemenea pot fi folosite materiale de diferite grosimi și se pot realiza piese de complexitate ridicată (capace, flanșe etc) dintr-o singură operație, care pot fi utilizate în diferite ramuri ale industriei constructoare de mașini sau producătoare de bunuri de larg consum. Utilizând fluid ca mediu de lucru piesele realizate prezintă o calitate ridicată a suprafeței având și un plăcut aspect estetic, un avantaj important pentru produsul final.

Structura mecanică a standului este proiectată să reziste la presiuni de până la 700 [bar], astfel cu instalația hidraulică adecvată ar ajunge la o forță de strângere de 215 [tf]. Însă pentru cercetarea de față, această presiune era neadecvată pentru unele materiale supuse studiului, astfel instalația hidraulică generează presiuni de până la 400 [bar], o forță de strângere de 125 [tf] și forța de hidroformare maximă pentru actuala configurație de 40 [tf]. Aceste forțe sunt considerate foarte mari pentru configurația actuală a standului, dar acest lucru este posibil printr-o bună proiectare, execuție și asigurarea unor elemente de etanșare corespunzătoare.

Rezultatele validării modelului, necesare pentru compararea cercetărilor numerice cu cele experimentale sunt deformația principală maximă  $\varepsilon_1$ , deformația principală minimă  $\varepsilon_2$ , subțierea relativă a semifabricatului și diagrama limită de deformare. Pentru posibilitatea măsurării acestor parametri semifabricatele supuse cercetării experimentale au fost imprimare electrochimic cu o rețea de puncte, înainte de hidroformare. Aceste puncte au fost studiate după deformare cu ajutorul sistemului GOM Argus, sistem optic de măsurare a deformațiilor. Presiunea din sistemul hidraulic al standului de hidroformare a fost monitorizată pe parcursul



încercărilor cu ajutorul unui traductor de presiune. Toate rezultatele obținute experimental sunt comparate și analizate pe larg cu cele obținute prin simulare numerică, procentul de eroare fiind mai mic de 5 [%]. Astfel a fost evaluată acuratețea rezultatelor experimentale și a fost validat modelul cu elemente finite. Pentru toate materialele studiate, atât deformațiile principale cât și subțierea relativă, au aceeași tendință de variație în funcție de raza matriței și de presiunea de hidroformare, și anume, ele cresc o dată cu scăderea razei matriței și creșterea presiunii de hidroformare.

Comparând rezultatele obținute prin cele două cercetări, numerice și experimentale, comportarea la deformare plastică prin hidroformare a oțelului inox W1.4301 este superioară celorlalte materiale studiate, demonstrată și prin comportarea la deformare prin valoarea deformațiilor suportate, prin buna rezistență la coroziune, dar și prin aspectul piesei în urma imprimării electrolitice și hidroformării.