



ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA „VASILE ALECSANDRI” DIN
BACĂU

Calea Mărășești, Nr. 157, Bacău 600115
Tel. +40-234-542411, tel./fax +40-234-545753
www.ub.ro; e-mail: rector@ub.ro



*CERCETĂRI ȘI
CONTRIBUȚII PRIVIND
DEFORMAREA PLASTICĂ
LA RECE A TABLELOR
METALICE DIN ALIAJ DE
MAGNEZIU*

Rezumatul tezei de doctorat

Conducător științific,

Prof.univ.dr.ing. **BRABIE Gheorghe**

Doctorand,

ing. **BORȘ Andrei - Dragoș**

Prefață

Cercetările teoretice și experimentale, cuprinse în prezenta teză de doctorat, se referă la deformarea plastică la rece a tablelor metalice din aliaje de Magneziu. Pentru realizarea celor propuse este necesară studierea proprietăților mecanice și a caracteristicilor de deformabilitate ale tablelor din aliaje de Magneziu.

Doresc să adresez sincere mulțumiri domnului prof.dr. ing. Gheorghe BRABIE, coordonatorul și îndrumătorul științific al prezentei teze de doctorat, pentru îndrumarea competentă și pentru sprijinul acordat pe parcursul cercetărilor și elaborării lucrării.

Adresez mulțumiri domnilor profesori dr. ing.ec. Dumitru NEDELICU de la Universitatea Tehnică „Gh.Asachi” din Iași, prof. dr. ing. Cristina MOHORA de la Universitatea Politehnică din București și conf.dr.ing. Bogdan-Alexandru CHIRIȚĂ de la Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău care în calitate de referenți științifici, care au avut răbdarea și bunăvoința de a analiza și evalua aceasta teză de doctorat.

De asemenea, doresc să mulțumesc membrilor departamentului Ingineria și Managementul Sistemelor Industriale din cadrul Facultății de Inginerie, Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău, pentru îndrumările primite, sprijinul de specialitate, în special domnilor, conf.dr.ing. Bogdan CHIRIȚĂ, șl.dr.ing. Eugen HERGHELEGIU, șl.dr.ing. Vlad CIUBOTARIU, șl.dr.ing. Cătălin TÂMPU.

Și nu în ultimul rând, folosesc această ocazie pentru a mulțumi familie mele, părinților mei, soției mele Maria și fratelui meu Bogdan care au fost alături de mine și m-au susținut din toate punctele de vedere, și moral și financiar, pe tot parcursul elaborării acestei teze de doctorat și nu numai.

Mulțumesc Bunului Dumnezeu care mi-a oferit sănătate, putere, răbdare și înțelepciune în elaborarea și finalizarea tezei de doctorat.

Drd.ing. Andrei-Dragoș BORȘ

CUPRINS

	pagina
CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETARILOR PRIVIND DEFORMAREA LA RECE A TABLELOR DIN ALIAJE DE MAGNEZIU.....	1/1
1.1. Caracterizare generală a aliajelor de magneziu.....	1/1
.....	
1.2. Aspecte cu privire la protecția mediului în cazul utilizării aliajelor de magneziu.....	5/2
1.3. Tratarea termică a aliajelor de magneziu.....	6/3
1.4. Aliaje de magneziu cu alte metale.....	8/3
1.4.1 Aliajul de magneziu AZ31B.....	8/3
1.4.2 Aliajul de magneziu AZ61A.....	11/-
1.4.3. Aliajul de magneziu ZK60A.....	13/-
1.5 Piese din aliaje de magneziu.....	15/-
1.5.1 Coloanele.....	15/-
1.5.2 Grinzile.....	16/-
1.6. Compoziția chimică și proprietăți ale aliajului de magneziu AZ31B.....	16/3
1.7. Proprietăți mecanice principale.....	21/4
1.8. Deformarea prin întindere a tablelor din aliaje de magneziu.....	23/5
1.9. Deformarea prin îndoire a tablelor din aliaje de magneziu.....	23/6
1.10. Concluzii generale privind stadiul actual al cercetărilor.....	30/9
CAPITOLUL 2. OBIECTIVELE ȘI ETAPELE TEZEI DE DOCTORAT.....	32/10
CAPITOLUL 3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PROPRIETĂȚILE TABLELOR METALICE DIN ALIAJE DE MAGNEZIU AZ31B.....	36/14
3.1 Determinarea experimentală a proprietăților mecanice.....	36/14
3.1.1. Testul de întindere.....	36/14
3.1.2 Metodologia de încercare.....	36/15
3.1.3 Instalatia experimentală.....	41/17
3.1.4. Geometria probelor.....	42/17
3.1.5. Dispozitive de măsurare a deformațiilor.....	42/-
3.1.6. Caracteristicile mecanice determinate.....	43/18
3.1.7 Concluzii.....	46/20
3.2 Determinarea caracteristicilor de deformabilitate și a curbelor limită de deformare.....	49/22
3.2.1 Metodologia de încercare.....	49/-
3.2.2. Caracteristici și echipamentul pentru testul Nakazima.....	50/22
3.2.3. Prelucrarea epruvetelor.....	51/-
3.2.4 Realizarea încercărilor.....	52/23
3.2.5. Achiziția de imagini.....	53/24
3.2.6. Analiza rezultatelor.....	54/25
3.2.7 Curba limită de deformare (CLD).....	59/28
3.2.8 Concluzii.....	61/29
CAPITOLUL 4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ÎNDOIREA TABLELOR METALICE ȘI CALITATEA PIESELOR REZULTATE.....	64/30
4.1 Influența deformării plastice asupra unor proprietăți mecanice ale materialelor metalice.....	64/30
4.2 Fenomenul de revenire elastică la deformarea tablelor metalice AZ31B.....	66/-
4.2.1. Cauze și efecte ale fenomenului.....	66/-
4.2.2 Factori de influență ai fenomenului de revenire elastică.....	67/-

4.2.3. Influența elementelor geometrice ale sculei.....	68/-
4.2.4 Influența condițiilor de deformare.....	69/-
4.2.5 Analiza influenței caracteristicilor și structurii materialului.....	71/-
4.3 Analiza experimentală a factorilor de influență ai revenirii elastice la îndoirea tablelor de magneziu.....	72/30
4.3.1. Obiectivele analizei experimentale.....	72/-
4.3.2. Metodologia încercării experimentale.....	72/-
4.3.2.1 Materialul și geometria probelor.....	72/-
4.3.2.2 Echipamentele și aparatura utilizată.....	73/30
4.3.2.3 Condițiile și parametrii de încercare.....	74/-
4.4. Încercări experimentale privind îndoirea tablelor metalice din aliaje de magneziu.....	74/-
4.4.1 Încercări experimentale privind influența forței de reținere.....	74/32
4.4.1.1. Rezultatele experimentale pentru piesele cu lățimea de 30mm.....	74/32
4.4.1.2. Rezultatele experimentale pentru piesele cu lățimea de 50mm.....	77/-
4.4.1.3 Rezultatele experimentale pentru piesele cu lățimea de 80mm.....	79/-
4.4.2. Încercări experimentale privind influența vitezei de deformare.....	81/34
4.4.3. Încercări experimentale privind influența direcției de laminare a tablei pieselor.....	83/-
4.4.4. Încercări experimentale privind influența lățimii pieselor.....	85/-
4.5. Concluzii privind factorii de influență ai fenomenului de revenire elastică	86/36
CAPITOLUL 5. ANALIZA PRIN SIMULARE A INFLUENȚEI FORȚEI DE REȚINERE ASUPRA REVENIRII ELASTICE LA ÎNDOIREA ÎN U.....	88/37
5.1. Obiectivele analizei prin simulare.....	88/-
5.2. Programul ABAQUS – prezentare generală.....	88/-
5.3. Modelul matematic de analiză.....	89/-
5.4. Metodologia de simulare a operației de îndoire în U.....	91/37
5.4.1. Modelul geometric.....	91/-
5.4.2. Proprietățile materialului.....	92/-
5.4.3. Condiții limită și de contact.....	96/38
5.4.4. Importul rezultatelor.....	96/38
5.5. Rezultatele analizei prin simulare.....	96/38
5.5.1. Rezultatele simulării pentru valoarea forței de reținere de 0kN.....	96/38
5.5.2. Rezultatele simulării pentru valoarea forței de reținere de 5kN.....	100/-
5.5.3. Rezultatele simulării pentru valoarea forței de reținere de 7.5kN.....	103/-
5.5.4. Rezultatele simulării pentru valoarea forței de reținere de 10kN.....	106/-
5.6. Comparații între rezultatele analizei prin simulare și analizei experimentale.....	109/-
5.7. Concluzii rezultate din analiza prin simulare a influenței forței de reținere asupra revenirii elastice.....	111/40
CAPITOLUL 6. ANALIZA POSIBILITĂȚILOR DE OPTIMIZARE A PROCESULUI DE ÎNDOIRE PRIN APLICAREA METODEI EXPERIENȚELOR DE TIP FACTORIAL.....	117/43
6.1 Analiza rezultatelor experimentale.....	117/43
6.1.1 Analiza rezultatelor pentru epruvetele cu lățimea de 30 mm.....	118/43
6.1.1.1 Analiza variației pentru unghiul de revenire U_1.....	118/43
6.1.1.2 Analiza variației pentru unghiul de revenire U_2.....	119/-
6.1.1.3 Analiza variației pentru raza de curbură a peretelui R.....	119/-
6.1.2. Analiza rezultatelor pentru epruvetele cu lățimea de 50 mm.....	120/-
6.1.2.1 Analiza variației pentru unghiul de revenire U_1.....	120/-
6.1.2.2 Analiza variației pentru unghiul de revenire U_2.....	121/-
6.1.2.3 Analiza variației pentru raza de curbură a peretelui R.....	122/44

6.1.3. Analiza rezultatelor pentru epruvetele cu lățimea de 80 mm.....	123/-
6.1.3.1 Analiza variației pentru unghiul de revenire U_1.....	123/-
6.1.3.2 Analiza variației pentru unghiul de revenire U_2.....	123/-
6.1.3.3 Analiza variației pentru raza de curbură a peretelui R.....	124/-
6.2. Analiza influenței factorilor procesului de îndoire în U asupra revenirii elastice.....	125/45
6.2.1. Analiza influenței asupra unghiului de revenire U_1.....	125/45
6.2.2. Analiza influenței asupra unghiului de revenire U_2.....	127/-
6.2.3. Analiza influenței asupra razei de curbură a peretelui.....	128/-
6.3. Optimizarea parametrilor procesului de îndoire în U în vederea reducerii revenirii elastice...	130/46
6.4. Concluzii privind optimizarea procesului de îndoire a tablelor metalice din aliaje de magneziu.....	131/47
CAPITOLUL 7. Concluzii finale. Contribuții originale și direcții viitoare de studiu.....	133/48
7.1. Contribuții originale.....	134/48
7.2. Direcții viitoare de studiu.....	136/50
BIBLIOGRAFIE.....	137/51

CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCĂTĂRIILOR PRIVIND DEFORMAREA LA RECE A TABLELOR DIN ALIAJE DE MAGNEZIU

1.1. Caracterizare generală a aliajelor de magneziu

Metalele și aliajele neferoase reprezintă una dintre cele mai importante grupe de materiale utilizate de om din cele mai vechi timpuri și cu perspective de creștere a importanței lor în viitor. În afara materialelor neferoase clasice, unele domenii de vârf ale tehnicii, precum: tehnica aerospațială, tehnica nucleară, electrotehnica, electronica, energetica etc., solicită materiale și aliaje cu proprietăți deosebite precum: supraconductibilitate, superplasticitate, refractaritate, rezistență mărită la coroziune, memoria formei, rezistențe mecanice de excepție, magnetism, rezistivitate etc. Pentru a fabrica produsele metalurgice solicitate de noile industrii sunt necesare tehnologii și instalații moderne, precum și specialiști cu o înaltă pregătire teoretică și practică.

Aliajele cu baza de magneziu se clasifică în:

- aliaje cu proprietăți de formabilitate;
- aliaje cu proprietăți de turnabilitate.

Aliajele de magneziu deformabile conțin aluminiu sau mangan și se folosesc sub forma de table, bare etc. Se deformează greu la temperatură ambiantă, deformarea făcându-se prin încălzire la 300...400°C, temperatura neinfluențându-le duritatea. Se folosesc pe scară redusă.

În tabelul 1.2 este prezentată o comparație între proprietățile fizico-chimice și mecanice ale acestor materiale și alte metale folosite [1.5].

În tabelul 1.3 sunt prezentate cele mai utilizate elemente de aliere pentru magneziu, litera cu care sunt notate și influența lor asupra proprietăților generale.

Tabel 1.2. Comparație între proprietățile fizico-chimice ale magneziului și aliajele sale cu alte materiale metalice folosite în general [1.2,5].

Material	Densitate g/cm ³	Punct de topire °C	Randament la tracțiune		Randament la rupere	
			(MPa)	Rt/densitate	(Mpa)	Rr/densitate
Magneziu	1,7	649	21	12	90	53
Aluminiu	2,7	660	98	36	118	44
Fier	7,9	1535	130	16	262	33
AZ91D-T6* (turnare)	1,8	Min 421	160	89	230	128
AZ31	1,8	605 – 630	155	86	240	133
Al6082-T6	2,7	555	255	94	300	111

*T6 reprezintă un tratament termic specific al aliajului. [1.2]

Tabel 1.3. Cele mai folosite elemente la formarea aliajelor, notarea și descrierea unor influențe pozitive și negative. [1.2,9]

Element	Notare	Influenta	
		Pozitiva	Negativa
Aluminiu	A	Proprietati mecanice, duritate, rezistenta la coroziune, turnabilitate	Porozitate, posibilitate de crapare la coroziune
Zinc	Z	Rezistenta la tractiune, rezistenta la coroziune	-
Cupru	C	Punctul de rupere	Rezistenta la tractiune și compresiune, rezistenta la coroziune
Ytriu	W	Rezistenta la tractiune, rezistenta la coroziune, turnabilitate	Favorizeaza crapaturile
Strontiu	J	Proprietati mecanice, granulatie fina	-
Zirconiu	K	Rezistenta la tractiune, ductibilitatea, granulatie fina	Punctul de rupere
Mangan	M	Rezistenta la tractiune, ductibilitate, rezistenta la coroziune	-
Calciu	X	Rezistenta la fluaj, granulatie fina, turnabilitate	Favorizeaza crapaturile
Elemente „pamantoase” rare	E	Reduce porozitatea, rezistenta la temperaturi mari și rezistenta la fluaj	-
Silicon	S	Rezistenta la compresiune, duritate	Punctul de rupere, turnabilitate

1.2. Aspecte cu privire la protecția mediului în cazul utilizării aliajelor de magneziu

Aliajele de magneziu sunt materiale foarte promitatoare pentru sectorul transporturilor datorită accelerării actuale din societatea modernă pentru a obține câteva vehicule mai „curate” care să poată oferi același confort și performanțe ca cele tradiționale dar într-o manieră mai ecologică și economică. Producția vehiculelor mai ușoare este o etapă foarte promitatoare în atingerea acestui scop (o posibilă scădere a emisiilor de CO₂ cu 30% datorită reducerii greutății [1.9]), și poate fi realizat prin înlocuirea pieselor mai grele din aluminiu și oțel cu cele mai ușoare din magneziu (această estimare este valabilă pe termen lung în folosirea unui vehicul. Pe termen scurt, o creștere a emisiei de CO₂ este posibilă ca urmare a producerii pieselor din magneziu).

Protecția contra coroziunii trebuie avută în vedere pentru toate categoriile de aliaje de magneziu. Protecția poate fi oferită prin straturi de protecție anodice, acoperiri prin conversie chimică, metode de vopsire, placări sau o combinație a acestor metode. Metode adecvate de

drenare trebuie folosite pentru a bloca patrunderea apei sau a altor fluide. Diferite imbinari metalice trebuie izolate complet în mod corespunzător, incluzând pereți de separație și masticuri.

1.3. Tratarea termică a aliajelor de magneziu

Baza de codificare – Notațiile pentru tratamente sunt folosite pentru toate formele de magneziu și aliaje de magneziu cu excepția lingourilor și se bazează pe secvențele tratamentelor de bază pentru a produce diferite calități. Notația tratamentului este după notația aliajului fiind separate printr-o cratimă. Notațiile de bază ale tratamentelor sunt formate din litere. Pentru notarea subdiviziilor tratamentelor de bază se folosesc cifre sau cifre și litere. Astfel de notații se fac pentru anumite secvențe ale tratamentului de bază și se vor evidenția doar operațiile care au o influență semnificativă în caracteristicile produsului. Dacă totuși există variații ale aceleiași secvențe a tratamentului de bază ce se pot folosi pentru a obține caracteristici diferite ale aliajului atunci se vor adăuga și numere în corpul notației.

1.4. Aliaje de magneziu cu alte metale

1.4.1 Aliajul de magneziu AZ31B

AZ31B este un aliaj pe bază de magneziu forjat conținând aluminiu și zinc. Este disponibil în forma de coli de tablă, forme plate, secțiuni extrudate, forjate și tevi. Acest aliaj are o rezistență bună la temperatura camerei și de asemenea și o ductibilitate bună și este folosit în principal la procese în care temperatura nu depășește 300°F. O rezistență crescută se poate obține la formele de coală sau cele plate printr-o durificare cu o recoacere parțială ulterioară. (H24 și H26). Nu sunt disponibile tratamente pentru a mări rezistența acestui aliaj după fabricarea sa.

Specificații cu privire la produsele forjate din AZ31B sunt prezentate în tabelul 1.5.a. Proprietățile fizico-mecanice la temperatura camerei sunt prezentate în tabelele 1.5.b,c și d. [1.53,54,55,56,57].

Tabel 1.5.a – specificațiile aliajului AZ31B[1.53]

Specificatie	Formare
AMS 4375	Coala sau plata
AMS 4376	Plata
AMS 4377	Coala sau plata
ASTM B 107	Extrudare
ASTM B 91	Forjare

1.6. Compoziția chimică și proprietăți ale aliajului de magneziu AZ31B

Magneziul este un material extrem de ușor. Cu toate acestea el are și o serie de dezavantaje considerabile care îi limitează în acest sens aplicativitatea. Aliajele de magneziu sunt în competiție în mod frecvent cu o serie de alte aliaje cum ar fi aluminiu pentru aplicații

structurale. Spre deosebire de aliajele de aluminiu ce au o înaltă rezistență, aliajele de magneziu sunt puțin mai sensibile (având o rezistență la tracțiune de aproximativ 140-345 MPa, față de valorile obținute pentru aluminiu de aproximativ 275-550 MPa) și au un modul de elasticitate mai mic (aproximativ 0.45×10^5 N/mm² față de $0.69-0.76 \times 10^5$ N/mm²).

1.7. Proprietati mecanice principale

Aliajele de magneziu deformabile sunt disponibile sub formă de bare, lingouri, table, plăci și forme forjate. Principalul aliaj pentru table și plăci este aliajul de magneziu AZ31.

Aliajul de magneziu AZ31 este un aliaj întărit cu o combinație de soluții de întărire, control al granulației și prelucrare la rece și fiind utilizabil pentru experimentele efectuate la rece. Aliajul AZ31 poate fi tratat pentru a împiedica revenirea, dar toate sunt limitate la temperatura de 93°C. Pentru utilizări la temperaturi mai mari, se folosesc aliajele cu thoriu sau HK31 și HM21. Pentru a avea un grad de rezistență maxim la curgere, aliajul HK31 necesită un tratament termic T6, în timp ce aliajul HM21 este prelucrat la temperatura camerei înainte de revenire (T8). Datorită rețelei cristaline hexagonale compacte, toate operațiunile, trebuiesc efectuate la temperaturi mari.

Pentru operațiuni de extruziune se alege în mod obișnuit unul din aliajele aluminiu-zinc, precum AZ31, AZ61 sau AZ80. Aliajele AZ80 și ZK60, răspund la întărirea prin precipitare. Întrucât procedeul de extrudare se realizează la o temperatură similară cu cea de tratare termică a soluției, și răcirea se face destul de rapid în aer, este suficient să se îmbătrânească pentru a-i aplica apoi tratamentul de călire T5. Aliajul ZK60 prezintă necesitatea tratării în condițiile T5, când sunt necesare durități și rezistențe crescute. Dintre celelalte aliaje de rezistență crescută pentru extruziune, mai sunt ZK61 și ZCM711. Pentru utilizări în condiții de temperaturi mari, aliajele HK31 și HM21 se pot utiliza. Un factor important în extruziune este simetria, preferabil față de ambele axe. Raportul optim de lățime-la-grosime al extruziunilor este de obicei sub 20.

Aliajele destinate forjării sunt AZ31, AZ61, AZ80 și ZK60. AZ31 se poate forja și cu ciocanul, în timp ce celelalte aliaje sunt forjate în prese. Aliajele de magneziu sunt încălzite la temperaturi de 340-510°C pentru forjare. ZK60 are o comportare puțin mai bună la forjare decât celelalte aliaje. Deși piesele forjate au cele mai mari rezistențe dintre toate piesele din aliaj de magneziu, ele sunt cateodată preferate pentru gradul lor de etanșare la presiune, a gradului de prelucrare și a lipsei distorsiunilor.

Datorită anizotropiei (sau texturii) produse de forjarea mecanică, tensiunea de curgere la compresiune a aliajelor de magneziu deformabile este mai redusă față de cea de la tracțiune. Tensiunea de curgere la compresiune variază între 0.4 și 0.7 din cea de curgere la tracțiune. Cum turnarea nu produce anizotropie, rezistența la compresiune este aproximativ egală cu cea la tracțiune.

Componentele turnate din aliaje de magneziu sunt în general folosite în aplicații industriale datorită greutateii lor scăzute și a proprietăților de amortizare. Aliajele de magneziu pot fi sensibile la coroziune galvanică și în consecință se execută tratamente de suprafață și acoperiri pentru a putea reduce apariția coroziunii. Dezvoltarea compozițiilor chimice au ajutat și ele în mod semnificativ la combaterea potențialului de coroziune.

