



Universitatea
Transilvania
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea: Inginerie Mecanică

Ing. Andrei Victor PETRICI

Analiza parametrică a comportării sistemelor inovative de remorcare a autovehiculelor

Parametric analysis of the behaviour of innovative vehicle towing systems

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător științific

Prof.univ.dr.ing. Nicolae Gheorghe RADU

BRAȘOV, 2020

D-lui

(D-nei)

.....

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Brașov

Nr. din

PREȘEDINTE:

Prof.univ.dr.ing. ROȘCA Ioan Călin

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof.univ.dr.ing. Gheorghe N. RADU

REFERENȚI:

Prof.univ.dr.ing. Anton HADĂR

Prof.univ.dr.ing. Adrian Marius PASCU

Prof.univ.dr.ing.mat. Sorin VLASE

Data și ora susținerii publice a tezei de doctorat: 11.12.2020, ora 10:00, în mediul on-line.

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa petrici.andrei.victor@unitbv.ro.

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.

CUPRINS

| | Pg. Teză | Pg. Rezumat |
|---|-------------|----------------|
| Introducere | 11 | 11 |
| Notații și Abrevieri | 14 | 14 |
| Figuri și Tabele | 17 | 17 |
| | | |
| CAP I – Materiale și sisteme inovative | 22 | 22 |
| Scurt istoric al materialelor compozite | 22 | 22 |
| 1.1 Definiția, utilizarea și alcătuirea materialelor compozite | 22 | 22 |
| 1.2 Proprietățile materialelor compozite | 25 | 24 |
| 1.2.1 Clasificare după natura matricei | 26 | 25 |
| 1.2.2 Clasificare după natura armăturii | 29 | - |
| 1.2.3 Clasificare după numărul fazelor continue (matricelor) | 32 | - |
| 1.2.4 Clasificare după numărul fazelor discontinue (armăturilor) | 33 | - |
| 1.2.5 Clasificare după topologia fazei discontinue a armăturii | 33 | - |
| 1.2.6 Clasificare după procedeul de obținere a constituenților și pieselor | 33 | - |
| 1.2.7 Clasificare după modul de conlucrare între constituenți | 35 | - |
| 1.2.8 Clasificare după constituenți | 36 | 27 |
| 1.3 Utilizarea materialelor compozite | 36 | 28 |
| 1.3.1 Materiale compozite utilizate în industria auto | 38 | 29 |
| 1.3.2 Materiale compozite utilizate în domeniul construcțiilor civile | 40 | 31 |
| 1.3.3 Materiale compozite utilizate în industria aeronautică | 43 | 32 |
| 1.3.4 Materiale compozite utilizate în construcția aerospațială | 45 | 33 |
| 1.4 Concluzii privind materialele compozite | 46 | 34 |
| Scurt istoric al aluminiului și aliajelor pe bază de aluminiu | 47 | 34 |
| 1.5 Evoluția aluminiului și aliajelor de aluminiu | 48 | - |
| 1.6 Proprietățile aluminiului și aliajelor de aluminiu | 49 | 35 |
| 1.6.1 Aliaje aluminiu-siliciu | 50 | 36 |
| 1.6.2 Aliaje aluminiu-cupru | 52 | 38 |
| 1.6.3 Aliaje aluminiu-magneziu | 53 | 38 |
| 1.7 Utilizarea aluminiului și aliajelor de aluminiu | 54 | 39 |
| 1.7.1 Aluminiu utilizat în industria transporturilor | 55 | 40 |
| 1.7.2 Aluminiu utilizat în industria construcțiilor civile | 60 | 44 |

| | | |
|---|------------|-----------|
| 1.7.3 Aluminii utilizat în fabricarea ambalajelor | 61 | 45 |
| 1.8 Concluzii privind aliajele de aluminiu | 62 | 46 |
| | | |
| CAP II – Stadiul actual al cercetărilor în domeniul sistemelor de remorcare | 64 | 47 |
| 2.1 Evoluția sistemului de tractare din cazul autovehicul – remorcă | 64 | 47 |
| 2.2 Structura sistemelor de remorcare | 67 | 50 |
| 2.3 Varietăți de sisteme de remorcare utilizate la autovehicule | 70 | 51 |
| 2.3.1 Cârlig de remorcare cu filet în partea inferioară | 70 | 52 |
| 2.3.2 Cârlig de remorcare simplu | 71 | 52 |
| 2.3.3 Cârlig de remorcare detașabil | 74 | 54 |
| 2.3.4 Cârlig de remorcare retractabil | 75 | 55 |
| 2.4 Metode de validare a sistemelor de remorcare | 78 | - |
| 2.5 Documente normative de reglementare a materialelor și sistemelor de remorcare | 81 | - |
| 2.6 Scopul și obiectivele tezei de doctorat | 83 | 56 |
| | | |
| CAP III – Metode de analiză analitică a stării de tensiune și deformație privind sistemul de remorcare | 85 | 58 |
| 3.1 Prezentarea sistemului de remorcare luat în studiu | 85 | 58 |
| 3.2 Starea de tensiuni și deformații | 87 | 60 |
| 3.2.1 Condiții limită | 88 | 61 |
| 3.2.2 Starea de tensiuni | 90 | 63 |
| 3.2.3 Starea de deformații | 101 | 69 |
| 3.3 Concluzii | 102 | 69 |
| | | |
| CAP IV – Metoda elementului finit privind stările de tensiuni și de deformații ale sistemului de remorcare | 104 | 71 |
| 4.1 Modelarea numerică a sistemului de remorcare | 105 | 71 |
| 4.2 Discretizarea modelului și analiza cu metoda elementului finit | 106 | 71 |
| 4.3 Extragerea rezultatelor țintă din soft | 108 | 72 |
| 4.3.1 Determinarea tensiunilor din sistem | 109 | 72 |
| 4.3.2 Determinarea deplasărilor din sistem | 110 | 74 |
| 4.4 Concluzii | 113 | 76 |

| | | |
|---|------------|-----------|
| CAP V – Fotoelasticimetria. Metoda optică de determinare a tensiunilor din cârligul de remorcare | 114 | 77 |
| 5.1 Introducere în fotoelasticimetrie | 116 | 77 |
| 5.2 Modele de calcul pentru solicitări simple | 118 | - |
| 5.2.1 Calculul la tracțiune | 118 | - |
| 5.2.2 Calculul la compresiune | 119 | - |
| 5.2.3 Calculul la încovoiere | 119 | - |
| 5.3 Determinarea experimentală a tensiunilor | 120 | 79 |
| 5.3.1 Calculul solicitării la compresiune din disc. Etalonarea materialului | 121 | 79 |
| 5.3.2 Calculul solicitării la încovoiere a cârligului de remorcare | 122 | 80 |
| 5.4 Compararea rezultatelor | 125 | 82 |
| 5.5 Concluzii | 127 | 83 |
| | | |
| CAP VI – Determinări experimentale ale stării de tensiune și deformații pentru epruvetele din care sunt realizate cârligele | 129 | 84 |
| 6.1 Aparatura și dispozitivele de testare | 129 | 84 |
| 6.2 Materiale utilizate pentru epruvete, tehnologii de obținere | 131 | 85 |
| 6.2.1 Materiale compozite utilizate; realizarea epruvetelor | 131 | - |
| 6.2.2 Aluminii și aliaje pe bază de aluminiu utilizate; realizarea epruvetelor | 133 | - |
| 6.2.3 Oțel utilizat; realizarea epruvetelor | 134 | - |
| 6.3 Masa specifică a materialelor luate în studiu | 135 | 85 |
| 6.4 Compararea rezultatelor epruvetelor solicitate la tracțiune | 135 | 86 |
| 6.5 Compararea rezultatelor epruvetelor solicitate la încovoiere | 140 | 88 |
| 6.6 Concluzii | 143 | 89 |
| | | |
| CAP VII – Cerințe tehnologice de realizare a cârligelor de remorcare din oțel, materiale compozite, aluminiu și aliaje de aluminiu | 146 | 90 |
| 7.1 Itinerariul tehnologic al cârligelor de remorcare din oțel | 146 | 90 |
| 7.2 Cerințe specifice tehnologiei de execuție | 148 | 90 |
| 7.2.1 Cerințe tehnologice impuse de materialele compozite | 148 | 90 |
| 7.2.2 Cerințe tehnologice impuse de aluminiu și aliajele de aluminiu | 149 | 91 |
| 7.3 Concluzii | 152 | 91 |

| | | |
|---|------------|------------|
| CAP VIII – Cercetări experimentale ale sistemului de remorcare | 153 | 92 |
| 8.1 Detalierea procesului experimental | 153 | 92 |
| 8.2 Determinări experimentale asupra sistemului de remorcare | 154 | 93 |
| 8.3 Determinări experimentale asupra cârligelor de remorcare | 156 | 94 |
| 8.4 Comparații în determinările experimentale | 167 | 97 |
| 8.5 Soluții de optimizare a cârligului de remorcare | 170 | 98 |
| 8.6 Concluzii | 172 | 99 |
| | | |
| CAP IX – Rezultate finale. Comparații – Concluzii finale – Contribuții proprie – Diseminarea rezultatelor – Direcții viitoare de cercetare | 174 | 101 |
| 9.1 Rezultate finale. Comparații | 174 | 101 |
| 9.2 Concluzii finale | 176 | 103 |
| 9.3 Contribuții originale | 180 | 107 |
| 9.3.1 Contribuții originale teoretice | 180 | 107 |
| 9.3.2 Contribuții originale experimentale | 181 | 108 |
| 9.4 Diseminarea rezultatelor | 182 | 109 |
| 9.5 Direcții viitoare de cercetare | 183 | 110 |
| | | |
| BIBLIOGRAFIE | 185 | 112 |
| | | |
| ANEXE | 191 | - |
| | | |
| REZUMAT | 194 | 118 |

CONTENT

| | Pg. Teză | Pg. Rezumat |
|---|-------------|----------------|
| Intro | 11 | 11 |
| Notations and Abbreviations | 14 | 14 |
| Figures and Tables | 17 | 17 |
| | | |
| CHAP I – Innovative materials and systems | 22 | 22 |
| Short history of composite materials | 22 | 22 |
| 1.1 Definition, use and structure of composite material | 22 | 22 |
| 1.2 Properties of composite materials | 25 | 24 |
| 1.2.1 Classification by nature of the matrix | 26 | 25 |
| 1.2.2 Classification by nature of the reinforcement | 29 | - |
| 1.2.3 Classification by number of continuous phases (matrix) | 32 | - |
| 1.2.4 Classification by number of discontinuous phases (reinforcement) | 33 | - |
| 1.2.5 Classification by topology of the discontinuous phase of reinforcement | 33 | - |
| 1.2.6 Classification by process of obtaining the constituents and parts | 33 | - |
| 1.2.7 Classification by mode of cooperating between constituents ... | 35 | - |
| 1.2.8 Classification by constituents | 36 | 27 |
| 1.3 Usage of composites | 36 | 28 |
| 1.3.1 Composites used in automotive industry | 38 | 29 |
| 1.3.2 Composites used in civil engineering field | 40 | 31 |
| 1.3.3 Composites used in aeronautical industry | 43 | 32 |
| 1.3.4 Composites used in aerospace | 45 | 33 |
| 1.4 Conclusions on composite materials | 46 | 34 |
| Short history of aluminum and aluminum alloys | 47 | 34 |
| 1.5 Evolution of aluminum and aluminum alloys | 48 | - |
| 1.6 Properties of aluminum and aluminum alloys | 49 | 35 |
| 1.6.1 Aluminum-Silicon alloys | 50 | 36 |
| 1.6.2 Aluminum-Copper alloys | 52 | 38 |
| 1.6.3 Aluminum-Magnesium alloys | 53 | 38 |
| 1.7 Usage of aluminum and aluminum alloys | 54 | 39 |
| 1.7.1 Aluminum used in transport industry | 55 | 40 |

| | | |
|---|------------|-----------|
| 1.7.2 Aluminum used in civil engineering field | 60 | 44 |
| 1.7.3 Aluminum used in manufacture of packaging | 61 | 45 |
| 1.8 Conclusions on aluminum alloys | 62 | 46 |
| | | |
| CHAP II – Current state of research in towing systems | 64 | 47 |
| | | |
| 2.1 Evolution of towing system in case of motor vehicle – trailer | 64 | 47 |
| 2.2 Structure of towing systems | 67 | 50 |
| 2.3 Varieties of towing systems used in mtor vehicles | 70 | 51 |
| 2.3.1 Towbar with thread at the bottom | 70 | 52 |
| 2.3.2 Simple towbar | 71 | 52 |
| 2.3.3 Detachable towbar | 74 | 54 |
| 2.3.4 Retractable towbar | 75 | 55 |
| 2.4 Methods of validation of towing systems | 78 | - |
| 2.5 Normative documents regulating towing materials and systems | 81 | - |
| 2.6 Purpose and objectives of the doctoral thesis | 83 | 56 |
| | | |
| CHAP III – Methods of analytical analysis of the state of stress and strain on the towing system | 85 | 58 |
| | | |
| 3.1 Description of the studied towing system | 85 | 58 |
| 3.2 State of stress and strain | 87 | 60 |
| 3.2.1 Limit conditions | 88 | 61 |
| 3.2.2 State of stress | 90 | 63 |
| 3.2.3 State of strain | 101 | 69 |
| 3.3 Conclusions | 102 | 69 |
| | | |
| CHAP IV – Finite element method for stress and strain of the towing system | 104 | 71 |
| | | |
| 4.1 Numerical modeling of the towing system | 105 | 71 |
| 4.2 Model discretization and analysis with finite element method | 106 | 71 |
| 4.3 Extracting the target results from the software | 108 | 72 |
| 4.3.1 Determination of stress from the system | 109 | 72 |
| 4.3.2 Determination of displacement from the system | 110 | 74 |
| 4.4 Conclusions | 113 | 76 |

| | | |
|--|------------|-----------|
| CHAP V – Fotoelasticimetry. Optical method of determining the stress in the towbar | 114 | 77 |
| 5.1 Introduction in fotoelasticimetry | 116 | 77 |
| 5.2 Calculation models for simple loads | 118 | - |
| 5.2.1 Traction calculation | 118 | - |
| 5.2.2 Compression calculation | 119 | - |
| 5.2.3 Bending calculation | 119 | - |
| 5.3 Experimental determination of stress | 120 | 79 |
| 5.3.1 Calculation of compression stress from disc. Calibration of Material | 121 | 79 |
| 5.3.2 Calculation of bending stress from the towbar | 122 | 80 |
| 5.4 Comparison between results | 125 | 82 |
| 5.5 Conclusions | 127 | 83 |
| | | |
| CHAP VI – Experimental determinations of stress and strain for the specimens from which the towbars are made | 129 | 84 |
| 6.1 Test equipment and devices | 129 | 84 |
| 6.2 Materials used for test specimens, production technologies | 131 | 85 |
| 6.2.1 Composites used; manufacturing of specimens | 131 | - |
| 6.2.2 Aluminum and aluminum alloys used; manufacturing of specimens | 133 | - |
| 6.2.3 Steel used; manufacturing of specimens | 134 | - |
| 6.3 Specific mass of the studied materials | 135 | 85 |
| 6.4 Comparison of test results on the traction specimens | 135 | 86 |
| 6.5 Comparison of test results on the bending specimens | 140 | 88 |
| 6.6 Conclusions | 143 | 89 |
| | | |
| CHAP VII – Technological requirements for the construction of towbars made of steel, composites, aluminum and aluminum alloys | 146 | 90 |
| 7.1 Technological itinerary of steel towbar | 146 | 90 |
| 7.2 Specific requirements for manufacturing technology | 148 | 90 |
| 7.2.1 Technological requirements imposed by composites | 148 | 90 |
| 7.2.2 Technological requirements imposed by aluminum | 149 | 91 |
| 7.3 Conclusions | 152 | 91 |

| | | |
|--|------------|------------|
| CHAP VIII – Experimental research on the towing system | 153 | 92 |
| 8.1 Detailing the experimental process | 153 | 92 |
| 8.2 Experimental determinations on the towing system | 154 | 93 |
| 8.3 Experimental determinations on the towbars | 156 | 94 |
| 8.4 Comparison in experimental determinations | 167 | 97 |
| 8.5 Towbar optimization solutions | 170 | 98 |
| 8.6 Conclusions | 172 | 99 |
| | | |
| CHAP IX – Final results. Comparisons – Final conclusions – Original contributions – Dissemination of results – Future directions of research | 174 | 101 |
| 9.1 Final results. Comparisons | 174 | 101 |
| 9.2 Final conclusions | 176 | 103 |
| 9.3 Original contributions | 180 | 107 |
| 9.3.1 Original theoretical contributions | 180 | 107 |
| 9.3.2 Original experimental contributions | 181 | 108 |
| 9.4 Dissemination of results | 182 | 109 |
| 9.5 Future directions of research | 183 | 110 |
| | | |
| BIBLIOGRAPHY | 185 | 112 |
| | | |
| ANNEXES | 191 | - |
| | | |
| ABSTRACT | 194 | 118 |

INTRODUCERE

Prezenta lucrare de doctorat are scopul principal de a reduce din masa totală a autovehiculelor, în vederea obținerii unui consum de energie și de noxe diminuate, dar și de a spori performanțele dezvoltate ale acestuia. Este cunoscut faptul că masa autovehiculului are influență directă asupra consumului de carburant, iar acesta din urmă are influență asupra noxelor produse de către motorul termic. De asemenea, masa autovehiculului influențează performanțele generale ale acestuia, prin urmare, cu cât masa este mai scăzută, cu atât performanțele cresc.

În ultimii ani, industria automobilelor a dezvoltat numeroase optimizări asupra autovehiculelor, având ca obiective ușurarea structurilor de rezistență, elementelor de caroserie, componentelor de motor și transmisie, ornamentelor interioare și exterioare, etc. Toate aceste obiective au rolul de a impacta în sens pozitiv capacitățile autovehiculului.

Pornind de la problemele actuale de poluare a mediului înconjurător, dar și cu avantajul îmbunătățirii performanțelor autovehiculului, în teză se propune un studiu privind înlocuirea unor elemente din oțel ale sistemului de remorcare utilizat pentru echiparea automobilului Audi Q5, în speță a cârligului de remorcare, cu modele realizate din materiale alternative cu masa specifică diminuată în comparație de cea a oțelului, și anume materiale compozite pe bază de fibră de carbon și aliaje pe bază de aluminiu.

Lucrarea este structurată pe nouă capitole, iar în elaborarea acesteia se regăsește o bibliografie selectă în domeniile de rezistența materialelor, materiale compozite și materiale neferoase, în special aluminiu.

În capitolul I se regăsește o amplă prezentare a materialelor compozite și a materialelor neferoase, clasificarea, proprietățile și domeniile de utilizare, punându-se accent pe materialele utilizate în activitățile cercetării experimentale.

În capitolul al II-lea se prezintă stadiul actual al cercetărilor în domeniul sistemelor de remorcare, rolul și clasificarea cârligelor de remorcare, standarde și metode de validare. Tot aici sunt prezentate scopul și obiectivele lucrării.

În capitolul al III-lea este prezentat sistemul de remorcare studiat, dar și determinarea prin metode clasice de calcul a tensiunilor și deformațiilor apărute în sistem.

În capitolul al IV-lea este parcursă o altă modalitate de determinare a stării de tensiuni și deformații din sistemul de remorcare, o metodă digitalizată pe baza teoriei de element finit.

Capitolul al V-lea este cel în care se realizează transferul de la noțiunile pur teoretice către cercetările experimentale. Aici se prezintă metoda de determinare a tensiunilor din cârligul de remorcare pe baza științei fotoelasticimetrice.

Capitolul al VI-lea debutează cu prezentarea aparatului de testare, procedee de obținere a epruvetelor din diverse tipuri de materiale, după care sunt prezentate comparativ rezultatele obținute prin încercarea epruvetelor confecționate.

În capitolul VII se regăsește argumentarea selectării celor mai avantajoase materiale pentru confecționarea cârligelor de remorcare alternative, necesare desfășurării studiului. De asemenea, în acest capitol se prezintă tehnologiile de fabricație și procesele adaptate fiecărui tip de material utilizat.

În capitolul VIII se prezintă întreg studiul experimental al sistemului de remorcare utilizând atât materialul inițial (oțelul), cât și materialele alternative pe bază de fibre de carbon și aliaje de aluminiu. Studiul constă în prezentarea procesului de testare, determinări experimentale atât asupra sistemului de remorcare ca și ansamblu, cât și asupra cârligului de remorcare ca și component individual, compararea rezultatelor obținute experimental cu diversele materiale, dar și soluții de optimizare. În finalul capitolului sunt concluziile cu privire la rezultatele obținute în urma determinărilor experimentale.

Ultimul capitol conține o serie de subcapitole, printre care se regăsesc compararea rezultatelor teoretice și experimentale obținute, concluziile finale ale lucrării, contribuțiile originale ale autorului, lista cu lucrările științifice publicate de către autor și nu în ultimul rând propunerile pentru continuarea studiului.

În final se regăsește bibliografia atent selectată în vederea realizării studiului, bibliografie din care nu lipsesc referințele către lucrările științifice ale autorului elaborate pe parcursul activității profesionale.

~ Mulțumiri ~

Îmi exprim toată stima și toată admirația către coordonatorul științific al tezei de doctorat, domnul Prof.Univ.Dr.Ing. Gheorghe N. RADU, care m-a ghidat pe întregul parcurs al elaborării prezentei lucrări de cercetare, alături de care am petrecut mult timp în vederea atingerii scopului și obiectivelor propuse.

Mulțumesc stimaților membri și președinte din comisia de îndrumare, domnilor prof.univ.dr.ing.mat. Sorin VLASE – Director al Departamentului de Inginerie Mecanică, prof.univ.dr.ing. Nicolae ISPAS – Director al Departamentului de Autovehicule și Transporturi, prof.univ.dr.ing Mircea NĂSTĂSOIU – Prodecan al Departamentului de Autovehicule și Transporturi, în calitate de membri și prof.univ.dr.ing Ioan Călin ROȘCA – Decan al Facultății de Inginerie Mecanică, fiind cadre didactice ale Facultății de Inginerie Mecanică din cadrul Universității „Transilvania” din Brașov.

Mulțumesc distinșilor membri din comisia de susținere publică a tezei de doctorat deoarece în vremuri de pandemie au reușit să realizeze aprecieri la adresa lucrării și pentru timpul dedicat participării la susținerea publică a acesteia.

Am toată recunoștința, iar pe această cale țin să îi mulțumesc, persoanei care în calitate de Manager General al companiilor la care mi-am desfășurat profesia, m-a susținut atât moral, cât mai ales financiar în desfășurarea tezei, domnului ing.dipl. Ioan PINTILIE.

Sincere aprecieri și mulțumiri stimatului devenit prieten, ing.dipl. Constantin STOIAN, inițial îndrumător profesional, apoi un ajutor atât moral cât și de specialitate în cercetările experimentale privind tehnologia materialelor pe bază de aluminiu, și nu numai.

Țin să mulțumesc unor persoane care mi-au oferit suport tehnic în activitățile experimentale ale lucrării: prof.univ.dr.ing. Adrian Marius PASCU din cadrul Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, dr.ing. Răzvan-Gabriel DRĂGAN, dr.ing. Dorin ROȘU, ing. Daniel CRAMARIUC.

Nu în ultimul rând, aduc mulțumiri familiei mele pentru tot sprijinul moral și financiar pe care mi l-au acordat în toți acești ani de stagiul doctoral.

NOTAȚII ȘI ABREVIERI

| Mărime | Denumire | Unitate de măsură |
|------------------|--|-------------------|
| a | Accelerația / decelerația | m/s ² |
| a _R | Accelerația / decelerația remorcii | m/s ² |
| a _{ans} | Accelerația / decelerația ansamblului autovehicul – remorcă | m/s ² |
| A _S | Aria secțiunii | mm ² |
| AAI | Aliaj de aluminiu | - |
| b | Lățimea de calcul | mm |
| b _M | Baza mare de calcul a trapezului | mm |
| b _m | Baza mică de calcul a trapezului | mm |
| B _F | Brațul forței F | mm |
| B _{FA} | Brațul forței F, ținând seama de testarea cârligului de remorcă în întregul ansamblu de remorcă | mm |
| B _{FI} | Brațul forței F, ținând seama de testarea cârligului de remorcă individual | mm |
| c | Coeficient de siguranță | - |
| C _V | Câmp de variație | % |
| d | Distanța, deplasarea | m |
| D | Diametrul de calcul | mm |
| D _G | Diametrul găurii | mm |
| D _S | Diametrul secțiunii | mm |
| δ | Deplasarea | mm |
| e | Excentricitatea – distanța dintre axa centrului de greutate și axa neutră ale cârligului de remorcă | mm |
| E | Modulul de elasticitate longitudinal (modulul lui Young) | MPa |
| ε | Deformația specifică (Δl / l ₀) | % |
| F | Forța | N |
| FC | Fibră de carbon | - |
| F _A | Forța de acționare asupra cârligului de remorcă testat în ansamblul de remorcă | N |
| F _I | Forța de acționare asupra cârligului de remorcă testat individual | N |
| g | Grosimea de calcul | mm |
| h | Înălțimea de calcul | mm |
| h ₁ | Înălțimea de calcul | mm |
| h ₂ | Înălțimea de calcul | mm |
| HB | Duritatea Brinell | MPa |
| i _c | Indice de comparație, utilizat pentru determinarea performanței materialelor utilizate în confecționarea cârligelor de remorcă, fiind raportul între forța de acționare asupra cârligelor și masa acestora | N/g |

| | | |
|----------------|---|--------------------|
| J_1 | Distanța dintre raza de curbură interioară și axa neutră ale cârligului de remorcare | mm |
| J_2 | Distanța dintre raza de curbură exterioară și axa neutră ale cârligului de remorcare | mm |
| k | Numărul de izocromate | - |
| l | Lungimea de calcul | mm |
| l_0 | Distanța dintre două repere înainte de deformarea piesei | mm |
| l_U | Distanța dintre două repere (l_0) după deformarea piesei | mm |
| Δl | Deformația ($l_U - l_0$) | mm |
| L_{inf} | Limita inferioară | % |
| L_{sup} | Limita superioară | % |
| m_{ans} | Masa ansamblului autovehicul – remorcă | kg |
| m_{auto} | Masa autoturismului | kg |
| m_R | Masa remorcii | kg |
| M | Momentul încovoietor rezultat | Nm |
| M_i | Momentul încovoietor | Nm |
| M_t | Momentul de torsiune | Nm |
| MEF | Metoda Elementului Finit | - |
| N | Forța axială rezultantă | N |
| r | Raza de curbură a axei neutre a cârligului de remorcare | mm |
| R | Raza de curbură a axei centrului de greutate a cârligului de remorcare | mm |
| R_1 | Raza de curbură interioară a cârligului de remorcare | mm |
| R_2 | Raza de curbură exterioară a cârligului de remorcare | mm |
| ρ | Masa specifică, densitatea | kg/dm ³ |
| s_f | Spațiul de frânare | m |
| s_f | Spațiul de frânare al ansamblului autovehicul – remorcă | m |
| σ_{adm} | Tensiunea admisibilă | MPa |
| σ_{co} | Tensiunea la compresiune | MPa |
| σ_e | Tensiunea limită de elasticitate | MPa |
| σ_{eA} | Tensiunea limită de elasticitate a cârligului de remorcare testat în ansamblul de remorcare | MPa |
| σ_{eI} | Tensiunea limită de elasticitate a cârligului de remorcare testat individual | MPa |
| σ_{ech} | Tensiunea echivalentă | MPa |
| σ_i | Tensiunea la încovoiere | MPa |
| σ_r | Tensiunea limită la rupere | MPa |
| σ_1 | Tensiunea principală normală | MPa |
| σ_2 | Tensiunea principală normală, perpendiculară pe σ_1 | MPa |
| τ_{f-adm} | Tensiunea admisibilă la forfecare | MPa |
| τ_f | Tensiunea la forfecare | MPa |
| t | Timpul | s |
| t_f | Timpul de frânare | s |

| | | |
|-------------|--|-----------------|
| t_{f-ans} | Timpu de frânare al ansamblului autovehicul – remorcă | s |
| T | Forța tăietoare rezultantă | N |
| Δt | Diferența dintre timpul final și timpul inițial | s |
| u_1 | Deplasarea sferei cârligului de remorcare pe direcția X+ | mm |
| v_1 | Deplasarea sferei cârligului de remorcare pe direcția Z+ | mm |
| v_f | Viteza finală | m/s |
| v_i | Viteza inițială | m/s |
| v_0 | Viteza în punctul 0, ($v_0 = 0$ m/s) | m/s |
| Δv | Diferența dintre viteza inițială / finală și v_0 | m/s |
| W_z | Modulul de rezistență | mm ³ |
| X | Axa de ruluu, axa longitudinală a autovehiculului | - |
| Y | Axa de tangaj, axa laterală / transversală a autovehiculului | - |
| Z | Axa de rotație, axa verticală a autovehiculului | - |
| 😊😊 | Total avantajos | - |
| 😊 | Major avantajos | - |
| 😊 | Puțin avantajos | - |
| 😞 | Puțin dezavantajos | - |
| 😞 | Major dezavantajos | - |
| 😞😞 | Total dezavantajos | - |

LISTĂ FIGURI

- Fig. 1.1** Consumul de materiale până în 2010
Fig. 1.2 Clasificarea materialelor compozite
Fig. 1.3 Tipuri de fibre
Fig. 1.4 Tipuri de țesături
Fig. 1.5 Direcția fibrelor
Fig. 1.6 Schema procesului de fabricație a fibrelor de carbon
Fig. 1.7 Schema procesului de fabricație a fibrelor de sticla
Fig. 1.8 Rezistența fibrelor la impact
Fig. 1.9 Domenii de utilizare a materialelor compozite
Fig. 1.10 Cota de piață a materialelor compozite
Fig. 1.11 Elemente ale autovehiculelor realizate din compozite
Fig. 1.12 Disc de frână ceramic
Fig. 1.13 Plăcuțe de frână ceramice
Fig. 1.14 Galerie de admisie Ford Mustang GT350
Fig. 1.15 Pneuri utilizate la autovehicule
Fig. 1.16 Plafon și pilon din beton armat
Fig. 1.17 Componente din beton, realizate în matrițe
Fig. 1.18 Cofraje realizate din fibra de sticla, pentru turnarea betonului
Fig. 1.19 Structura panourilor sandwich
Fig. 1.20 Interacțiunea panourilor sandwich cu fenomenele naturale
Fig. 1.21 Cadă de baie modernă
Fig. 1.22 Avionul de luptă F-18
Fig. 1.23 Avionul B-1B Lancer
Fig. 1.24 Elicopterul Aerospațiale – componente din compozite
Fig. 1.25 Componente ale navei aerospațiale NASA, realizate din compozite
Fig. 1.26 Diagrama de echilibru a sistemului Al-Si
Fig. 1.27 Dezvoltarea producției mondiale de aluminiu primar
Fig. 1.28 Cota de piață a aluminiului
Fig. 1.29 Elemente ale autovehiculelor realizate din aluminiu
Fig. 1.30 Carcasele blocului motor, chiulasei și cutiei de viteze, din aliaje de Al
Fig. 1.31 Caroserie de tren din Al
Fig. 1.32 Tren de mare viteză
Fig. 1.33 Structură de vapor din Al
Fig. 1.34 Iaht construit din Al
Fig. 1.35 Dirijabilul Zeppelin
Fig. 1.36 Zburătorul fraților Wright
Fig. 1.37 Monoplanul Junkers J1
Fig. 1.38 Gâsca de staniu
Fig. 1.39 Concorde
Fig. 1.40 Empire State Building
Fig. 1.41 Aeroportul Farnborough, UK
Fig. 1.42 Doza Coca Cola, din aluminiu
Fig. 1.43 Ambalaje pe bază de aluminiu
- Fig. 2.1** Primul autovehicul, Nicolas-Joseph Cugnot, 1769
Fig. 2.2 Tractor cu remorcă / căruță

- Fig. 2.3** Bicicletă cu cărucior pentru produse / copii
- Fig. 2.4** Camion cu semiremorcă / remorcă
- Fig. 2.5** Roluri și tipuri de remorci
- Fig. 2.6** Cuplă de tractare utilizată la camioane
- Fig. 2.7** Sistem de prindere a remorcii pe camion
- Fig. 2.8** Structura sistemului de remorcare utilizat la autoturisme
- Fig. 2.9** Cârlig de remorcare cu filet – hitch ball
- Fig. 2.10** Cârlig de remorcare – hitch ball cu 3 sfere
- Fig. 2.11** Cârlig de remorcare cu flanșă
- Fig. 2.12** Cârlig de remorcare în formă de L
- Fig. 2.13** Cârlige de remorcare în formă de L cu raze de îndoire diferite
- Fig. 2.14** Cârlige de remorcare în formă de L cu unghiuri de îndoire diferite
- Fig. 2.15** Cârlige de remorcare în formă de L cu două îndoiri
- Fig. 2.16** Cârlige de remorcare în formă de U, fixare sudură / șurub – piuliță
- Fig. 2.17** Cârlig de remorcare detașabil
- Fig. 2.18** Tipuri de cârlige de remorcare detașabile
- Fig. 2.19** Cârlig de remorcare retractabil
- Fig. 2.20** Modul de retragere a cârligului de remorcare retractabil, în interiorul barei de protecție
- Fig. 2.21** Variante constructive ale cârligelor de remorcare retractabile
- Fig. 2.22** Mașină de măsurat în coordonate 3D
- Fig. 2.23** Verificarea pătrunderii și înălțimii sudurii
- Fig. 2.24** Procesul de evidențiere a zonei sudate
- Fig. 2.25** Model de instrument utilizat pentru măsurarea sudurii
- Fig. 2.26** Efectuarea testului Carlos asupra sistemului de remorcare
-
- Fig. 3.1** Audi Q5
- Fig. 3.2** Operațiunea de montaj a sistemului de remorcare
- Fig. 3.3** Dimensiunile sistemului de remorcare
- Fig. 3.4** Zone ale cârligului de remorcare
- Fig. 3.5** Schiță simplificată a sistemului de remorcare studiat
- Fig. 3.6** Sensul și direcția forței F din timpul rulării ansamblului autovehicul – remorcă
- Fig. 3.7-a** Variabilele necesare calculului „Winkler” (teoria de bară curbă) – secțiune circulară
- Fig. 3.7-b** Variabilele necesare calculului „Winkler” (teoria de bară curbă) – secțiune trapezoidală (trapez isoscel)
- Fig. 3.7-c** Variabilele necesare calculului „Winkler” (teoria de bară curbă) – secțiune pătrată
- Fig. 3.8** Evoluția secțiunii studiate a cârligului de remorcare
- Fig. 3.9** Tensiunea la încovoiere
- Fig. 3.10** Tensiunea la torsiune
- Fig. 3.11** Modul de deformare (exagerat) al sistemului de remorcare
-
- Fig. 4.1** Modelarea sistemului de remorcare
- Fig. 4.2** Vedere laterală a ansamblului
- Fig. 4.3** Vedere de sus a ansamblului
- Fig. 4.4** Tipuri de elemente finite
- Fig. 4.5** Discretizarea sistemului de remorcare
- Fig. 4.6** Discretizarea cârligului de remorcare

- Fig. 4.7** Direcția forței în cârligul și în sistemul de remorcare
- Fig. 4.8** Tensiunile și modul de deformare (exagerat) al sistemului de remorcare
- Fig. 4.9** Tensiunile Von Mises apărute în cârligul de remorcare și grinda de rezistență
- Fig. 4.10** Tensiunile Von Mises apărute în cârligul de remorcare
- Fig. 4.11** Deplasările și modul de deformare (exagerat) al sistemului de remorcare
- Fig. 4.12** Aspecte privind deplasările sistemului de remorcare
- Fig. 4.13** Aspecte privind deplasările cârligului de remorcare
-
- Fig. 5.1** Polariscop
- Fig. 5.2** Curbele izocromate
- Fig. 5.3** Epruvetă supusă la tracțiune
- Fig. 5.4** Curba epruvetei
- Fig. 5.5** Mostră supusă la compresiune
- Fig. 5.6** Epruvetă supusă la încovoiere și curba acesteia
- Fig. 5.7** Discul văzut la polariscop
- Fig. 5.8** Curba de etalonare pentru solicitarea de compresiune a discului
- Fig. 5.9** Cârligul de remorcare văzut la polariscop
- Fig. 5.10** Cârlig cu secțiune dreptunghiulară pentru compararea cu cârligul supus la polariscop
- Fig. 5.11** Tensiunile rezultate în cârligul de remorcare prin trei metode
-
- Fig. 6.1** Instalație cu raze X pentru verificarea nivelului de porozitate
- Fig. 6.2** Mașină de testare a rezistenței la tracțiune
- Fig. 6.3** Spectrometru
- Fig. 6.4** Dispozitiv pentru încercarea epruvetelor la încovoiere
- Fig. 6.5** Dispozitiv pentru încercarea cârligelor de remorcare
- Fig. 6.6** Dispozitiv pentru încercarea ansamblului de remorcare
- Fig. 6.7** Epruvete pentru tracțiune și încovoiere, realizate din fibră de carbon și două tipuri de rășini
- Fig. 6.8** Amestec fibră + rășini
- Fig. 6.9** Placă fibră + rășini
- Fig. 6.10** Cuptor pentru tratarea compozitelor
- Fig. 6.11** Epruvete pentru tracțiune și încovoiere, realizate din Al99,7%, AlSi12Cu1Fe și AlSi10MnMg
- Fig. 6.12** Epruvete pentru tracțiune și încovoiere, realizate din oțel
- Fig. 6.13** Tehnologie obținere epruvete S355
- Fig. 6.14** Forța de rupere la tracțiune asupra epruvetelor
- Fig. 6.15** Dimensiunile epruvetelor și procesul de tracțiune
- Fig. 6.16** Tensiunea de rupere la tracțiune asupra epruvetelor
- Fig. 6.17** Tensiunea de rupere asupra epruvetelor de tracțiune
- Fig. 6.18** Variația câmpului tensiunii de rupere prin tracțiune asupra epruvetelor
- Fig. 6.19** Deformația / Alungirea prin tracțiune a epruvetelor
- Fig. 6.20** Forța de rupere la încovoiere asupra epruvetelor
- Fig. 6.21** Dimensiunile epruvetelor și procesul de încovoiere
- Fig. 6.22** Tensiunea de rupere la încovoiere asupra epruvetelor
- Fig. 6.23** Tensiunea de rupere asupra epruvetelor de încovoiere
- Fig. 6.24** Variația câmpului de tensiune la rupere asupra epruvetelor de încovoiere
-
- Fig. 7.1** Itinerariul tehnologic al cârligului de remorcare realizat în bară de oțel

- Fig. 7.2** Debitare
- Fig. 7.3** Forjare sferă
- Fig. 7.4** Strunjire
- Fig. 7.5** Îndoire
- Fig. 7.6** Aplatizare
- Fig. 7.7** Găurire
- Fig. 7.8** Matriță pentru cârlig din FC
- Fig. 7.9** Traseul fibrelor de carbon din cârligul de remorcare
- Fig. 7.10** Cârlig de remorcare realizat din fibre de carbon, cu sfera și inserții metalice
- Fig. 7.11** Semifabricat turnat în amestec de formare
- Fig. 7.12** Alcătuirea formei pentru turnare
- Fig. 7.13** Piesa brută
- Fig. 7.14** Cârlig de remorcare obținut prin turnare gravitațională
- Fig. 7.15** Tipuri de materiale utilizate în confecționarea cârligelor de remorcare

- Fig. 8.1-a** Sistemul de remorcare fixat pe masa de verificare dimensională
- Fig. 8.1-b** Sistemul de remorcare fixat pe mașina de testare la tracțiune
- Fig. 8.2** Curba caracteristică a sistemului de remorcare
- Fig. 8.3** Solicitățile apărute în cârligul de remorcare
- Fig. 8.4** Curba caracteristică a cârligului din fibre de carbon
- Fig. 8.5** Cârligul din fibre de carbon după testare, dezintegrat
- Fig. 8.6** Curba caracteristică a cârligului din oțel S355
- Fig. 8.7** Curba caracteristică a cârligului din Al99,7%
- Fig. 8.8** Cârligul din Al99,7% după testare
- Fig. 8.9** Curba caracteristică a cârligului din AlSi10MnMg
- Fig. 8.10** Curba caracteristică a cârligului din AlSi12Cu1Fe
- Fig. 8.11** Cârligul de remorcare din AlSi10MnMg, dezintegrat
- Fig. 8.12** Cârligul de remorcare din AlSi12Cu1Fe, dezintegrat
- Fig. 8.13** Forța maximă acționată pe cârligul de remorcare
- Fig. 8.14** Suprapunerea curbelor caracteristice ale cârligelor de remorcare
- Fig. 8.15** Performanța cârligelor de remorcare din materiale alternative
- Fig. 8.16** Indici de comparație a performanțelor materialelor alternative ale cârligelor de remorcare
- Fig. 8.17** Performanța cârligelor de remorcare din materiale alternative
- Fig. 8.18** Suprapunerea curbelor caracteristice ale cârligului de remorcare din oțel și sistemului de remorcare
- Fig. 8.19** Suprapunerea modului de deformare a cârligului de remorcare testat individual și a celui testat în ansamblul de remorcare
- Fig. 8.20** Concepte și propuneri pentru optimizarea cârligului de remorcare
- Fig. 8.21** Diagrama recoacerii de detensionare aplicată aluminiului și aliajelor de aluminiu (AlSi10MnMg și AlSi12Cu1Fe)

LISTĂ TABELE

Tabelul 1.1 Proprietățile materialelor din alcătuirea matricelor polimerice

Tabelul 1.2 Caracteristicile materialelor ceramice

Tabelul 1.3 Particule obținute din materiale, folosite în alcătuirea compozitelor

Tabelul 1.4 Caracteristicile mecanice ale fibrelor

Tabelul 1.5 Principalele proprietăți fizice și tehnologice ale aluminiului și aliajelor acestuia

Tabelul 2.1 Avantajele și dezavantajele diferitelor tipuri de cârlige de remorcare

Tabelul 3.1 Valorile necesare determinării deplasării sferei

Tabelul 3.2 Centralizarea valorilor specifice tensiunilor și deformațiilor din sistem

Tabelul 3.3 Centralizarea tensiunilor apărute în cele 3 variante constructive

Tabelul 4.1 Centralizarea valorilor specifice tensiunilor din sistem

Tabelul 4.2 Centralizarea valorilor specifice deplasărilor din sistem, considerând întreg sistemul de remorcare

Tabelul 4.3 Centralizarea valorilor specifice deplasărilor din sistem, considerând doar cârligul de remorcare individual

Tabelul 5.1 Centralizarea valorilor specifice forței F în funcție de izocromate apărute pe disc

Tabelul 5.2 Determinarea tensiunilor din cârlig prin analogie la discul etalon

Tabelul 5.3 Determinarea tensiunilor din cârlig considerându-se încovoiere în cârlig

Tabelul 5.4 Centralizarea tensiunilor din cârlig obținute prin trei metode de calcul

Tabelul 5.5 Tensiuni obținute în ipoteza unui cârlig de remorcare din material fotoelastic, dar cu geometria cârligului real

Tabelul 6.1 Masa specifică a materialelor studiate în lucrare

Tabelul 6.2 Avantajele și dezavantajele fiecărui tip de material

Tabelul 8.1 Caracteristicile comportamentale ale sistemului de remorcare

Tabelul 8.2 Proprietățile determinărilor experimentale ale cârligelor de remorcare

Tabelul 9.1 Tensiunile critice obținute prin cele 3 metode de determinare

CAPITOLUL I

MATERIALE ȘI SISTEME INOVATIVE

Scurt istoric al materialelor compozite

Materialele compozite s-au dezvoltat odată cu formarea universului, au dobândit valențe noi și din ce în ce mai performante și reprezintă o necesitate tot mai mare pentru om, iar în mediul înconjurător găsim o mulțime de exemple de materiale compozite, și anume: **plantele** sunt compozite ranforsate cu fibre celulozice ce asigură rezistență mecanică specifică; **animalele** sunt compozite armate cu fibre de colagen, keratină și elastină. Omul a creat materiale compozite încă din cele mai vechi timpuri, primul exemplu fiind procesat în Egipt, amestecându-se paie de cereale cu argilă, formând astfel „cărămizi”, folosite apoi la realizarea adăposturilor umane, pentru ca mai târziu romanii să formeze o asemănare a betonului, amestecând tuf vulcanic, var și nisip [12].

În muzeul Britanic din Londra se află expus un vas folosit pentru depozitare în anul 900, alcătuit din fibră de sticlă întărit cu o rășină, fiind echivalent al zilelor noastre cu un compozit de tip fibră de sticlă cu rășină epoxidică [55].

În anul 1942 s-a realizat prima ambarcațiune din fibră de sticlă, acest compozit fiind utilizat și pentru componentele electrice din domeniul aeronauticii [55].

Fibra de carbon cu rezistență ridicată la rupere a apărut în anul 1968, fiind utilizată la materialele avansate ale unor componente de avion, iar compozitele cu matrice metalică au apărut în 1970 [17, 55].

Conform opiniei profesorului Ioan Carcea [12], materialele compozite reprezintă apogeul clasei de materiale dezvoltate de om în epoca modernă, însă prezintă în continuare provocări ale viitorului privind atât performanțele acestora cât și tehnologiile de fabricare. Acestea sunt alcătuite din cel puțin două faze de natură diferită, iar acestea odată combinate formează un material nou, cu proprietăți mult superioare față de cele de la care s-a pornit, privind raportul dintre proprietăți și greutatea specifică.

1.1 Definiția, utilizarea și alcătuirea materialelor compozite

Materialele compozite fac parte din categoria „materiale noi” și au fost create ca alternativă performantă a materialelor tradiționale, satisfăcând următoarele cerințe: rezistență mecanică și rigiditate; rezistență la coroziune; rezistență la acțiunea agenților

chimici; greutate scăzută; stabilitate dimensională; rezistență la solicitări variabile, la șoc și la uzură; proprietăți izolatoare și estetică. Cel mai important avantaj al acestor materiale este raportul mare dintre rezistență și greutatea volumică [54], lucru esențial pentru diminuarea masei proprii a construcțiilor realizate din compozite.

Ca definiție universală, general valabilă, se poate spune că materialul compozit reprezintă amestecul dintre cel puțin două componente, cu proprietăți diferite ce se completează reciproc, obținându-se astfel un material nou, cu caracteristici îmbunătățite față de cele ale fiecărui component luat individual.

Cu trecerea anilor, materialele metalice tradiționale încep să fie înlocuite de materialele compozite, care și-au confirmat performanțele în utilizare, iar în graficul din figura 1.1 se poate observa variația consumului de metale, materiale compozite și produse naturale de-a lungul timpului [20, 27, 34, 1.].

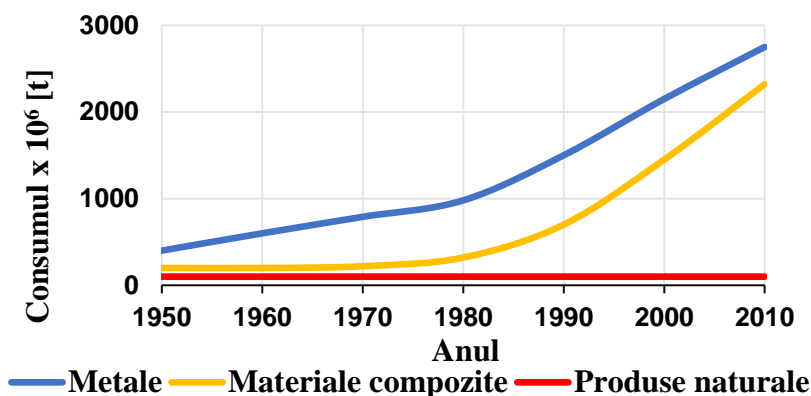


Fig. 1.1 Consumul de materiale până în 2010 [20, 27, 34, 54]

Printre toate avantajele prezentate ale materialelor compozite, trebuie menționat faptul că acestea au și dezavantaje importante, printre care se enumeră: sunt mai scumpe decât materialele tradiționale, astfel că trebuie utilizate doar acolo unde sunt necesare; nu prezintă ductilitate și au comportament elastic până la rupere (fapt evidențiat în partea experimentală a lucrării); după anumite temperaturi de tranziție sunt deficiente, scăzând brusc rezistența și modulul de elasticitate [30]. Pe lângă dezavantajele în utilizare ale compozitelor, acestea mai prezintă o serie dăunătoare pentru integritatea omului, în sensul că fiind alcătuite din produse petroliere sunt combustibile, iar gazele rezultate în urma arderii sunt toxice [30]. De asemenea, în timpul preparării de către operatori a materialului compozit, unele persoane pot suferi deficiențe la respirație din cauza rășinii epoxidice, rășină care emite vapori ce pot fi inhalați de personal.

Prin definiție, materialele compozite reprezintă combinarea dintre minimum doi constituenți ce poartă denumirea de *faze*. Materialul de bază al amestecului poartă denumirea de *matrice* (faza continuă), iar cealaltă sau celelalte faze se numesc *armături* (faza discontinuă), prezentându-se sub formă de fibre sau particule și contribuie la îmbunătățirea proprietăților matricei. În compoziția materialelor compozite se pot găsi adaosuri tehnologice care au diferite roluri de: ignifugare, catalizator, accelerator, protecție împotriva razelor ultraviolete, etc [10, 20].

Rolurile matricei din materialul compozit sunt: asigurarea unui mediu relativ rigid, capabil să transmită eforturile către fibrele acesteia, capacitatea de a se plia pe matriță pentru a lua forma acesteia și de a se obține piesa dorită, protejarea armăturii, de a redistribui sarcinile atunci când elemente ale armăturii cedează. Matricea înglobează armătura [10, 20].

Rolul armăturii din materialul compozit este de a prelua eforturile încărcării transmise prin matrice, încărcarea trebuind distribuită între matrice și armătură. Aceasta trebuie să fie compatibilă din punct de vedere chimic cu matricea, să aibă orientarea optimă în compozit pentru a prelua solicitările din materialul rezultat, să adere la materialul din care este compusă matricea. Armătura este inclusă de materialul ce formează matricea [10, 20].

1.2 Proprietățile materialelor compozite

Este dificil a se realiza o clasificare riguroasă a materialelor compozite din cauza diversității tot mai mari apărute în ultimii ani. Datorită acestui fapt se va încerca o divizare în categorii, având în vedere o serie de criterii [4, 10]:

1. natura matricei;
2. natura armăturii;
3. numărul fazelor continue (matricelor);
4. numărul fazelor discontinue (armăturilor);
5. topologia fazei discontinue a armăturii;
6. procedeul de obținere a constituenților și a pieselor din compozit;
7. modul de conlucrare între constituenți;
8. constituenții.

Clasificarea anterior prezentată conține categorii care se suprapun, dar și care se completează reciproc, iar o clasificare generală realizată într-un mod sintetic, având ca repere două criterii privind modul de orientare a armăturii în matrice și particularitățile geometrice ale acesteia, se afișează în figura 1.2 [20, 27].

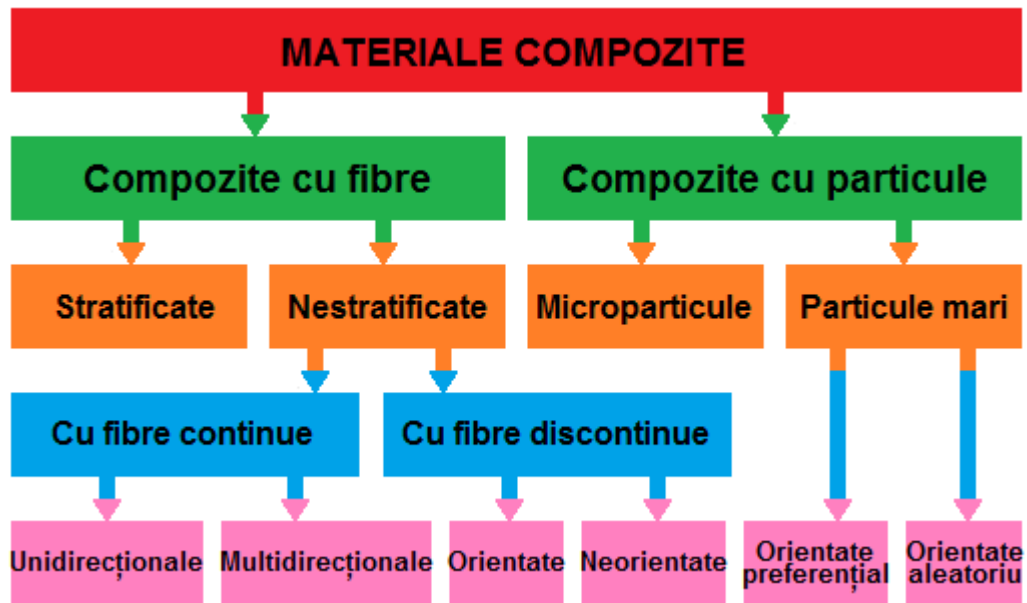


Fig. 1.2 Clasificarea materialelor compozite [20, 27]

În continuarea lucrării se va parcurge fiecare criteriu de clasificare ce a fost enumerat la începutul subcapitolului, se precizează caracteristicile compozitelor și se vor aduce exemple întâlnite în diferite domenii de utilizare.

1.2.1 Clasificare după natura matricei

Privind acest criteriu de clasificare, compozitele se divid în 3 categorii:

1. materiale compozite cu *matrice polimerică*;
2. materiale compozite cu *matrice metalică*;
3. materiale compozite cu *matrice ceramică*.

1. Compozite cu matrice polimerică

Aceste materiale sunt cele mai răspândite și sunt printre primele compozite apărute, purtând denumirea de *mase plastice ranforsate*. Primul material compozit, format din fibră de bumbac și rășini fenol-formaldehidice, este cunoscut sub numele de *textolit* și a apărut în anul 1941, pentru ca la sfârșitul celui de-al doilea război mondial să se înceapă producerea de materiale polimerice ranforsate cu fibră de sticlă, utilizate în construcția de avioane, nave, mașini, fiind printre cele mai utilizate [56].

2. Compozite cu matrice metalică

Aceste materiale au scară de utilizare mai restrânsă decât cele cu matrice polimerică, fiind folosite cu precădere acolo unde temperatura de lucru este mai mare (până la 700°C),

iar polimerii se degradează. Apărute ulterior compozitelor polimerice, compozitele cu matrice metalică sunt utilizate datorită unor avantaje: rezistență la aprindere și proprietăți mecanice ridicate, stabilitate dimensională și capacitate bună de prelucrare, conductivitate electrică și termică ridicate, rezistență crescută la oboseală, fisurare și impact.

3. Compozite cu matrice ceramică

Datorită proprietăților intrinseci ridicate, îndeosebi a legăturilor interatomice, ceramica este tot mai des utilizată pentru fabricarea materialelor compozite. Rezistența foarte bună la rupere (de multe ori mai ridicată decât a celor mai performante oțeluri), modulul de elasticitate mare (mai ridicat decât al oțelurilor), duritate mare și stabilitate la creșterea temperaturii, rezistența mecanică avantajoasă la temperaturi înalte, rezistența foarte ridicată la contactul cu agenții chimici și la oxidare, sunt doar câteva dintre cele mai importante performanțe pe care le dobândesc materialele compozite cu matrice ceramică (a se vedea proprietățile din tabelul 1.2).

Tabelul 1.2 *Caracteristicile materialelor ceramice* [4, 10]

| Materialul | Rezistența la flexiune [MPa] | Modulul de elasticitate [GPa] | Rezistența la șoc termic [°C] | Dilatarea termică [10^{-6} grd ⁻¹] |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Nitrura de siliciu | 315 | 175 | 570 | 2,4 |
| Alumina | 350 | 385 | 96 | 7,4 |
| Carbura de siliciu | 420 | 406 | 230 | 3,8 |

1.2.2 Clasificare după natura armăturii

Asemănător clasificării după natura matricei, clasificarea după natura armăturii se divide în trei categorii:

1. materiale compozite *armate cu particule*;
2. materiale compozite *armate cu fibre discontinue (whiskers)*;
3. materiale compozite *armate cu fibre (lamine)*.

1. Compozite armate cu particule

Particulele din armătura materialelor compozite reprezintă microsferice de sticlă sau de alte materiale, pline sau goale, cu diametre cuprinse între 5 μm ÷ 0,5 mm, și sunt utilizate într-o repartiție granulometrică, specifică unei curbe date, formând astfel compozite cu grad ridicat de anizotropie [4, 10].

2. Compozite armate cu fibre discontinue (whiskers)

Armătura whiskers este caracterizată de monocristale filiforme, având diametre cuprinse între $1 \div 50 \mu\text{m}$ și lungimi între $20 \mu\text{m} \div 0,5 \text{ mm}$ (uneori până la 2,5 mm). Monocristalele se obțin din materiale ceramice (nitrură și carbură de zirconiu, oxid de magneziu, carbură de bor, oxid de beriliu, nitrură de aluminiu, oxid de aluminiu, carbon) și materiale metalice (nichel, cupru, fier, titan, aluminiu, bor) [4, 10].

3. Compozite armate cu fibre (laminare)

Cele mai performante materiale compozite fac parte din această categorie, armate cu fibre continue, și se caracterizează ca fiind puternic anizotrope. În funcție de dimensiunea fibrelor, compozitele primesc o nouă clasificare (a se vedea figura 1.3): lungi, tocate, măcinate. Fibrele întâlnite sunt: metalice, nemetalice, kevlar, siliciu, carbon, sticlă, celulozice, azbest, carbură de siliciu [4, 10].

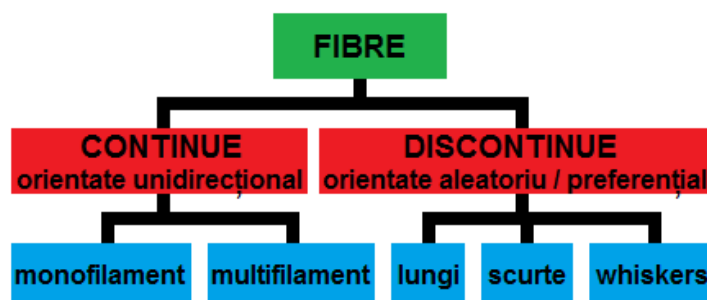


Fig. 1.3 Tipuri de fibre [4, 10]

1.2.8 Clasificare după constituenți

Această clasificare face referire la tipul și forma fazei discontinue (în speță armătura), fiind astfel divizate [4, 10]:

1. materiale compozite *cu particule* – armătura din compozit lucrează punctual și este imersată într-o matrice;

2. materiale compozite *fibroase (cu fibre)* – au armătura alcătuită din fibre continue sau discontinue, lungi sau scurte, orientate după una, două sau trei direcții sau orientate aleatoriu, iar faza continuă poate conține două sau mai multe materiale și înglobează armătura;

3. materiale compozite *cu foi (lenticulare)* – armătura este alcătuită din foi plane care se înglobează într-o matrice;

4. materiale compozite *laminare (stratificate)* – acest compozit conține straturi cu proprietăți de rezistență diferită, dar și orientarea acestora diferită;

5. materiale compozite *umplute cu schelet (cu alcătuire spațială) / spume* – aceste compozite sunt alcătuite dintr-un schelet de bază, fiind apoi umplut cu un alt tip de material. Armătura conține cel puțin unul din următoarele elemente chimice: aluminiu, beriliu, bor, carbon, magneziu, siliciu, titan.