Aluminiul se aliază cu magneziul pentru mărirea rezistenței, turnabilității și rezistenței la coroziune. Aluminiul are un grad de solubilitate în stare solidă maxim în magneziu de 12.7% la

430°C, care scade către 2% la rece, ar putea părea la început că sistemul ar putea fi durificat prin precipitare. Precipitatul rezultat este neregulat și conferă o durificare moderată. Când este adăugat zinc la compoziție, precipitatul este rafinat și rezistența este crescută printr-o combinație de durificare în stare solidă și durificare prin precipitare. Chiar și atunci, gradul de durificare este minimal, în comparație cu cel obținut la aliajele de aluminiu tratabile termic. Cu rezistențe la tracțiune în plaja de valori 214-241 MPa și alungiri de 1-8%, aliajele Mg-Al-Zn nu sunt deosebit de rezistente sau ductile, dar au densități scăzute și sunt ușor de turnat.

Proprietățile la tracțiune ale unui număr de aliaje de magneziu deformabile și pentru turnătorie sunt date în tabelul 1.21.

Tabelul 1.21 – Proprietăți mecanice tipice ale unor aliaje de magneziu reprezentative [3.12]

Al iaj	Călire	Tensiune de rupere (N/mm ²)	Tensiune de curgere (N/mm ²)	Alungire (%)
Turnare				
AM100A	T6	276	152	1
AZ91C	T6	276	145	6
AZ91E	T6	276	152	3
AZ92A	T5	159	110	2
EZ33A	T6	262	193	3
QE22A	T6	248	165	2
WE43A	T5	207	138	3,5
ZE41A	T6	310	193	10
ZK-61A				
Extruziune				
AZ31B- C	F	262	200	15
AZ61A	F	310	228	16
ZK60A	T5	365	303	11
Table și plăci				
AZ31B	H24	290	221	15

1.8. Deformarea prin întindere a tablelor din aliaje de magneziu

Intinderea este un test fundamental de încercare a materialelor ce presupune ca o piesa proba să fie supusă la un test de întindere controlat până la rupere. Rezultatele din acest test sunt în general folosite pentru a alege un material pentru o aplicație, pentru un control al calitatii și pentru a prezice cum va reacționa un material sub acțiunea diferitelor forțe. Proprietățile care sunt determinate în mod direct prin acest test sunt rezistența la rupere, întinderea maximă și reducerea suprafeței. Din aceste măsurători mai pot fi determinați următorii parametri: Modulul Young, Coeficientul Poisson, limita de curgere și coeficientul de anizotropie. Testele de întindere uniaxiale sunt cele mai des întâlnite pentru obținerea caracteristicilor mecanice ale materialelor izotropice. Pentru materiale anizotropice cum sunt materialele compozite sunt necesare teste de întindere biaxiale.

Testele de întindere efectuate la temperaturi ridicate sunt efectuate conform ASTM E21. Viteza la care se efectuează testele are un efect considerabil asupra rezultatelor obținute. Ratele

de solicitare cel mai des folosite asupra magenziului sunt de 0.005in/in/min pana la curgere si 0.10in/in/min de la curgere pana la rupere [1.16,17,18,19,20,21].

În figura 1.4 este prezentat modelul de proba utilizat pentru testele la tractiune

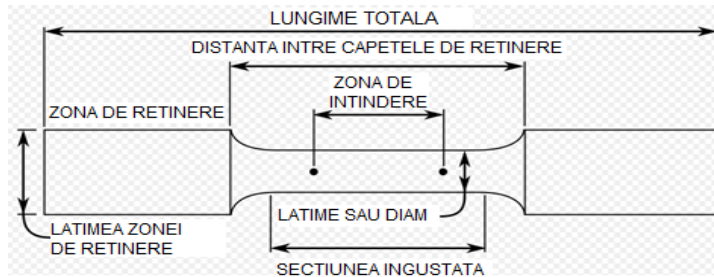


Figura 1.4. Model de epruveta si specificatii pentru testarea la intindere [1.21]

1.9. Deformarea prin îndoire tablelor din aliaje de magneziu

Tablele sunt semifabricate care au una din dimensiuni (grosimea) mult mai mică decât celelalte două. Prelucrarea lor prin deformare plastică asigură obținerea unor piese complexe cu forma apropiată de cea finală și cu o mare economie de material. Îndoirea și ambutisarea sunt două din metodele de prelucrare a tablelor cu aplicații în domeniul industrial.

Îndoirea reprezintă procedeul tehnologic de modificare a formei și dimensiunilor semifabricatelor, fără îndepărtare de material. Semifabricatele supuse operației de îndoire pot fi: table, bare, țevi, sârme, profiluri.

Metodele de îndoire sunt:

-după natura efortului dezvoltat:

- îndoire manuală;
- îndoire mecanică.

-după temperatură:

- îndoire la rece;
- îndoire la cald.

Îndoirea manuală a tablelor necesită un efort fizic deosebit, iar productivitatea muncii este scăzută. Îndoirea mecanică se realizează cu ajutorul unor utilaje cum sunt valțurile, mașinile de îndoit și presele mecanice.

Mașinile de îndoit sunt cu acționare electromecanică, hidraulică și pneumatică.

Îndoirea tablelor pe prese mecanice utilizează matrițe de îndoit. În figura 1.6 sunt prezentate echipamente folosite la astfel de operațiuni.

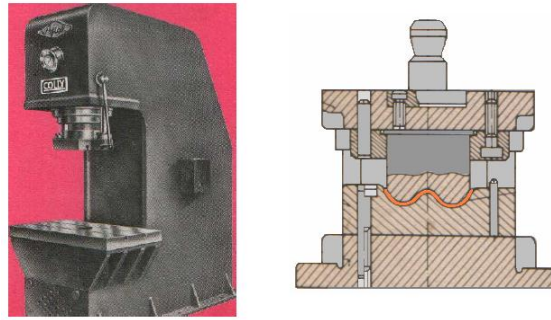


Fig. 1.6 a. Presă hidraulică b. Matriță de profilare[4.15]

La operația de îndoire se controlează razele și unghiurile de îndoire, poziția lor, prezența unor lovituri, fisuri. Controlul se realizează cu șublere, rigle gradate, raportoare și șabloane.

Analiza procesului de îndoire:

Îndoirea reprezintă operația de deformare plastică prin care are loc modificarea formei unui semifabricat prin încovoierea plană în jurul unei muchii rectilinii.

În funcție de dimensiunile și forma pieselor de prelucrat îndoirea se poate realiza cu ajutorul matrițelor, la mașini speciale de îndoire și la instalații speciale manuale sau mecanizate. Piesele obținute prin îndoire la rece din tablă pot avea diferite forme atât în secțiune transversală cât și longitudinală, iar grosimea lor maximă poate ajunge până la 100 mm. Schemele de îndoire sunt prezentate în figura 1.7.

Deformarea semifabricatului la îndoire reprezintă un proces de deformare elasto-plastică și are loc în condițiile modificării curburii în planul de îndoire datorită acțiunii forțelor de deformare care produc un efect de încovoiere.

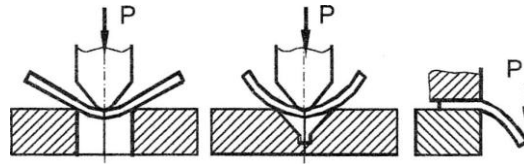


Fig.1.7 Scheme de îndoire [4.14]

Revenirea elastică este caracterizată de doi parametri geometrici ai piesei îndoite: unghiul de revenire elastică și raza de revenire.

Revenirea elastică influențează forma piesei îndoite, modificând unghiul de îndoire.

Raza de revenire se consideră neglijabilă în cazul unor raze mari de îndoire și se ia în considerație în cazul îndoirii cu raze mici de îndoire.

Revenirea elastică este influențată de următorii parametri:

- proprietățile fizico-mecanice ale materialului;
- forma și dimensiunile piesei;
- unghiul de îndoire;
- construcția matriței utilizate;
- procedul de lucru adoptat.

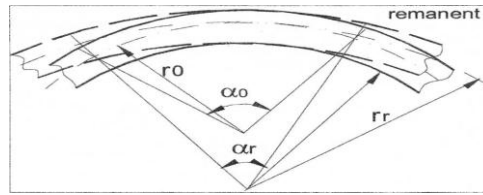


Fig.1.11 Parametrii revenirii elastice la îndoire [4.15]

Procesul de îndoire este foarte flexibil, putând fi obținute o varietate mare de forme cu ajutorul diferitelor matrițe și preselor de îndoit. Materialul este așezat pe matrița, unde este poziționat cu ajutorul unor opritoare sau tamponare, iar prinderea de obicei se face cu ajutorul bridelor. Partea superioară a preseii, poansonul, cu presa de îndoit adecvată, coboară spre tabla și formează îndoitura după forma poansonului. Schema acestui procedeu este prezentată în figura 1.14

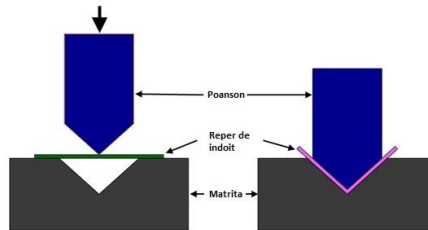


Fig. 1.14 Schema procesului de îndoire prin matritare [4.1]

Când tabla este îndoită, suprafața din interiorul îndoiturii se comprimă, iar suprafața din exterior se întinde. Undeva în interiorul grosimii tablei se află axa neutră, axa care nu se comprimă și nici nu se întinde, ea rămânând la aceeași lungime pe tot parcursul îndoiturii. În figura 1.18 este prezentată analiza grafică a procesului de îndoire.

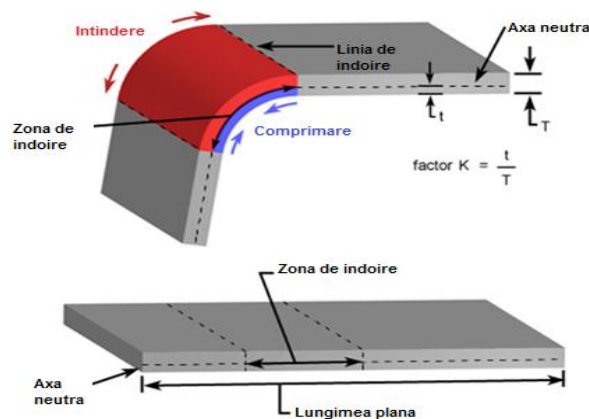


Fig. 1.18. Starea de tensiuni a procesului de îndoire [4.13]

Se poate vedea din diferența de lungimi cum în zona roșie apar tensiuni de întindere, iar în zona albastră tensiuni de comprimare. Valoarea tensiunilor crește odată cu departarea axei de

zona în cauza. Dacă o forță relativ mică este aplicată pe metal, el se va deforma elastic, iar apoi va reveni după ce forța va fi retrasă. În figura 1.19. este prezentată distribuția forțelor în timpul procesului de îndoire.

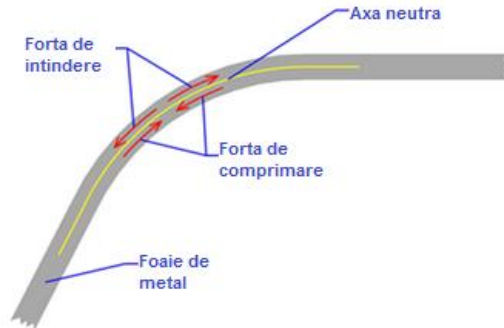


Fig. 1.19 Distribuția forțelor în timpul procesului de îndoire [4.1]

Pentru ca deformarea plastică să aibă loc, o forță de minim cu o anumită valoare trebuie aplicată pentru a se atinge limita de plasticitate, pentru ca materialul să se deformeze plastic. Această limită nu este atinsă decât la o anumită distanță față de axa neutră, astfel că în jurul axei neutre a tablei se găsește un miez elastic care suferă numai deformare elastică, chiar dacă în jurul lui materialul este deformat plastic (figura 1.20).

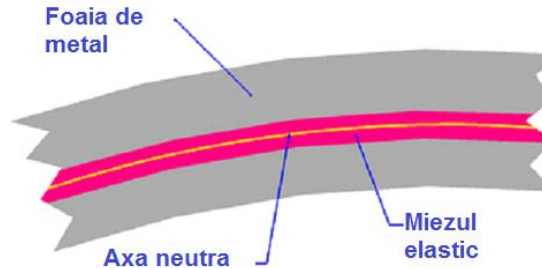


Fig. 1.20. Miezul elastic în timpul îndoirii [4.1]

1.10. Concluzii generale privind stadiul actual al cercetărilor

Îndoirea tablelor metalice din aliaje de magneziu este operația de deformare plastică la rece care constă în modificarea formei unei piese din tablă plană, prin încovoiere în jurul unei muchii rectilinii. Deformarea piesei constă în modificarea curburii acesteia în planul de îndoire datorită acțiunilor forțelor de deformare ce produc un efect de încovoiere. Principale aplicații ale acestei operații sunt variate întrucât îndoirea este un proces de prelucrare prin deformare plastică larg utilizat pe scară industrială.

În cazul îndoirii în U, piesa este inițial fixată între matriță și placa de reținere, deplasarea poansonului producând curgerea materialului în cavitatea matriței și deci deformarea acestuia. În acest caz materialul este supus unei stări complexe de tensiuni și deformații.

Revenirea elastică este un fenomen de instabilitate a formei și dimensiunilor piesei, ce apare după încetarea acțiunii forței de deformare și scoaterea piesei din dispozitiv. În cazul îndoirii, fenomenul de revenire elastică se manifestă prin modificarea valorilor unor unghiuri, modificarea razelor de curbură, curbarea pereților și prin modificarea stării de eforturi și deformații.

Analiza cercetărilor teoretice și experimentale privind fenomenul de revenire elastică la îndoirea tablelor conduce la următoarele concluzii:

- revenirea elastică crește odată cu creșterea rezistenței materialului și cu creșterea raportului dintre lățimea matriței și grosimea tablei;
- punctul de curgere al materialului are un efect destul de mare asupra revenirii elastice;
- creșterea razei poansonului determină o revenire elastică mai mare datorită unui grad mai mic al deformării plastice;
- creșterea forței de reținere are ca efect diminuarea revenirii elastice, însă creșterea acestei forțe este limitată de pericolul ruperii materialului.

Modelele matematice utilizate pentru determinarea unghiului de revenire elastică conduc la diferențe destul de mari față de valorile experimentale. Pentru îmbunătățirea modelelor de calcul a parametrilor revenirii elastice la îndoirea tablelor metalice, este necesară considerarea unor factori suplimentari de influență ca: frecarea, ecrusarea, existența unei stări plane de eforturi, anizotropia materialului, distribuția tensiunilor reziduale.

Metodele tehnice aplicate în scopul diminuării revenirii elastice, conduc la efecte pozitive dar aplicarea acestora conduce la creșterea complexității sculelor de deformare și a prețului de cost al acestora.

CAPITOLUL 2. OBIECTIVELE ȘI ETAPELE TEZEI DE DOCTORAT

Obiectivul principal al acestei lucrări a fost studierea și analizarea proprietăților aliajelor metalice de magneziu AZ31B și efectuarea de încercări și teste pentru determinarea proprietăților mecanice și a caracteristicilor de deformabilitate.

Primele obiective ale acestei lucrări pornesc de la studiul și analiza magneziului ca element chimic, însoțit de toate proprietățile care s-au studiat deja despre acesta. Apoi au fost analizate toate structurile metalice la care Magneziul intră în compoziție.

O primă etapă a fost cea de analiză a cercetărilor similare efectuate deja în domeniul deformării plastice la rece. Au fost analizate cât mai multe tipuri de aliaje. Aliajele de magneziu deformabile conțin aluminiu sau mangan și se folosesc sub formă de table, bare etc. Se deformează greu la temperatura ambiantă, deformarea făcându-se prin încălzire la 300...400°C, temperatura neinfluențându-le duritatea. Se folosesc pe scară redusă.

După studierea principalelor aliaje de magneziu s-au căutat date despre aliaje pe baza de aluminiu și oțel, principalele contracandidate la realizarea diferitelor piese din industria automobilistică și aviatică. În urma analizării acestor date s-a constatat că fiecare aliaj fie că e pe baza de magneziu, de aluminiu sau oțel are avantajele și dezavantajele sale. În industrie când se

alege materialul din care se va realiza o piesa se tine cont de proprietatile pe care va trebui sa le aiba piesa. Astfel ca pentru o piesa la care rezistenta fizica este de mare importanta atunci se va alege otelul ca material de baza pentru aliere (ex. osii, brate de sustinere). Daca se va dori construirea unei piese la care este necesara o rezistenta fizica medie si se doreste in principal ca piesa sa nu fie grea, atunci se va alege un aliaj de magneziu pentru ca acesta are o densitate mai mica si deci este mai usor (ex. rezervoare de combustibil, planse de bord).

Au fost luate în calcul și o serie de aspecte cu privire la protecția mediului, astfel încât s-a constatat că aliajele de magneziu sunt materiale foarte promitatoare pentru sectorul transporturilor datorita accelerarii actuale din societatea moderna pentru a obtine cateva vehicule mai „curate” care sa poate oferi acelasi confort si performante ca cele traditionale dar intr-o maniera mai ecologica si economica. Productia vehiculelor mai usoare este o etapa foarte promitatoare in atingerea acestui scop (o posibila scadere a emisiilor de CO₂ cu 30% datorita reducerii greutatii [1.9]), si poate fi realizat prin inlocuirea pieselor mai grele din aluminiu si otel cu cele mai usoare din magneziu (aceasta estimare este valabila pe termen lung in folosirea unui vehicul. Pe termen scurt, o crestere a emisiei de CO₂ este posibila ca urmare a producerii pieselor din magneziu).

Pentru a imbunatati o serie de proprietati ale aliajelor de magneziu in industrie se folosesc o serie de tratamente termice sau aliere cu alte elemente chimice. Au fost prezentate pricipalele tratamente termice care se folosesc pentru aliajele de tablelor de magneziu.

Urmatorul obiectiv urmarit in cadrul tezei de doctorat il constitutie analiza testelor efectuate pe aliaje din table de magneziu. Primul aliaj studiat este AZ31B, aliaj pe care am efectuat ulterior si eu o serie de teste. Am cercetat si gasit diferite modalitati de realizare ale acestui aliaj precum si standardele dupa care se realizeaza acestea. Totul a fost documentat si structurat in tabele. De asemeni am identificat si proprietatile si specificatiile fizico-mecanice pentru toate versiunile de realizare a acestui aliaj (coala sau plata, extrudare si forjare). S-a analizat forma, tratamentul, grosimea, baza și o serie de proprietăți mecanice și fizice. Un alt aliaj studiat este AZ61A. S-a analizat forma, tratamentul, grosimea, baza și o serie de proprietăți mecanice și fizice. Un ultim aliaj studiat este ZK60A. S-a analizat forma, tratamentul, grosimea, baza și o serie de proprietăți mecanice și fizice.

După ce au fost studiate principalele proprietăți ale aliajelor de magneziu s-au studiat o serie de piese. Aici au fost studiate coloanele și grinzele.

O nouă etapă în cadrul obiectivului de analiză a stadiului actual al cercetărilor a fost cea de analiză a proprietăților generale ale magneziului, proprietăți fizico-chimice ale magneziului și o serie de alte informații diverse.

Tot în cadrul acestei etape au fost studiate și proprietățile mecanice principale ale aliajului AZ31. Un prim test ce a fost efectuat este testul de întindere. Proprietatile care sunt determinate in mod direct prin acest test sunt rezistenta la rupere, întinderea maxima si reducerea suprafetei. Din aceste masuratori mai pot fi determinati urmatorii parametri: Modulul Young, Coeficientul Poisson, limita de curgere si coeficientul de anizotropie. Un alt test care care s-a efectuat asupra tablelor din aliaj de magneziu a fost testul la îndoirea în U. Pentru ambele teste s-au urmărit în principal condițiile în care se pot efectua testele, instalația experimentală.

Un nou obiectiv în cadrul tezei de doctorat a fost cel de cercetare experimentală a privind proprietățile tablelor metalice din aliaje de magneziu. În cadrul acestui obiectiv vom avea două subobiective, fiecare cu mai multe etape. Un prim subobiectiv îl reprezintă determinarea

experimentală a proprietăților mecanice. În cadrul acestui obiectiv avem o primă etapă în care este prezentată principala modalitate de determinare a proprietăților mecanice și anume testul la întindere. Încercarea la tracțiune este una din cele mai importante încercări mecanice. Aceasta permite aprecierea caracteristicilor de rezistență, plasticitate cât și a caracterului ruperii materialelor. O a doua etapă în cadrul acestui obiectiv o reprezintă metodologia de încercare a testului la întindere. Aici sunt descrise toate etapele începând de la pregătirea mașinii de efectuat încercări, a epruvetelor și până la efectuarea propriu-zisă a încercării și terminând cu activitățile de citire a datelor înregistrate. Următoarea etapă o constituie prezentarea instalației experimentale. Apoi urmează stabilirea geometriei epruvetelor. În cadrul acestei etape sunt prezentate datele constructive ale epruvetelor sub forma tabelară și sunt prezentate grafic schitele de croire a epruvetelor. Urmează alegerea dispozitivelor de măsurare a deformațiilor din timpul efectuării testelor. Pentru măsurarea deformațiilor epruvetei, se utilizează un dispozitiv, numit extensometru. O ultimă etapă a acestui obiectiv o constituie prezentarea caracteristicilor mecanice determinate. Toate caracteristicile mecanice determinate au fost notate și ordonate în tabele. Pe baza acestor date s-a trasat atât curba ingineriască cât și curba reală pentru a putea compara datele obținute cu cele teoretice.

Cel de-al doilea subobiectiv este determinarea caracteristicilor mecanice de deformabilitate și a curbelor limita de deformare. În cadrul acestei determinări am parcurs toate etapele necesare: am studiat metodologia de încercare, am analizat echipamentul necesar testului Nakazima. Apoi am trecut la etapa de prelucrare a epruvetelor, etapa de pregătire a epruvetelor și apoi la realizarea încercărilor. După ce au fost realizate încercările se trece la achiziția de imagini, adică salvarea imaginilor înregistrate de camera video din dotarea echipamentului de testare. Următoarea etapă este cea de procesare a imaginilor achiziționate anterior. În urma procesării imaginilor și prelevării datelor din graficele rezultate se poate efectua analiza rezultatelor obținute. Rezultatele obținute sunt apoi structurate într-un tabel cu ajutorul căruia se va construi ulterior Curba Limita de Deformare.