Cele mai întâlnite și utilizate materiale compozite sunt cele pe bază de fibre, armătura preluând acțiunile mecanice pe care le încasează piesa, iar rolul matricei este de a ține fibrele unite și de a le proteja de factorii externi. Compozitul rezultat este un produs anizotrop deoarece constituenții au proprietăți foarte diferite, rezistența mecanică a matricei fiind de 25 până la 50 de ori mai mică decât cea a armăturii.

1.3 Utilizarea materialelor compozite

Materialele compozite și-au dovedit performanțele, ceea ce face ca acestea să fie utilizate în foarte multe ramuri ale industriei (fig. 1.9), inclusiv în medicină. În funcție de domeniul de activitate se folosesc compozite cu diferite proprietăți, înlocuind cu succes materialele tradiționale, punându-se accent pe caracteristicile constituenților luați individual (armătură + matrice), cât și pe proprietățile de a forma împreună un nou material.

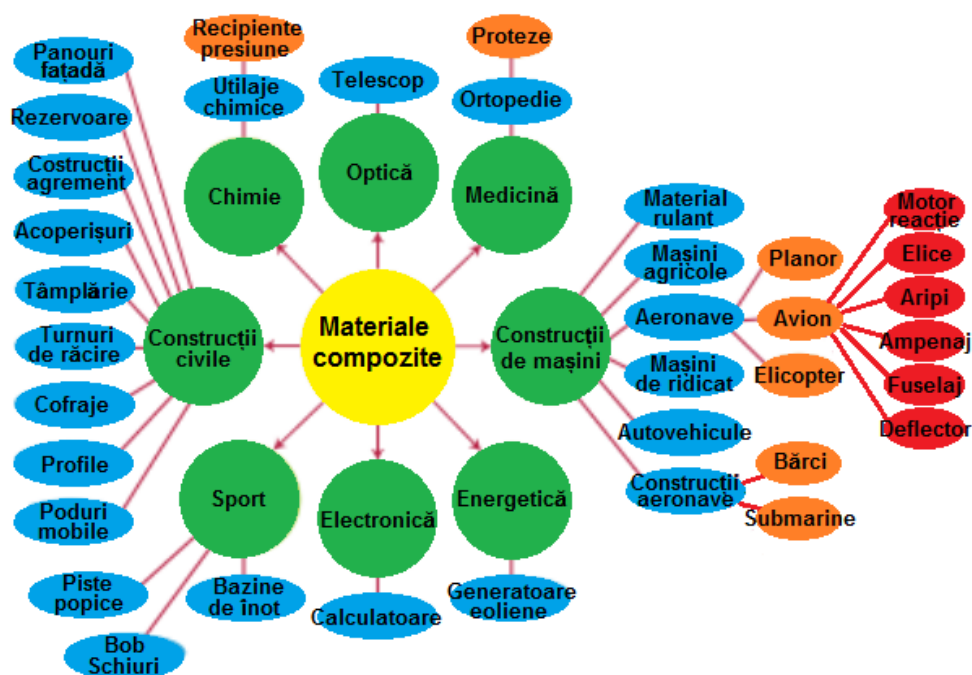


Fig. 1.9 Domenii de utilizare a materialelor compozite

Procentajul utilizării materialelor compozite, în diferite domenii

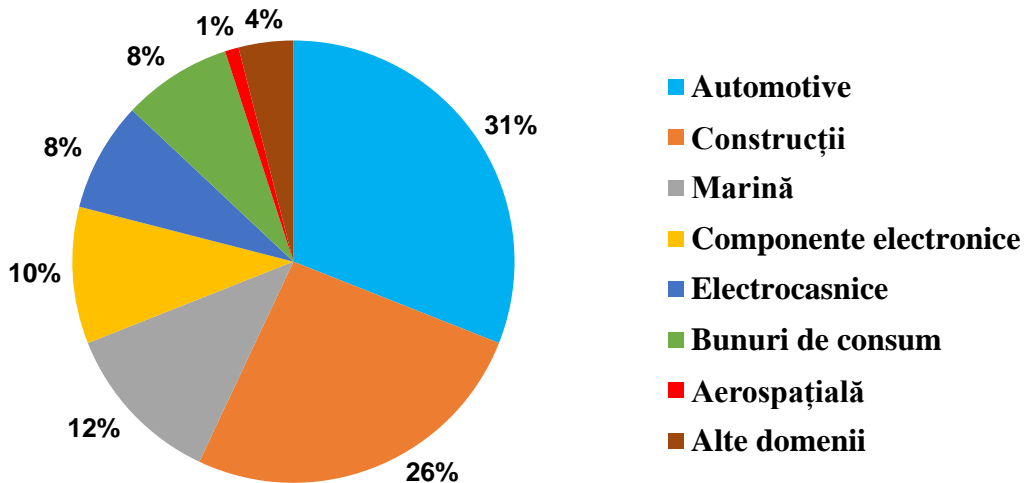


Fig. 1.10 Cota de piață a materialelor compozite [60]

Conform studiului [60], cantitatea cea mai mare de materiale compozite este utilizată în industria automotive și a construcțiilor civile, iar în graficul din figura 1.10 este prezentată ponderea consumului de compozite.

1.3.1 Materiale compozite utilizate în industria auto

După cum se poate observa în graficul mai sus menționat, cel mai important domeniu de utilizare al materialelor compozite este cel al industriei de automobile, la nivel mondial utilizându-se în jur de 31% din întreaga cantitate.

Normele de poluare tot mai riguroase îi conduc pe cercetătorii producătorilor de autovehicule spre eficientizarea motoarelor, pentru a le scădea noxele pe care acestea le emit. Un alt mod de a diminua noxele este de a realiza caroserii și elemente ale acestora cât mai ușoare, înlocuindu-se materialele tradiționale metalice cu materiale compozite polimerice, motorul transportând o masă totală a autovehiculului diminuată, necesitând astfel o cantitate mai mică de combustibil necesară mișcării, ceea ce conduce și la reducerea emisiilor poluante, dar și la creșterea performanțelor.

Pe lângă avantajele masei specifice scăzute și a rezistențelor ridicate, tendința de scădere a duratei de viață cât și creșterea numărului de autovehicule, impun materialelor compozite capacități bune de reciclare, apărând astfel revoluții în tehnologiile de fabricare, dezvoltându-se linii de producție moderne.

În prezent materialele plastice reprezintă aproximativ 10% din masa totală a unui autovehicul, iar procentul are tendința ascendentă [20, 27]; în figura 1.11 sunt prezentate elemente de carenaj și nu numai, realizate din plastic, însă se realizează și componente din

interiorul autovehiculului, cât și ale șasiului, motorului, transmisiei, distribuției și sistemului de suspensie și frânare [20]. Construcția blocului motor din materiale compozite polimerice rămâne în continuare o provocare a cercetării, acesta fiind supus în timpul funcționării unor solicitări specifice de temperaturi, forțe, frecare, contact cu uleiuri și combustibil, etc.

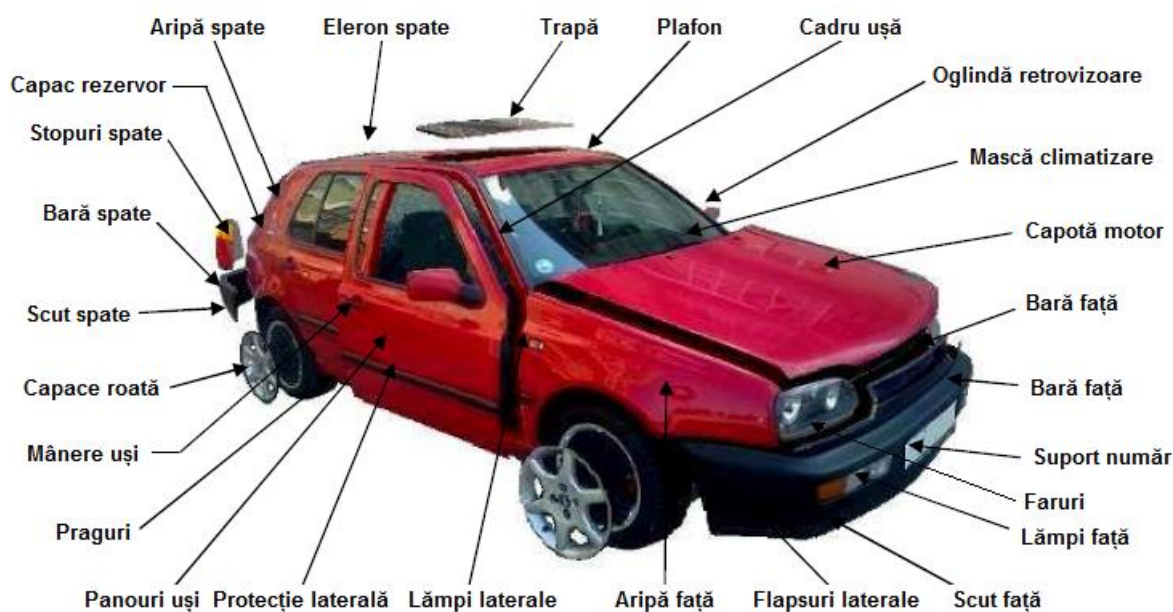


Fig. 1.11 Elemente ale autovehiculelor realizate din compozite [20]

Materialele compozite ceramice reprezintă cea mai performantă categorie de compozite, având proprietăți deosebite în funcționare, dar și costuri pe măsură, fiind realizate pentru componente importante ale motorului și sistemului de frânare.

Pistoanele performante ale motoarelor diesel supraalimentate au capul pistonului din material ceramic rezistent la temperaturi foarte înalte, însă acestea necesită atenție deosebită în procesul de fabricație.

Discurile și plăcuțele de frână (fig. 1.12, fig. 1.13) realizate din materiale ceramice au proprietăți de disipare a căldurii foarte mari, fiind mult mai ușoare decât materialele tradiționale, utilizându-se cu precădere la autovehiculele sport.



Fig. 1.12 Disc de frână ceramic [61]



Fig. 1.13 Plăcuțe de frână ceramice [62]

Galeria de admisie (fig. 1.14) a autovehiculelor cu performanțe ridicate a motorului sunt realizate din nylon 66 ranforsat cu fibre de sticlă într-o proporție de 33% (formând un compozit termoplastic), obținându-se astfel un produs cu o greutate înjumătățită față de varianta din aliaj de aluminiu și cu proprietăți superioare de curgere a aerului în interiorul acesteia.

Pneul (fig. 1.15), datorită modului de alcătuire, reprezintă el însuși un material compozit, utilizând armătura din cabluri de oțel, pentru a oferi rezistență și stabilitate benzii de rulare și matricei din cauciuc natural sau sintetic. Banda de rulare este de asemenea din cauciuc și poate fi înlocuită (reșapare).



Fig. 1.14 Galerie de admisie Ford Mustang GT350 [63]



Fig. 1.15 Pneuri utilizate la autovehicule [64]

1.3.2 Materiale compozite utilizate în domeniul construcțiilor civile

Al doilea cel mai răspândit domeniu de utilizare al compozitelor este cel al construcțiilor civile, cu o pondere în jur de 26%. Aplicațiile din acest domeniu sunt foarte variate, întâlnindu-se compozite în structurile de rezistență a clădirilor, cofraje, pereți exteriori, izolații, tâmplărie, obiecte sanitare, elemente de decor, etc.

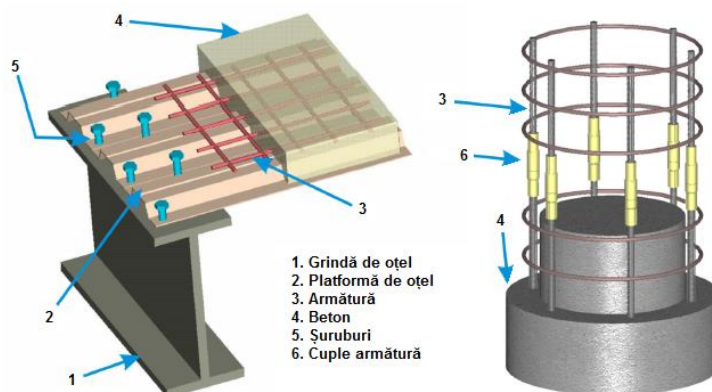


Fig. 1.16 Plafon și pilon din beton armat [27]

Betonul armat este cel mai utilizat compozit în stâlpii de rezistență și plafoanele clădirilor civile (fig. 1.16). Ca alternativă a betonului armat se poate utiliza lemnul sau metalul, atât pentru stâlpi cât și pentru planșee.

1.3.3 Materiale compozite utilizate în industria aeronautică

Datorită cercetărilor în domeniul militar și industriei aeronautice există această amplă și rapidă dezvoltare a materialelor compozite. Necesitatea de a realiza structuri și carenaje pentru avioane și elicoptere cât mai ușoare, dar cu rezistență ridicată, i-au condus pe constructori către aceste tipuri de materiale [34].

În prezent, compozitele pe bază de fibră de carbon sunt cele mai utilizate materiale în industria aeronauticii a S.U.A.. Acestea se găsesc sub formă de benzi preimpregnate, cunoscute sub denumirea de *prepreg* și sunt foarte utilizate de companiile Boeing, General Dynamics, Northrop și McDonnell Douglas [27].



Fig. 1.22 Avionul de luptă F-18 [34, 69]

Cele mai multe aplicații ale materialelor compozite sunt utilizate în domeniul militar, depășind 40% din întreaga industrie a aviației [3]. În anul 1985 concernul McDonnell Douglas folosea 181.500 de kilograme de materiale compozite fabricând avioanele de luptă F-18 (fig. 1.22) și AV-8B. Aproximativ 26% din masa structurii avionului AV-8B este alcătuită din materiale compozite, reducând astfel greutatea acestuia cu circa 225 de kilograme. Carenajul, fuzelajul din față, flettnerul, profundatorul, chesonul aripii, stabilizatorul orizontal, cât și alte suprafețe de control sunt confecționate din materiale compozite. Învelișurile aripilor sunt compuse din mai multe plăci stratificate, aliniată cap la cap, îmbinate într-o structură de tip multilonjeron; peste 10% din masa avionului de luptă F-18 (fig. 1.22) și peste 50% din suprafața sa sunt formate din materiale compozite pe bază de fibră de carbon.

1.3.4 Materiale compozite utilizate în construcția aerospațială

Aplicațiile militare trebuie să îndeplinească o serie întreagă de cerințe, însă cele mai importante sunt: greutate scăzută, coeficient de dilatare termică scăzut, rigiditate ridicată și stabilitate dimensională în timpul duratei de viață [3, 27, 34]. În aplicații se întâlnesc trei astfel de categorii:

1. sisteme de proiectile – rachetă tactică;
2. sisteme de proiectile – rachetă strategică;
3. sisteme de proiectile – rachetă defensivă;

Componentele structurale ale rachetelor tactice sunt în general mici și ușoare, trebuind să reziste la accelerații foarte mari și vibrații în condiții grele de lucru (umiditate mare, substanțe chimice, sare și nisip). În timpul funcționării, carcasa motorului acestui tip de rachetă este supusă la o presiune ridicată și trebuie să aibă rigiditate axială mare, acestea fiind motivele pentru care se realizează din metal, compozitele fiind doar înlocuitori.

Temperatura de utilizare a garniturilor navetei aerospațiale (NASA) a S.U.A. este între 300 °C și 600 °C, astfel că protecția termică are un rol foarte important în alcătuirea compozitelor; garniturile sunt realizate din compozit carbon – carbon, siliciu – siliciu, și piese structurale din bor – aluminiu (fig. 1.25).

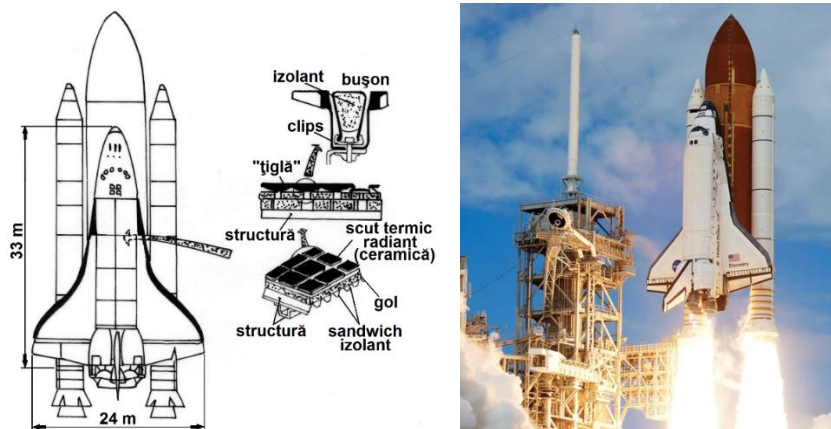


Fig. 1.25 Componente ale navetei aerospațiale NASA, realizate din compozite [34, 72]

Scutul termic radiant este alcătuit din compozite ceramice siliciu – siliciu și protejează partea centrală a navetei.

Fibrele de sticlă (de tip E și S), fibrele de aramidă și fibrele de carbon – grafit sunt cele mai răspândite în acest domeniu și au o largă utilizare.

Cele mai întâlnite rășini sunt cele epoxidice care prezintă o serie de avantaje, printre care: rezistență mare la rupere, tenacitate, disiparea lentă a fisurilor; pe lângă aceste avantaje, acestea dețin un comportament avantajos într-o plajă largă de temperaturi -90 °C ÷ 180 °C.

1.4 Concluzii privind materialele compozite

Materialele compozite reprezintă în prezent apogeul științei materialelor, având o serie întreagă de avantaje ce recomandă înlocuirea materialelor clasice. Compozitul reprezintă amestecul dintre cel puțin două componente cu proprietăți diferite care se completează reciproc, formând un material nou, cu proprietăți superioare celor inițiale, luate individual. Cele două componente se mai numesc și faze, iar fazele sunt: matrice și armătură. Rolul principal al matricei este de a realiza un mediu rigid capabil să transmită eforturile către armătură, iar rolul armăturii este de a prelua eforturile pe care le primește piesa realizată din material compozit.

Se consideră că primul material compozit creat de om a apărut în Egipt, atunci când se realizau amestecuri formate din paie de cereale și argilă. Compoziția finală era modelată sub formă de cărămizi, iar acestea se foloseau pentru a construi adăposturile oamenilor.

Raportul ridicat între rezistență și greutate, stabilitatea dimensională în timp, rezistența la coroziune și împotriva agenților chimici și buna capacitate de a fi prelucrate, sunt doar câteva dintre caracteristicile excepționale ale compozitelor, acestea înlocuind cu succes cele mai utilizate metale din industrie – oțelul și aluminiul.

Materialele compozite sunt utilizate în domeniul auto, construcții civile, industria aeronautică și aerospațială și alte domenii, inclusiv în medicină. Datorită aplicațiilor militare de ultimă generație, compozitele au căpătat o dezvoltare foarte mare într-un timp scurt.

Dezavantajele compozitelor sunt: preț mai ridicat decât al metalelor, ușor inflamabile, rășinile emit vapori toxici, se reciclează mai greu decât metalele.

Scurt istoric al aluminiului și aliajelor pe bază de aluminiu

„Aluminiul este cel mai răspândit metal din scoarța terestră, iar printre elemente ocupă locul al treilea în urma oxigenului și siliciului. Datorită activității sale chimice mari, aluminiul se găsește în natură numai sub formă de compuși. Împreună cu oxigenul și siliciul, acesta reprezintă 82,58% din scoarța terestră.” [103]

Simbolul chimic al aluminiului este Al, iar cea mai utilizată tehnologie pentru obținerea aluminiului pur este alcătuită din două etape:

1. prin electroliză, din bauxită se extrage alumina;
2. prin electroliză, din alumină se obține oxigen și aluminiu.

După fier, aluminiul a devenit metalul cu cea mai largă întrebuințare, iar printre nenumăratele avantaje ale acestuia se enumeră următoarele:

- metal ușor $\rho_{Al} = 2,7 \text{ kg/dm}^3$, în comparație cu fierul $\rho_{Fe} = 7,8 \text{ kg/dm}^3$, motiv pentru care este utilizat în industria navală și aeronautică;

- bun conducător electric și termic, mai slab decât cuprul, dar mult mai ușor decât acesta $\rho_{Cu} = 8,95 \text{ kg/dm}^3$, motiv pentru care este utilizat în industria electrică;

- metal ductil și maleabil, cu posibilitatea de a se obține foițe subțiri cu grosimea de 0,005 mm, motiv pentru care este folosit în industria alimentară și farmaceutică;

Aluminiul pur are proprietăți mecanice destul de slabe, iar pentru a se îmbunătăți caracteristicile, acestuia i se adaugă diferite elemente de aliere, obținându-se aliajele de aluminiu, care, în funcție de aplicație, au proprietăți mult mai eficiente. Alierea de elemente este întâlnită foarte des, nu doar la metale și are rolul de a îmbunătăți unele proprietăți:

- fontă și oțel, aliaje pe bază de Fe, aliate cu C, Ni, Cr, Mo, V, etc.;

- alamă și bronz, aliaje pe bază de Cu-Zn și Cu-Sn, aliate cu Ni, Sn, Fe, Zn, Pb, etc.;

- beton armat, poate fi considerat aliaj pe bază ciment cu armătură din Fe și piatră cu rol de umplutură;

- materialele compozite pe bază de carbon sau fibră de sticlă cu rășină.

Diferența dintre metalele aliate și materialele compozite este că la cele dintâi alierea se realizează microstructural, la temperaturi foarte înalte, însă scopul este același: **îmbunătățirea proprietăților mecanice, fizice și / sau chimice.**

1.6 Proprietățile aluminiului și aliajelor de aluminiu

Aluminiul face parte din grupa a III-a principală a sistemului periodic, are numărul de ordine 13, masa atomică 27, cristalizează în sistemul cubic cu fețe centrate și prezintă trei izotopi radioactivi cu perioada de înjumătățire mai mică de 7 minute.

Tabelul 1.5 *Principalele proprietăți fizice și tehnologice ale aluminiului și aliajelor acestuia*

| Caracteristică | Aluminiu pur | Aliaje de aluminiu |
|--|--------------|--------------------|
| Masa specifică, ρ [kg/dm^3] | 2,7 | 2,6 ÷ 2,85 |
| Rezistența mecanică la tracțiune, σ_r [MPa] | 70 ÷ 100 | 150 ÷ 450 |
| Punctul de topire, [°C] | 660 | 570 ÷ 655 |
| Alungirea, [%] | 20 ÷ 45 | 0,5 ÷ 18 |
| Duritatea Brinell, HB [MPa] | 250 ÷ 400 | 500 ÷ 1300 |

Principalele proprietăți fizice și tehnologice ale aluminiului și aliajelor de aluminiu sunt prezentate în tabelul 1.5 [6, 11, 19].

În general, aliajele se pot clasifica după mai multe criterii, câteva dintre acestea fiind prezentate în continuare:

1. după numărul elementelor de aliere: aliaje binare, ternare, cuaternare, complexe;
2. după conținutul elementelor de aliere: aliaje slab aliate (cu maxim 3% elemente de aliere), aliaje mediu aliate (cu 3 ÷ 10% elemente de aliere), aliaje înalt aliate (cu minim 10% elemente de aliere);

Cel mai simplu criteriu de clasificare pentru aliaje poate fi considerat acela al elementului principal din compoziția chimică: aliaje de aluminiu, cupru, magneziu, etc.

Aliajele pentru turnătorie au valori mai mari ale elementelor de aliere, permițând tratamentul termic prin călire și îmbătrânire sau recoacere. De asemenea, aliajele pentru turnătorie se clasifică după elementul principal de aliere: siliciu, cupru, magneziu, zinc. Aceste aliaje de aluminiu pot fi binare, însă de cele mai multe ori ele sunt aliaje complexe, conținând cantități importante ale altor elemente de aliere.

Aliajele Al-Si, Al-Cu și Al-Mg sunt cele mai întâlnite în practică, iar mărcile acestora sunt simbolizate în funcție de procedeul de turnare: ATN – aliaje turnate în amestec de formare, ATC – aliaje turnate în cochilă, ATP – aliaje utilizate la turnarea sub presiune.

1.6.1 Aliajele aluminiu-siliciu

Sunt cele mai utilizate aliaje de aluminiu utilizate în turnătorii, cu caracteristici bune de turnare și proprietăți tehnologice înalte, cunoscute în tehnică cu denumirea de **siluminuri**.

Caracteristicile mecanice ale siluminurilor se pot îmbunătăți modificând structura de turnare, introducând adaosuri mici de elemente modificatoare înainte de turnare, și anume: sodiu, potasiu, calciu, litiu.

Proprietățile mecanice ale siluminurilor se pot îmbunătăți prin alierea în diferite procente cu diferite elemente chimice, dar în același timp se pot înrăutăți. În continuare sunt prezentate câteva exemple **favorabile** și **nefavorabile** de aliere:

- **Mg** – are o influență extraordinară privind îmbunătățirea caracteristicilor mecanice. Adăugarea acestuia în siluminu duce la formarea compusului Mg_2Si , a cărui solubilitate variază cu temperatura, permițând astfel aplicarea tratamentului de durificare;

- Cu – adăugat în concentrație de max 5%, durifică soluția solidă sau formează compusul Al_2Cu , care de asemenea durifică, ridică rezistența la tracțiune și proprietățile de prelucrabilitate / micșorează rezistența la coroziune;

- Zn – durifică și mărește proprietățile mecanice / înrăutățește proprietățile de turnare;

- Fe – este un component dăunător formând compusul binar $FeAl_3$ și compuși ternari $Al_{12}Fe_3Si$ și Al_9Fe_2Si care precipită direct în lichid, scăzând plasticitatea și măbind fragilitatea. Prin adăugarea de Mn, Cr, Ti, Zr, V, Ni, Co se diminuează efectul negativ al fierului, iar conținutul de fier maxim admis este de 0,1%.

- Co – micșorează efectul negativ al fierului, micșorează coeficientul de dilatare și mărește rezistența la temperaturi înalte, fiind recomandat la aliajele utilizate în fabricarea pistoanelor;

- Nichelul – îmbunătățește caracteristicile mecanice, refractaritatea și diminuează coeficientul de dilatare.

Îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și lărgirea domeniilor de utilizare a siluminurilor se realizează prin adaosuri de elemente care prin aliere formează faze intermetalice cu siliciul sau aluminiul, a căror solubilitate variabilă în stare solidă permite durificarea prin tratament termic.

Alierea siluminurilor cu până la 0,5% Mg și tratament termic de revenire, conduc la majorarea rezistenței la tracțiune cu 20%, dublarea plasticității, rezistență foarte mare la coroziune. Adaosurile mai mici de 0,5% Mg reduc tendința de apariție a retasurilor, iar adaosurile mai mari duc la creșterea duratei de omogenizare a soluției solide și conținutului de gaze. Adaosul de până la 2% Cu din aliajele ternare Al-Si-Mg mărește susceptibilitatea la tratament termic și caracteristicile mecanice, motiv pentru care sunt folosite în construcția blocului motor al motoarelor cu ardere internă și carcasei compresoarelor.

Alierea siluminurilor cu 2-6% Cu se pretează turnării în forme, prezintă caracteristici mecanice și prelucrabilitate prin așchiere ridicate. Adaosul de Mg în aliajele ternare Al-Si-Cu conduce la obținerea de caracteristici mecanice superioare, acestea fiind utilizate la piesele supuse la solicitări și temperaturi ridicate. Pentru a îmbunătăți și mai mult proprietățile, în aliajele cuaternare Al-Si-Cu-Mg se adaugă elemente de aliere greu fuzibile, și anume: W, Nb, Mo, V, Ti, Zr, Ni, Cr, etc., aceste noi tipuri de aliaje fiind folosite pentru obținerea de pistoane ale motoarelor cu ardere internă, corpuri de compresor, componente pentru instalațiile de gaz.

1.6.2 Aliajele aluminiu-cupru [26]

Aceste aliaje se împart în două grupe importante:

1. Aliaje pentru turnătorii, fiind grupate în 3 categorii:

- aliaje cu $< 5\%$ Cu, în care adesea sunt adaosuri de Mg și Mn;
- aliaje cu $7 \div 8\%$ Cu, în care adesea sunt adaosuri de Si și Fe, iar în cantități mai mici: Mn, Cr, Zn, Sn;
- aliaje cu $10 \div 14\%$ Cu, în care sunt adaosuri de Si (max. 5%), Fe (max 1,5%), Mg (max 0,3%), iar în cantități mai mici: Ni, Mn, Cr.

2. Aliaje pentru deformare plastică, fiind grupate în 3 categorii:

- aliaje cu $5 \div 6\%$ Cu, binare sau cu adaosuri de Si, Mn, Sn, Pb, Cd, Bi, Li, V, Zr;
- duraluminiu cu $4 \div 4,5\%$ Cu, $0,5 \div 1,5\%$ Mg, $0,5 \div 1\%$ Mn;
- aliaje cu Ni, precum cele de tip Y, cu 4% Cu, 2% Ni, 1,5% Mg.

În comparație cu siluminurile, proporția de eutectic din aliajele de turnătorie hipoeutectice ATCu4, ATCu8, ATCu10 este foarte mică, ceea ce le face mai puțin fragile. Călirea aliajelor cu peste 5% Cu dublează rezistența la rupere, iar îmbătrânirea artificială la 160 °C o triplează.

Proprietățile de turnare ale aliajelor Al-Cu sunt mai slabe decât ale aliajelor Al-Si, prezentând fluiditate mai scăzută, însă tendințele de a forma crăpături la cald și de absorbție a gazelor sunt mai mari. Pentru sporirea proprietăților de turnare, prin creșterea fluidității și reducerea tendinței de fisurare la cald, aliajelor Al-Cu li se adaugă Si. Dezavantajul alierii cu Si este scăderea rezistenței mecanice și a plasticității aliajului.

Mărirea durtății și a rezistenței la rupere, chiar și la temperaturi ridicate, se realizează prin alierea cu Mg, cu inconvenientul de a reduce alungirea și proprietățile de turnare.

Adaosul de Mn conduce la creșterea rezistenței la temperaturi ridicate și reduce tendința de formare a fisurilor la cald.

1.6.3 Aliajele aluminiu-magneziu

Fac parte din grupa aliajelor superușoare, prezintă rezistență mecanică și la coroziune și proprietăți de prelucrabilitate ridicate, capacitate superioară de lustruire, obținându-se suprafețe cu aspecte deosebit de frumoase după anodizare.

Realizarea pieselor turnate din aceste tipuri de aliaje este foarte dificilă din cauza proprietăților slabe de turnare, și anume: fluiditate scăzută, tendință ridicată de oxidare (atât la elaborare, cât și la turnare), tendință ridicată de formare a ratasurilor și fisurilor la cald.

Odată cu creșterea proporției de Mg din aliaj, cresc și caracteristicile mecanice, rezistența la coroziune în apa de mare sau soluții slab alcaline, capacitatea de lustruire, de asemenea scad proprietățile de sudabilitate și plasticitatea.

Aliajele cu peste 10 ÷ 15% Mg sunt foarte fragile, prezintă proprietăți de turnare foarte slabe, motiv pentru care nu sunt utilizate în practică.

Prin adaosuri de elemente chimice se produc îmbunătățiri ale anumitor proprietăți: Si – creșterea fluidității, Cu – reducerea efectului coroziunii intercrystaline, Zn – creșterea fluidității și proprietăților mecanice, Mn și Cr – creșterea rezistenței la coroziune, Ni și Zr – mărirea temperaturii de recristalizare, Ti și B modificarea structurii de turnare, Li și Be diminuarea reacțiilor de oxidare.

1.7 Utilizarea aluminiului și aliajelor de aluminiu

Proprietățile deosebite pe care le oferă acest metal, în special aliajele cu diferite elemente chimice, au făcut ca într-o perioadă istorică scurtă să devină al doilea cel mai utilizat produs din metalurgie.

Evoluția producției mondiale de aluminiu este fantastică – figura 1.27, datorită proprietăților mecanice comparabile cu ale oțelului (oțelul este cel mai răspândit produs metalurgic), în condițiile unei greutate specifice de aproximativ trei ori mai mici.

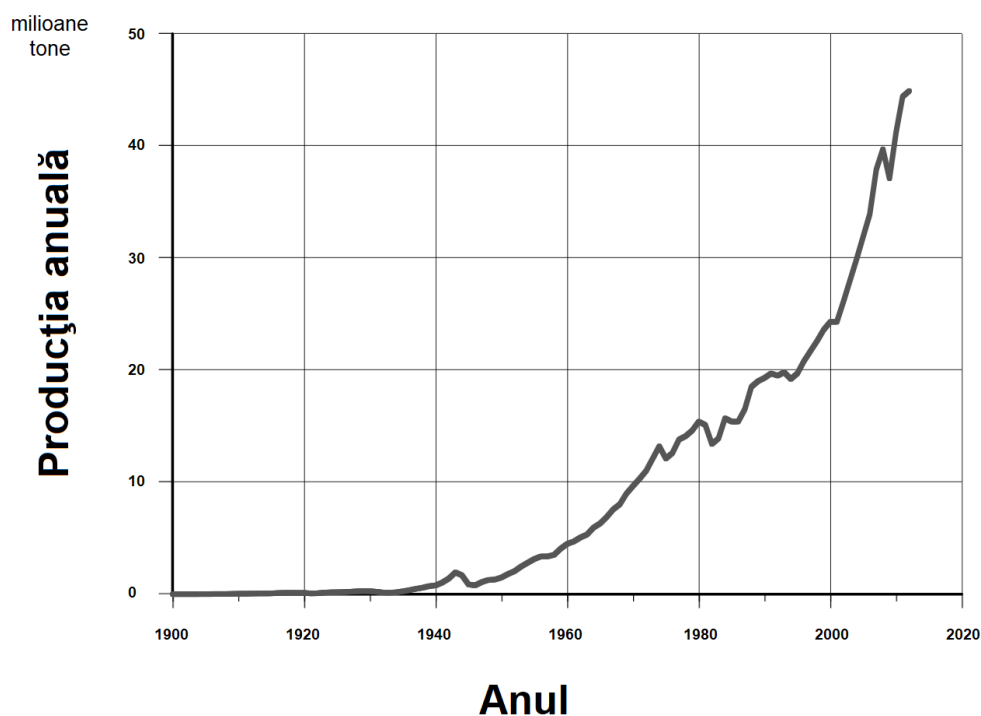


Fig. 1.27 Dezvoltarea producției mondiale de aluminiu primar [105]

Conform unui studiu realizat de *The Essential Chemical Industry – online* din anul 2016, cea mai mare pondere de aluminiu este destinată industriei de transport 36% (maritim, aerospațial, trenuri, autobuze, mașini, biciclete, trotinete, etc.), urmată de domeniul construcțiilor civile cu un procent de 26% (uși, ferestre, panouri, structuri de rezistență, fațade, etc.) și domeniul electric și electronic cu 14% (cabluri electrice, circuite electronice, etc.). În industria alimentară aluminiul este foarte răspândit privind ambalarea, protejând alimentele și băutura de razele solare și de socurile de la manipulare. În figura 1.28 este ilustrată ponderea aluminiului în diversele domenii de aplicabilitate.

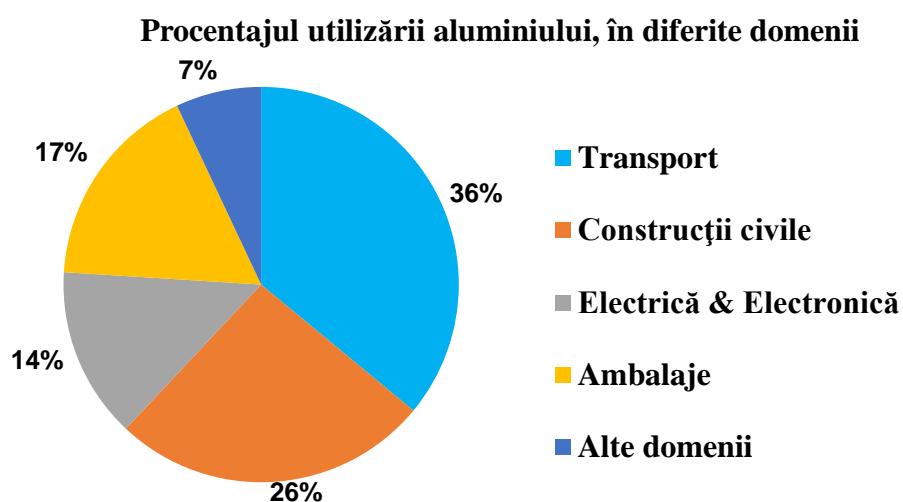


Fig. 1.28 Cota de piață a aluminiului [106]

1.7.1 Aluminiu utilizat în industria transporturilor

După cum se poate observa în graficul de mai sus, cel mai răspândit domeniu de utilizare al aluminiului este cel al mijloacelor de transport, domeniu în care întâlnim industriile: automotive, feroviar, maritim, aerospațial, stradal, etc.

Cel mai important argument care susține folosirea aluminiului în această industrie este faptul că legislațiile impun norme din ce în ce mai stricte cu privire la poluarea atmosferei, fiind necesar consumul redus de energie, iar aceasta se realizează în principal prin ușurarea structurilor acestor mijloace de transport, înlocuindu-se fierul cu aluminiul sau mai bine spus, înlocuindu-se oțelul cu aliajele de aluminiu.

Dacă între anii 1990 și 2000 masa de oțel a unui automobil era 50 ÷ 60% din masa totală, potrivit centrului de cercetare auto (CAR) [108] în prezent masa de oțel a autovehiculelor este de aproximativ 15%, iar până în 2040 se va ajunge la aproximativ 5% din masa totală.

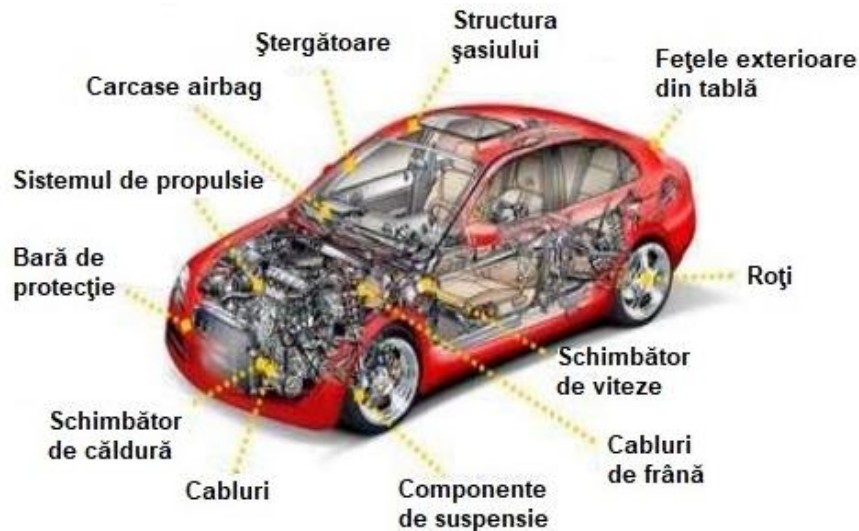


Fig. 1.29 Elemente ale autovehiculelor realizate din aluminiu [107]

În prezent producătorii de automobile de top folosesc frecvent aliajele de aluminiu în construcția acestora, la majoritatea componentelor (fig. 1.29).

Primul autovehicul de serie având caroseria realizată integral pe bază de aluminiu a fost prezentat în 2001 la salonul de la Frankfurt, fiind un automobil marca Audi, modelul A2. Pe cadrul realizat din profile extrudate de aluminiu s-au fixat panouri din aluminiu, rezultând astfel o structură suficient de rezistentă la acțiunile mecanice. Greutatea caroseriei nou confecționate era cu circa 40% mai ușoară decât precedenta realizată din oțel. Desigur, protecția anticorozivă a noii caroserii prezenta o garanție mai mare decât cea anterioară [6].

Carcasa blocului motor, chiulasa motorului, carcasa cutiei de viteze, sunt elemente foarte importante ale sistemului de propulsie, care dețin o pondere foarte importantă din masa automobilului (fig. 1.30). Aceste elemente erau construite din fontă și îngreunau foarte mult autovehiculul, reducându-i performanțele, iar în prezent sunt construite din aliaje de aluminiu și turnate sub presiune, diminuându-se astfel masa întregului autovehicul, îmbunătățindu-se astfel performanțele.



Fig. 1.30 Carcasele blocului motor, chiulasei și cutiei de viteze, din aliaje de Al

Una dintre cele mai semnificative schimbări în ultimele două decenii a fost înlocuirea caroseriei de oțel cu cea de aluminiu, la trenurile de transport în comun, reducând simțitor masa vagoanelor [109]. Trenurile de mare viteză din întreaga lume sunt construite cu caroserii din aluminiu, permițând astfel ca acestea să accelereze mult mai rapid și să dezvolte viteze mai mari (fig. 1.31, fig. 1.32).



Fig. 1.31 Caroserie de tren din Al [110]



Fig. 1.32 Tren de mare viteză [109]

Cel mai important factor în alegerea aluminiului pentru construcțiile maritime, în detrimentul fierului sau al cuprului, este rezistența deosebit de ridicată la coroziune. Aluminiul își păstrează aceleași proprietăți indiferent de condițiile climatice, nu este atacat de apă, umiditate sau sare [111].

Alte avantaje ale folosirii aluminiului în construcțiile navale sunt: sudabilitate, prelucrabilitate și rezistență ridicate, durată de viață foarte mare, nu arde ușor, nu alimentează focul neașteptat, rezistență la oboseală, este foarte ușor în comparație cu alte metale uzuale, este ecologic și complet reciclabil, necesită întreținere minimă [111].



Fig. 1.33 Structură de vapor din Al [112]



Fig. 1.34 Iaht construit din Al [113]

În figura 1.33 este ilustrată structura de rezistență a unei nave maritime, alcătuită în întregime de profile din aliaje de aluminiu, peste care se adaugă foi de tablă pentru etanșarea interiorului de sub punte, iar în figura 1.34 este un iaht cu întreaga masă de rezistență și carenaje construite din aluminiu.

Industria aerospațială este cea care a dat startul utilizării aluminiului, datorită acestui domeniu s-au avansat cercetările atât de repede în știința și ingineria aluminiului și aliajelor pe bază de aluminiu [114].

„Aluminiul a fost folosit în aviație înainte ca avioanele să fie inventate”. La sfârșitul secolului al XIX-lea, contele Ferdinand Zeppelin a folosit aluminiu pentru a realiza cadrele celebrului său dirijabil Zeppelin (fig. 1.35) [121].

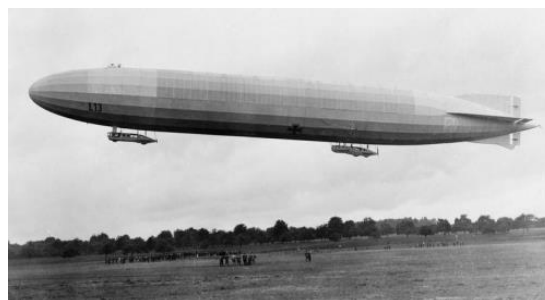


Fig. 1.35 Dirijabilul Zeppelin

Aluminiul este ideal pentru fabricarea aeronavelor deoarece este ușor și rezistent, permițând ca acestea să transporte mai multă greutate și să devină mai eficiente. În plus, rezistența ridicată a aluminiului la coroziune oferă siguranță aeronavei și pasagerilor.

În 1915, designerul de aeronave german Hugo Junkers a construit primul avion complet metalic din lume, monoplanul Junkers J1– fig. 1.37. Fuzelajul său a fost realizat dintr-un aliaj de aluminiu care a cuprins cupru, magneziu și mangan [123].



Fig. 1.37 Monoplanul Junkers J1

Perioada dintre Primul Război Mondial și Al Doilea Război Mondial a fost cunoscută sub numele de Epoca de Aur a Aviației.

În anii 1920, americanii și europenii au concurat în cursele cu avioane, ceea ce a dus la inovații în proiectare și performanță. Biplanele au fost înlocuite cu monoplanuri mai

În timpul celui de-al Doilea Război Mondial, aluminiul a fost necesar pentru numeroase aplicații militare, în special construcția de rame de avioane, ceea ce a determinat creșterea producției de aluminiu.

Toate navele spațiale moderne sunt compuse din 50% până la 90% aliaj de aluminiu. Aliajele de aluminiu au fost utilizate pe scară largă la nava spațială Apollo, la stația spațială Skylab, la navele spațiale și la stația spațială internațională.

1.7.2 Aluminiiu utilizat în industria construcțiilor civile

În anii 1920 alumiuniul a fost folosit pentru prima dată în acest domeniu, realizându-se aplicații decorative și de design. Puțin mai târziu, în 1930, au fost confecționate structuri de rezistență din alumiuniu pentru celebrul Empire State Building, inclusiv faimoasa turlă – fig. 1.40, înlocuind cu succes structurile din beton și beton armat.

În prezent, din punct de vedere energetic, alumiuniul este recunoscut ca unul dintre cele mai eficiente și mai durabile materiale de construcție. Se preconizează la nivel mondial o pondere între 50% și 85% alumiuniu reciclat provenit din construcții.

Proprietățile superioare față de cele ale lemnului au făcut ca ușile și ferestrele locuințelor să fie confecționate din alumiuniu, fiind mult mai ușor de întreținut [115].

De asemenea, caloriferele din fontă au fost înlocuite de cele din alumiuniu, acestea din urmă fiind mai ușor de manevrat, au aspect mai plăcut, transmit căldura mai repede, însă dezavantajul este că cedează căldura mult mai rapid.



Fig. 1.40 Empire State Building

Construcțiile civile care au structurile de rezistență realizate din alumiuniu sunt foarte luminoase, deoarece permit utilizarea ferestrelor de mari dimensiuni, îmbinarea dintre structură și tâmplărie fiind confortabilă în execuție. Inclusiv construcțiile de tip hală, pe lângă stâlpii de rezistență din profile alumiuniu, folosesc panouri sandwich cu straturile exterioare din tablă de alumiuniu – fig. 1.41.

Din punct de vedere estetic, construcțiile cu elementele decorative (de interior cât și de exterior) produse din alumiuniu sunt o splendoare în adevăratul sens al cuvântului. Un astfel de exemplu este arhitectura terminalului aeroportului din Farnborough – Marea Britanie, arhitectură care se integrează perfect cu designul aeronavelor [116].



Fig. 1.41 Aeroportul Farnborough, UK

1.7.3 Aluminiu utilizat în fabricarea ambalajelor [117, 118]

Aluminiul este un material de ambalare versatil, cu o capacitate foarte bună de a fi format în orice formă, păstrându-și totodată calitatea de a proteja, iar faptul că este complet reciclabil face ca acesta să fie unul dintre cele mai utilizate materiale de ambalare din lume.

Probabil nu există persoană pe mapamond care să nu cunoască celebra doză de suc, Coca Cola, confecționată din aluminiu (fig. 1.42), fie în varianta veche începând cu anul 1960, fie în varianta modernă apărută în anul 2000. De asemenea, majoritatea cutiilor de conserve sunt confecționate din aliaje pe bază de aluminiu, având proprietăți multiple.



Fig. 1.42 Doza Coca Cola, din aluminiu

Utilizarea aluminiului în materialele de ambalare oferă foarte multe avantaje:

- conductivitate termică foarte bună;
- transfer rapid de căldură (de 2,4 ori mai rapid în comparație cu fierul);
- aspect comercial foarte bun datorită suprafeței strălucitoare și posibilității de inscripționare, desenare, personalizare;
- grosimea minimă a unei folii de aluminiu este de 4 μm ;
- costuri mai scăzute de transport datorită masei reduse comparativă cu alte metale;
- are rolul de barieră completă pentru lumină, gaze, umiditate, căldură, miros și microorganisme;
- reciclarea aluminiului necesită doar 5% din energia necesară pentru producere.

O imagine reprezentativă cu câteva dintre produsele comerciale care utilizează ambalaje din aluminiu este atașată alături, în figura 1.43, acestea fiind de la produse alimentare, băuturi, până la ambalaje de produse farmaceutice și de îngrijire personală.



Fig. 1.43 Ambalaje pe bază de aluminiu

1.8 Concluzii privind aliajele de aluminiu

Deși are o istorie destul de scurtă, de doar două secole, aluminiul este cel mai răspândit metal din scoarța terestră, devenind rapid al doilea cel mai utilizat produs metalurgic de pe glob, după oțel.

Tehnica de obținere a aluminiului este destul de complexă, acesta nefiind găsit în natură în stare pură, realizându-se în general prin două procese succesive de electroliză. Aluminiul odată obținut și prelucrat este foarte ușor de reciclat, fiind necesară doar 5% din energia consumată pentru procesul de obținere. De asemenea, emisiile de gaze cu efect de seră provenite din reciclarea aluminiului sunt de doar 15% din emisiile provenite din obținerea aluminiului primar [6].

Multiplele avantaje pe care le oferă aluminiul și aliajele acestuia au făcut ca răspândirea acestuia să fie foarte mare, de la industriile auto, feroviară, aeriană și maritimă, domeniul construcțiilor civile, electrică și electronică, până la industria alimentară și farmaceutică.

Principalele proprietăți ale aluminiului și aliajelor din aluminiu sunt: rezistența mecanică la tracțiune $70 \div 100$ MPa pentru aluminiu și $150 \div 450$ MPa pentru aliaje, masa specifică $2,7 \text{ g/cm}^3$ pentru aluminiu și $2,6 \div 2,85 \text{ g/cm}^3$ pentru aliaje, punct de topire $660 \text{ }^\circ\text{C}$ pentru aluminiu și $570 \div 655 \text{ }^\circ\text{C}$ pentru aliaje, alungirea $20 \div 45\%$ pentru aluminiu și $0,5 \div 18\%$ pentru aliaje și duritatea HB $250 \div 400$ MPa pentru aluminiu și $500 \div 1300$ MPa pentru aliajele aluminiului.

Dacă în industria de automobile este utilizat atât pentru elemente de caroserie, roți, cabluri, cât și în componența motoarelor și transmisiilor, în lucrarea de față se va încerca utilizarea aliajelor de aluminiu pentru componente ale sistemului de remorcare, mai exact pentru realizarea cârligului de remorcare ca alternativă a celui realizat din oțel.

CAPITOLUL II

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL SISTEMELOR DE REMORCARE

2.1 Evoluția sistemului de tractare din cazul autovehicul - remorcă

Înainte de apariția vehiculelor terestre autopropulsate, evident au existat vehiculele transportate de om, pentru ca mai apoi să se dezvolte cele cu tracțiune animală. Nevoia de a transporta diferite materiale și hrană, pe distanțe lungi, a condus către apariția primului tip de vehicul – *targa*, pentru ca mai apoi, necesitatea tot mai mare i-a condus pe oameni spre îmblânzirea animalelor pentru a le folosi la tractarea celui de-al doilea tip de vehicul, *căruța*, acestea apărând încă din cele mai vechi timpuri.

În anul 1672, Ferdinand Verbiest, matematician, astronom și misionar, apropiat al împăratului Chinei de la acea vreme, a dezvoltat primul autovehicul, însă nu era capabil să transporte un conducător sau pasageri, acesta fiind prea mic [73].

Cel dintâi autovehicul utilizat pentru transport a fost realizat în 1769, datorită necesității armatei franceze de a deplasa armamentul. Inginerul militar Nicolas-Joseph Cugnot a creat un triciclu (două roți în spate și una în față) care era propulsat de un motor cu aburi, cu doi cilindri. Autovehiculul era construit din lemn, manevrat de două persoane, iar cazanul era situat în partea frontală [74, 75].

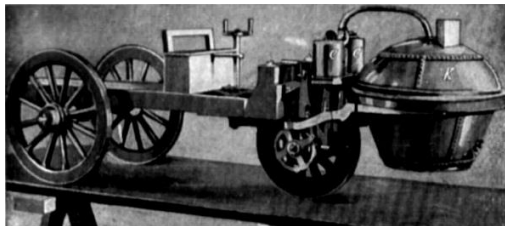


Fig. 2.1 Primul autovehicul, Nicolas-Joseph Cugnot, 1769 [73]

Primul motor cu ardere internă a apărut în anul 1806 și a fost creat de inginerul elvețian François Isaac de Rivaz, utilizând drept combustibil un amestec de hidrogen și oxigen [75].

Motorul Otto (în patru timpi) este un motor cu ardere internă și a fost realizat de inginerul german Nikolaus August Otto în anul 1854 [76]. Același inventator german a dezvoltat și motorul pe bază de cărbune, asemănător motorului actual pe benzină, în 1862;

motorul Diesel este conceput și creat de germanul Rudolf Diesel în anul 1892, utilizând la început drept combustibil praf de cărbune, pentru ca mai apoi să utilizeze ulei de alune [77].

Evoluția motorului electric începe în anul 1828, atunci când maghiarul Ányos Jedlik a inventat un motor primitiv și l-a pus în funcțiune pe un vehicul în miniatură. În 1834 fierarul american Thomas Davenport a inventat primul motor electric de curent continuu, iar patru ani mai târziu, în 1838, scoțianul Robert Davidson construia o locomotivă ce atingea 6 km/h. Primul vehicul electric ce depășește 100 km/h a fost realizat de belgianul Camille Jenatzy, în 1899, iar autovehiculul avea o formă aerodinamică asemănătoare unui obuz [75].

Inventatorul automobilului modern este considerat germanul Karl Benz, care în 1886 a obținut acest patent. Acesta a fost și cel care a realizat primul motor folosind apa pentru răcire, iar transmisia era realizată cu lanțuri de bicicletă și curele [78].

Prima producție de automobile în serie fost realizată de același Karl Benz, în 1888 [10], iar de atunci, cele mai importante inovații la nivelul automobilului au fost:

- 1894 – *Dunlop* – apare roata cu anvelopă de cauciuc și cameră de aer [10];
- 1894 – Louis-Rene Panhard & Emile Levassor – dezvoltă prima cutie de viteze cu 3 trepte, design de bază utilizat și astăzi [79];
- 1914 – Fred Duesenberg – inventează frâna hidraulică [80];
- 1924 – Aurel Persu – dezvoltă primul automobil cu profil aerodinamic având roțile integrate în caroserie [81].

Nevoia tot mai mare de a transporta obiecte și persoane cu același vehicul a condus spre apariția remorcii. Remorca este un vehicul ce nu are capacitatea de a se autopropulsa, fiind nevoie de un alt vehicul tractant pentru a o deplasa. Se poate spune că istoria remorcii a început odată cu cea a vehiculului, considerându-se astfel căruța ca fiind remorcă, trasă de animale, sau căruciorul tractat de oameni.

În prezent, formele și destinațiile remorcilor sunt foarte variate și se pot întâlni de exemplu: tractoare care tractează nu doar remorci clasice, dar și căruțe – fig. 2.2; biciclete care tractează cărucioare pentru transport marfă, dar și pentru copii – fig. 2.3; trenul, tramvaiul și metroul sunt formate din locomotive, de care se leagă vagoane cu rol de remorcă; camioanele sunt de două tipuri: alcătuite din cap tractor plus semiremorcă cu lungimea de aproximativ 13 metri sau formate dintr-un vehicul trăgător cu o remorcă pe același șasiu de care se cuplează una, două sau mai multe remorci, cu puntea din față articulată, având lungimile de aproximativ 7 metri fiecare – fig. 2.4.



Fig. 2.2 Tractor cu remorcă / căruță [82, 83]



Fig. 2.3 Bicicletă cu cărucior pentru produse / copii [84, 85]



Fig. 2.4 Camion cu semiremorcă / remorcă [35]



Fig. 2.5 Roluri și tipuri de remorci [35]

De asemenea, remorcile și semiremorcile pentru autovehicule sunt foarte variate și au o mulțime de destinații, nu doar de a transporta mărfuri sau persoane. Rolurile atribuite remorcilor cele mai întâlnite sunt: rulotă, platformă cu prelată, fără prelată, generator de curent electric, cisternă, basculantă, betonieră, transport frigorific, magazin, nacelă, transport animale, etc. – fig. 2.5.

Semiremorcile sunt acele remorci care sunt lipsite de osia din față, în timpul funcționării ele sprijinindu-se pe partea din spate a autovehiculului. Pentru autoturisme, cele mai frecvente sunt semiremorcile, remorca cu două osii fiind întâlnită cel mai des la platforme sau acolo unde greutatea este ridicată, necesită echilibru la staționare și / sau se impune acest lucru din diverse considerente.

Datorită regimului din timpul funcționării a ansamblului autoturism – remorcă, cuplarea dintre aceste două vehicule trebuie să fie foarte rezistentă, atât la solicitări dinamice cât și statice, dar și la influența factorilor chimici și meteorologici.

2.2 Structura sistemelor de remorcare

Legătura dintre autovehicul și vehiculul tractat se realizează cu un sistem de remorcare complex, printre cele mai importante componente ale acestui sistem fiind cârligul de remorcare; în literatura străină *towball* sau *towbar* sunt denumirile ce se utilizează pentru cârlig de remorcare, termenul *hook* fiind pentru cârligul utilizat în domeniul construcțiilor civile.

Forma generală a sistemului de remorcare este prezentată în figura 2.8, aceleași componente întâlnindu-se la toate sistemele pentru autoturisme, dar cu forme diferite.

Componenta sistemelor de remorcare este aproximativ similară la toate modelele de autovehicule, diferențele putând fi următoarele: flanșele de prindere pe șasiu pot avea mai multe forme sau pot fi din două sau mai multe părți, conectate între ele fie prin sudură, fie prin șuruburi cu piulițe; distanța dintre flanșele de prindere ale cârligului poate varia, asta în funcție de tipul de cârlig de remorcare; bara de rezistență poate fi îndoită în două sau patru puncte, în funcție de șasiu, pentru a ocoli diverse componente ale acestuia; **cârligul de remorcare poate avea o mulțime de forme, pentru a nu se suprapune peste bara de protecție din spate a automobilului, dar și în funcție de modelul de cârlig, clasificare ce este prezentată în continuarea capitolului.**

Flanșele se realizează prin tăiere cu laser, utilizând semifabricat din tablă de diverse dimensiuni, iar îndoirea, acolo unde este cazul, se prelucrează pe mașini speciale de îndoit tablă, cu cuțite cu raze specifice, solicitate de proiectant.

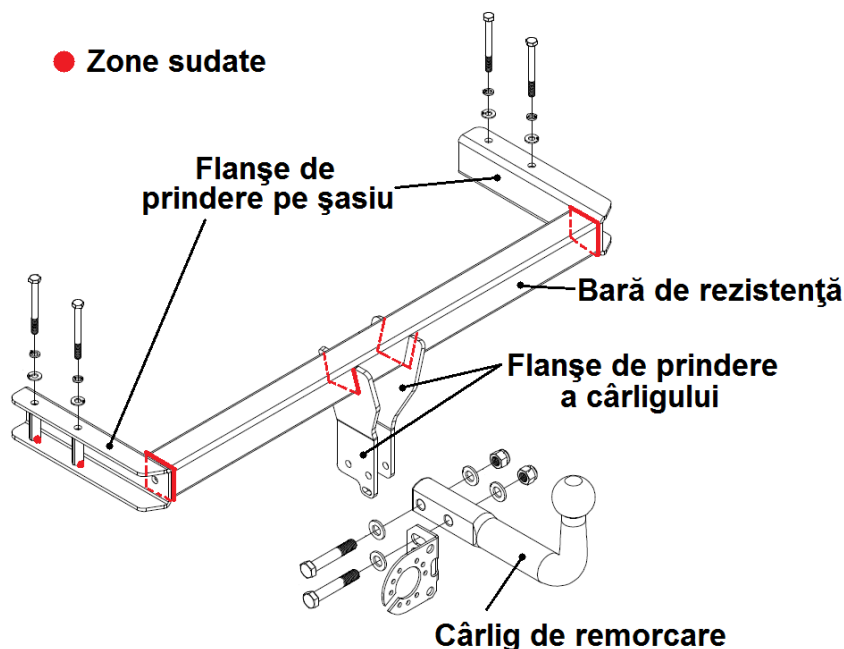


Fig. 2.8 Structura sistemului de remorcare utilizat la autoturisme [36]

2.3 Varietăți de sisteme de remorcare utilizate la autoturisme

Clasificarea cârligelor de remorcare este destul de complexă și se poate realiza în funcție de mai mulți factori, cum ar fi: de destinație, de complexitate, de tehnologia de fabricare, de gabaritul remorcilor, etc. **Se consideră că cel mai important criteriu de clasificare este în funcție de tipul cârligelor [35], iar în lucrarea de față se prezintă o amplă clasificare în funcție de acest criteriu.**

Privind criteriul de clasificare în funcție de tipul cârligului de remorcare, există următoarea divizare:

1. cârlig de remorcare cu filet în partea inferioară – fig. 2.9;
2. cârlig de remorcare simplu – fig. 2.11, fig. 2.12;
3. cârlig de remorcare detașabil – fig. 2.17, fig. 2.18;
4. cârlig de remorcare retractabil – fig. 2.19.