Următorul obiectiv în cadrul tezei de doctorat este cel de cercetări experimentale privind îndoirea tablelor metalice și calitatea pieselor rezultate. O primă etapă în cadrul acestui obiectiv o reprezintă analiza influenței deformării plastice asupra unor proprietăți mecanice ale materialelor metalice. În cadrul acestei etape s-a constatat că în timpul deformării se produc modificări importante ale proprietăților materialului. Starea cu proprietăți modificate crescute a materialului se numește întărire sau ecruisare. Următoarea etapă din cadrul acestui obiectiv urmărește fenomenul de revenire elastică la deformarea tablelor metalice AZ31B. În cadrul acestei etape s-au studiat cauzele și efectele fenomenului de revenire elastică. Apoi s-a studiat care este influența elementelor geometrice ale sculei. Tot aici a fost studiată și influența condițiilor de deformare. De asemenea a fost analizată și influența caracteristicilor și structurii materialului. Aici s-a constatat că un factor important de influență asupra revenirii elastice îl reprezintă direcția de orientare a grăunților metalului. Îndoirea pe direcția de laminare dă rezultate diferite comparativ cu îndoirea perpendicular pe direcția de laminare.

Un alt obiectiv a fost cel al analizei experimentale a factorilor de influență ai revenirii elastice la îndoirea tablelor de magneziu. Aici s-au stabilit etapele analizei experimentale și metodologia de încercare. În cadrul studierii metodologiei de încercare s-a stabilit materialul și geometria probelor, echipamentele și aparatura utilizată și s-au stabilit condițiile și parametrii de încercare.

Dupa ce au fost realizate toate incercarile s-a trecut la structurarea rezultatelor obtinute. Astfel ca primele rezultate obtinute au fost cele in urma incercarilor experimentale privind influenta fortei de retinere pentru epruvetele cu latimea de 30mm, 50mm si 80mm.

Apoi au fost consemnate rezultatele incercarilor experimentale privind influenta vitezei de deformare. Un alt set de rezultate consemnate au fost cele in urma incercarilor experimentale privind influenta directiei de laminare a tablei. O ultima categorie de rezultate obtinute au fost cele referitoare la influenta latimii epruvetelor.

Un nou obiectiv urmărit în cadrul tezei de doctorat îl reprezintă analiza prin simulare a influenței forței de reținere asupra revenirii elastice la îndoirea în U. O primă etapă o constituie analizarea obiectivelor simulării. Aspectul principal urmărit a fost cel de realizare a unui model care să permită estimarea cât mai eficientă a intensității revenirii elastice, a modului în care forța de reținere influențează apariția acestui fenomen și a stării de tensiuni și deformații din piesă la finalul procesului de îndoire în U, deci în mod implicit după revenirea elastică.

O a doua etapă în cadrul acestui obiectiv o reprezintă prezentarea programului cu ajutorul căruia se efectuează simularea. Programul folosit pentru simulare se numește ABAQUS și este produs de firma Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., SUA, și conține o suită de programe de simulare, bazate pe metoda elementului finit, care pot rezolva o gamă variată de probleme, începând de la simple analize liniare până la simulări neliniare, cu un grad ridicat de dificultate. Programul conține o bibliotecă vastă de elemente cu ajutorul cărora se pot modela foarte multe forme geometrice.

O altă etapă s-a bazat pe analiza dinamică realizată în ABAQUS/Explicit cu ajutorul căruia prin includerea unor reguli de integrare explicită utilizând matrice diagonale ale masei elementelor s-a putut determina un model matematic.

- Următoarea etapă a vizat metodologia de simulare a operației de îndoire în U. În cadrul acestei etape s-a constatat că prin intermediul simulărilor s-a urmărit găsirea unui model teoretic care să determine parametrii revenirii elastice în funcție de forța de reținere folosită. În acest scop s-a urmărit starea de tensiuni și deformații aparută în material în procesul de îndoire în U. Tot în cadrul acestei etape s-a ținut cont de geometria probei și de proprietățile materialului. O etapă importantă în cadrul acestui obiectiv o reprezintă prezentarea rezultatelor analizei prin simulare. În cadrul acestei etape au fost prezentate rezultatele obținute pentru simulările efectuate pentru operațiunea de îndoire în U ce au fost realizate pentru următoarele valori ale forței de reținere: 0kN, 5kN, 7.5kN și 10kN. După ce s-au prezentat toate rezultatele obținute pentru fiecare forță de reținere utilizată s-au extras o serie de concluzii cu privire la analiza prin simulare a influenței forței de reținere asupra revenirii elastice. O ultimă etapă din cadrul acestui obiectiv o reprezintă cea de comparație între rezultatele analizei prin simulare și analizei experimentale. Aici s-a constatat că pentru toți factorii analizați curbele de variație obținute prin determinări experimentale au prezentat aceeași tendință cu cele obținute din simulare. În cazul forțelor de reținere mai mari s-a constatat că există o ușoară tendință de scădere a intensității revenirii elastice la efectuarea simularilor comparativ cu datele obținute pe cale experimentală. Acest lucru se poate datora faptului că proprietățile fizico-mecanice ale materialului sunt descrise într-un anumit fel în programul de analiză.

Un alt obiectiv urmărit în cadrul tezei a fost acela al analizei posibilităților de optimizare a procesului de îndoire prin aplicarea metodei experiențelor de tip factorial. În cadrul acestui obiectiv întâlnim mai multe etape. O primă etapă o constituie analiza rezultatelor experimentale.

Pentru stabilirea influenței parametrilor procesului asupra valorii revenirii elastice s-a utilizat metoda statistică de analiză a variației (ANOVA). ANOVA este un test statistic cu ajutorul căruia se poate stabili relevanța efectului unor factori de intrare și a interacțiunilor dintre aceștia asupra unuia sau mai multor răspunsuri. Rezultatele au fost analizate separat pentru epruvetele cu lățimea de 30mm, 50mm și 80mm. La fiecare din rezultatele prezentate pe lățimea epruvetei s-au extras rezultate cu privire la analiza variației unghiului de revenire U_1 și U_2 și analiza variației razei de curbură a peretelui R.

O altă etapă este cea a analizei influenței factorilor procesului de îndoire în U asupra revenirii elastice. Aici s-a analizat influența combinată a tuturor celor trei factori de intrare ai procesului (lățimea benzii, direcția de laminare și forța de reținere) asupra parametrilor revenirii elastice. Importanța factorilor este stabilită cu ajutorul coeficientului Fisher. În cadrul acestei etape rezultatele obținute au fost structurate în funcție de unghiul de revenire U_1 , U_2 și raza de curbură a peretelui R. După prezentarea rezultatelor urmează etapa de optimizare a parametrilor procesului de îndoire în U în vederea reducerii revenirii elastice. Rezolvarea problemei de optimizare a condus la un set de zece soluții care respectă în proporție mai mare sau mai mică setul de condiții impuse. Soluțiile obținute au fost ierarhizate în raport cu un grad de dezirabilitate, calculat pe baza proporțiilor în care acestea respectă condițiile limită. O ultimă etapă în cadrul acestui obiectiv o reprezintă prezentarea concluziilor privind optimizarea procesului de îndoire a tablelor metalice din aliaje de magneziu.

Ultimul obiectiv al acestei teze de doctorat îl constituie formarea concluziilor finale, a contribuțiilor originale și a direcțiilor viitoare de studiu.

CAPITOLUL 3. CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND PROPRIETĂȚILE TABLELOR METALICE DIN ALIAJE DE MAGNEZIU AZ31B

3.1 Determinarea experimentală a proprietăților mecanice

3.1.1. Testul de întindere

Testul de întindere este un test fundamental de încercare a materialelor ce presupune ca o piesă probă să fie supusă la un test de întindere controlat până la rupere. Rezultatele din acest test sunt în general folosite pentru a alege un material pentru o aplicație, pentru un control al calității și pentru a prezice cum va reacționa un material sub acțiunea diferitelor forțe. Proprietățile care sunt determinate în mod direct prin acest test sunt rezistența la rupere, întinderea maximă și reducerea suprafeței. Din aceste măsurători mai pot fi determinați următorii parametri: Modulul Young, Coeficientul Poisson, limita de curgere și coeficientul de anizotropie. Testele de întindere uniaxiale sunt cele mai des întâlnite pentru obținerea caracteristicilor mecanice ale materialelor izotropice. Pentru materiale anizotropice cum sunt materialele compozite sunt necesare teste de întindere biaxiale.

În figura 3.1 este prezentat modelul de probă utilizat pentru testele la tracțiune

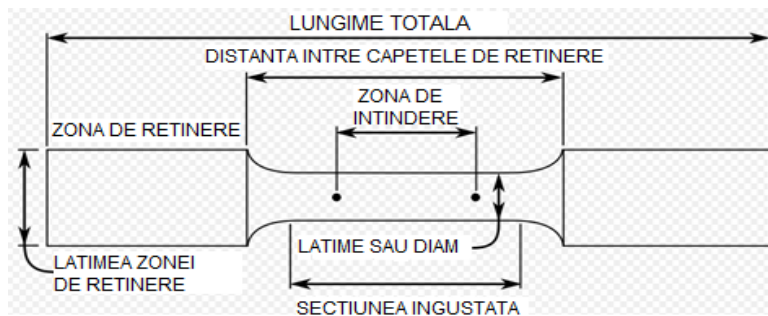


Figura 3.1. Model de epruveta si specificatii pentru testarea la intindere [1.21]

3.1.2 Metodologia de incercare

Încercarea la tracțiune este una din cele mai importante încercări mecanice. Aceasta permite aprecierea caracteristicilor de rezistență, plasticitate cât și a caracterului ruperii materialelor. Încercarea constă în ruperea sub acțiunea unei forțe de tracțiune a unei epruvete de formă caracteristică și înregistrarea curbei de variație a forței F cu deformația Δl . Epruveta cilindrică cu capete de prindere este forma cea mai utilizată pentru toate tipurile de materiale. În cazul tablelor și benzilor se recomandă și utilizarea epruvetelor plate cu capete de prindere. Pentru anumite tipuri de materiale ca: sârme, oțel beton, profile ușoare, benzi înguste etc. se pot realiza epruvete și fără capete de prindere.

Înainte de începerea lucrării

- Se măsoară epruveta pe lungime totala și latimea supusa întinderii apoi se introduc în program dimensiunile epruvetei.
- Se fixează epruveta în falca superioară după care se coboară falca de jos și se fixează epruveta și în falca de jos. Se va avea grijă ca epruvetele să rămână în afara fâlcilor mașinii.
- Se atasează extensometrul și se poziționează exact pe zona destinată întinderii apoi se scoate cuiul de siguranță;
- Se pornește instalația de încercare.

În timpul lucrării

Se pornește instalația de încercare și se notează deformația pe graficul afișat de program și se urmăresc valorile forței concomitent cu cele ale deformării epruvetei.

După terminarea lucrării

- Se salvează testul în baza de date și se exportă rezultatele pentru a fi prelucrate matematic.
- Se scoate epruveta din punctele de fixare ale instalației de testare, se așează pe masă, cap la cap, cele două bucati și se măsoară lungimea între repere. Cu ajutorul acesteia, se calculează lungimea specifică la rupere.
- se calculează limita de elasticitate;
- se calculează limita de curgere;

- e) se calculează coeficientul de anizotropie;
- f) se calculează modulul de elasticitate;
- g) se calculează coeficientul Poisson;
- h) se trasează curba tensiuni – deformații.

La efectuarea testului de întindere s-au folosit epruvete conform STAS 200 de tip „haltera”. S-au efectuat câte două încercări pentru 0° fata de direcția de laminare, două încercări pentru 45° fata de direcția de laminare și tot două încercări pentru 90° fata de direcția de laminare. În total s-au folosit 6 epruvete pentru a determina caracteristicile mecanice la viteza de 1mm/min. Tot 6 epruvete s-au folosit și pentru a determina caracteristicile mecanice la viteza de 10mm/min.

Trasarea curbei caracteristice

Pentru una din epruvete, se va trasa prin puncte curba caracteristică. Pentru aceasta, după cum se arată se aplică asupra epruvetei diferite sarcini și se măsoară deformațiile corespunzătoare.

Pentru obținerea punctelor, se procedează astfel: cunoscând forța P aplicată, se calculează efortul unitar corespunzător, cu formula : $\sigma = \frac{P}{A_0}$

Apoi cunoscând lungimea variabilă l între repere se calculează lungimea specifică $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$

Pe această curbă se definesc următoarele elemente:

-zona de proporționalitate OA pe care se respectă legea lui Hooke $\sigma=E \cdot e$ în care : E este modulul de elasticitate longitudinal sau modulul lui Young, iar $e=\Delta l/l_0$ deformația relativă reală.

-A limita de proporționalitate σ_p sau R_p este efortul până la care efortul crește proporțional cu deformația.

-B limita de elasticitate σ_e efortul maxim până la care deformația este total elastică, după încetarea acțiunii forței epruveta revenind la dimensiunile inițiale sau R_{p001} limita de elasticitate tehnică , efortul corespunzător unei deformații plastice de maxim 0,01%.

-CD zona de curgere sau de deformație sub sarcină constantă. Se definește limita de curgere σ_c ca raport între forța de curgere F_c și secțiunea inițială a epruvetei sau R_{p02} limita de curgere tehnică efortul corespunzător unei deformații plastice de maxim 0,2%.determinată în cazul materialelor la care curba ridicată la încercarea de tracțiune nu prezintă palier de curgere.

-E este punctul corespunzător forței maxime. În acest punct în mod convențional se definește și calculează efortul convențional de rupere σ_r sau R_m ca raport între F_{max} și secțiunea inițială S_0 .

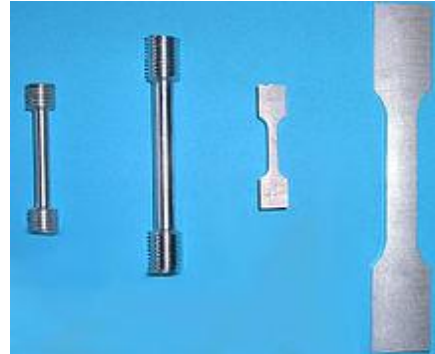
-În realitate ruperea se produce în punctul F. Efortul convențional corespunzător punctului F este mai mic ca urmare a raportării forței la secțiunea inițială S_0 . În zona EF a curbei epruveta suferă o puternică deformare localizată, o gătuire care conduce la reducerea pronunțată a secțiunii. În aceste condiții efortul real are o valoare mult mai ridicată . Valoarea efortului real nu prezintă interes practic în caracterizarea materialului inițial deoarece acesta rezultă în urma unei deformări plastice la rece puternice care este însoțită de fenomenul de ecruisare și care modifică esențial caracteristicile.

3.1.3 Instalatia experimentală

Una din presele hidraulice la care se face încercarea de întindere, prezentată schematic în figura 3.6, este Lloyd EZ50, ce poate executa încercări de tipul întindere și compresiune.



Fig.3.6 a Masina Lloyd EZ 50;



b. modele de epruvete folosite [3.32]

Presă trebuie să îndeplinească următoarele condiții.

- Să aibă o centrare maximă a epruvetei, astfel ca aplicarea să se poată face axial.
- Să asigure o creștere, respectiv descreștere a sarcinii lipsită de șocuri.
- Să măsoare sarcina aplicată cu o precizie de $\pm 1\%$
- Să permită menținerea sarcinii prescrise timp de minimum 30 de secunde

Se introduce epruveta de încercat la întindere în falca inferioară și se strânge prin rotirea mânerului de sub ea. Se deplasează apoi falca superioară cu ajutorul butonului de pe panoul de comandă sau din telecomandă de pe softul instalat pe calculator, până ce, între cele două fălci, este o distanță corespunzătoare lungimii epruvetei; apoi se prinde epruveta tot prin rotirea mânerului de fixare poziționat deasupra acesteia. Apoi din softul instalat pe calculator se alege modul de testare, grosimea probei și lungimea acesteia, viteza de deplasare a falcii superioare și se pornește mașina din program prin apăsarea butonului START. După ruperea epruvetei se oprește mașina prin apăsarea butonului STOP sau mașina se va opri singură dacă am selectat opțiunea de încetare a testului la ruperea probei.

3.1.4. Geometria probelor

Încercarea se execută pe epruvete din tablă de magneziu. Epruvetele folosite la încercările de tracțiune sunt croite după standardul SR EN ISO 527-4:2000 și forma lor este prezentată în figura de mai jos iar dimensiunile sunt prezentate în tabelul 3.2.

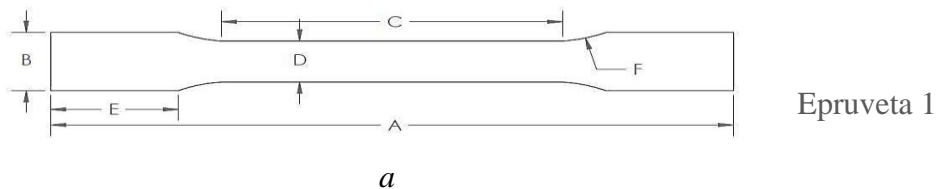


Fig. 3.7. Modele de epruvete folosite la încercarea de tracțiune [3.31]

Tabel 3.2. Dimensiunile epruvetelor la încercarea de tracțiune [3.31]

Epruveta	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	G (mm)
1	150	17	75	12	28	R20	-
2	150	40	45	16	52.5	R26	-
3	150	40	12	12	69	R6	8

3.1.6. Caracteristicile mecanice determinate

Caracteristicile mecanice ale materialului încercat s-au determinat pentru fiecare epruveta supusa la testul de întindere. În tabelul 3.3 sunt afișate caracteristicile mecanice determinate la viteza de 1mm/min:

Tabel 3.3 Caracteristici mecanice determinate ($v = 1\text{mm/min}$)

Parametru Epruveta	Limita elasticității N/mm ²	Limita de curgere N/mm ²	Limita de rupere N/mm ²	Coefficientul de anizotropie	Alungirea la rupere %	Coefficientul Poisson	Modulul de elasticitate Mpa
1	2	3	4	5	6	7	8
0° fata de directia de laminare							
1	102.91	152.49	231.43	0.44	9.33	0.48	15808
2	94.58	165.61	252.32	0.56	8	0.70	20919
45° fata de directia de laminare							
1	162.40	175.19	257.12	0.50	8	0.62	35923
2	169.86	177.94	255.58	0.40	6.67	0.60	31641
90° fata de directia de laminare							
1	182.59	203.08	306.70	0.11	6,67	0.16	33858
2	185.22	198.77	301.01	0.22	8	0.28	33048

În figura 3.9 este prezentată curba tensiuni – deformații pentru cele două epruvete folosite la încercarea de întindere pentru 0° fata de direcția de laminare. Pentru trasarea curbei s-a făcut o medie a valorilor obținute la cele două încercări făcute. În grafic este prezentată curba reală rezultată în urma testelor și curba inginerască.

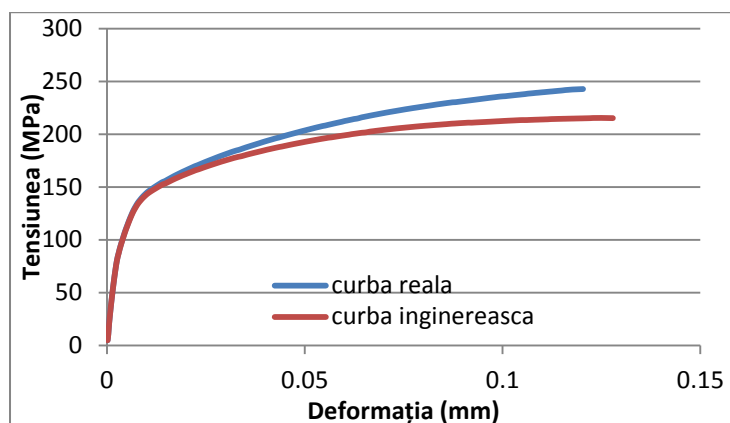


Fig. 3.9 Curba tensiuni deformatii pentru epruvetele incercate la 0° fata de directia de laminare

Caracteristicile mecanice ale epruvetelor încercate determinate la testul de întindere sunt afișate tabelul 3.4 și au fost realizate la viteza de 10mm/min:

Tabel 3.4 Caracteristici mecanice determinate ($v = 10\text{mm/min}$)

Parametru Epruveta	Limita elasticității N/mm ²	Limita de curgere N/mm ²	Limita de rupere N/mm ²	Coefficientul de anizotropie	Alungirea la rupere %	Coefficientul Poisson	Modulul de elasticitate Mpa
1	2	3	4	5	6	7	8
0° fata de directia de laminare							
1	121.94	191.74	283.83	0.28	9.46	0.59	36382
2	82.56	193.35	276.40	0.45	8.53	0.52	36838
45° fata de directia de laminare							
1	170.99	184.95	274.08	0.20	8.66	0.23	29720
2	185.28	195.18	250.69	0.30	7.33	0.41	29092
90° fata de directia de laminare							
1	202.78	208.13	296.04	0.11	8.01	0.28	27378
2	182.93	207.59	313.74	0.11	6.67	0.16	37234

În figura 3.12 este prezentată curba tensiuni – deformatii pentru cele două epruvete folosite la încercarea de întindere pentru 0° fata de directia de laminare. Pentru trasarea curbei s-a făcut o medie a valorilor obținute la cele două încercări făcute. În grafic este prezentată curba reală rezultată în urma testelor și curba ingineriască.

În figura 3.13 este prezentată curba tensiuni – deformatii pentru cele două epruvete folosite la încercarea de întindere pentru 45° fata de directia de laminare. Pentru trasarea curbei s-a făcut o medie a valorilor obținute la cele două încercări făcute. În grafic este prezentată curba reală rezultată în urma testelor și curba ingineriască.

În figura 3.14 este prezentată curba tensiuni – deformatii pentru cele două epruvete folosite la încercarea de întindere pentru 90° fata de directia de laminare. Pentru trasarea curbei s-a făcut

o medie a valorilor obtinute la cele doua incercari facute. In grafic este prezentata curba reala rezultata in urma testelor si curba ingineriasca.