Exemplificarea și detalierea fiecărui tip de cârlig este importantă, deoarece acestea trebuie alese corespunzător fiecărui model de autovehicul. Necesitatea utilizatorilor este și aceasta încă un motiv în echiparea autoturismului cu sistem de remorcare.

2.3.1 Cârlig de remorcare cu filet în partea inferioară

În literatura de specialitate și comerțul extern acest tip de cârlig este cunoscut sub numele de *hitch ball* și a fost conceput inițial pentru a fi utilizat la ATV-uri, pentru ca mai apoi să fie utilizate și la autoturisme – fig. 2.9.



Fig. 2.9 Cârlig de remorcare cu filet – hitch ball [88, 89]

Construcția hitch ball-ului este foarte simplă, necesitând pentru semifabricat o bară din oțel S355 cu diametrul de peste 50 mm, pe strung realizându-se prima dată filetul, apoi partea sferică. După ce se finalizează strunjirea, se continuă cu două frezări între sferă și partea filetată, pentru a permite contra-filetarea piuliței. Ultima operație tehnologică este marcarea, operație realizată cu ajutorul unei prese hidraulice, marcându-se respectarea standardului de dimensiune „ISO 50” pe partea superioară plată a sferei.

Acest sistem de remorcare, prin simplitatea construcției, tehnologiei și a materialelor semifabricate uzuale, asigură un preț final accesibil și poate fi adaptat pentru orice tip de automobil, indiferent de marcă sau model; în general cârligul tip hitch ball se utilizează la autovehicule de teren și autoutilitare.

2.3.2 Cârlig de remorcare simplu



Fig. 2.11 Cârlig de remorcare cu flanșă [35]

Cârligele de remorcare simple sunt cele mai întâlnite la autovehicule, datorită prețului scăzut pe care îl prezintă. În literatura de specialitate se găsesc sub denumirea de *towbar* sau *towball*, iar cele mai multe dintre acestea sunt în formă de L și U. Un al treilea tip de cârlig simplu este cel cu flanșă, cu rezistență mai ridicată decât cele în formă de L și U, (fig. 2.11) și se utilizează cu precădere la autoutilitare și autocare, datorită remorcilor mai grele pe care se presupune că le tractează.

Cele mai întâlnite cârlige de remorcare utilizate la autoturisme sunt cele în formă de L (fig. 2.12). **Proiectarea cârligelor de remorcare pornește odată cu stabilirea sarcinii maxime pe care o poate tracta autovehiculul, însă dimensionarea acestuia trebuie să țină cont și de bara de protecție din spate, pe care trebuie să o ocolească, astfel se consideră lungimea L ca fiind distanța dintre centrul sferei și mijlocul distanței dintre cele două găuri, iar înălțimea H este distanța dintre centrul sferei și axa care trece printre cele două găuri (fig. 2.12). După cum s-a specificat în subcapitolul precedent, diametrul sferei cârligului este de 50 mm, conform standardului.**

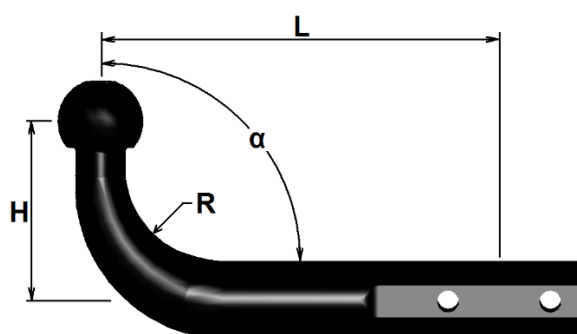


Fig. 2.12 Cârlig de remorcare în formă de L [35]

Pe lângă dimensiunile amintite, trebuie specificat faptul că aceste cârlige se găsesc cu raza de îndoire R cuprinsă între 25 și 120 mm (fig. 2.13), unghiul de îndoire α cu valori între 67° și 150° (fig. 2.14), dar și cu două îndoiri, ambele pe interior, sau una pe interior și cealaltă pe exterior (fig. 2.15) [35].

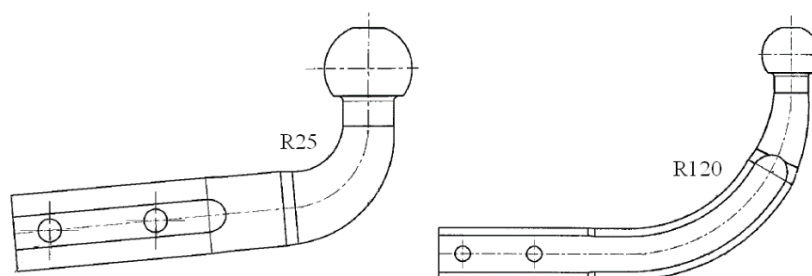


Fig. 2.13 Cârlige de remorcare în formă de L cu raze de îndoire diferite [35]

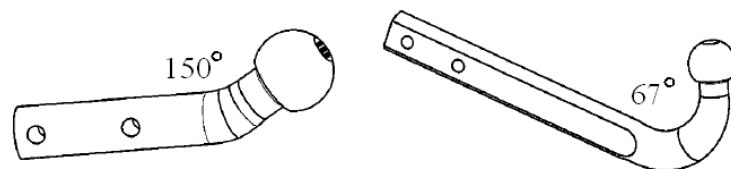


Fig. 2.14 Cârlige de remorcare în formă de L cu unghiuri de îndoire diferite [35]

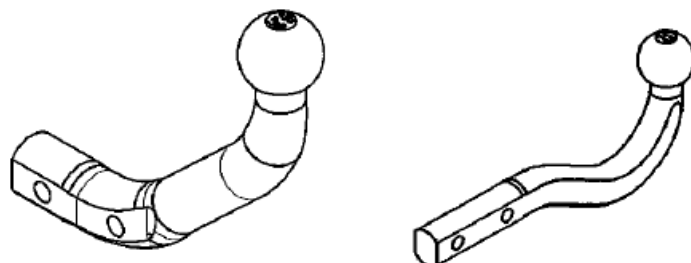


Fig. 2.15 Cârlige de remorcare în formă de L cu două îndoiri [35]

2.3.3 Cârlig de remorcare detașabil

În unele state, spre exemplu în Italia și Olanda, din considerente de siguranță pentru integritatea celorlalte autoturisme, este interzisă participarea în trafic a unui autovehicul cu cârlig de remorcare, fără ca acesta să tracteze și o remorcă. Datorită acestui fapt, pentru ca proprietarii să nu mai fie nevoiți de fiecare dată să demonteze cârligul din șuruburi, s-au dezvoltat cârligele de remorcare detașabile (fig. 2.17), care printr-o simplă rotire a unui component de pe acestea, se pot demonta și depozita în portbagajul autoturismului.



Fig. 2.17 Cârlig de remorcare detașabil [35]

În literatura de specialitate și comerț, acest tip de cârlig poartă denumirea de *TDS*, prescurtare de la englezescul **Towball Detachable System**.

2.3.4 Cârlig de remorcare retractabil

Inovarea în acest domeniu o reprezintă cârligele de remorcare retractabile (fig. 2.19), care prezintă avantajul confortului utilizatorilor. Acest tip de cârlige este foarte interesant, având un mecanism complex ce permite retragerea lor în interiorul barei de protecție a autoturismului, atunci când nu tractează o remorcă, fără a mai fi nevoie de a fi depozitat de către beneficiar în portbagajul automobilului.



Fig. 2.19 Cârlig de remorcare retractabil [35]

Tabelul 2.1 Avantajele și dezavantajele diferitelor tipuri de cârlige de remorcare

| Tip cârlig de remorcare | Avantaje | Dezavantaje |
|--|--|---|
| Hitch ball | <ul style="list-style-type: none"> - posibilitatea demontării împotriva furtului și legislațiilor care nu permit circularea fără remorcă; - timp scurt de demontare; - preț scăzut; | <ul style="list-style-type: none"> - necesitatea a două chei fixe pentru montare și demontare; - necesitatea spațiului pentru depozitare; |
| Cârlig simplu (fixat cu șuruburi) | <ul style="list-style-type: none"> - posibilitatea demontării împotriva furtului și legislațiilor care nu permit circularea fără remorcă; - preț scăzut; | <ul style="list-style-type: none"> - necesită două chei fixe pentru montare și demontare; - necesită timp pentru (de)montare; - necesită spațiu pentru depozitare; |
| Cârlig simplu (sudat) | <ul style="list-style-type: none"> - imposibil de a fi fraudat, decât prin distrugere; - preț scăzut; | <ul style="list-style-type: none"> - imposibil de circulat în regiunile unde legislația nu permite accesul vehiculelor cu cârlig de remorcare și fără a tracta o remorcă; - imposibil de înlocuit, decât cu întregul ansamblu de remorcare; |
| Cârlig detașabil | <ul style="list-style-type: none"> - posibilitatea demontării împotriva furtului și legislațiilor care nu permit circularea fără remorcă; | <ul style="list-style-type: none"> - necesită spațiu pentru depozitare; - preț relativ ridicat; |
| Cârlig retractabil | <ul style="list-style-type: none"> - imposibil de a fi sustras, decât prin distrugere; - design foarte modern; - nu ocupă spațiu util; | <ul style="list-style-type: none"> - preț relativ ridicat în cazul celor cu acționare mecanică; - preț foarte ridicat în cazul celor cu acționare electrică; |

2.6 Scopul și obiectivele tezei de doctorat

Scopul tezei de doctorat îl constituie formularea conceptului și a metodelor de analiză în vederea stabilirii soluțiilor tehnice inovative pentru sistemele de remorcare a autovehiculelor, pe bază de materiale alternative, în speță compozite și aliaje de aluminiu.

În acest context, se analizează soluțiile existente, iar apoi materialele compozite și aliajele de aluminiu specifice care trebuie să asigure cerințele și standardele internaționale în vigoare. În esență, actualmente, constructorii auto au introdus materialele compozite și aliajele de aluminiu atât în alcătuirea caroseriei și șasiului, cât și în componența pieselor motorului, pentru a diminua masele și a crește performanțele motoarelor, motiv pentru care, conținutul lucrării face referire la implementarea compozitelor și aliajelor în ansamblul de remorcare.

Un alt beneficiu important al utilizării materialelor alternative, este acela că, având masele mai scăzute decât cele ale materialelor clasice, contribuie la reducerea nivelului de noxe produse de motorul termic din dotarea autovehiculelor.

Obiectivele lucrării sunt în concordanță cu scopul acesteia, pe baza unor analize parametrice și determinări experimentale, având la bază o documentare minuțioasă realizată în prealabil, atât în lucrări de specialitate cât și în mediul online.

Baza de plecare spre această cercetare este un sistem de remorcare utilizat la autovehiculul Audi Q5, care este modelat și încărcat în mediul virtual, utilizând softul Inventor pentru modelare, dar și pentru analiza cu metoda elementelor finite.

Cercetările teoretice și experimentale:

- execuția ansamblului de remorcare pentru studiu;
- testarea ansamblului de remorcare conform cerințelor din standardele în vigoare;
- utilizarea de semifabricate conform standardelor solicitate de proiectant;
- prelucrarea și sudarea componentelor, cu respectarea standardelor pentru aceste operații;
- testarea propriu-zisă a ansamblului pe un stand de încercare la 2×10^6 cicluri (testul Carlos, realizat la firma Westfalia, Germania, în colaborare cu firma Terwa, Brașov);
- proiectarea și executarea de dispozitive necesare tehnologiei de fabricare a cârligului de remorcare din materiale compozite; realizarea cârligului de remorcare din fibre de carbon (firma S.C. Compozite S.R.L., Brașov);

- proiectarea și executarea de dispozitive necesare tehnologiei de fabricare a cârligelor de remorcare din aliaje de aluminiu; realizarea cârligelor de remorcare din aliaje de aluminiu (firma S.C. Electroprecizia Electrical Motors S.R.L., Săcele, Brașov)
- proiectarea și executarea unui dispozitiv de prindere a cârligului de remorcare, pe o mașină de încercare a rezistenței mecanice prin tracțiune (Laborator Rezistența Materialelor – Universitatea Transilvania, Brașov);
- testarea cârligelor de remorcare realizate din oțel, materiale compozite și respectiv din aliaje de aluminiu;
- realizarea epruvetelor și determinarea tensiunilor și a deformațiilor acestora la tracțiune și încovoiere, inclusiv pentru modelele realizate din oțel, fibre de carbon și aliaje de aluminiu (Laborator Rezistența Materialelor – Universitatea „Transilvania”, Brașov);
- studii și analize numerice (MEF);
- studii și analize utilizând metoda fotoelastică de determinare a tensiunilor dintr-un model al cârligului de remorcare confecționat din plexiglas (Laborator Rezistența Materialelor – Universitatea „Lucian Blaga”, Sibiu).

CAPITOLUL III

METODE DE ANALIZĂ ANALITICĂ A STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE PRIVIND SISTEMUL DE REMORCARE

Cercetările teoretice din cadrul acestui capitol fac referire la efectuarea unui calcul clasic, cu trimitere la o vastă bibliografie din domeniul rezistenței materialelor; odată cu acest al III-lea capitol începe și partea de cercetare dedicată sistemului de remorcare studiat în lucrare.

Pentru determinarea tensiunilor din materiale este nevoie de dimensiunile atât a ansamblului de remorcare, cât și a secțiunilor fiecărui component. Pentru determinarea deformațiilor apărute este nevoie a se cunoaște materialul din care este confecționat sistemul de remorcare. Bineînțeles, un factor foarte important în stabilirea tensiunilor și deformațiilor îl constituie forța la care este solicitat ansamblul.

3.1 Prezentarea sistemului de remorcare luat în analiză

Sistemul de remorcare ales pentru a se realiza cercetările teoretice și experimentale este cel utilizat pentru echiparea autoturismelor Audi Q5 (fig. 3.1), care sunt dotate cu cârlige de remorcare simple, fixate cu două șuruburi de flanșele centrale de pe grinda de rezistență.



Fig. 3.1 Audi Q5 [101]

Pentru a fixa sistemul de remorcare pe șasiul automobilului este nevoie de a se dezambla bara de protecție din spate, iar apoi a se asambla la loc. Prinderea sistemului de remorcare de structura autovehiculului se realizează cu patru șuruburi M10 x 100 și 4 piulițe M10. Toate aceste operații, cât și ordinea lor, sunt cuprinse în imaginea din figura 3.2.

După montarea grinzii transversale și a barei de protecție, ultima operație (operația 7, fig. 3.2) constă în fixarea cârligului de remorcare și a legăturii electrice. Prinderea cârligului se realizează cu două șuruburi M12 x 70 și două piulițe M12.

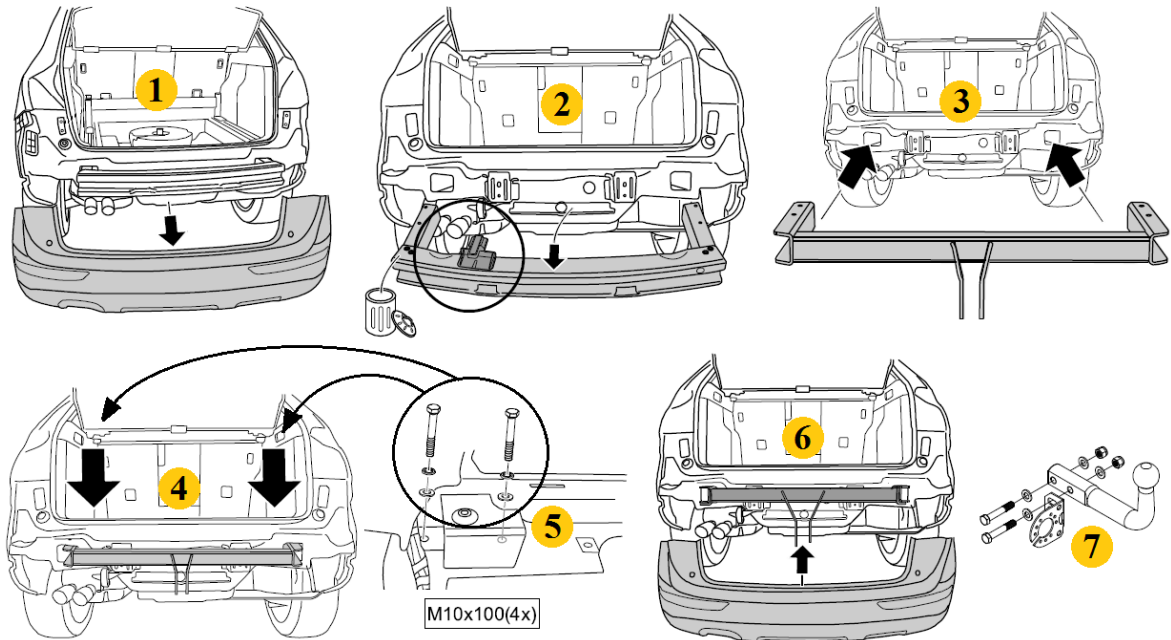


Fig. 3.2 Operațiunea de montaj a sistemului de remorcare

Dimensiunile, necesare studiului, ale sistemului de remorcare pentru care se efectuează calcule de rezistență mecanică sunt prezentate în figura 3.3, iar materialele utilizate în fabricație sunt echivalente cu **S355J2** și grupa 12.9 pentru șuruburile de prindere.

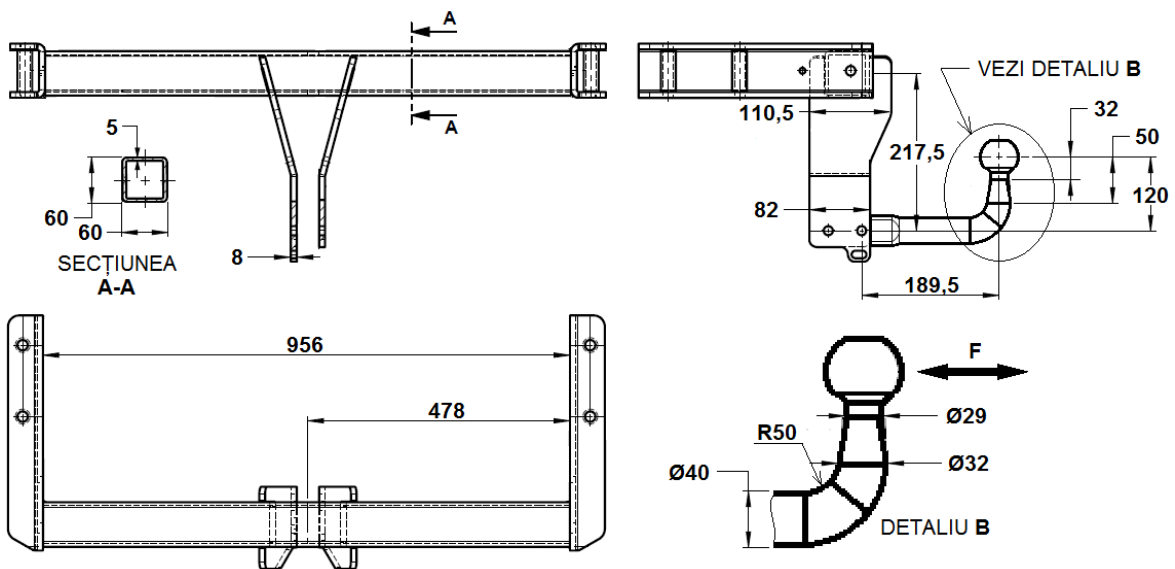


Fig. 3.3 Dimensiunile sistemului de remorcare

În continuarea lucrării se va vorbi foarte mult despre anumite zone ale cârligului de remorcă, prin urmare, în figura 3.4 se definește constituirea pentru a facilita interpretarea.

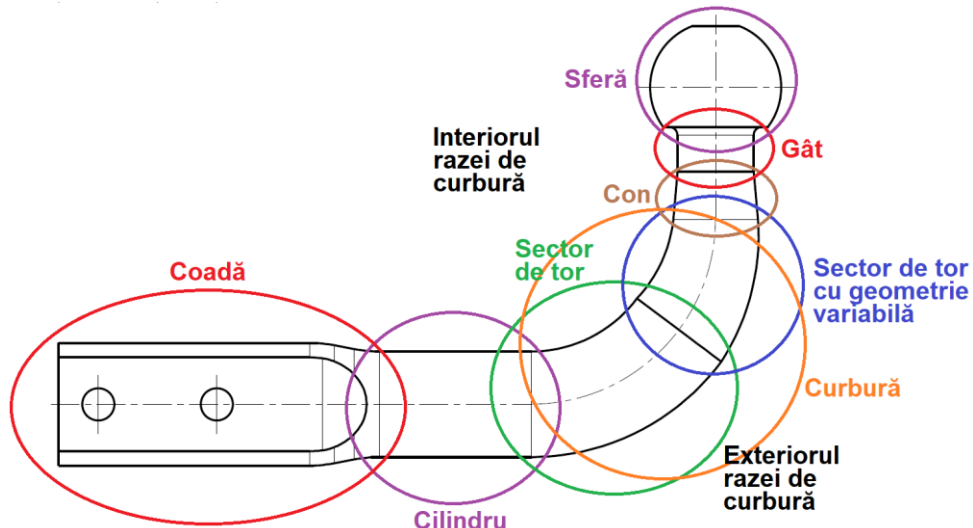


Fig. 3.4 Zone ale cârligului de remorcă

Conform precizărilor anterioare, pentru determinarea deformațiilor este nevoie de specificarea materialului din care se fabrică sistemul, iar pentru S355J2 se cunosc:

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \sigma_e = 355 \text{ [N/mm}^2\text{]} \text{ și } \sigma_r = 470 \div 630 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

3.2 Starea de tensiuni și deformații

În figura 3.5 este realizată o schiță simplificată a figurii 3.3, care ajută la efectuarea calculelor clasice ale tensiunilor și deformațiilor.

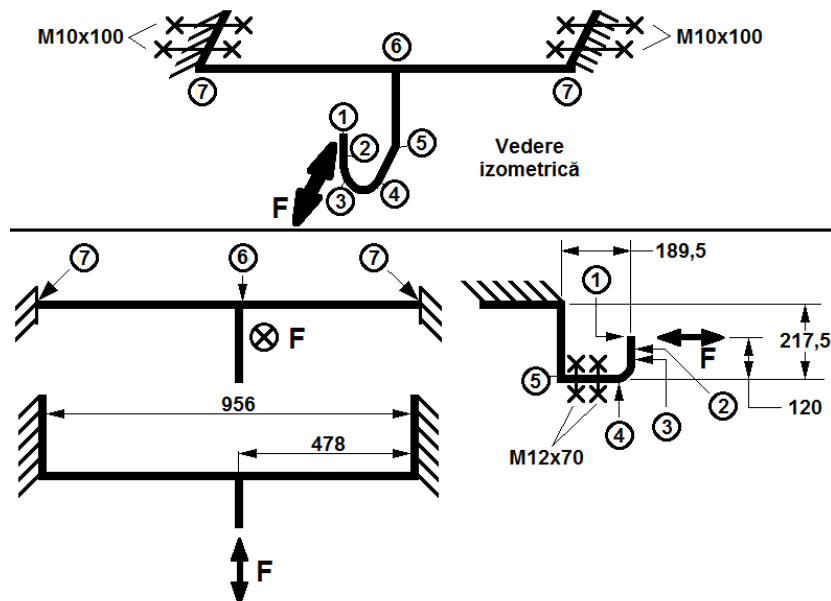


Fig. 3.5 Schiță simplificată a sistemului de remorcă studiat

3.2.1 Condiții limită

După cum este evidențiat în figura 3.5, sistemul de remorcare se consideră a fi încastrat de șasiul autovehiculului prin intermediul celor 4 șuruburi M10 x 100. De asemenea, cârligul de remorcare se consideră a fi încastrat pe structura sistemului de remorcare, datorită prinderii prin intermediul celor 2 șuruburi M12 x 70.

Forța F este paralelă cu solul și se consideră a fi îndreptată spre centrul sferei cârligului de remorcare, înspre autovehicul. Această forță provine de la legătura mecanică dintre remorcă și autovehiculul trăgător, iar valoarea forței maxime se calculează în timpul frânării bruște, în funcție de masa remorcii și valoarea decelerației ansamblului autovehicul – remorcă [37]. Este de interes masa remorcii deoarece în timpul frânării remorca tinde să împingă autovehiculul, datorită inerției, atunci când remorca nu este prevăzută cu sistem propriu de frânare. O forță similară apare și atunci când autovehiculul accelerează, remorca tinzând să țină pe loc autovehiculul, forța fiind îndreptată în sens invers față de cea din figurile 3.3 și 3.5. Forța exercitată de remorcă în timpul frânării este mai mare decât cea de la demarare, deoarece decelerația de la frânare este mai mare decât accelerația ansamblului autovehicul – remorcă.

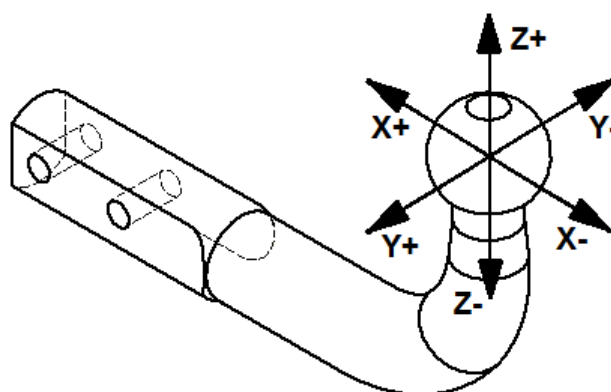


Fig. 3.6 Sensul și direcția forței F din timpul rulării ansamblului autovehicul – remorcă

În realitate forța exercitată de remorcă asupra cârligului de remorcare, în timpul mersului, este pe toate cele 3 direcții, datorită următoarelor considerente, fig. 3.6:

- unghiul variabil, în plan orizontal, dintre axele longitudinale ale autovehiculului și ale remorcii, lucru întâlnit pe drumurile cu viraje, introduce forțe pe direcțiile X și Y ;
- unghiul variabil, în plan vertical, dintre axele longitudinale ale autovehiculului și ale remorcii, atunci când ansamblul circulă pe drumuri în pantă și în rampă sau pe drumurile cu denivelări, introduce forțe pe direcțiile X și Z ;

- cea mai frecventă și solicitată direcție este cea longitudinală **X**, în timpul frânelor și accelerărilor.

Pentru a determina valoarea forței maxime care poate acționa asupra cârligului este nevoie de următoarele caracteristici:

- relația prin care se determină valoarea forței [49]:

$$F = m_R \cdot a_R \quad (3.1)$$

- se consideră o remorcă cu masa maximă permisă autovehiculelor: **m_R = 750 kg**;

- pentru că se discută despre frânare înseamnă că există decelerație, determinată prin relația:

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} \Rightarrow a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow a = \frac{v_i - v_0}{t_f} = \frac{27,78 - 0}{2,53} = 10,98 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (3.2)$$

- în cartea tehnică a autoturismului nu este specificat timpul de frânare necesar determinării accelerației (decelerației), însă se specifică spațiul de frânare – **s_f**, de la viteza inițială: **v_i = 100 [km/h] = 27,78[m/s]** la **v₀ = 0 [km/h] = 0 [m/s]**, **s_f = 35,2 [m]** [102];

- pornind de la relația deplasării (în cazul de față spațiul de frânare – **s_f**), se poate determina valoarea timpului de frânare – **t_f**:

$$d = \frac{a \cdot t^2}{2} \Rightarrow t_f = \frac{2 \cdot s_f}{v_i - v_0} \Rightarrow t_f = \frac{2 \cdot 35,2}{27,78 - 0} \Rightarrow t_f = 2,53 \text{ [s]} \quad (3.3)$$

unde **s_f = d** și **t_f = t**;

Aceste valori ale decelerației „**a**”, timpului de frânare „**t_f**” și spațiului de frânare „**s_f**” sunt calculate în condițiile în care autoturismul frânează, fără a avea remorca atașată. Frânarea ansamblului autovehicul – remorcă se realizează pe o distanță mai lungă, deoarece tendința remorcii este de a împinge autovehiculul și de a-i mări spațiul și timpul de frânare, iar valoarea decelerației este mai scăzută, astfel se consideră acești parametri cu regula de 3 simplă, proporțional cu masa autovehiculului și masa întregului ansamblu – relația 3.4.

$$m_{auto} = 1.933 \text{ kg} \dots s_f = 35,2 \text{ m} \dots t_f = 2,53 \text{ s} \dots a = 10,98 \text{ m/s}^2 \quad (3.4)$$

$$m_{ans} = m_{auto} + m_r \dots s_{f-ans} = \dots t_{f-ans} = \dots a_{ans} = \dots$$

$$m_{ans} = m_{auto} + m_r = 1.933 + 750 = 2683 \text{ [kg]} \quad (3.5)$$

$$s_{f-ans} = \frac{m_{ans} \cdot s_f}{m_{auto}} = \frac{2.683 \cdot 35,2}{1.933} = 48,86 [m] \quad (3.6)$$

$$t_{f-ans} = \frac{m_{ans} \cdot t_f}{m_{auto}} = \frac{2.683 \cdot 2,53}{1.933} = 3,52 [s] \quad (3.7)$$

$$a_{ans} = \frac{m_{ans} \cdot a}{m_{auto}} = \frac{2.683 \cdot 10,96}{1.933} = 7,9 [m/s^2] \quad (3.8)$$

- cunoscându-se decelerația ($\mathbf{a_R} = \mathbf{a_{ans}} = 7,9 [m/s^2]$) și masa remorcii ($\mathbf{m_R} = 750 [kg]$), se introduc în relația 3.1 și se va obține valoare forței $\mathbf{F} \approx 6 [kN]$;

În fișa de omologare a acestui sistem de remorcare se specifică valoarea forței de testare, la 2×10^6 cicluri, $\mathbf{F} = 7,26 [kN]$, mai mare cu 20% față de valoarea maximă rezultată din calcule, prin urmare, pentru ca studiul să fie acoperitor, în calculele de rezistență se va considera:

$$\mathbf{F} = 7,5 [kN]$$

3.2.2 Starea de tensiuni

Pentru stabilirea tensiunilor care apar în sistemul de remorcare trebuie urmărite simultan figurile 3.3 și 3.5 în care se găsesc informații privind brațul de aplicare al forței și secțiunea în acel punct, respectiv punctele pentru care se efectuează calculele.

Bibliografia după care se realizează calculele teoretice și diagramele forțelor tăietoare, forțelor axiale, momentelor de încovoiere și momentelor de torsiune este una selectă, ale unor autori cu semnificație importantă în domeniul rezistenței materialelor, ceea ce conferă validarea rezultatelor. În continuare se vor efectua calcule de rezistență pentru fiecare punct al sistemului în parte și se vor realiza mențiuni:

Punctul 1

În acest punct nu există nici moment de încovoiere și nici moment de torsiune, direcția forței \mathbf{F} trecând prin acesta; există doar **solicitarea de contact**, care este foarte mică, datorită diametrului mare al capătului sferic al cârligului de remorcare și forma scobită a cuplei remorcii, care copiază forma sferei cârligului, astfel forța fiind distribuită sub forma unei elipsoide, cu tensiunea maximă în punctul de intersecție dintre direcția forței și suprafața sferei.

Punctul 2

În acest punct apar **solicitările de încovoiere și forfecare**, datorate forței tăietoare F , rezultând tensiunea de încovoiere σ_{i2} și tensiunea de forfecare τ_{f2} :

Tensiunea la încovoiere:

$$\sigma_{i2} = \frac{M_{i2}}{W_{z2}} = \frac{240 \cdot 10^3}{2.394,31} = 100,24 \text{ [MPa]} \quad (3.12)$$

Tensiunea la forfecare:

$$\tau_{f2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{F}{A_{S2}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{7.500}{660,5} = 15,15 \text{ [MPa]} \quad (3.13)$$

Tensiunea echivalentă:

$$\sigma_{ech-2} = \sqrt{\sigma_{i2}^2 + 4 \cdot \tau_{f2}^2} = 104,72 \text{ [MPa]} < \sigma_{adm} = 355 \text{ [MPa]} \quad (3.14)$$

Punctul 3

În acest punct apar **solicitările de încovoiere și forfecare**, datorate forței tăietoare F , rezultând tensiunea de încovoiere σ_{i3} și tensiunea de forfecare τ_{f3} :

Tensiunea la încovoiere:

$$\sigma_{i3} = \frac{M_{i3}}{W_{z3}} = \frac{375 \cdot 10^3}{3.216,90} = 116,57 \text{ [MPa]} \quad (3.18)$$

Tensiunea la forfecare:

$$\tau_{f3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{F}{A_{S3}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{7.500}{804,22} = 12,44 \text{ [MPa]} \quad (3.19)$$

Tensiunea echivalentă (teoria a III-a, teoria tensiunilor tangențiale maxime):

$$\sigma_{ech-3} = \sqrt{\sigma_{i3}^2 + 4 \cdot \tau_{f3}^2} = 119,20 \text{ [MPa]} < \sigma_{adm} = 355 \text{ [MPa]} \quad (3.20)$$

Punctul 4

Dacă la punctele anterioare s-au realizat calculele momentelor și tensiunilor cu teoria lui Navier, în acest punct se va utiliza calculul de determinare a tensiunilor cu teoria lui Winkler (teoria barelor curbe), deoarece raportul dintre R (raza de curbură a cârligului) și D_{S4} (diametrul secțiunii barei cârligului) este mai mic de 5, ceea ce indică faptul că raza este de curbură mare sau altfel spus, raza de curbură este mică [37, 38, 42] – figura 3.7-a.

$$\frac{R}{\frac{D_{S4}}{2}} = \frac{R_1 + \frac{D_{S4}}{2}}{D_{S4}} = \frac{50 + 20}{40} = 1,75 < 5 \Rightarrow \left\langle \begin{array}{l} \text{necesitatea unitilizării} \\ \text{teoriei lui Winkler} \end{array} \right\rangle \quad (3.21)$$

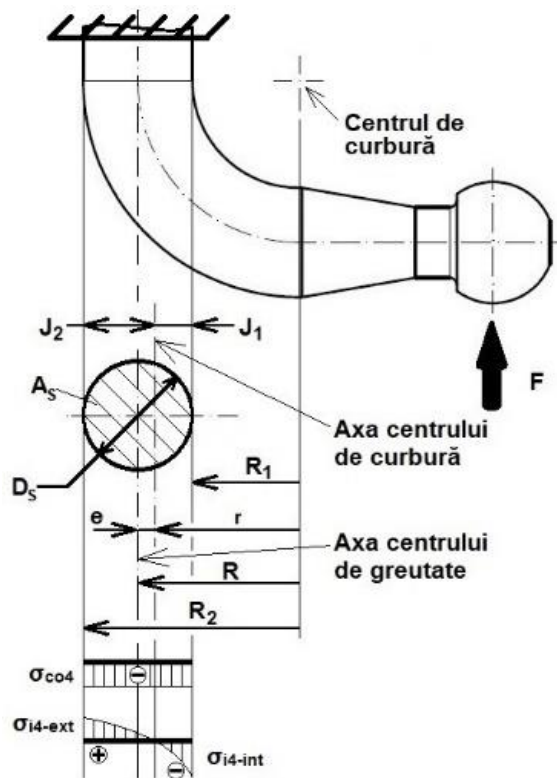


Fig. 3.7-a Variabilele necesare calculului „Winkler” (teoria de bară curbă) – secț. circulară

În acest punct apar **solicitările de încovoiere și compresiune**, datorate forței F , rezultând tensiunea de încovoiere σ_{i4} și tensiunea de compresiune σ_{co4} :

Tensiunea interioară la încovoiere:

$$\sigma_{i4-int} = \frac{M_{i4}}{A_{S4} \cdot e} \cdot \frac{J_1}{R_1} = \frac{900 \cdot 10^3}{1.256,6 \cdot 1,46} \cdot \frac{18,54}{50} = 182,03 \text{ [MPa]} \quad (3.28)$$

Tensiunea exterioară la încovoiere:

$$\sigma_{i4-ext} = \frac{M_{i4}}{A_{S4} \cdot e} \cdot \frac{J_2}{R_2} = \frac{900 \cdot 10^3}{1.256,6 \cdot 1,46} \cdot \frac{21,46}{90} = 117,04 \text{ [MPa]} \quad (3.29)$$

Tensiunea la compresiune:

$$\sigma_{co4} = \frac{F}{A_{S4}} = \frac{7.500}{1.256,6} = 5,97 \text{ [MPa]} \quad (3.30)$$

Tensiunea interioară echivalentă:

$$\sigma_{ech-int-4} = \sigma_{i4-int} + \sigma_{co4} = 188 \text{ [MPa]} < \sigma_{adm} = 355 \text{ [MPa]} \quad (3.31)$$

!!! Deoarece se va constata că în acest punct se găsește tensiunea maximă din sistem, se propun două soluții de optimizare a secțiunii cârligului de remorcare, având aceeași arie și aceeași axă a centrului de greutate cu varianta secțiunii circulare !!!

Secțiune trapezoidală

(cu raza de îndoire după baza mare)

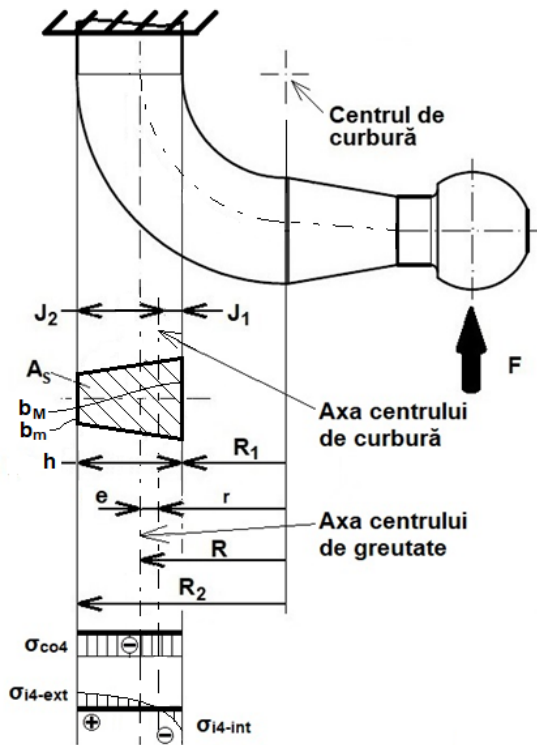


Fig. 3.7-b Variabilele necesare calculului „Winkler” (teoria de bară curbă) – secțiune trapezoidală (trapez isoscel)

Secțiune pătrată

(cu raza de îndoire după o muchie)

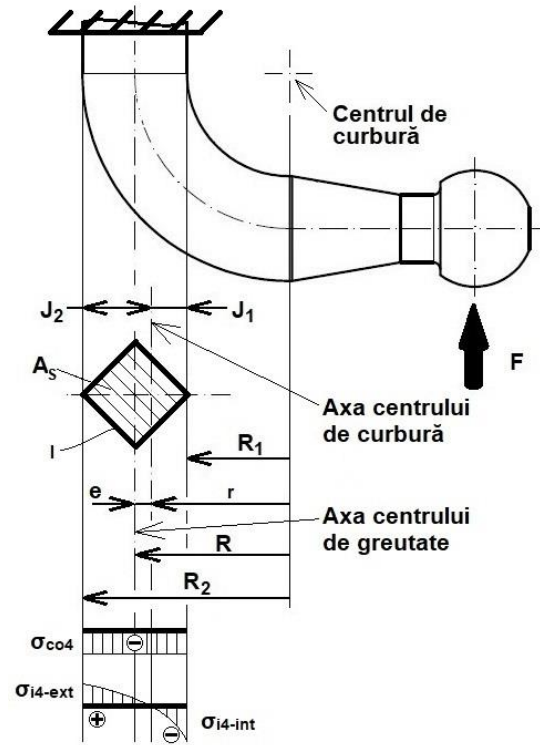


Fig. 3.7-c Variabilele necesare calculului „Winkler” (teoria de bară curbă) – secțiune pătrată

În acest punct apar **solicitările de încovoiere și compresiune**, datorate forței F, rezultând tensiunea de încovoiere σ_{i4} , tensiunea de compresiune σ_{co4} :

Tensiunea interioară la încovoiere:

$$\sigma_{i4-int} = 135,83 \text{ [MPa]} \quad (3.28 - 1)$$

Tensiunea exterioară la încovoiere:

$$\sigma_{i4-ext} = 109,94 \text{ [MPa]} \quad (3.29 - 1)$$

Tensiunea la compresiune:

$$\sigma_{co4} = 5,97 \text{ [MPa]} \quad (3.30 - 1)$$

Tensiunea interioară echivalentă:

$$\sigma_{ech-int-4} = 141,8 \text{ [MPa]} \quad (3.31 - 1)$$

$$\sigma_{ech-int-4} < \sigma_{adm} = 355 \text{ [MPa]}$$

Tensiunea interioară la încovoiere:

$$\sigma_{i4-int} = 242,87 \text{ [MPa]} \quad (3.28 - 2)$$

Tensiunea exterioară la încovoiere:

$$\sigma_{i4-ext} = 129,86 \text{ [MPa]} \quad (3.29 - 2)$$

Tensiunea la compresiune:

$$\sigma_{co4} = 5,97 \text{ [MPa]} \quad (3.30 - 2)$$

Tensiunea interioară echivalentă:

$$\sigma_{ech-int-4} = 248,83 \text{ [MPa]} \quad (3.31 - 2)$$

$$\sigma_{ech-int-4} < \sigma_{adm} = 355 \text{ [MPa]}$$

Punctul 5

În acest punct se calculează atât rezistența șuruburilor cât și cea a cârligului de remorcare, iar solicitările sunt de **forfecare, încovoiere și compresiune** (**forfecare** corespunzătoare celor două șuruburi M12 x 70 și **încovoiere + compresiune** la bara cârligului de remorcare, bară găurită pentru cele două șuruburi), datorate forței tăietoare F , rezultând tensiunea de forfecare a șuruburilor τ_{f5} și tensiunea de compresiune σ_{c5} :

Tensiunea de forfecare a șuruburilor:

$$\tau_{f5} = \frac{F}{Nr. \text{ de șuruburi} \cdot A_{S\dot{S}5}} = \frac{7.500}{2 \cdot 83,32} = 45,07 [MPa] < \tau_{f-adm} \quad (3.33)$$

Momentul încovoiitor:

$$M_{i5} = B_{F5} \cdot F = 189,5 \cdot 7.500 = 1.421,25 [Nm] \quad (3.34)$$

Deoarece secțiunea cârligului în punctul 5 (fig. 3.5) este cu o formă geometrică mai complexă și mai dificil de calculat (fig. 3.8-3), pentru simplificarea calculelor se va face o aproximare geometrică simplistă (fig. 3.8-4), dar acoperitoare pentru siguranța proiectării. Siguranța calculului este dată și de faptul că forma geometrică reală are un comportament mai avantajos decât cea teoretică, iar tensiunile reale sunt mai scăzute decât cele rezultate.

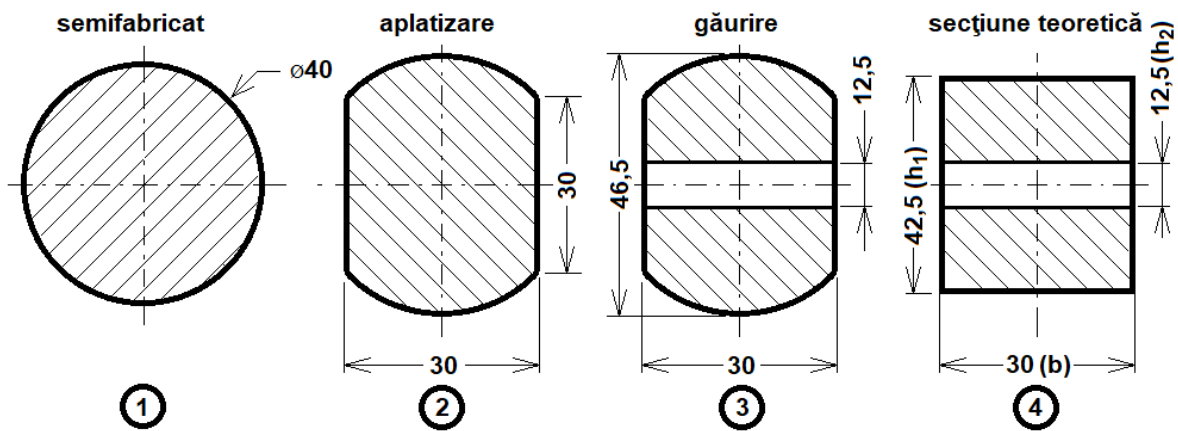


Fig. 3.8 Evoluția secțiunii studiate a cârligului de remorcare

Tensiunea la încovoiere:

$$\sigma_{i5} = \frac{M_{i5}}{W_{z5}} = \frac{1.421,25 \cdot 10^3}{8.250} = 172,27 [MPa] \quad (3.36)$$

Tensiunea la compresiune:

$$\sigma_{c5} = \frac{F}{A_{S5}} = \frac{7.500}{900} = 8,33 [MPa] \quad (3.38)$$

Punctul 6

În acest punct se calculează **tensiunea la încovoiere** pentru cele două flanșe de care se fixează cârligul de remorcare:

Tensiunea la încovoiere:

$$\sigma_{i6} = \frac{M_{i6}}{W_{z6}} = \frac{731,25 \cdot 10^3}{32.560,67} = 22,46 \text{ [MPa]} \quad (3.41)$$

Punctul 7

În acest punct se calculează grinda de rezistență a sistemului de remorcare (țeavă pătrată), grindă care se consideră încastrată la ambele capete. **Solicitările** care apar asupra grinzii sunt de **încovoiere, forfecare și torsiune**, utilizând metoda lui Veresceaghin:

$$X_1 = 0 - T = \text{antisimetrie} \quad (3.42)$$

$$X_3 = 0 - N = \text{se descarcă în bară} \quad (3.43)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{22} = \frac{1}{EI_z} \cdot \frac{l}{2} \cdot 1 \cdot 1 = \frac{l}{2EI_z} \\ \Delta_{2F} = \frac{1}{EI_z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{l}{2} \cdot \left(-\frac{F \cdot l}{4}\right) = -\frac{Fl^2}{16EI_z} \gg X_2 = \frac{-\Delta_{2F}}{\delta_{22}} = \frac{-\left(-\frac{Fl^2}{16EI_z}\right)}{\frac{l}{2EI_z}} = \frac{F \cdot l}{8} \gg \\ \delta_{22} \cdot X_2 + \Delta_{2F} = 0 \end{array} \right. \gg X_2 = \frac{7.500 \cdot 956}{8} = 896.250 \text{ [Nmm]} \quad (3.44)$$

Tensiunea la încovoiere:

$$\sigma_{i7} = \frac{M_{i7}}{W_{z7}} = \frac{896.250}{15.166,67} = 59,09 \text{ [MPa]} \quad (3.46)$$

Tensiunea la torsiune:

$$\sigma_{i7} = \frac{M_{t7}}{W_{p7}} = \frac{365.625}{30.333,33} = 12,05 \text{ [MPa]} \quad (3.49)$$

Tensiunea echivalentă în încastrarea din punctul 7:

$$\sigma_{ech} = \sqrt{\sigma_i^2 + 4\tau_t^2} = 63,82 \text{ [MPa]} < \sigma_{ech} = 355 \text{ [MPa]} \quad (3.50)$$

3.2.3 Starea de deformații

Pentru stabilirea deformațiilor care apar în sistemul de remorcare trebuie urmărită figura 3.11 în care se găsesc informații privind modul de deformare al întregului sistem de remorcare și figura 3.5, unde sunt dimensiunile acestuia. Desigur, deformația din imaginea atașată este

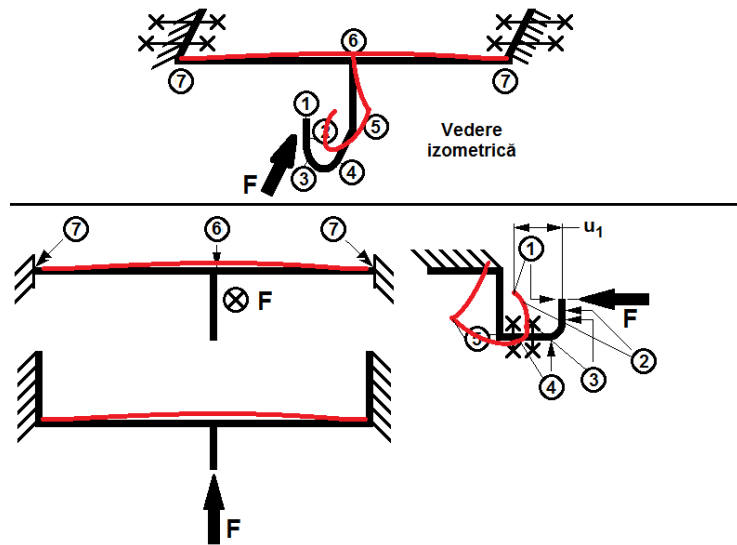


Fig. 3.11 Modul de deformare (exagerat) al sistemului de remorcare

exagerată, având rolul de a accentua modul de deformare.

Pentru calcul se va considera deplasarea u_1 , pe direcția longitudinală a autovehiculului.

Metoda de calcul după care se realizează calculele deformației este cea a lui Castigliano.

Tabelul 3.1 Valorile necesare determinării deplasării sferei

| Regiunea | M_i | $\frac{\partial M_i}{\partial F}$ | Limite | Deplasare [mm] |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------|
| 1-2 | $F \cdot x$ | x | $0 \div B_{F2}$ | 0,011 |
| 2-3 | $F \cdot x$ | x | $0 \div B_{F3}$ | 0,029 |
| 3-4 | $F \cdot (B_{F3} + R \sin \alpha)$ | $B_{F3} + R \sin \alpha$ | $0 \div \frac{\pi}{2}$ | 0,012 |
| 4-5 | $F \cdot B_{F4}$ | B_{F4} | $0 \div B_{F5}$ | 0,737 |
| 5-6 | $-F \cdot (x - B_{F4})$ | $-(x - B_{F4})$ | $0 \div B_{F6}$ | -0,010 |
| 6-7 | $\frac{F}{2} \cdot \frac{x}{2}$ | $\frac{x}{4}$ | $0 \div B_{F7}$ | 0,145 |
| DEPLASAREA SFEREI – u_1 (considerând întregul sistem) | | | | 0,924 |
| DEPLASAREA SFEREI – u_1' (considerând încastrarea în găurile cârligului de remorcare) | | | | 0,789 |

3.3 Concluzii

Urmărind starea de tensiune a sistemului de bare, se observă că raportul dintre tensiunea admisibilă a materialelor și tensiunea maximă rezultată în urma calculelor indică un coeficient de siguranță de 2 utilizat în construcția sistemului de remorcare:

$$c = \frac{\sigma_e}{\sigma_{i-max}} = \frac{355}{188} = 1,89 \approx 2$$

În vederea centralizării datelor privind tensiunile și deformațiile apărute în sistemul de remorcare se realizează tabelul 3.2, ce conține valorile regăsite în zonele de interes.

Tabelul 3.2 Centralizarea valorilor specifice tensiunilor și deformațiilor din sistem

| Componentul solicitat | Zona tensiunii apărute | Tensiunea [MPa] | Deplasarea [mm] |
|---|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Cârligul de remorcare | Interiorul razei de curbură | 188 | - |
| | Exteriorul razei de curbură | 117,04 | - |
| Grinda de rezistență | Extremități | 63,82 | - |
| Deplasarea sferei în plan orizontal, pe direcție orizontală (considerând întregul sistem) | | | 0,924 |
| Deplasarea sferei în plan orizontal, pe direcție orizontală (considerând încastrare în orificiile cârligului) | | | 0,789 |

Privind optimizarea celui mai solicitat component al ansamblului de remorcare se propun două variante constructive cu secțiuni diferite, păstrând aceeași suprafață transversală și se realizează calcule de rezistență. O variantă benefică este cu secțiunea trapezoidală și raza de îndoire după baza mare, iar una mai puțin avantajoasă este cu secțiunea pătrată și raza de îndoire după o muchie. În tabelul 3.3 sunt prezentate valorile de calcul privind compararea rezistenței mecanice a celor trei variante constructive.

Tabelul 3.3 Centralizarea tensiunilor apărute în cele 3 variante constructive

| Variantă constructivă (secțiune) | Tensiunea maximă [MPa] |
|----------------------------------|------------------------|
| Circulară | 188 |
| Trapezoidală | 141,8 |
| Pătrată | 248,83 |

În ceea ce privește starea de deformație trebuie specificat faptul că deplasările sistemului sunt reduse, ținând cont de dimensiunile acestuia. În aplicații cu siguranță vor fi deplasări mai semnificative din cauza jocurilor din ansamblele de șuruburi cu piulițe.

Foarte important de specificat este faptul că alegerea sistemului de remorcare de către producător pentru acest autovehicul a fost realizată în conformitate, calculele de rezistență mecanică validând proiectarea modelului, iar siguranța în trafic a ansamblului format din autovehicul și remorcă este asigurată.

CAPITOLUL IV

METODA ELEMENTULUI FINIT PRIVIND STĂRILE DE TENSIUNE ȘI DE DEFORMAȚIE ALE SISTEMULUI DE REMORCARE

4.1 Modelarea numerică a sistemului de remorcare

Sistemul de remorcare studiat este alcătuit din mai multe componente, așa cum este prezentat în figura 4.1, elementele constitutive fiind de asemenea prezentate în figură.

Modelarea sistemului de remorcare din această lucrare se realizează în softul Inventor dezvoltat de compania Autodesk, renumită pentru crearea softului AutoCAD, iar simularea

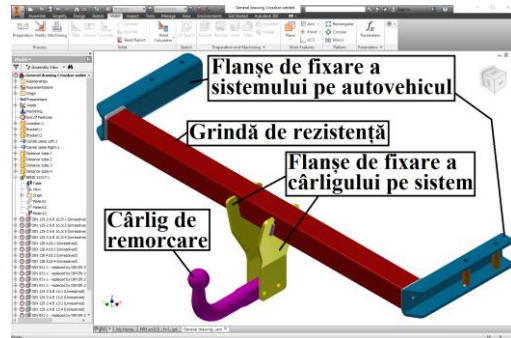


Fig. 4.1 Modelarea sistemului de remorcare

cu MEF se realizează în același soft, existând nenumărate validări ale altor aplicații și experiențe anterioare de succes. O altă validare finalizată cu succes va fi în această lucrare prin analiza comparativă a rezultatelor cu metoda clasică de calcul a tensiunilor și deformațiilor cu simularea pe baza MEF a sistemului de remorcare.

4.2 Discretizarea modelului și analiza cu metoda elementului finit

În figura 4.5 se prezintă discretizarea întregului sistem de remorcare, discretizarea alcătuită din 41.347 de elemente și 73.004 noduri, așa cum sunt redată din soft.

În figura 4.6 este prezentată discretizarea cârligului de remorcare, discretizare compusă din 3.827 de noduri și 2.262 de elemente.

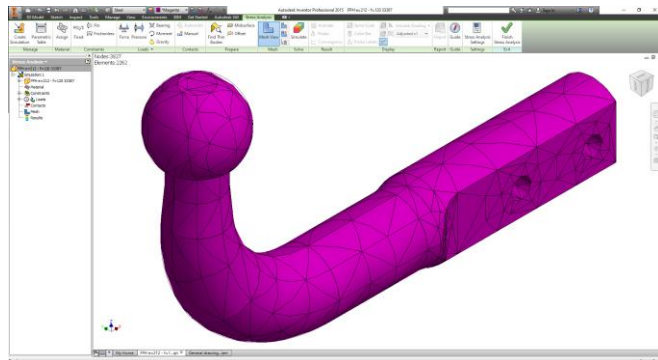


Fig. 4.6 Discretizarea cârligului de remorcare

Așa cum s-a stabilit în capitolul anterior, forța se va aplica în centrul sferei, pe direcția longitudinală a autovehiculului, cu sensul înspre autoturism, iar valoarea forței care acționează pe sistemul de remorcare este $F = 7,5 \text{ kN}$, a se vedea figura 4.7.

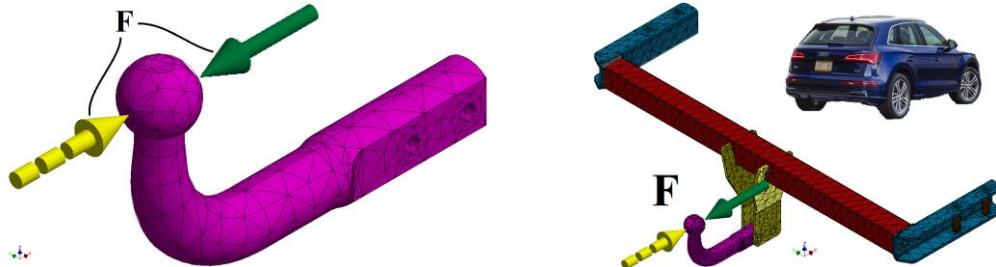


Fig. 4.7 Direcția forței în cârligul și în sistemul de remorcare

4.3 Extragerea rezultatelor țintă din soft

4.3.1 Determinarea tensiunilor din sistem

În figura 4.8 este atașată imaginea de ansamblu a sistemului de remorcare, evidențiindu-se multicolor zonele sollicitate la efort după aplicarea forței în sistem, conform legendei de culori din partea stângă a capturii din softul de simulare. Modul de deformare al sistemului de remorcare este prezentat exagerat pentru a facilita audienței înțelegerea potențialului suferit de ansamblu.

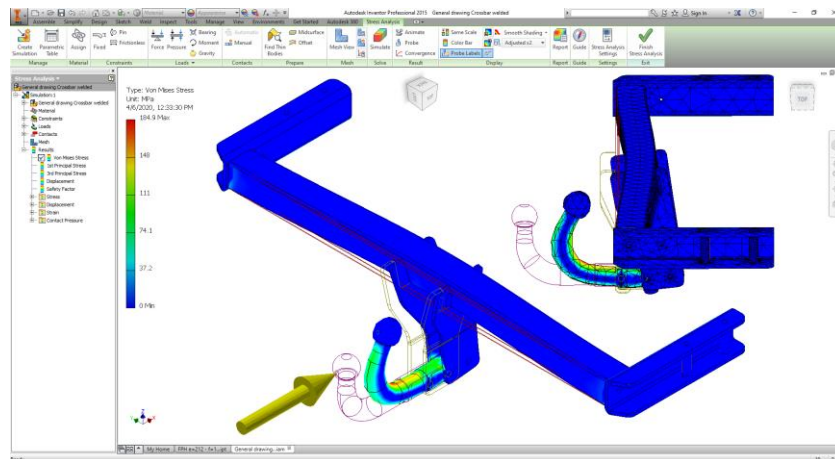


Fig. 4.8 Tensiunile și modul de deformare (exagerat) al sistemului de remorcare

Din spectrul de culori se observă cum tensiunea cea mai mare apare în cârlig, iar în zona extremităților grinzii apar puncte de interes, însă nu la fel de sollicitate precum cele din cârligul de remorcare.