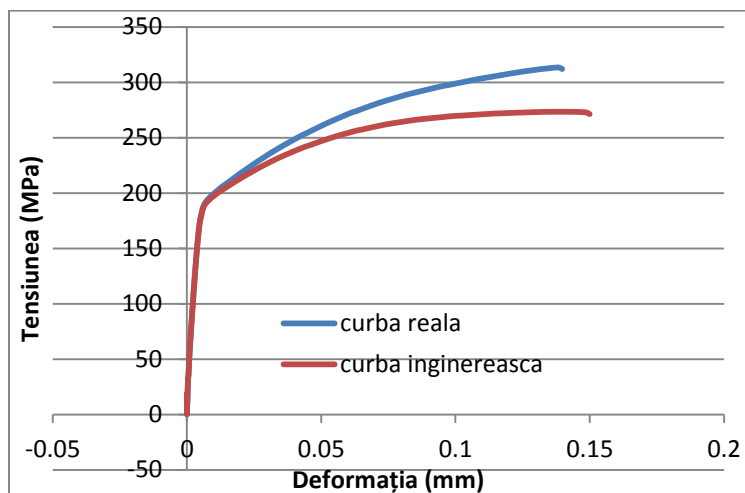


Fig. 3.14 Curba tensiuni deformatii pentru epruvetele incercate la 90° fata de directia de laminare

3.1.7 Concluzii

In urma incercarilor efectuate datele obtinute au fost trecute in tabelul 3.3 pentru incercarile efectuate la o viteza de 1mm/min si in tabelul 3.4 pentru incercarile efectuate la o viteza de 10mm/min.

In graficele 3.9, 3.10 si 3.11 sunt prezentate curbele tensiuni – deformatii pentru incercarile efectuate la 0°, 45° si 90° fata de directia de laminare a tablei de magneziu. In cele 3 grafice incercarile au fost efectuate la viteza de 1mm/min. Pentru a putea face o analiza asupra comportarii materialului testat in aceste grafice s-a trasat si curba ingineriasca, astfel putandu-se observa usor diferenta intre comportamentul teoretic al materialului testat si cel real obtinut in urma testului de intindere.

Pentru a putea face o comparatie intre aceste grafice s-a intocmit graficul din figura 3.15 unde s-au selectat din cele 3 grafice prezentate mai sus doar valorile curbei reale si astfel observam comportamentul materialului pentru incercarile efectuate la 0°, 45° si 90° fata de directia de laminare. Se observa ca materialul reactioneaza cel mai bine la intindere atunci cand aceasta se face in acelasi sens cu directia de laminare a tablei adica la 0°. La efectuarea incercarilor la 45° fata de directia de laminare a tablei se observa ca materialul se deformeaza mai greu, tensiunea crescand semnificativ de la aprox. 240 N/mm² la aprox 290 N/mm². La incercarile efectuate la 90° fata de directia de laminare a tablei se observa ca materialul se deformeaza si mai greu decat in situatiile anterioare astfel ca tensiunea ajunge la valori aprox 310 N/mm² si lungimea deformatiei este mai scurta.

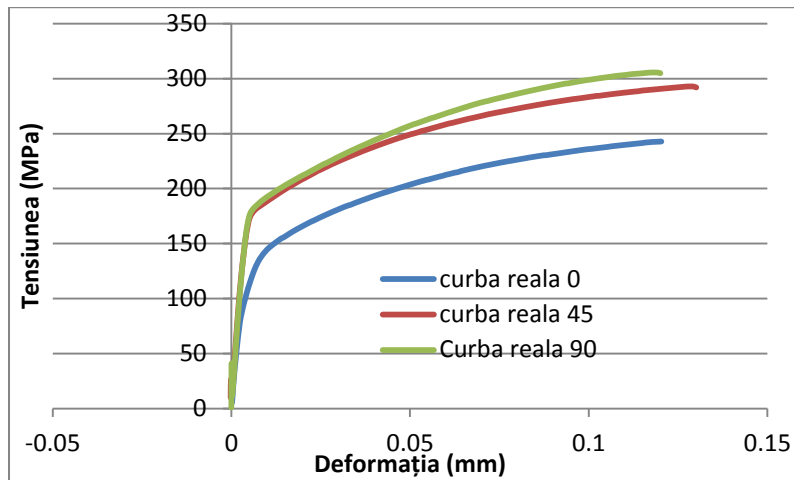


Fig. 3.15 Curbele reale obtinute la cele 3 incercari efectuate cu viteza de 1mm/min

In graficele 3.12, 3.13 si 3.14 sunt prezentate curbele tensiuni – deformatii pentru incercarile efectuate la 0°, 45° si 90° fata de directia de laminare a tablei de magneziu. In cele 3 grafice incercarile au fost efectuate la viteza de 10mm/min. Pentru a putea face o analiza asupra comportarii materialului testat in aceste grafice s-a trasat si curba ingineriasca, astfel putandu-se observa usor diferenta intre comportamentul teoretic al materialului testat si cel real obtinut in urma testului de intindere.

O alta analiza care s-a efectuat este cea intre comportarile materialului pe aceeasi directie de laminare si pe viteze diferite. In figura 3.17 observam comportarea tablei de magneziu la incercarile de intindere efectuate la 0° fata de directia de laminare si cele doua viteze folosite, respectiv cea de 1mm/min si cea de 10 mm/min. Se observa ca materialul la o viteza mai mica de intindere s-a rupt la o tensiune de aprox 245 N/mm² pe cand la viteza de 10mm/min a fost necesara o tensiune de aprox 280 N/mm².

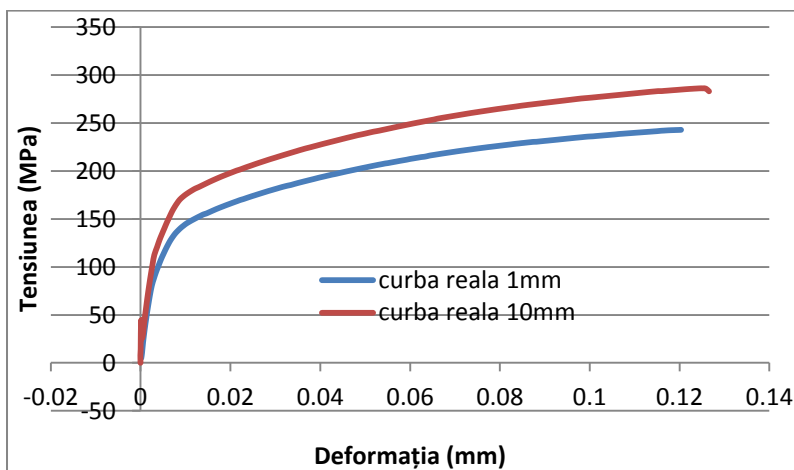


Fig. 3.17 Curbele reale obtinute la cele incercarile efectuate la 0° fata de directia de laminare cu cele 2 viteze

Analizand rezultatele obtinute la incercarile de intindere efectuate la 45° fata de directia de laminare si cele doua viteze folosite, respectiv cea de 1mm/min si cea de 10 mm/min. observam in figura 3.18 faptul ca comportarea tablei de magneziu difera. Se observa ca materialul la o viteza mai mica de intindere s-a rupt la o tensiune de aprox 290 N/mm² pe cand la viteza de 10mm/min a fost necesara o tensiune de aprox 320 N/mm². De asemenea se constata ca in cazul celor doua viteze limita de elasticitate tinde sa fie egala.

3.2 Determinarea caracteristicilor de deformabilitate si a curbelor limita de deformare

Aliajul de magneziu pe care au fost făcute cercetările experimentale este AZ31. Acest sortiment de magneziu este frecvent utilizat în ambutisarea pieselor din industria automobilistica.

Compozitia chimică procentuală a aliajului este prezentată în Tabelul 3.5.

Tabel 3.5. Compozitia chimică a aliajului de magneziu AZ31 [3.4, 3.8]

Aliaj	Compozitie nominala (% din greutate)					
	Al	Zn	Mn	Zr	RE	Altele
AZ31	3.0	1.0	0.30	-	-	-

3.2.2. Caracteristici si echipamentul pentru testul Nakazima

In figura 3.21 este prezentata instalatia de incercare pentru testul Nakazima. Instalatia este formata dintr-o presa hidraulica si sistemul de camere video Aramis.



Fig. 3.21 Masina de incercare pentru testul Nakazima

Cele mai importante avantaje ale procedurii Nakazima sunt:

- Constructia simplă a dispozitivului de deformare;
- Epruvetele sunt ușor de realizat datorită geometriei lor simple;
- Posibilitatea de acoperire a întregului domeniu de deformatii necesar determinării Cubei Limită de Deformare.

Principalele dezavantaje sunt:

- Posibilitatea ondulării epruvetelor;
- Apariția unor erori de măsurare datorate razei de curbură a poansonului;
- Necesitatea utilizării unor lubrifianți.

Umflarea hidraulică presupune deformarea prin întindere a unei epruvete discoidale sub acțiunea unui lichid (figura 3.22). Pentru a obține deformarea limitată în zona din dreapta a CLD, se folosesc plăci de retenție cu alezaj circular sau eliptic având diverse excentricități a_0/b_0 . Avantajul principal al acestei încercări este reprezentat de absența efectelor perturbatoare ale frecării. De asemenea, atunci când se cunoaște presiunea și raza de curbură polară a epruvetei, se pot determina tensiunile asociate deformațiilor principale maxime ale epruvetei. Există însă și un dezavantaj: prin umflare hidraulică se poate studia experimental numai ramura din dreapta a CLD ($\epsilon_2 > 0$).

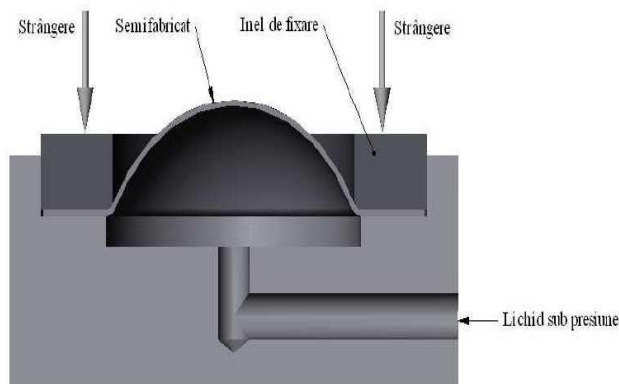


Fig. 3.22 Schema de principiu a procesului de umflare hidraulică [3.4]

Justificarea utilizării a două tipuri de teste în condițiile în care testul Nakazima permite determinarea deformațiilor situate atât în zona negativă ($\epsilon_2 < 0$) cât și în zona pozitivă constă în principalul avantaj al testului de umflare hidrostatică și anume absența perturbatoare a frecării, facilitându-se astfel determinarea unui punct din zona echibiaxială.

3.2.4 Realizarea încercărilor

În Figura 3.26 sunt prezentate cele cinci epruvete de geometrii diferite supuse testului Nakazima. Pentru fiecare geometrie în parte s-au pregătit câte cinci probe.

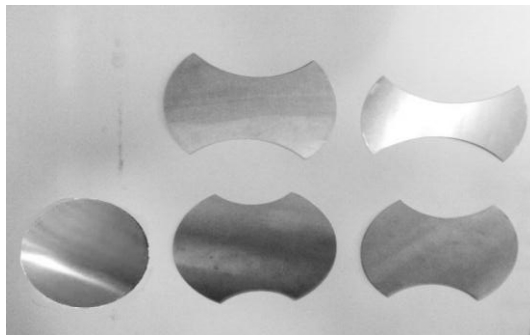


Fig 3.26. Epruvetele tăiate după cele 5 geometrii supuse testului Nakazima

Într-o primă fază suprafața epruvetei este acoperită cu o vopsea albă mată după care se aplică cu un spray de vopsea neagră un strat prin gazare pentru formarea punctelor de urmărit pe parcursul testului de deformare. În figura 3.27 sunt prezentate câteva epruvete pregătite pentru efectuarea testului Nakazima.

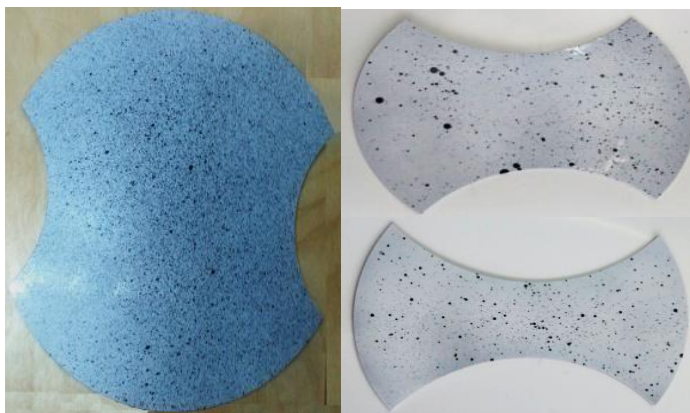


Fig. 3.27 Epruvete pregătite pentru testul Nakazima

3.2.5. Achiziția de imagini

După ce epruveta a fost vopsită se poate trece la etapa a doua și anume de achiziție a imaginilor în timpul procesului de deformare. Aceste imagini vor fi utilizate la calculul deformațiilor. Pentru analiza deformațiilor limită, se înregistrează imagini până în momentul apariției unei fisuri (figura 3.28.).

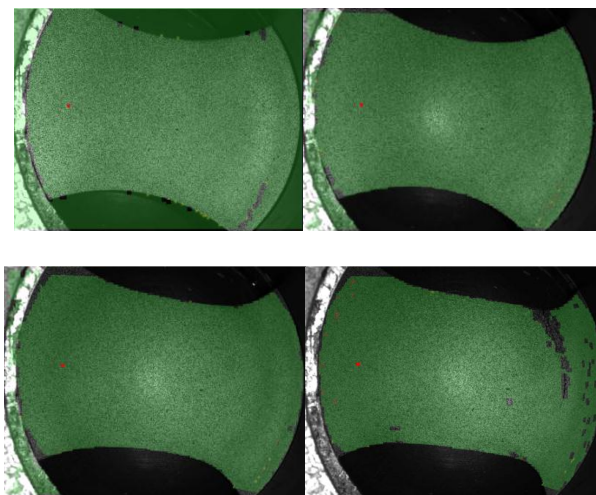


Figura 3.28. Imagini achiziționate în diferite stadii ale procesului de deformare

În cadrul acestei etape, programul Aramis analizează automat deplasările de puncte de pe suprafața epruvetei, utilizând principiul fotogrametriei. La finalul acestei analize este afișată o hartă a distribuției deformațiilor (figura 3.29.).

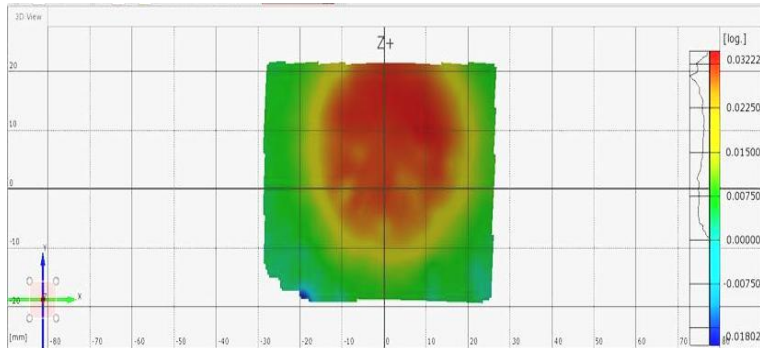


Figura 3.29. Harta distribuției deformației principale maxime

3.2.6. Analiza rezultatelor

Programul din cadrul sistemului de măsurare on-line a deformațiilor Aramis, este perfect adaptat multitudinilor de aplicații ale sistemului. Astfel numeroasele funcții ale softului permit achiziția de date, evaluarea acestora respectiv afișarea rezultatelor sub o formă optimizată.

La terminarea testelor au fost fotografiate epruvetele pentru a prezenta modul de deformare și fisurile sau rupturile apărute. În figura 3.31 a,b și c sunt prezentate imaginile epruvetelor deformate.

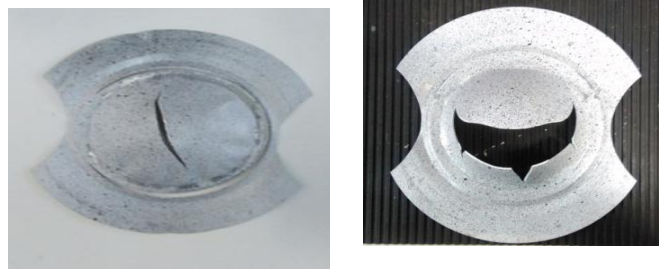


Fig. 3.31.a Deformările maxime ale epruvetelor



Fig. 3.31.b Deformările maxime ale epruvetelor



Fig. 3.31.c *Deformările maxime ale epruvetelor*

Cu ajutorul programului de analiza a imaginii din sistemul ARAMIS sau efectuat o serie de determinari si observatii cu privire la comportamentul epruvetelor in timpul efectuarii testelor.

In figura 3.32 se observa cum poansonul in momentul in care ajunge la epruveta si actioneaza asupra suprafetei acesteia incepe deformarea efectiva a epruvetei. Cu cat poansonul actioneaza mai tare cu atat deformatia este mai mare si se propaga spre marginile epruvetei.

Momentul aparitiei fisurii in urma presiunii exercitate de poanson pe suprafata epruvetei este prezentat in figura 3.33.

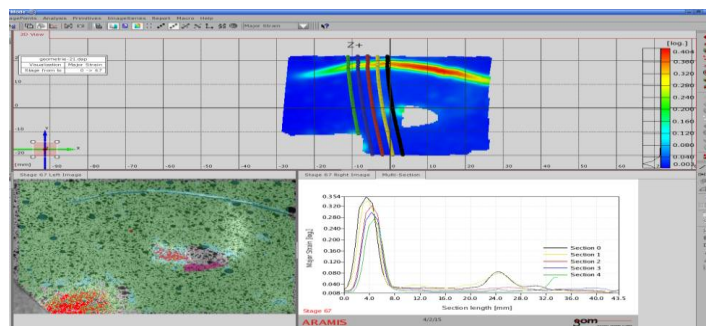


Fig 3.33 *Momentul aparitiei fisurii epruvetei in timpul efectuarii testului.*

Momentul in care deformatia epruvetei atinge cote maxime este acela de dinaintea aparitiei fisurilor sau rupturilor. In momentul in care apar primele fisuri inseamna ca deformatia epruvetei este maxima si s-a atins limita de curgere a materialului. Deformatia maxima a materialului inseamna ca acesta s-a intins si subtiat in acelasi timp pana cand la nivel molecular s-a produs o instabilitate a structurii granulare.

In partea de jos in stnga figurii este prezentata imaginea captata in timp real de camerele de luat vederi ale instalatiei de testare. In partea de sus a figurii este prezentata interpretarea imaginii captate pe baza tensiunilor si deformatiilor ce apar in timpul testului. Dupa cum se poate observa si in figura prezentata mai sus tensiunile si deformatiile au atins valori maxime in zona aparitiei fisurii.

In figura 3.34 este prezentat momentul in care epruveta s-a rupt in urma presiunii exercitate de poanson pe suprafata analizata, moment care reprezinta totodata si sfarsitul testului.

Dupa aparitia fisurii in care deformatia epruvetei este maxima daca continuam actiunea de deformare in cele din urma fisura se propaga in diferite directii in functie de aparitia fenomenului de instabilitate a granulelor din structura moleculara a materialului semifabricatului si in cele din urma apare ruperea efectiva a semifabricatului.

In partea de sus a figurii se poate observa ca pe toata suprafata epruvetei se manifesta o stare de tensiuni si deformatii ridicate si in cele din urma materialul a cedat. In general materialul cedeaza in astfel de situatii din zonele unde epruveta este mai ingusta pentru ca in acele zone atat tensiunile cat si deformatiile cresc mai repede. Aceste zone sunt urmarite cu precadere in timpul efectuării incercărilor. Materialul mai poate ceda si din cauza prezentei unor defecte de fabricatie, a unor imperfectiuni rezultate de la taierea sau prelucrarea epruvetei.

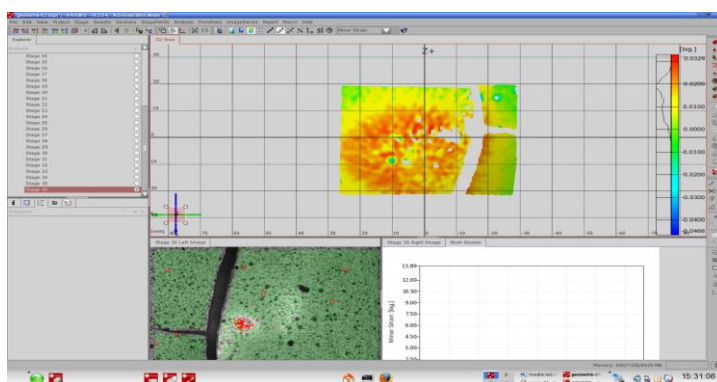


Fig 3.34. Momentul de rupere a epruvetei

Tot cu ajutorul programului de analiza a imaginii din sistemul ARAMIS s-au efectuat o serie de analize cu privire la modul de deformare al epruvetelor.

Cu ajutorul programului de analiza a imaginii din sistemul ARAMIS s-au urmarit directiile de deplasare ale punctelor de pe suprafata epruvetei in momentul in care poansonul incepe sa actioneze asupra epruvetei si incepe efectiv procesul de deformare.

In figura 3.36 este prezentata o imagine in care programul ne indica efectiv directiile de deplasare ale fiecarui punct de pe suprafata semifabricatului pe care a reusit sa il urmareasca de la inceputul testului si pana la sfarsitul testului.

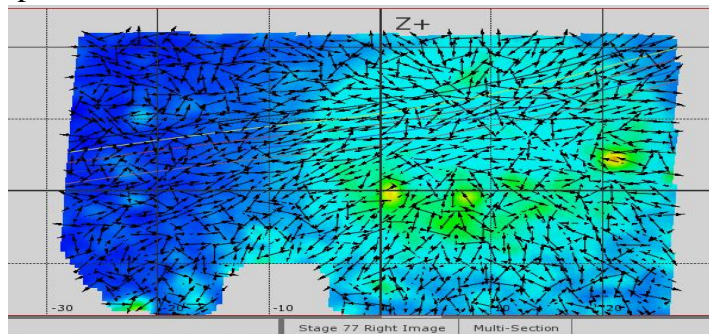


Fig 3.36. Analiza deplasării punctelor de pe suprafața epruvetei în timpul testului

Programul prin intermediul camerelor video urmărește stropii de vopsea neagra aplicați în etapa de pregătire a epruvetelor din momentul începerii testului și până la sfârșitul acestuia.

Trebuie menționat că unele puncte de pe suprafața semifabricatului nu pot fi urmărite de program până la sfârșitul testului din simplul motiv că materialul în procesul său de deformare se poate deforma exact din zona unde este aplicat punctul și astfel acesta își modifică geometria și dimensiunile și atunci nu mai este recunoscut după caracteristicile inițiale. Un alt motiv pentru care programul nu poate urmări toate punctele efectiv de la începutul testului și până la sfârșitul testului este acela că unele puncte în urma deformațiilor aparute pot ieși din câmpul vizual al camerelor. Măsurătorile pe care le face programul sunt efectuate pe baza deplasării punctelor în sensul măririi sau micșorării distanțelor dintre ele.