Analizând modul de deformare al sistemului se observă ușoara torsionare a grinzii, justificându-se astfel efectuarea calculului clasic la torsiune a acestui component.

Tensiunile echivalente apărute în cele două elemente de interes ale sistemului de remorcare sunt în figura 4.9.

Se observă că tensiunea maximă apărută în grindă nu este exact la capete. Fiind o bară sollicitată simetric, încastrată la ambele capete, tensiunea cea mai mare apare ușor depărtat de zona de încastrare, iar în acest caz punctele cu efort maxim apar la 8,2 mm depărtare de extremități.

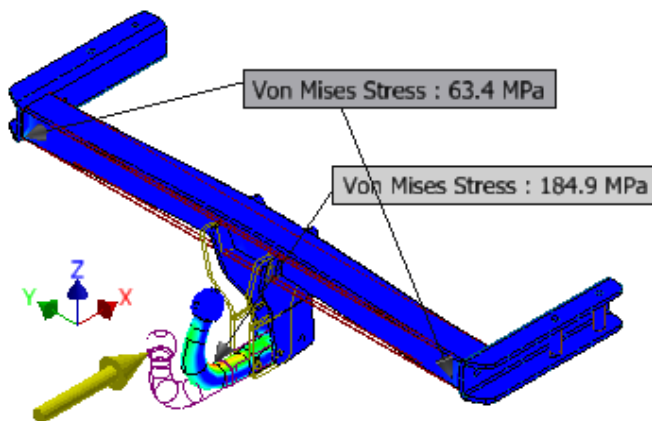


Fig. 4.9 Tensiunile Von Mises apărute în cârligul de remorcare și grinda de rezistență

Intrând în detalierea cârligului de remorcare, componentul cel mai sollicitat din sistem, se observă că în partea interioară apar tensiuni mai ridicate decât în partea exterioară, așa cum s-a specificat în capitolul anterior, la efectuarea calculului clasic de rezistență.

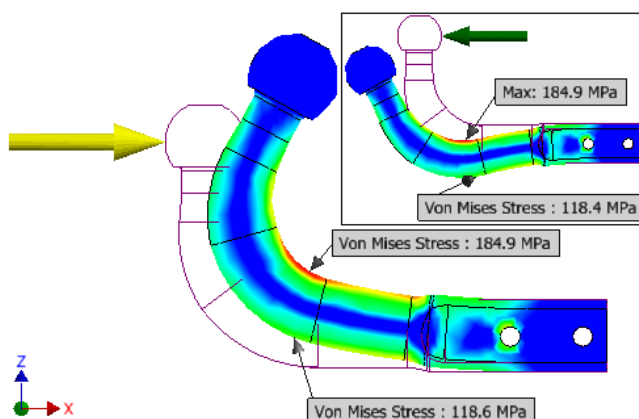


Fig. 4.10 Tensiunile Von Mises apărute în cârligul de remorcare

Tensiunea maximă apărută în cârligul de remorcare și tensiunea apărută în zona de curbură exterioară sunt prezentate în figura 4.10.

În tabelul 4.1 sunt centralizate tensiunile apărute în sistemul de remorcare, cu precădere zonele de interes pentru studiul lucrării.

Tabelul 4.1 Centralizarea valorilor specifice tensiunilor din sistem

| Componentul sollicitat | Zona tensiunii apărute | Tensiunea [MPa] |
|------------------------|---|-----------------|
| Cârligul de remorcare | Interiorul razei de curbură, σ_{int} | 184,9 |
| | Exteriorul razei de curbură, σ_{ext} | 118,6 |
| Grinda de rezistență | Extremități | 63,4 |

4.3.2 Determinarea deplasărilor din sistem

În vederea determinării deplasărilor din sistem, interesul major este pentru determinarea săgeții date de sfera cârligului de remorcare în plan orizontal, spre autoturism, pentru a nu exista riscul de a intra în contact cu bara de protecție a acestuia.

În figura 4.11 este prezentată imaginea de ansamblu a sistemului de remorcare, evidențindu-se multicolor zonele care suferă deplasările cele mai pronunțate după aplicarea forței în sistem, conform legendei de culori din stânga ecranului capturată din softul de simulare. Modul de deformare al sistemului de remorcare este prezentat exagerat pentru a facilita asistenței înțelegerea potențialului suferit de ansamblu.

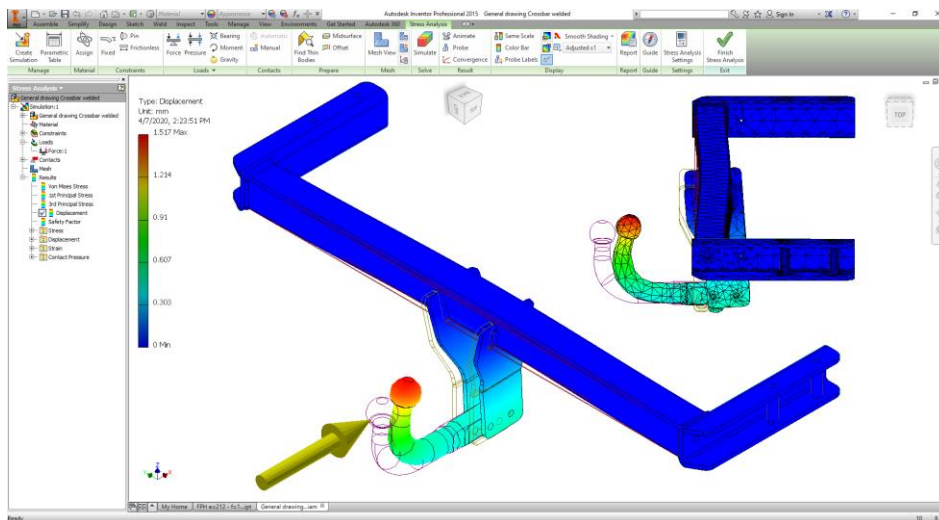


Fig. 4.11 Deplasările și modul de deformare (exagerat) al sistemului de remorcare

Analizând modul de deformare al sistemului de remorcare se constată trei aspecte importante, bazate pe figura 4.12 care exprimă starea inițială și starea deformată a sistemului, și anume:

- **deplasarea maximă apare în punctul din stânga sus a aplatizării de pe sfera cârligului.** Punctul marcat cu ,2' în figura 4.12 reprezintă locul unde are loc deplasarea cea mai accentuată a sistemului de remorcare – acest punct reprezintă mai puțin interesul acordat deplasărilor din sistem. Punctul marcat cu ,1' în aceeași figură reprezintă punctul specific centrului sferei, deplasarea acestuia făcând obiectul de interes;

- **deplasarea sferei se realizează pe două direcții.** Privind sistemul studiat din lateralul autoturismului (fig. 4.12), se observă că sfera se deplasează atât pe direcția și sensul $X+$ (orizontal spre autovehicul), cât și pe direcția și sensul $Z+$ (vertical spre plafonul autoturismului), realizându-se o deplasare compusă. Valorile săgeților u_1 , v_1 , u_2 , v_2 , dar și compusele vectoriale ale acestora $\delta_{u_1-v_1}$ și $\delta_{u_2-v_2}$ sunt specificate în tabelul 4.2.

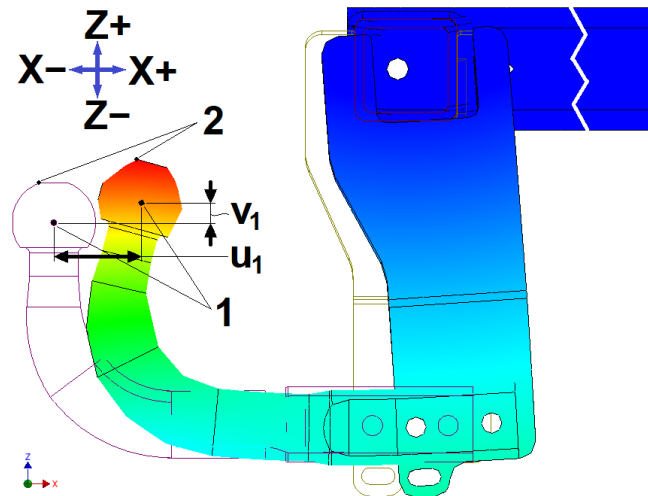


Fig. 4.12 Aspecte privind deplasările sistemului de remorcare

- **torsiunea grinzii tinde să anuleze deplasarea sferei.** Se observă în figura 4.12 faptul că deformarea cârligului se realizează

prin încovoiere în sensul acelor de ceasornic, iar deformarea grinzii se realizează în sensul de rotație opus acelor de ceasornic (odată cu întregul cârlig de remorcare). Prin urmare, această compunere de deplasări tinde să readucă sfera cârligului la poziția inițială.

Tabelul 4.2 Centralizarea valorilor specifice deplasărilor din sistem, considerând întreg sistemul de remorcare

| Semnificația săgeții | Simbol | Deplasarea [mm] |
|---|-----------------------------------|-----------------|
| Deplasarea orizontală a centrului sferei | u_1 | 1,313 |
| Deplasarea verticală a centrului sferei | v_1 | 0,295 |
| Deplasarea compusă a centrului sferei | $\delta_{u_1-v_1}$ | 1,346 |
| Deplasarea maximă pe orizontală a sferei | $u_{max} = u_2$ | 1,474 |
| Deplasarea maximă pe verticală a sferei | $v_{max} = v_1$ | 0,357 |
| Deplasarea maximă compusă a sferei | $\delta_{max} = \delta_{u_1-v_1}$ | 1,517 |

Valoarea deplasării u_1 reprezintă un obiect de interes al lucrării.

În ceea ce privește strict deformarea cârligului de remorcare se vor nota în tabelul 4.3 deplasarea specifică centrului sferei pe orizontală u_1' , respectiv pe verticală v_1' .

În figura 4.13 este prezentată deplasarea cârligului de remorcare singular, considerându-se încastrat în zona orificiilor de fixare.

Comparând deplasarea vectorială pe cele două direcții ale sferei cârligului individual (fig. 4.13) și ale sferei cârligului în ansamblul de remorcare (fig. 4.12) se observă o diferență. Raportul dintre deplasarea orizontală și cea verticală este mai ridicat în cazul cârligului singular, semn că torsiunea grinzii tinde să reducă mai accentuat deplasarea pe verticală a sferei și mai puțin pe orizontală.

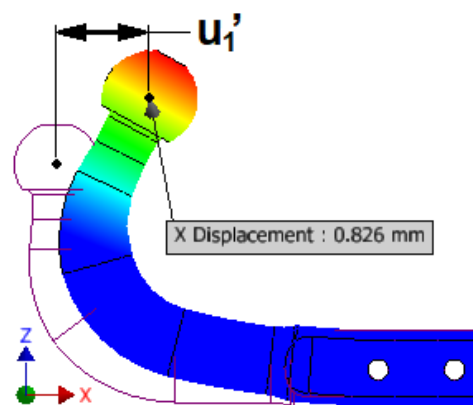


Fig. 4.13 Aspecte privind deplasările cârligului de remorcare

Tabelul 4.3 Centralizarea valorilor specifice deplasărilor din sistem, considerând doar cârligul de remorcare individual

| Semnificația săgeții | Simbol | Deplasarea [mm] |
|---|--------------------------|-----------------|
| Deplasarea orizontală a centrului sferei | u_1' | 0,826 |
| Deplasarea verticală a centrului sferei | v_1' | 0,589 |
| Deplasarea compusă a centrului sferei | $\delta_{u_1'-v_1'}$ | 1,015 |

Valoarea deplasării u_1' reprezintă un obiect de interes al lucrării.

4.4 Concluzii

În lucrarea de față se efectuează studii privind comportamentul sistemelor de remorcare utilizate la autovehicule care implică analiza numerică pe baza MEF, cu ajutorul softului Inventor. **Se realizează două studii în paralel, pe de o parte studiul întregului ansamblu de remorcare, pe de altă parte, studiul cârligului de remorcare individual, component ce este cel mai solicitat în sistem.**

Structura ansamblului de remorcare se consideră încastrată în flanșele exterioare ale acestuia, după care acționează o forță de 7,5 kN în centrul sferei cârligului de remorcare, pe direcție orizontală, spre autovehicul, **simulând frânarea ansamblului format din autovehicul și remorcă.**

Accentul se pune pe determinarea tensiunilor apărute în sistem, pentru ca acestea să nu depășească limitele admisibile specifice materialelor din care sunt alcătuite, dar și pe deplasările survenite în sistem, pentru a nu produce contact între elementele ansamblului de

CAPITOLUL V

FOTOELASTICIMETRIA. METODA OPTICĂ DE DETERMINARE A TENSIUNILOR DIN CÂRLIGUL DE REMORCARE

În capitolele III și IV sunt determinări ale stărilor de tensiuni și deformații pentru sistemul de remorcare prin metode teoretice de calcul, analitice, respectiv numerice. După cum este binecunoscut, orice activitate inginerescă se bazează pe metode teoretice de calcul, iar acestea trebuie validate întotdeauna de metode experimentale. În general, metodele teoretice de calcul nu țin și nu pot ține seama de un întreg lanț de factori, considerându-se o comportare ideală a materialelor din care modelele analizate sunt realizate.

Tehnica ce se bazează pe proprietatea de birefrință a materialelor în vederea determinării experimentale a stărilor de tensiuni din piesele supuse la încărcări se numește fotoelasticimetrie. Această metodă de determinare a tensiunilor dintr-un component sau un ansamblu de componente, spre deosebire de celelalte metode prezentate, are avantajul că oferă informații privind tensiunile din întregul sistem analizat, având rezultate favorabile și atunci când sunt structuri cu geometrie complexă.

În acest capitol se propune o primă metodă experimentală de determinare a tensiunilor din cârligul de remorcare utilizând fotoelasticimetria, însă pentru înțelegerea acestui fenomen sunt necesare câteva cunoștințe din domeniul opticii.

5.5 Introducere în fotoelasticimetrie

După cum s-a menționat anterior, fotoelasticimetria este o metodă de determinare pe cale experimentală a tensiunilor dintr-un corp, bazându-se pe proprietățile de birefrință ale materialului supus unei încărcări. Metoda nu se raportează la starea de deformație a corpurilor, determinându-se ulterior starea de tensiuni prin analogie la deplasări, așa cum se întâmplă utilizând alte metode experimentale.

Această tehnică de determinare se poate realiza prin două metode: metoda prin transparență și metoda prin reflexie [21, 25, 46, 48].

Metoda prin transparență se poate aplica la modele plane și spațiale, modelele trebuind construite dintr-un material fotoelastic (optic activ, transparent) confecționat la o anumită scară, iar cu ajutorul unui echipament destinat cercetărilor fotoelastice denumit polariscop – figura 5.1, se pot determina tensiunile din sistem. Această metodă face obiectul de studiu pentru lucrarea de față.

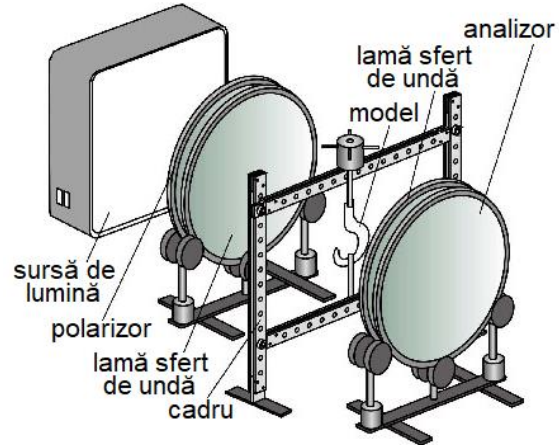


Fig. 5.1 Polariscop [120]

Metoda prin reflexie presupune determinarea stărilor de tensiuni utilizând un polariscop special (cu reflexie), direct pe structura cercetată, acoperindu-se cu o folie fotoelastică suprafața modelului, încărcând sistemul cu solicitările reale. Această metodă permite atât încărcări statice, cât și dinamice.

Plexiglasul are sensibilitate optică, în schimb are comportament avantajos la compresiune și tracțiune. Este ușor prelucrabil, simplu și ieftin de achiziționat.

Există și alte materiale fotoelastice, avantajoase, pe bază de rășini sintetice.

Izocromatele reprezintă locurile geometrice ale punctelor unde diferența tensiunilor normale principale este constantă.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = constant \quad (5.1)$$

Bazându-se pe relația dintre tensiunile tangențiale principale și tensiunile normale principale, izocromaticile mai pot fi definite ca fiind locurile geometrice ale tensiunilor tangențiale maxime cu valoare constantă.

Pentru starea plană de tensiune:

$$\tau_{1,2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (5.2)$$

Se vor lua în considerare curbele izocromatice a căror diferență $\sigma_1 - \sigma_2$ este multiplu de o valoare constantă σ_0 .

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= k \cdot \sigma_0, \\ k &= 0, 1, 2, 3, 4... \end{aligned} \quad (5.4)$$

Ordinul izocromatei este reprezentat de numărul k , iar în figura 5.2 sunt reprezentate demonstrativ curbele izocromate.

Numărul k este pozitiv, deoarece $\sigma_1 > \sigma_2$ și diferența $\sigma_1 - \sigma_2$ este pozitivă.

Când $k = 0$ și $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$ rezultă linia singulară sau izocromata de ordinul 0.

Pentru starea plană de tensiune, forma izocromatei arată astfel:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} = k \cdot \sigma_0 \quad (5.5)$$

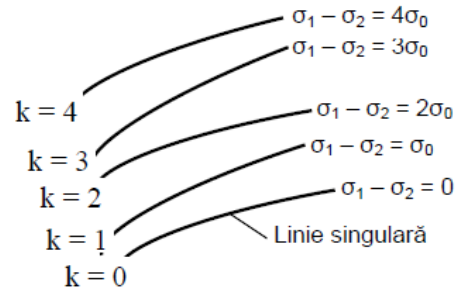


Fig. 5.2 Curbele izocromate

5.5 Determinarea experimentală a tensiunilor

Din cauza formei geometrice complexe a cârligului de remorcare, calculul de determinare a tensiunilor este destul de dificil, fiind nevoie de câteva artificii pentru a veni în sprijinul simplificării metodei de calcul.

Confecționarea modelului fotoelastic se face din plexiglas, materialul cel mai avantajos pentru cercetările experimentale necesare, atât din punct de vedere tehnic, cât și din punct de vedere economic.

Prin urmare, se realizează conturul cârligului de remorcare din foaie de plexiglas cu grosimea de 8 mm, iar adițional se realizează un disc pentru etalonare fotoelastică din același material și cu aceeași grosime de 8 mm, iar diametrul de $\varnothing 63$ mm.

Calculul tensiunilor cu ajutorul fotoelasticității se va realiza prin două metode, după care se vor compara rezultatele:

În prima metodă se va realiza etalonarea materialului fotoelastic utilizând discul pentru determinarea tensiunii corespunzătoare unei izocromate, după care, cu datele rezultate, prin analogie se vor determina tensiunile din cârligul de remorcare.

A doua metodă de determinare a tensiunilor se realizează considerând a fi încovoiere pură în cârlig și se va realiza conform bazei teoretice a capitolului 5.2.3.

5.3.1 Calculul solicitării la compresiune din disc. Etalonarea materialului

Se cunosc dimensiunile discului:

$$D = 63 \text{ mm}, g = 8 \text{ mm};$$

Discul este supus la compresiune pe dispozitivul de fixare al polariscopului așa cum este prezentat în figura 5.7, iar cu ajutorul unui dinamometru de măsurare a forței F se înregistrează valoarea acesteia la fiecare apariție a unei noi izocromate – tabelul 5.1.

Tabelul 5.1 Centralizarea valorilor specifice forței
F în funcție de izocromate apărute pe disc

| k | F [N] | σ_0 [MPa] |
|---|--------------|------------------|
| 0 | 0 | 0,863 |
| 1 | 77,2 | |
| 2 | 258,6 | |
| 3 | 458,0 | |
| 4 | 651,8 | |
| 5 | 853,6 | |

În ecuația 5.12 se introduc valorile obținute pe cale experimentală și rezultă σ_0 :

$$\sigma_0 = \frac{8 \cdot F}{k \cdot \pi \cdot D \cdot g} = \frac{8 \cdot 853,6}{5 \cdot \pi \cdot 63 \cdot 8} = 0,863 \text{ [MPa]}$$

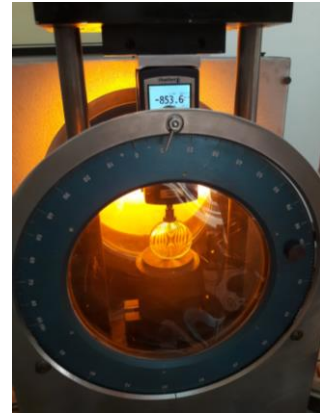


Fig. 5.7 Discul văzut la polariscop

5.3.2 Calculul solicitării la încovoiere a cârligului de remorcare

Cârligul de remorcare se supune la o forță astfel încât să apară la polariscop suficiente izocromate pentru realizarea calculului de tensiune (a se vedea figura 5.9).

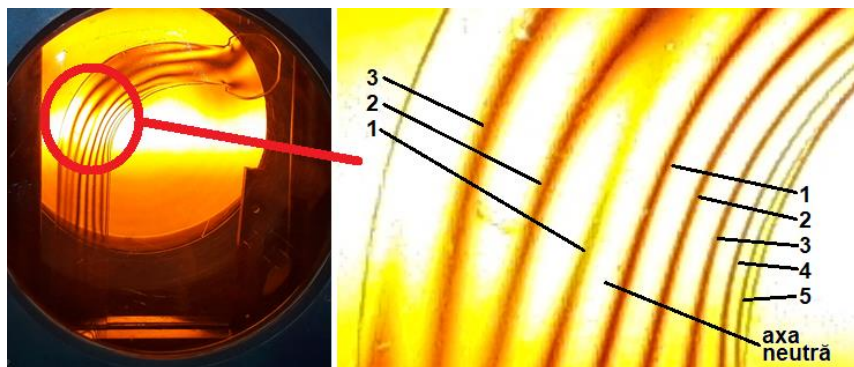


Fig. 5.9 Cârligul de remorcare văzut la polariscop

Forța la care a apărut numărul satisfăcător de izocromate este $F = 66,6$ N, iar înainte de a se determina tensiunile se analizează dispunerea acestora.

Pe exteriorul razei de curbură au apărut 3 izocromate, iar pe interior se pot vizualiza 5 izocromate. Acest lucru confirmă faptul că tensiunile interioare și exterioare sunt diferite, iar sistemul nu se comportă asemănător unei solicitări simple de încovoiere.

În figura 5.9 mai poate fi observat un fenomen foarte interesant. Urmărind izocromatele de la coada cârligului spre sfera acestuia, în zona cilindrică se întâlnesc câte 4 izocromate de fiecare parte a axei neutre, axa neutră situându-se în centrul cilindrului.

Determinarea tensiunilor din cârlig prin analogie la discul etalon

După încărcarea modelului fotoelastic și identificarea numărului de izocromate apărute pe acesta se concepe tabelul 5.2, realizându-se corelațiile dintre izocromatele apărute pe discul etalon și cârligul de remorcare.

Conform calculului de etalonare a discului din subcapitolul 5.3.1, valoarea unei izocromate este $\sigma_0 = 0,863 \text{ MPa}$.

În tabelul 5.2 sunt prezentate rezultate de interes extrase din analiza pe baza fotoelasticității, raportarea tensiunilor din disc la cârligul de remorcare, analogia la valoarea forței reale din cârligul de remorcare și rezultate tensiunilor din analiza cu MEF.

Tabelul 5.2 *Determinarea tensiunilor din cârlig prin analogie la discul etalon*

| Colectare | F [N] | σ_0 [MPa] | k_{int} | σ_{int} [Mpa] | k_{ext} | σ_{ext} [Mpa] |
|---|--------------------|---------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|
| 1. Calculul tensiunilor apărute în cârligul de remorcare în funcție de etalonarea discului | $F_{model} = 66,6$ | 0,86 | 1 | 0,86 | 1 | 0,86 |
| | | | 2 | 1,73 | 2 | 1,73 |
| | | | 3 | 2,59 | 3 | 2,59 |
| | | | 4 | 3,45 | - | |
| | | | 5 | 4,31 | | |
| 2. Calculul tensiunilor apărute în cârligul de remorcare în funcție de forța reală, prin analogie la valorile de la punctul 1 | $F_{real} = 7.500$ | 97,14 | 1 | 97,14 | 1 | 97,14 |
| | | | 2 | 194,27 | 2 | 194,27 |
| | | | 3 | 291,41 | 3 | 291,41 |
| | | | 4 | 388,54 | - | |
| | | | 5 | 485,68 | | |

Valorile tensiunilor din cârligul de remorcare rezultate prin analogie la etalon sunt:

$$\sigma_{int} = \frac{F_{real} \cdot \sigma_0 \cdot k_{int}}{F_{model}} = \frac{7.500 \cdot 0,86 \cdot 5}{66,6} = 485,68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ext} = \frac{F_{real} \cdot \sigma_0 \cdot k_{ext}}{F_{model}} = \frac{7.500 \cdot 0,86 \cdot 3}{66,6} = 291,41 \text{ MPa}$$

Determinarea tensiunilor din cârlig considerând încovoiere

După încărcarea modelului fotoelastic și identificarea numărului de izocromate apărute pe acesta se concepe tabelul 5.3, determinând tensiunea σ_0 pe baza relației 5.15.

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1}{k} = \frac{\frac{6 \cdot M_i}{g \cdot h^2}}{k} = \frac{6 \cdot F \cdot B_F}{k \cdot g \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 66,6 \cdot 120}{5 \cdot 8 \cdot 40^2} = 0,75 \text{ MPa}$$

unde $B_F = 120 \text{ mm}$ și $h = 40 \text{ mm}$ (h coincide cu diametrul barei cârligului)

Tabelul 5.3 Determinarea tensiunilor din cârlig considerându-se încovoiere în cârlig

| Colectare | F [N] | σ_0 [MPa] | k_{int} | σ_{int} [MPa] | k_{ext} | σ_{ext} [MPa] |
|---|--------------------------|---------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|
| 1. Calculul tensiunilor apărute în cârligul de remorcare în funcție de modelul fotoelastic al cârligului | F_{model} = 66,6 | 0,75 | 5 | 3,75 | 3 | 2,25 |
| 2. Calculul tensiunilor apărute în cârligul de remorcare în funcție de forța reală, prin analogie la valorile de la punctul 1 | F_{real} = 7.500 | 84,38 | 5 | 421,88 | 3 | 253,13 |

Valorile tensiunilor în cârligul de remorcare rezultate din calculul la încovoiere sunt:

$$\sigma_{int} = \frac{F_{real} \cdot \sigma_0 \cdot k_{int}}{F_{model}} = \frac{7.500 \cdot 0,75 \cdot 5}{66,6} = 421,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ext} = \frac{F_{real} \cdot \sigma_0 \cdot k_{ext}}{F_{model}} = \frac{7.500 \cdot 0,75 \cdot 3}{66,6} = 253,13 \text{ MPa}$$

Această metodă de calcul este pur teoretică și se bazează strict pe teorema lui Navier, așa cum apare în cercetările privind aplicațiile de încovoiere ale fotoelasticimetricii. În realitate s-a demonstrat că forma acestui cârlig necesită rezolvare prin teorema lui Winkler, în acest caz acceptându-se o abatere ipotetică pentru compararea unor rezultate.

După cum se cunoaște, secțiunea modelului din plexiglas este dreptunghiulară, iar secțiunea reală a cârligului de remorcare este circulară, prin urmare tensiunile rezultate nu pot fi comparate pur și simplu.

5.5 Compararea rezultatelor

Din analiza determinării analitice (calcul clasic) și numerice (MEF) a solicitărilor din cârligul de remorcare se constată o similitudine aproape perfectă, considerându-se metodele reciproc validate.

Prin urmare, așa cum s-a menționat anterior faptul că secțiunile modelului fotoelastic și cel real nu se aseamănă, pentru a veni în sprijinul comparării rezultatelor se proiectează virtual un cârlig cu secțiunea asemănătoare celui din plexiglas și cu ajutorul MEF se determină tensiunile din zonele de interes ale modelului, după care se vor compara rezultatele obținute prin cele două metode bazate pe fotoelasticimetrie cu cea bazată pe element finit. Rezultatele se vor raporta la cele obținute cu MEF, deoarece se consideră a fi o metodă validată pentru determinarea tensiunilor.

În figura 5.10 este atașată analiza cu MEF a cârligului de remorcare și sunt sugerate tensiunile care fac obiectul de interes.

Se centralizează datele obținute privind tensiunea interioară și exterioară din zona de curbură a cârligului de remorcare în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4 Centralizarea tensiunilor din cârlig obținute prin trei metode de calcul

| Metoda de determinare | | σ_{int} | σ_{ext} |
|-----------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|
| 1. | MEF | 543,2 | 332,8 |
| 2. | Fotoelasticimetrie – disc etalon | 485,68 | 291,41 |
| 3. | Fotoelasticimetrie – încovoiere | 421,88 | 253,13 |

5.5 Concluzii

Fotoelasticimetria este o metodă de determinare pe cale experimentală a tensiunilor dintr-un model, bazându-se pe proprietățile de birefrință ale materialului supus unei încărcări. Modelul se confecționează dintr-un material fotoelastic și trebuie să respecte forma sistemului studiat, dar nu și dimensiunile acestuia, putând fi realizat la o scară avantajoasă.