3.2.7 Curba limită de deformare (CLD)

Pentru a selecta valorile optime ale deformării majore și ale deformării minore se aplică o secțiune în zona unde s-a produs fisura sau rupătura și se aleg valorile înregistrate înaintea apariției fisurii pentru că acolo se înregistrează punctul maxim de deformare al materialului epruvetei înainte de a apărea acea instabilitate a structurii moleculare a materialului menționată anterior.

În figura 3.39 este realizat un print-screen în care putem observa modul de analizare a datelor. În stanga jos avem imaginea reală a epruvetei înregistrată de camerele video. În partea de sus a print-screen-ului avem imaginea epruvetei prelucrată de programul de analiză a imaginii în care se observă și secțiunea aleasă pentru extragerea datelor în vederea realizării curbei limită de deformare. În partea din dreapta jos avem graficul cu valorile înregistrate în secțiunea selectată din momentul începerii testului și până în momentul terminării testului.

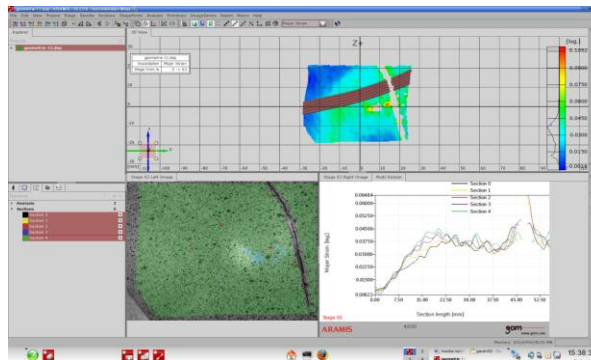


Fig 3.39 Trasarea secțiunii aspră epruvetei și graficul valorilor aferent secțiunii

Etapa următoare în vederea construirii curbei limită de deformare o constituie realizarea tabelului 3.7 cu toate valorile înregistrate pentru fiecare din cele cinci geometrii și pentru fiecare din cele cinci încercări efectuate pentru fiecare geometrie în parte. Valorile colectate sunt cele ale deformății majore și ale deformății minore. Apoi se calculează o medie a acestor valori pentru fiecare geometrie în parte.

În tabelul 3.8 sunt prezentate valorile deformății minime și maxime cu ajutorul cărora se va construi diagrama curbei limite de deformații. În tabel sunt prezentate valorile în ordinea în care se va construi diagrama.

Tabel nr 3.8 Valorile deformațiilor ce vor fi utilizate la realizarea CLD.

Geometrie	Deformația minima	Deformația maxima
5	-0.0447	0.1004
4	-0.0320	0.0700
3	0.0019	0.0425
2	0.0160	0.0445
1	0.0280	0.0570

În figura 3.40 este prezentat graficul curbei tensiuni deformații realizat cu ajutorul valorilor calculate în tabelul 3.7 și ordonate corespunzător în tabelul 3.8.

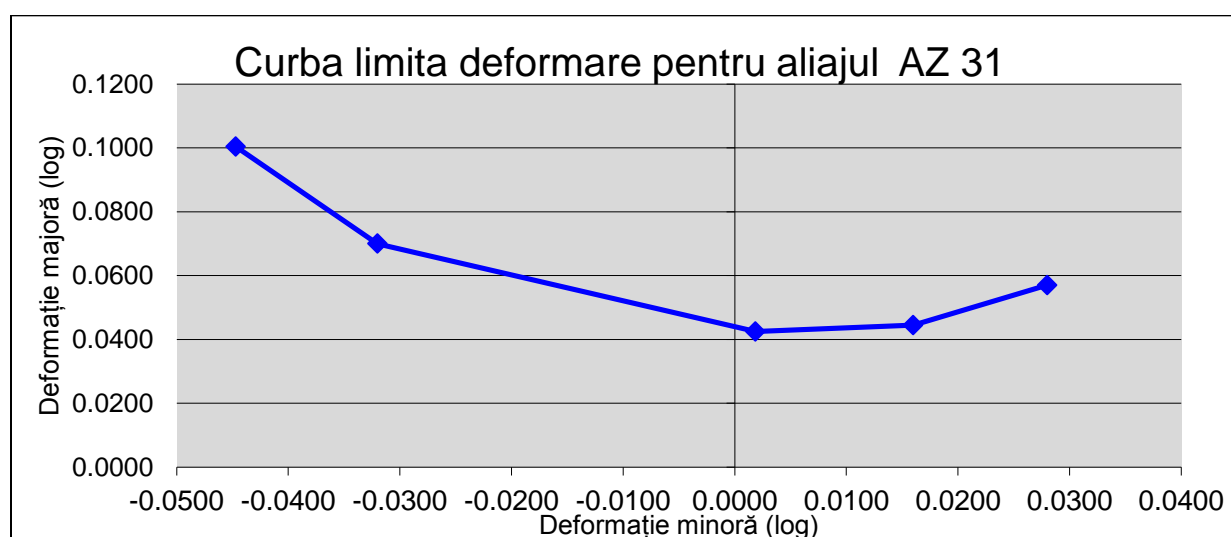


Fig. 3.40 Diagrama curbei limite deformații trasată prin punctele medii ale deformațiilor obținute

3.2.8 Concluzii

În urma calculelor făcute și a rezultatelor obținute se observă că diagrama construită cu ajutorul valorilor experimentale obținute este similară cu diagrama teoretică prezentată anterior în figura 3.24.

În figura 3.43. este prezentată diagrama curbei limite deformații trasată prin toate punctele determinate în urma încercărilor experimentale efectuate. În figura sunt reprezentate și zonele de localizare a fiecărei geometrii de epruvete în parte cu valorile obținute.

Pentru compararea rezultatelor obținute în urma experimentelor efectuate s-au luat în calcul și date similare cu privire la diferite aliaje cum ar fi oțelul și aluminiul. În figura 3.44 este prezentată Diagrama curbei limite de deformație pentru oțel.

Se poate observa că valorile deformației minore pentru aliajul de oțel sunt de 0.51 la punctul maxim față de 0.11 pentru aliajul de magneziu. De asemenea și valorile deformației maxime ajung în zona negativă până la valori de -0.21 pentru aliajul de oțel iar pentru aliajul de

magneziu aceste valori sunt de doar -0.05. Dacă privim valorile deformației maxime în zona pozitivă vom observa că diferențele nu mai sunt atât de mari adică pentru aliajul de oțel s-au obținut valori de 0.31 iar pentru aliajul de magneziu s-au obținut valori de 0.28.

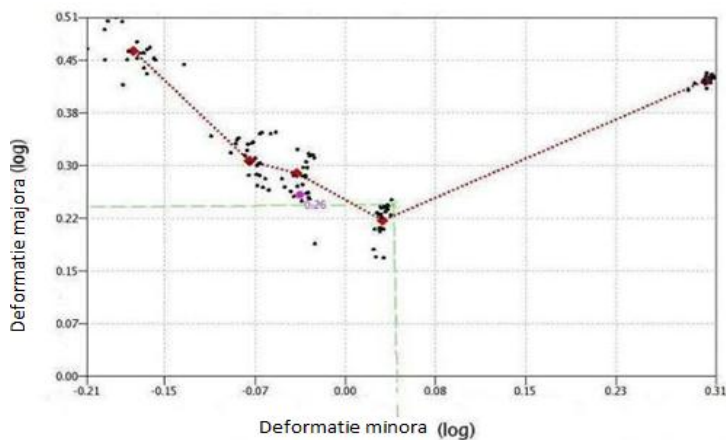


Fig. 3.44. Curba limita de deformare pentru Oțel [3.29]

Se poate observa că valorile deformației minore pentru aliajul de oțel sunt de 0.51 la punctul maxim față de 0.11 pentru aliajul de magneziu. De asemenea și valorile deformației maxime ajung în zona negativă până la valori de -0.21 pentru aliajul de oțel iar pentru aliajul de magneziu aceste valori sunt de doar -0.05. Dacă privim valorile deformației maxime în zona pozitivă vom observa că diferențele nu mai sunt atât de mari adică pentru aliajul de oțel s-au obținut valori de 0.31 iar pentru aliajul de magneziu s-au obținut valori de 0.28.

CAPITOLUL 4. CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND INDOIREA TABLELOR METALICE SI CALITATEA PIESELOR REZULTATE

4.1 Influența deformării plastice asupra unor proprietăți mecanice ale materialelor metalice

Una din principalele caracteristici ale fenomenului de deformare plastică la rece a materialelor metalice este aceea că tensiunea tangențială necesară producerii deplasărilor la nivelul planelor de alunecare crește continuu, odată cu creșterea deformațiilor specifice de alunecare. În timpul deformării se produc modificări importante ale proprietăților materialului. Din punct de vedere tehnologic ne interesează modificarea proprietăților de plasticitate și mai ales a celor mecanice exprimate prin creșterea rezistenței de rupere la tracțiune și a durității materialului deformat cu creșterea deformației la rece. Starea cu proprietăți modificate crescute a materialului se numește **întărire sau ecruisare**.

4.3 Analiza experimentală a factorilor de influență ai revenirii elastice la îndoirea tablelor de magneziu

4.3.2.2 Echipamentele și aparatura utilizată

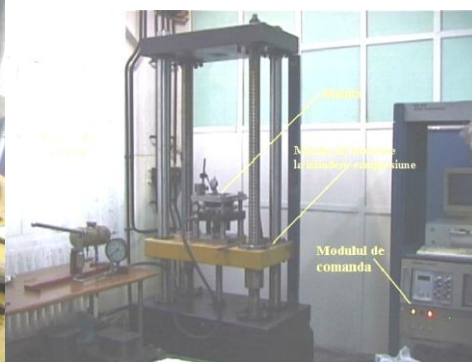
Încercările experimentale au fost efectuate cu ajutorul unei matrițe pentru ambutisarea pieselor rectangulare, de construcție specială care să permită aplicarea unor forțe de reținere diferite. Componenta dispozitivului este prezentată în figura 4.13.a. Parametrii geometrici ai sculelor sunt prezentați în tabelul 4.3. Variația forței de reținere a fost realizată cu ajutorul unui dispozitiv hidraulic cu acționare manuală, citirea presiunii fluidului fiind realizată cu ajutorul unui manometru de presiune de 250 bari. Forța de deformare a fost obținută cu ajutorul unei mașini de încercare la întindere-compresiune cu acționare mecanică, prevăzută cu variator pentru reglarea vitezei de deformare. Instalația de încercare și componenta acesteia este prezentată în figura 4.13.b. Profilul piesei rezultate și parametrii revenirii elastice au fost determinați cu ajutorul unei instalații de măsurat în coordonate MicroVu Spectra, prezentată în figura 4.13.c.

Tabelul 4.3. Dimensiunile elementelor matriței

Dimensiunile poansonului (mm)	78×120
Raza de racordare a poansonului (mm)	10
Deschiderea matriței (mm)	80
Raza de racordare a matriței (mm)	5
Lungimea cursei poansonului (mm)	50



a. Dispozitivul de încercare



b. Instalația de încercare



c. Instalația de măsurat în coordonate

Fig. 4.13 Echipamente si aparatura utilizata

4.4.1 Încercări experimentale privind influența forței de reținere

Studiul experimental privind influența forței de reținere asupra parametrilor revenirii elastice a fost realizat în condiții de frecare uscată între material și scule. Factorii care au variat pe timpul încercărilor au fost forța de reținere, viteza de deformare și direcția de laminare. Încercările s-au efectuat pe semifabricate cu trei lățimi distincte: 30mm, 50mm și 80mm.

4.4.1.1. Rezultatele experimentale pentru piesele cu lățimea de 30mm

Piesele obținute prin îndoirea în U utilizând diferite valori ale forței de reținere (unele prezentate în figura 4.15.) au fost scanate cu ajutorul instalației prezentate anterior. Se poate observa astfel modificarea produsă forme piesei prin varierea forței de reținere. Valorile parametrilor revenirii elastice sunt prezentate în tabelul 4.4.

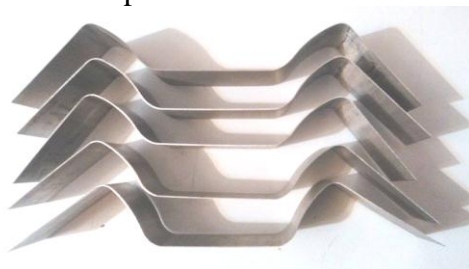


Fig. 4.15. Influența forței de reținere asupra revenirii elastice

Tabelul 4.4. Parametrii revenirii elastice

Piesa	Direcție de laminare [grd]	Forța de reținere [kN]	Unghiul θ_1 [grd]		Unghiul θ_2 [grd]		Raza de curbură a peretelui ρ [mm]	
			S	D	S	D	S	D
P01	0	0	119,09	119,19	49,07	46	111,69	117,42
P02	0	5	119,25	119,56	43,55	44,28	113,65	115,28
P03	0	5	120,28	123,19	51,11	49,02	113,95	125,43
P04	0	5	118,35	119,39	53,07	49,47	106,99	115,06
P01	90	0	126,19	127,07	49,05	45,49	122,06	150,1
P02	90	5	118,48	122,44	41,4	40,08	121,05	131,6
P03	90	5	121,24	118,49	51,34	52,49	102,98	107,4

Variația parametrilor revenirii elastice (θ_1 , θ_2 , ρ) în funcție de valorile forței de reținere este prezentată sub forma unor grafice în figurile 4.16.a, b, c și 4.17, din analiza acestora putând fi desprinse câteva observații:

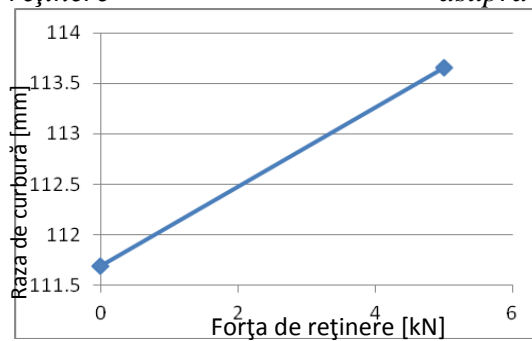
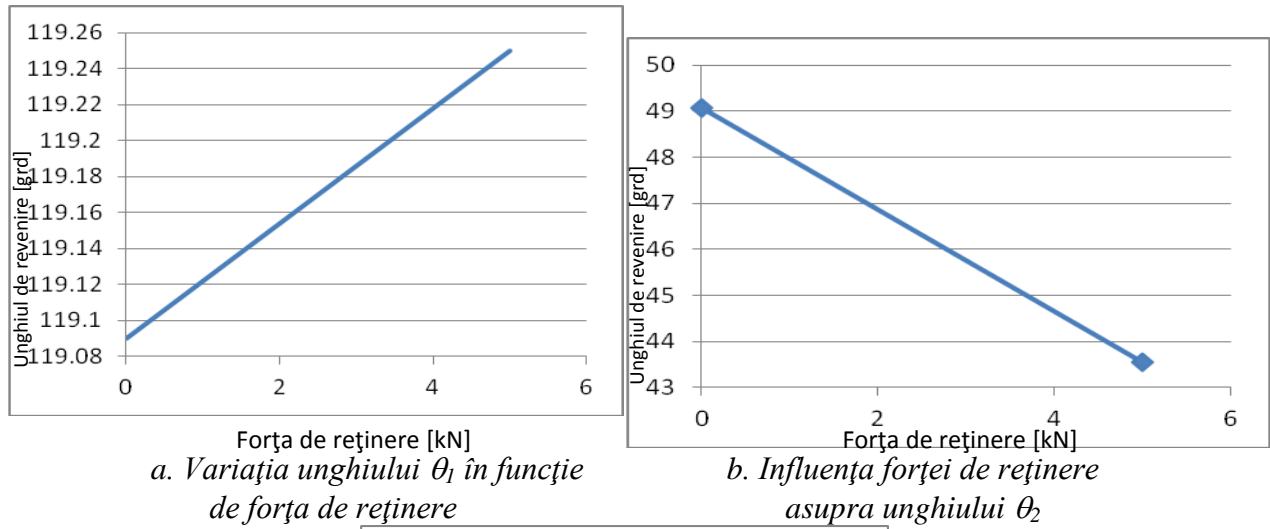


Fig. 4.16. Variația parametrilor revenirii elastice în funcție de valorile forței de reținere

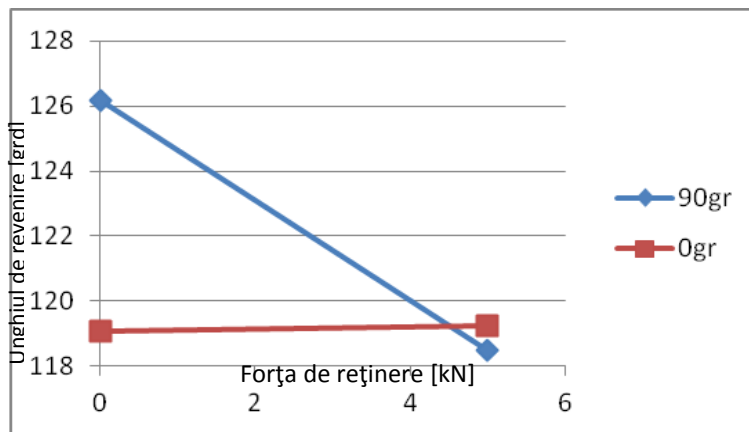


Fig. 4.17. Influența direcției de laminare asupra unghiului de revenire

- la creșterea valorilor forței de reținere are loc o creștere a intensității revenirii elastice la unghiul de revenire θ_1 și o diminuare a intensității revenirii elastice la unghiul de revenire θ_2 ;

- unghiurile de revenire, θ_1 între fundul piesei și peretele piesei respectiv θ_2 între perete și flanșă, înregistrează o variație ușoară pentru valorile mai mici ale forței de reținere;
- raza de curbură a peretelui ρ prezintă variații ușoare în cazul valorilor mari ale forței de reținere;
- comparând rezultatele încercărilor pieselor tăiate la 0 și 90 grade pe direcția de laminare se observă că variația unghiului de revenire elastică este mult mai concludentă în cazul probei tăiată perpendicular pe direcția de laminare.

4.4.2. Încercări experimentale privind influența vitezei de deformare

În scopul determinării pe cale experimentală a influenței vitezei de deformare asupra parametrilor revenirii elastice, s-au comparat rezultatele obținute pentru semifabricatele cu lățimile de 30mm, 50mm și 80mm la 0° ca direcție de laminare (figura 4.24) în raport cu viteza de deformare. În scopul reducerii la maxim a influenței forței de reținere, valoarea acesteia a fost păstrată constantă la $F=5kN$. Experimentele au fost realizate în condiții de frecare uscată. Valorile parametrilor revenirii elastice în raport cu cele două viteze de deformare folosite sunt prezentate în tabelul 4.7.

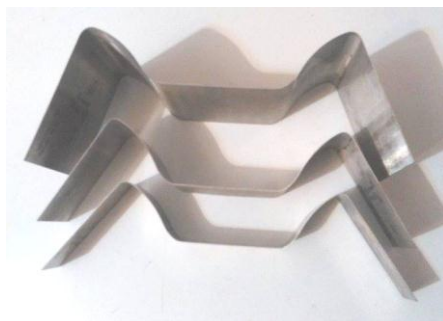
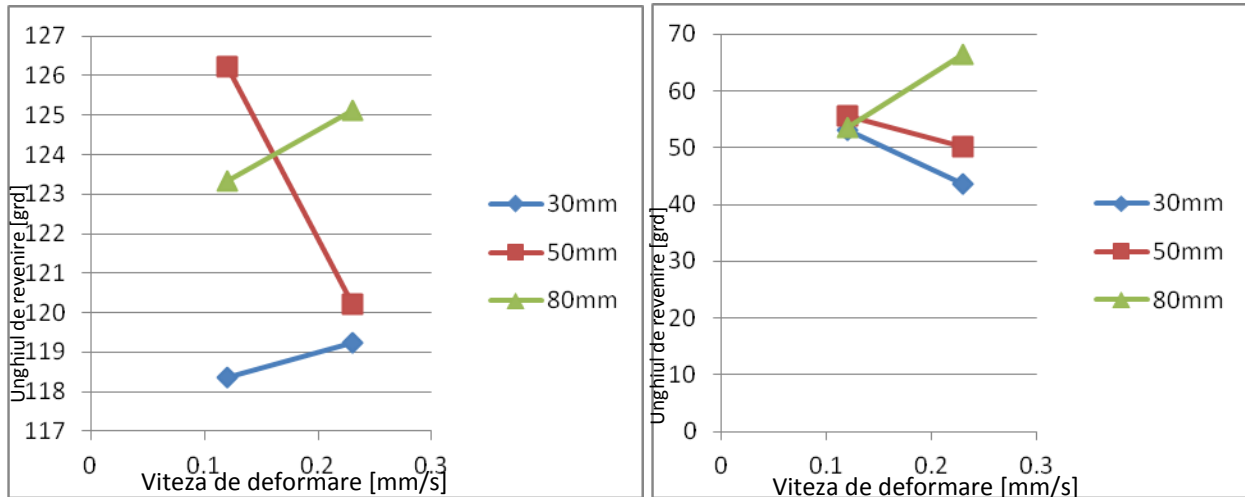


Fig. 4.24. Influența vitezei de deformare asupra revenirii elastice

Tabelul 4.7. Parametrii revenirii elastice

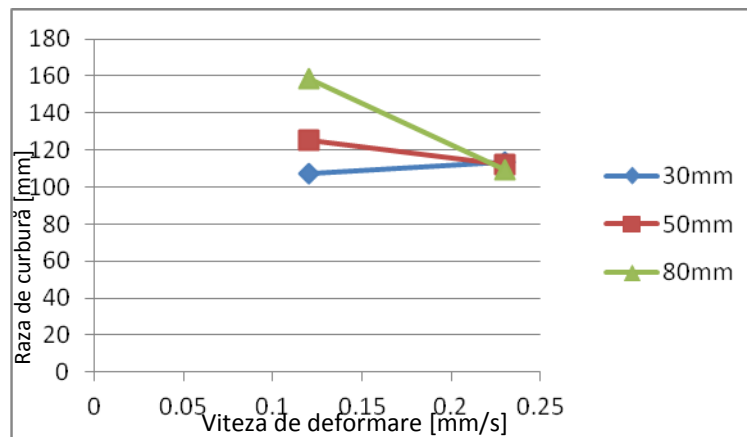
Piesa	Lățimea piesei [mm]	Viteza de deformare [mm/s]	Unghiul θ_1 [grad]		Unghiul θ_2 [grad]		Raza de curbură a peretelui ρ [mm]	
			S	D	S	D	S	D
P01	30	0.23	119,25	119,56	43,55	44,28	113,65	115,28
P02	50	0.23	120,22	122,28	50,09	51,18	112,06	117,38
P03	80	0.23	125,11	128,04	66,32	66,04	109,60	115,24
P01	30	0.12	118,35	119,39	53,07	49,47	106,99	115,06
P02	50	0.12	126,21	123,24	55,50	56,43	125,22	103,51
P03	80	0.12	123,32	125,31	53,44	51,53	158,66	124,60

Variația parametrilor revenirii elastice (θ_1 , θ_2 , ρ) în funcție de viteza de deformare este prezentată sub forma unor grafice în figura 4.25 a,b și c, din analiza acestora putând fi desprinse câteva observații:



a. Influența vitezei asupra unghiului de revenire θ_1

b. Influența vitezei asupra unghiului de revenire θ_2



c. Influența vitezei asupra razei de curbură a peretelui

Fig 4.25 Influența vitezei de deformare asupra parametrilor revenirii elastice

- la creșterea valorilor vitezei de deformare are loc o creștere a intensității revenirii elastice;
- unghiurile de revenire, θ_1 între fundul piesei și peretele piesei respectiv θ_2 între perete și flanșă, înregistrează o variație puternică pentru valorile mai mici ale vitezei de deformare;
- raza de curbură a peretelui ρ prezintă variații mai mari în cazul valorilor mici ale vitezei de deformare;

4.5. Concluzii privind factorii de influență ai fenomenului de revenire elastică

Din analiza rezultatelor experimentale obținute și prezentate anterior se pot desprinde următoarele concluzii despre influența factorilor studiați asupra fenomenului de revenire elastică la îndoirea în U a tablelor din aliaj de magneziu:

1. Referitor la **influența forței de reținere**, se evidențiază următoarele aspecte:
 - creșterea forței de reținere conduce la reducerea parametrilor revenirii elastice atât în cazul pieselor cu lățimea de 30 mm cât și al pieselor cu lățimea de 50mm și 80 mm. Aceasta se explică prin faptul că la creșterea forței de reținere se produce o uniformizare a distribuției eforturilor pe grosimea materialului.
 - piesele cu lățimea de 80 mm prezintă o variație mai intensă a unghiurilor de revenire în cazul forțelor de reținere mai mici și o variație mai pronunțată a razei de curbură a peretelui pentru forțele de reținere mari;
 - piesele cu lățimea de 30 mm au necesitat limitarea forței de reținere la 5kN, datorită ruperii materialului în cazul forțelor mai mari;
 - în cazul pieselor cu lățimea de 30 mm unghiurile de revenire prezintă o variație ușoară odată cu creșterea forței de reținere, iar raza de curbură are o variație mai importantă în cazul forțelor de reținere mai mari;
2. Referitor la **influența vitezei de deformare**, rezultă următoarele concluzii:
 - la creșterea valorilor vitezei de deformare are loc o creștere a intensității revenirii elastice;
 - unghiurile de revenire, θ_1 între fundul piesei și peretele piesei respectiv θ_2 între perete și flanșă, înregistrează o variație puternică pentru valorile mai mici ale vitezei de deformare;
 - raza de curbură a peretelui ρ prezintă variații mai mari în cazul valorilor mici ale vitezei de deformare;
3. În ceea ce privește influența structurii determinate de **direcția de laminare** se poate concluziona că:
 - la schimbarea direcției de laminare are loc o creștere a intensității revenirii elastice asupra tuturor parametrilor analizați;
 - unghiurile de revenire, θ_1 între fundul piesei și peretele piesei respectiv θ_2 între perete și flanșă, înregistrează o variație mai puternică pentru direcția de laminare de 90 grade comparativ cu direcția de laminare de 0 grade. Cu toate acestea se observă că unghiul de revenire θ_1 prezintă o variație mai accentuată comparativ cu unghiul de revenire θ_2 pentru toate cele trei variații de lățime ale piesei;
 - raza de curbură a peretelui ρ prezintă variații sensibil mai mari în cazul schimbării direcției de laminare;
4. În ceea ce privește influența structurii determinate de **lățimea piesei** se pot evidenția următoarele concluzii:
 - odată cu creșterea lățimii semifabricatului are loc o ușoară creștere a intensității revenirii elastice;
 - unghiurile de revenire, θ_1 între fundul piesei și peretele piesei respectiv θ_2 între perete

- și flanșă, înregistrează variații ușoare pe măsura creșterii lățimii piesei;
- raza de curbură a peretelui ρ prezintă variații negative în cazul creșterii lățimii semifabricatului datorită faptului că cu cât crește mărimea lățimii semifabricatului cu atât scade forța de reținere pe suprafața acesteia;

CAPITOLUL 5. ANALIZA PRIN SIMULARE A INFLUENȚEI FORȚEI DE REȚINERE ASUPRA REVENIRII ELASTICE LA ÎNDOIREA ÎN U

5.4. Metodologia de simulare a operației de îndoire în U

Prin intermediul simulărilor s-a urmărit găsirea unui model teoretic care să determine parametrul revenirii elastice în funcție de forța de reținere folosită. În acest scop s-a urmărit starea de tensiuni și deformații aparute în material în procesul de îndoire în U.

La procedeul de îndoire în U s-a luat în calcul și existența unei stări plane de deformații. Din cauza simetriei față de planul ce trece prin mijlocul poansonului și pentru a reduce timpul de analiză și calcul, ansamblul a fost modelat doar pe jumătate.

Dimensiunile inițiale ale tablei sunt 300 mm lungime, 30 mm lățime, respectiv 0.5 mm grosime. Pentru reprezentarea tablei s-a utilizat un corp deformabil. Tot în scopul reducerii timpului de calcul, tabla a fost modelată utilizând 175 elemente de suprafață S4R (shell), dispuse pe un rând. S-au folosit cinci puncte de integrare pe grosimea elementului.

Poansonul, placa de reținere și matrița sunt modelate folosind corpuri rigide definite prin suprafețe analitice. Un prim avantaj al acestora este acela dat de efortul de calcul redus și un altul este dat de comportamentul mai bun în condițiile de contact. Mișcarea corpurilor rigide este controlată cu ajutorul unui singur punct: nodul de referință. Acesta are grade de libertate de translație și de rotație și este unic definit pentru fiecare corp rigid. Pentru condițiile limită și condițiile de masă impuse unui corp rigid se asociază nodului de referință.

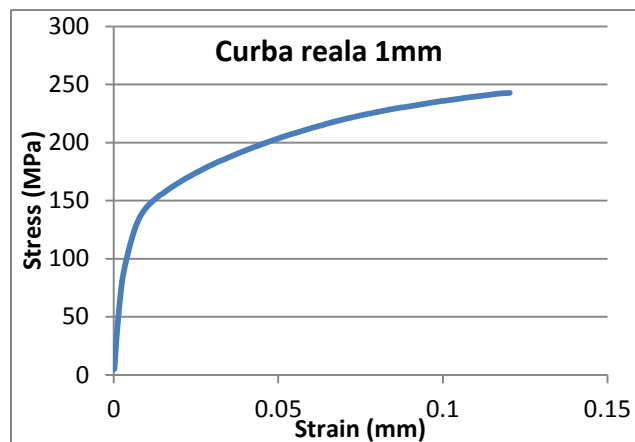


Fig. 5.6. Curba eforturi-deformații reale pentru aliajul de magneziu AZ31B

Pe baza curbei din figura nr 5.6 se determină curba eforturi reale – deformație plastică, prezentată în tabelul 5.2, ce va fi introdusă în programul ABAQUS pentru caracterizarea comportamentului materialului în domeniul plastic.

5.4.3. Condiții limită și de contact

Datorită faptului că a fost modelată doar o jumătate a ansamblului, este necesară impunerea unei condiții limită de simetrie față de planul ce trece prin mijlocul poansonului. Condițiile limită impuse poansonului și plăcii de reținere privind viteza de deplasare și forța de reținere, au urmărit respectarea cât mai fidelă a condițiilor experimentale reale.

Pentru modelarea condițiilor de contact între corpurile aflate în mișcare s-a folosit o formă modificată a legii de frecare a lui Coulomb combinată cu metoda penalității.

5.4.4. Importul rezultatelor

După ce a fost terminat procesul de simularea operației de îndoire în U cu ajutorul ABAQUS/Explicit, rezultatele vor fi transferate, cu ajutorul unei procedură de import, în ABAQUS/Standard pentru simularea fenomenului de revenire elastică printr-o analiză statică. Pe parcursul analizei, ABAQUS/Standard aplică automat o stare de eforturi artificială în scopul echilibrării eforturilor importate, după care o înlătură gradual. Deplasările obținute la finalul analizei reprezintă revenirea elastică.

5.5. Rezultatele analizei prin simulare

Simulările pentru operațiunea de îndoire în U au fost realizate pentru următoarele valori ale forței de reținere: 0kN, 5kN, 7.5kN și 10kN.

5.5.1. Rezultatele simulării pentru valoarea forței de reținere de 0kN

În figura 5.7 este prezentată starea de eforturi echivalente von Mises înainte și după revenirea elastică.

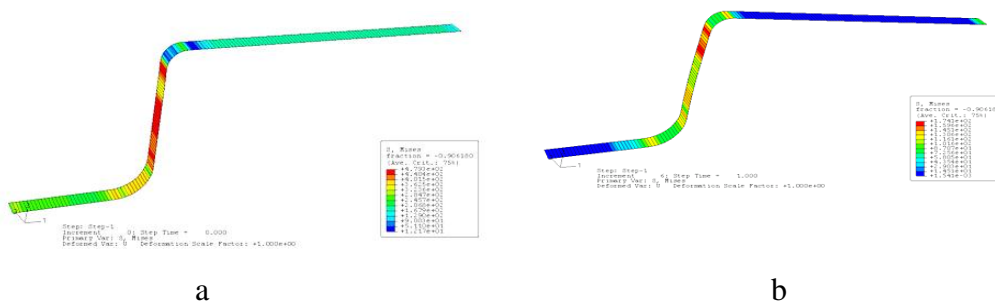


Fig. 5.7. Eforturile echivalente înainte (a) și după revenirea elastică (b)

Se observa ca înaintea revenirii elastice tensiunile maxime au fost înregistrate în peretele piesei ca urmare a solicitărilor de întindere induse de forța de reținere. După revenirea elastică se observa ca eforturile maxime apar în zona superioară a peretelui.

Distribuția eforturilor echivalente în lungul piesei pe cele două fețe ale piesei înainte (a) și după revenire (b). sunt prezentate sub forma unor grafice în figura 5.8. Se observa ca există diferențe mari înainte de revenirea elastică atât în zona fundului piesei cât și a peretelui. Revenirea elastică conduce la o reducere semnificativă a diferenței dintre eforturile pe cele două fețe.

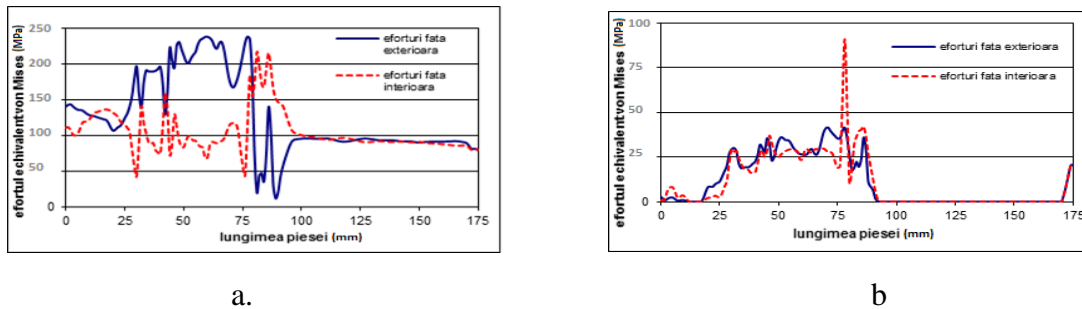


Fig. 5.8. Eforturile echivalente pe fețele piesei înainte (a) și după revenirea elastică (b)

Starea de deplasări după revenirea elastică este prezentată în figura 5.9.

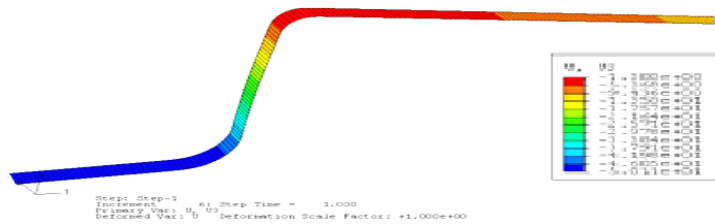
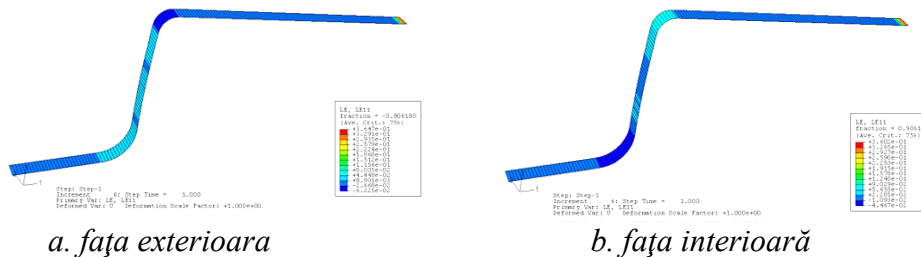
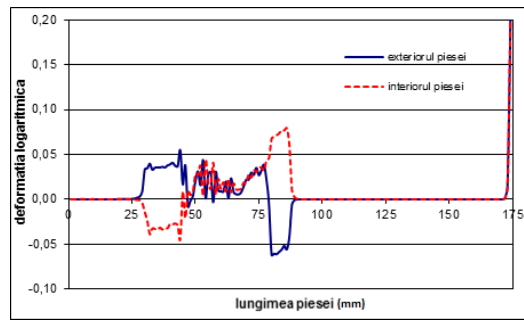


Fig. 5.9. Deplasările elementelor după revenirea elastică

În figura 5.10 sunt prezentate stările de deformații logaritmice pe cele două fețe după revenirea elastică și distribuția deformațiilor pe lungimea piesei.





c. distribuția deformațiilor pe lungimea piesei

Fig. 5.10. Deformațiile logaritmice ale piesei pe cele două fețe după revenire

Se poate observa ca diferențele majore între cele două distribuții apar în zonele de racordare ale peretelui cu fundul piesei respectiv cu flanșa. Aceste diferențe se explică prin solicitările de încovoiere la care este supus materialul și care generează deformații de compresiune pe fața exterioară și de întindere pe fața interioară în zona de racordare cu flanșa, respectiv deformații de întindere pe fața exterioară și de compresiune pe fața interioară în zona de racordare cu fundul piesei.

Ambele profile, cel teoretic și cel rezultat în urma simulării sunt prezentate în figura 5.11.

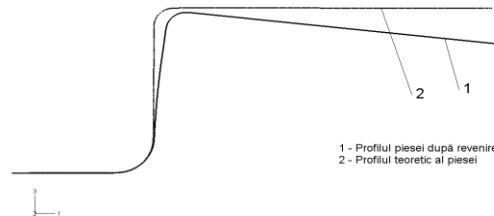


Fig. 5.11. Profilul real și profilul teoretic al piesei

5.7. Concluzii rezultate din analiza prin simulare a influenței forței de reținere asupra revenirii elastice

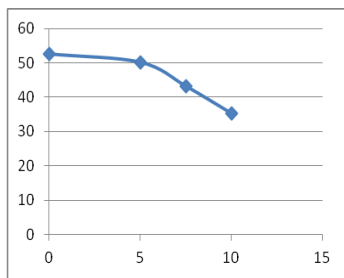
În figura 5.30 se pot observa profilele pieselor rezultate în urma simulărilor utilizând diferite valori ale forței de reținere. Observăm că cu cât crește mai mult forța de reținere cu atât mai mult profilul piesei se apropie de forma teoretică.



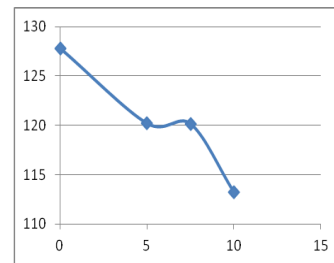
Fig. 5.30 Influența forței de reținere asupra revenirii elastice

În figura 5.31 sunt prezentați parametrii revenirii elastice în funcție de valoarea forței de reținere. Creșterea forței de reținere are ca efect diminuarea parametrilor revenirii elastice astfel:

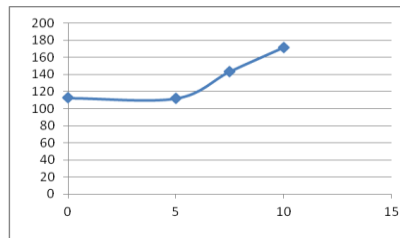
- la creșterea valorilor forței de reținere are loc o creștere a intensității revenirii elastice la unghiul de revenire θ_1 și o diminuare a intensității revenirii elastice la unghiul de revenire θ_2 ; (tabel 5.3)
- unghiurile de revenire, θ_1 între fundul piesei și peretele piesei respectiv θ_2 între perete și flanșă, înregistrează o variație ușoară pentru valorile mai mici ale forței de reținere; (tabel 5.3)
- raza de curbură a peretelui ρ prezintă variații ușoare în cazul valorilor mari ale forței de reținere; (tabel 5.3)



a. variația unghiului de revenire la baza piesei



b. variația unghiului de revenire al flanșei

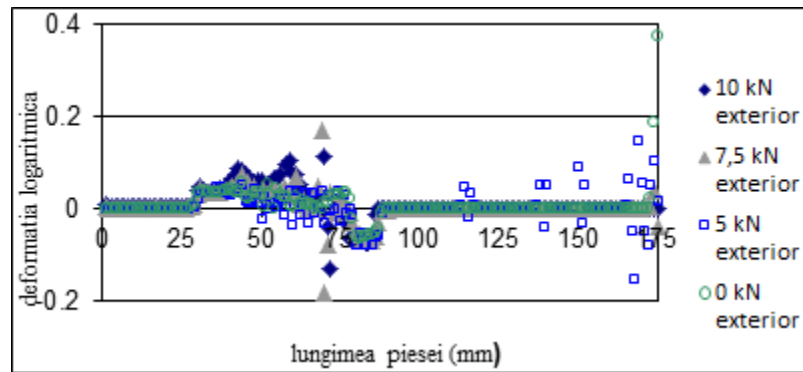


c. variația razei de curbură a peretelui

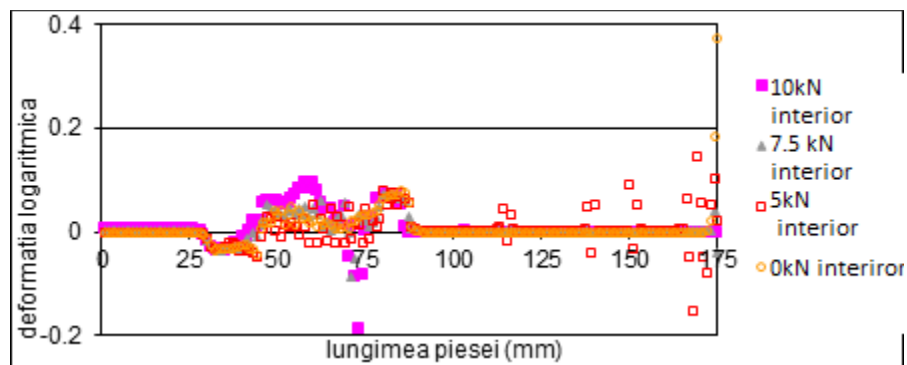
Fig. 5.31. Influența forței de reținere asupra parametrilor revenirii elastice

• În urma analizei influenței forței de reținere asupra deformațiilor prezentate în figura 5.34 se observă că la creșterea forței de reținere cresc deformațiile produse pe cele două fețe în zona peretelui și în același timp dispar diferențele între deformațiile pe cele două fețe.

Observăm că la încercările efectuate cu forțe de reținere mari la îndoirea în U este împiedicată curgerea materialului în matriță rezultând astfel eliminarea diferențelor între stările de tensiuni și deformații de pe cele două fețe ale piesei, în special în zona peretelui, cu consecințe pozitive în diminuarea efectelor revenirii elastice asupra formei finale a piesei.



a. Influența forței de reținere asupra deformațiilor de pe fața exterioară



b. Influența forței de reținere asupra deformațiilor de pe fața interioară

Fig. 5.34 Variația deformațiilor în raport cu forța de reținere

Din analiza rezultatelor obtinute se pot desprinde următoarele concluzii:

- pentru toți factorii analizați curbele de variație obținute prin determinări experimentale au prezentat aceeași tendință cu cele obținute din simulare;
- în cazul forțelor de reținere mai mari s-a constatat că există o ușoară tendință de scădere a intensității revenirii elastice la efectuarea simularilor comparativ cu datele obținute pe cale experimentală. Acest lucru se poate datora faptului că proprietățile fizico-mecanice ale materialului sunt descrise într-un anumit fel în programul de analiză;
- creșterea forței de reținere conduce la o scădere a revenirii elastice dar totuși date fiind proprietățile materialului, prin faptul că are o densitate scăzută există o limitare a forței de reținere. La forțe de reținere mai mari de 5 kN epruvetele mai înguste au cedat în timpul încercărilor; pentru epruvetele mai late cea mai mare forță de reținere a fost de 10 kN;
- în urma comparării rezultatelor putem concluziona că analiza fenomenului revenirii elastice prin metoda elementelor finite oferă o serie de informații care sunt suficient de precise pentru ca acestea să poată fi considerate ca valide.

Utilizat într-o manieră corespunzătoare procedeul de simulare prin metoda elementelor finite poate fi considerat o metodă eficientă prin care se pot analiza factorii de influență ai revenirii elastice și ofera capacitatea de a obține date corecte încă din faza de proiectare.

CAPITOLUL 6. ANALIZA POSIBILITĂȚILOR DE OPTIMIZARE A PROCESULUI DE ÎNDOIRE PRIN APLICAREA METODEI EXPERIENȚELOR DE TIP FACTORIAL

6.1 Analiza rezultatelor experimentale

Cercetările experimentale au fost organizate conform unui plan de experiențe de tip factorial.

Factorii de influență analizați sunt prezentați în tabelul 6.1

Tabel 6.1 Factori de influență analizați

Factori de influență	Simbolizare	Tip factor	Nivelul de variație		
			30	50	80
Lățimea epruvetei (mm)	Latime	Categoric	30	50	80
Direcția de laminare (grd.)	Dir_laminare	Categoric	0	90	
Forța de reținere (kN)	F_reținere	Numeric	0	5	

Parametrii revenirii elastice urmăriți au fost:

- Unghiul la fundul piesei (U₁), măsurat în grade;
- Unghiul flanșei (U₂), măsurat în grade;
- Raza de curbură a peretelui (Raza), măsurată în mm.

A fost utilizat un plan de experiențe complet, ce a totalizat un număr de 12 încercări. Pentru a putea analiza mai ușor factorii de influență s-au luat în considerare o medie a valorilor parametrilor revenirii elastice. Planul de experiențe utilizat este prezentat în tabelul 6.2.

6.1.1 Analiza rezultatelor pentru epruvetele cu lățimea de 30 mm

6.1.1.1 Analiza variației pentru unghiul de revenire U₁

Rezultatele ANOVA pentru experimentele realizate în cazul epruvetelor cu lățime de 30 mm sunt prezentate în tabelul 6.3. Acestea arată că direcția de laminare are o influență mai mare asupra unghiului de revenire U₁ decât forța de reținere ($MS_{Dir_laminare} > MS_{F_reținere}$). Influența celor doi factori asupra unghiului de revenire U₁ este ilustrată în figura 6.1. Se poate observa creșterea unghiului de revenire elastică atunci când direcția de laminare se modifică de la 0 grd. la 90 grd., în timp ce creșterea forței de reținere produce o micșorare a revenirii elastice.

Tabel 6.3 Rezultatele Anova pentru experimentele realizate pe epruvetele cu lățimea de 30mm

Source	DF	SS	MS	F	P
Direcția de laminare (Dir_laminare)	1	14.627	14.627	*	*
Forța de reținere (F_reținere)	1	7.852	7.852	*	*
Error	1	13.435	13.435	*	*
Total	3	35.914	-	-	-

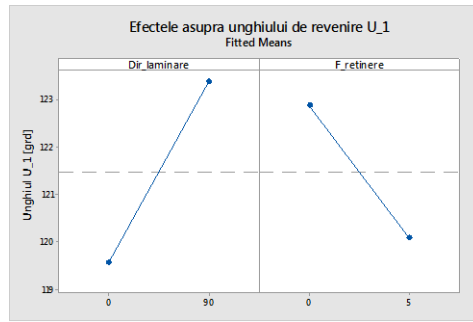


Figura 6.1 Influența direcției de laminare și a forței de reținere asupra unghiului de revenire U_1

6.1.2.3 Analiza variației pentru raza de curbură a peretelui R

Rezultatele ANOVA pentru experimentele realizate în cazul epruvetelor cu lățime de 50 mm sunt prezentate în tabelul 6.8. Acestea arată că direcția de laminare are o influență mai mare asupra razei peretelui R decât forța de reținere ($MS_{Dir_laminare} > MS_{F_reținere}$). Influența celor doi factori asupra razei peretelui R este ilustrată în figura 6.6. Se poate observa creșterea razei peretelui R atunci când direcția de laminare se modifică de la 0 grad. la 90 grad., în timp ce creșterea forței de reținere produce o micșorare a revenirii elastice.

Tabel 6.8 Rezultatele Anova pentru experimentele realizate pe epruvetele cu lățimea de 50mm

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dir_laminare	1	3.817	3.817	*	*
F_reținere	1	1.008	1.008	*	*
Dir_laminare*F_reținere	1	3.155	3.155	*	*
Error	0	*	*	*	*
Total	3	7.980	-	-	-

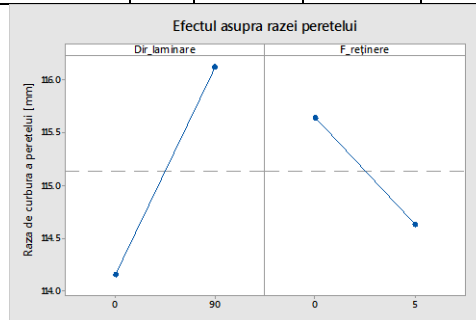


Figura 6.6 Influența direcției de laminare și a forței de reținere asupra razei de curbură a peretelui R

În cazul razei de curbură a peretelui piesei, factorul cu influența cea mai mare este tot direcția de laminare. Schimbarea orientării în raport cu direcția de laminare, de la 0 grd. la 90 grd., conduce la o creștere a razei de curbură a peretelui, deci la reducerea revenirii elastice.

6.2. Analiza influenței factorilor procesului de îndoire în U asupra revenirii elastice

În cele ce urmează este analizată influența combinată a tuturor celor trei factori de intrare ai procesului (lățimea benzii, direcția de laminare și forța de reținere) asupra parametrilor revenirii elastice.

Importanța factorilor este stabilită cu ajutorul coeficientului Fisher (F-value) ce se calculează pentru un anumit grad de încredere, exprimat prin valoarea p (pragul de eroare). Coeficientul F se calculează ca raport între dispersia factorului și dispersia erorii:

$$F = \frac{MS_{factor}}{MS_{error}}$$

În aceste analize s-a utilizat un prag de eroare p=5% (grad de încredere de 95%). Dacă pentru un factor de influență rezultă un coeficient Fisher care depășește acest prag de eroare, factorul respectiv este considerat nesemnificativ și se elimină automat din modelul de calcul.

6.2.1. Analiza influenței asupra unghiului de revenire U_1

Rezultatele testului ANOVA prezentate în tabelul 6.12 arată că modelul este semnificativ (F-value=17,87) și poate fi utilizat pentru studiul variației unghiului de revenire U_1. Factorii de influență semnificativi sunt lățimea benzii, direcția de laminare și forța de reținere.

Contribuția fiecărui factor se calculează ca raport procentual între suma pătratică (SS) a fiecărui factor și suma pătratică a modelului total. Se observă astfel că cel mai important factor de influență este lățimea benzii (56,4%), urmată de forța de reținere (18,08%) și de direcția de laminare (16,59%).

Tabel 6.12. Rezultatele testului ANOVA privind analiza influenței asupra unghiului de revenire U_1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribuție
Model	4	202.97	50.743	17.87	0.001	-
Latime	2	125.69	62.844	22.14	0.001	56.40%
Dir_laminare	1	36.98	36.984	13.03	0.009	16.59%
F_retinere	1	40.30	40.303	14.20	0.007	18.08%
Error	7	19.87	2.839	-	-	-
Total	11	222.85	-	-	-	-

Graficele de influență a celor trei factori sunt prezentate în figura 6.10. Se poate observa astfel că revenirea elastică se reduce (unghiul U_1 scade) odată cu reducerea lățimii benzii de material, la creșterea forței de reținere și la o orientare a materialului paralelă cu direcția de laminare (0grd).

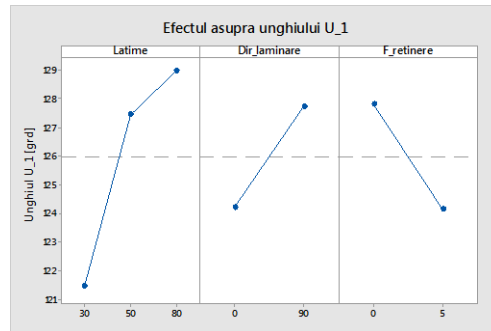


Figura 6.10 Influența direcției de laminare, forței de reținere și a lățimii epruvetei asupra unghiului de revenire U_1

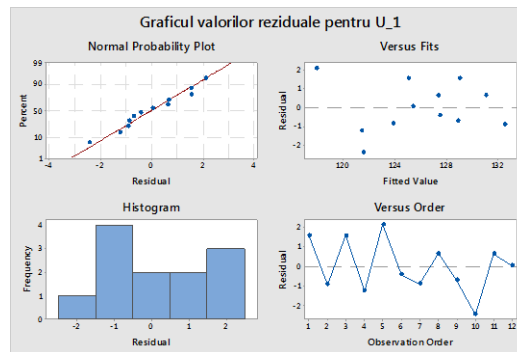


Figura 6.11 Distribuția valorilor reziduale pentru unghiului de revenire U_1

Ecuția de regresie derivată din acest model de calcul are următoare formă:

$$U_1 = 125.975 - 4.491 \text{ Latime}_{30} + 1.481 \text{ Latime}_{50} + 3.010 \text{ Latime}_{80} - 1.756 \text{ Dir}_{laminare}_0 + 1.756 \text{ Dir}_{laminare}_{90} + 1.833 \text{ F}_{reținere}_0 - 1.833 \text{ F}_{reținere}_5$$

Diagnosticarea modelului se poate face examinând figura 6.11 ce ilustrează distribuția valorilor reziduale. Din aceasta se poate observa că distribuția acestora este una liniară, fără un tipar evident, ceea ce sugerează că modelul este corect.

6.3. Optimizarea parametrilor procesului de îndoire în U în vederea reducerii revenirii elastice

Pe baza modelelor matematice determinate anterior se poate căuta o soluție optimală care să corespundă unor valori minime ale parametrilor revenirii elastice. În acest scop este necesară stabilirea unor condiții limită pentru factorii de influență și a unor valori țintă pentru parametrii revenirii elastice.

Astfel au fost impuse următoarele condiții:

- minimizarea lățimii benzii de material, deoarece aceasta a condus în mod constant la valori mai mici ale revenirii elastice;

- încadrarea în intervalul prestabilit de valori ale orientării în raport cu direcția de laminare;
- creșterea forței de reținere deoarece aceasta are efecte pozitive asupra revenirii elastice;
- reducerea valorii unghiurilor de revenire elastică U_1 , respectiv U_2 ;
- creșterea razei de curbură a peretelui piesei astfel încât acesta să poată fi aproximat cât mai bine cu un segment de dreaptă.

Rezolvarea problemei de optimizare a condus la un set de zece (10) soluții care respectă în proporție mai mare sau mai mică setul de condiții impuse. Soluțiile obținute au fost ierarhizate în raport cu un grad de dezirabilitate, calculat pe baza proporțiilor în care acestea respectă condițiile limită. Soluțiile propuse sunt prezentate în figura 6.17.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Weight	Importance
Latime	is in range	30	90	1	3
Dir_laminare	is in range	0	90	1	3
F_retinere	is in range	0	5	1	3
U_1	minimize	119.14	131.685	1	4
U_2	minimize	46.33	65.77	1	4
Raza	minimize	97.835	136.08	1	3

Number	Latime	Dir_laminare	F_retinere	U_1	U_2	Raza	Desirability
1	30	0	5	117.894	45.7498	117.09	0.981
2	30	90	5	121.635	45.7498	113.73	0.909
3	30	0	0	121.96	49.0277	119.312	0.892
4	30	90	0	125.691	49.0277	131.323	0.746
5	50	0	5	123.887	53.1148	116.312	0.730
6	50	90	5	127.376	53.1148	112.951	0.565
7	80	0	0	127.533	60.3927	109.039	0.457
8	80	0	5	125.596	60.2262	123.225	0.457
9	80	90	5	128.937	60.2262	119.865	0.361
10	50	90	0	131.044	58.3827	121.641	0.257

Figura 6.17 Soluții propuse în vederea optimizării procesului de îndoire

Soluția optimă (cu valoarea cea mai mare a dezirabilității, 0,981) propune o combinație de factori de influență și o estimare a revenirii elastice obținute, conform tabelului 6.14. Prezentarea grafică a soluției optime conform tabelului 6.14 este realizată în figura 6.18.

Tabel 6.14. Soluția optimă în vederea optimizării procesului de îndoire în U

Latime	Dir_laminare	F_retinere	Parametrii revenirii elastice			Desirabilitate
			Unghi U_1	Unghi U_2	Raza curbură	
30	0	5	117.894	45.7498	117.09	0.981

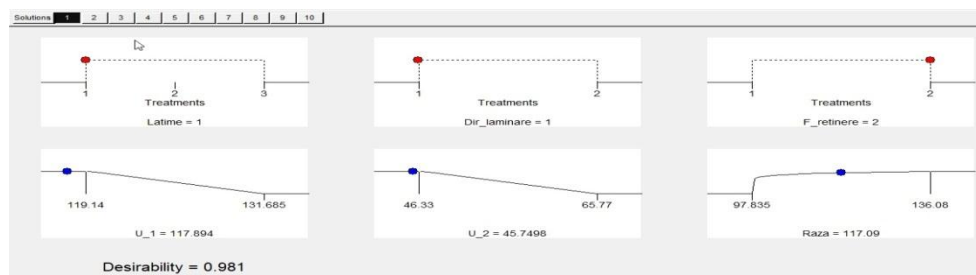


Figura 6.17 Soluția optima pentru optimizarea procesului de îndoire în U

6.4. Concluzii privind optimizarea procesului de îndoire a tablelor metalice din aliaje de magneziu

Pe baza analizei stadiului actual al cercetărilor privind fenomenul de revenire elastică la îndoirea tablelor metalice din aliaje de magneziu precum și pe baza rezultatelor obținute din

determinările experimentale privind fenomenul de revenire elastică la indoirea în U a epruvetelor din aliaj de magneziu AZ31B se pot desprinde următoarele concluzii:

- revenirea elastică este una din problemele cu care se confruntă cercetătorii din domeniu datorită influenței semnificative a acestui fenomen asupra preciziei dimensionale și de forma a pieselor obținute;
- revenirea elastică a pieselor obținute prin indoirea în U a tablelor din aliaje de magneziu afectează precizia dimensională a acestora, abaterile de la profilul teoretic înregistrându-se pentru următorii parametri geometrici ai epruvetelor: raza de curbură a peretelui lateral; unghiul de revenire între fundul epruvetei și peretele lateral și unghiul de revenire între flanșă și peretele lateral al epruvetei.
- unul din factorii de influență importanți ai revenirii elastice îl reprezintă condițiile de deformare și în special forța de reținere și direcția de laminare;
- soluțiile tehnice și metodele aplicate în vederea eliminării și/sau reducerii efectelor revenirii elastice se bazează fie pe controlul stării de tensiuni și deformații generate în timpul procesului de deformare.

Pornind de la aceste concluzii se impune elaborarea unei metode care să permită descrierea influenței diferiților parametri ai procesului asupra parametrilor geometrici ai piesei prelucrate astfel încât să fie posibilă diminuarea sau eliminarea efectelor revenirii elastice încă din faza de proiectare a procesului de deformare. În acest sens, rezultate satisfăcătoare pot fi obținute prin aplicarea unor tehnici și metode de optimizare.

Metodele de optimizare aplicate s-au bazat pe planuri de experimentare factoriale fracționate care iau în considerație o serie de parametri ai procesului de îndoire în U și descriu efectul acestora asupra unor parametri geometrici ai epruvetei. Metodele de optimizare au utilizat trei parametri de influență ai procesului.

Alegerea atât a parametrilor procesului cât și a parametrilor geometrici ai piesei a fost făcută având în vedere ca aceștia să fie independenți între ei. Pentru fiecare din combinațiile de valori ale parametrilor procesului s-a realizat o simulare prin metoda elementelor finite rezultând astfel un fișier din care prin post-procesare se pot determina valorile parametrilor geometrici urmăriți ai epruvetei. Pentru a realiza acest lucru a fost necesar ca metoda numerică să furnizeze rezultate bune, cât mai apropiate de cele practice reale.

CAPITOLUL 7. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU

7.1. Contribuții originale

Prin cercetarea realizată în cadrul tezei s-au adus următoarele contribuții originale:

a. Realizarea unei documentări privind stadiul actual al cercetărilor teoretice și experimentale privind deformarea plastică la rece a tablelor metalice din aliaje de magneziu, evidențiind comparativ și critic diferitele rezultate sau aspecte prezentate în literatura tehnică de specialitate;

b. Formularea concluziilor privind stadiul actual al cercetărilor, ce au permis demonstrarea oportunității și necesității cercetărilor în domeniul temei, precum și precizarea direcțiilor și obiectivelor de studiu;

c. Stabilirea algoritmului de studiu în vederea aplicării unei metode care să permită identificarea relației optime dintre parametrii procesului, geometria sculelor și caracteristicile materialului, astfel încât efectele revenirii elastice asupra preciziei de formă a pieselor obținute să fie minime.

d. Determinarea experimentală a proprietăților mecanice ale aliajului de magneziu AZ31B. Încercările au fost efectuate pe epruvete de tip halteră la două viteze de deformare diferite și pe trei direcții de laminare a colii de tablă, respectiv 0 grade, 45 și 90 grade. S-au realizat o serie de concluzii cu privire la rezultatele obținute;

e. Determinarea caracteristicilor de deformabilitate și a curbelor limită de deformare pentru aliajul de magneziu AZ31B. Încercările pentru testul Nakazima s-au efectuat pe o presa hidraulică de tip Buldge Test. S-au realizat o serie de concluzii cu privire la rezultatele obținute;

f. Analizarea influenței deformării plastice asupra unor proprietăți mecanice ale materialelor metalice. Aici au fost studiate:

- a. Fenomenul de revenire elastică la deformarea tablelor metalice AZ31B. Au fost analizați factorii de influență ai revenirii elastice, influența elementelor geometrice ale sculei, influența condițiilor de deformare și influența caracteristicilor și structurii materialului;
- b. Analizarea experimentală a factorilor de influență ai revenirii elastice la îndoirea tablelor de magneziu;
- c. Realizarea de încercări experimentale privind îndoirea tablelor metalice din aliaje de magneziu;
- d. S-au sintetizat o serie de concluzii cu privire la factorii de influență ai fenomenului de revenire elastică.

g. Analizarea prin simulare a influenței forței de reținere asupra revenirii elastice la îndoirea în U a tablelor metalice din aliaj de magneziu. Aici au fost studiate:

- a. Realizarea modelului matematic;
- b. Analizarea metodologiei de simulare a operației de îndoire în U;
- c. Analizarea rezultatelor obținute prin simulare. S-au obținut rezultate în urma simulărilor pentru forțele de reținere de 0kN, 5kN, 7,5kN și 10kN;
- d. Compararea între rezultatele analizei prin simulare și analizei experimentale;
- e. S-au sintetizat o serie de concluzii cu privire la analiza prin simulare a influenței forței de reținere asupra revenirii elastice;

h. Analizarea posibilităților de optimizare a procesului de îndoire prin aplicarea metodei experiențelor de tip factorial. Aici au fost studiate:

- a. Analizarea rezultatelor pentru epruvetele cu lățimea de 30 mm. Aici a fost analizată variația pentru cele două unghiuri de revenire și pentru raza de curbură a peretelui;
- b. Analizarea rezultatelor pentru epruvetele cu lățimea de 50 mm. Aici a fost analizată variația pentru cele două unghiuri de revenire și pentru raza de curbură a peretelui;
- c. Analizarea rezultatelor pentru epruvetele cu lățimea de 80 mm. Aici a fost analizată variația pentru cele două unghiuri de revenire și pentru raza de curbură a peretelui;

- d. Analizarea influenței factorilor procesului de îndoire în U asupra revenirii elastice. A fost realizată analiza influenței celor două unghiuri de revenire și a razei de curbură a peretelui epruvetei;
 - e. Realizarea optimizării parametrilor procesului de îndoire în U în vederea reducerii revenirii elastic;
 - f. S-au formulat o serie de concluzii privind optimizarea procesului de îndoire a tablelor metalice din aliaje de magneziu.
- i. Rezultatele obținute în cadrul cercetărilor au fost valorificate prin: 3 lucrări publicate în cadrul unei reviste de specialitate din țară și în cadrul unei conferințe științifice de specialitate desfășurată la București în luna noiembrie 2017;

7.2. Direcții viitoare de studiu

În urma cercetărilor efectuate, consider ca fiind utilă și posibilă dezvoltarea și extinderea cercetărilor relative la tema abordată, în următoarele direcții:

- a. Analiza influenței altor factori și parametri de proces asupra preciziei geometrice a pieselor obținute prin indoire în U, respectiv: viteza de deformare, forța de deformare, forță de retenere, etc;
- b. Analiza metalografică a materialului după deformare, în diferite zone ale piesei, în vederea determinării modificărilor structurale survenite în timpul solicitării și a efectului acestora asupra preciziei geometrice;
- c. Aplicarea unei metode care să permită determinarea experimentală a tensiunilor reziduale pe întreaga secțiune a piesei (de exemplu, difracția cu raze X), în vederea cuantificării efectului acestor tensiuni asupra fenomenului de revenire elastică;
- d. Analiza experimentală a comportării epruvetelor în cazul folosirii unor forțe de retenere mai mari și a unor epruvete cu lățimi mai mari decât cele studiate în prezenta teză;
- e. Implementarea în cadrul analizei cu element finit a unor modele care să descrie cât mai fidel comportarea materialului din procesul fizic. Cunoașterea mecanismului deformării și a interacțiunilor mutuale implicate în proces vor permite un control eficient a curgerii materialului, și, de asemenea, o proiectare mai bună a procesului de deformare;
- f. Aprofundarea studiului privind aplicarea tehnicilor de optimizare (stabilirea unor domenii optime de aplicare) și utilitatea acestora în controlul revenirii elastice la indoirea tablelor metalice din aliaje de magneziu.

BIBLIOGRAFIE

- 1.1 <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/>
- 1.2 Kainer K. U., Srinivasan P. B., Blawert C., Dietzel W., "Corrosion of Magnesium and its alloys" Shreir's Corrosion, 2010, Chapter 3.09, pp 2011-2041.
- 1.3 Willekens J., „Magnesium-Verfügbarkeit, Markttendenzen Preisentwicklung, DGM Fortbildungsseminar“, Clausthal-Zellerfeld, 29 (1997).
- 1.4 Kramer D. A., "Magnesium Metal" Annual report of the "United States Geographic Survey (USGS)" 2010.
- 1.5 Pinheiro G. A., "Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanism and Assessment of Joint Properties", GKSS Forschungszentrum, 2008.
- 1.6 Yuen C. K., Ip W. Y., "Theoretical risk assessment of magnesium alloys as degradable biomedical implants" Acta Biomater. 6 (2010) pp. 1808-1812.
- 1.7 Witte F., Hort N., Vogt C, Cohen S, Kainer K. U., Willumeit R, Feyerabend F., "Degradable biomaterials based on magnesium corrosion" Curr. Opin. Sol. Stat. Mater. Sci. 12 (2008) pp. 63–72.
- 1.8 Ferreira P.C., Kde P. A., Takayanaguri A.M., Segura-Munoz A. I., "Aluminium as a risk factor for Alzheimers disease" Rev. Lat. Am. Enfermagem 16 (2008) pp 151-157.
- 1.9 Mordike B.L., Ebert T., "Magnesium: Properties - applications -potential" Mater. Sci. Eng. A302 (2001) pp 37-45.
- 1.10 United States Automotive Materials Partnership (USAMP) "Magnesium Vision 2020: A north American Automotive vision for magnesium" 2006.
- 1.11 Luo A. A. "Wrought magnesium alloys and manufacturing processes for automotive applications" in Lightweight Magnesium Technology, USA, 2006, pp 155-165.
- 1.12 Krajewski P. E., "Elevated Temperature Forming of Sheet Magnesium Alloys" Light Weight Magnesium Alloy Technology 2001-2005, 2006, pp. 331-336.
- 1.13 Schnell R., Hoenes R., Kaeumle F., „Erfahrungen mit Magnesium-Rädern in Sport und Serienautos“ Deutscher Verband für Materialforschungs und Prüfung Korrosion an Fahrzeuge, DVM-Tag 1995, pp. 175-190.
- 1.14 Fink R., "Druckgießen von magnesium" in Magnesium-Eigenschaften, Anwendung, Potentiale, WILEY-VCH Verlag GmbH, Weiheim, 2000, pp 26-48. 156
- 1.15 Friedrich H., Schumann S., "Research for a "new age of magnesium" in the automotive industry", Mater. Proc. Tech. 117 (2001) pp 276-281.
- 1.16 Eastman, E. J., McDonald, J. C., and Moore, A. A., "The Relation of Stress to Strain in Magnesium Alloys", Journal of the Aeronautical Sciences, pp 273-280 (July 1945).
- 1.17 Moore, A. A., "The Effect of Speed of Testing of Magnesium-Base Alloys", American Society for Testing and Materials, Proceedings 48, pp 1133-1138 (1948).
- 1.18 Fenn, R. W., Jr., and Gusack, J. C., "Effect of Strain Rate and Temperature on the Strength of Magnesium Alloys", American Society of Testing and Materials, Proceedings 58, pp 685-696 (1958).
- 1.19 Fenn, R. W., Jr., and Lockwood, L. F., "Low-Temperature, Properties of Welded Magnesium Alloys", The Welding Journal Research Supplement (August 1960).
- 1.20 Czichos, Horst (2006). *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. Berlin: Springer. pp. 303–304. [ISBN 978-3-540-20785-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-20785-6).

- 1.21 Davis, Joseph R. (2004). *Tensile testing* (2nd ed.). ASM International. [ISBN 978-0-87170-806-9](#).
- 1.22 Handbook of Metallurgical Process Design, By George E. Totten, Kiyoshi Funatani, Lin Xie, CRC Press.
- 1.23 Moore, A. A., and McDonald, J. C., “Compression Testing of Magnesium Alloy Sheet”, American Society for Testing and Materials, Bulletin No. 135, pp 27-30 (August 1945).
- 1.24 Fenn, R. W., Jr., “Compression Testing of Sheet Magnesium Utilizing Rapid Heating”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 60, pp 940-956 (1960).
- 1.25 Gusack, J. A., and Moore, A. A., “An Autographic Bearing-Strength Test Method, and Typical Test Values on Some Magnesium Alloys at Room and Elevated Temperatures”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 56, pp 834-841 (1956).
- 1.26 Stickley, G. W., and Moore, A. A., “Effects of Lubrication and Pin Surface on Bearing Strengths of Aluminum and Magnesium Alloys”, American Society for Testing and Materials, Materials, Research and Standards, Vol. 2, No. 2, pp 747-751 (September 1962).
- 1.27 Fenn, R. W., Jr., and Clapper, R. B., “Evaluation of Test Variables in the Determination of Shear Strength”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 56, pp 842-858 (1956).
- 1.28 Schijve, Jaap (2001). *Fatigue of Structures and Materials*. Springer. p. 90. [ISBN 978-0792370147](#).
- 1.29 Peterson, Rudolf Earl (1953). *Stress Concentration Design Factors*. John Wiley & Sons. [ISBN 978-0471683766](#).
- 1.30 Dorn, J. E., and Meriam, J. L., “Properties and Heat Treatment of Magnesium Alloys, Part II, Notch Sensitivity of Magnesium Alloys”, OSRD No. 1819, Report M-104, pp 68 (September 1943).
- 1.31 Dorn, J. E., and others, “Properties and Heat Treatment of Magnesium Alloys, Part V, Section I, The Sensitivity of Magnesium Alloy Sheet to Drilled, Reamed, and Punched Holes. Part V, Section II, The Notch Sensitivity of Magnesium Alloy Extrusions and the Influence of Various Factors”, OSRD No. 3043 (NRC Research Project NRC-21), Final Report M-177, pp 202 (December 1943).
- 1.32 Doan, J. P., and McDonald, J. C., “The Notch Sensitivity in Static and Impact Loading of Some Magnesium-Base and Aluminum-Base Alloys”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 46, pp 1097-1118 (1946).
- 1.33 Moore, A. A., and McDonald, J. C., “Tensile and Creep Strengths of Some Magnesium- Base Alloys at Elevated Temperatures”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 46, pp 970-989 (1946).
- 1.34 McDonald, J. C., “Tensile, Creep and Fatigue Properties of Some Magnesium-Base Alloys”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 48, pp 737-754 (1948).
- 1.35 Wyman, L. L., “High-Temperature Properties of Light Alloys (NA-137). Part II, Magnesium”, U.S. Office of Scientific Research and Development Report No. 4150, M-292, pp 101 (1944).
- 1.36 Craighead, C. M., Grube, K. P., Eastwood, L. W., and Lorig, C. H., “The Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Magnesium Alloy”, Rand Corporation Report R-146, pp 210 (October 1949).
- 1.37 Wyman, L. L., “High-Temperature Properties of Light Alloys (NA-137). Part II, Magnesium”, U.S. Office of Scientific Research and Development Report No. 4150, M-292, pp 101 (1944).
- 1.38 Jonsson, S. *Mechanical Properties of Metals and Dislocation Theory from an Engineer’s Perspective*. s.l. : Royal institute of Technology, Material Science and Engineering, 2008.

- 1.39 Clapper, R. W., "Isochronous Stress-Strain Curves for Some Magnesium Alloys Showing the Effects of Varying Exposure Time on Their Creep Resistance", American Society for Testing and Materials, Proceedings 58, pp 812-825 (1958).
- 1.40 Found, G. H., "The Notch Sensitivity in Fatigue Loading of Some Magnesium-Base and Aluminum-Base Alloys", American Society for Testing and Materials, Proceedings 46, pp 715-740 (1946).
- 1.41 Schuette, E. H., "Fatigue Properties of Magnesium Alloy Forgings", Wright-Patterson Air Force Base Technical Report No. 60-854, pp 112 (December 1960) (MCIC 43549).
- 1.42. Blatherwick, A. A., and Lazan, B. J., "Fatigue Properties of Extruded Magnesium Alloy ZK60A Under Various Combinations of Alternating and Mean Axial Stresses", WADC Tech Report 53-181, pp 27 (August 1953) (MCIC 108173).
- 1.43 Klein F., "Zukünftige potenziale von Magnesiumwerkstoffen in der automobileindustrie" in 15th Magnesium Automotive and User Seminar, Germany, 2007, pp 1-10.
- 1.44 Song L., Atrens A., "Corrosion mechanisms of magnesium alloys" Adv. Eng. Mater. 1 (1999) pp 11-33.
- 1.45 Davis J. R., "Corrosion: Understanding the Basics" ASM international, 4th Edition, 2008.
- 1.46 Witte F., "The history of biodegradable magnesium implants: A review", Acta Biomaterialia, 6 (2010) pp 1680-1692.
- 1.47 Lambotte A, L'utilisation du magnesium comme materiel perdu dans l'osteosynthese, Bull. Mem. Soc. Nat. Cir. 28 (1932) pp 1325-1334.
- 1.48 Wong H. Man, Yeung K. W. K., Lam K. O., Tam V., Chu P. K., Luk K. D. K., Cheung K. M. C., "A biodegradable polymer-based coatings to control the performance of magnesium alloy orthopaedic implants" Biomaterials, 31 (2010) pp 2084-2096
- 1.49. Carcea, I. Aliaje neferoase de turnătorie. Editura Performantica. Iasi. 2009;
- 1.50. <http://www.doitpoms.ac.uk>
- 1.51 <http://www.astm.org/Standards/B296.htm>
- 1.53 <http://standards.sae.org/ams4375/>
- 1.54 <http://standards.sae.org/ams4376/>
- 1.55 <http://standards.sae.org/ams4377/>
- 1.56 <http://www.astm.org/Standards/B107.htm>
- 1.57 <http://www.astm.org/Standards/B91.htm>
- 1.58 <http://standards.sae.org/ams4350/>
- 1.59 <http://standards.sae.org/ams4352/>
- 1.60 <http://standards.sae.org/ams4362/>
- 1.61 <http://standards.sae.org/ams4455/>
- 1.62 <http://standards.sae.org/ams4483/>
- 1.63 <http://standards.sae.org/ams4437/>
- 1.64 <http://standards.sae.org/ams4452/>
- 1.65 <http://standards.sae.org/ams4446/>
- 1.66 <http://standards.sae.org/ams4434/>
- 1.67 <http://standards.sae.org/ams4484/>
- 1.68 <http://standards.sae.org/ams4453/>
- 1.69 <http://standards.sae.org/ams4442/>
- 1.70 <http://standards.sae.org/ams4418/>
- 1.71 <http://standards.sae.org/ams4439/>

- 1.72 Schuette, E. H., "Hyperbolic Column Formulas for Magnesium Alloy Extrusions", Journal of the Aeronautical Sciences, 15, pp 523-529 (1948).
- 1.73 Schuette, E. H., "Column Curves for Magnesium Alloy Sheet", Journal of the Aeronautical Sciences, 16, pp 301-305 (1949).
- 1.74 "Index of Aircraft Structures Research Reports," U.S. National Advisory Committee for Aeronautics, Index No. 7E29, 40 pp (June 1947).
- 1.75 Gerard, and Becker, H., "Handbook of Structural Stability," National Advisory
- 1.76 Case and Chilver "Strength of Materials and Structures (1999).
- 1.77 https://en.wikipedia.org/wiki/Torsion_%28mechanics%29#cite_note-1
- 1.78 https://books.google.ro/books?id=wLFPCwAAQBAJ&pg=PA605&lpg=PA605&dq=WW-T825&source=bl&ots=PzSSeCrG2B&sig=pEEGketRTTlcMU4PDXf6ohxBCOc&hl=ro&sa=X&ved=0ahUKEwiLvKe_dbLAhWCK5oKHUIQBsgQ6AEILzAC#v=onepage&q=WW-T-825&f=false
- 1.79 https://books.google.ro/books?id=PyYBCAAAQBAJ&pg=PA301&lpg=PA301&dq=WW-T-825&source=bl&ots=oIO-a5h_M&sig=LIZj4ZTiRZ_yiLp18409sAp0MLA&hl=ro&sa=X&ved=0ahUKEwiLvKe_dbLAhWCK5oKHUIQBsgQ6AEINDAD#v=onepage&q=WW-T-825&f=false
- 1.80 Blawert C., Fechner D., Hoeche D., Heitmann V., Dietzel W. Kainer K. U., Zivanovic P., Scharf C., Ditze A., Groebner J., Schmid-Fetzer R., "Magnesium secondary alloys: 157 Alloy design for magnesium alloys with improved tolerance against impurities" Corros. Sci. 52 (2010) pp. 2452-2468.
- 1.81 Beldjoudi T., Fiaud C., Robbiola L., "Influence of homogenization and artificial aging heat treatments on corrosion behaviour of Mg-Al alloys" Corrosion 49 (1993) pp. 733- 745.
- 1.82 Coy A.E. , Viejo F., Garcia-Garcia F.J., Liu Z., Skeldon P., Thompson G.E. "Effect of eximer laser surface melting on the microstructure and corrosion performance of die cast AZ91D magnesium alloy" Corros. Sci. 52 (2010) pp. 387-397.
- 1.83 Guan Y.C., Zhou W., Li Z.L., Zheng H.Y., " Study on the solidification microstructure in AZ91D Mg alloy after laser surface melting" Appl. Surf. Sci. 255 (2009) pp. 8235-8238.
- 1.84 Nwaogu U.C., Blawert C., Scharnagl N., Dietzel W., Kainer K.U. "Influence or inorganic acid pickling on the corrosion resistance of magnesium AZ31 sheet" Corros. Sci. 51 (2009) pp. 2544-2556.
- 1.85 Friedrich C. "Reliable light weight fastening of magnesium components in automotive applications" Light Weight Magnesium Alloy Technology 2001-2005, 2006, pp. 191- 196.
- 1.86 Gray J. E., "Protective coatings on magnesium and its alloys – A critical review", J. Alloys Comp. 336 (2002) pp 88-113.
- 1.87 Winston A. W., Reid J. B., Gross W. H., "Surface preparation and magnesium painting of magnesium alloys" Ind. Eng. Chem. 27 (1935) pp 1333-1337.
- 1.88 Berglundh T., Abrahamsson I., Albouy J. P., " Bone healing at implants with a fluoride-modified surface: an experimental study in dogs" Clin. Oral Impl. Res. 18 (2007) pp. 147-152.
- 1.89 Lu X., Zuo Y., Zhao X., Tang Y., Feng X., " The study of a Mg-rich epoxy primer for protection of AZ91D magnesium alloy" Corros. Sci. Article in press.
- 1.90 Wang Z., Wan L., Xu Z., "Surface engineerings of polyacrylonitrile-based asymmetric membranes towards biomedical applications: An overview" J. Membr. Sci. 304 (2007) pp. 8-23.
- 1.91 <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/>
- 3.1. JAKAB C. BOGDAN
"Tehnologia Materialelor" - Indrumar Pentru Lucrari De Laborator, Universitatea "Transilvania",

Brasov, 1996

- 3.2. TUDOR NEAMTU, GHEORGHE N. RADU, VASILE CIOFOAIA
"Rezistenta Materialelor" - Lucrari De Laborator, Universitatea "Trasilvania", Brasov, 1988
- 3.3. IRS STANDARD ROMAN SR ISO 17025
"Cerinte Generale Pentru Competenta Laboratoarelor De Incercari Si Etalonari"
- 3.4. Banabic D., Dörr I.R. „Deformabilitatea tablelor metalice subtiri. Metoda curbilor limită de deformare“. În: Editura O.I.D.I.C.M., Bucuresti, 1992.
- 3.5. www.gom.com
- 3.6. Hill R., “On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 1, issue 1, 1952, p. 19–30.
- 3.7. Swift H.W., “Plastic instability under plane stress”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 1, issue 1, 1952, p. 1–18.
- 3.8. Marciniak Z., Kuczynski K., “Limit strains in the processes of stretch forming sheet metal”, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 9, issue 9, 1967, p. 609–612.
- 3.9. Hutchinson R.W., Neal K.W., “Sheet necking III. Strain-rate effects”, Mechanics of Sheet Metal Forming, Plenum Press New York – London, 1978, p. 269–285.
- 3.10. Stören S., Rice J.R., Localized necking in thin sheets. J. Mech. Phys. Solids 123, 1975, p. 421-425.
- 3.11 Eastman, E. J., McDonald, J. C., and Moore, A. A., “The Relation of Stress to Strain in Magnesium Alloys”, Journal of the Aeronautical Sciences, pp 273-280 (July 1945).
- 3.12 Moore, A. A., “The Effect of Speed of Testing of Magnesium-Base Alloys”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 48, pp 1133-1138 (1948).
- 3.13 Fenn, R. W., Jr., and Gusack, J. C., “Effect of Strain Rate and Temperature on the Strength of Magnesium Alloys”, American Society of Testing and Materials, Proceedings 58, pp 685-696 (1958).
- 3.14 Fenn, R. W., Jr., and Lockwood, L. F., “Low-Temperature, Properties of Welded Magnesium Alloys”, The Welding Journal Research Supplement (August 1960).
- 3.15 Moore, A. A., and McDonald, J. C., “Tensile and Creep Strengths of Some Magnesium- Base Alloys at Elevated Temperatures”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 46, pp 970-989 (1946).
- 3.16 McDonald, J. C., “Tensile, Creep and Fatigue Properties of Some Magnesium-Base Alloys”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 48, pp 737-754 (1948).
- 3.17 Wyman, L. L., “High-Temperature Properties of Light Alloys (NA-137). Part II, Magnesium”, U.S. Office of Scientific Research and Development Report No. 4150, M-292, pp 101 (1944).
- 3.18 Craighead, C. M., Grube, K. P., Eastwood, L. W., and Lorig, C. H., “The Effects of Temperature on the Mechanical Properties of Magnesium Alloy”, Rand Corporation Report R-146, pp 210

(October 1949).

- 3.19 Clapper, R. W., “Isochronous Stress-Strain Curves for Some Magnesium Alloys Showing the Effects of Varying Exposure Time on Their Creep Resistance”, American Society for Testing and Materials, Proceedings 58, pp 812-825 (1958).
- 3.20 Gerard, and Becker, H., “Handbook of Structural Stability,” National Advisory
- 3.21 Case and Chilver "Strength of Materials and Structures (1999).
- 3.22 <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/>
- 3.23 Kramer D. A., “Magnesium Metal” Annual report of the “United States Geographic Survey (USGS)” 2010.
- 3.24 Mordike B.L., Ebert T., “Magnesium: Properties - applications -potential” Mater. Sci. Eng. A302 (2001) pp 37-45.
- 3.25 United States Automotive Materials Partnership (USAMP) “Magnesium Vision 2020: A north American Automotive vision for magnesium” 2006
- 3.26 Luo A. A. “Wrought magnesium alloys and manufacturing processes for automotive applications” in Lightweight Magnesium Technology, USA, 2006, pp 155-165
- 3.27 <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/>
- 3.28 Czichos, Horst (2006). *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. Berlin: Springer. pp. 303–304. ISBN 978-3-540-20785-6.
- 3.29 Handbook of Metallurgical Process Design, By George E. Totten, Kiyoshi Funatani, Lin Xie, CRC Press
- 3.30 Ciupitu I.,- Deformări plastice. Tehnologii și echipamente, Reprografia universității din Craiova, 2000
- 3.31 <http://www.tsocm.pub.ro/LIM/incercari.htm>
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tensile_specimen-round_and_flat.jpg
http://www.intechopen.com/source/html/44612/media/image38_w.jpg
http://www.intechopen.com/source/html/44612/media/image39_w.jpg
http://www.intechopen.com/source/html/44612/media/image40_w.jpg
<https://www.epsilontech.com/products/axial-extensometer-model-3542/>
<http://scanare3d.com/?product=aramis-testarea-materialelor>
- 3.32. Hora P., Tong L., Reissner J., “A prediction method for ductile sheet metal failure in FE-simulation”, Proceedings of the Numisheet’96 Conference (Dearborn/Michigan), 1996, p. 252–256.
- 3.33. Banabic D., Aretz H., Paraianu L. and Jurco P., “Application of various FLD modelling approaches”, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, no. 13, 2005, p. 1–11.
- 3.34. Butuc M.C., Barata da Rocha A., Gracio J. J. and Ferreira Duarte J., “A more general model for forming limit diagrams prediction”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 125–126, issue 9, 2002, p. 213–218.

- 3.35. Jurco P., Banabic D., „A user-friendly programme for calculating Forming Limit Diagrams“. In: Banabic D (ed) Proc. of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming, Cluj Napoca, 2005, p. 423-427.
- 3.36. Banabic D., Aretz H., Comşa D.S., Părăianu L., „An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets“, International Journal of Plasticity, 21, 3, 2005, p.493-512.
- 3.37. TestExpert Manual.
- 3.38. Banabic D., „Modelarea proceselor de deformare plastică a tablelor“ Transilvania Press, Cluj-Napoca, 1995.
- 3.39 <http://www.epsilontech.com/products/axial-extensometer-model-3542/>
- 4.1 The library of Manufacturing.com
- 4.2 Jim Kirkpatrick, Metalworking FAQ/Compendium
- 4.3 Sheet Metal Desing Handbook - <http://www.Qualitytool.com/resources>
- 4.5 Amada America, The ABC of bending tools, -
<http://www.amada.com/products/tooling/techinfo/rg/rgABCtoc.htm>
- 4.6 Lehi Sheet Metal - http://www.lehisheetmetal.com/1_e_bend.htm
- 4.7 Ohio State University, Bending - <http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/BendingOverview/index.html>
- 4.8 Engineers Edge, Design and Engineering Data, Sheet Metal,
http://www.engineersedge.com/Design_Data.shtml
- 4.9 ASMA Chronicle, Advanced Sheet Metal Applications
- 4.10 <http://www.asmachronicle.com/>
- 4.11 Lange K (1985) - Handbook of metal forming. McGraw-Hill, New York
- 4.12 Weinmann KJ, Shippell RJ (1978) - Effect of tool and workpiece geometries upon bending forces and springback in 90 degree V-die bending of HSLA steel plate. 6th North American Metal Working Research Conference Proceeding, May 1978, pp 220–227
- 4.13 Ciupitu I.,- Deformări plastice. Tehnologii și echipamente, Reprografia universității din Craiova, 2000
- 4.15 <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming>
- 4.16 <https://color-metal.ro/ro/%C3%AEndoirea-tablelor-descrierea-procedurii>
- 4.17 <http://profile-aluminiu.com/%C3%AEndoirea-tablelor-descrierea-procedurii>
- 4.18 <http://www.scriub.com/tehnica-mecanica/TRATAMENTE-TERMICE-ALIAJE-DE-A65511.php>
- 4.19 <https://vdocuments.site/magneziu-aliaje.html>
- 4.20 <http://docplayer.gr/63541972-8-1-generalitati-definitie-intoirea-este-operatia-tehnologica-de-modificare-a-formei-si-dimensiunilor-semifabricatelor-fara.html>
- 4.21 <https://vdocuments.site/incercarea-la-tractione-a-metalelor-569f8e1da6f96.html>
- 4.22 <https://ro.wikipedia.org/wiki/magneziu>
- 4.23 <https://vdocuments.site/magneziu-aliaje.html>