Determinarea tensiunilor apărute în modelul fotoelastic studiat se realizează prin două metode de calcul date de tehnica fotoelasticimetriei. Pe de o parte se realizează utilizând un disc pentru etalonarea materialului fotoelastic, după care se realizează calculele de rezistență ale cârligului prin analogie la discul etalon, iar pe de altă parte se consideră încovoiere pură în cârligul de remorcare.

Rezultatele obținute prin cele două metode de calcul privind fotoelasticimetria sunt analizate prin comparație cu rezultatele obținute printr-o metodă validată de calcul.

Parcurgând metodele analitice și numerice de determinare a tensiunilor au rezultat valori similare a tensiunilor din cârligul de remorcare, iar pentru simplificarea procesului de analiză a rezultatelor obținute prin tehnica fotoelasticimetriei se compară datele cu cele obținute prin MEF.

În realitate secțiunea cârligului de remorcare este circulară, iar modelul fotoelastic are secțiunea dreptunghiulară. Pentru a analiza rezultatele obținute prin fotoelasticimetrie se va realiza virtual un model identic cu cel din material fotoelastic, se va supune virtual încărcării astfel încât să poate fi comparate rezultatele celor două metode.

Aspectul cel mai important al acestui capitol este dat de confirmarea și validarea experimentală a zonei critice apărute în urma încărcării cârligului de remorcare.

CAPITOLUL VI

DETERMINĂRI EXPERIMENTALE ALE STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE PENTRU EPRUVETELE DIN CARE SUNT REALIZATE CÂRLIGELE DE REMORCARE

6.1 Aparatura și dispozitivele de testare

Determinarea experimentală a forțelor de încercare și deformare ale epruvetelor și ale cârligelor de remorcare s-a realizat pe o mașină verticală digitală de testare a rezistenței la tracțiune (fig. 6.2), rezultând astfel diagramele forță – deplasare ($F - \delta$). Introducându-se secțiunile de rupere ale epruvetelor se obțin prin analogie diagramele tensiune – deplasare ($\sigma - \delta$).

Pentru încercarea la tracțiune a epruvetelor s-au folosit bacurile zimțate din dotarea mașinii de testare a rezistenței la tracțiune. Pentru realizarea încercărilor la încovoiere a epruvetelor, cât și a încercărilor cârligelor de remorcare s-au proiectat, realizat și adaptat utilajului dispozitive speciale, prezentate în figura 6.4, respectiv figura 6.5.



Fig. 6.2 Mașină de testare a rezistenței la tracțiune („MTS” – S.C. Terwa Construction S.R.L.)

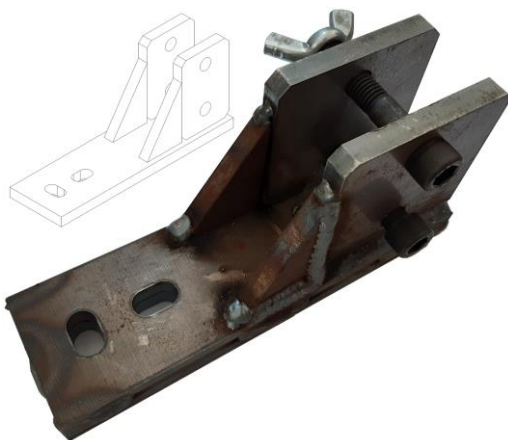


Fig. 6.5 Dispozitiv pentru încercarea cârligelor de remorcare



Fig. 6.4 Dispozitiv pentru încercarea epruvetelor la încovoiere

6.2 Materiale utilizate pentru epruvete, tehnologii de obținere

Doarece scopul tezei de doctorat este de a stabili soluții inovative privind materialele pentru sistemele de remorcare, se cercetează posibilitatea înlocuirii materialelor din care se confecționează sistemele de remorcare actuale (oțeluri) cu diferite tipuri de materiale folosite în alte domenii ingineresti, iar pentru confecționarea epruvetelor în vederea comparării comportamentului diferitelor tipuri de materiale s-au folosit următoarele:

1. Fibră de carbon cu țesătură unidirecțională + rășină tip SIKADUR 330;
2. Fibră de carbon cu țesătură unidirecțională + rășină tip Epoxy L385 + întăritor 385;
3. Oțel echivalent cu cel al cârligului de remorcare, S355J2, prelucrare prin așchiere;
4. Aluminiu pur 99,7%, turnare gravitațională;
5. Aliaj de aluminiu AlSi10MnMg, turnare sub presiune;
6. Aliaj de aluminiu AlSi12Cu1Fe, turnare sub presiune.

6.3 Masa specifică a materialelor luate în studiu

Masa specifică (densitatea, ρ [g/cm^3]) a materialelor variază în funcție de compoziția chimică din care sunt alcătuite, iar materialele studiate în lucrarea de față au valorile densității afișate în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1 Masa specifică a materialelor studiate în lucrare

| Material | Densitate ρ , [g/cm^3] |
|------------------------------|---|
| Oțel | 7,75 ÷ 7,85 |
| Fibră de carbon | 1,7 ÷ 1,8 |
| Aluminiu / Aliaj de aluminiu | 2,6 ÷ 2,7 |

Se observă că materialul cu cea mai mare masă specifică este oțelul, motiv pentru care se dorește studiul obținerii cârligelor de remorcare din materiale alternative, tocmai în ideea de a reduce din masa totală a autovehiculului.

Materialele propuse pentru înlocuirea oțelului au această proprietate mult inferioară, masa specifică a materialelor compozite pe bază de fibră de carbon fiind la 20% din cea a oțelului, iar densitatea aluminiului și a aliajelor pe bază de aluminiu fiind la 33% din cea a oțelului.

6.4 Compararea rezultatelor epruvetelor solicitate la tracțiune

Rezultatele privind forța de rupere a materialului la tracțiune reprezintă media aritmetică a forțelor care acționează pe toate cele 10 epruvete obținute din fiecare tip de material studiat [40].

Analog s-a efectuat calculul privind tensiunea de rupere la tracțiune a fiecărui tip de material.

Pe baza diagramelor de forțe specifice fiecărei epruvete se realizează diagrama de tensiuni. Comparând diagrama forțelor cu cea a tensiunilor se constată de fapt că rezistența cea mai mare la rupere o prezintă epruvetele din fibre de carbon cu rășină tip Epoxy.

În figura 6.17 este prezentată variația tensiunii epruvetelor solicitate la tracțiune, în funcție de materialul utilizat și numărul de identificare al fiecărei epruvete.

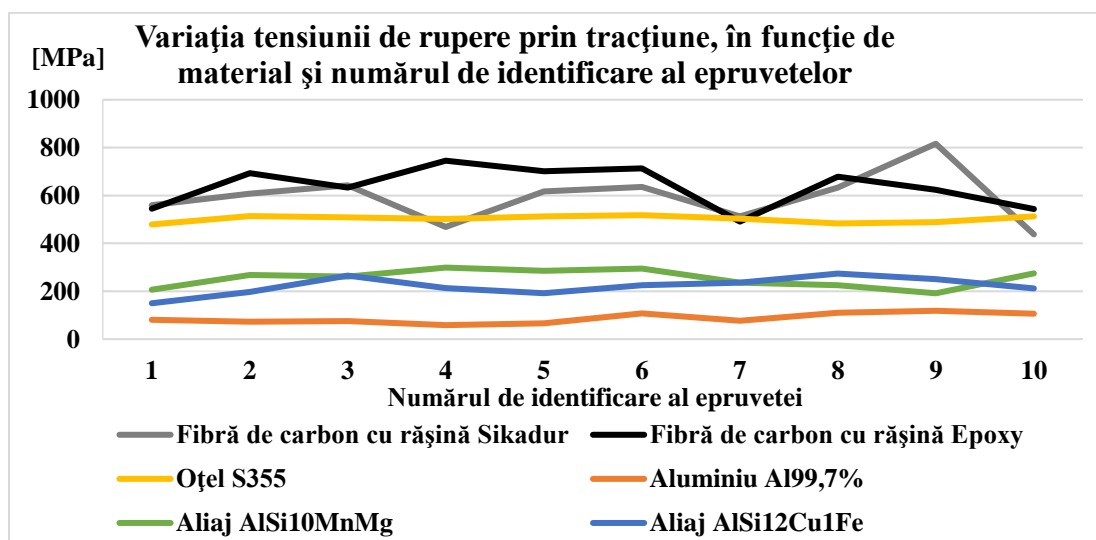


Fig. 6.17 Tensiunea de rupere asupra epruvetelor de tracțiune

Se observă din figura 6.17 că epruvetele cu comportamentul cel mai constant al tensiunii sunt cele din oțel, justificându-se prin faptul că omogenitatea materialului este foarte bună, existând o multitudine de studii și teorii diverse în acest sens.

Bineînțeles, așa cum era de așteptat, epruvetele din aluminiu pur

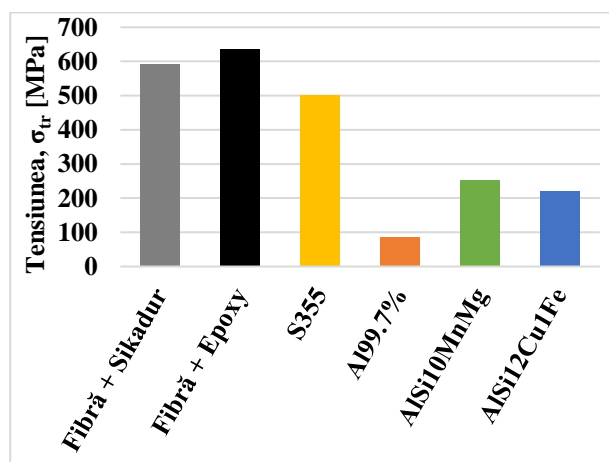


Fig. 6.16 Tensiunea de rupere la tracțiune a epruvetelor

99,7% sunt cele mai puțin rezistente la rupere, fiind materialul cel mai slab din punct de vedere al tensiunii la rupere. Din acest motiv nici nu sunt întâlnite în industria structurilor de rezistență.

Prin îmbunătățirea proprietăților aluminului, prin alierea cu diverse elemente chimice, se observă că aliajele capătă rezistență ridicată față de cea a aluminului pur.

O informație prețioasă extrasă din diagramele de forțe rezultate de la mașina de tracțiune este referitoare la deformația sau alungirea epruvetelor solicate la tracțiune.

Starea de deformație se consideră sub două forme:

- Δl , informație regăsită în diagrama de efort,
- ε , informație rezultată din relația 6.5.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_U - l_0}{l_0} \quad (6.5)$$

unde $l_0 = 70$ mm, reprezentând lungimea de calcul a epruvetei

Privind deformațiile după solicitări ale diferitelor tipuri de materiale, informații atașate în figura 6.19, se pot face următoarele afirmații:

- **Materialul cel mai elastic este de departe oțelul, cu o alungire de 40%;**
- **Al doilea cel mai elastic material este alumiul pur, cu o alungire sub 15%;**
- **Ambele tipuri de materialele compozite au alungirea ușor peste 7%;**
- **Aliajele de aluminiu au alungirea cea mai scăzută, AlSi10MnMg cu alungirea de 4,5% și AlSi12Cu1Fe cu alungirea de 3,4%.**

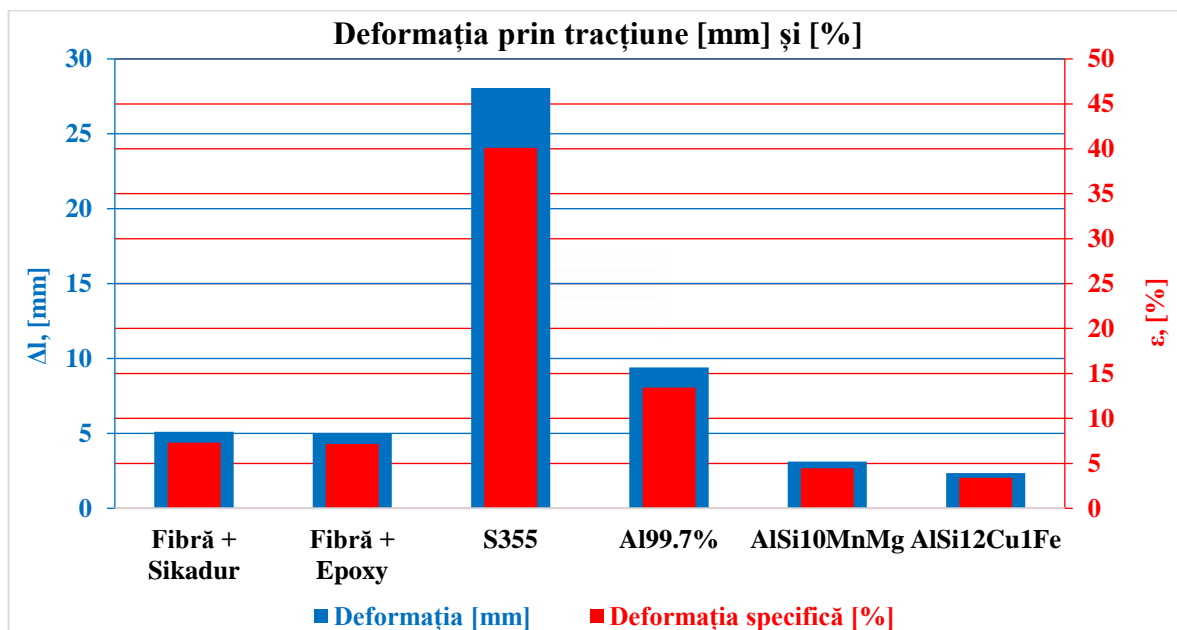


Fig. 6.19 Deformația & Deformația specifică prin tracțiune a epruvetelor

6.5 Compararea rezultatelor epruvetelor solicitate la încovoiere

Rezultatele privind forța de rupere a materialului la încovoiere reprezintă media aritmetică a forțelor care acționează pe toate cele 10 epruvete obținute din fiecare tip de material studiat.

Tensiunea cea mai mare apare la jumătatea celor două reazeme, în punctul unde acționează forța. Determinarea tensiunii de rupere prin încovoiere pentru fiecare epruvetă se realizează aplicând relația 6.6 a lui Navier, cu elementele constitutive din figura 6.21:

$$\sigma_{i2} = \frac{M_i}{W_z} = \frac{\frac{F}{2} \cdot B_F}{\frac{h \cdot g^2}{6}} = \frac{\frac{F}{2} \cdot \frac{l_0}{2}}{\frac{h \cdot g^2}{6}} = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{2 \cdot h \cdot g^2} \quad (6.6)$$

Dintre cele două materiale compozite rezistența cea mai mare la rupere o prezintă epruvetele din fibre de carbon cu rășină tip Epoxy.

Rezistența cea mai scăzută la încovoiere o are aluminiul pur, iar dintre aliajele de aluminiu, AlSi10MnMg prezintă performanțe mai ridicate decât AlSi12Cu1Fe.

În figura 6.23 este prezentată variația tensiunii epuvetelor solicitate la încovoiere, în funcție de materialul utilizat și numărul epruvetei.

Se observă din figura 6.23 că epruvetele cu comportamentul cel mai constant al tensiunii sunt cele din oțel, justificându-se prin faptul că omogenitatea materialului este asigurată, existând o multitudine de studii și teorii diverse în acest sens.

Bineînțeles, așa cum era de așteptat, epruvetele din aluminiu pur 99,7% sunt cele mai puțin rezistente la rupere, fiind materialul cel mai slab din acest punct de vedere.

Prin îmbunătățirea proprietăților aluminiului, prin alierea cu diverse elemente chimice, se observă că aliajele capătă rezistență ridicată față de cea a aluminiului pur.

Epruvetele din fibră de carbon cu rășină de tip Sikadur au comportament mai performant decât epruvetele din fibră de carbon cu rășină tip Epoxy, iar epruvetele din aliaj de aluminiu AlSi10MnMg au performanțe mai bune decât cele din AlSi12Cu1Fe.

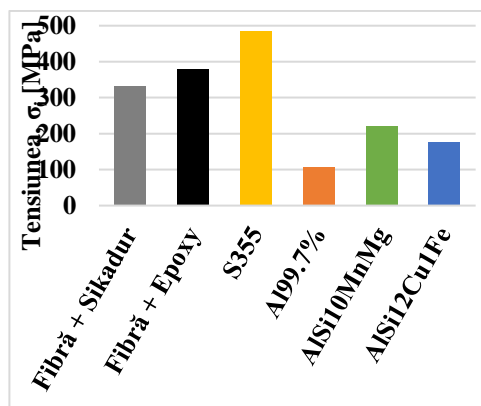


Fig. 6.22 Tensiunea de rupere la încovoiere asupra epruvetelor

Epruvetele din fibră de carbon și rășină de tip Sikadur au comportament mai avantajos, în sensul că diferența dintre tensiunile epruvetelor cele mai performante și cele mai lipsite de performanță este mai apropiată de valoarea 0%.

De remarcat însă este comportamentul epruvetelor la încovoiere. Cele confecționate din oțel și aluminiu pur tind să se poată deforma neavând limită, fără a se produce ruperea, fapt pentru care sunt materiale cu coeficient de alungire superior; epruvetele confecționate din fibre de carbon și cele din aliaje de aluminiu se distrug complet, ajungând să formeze două părți diferite, deoarece materialele sunt mai casante.

6.6 Concluzii

Valorile obținute experimental ale caracteristicilor mecanice specifice materialelor alternative comparate cu proprietățile transpuse în capitolul I, privind elementele teoretice ale materialelor compozite pe bază de fibre de carbon și ale aliajelor de aluminiu, permit desprinderea următoarelor concluzii:

- rezistența la tracțiune (limita de rupere – σ_r) obținută experimental este în medie de 620 MPa pentru epruvetele din FC, în comparație cu 2.700 MPa rezistența teoretică a fibrei de carbon, însă epruvetele au în compoziție 40% rășină epoxidică;

- rezistența la tracțiune (limita de rupere – σ_r) obținută experimental este în medie de 240 MPa pentru epruvetele din AAl, valoare regăsită în plaja de valori teoretice ale rezistenței la tracțiune specifice aliajelor de aluminiu de 150 ÷ 450 MPa;

- rezistența la tracțiune (limita de rupere – σ_r) obținută experimental este în medie de 87 MPa pentru epruvetele din aluminiu pur, valoare regăsită în plaja de valori teoretice ale rezistenței la tracțiune specifice aluminiului de 70 ÷ 100 MPa;

- alungirea obținută experimental a epruvetelor din AAl este de 4%, valoare care intră în plaja teoretică specifică alungirii AAl de 0,5 ÷ 18%;

- alungirea obținută experimental a epruvetelor din aluminiu pur este de 13%, valoare care este ieșită din plaja teoretică specifică alungirii aluminiului pur de 20 ÷ 45%.

Analizând toate informațiile din procesul de testare a epruvetelor, atât la tracțiune, cât și la încovoiere, nu se poate afirma că un tip de material anume are proprietățile cele mai performante, fiecare tip având anumite avantaje mai importante sau mai puțin importante.

CAPITOLUL VII

CERINȚE TEHNOLOGICE DE REALIZARE A CÂRLIGELOR DE REMORCARE DIN OȚEL, MATERIALE COMPOZITE, ALUMINIU ȘI ALIAJE DE ALUMINIU

7.1 Itinerariul tehnologic al cârligelor de remorcă din oțel

Marea majoritate a cârligelor de remorcă întâlnite la autovehiculele cu masa mai mică de 3,5 tone sunt simple, datorită prețului redus de achiziție și montaj.

După cum s-a specificat în capitolul al II-lea, tehnologia de obținere în serie a acestui tip de cârlig începe de la un semifabricat sub formă de bară circulară, debitat la lungimea stabilită, forjat și strunjit la un capăt, îndoit la mijloc, aplatizat și gaurit la capătul opus sferei.

7.2 Cerințe specifice tehnologiei de execuție

Comportarea diferită a materialelor și a tipurilor de materiale, condițiile de fabricație aflate la dispoziție și cunoștințele în tehnologia de obținere a unui produs au condus spre varietatea metodelor de fabricare a cârligelor de remorcă, din mai multe tipuri de materiale.

7.2.1 Cerințe tehnologice impuse de materialele compozite

Este cunoscut faptul că materialele compozite sunt foarte greu reciclabile, reutilizabile și remodelabile, motiv pentru care din faza de proiectare a produselor din aceste tipuri de materiale trebuie cunoscute dimensiunile exacte și realizată corect tehnologia de fabricație. O eventuală corectare a dimensiunilor sau a formelor geometrice ale acestor repere este foarte greu sau chiar imposibil de realizat după polimerizare.

Pentru confecționarea cârligului de remorcă din materiale compozite pe bază de fibre de carbon, primele etape sunt de proiectare și executare a unei matrițe alcătuită din două părți, care copiază geometria cârligului de remorcă realizat din oțel. Matrița este realizată din fibre de sticlă polimerizată cu rășină epoxidică, având înglobate 4 bucșe de centrare pentru a se asambla perfect pentru execuția cârligului de remorcă.

7.2.2 Cerințe tehnologice impuse de aluminiu și aliajele de aluminiu

Aliajele de aluminiu prezintă o diversitate foarte mare de tehnologii prin care se pot realiza produse finite, în funcție de compoziția chimică, respectiv elementul principal de aliere, după aluminiu.

Procedeele de obținere a cârligului de remorcă este prin turnare gravitațională manuală în amestec de formare clasic KONSAB E24, realizat cu rame metalice detașabile, modelând amestecul după cârligul de remorcă realizat din oțel – fig. 7.11.

Amestecul de formare utilizat este preparat din fabricație, iar fragmentele care au intrat în contact direct cu aluminiul sau siluminiul topit nu au mai fost refolosite.

7.3. Concluzii

Realizarea modelelor de cârlige de remorcă s-au realizat la companii specializate pe diversele tehnologii necesare, după cum urmează:

- Ansamblul de remorcă, cârligul de remorcă și epruvetele din oțel este realizat la S.C. Terwa România S.R.L.;

- Cârligul de remorcă și epruvetele din fibre de carbon este realizat la compania specializată S.C. Compozite S.R.L.;

- Cârligele de remorcă și epruvetele din aliaje de aluminiu și aluminiu pur sunt realizate la S.C. Electroprecizia Electrical Motors S.R.L.;

- Încercările experimentale sunt realizate la laboratorul de Rezistența Materialelor din cadrul Universității „Transilvania” din Brașov și S.C. Terwa Construction S.R.L..

Pentru compararea solicitărilor și deformațiilor prin determinări experimentale asupra cârligelor de remorcă realizate din mai multe tipuri de materiale s-au confecționat 5 mostre: unul din oțel, unul din compozite pe bază de fibre de carbon cu inserții metalice, două cârlige din două tipuri de aliaje de aluminiu și unul din aluminiu cu puritate de 99,7%.

Procesele de fabricație sunt diverse, având mai multe faze, fiecare material utilizând tehnologie specifică de obținere a cârligului de remorcă.

Obținerea cârligelor s-a realizat prin respectarea regulilor și sugestiilor experților din domeniile de activitate necesare, din zona de materiale compozite, dar și din cea de turnatorie. Cârligul de remorcă din oțel respectă standardele de producție în serie a acestora, dar și pe cele ale managementului calității din industria auto ISO TS 16949.

CAPITOLUL VIII

CERCETĂRI EXPERIMENTALE ALE SISTEMELOR DE REMORCARE

8.1 Detalierea procesului experimental

Așa cum s-a detaliat în primele capitole ale lucrării, aprofundarea determinărilor experimentale ale cârligelor de remorcă confectionate din mai multe tipuri de materiale poate aduce beneficii în industria automotive, reducând masa totală a autovehiculelor dotate cu astfel de sisteme.

Tot în capitolele anterioare s-au specificat tipurile de materiale luate în studiu, tipurile de materiale din care s-au confectionat cârligele de remorcă, argumentele pentru care au fost acestea selectate, dar nu în ultimul rând avantajele și dezavantajele acestora.

De asemenea, în capitolul VI s-au prezentat utilajele și dispozitivele proiectate, desenate și executate care au contribuit la determinarea experimentală a cârligelor de remorcă.

Rezumând informațiile regăsite în toate capitolele anterioare, capitole care contribuie la realizarea capitolului de față, se subliniază următoarele:

- determinările experimentale constau în testarea pe de o parte a întregului sistem de remorcă, iar pe de altă parte a cârligelor de remorcă pe o mașină de tracțiune, **simulând frânarea autovehiculului cu remorcă**, aplicație transpusă în compresiune pe mașina de tracțiune. Mașina de tracțiune este cu o capacitate de 100 tone forță, însă este de ultimă generație și cu acuratețe convenabilă experimentelor (MTS – companie americană);

- target-ul determinărilor experimentale este ca mostrele cârligelor de remorcă să reziste la o forță mai mare sau cel puțin egală cu 7.500 N, această valoare rezultând din calculul frânării accentuate a unui autovehicul cu remorca atașată, unde remorca tinde să împingă autovehiculul spre a înainta.

Activitatea practică a acestui capitol este constituită din adaptarea fixării sistemului de remorcă și a fixării cârligelor de remorcă pe platoul mașinii de tracțiune, utilizând dispozitive realizate special pentru aceste aplicații (fig. 6.4 și fig. 6.5), proiectate și realizate de autorul tezei. Tot din activitatea practică se constituie și testarea cârligelor de remorcă fabricate din diversele tipuri de materiale, fiecare cârlig de remorcă fiind testat individual.

8.2 Determinări experimentale asupra sistemului de remorcare

Ansamblul de remorcare reprezintă (fig. 8.1) o structură cu geometrie destul de complexă supusă la efort, în care stările de tensiuni și deformații nu pot fi identificate și măsurate cu ușurință, fiind nevoie de câteva baze de calcul anterior efectuate.



Fig. 8.1-a Sistemul de remorcare fixat pe masa de verificare dimensională



Fig. 8.1-b Sistemul de remorcare fixat pe mașina de testare la tracțiune

În acest tip de încercare experimentală nu se poate determina zona unde apare efortul cel mai mare decât prin analogie la cercetările teoretice de calcul analitic și (sau) numerice.

În cercetările privind calculul clasic de rezistență, dar și din MEF și fotoelasticimetrie a rezultat faptul că în cârligul de remorcare, în zona interioară a razei de curbura, apare tensiunea cea mai mare din întregul sistem de remorcare. Prin urmare, se va considera în studiul experimental al sistemului de remorcare faptul că tensiunea cea mai ridicată apare tot în zona mai sus indicată a cârligului, iar cu valorile forțelor înregistrate de mașina de testare a rezistenței se va realiza calculul tensiunilor apărute în cârligul de remorcare.

8.3 Determinări experimentale asupra cârligelor de remorcare

Solicitarea întâlnită în determinarea experimentală a cârligelor de remorcare nu este pură, fiind o solicitare compusă din încovoiere cu tracțiune – compresiune (fig. 8.3). Din acest motiv, înainte de determinarea experimentală a tensiunilor și deformațiilor apărute în cârligele de remorcare s-au efectuat teste experimentale pe epruvete, atât la tracțiune cât și la încovoiere.

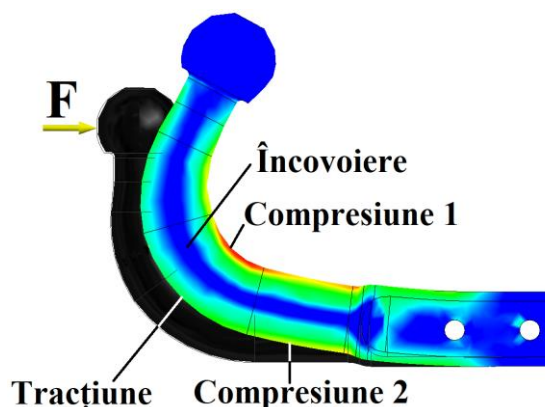


Fig. 8.3 Solicitățile apărute în cârligul de remorcare

Solicitarea principală este de încovoiere și apare aproape pe toată lungimea cârligului, începând din zona gâtului până în dreptul găurii cele mai îndepărtate de bilă.

Pe lângă aspectele pozitive din punct de vedere al rezistenței cârligului de remorcare realizat din fibre de carbon, un alt aspect pozitiv este faptul că acesta nu s-a dezintegrat în zona de adeziune dintre fibrele de carbon și sfera metalică.

Acest cârlig are un dezavantaj în comportament deoarece în figura 8.5 se observă urme de dezintegrare totală în zona cozii acestuia (macrofisuri pe aplatizare), însă aspectul pozitiv din acest inconvenient este că reperul nu s-a rupt complet în mai multe părți, așa cum s-a întâmplat cu epruvetele echivalente testate.

Dacă forța de apăsare a mașinii de tracțiune ar fi continuat să acționeze asupra cârligului cu siguranță acesta ar fi suferit dezintegrare în mai multe componente.

Cârligul de remorcare realizat din fibre de carbon s-a rupt în acea zonă deoarece bușca

din oțel, fibrele de carbon și rășina epoxidică nu au preluat forța ca un material omogen și nu au lucrat concomitent. Din cauza efortului bușca a rupt adeziunea de fibre și a provocat o presiune suplimentară pe acestea, până ce fragmente din materialul compozit au cedat.

Cârligul de remorcare din oțel a avut comportamentul cel mai favorabil la acționarea forței, în sensul că a rezistat la forța cea mai mare și nici nu a ajuns la deteriorare majoră sau rupere, deformându-se doar plastic.

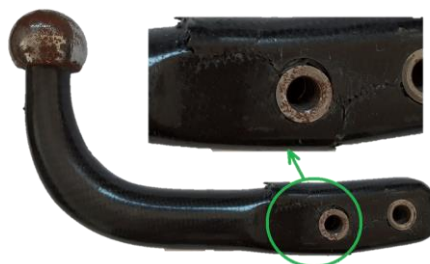


Fig. 8.5 Cârligul din fibre de carbon după testare, dezintegrat

Despre **cârligul de remorcare realizat din aluminiu pur** se poate spune că a avut un comportament avantajos, deoarece deformarea s-a realizat plastic, însă fără rupere; dezavantajul major constă în rezistența foarte scăzută.

Luând în considerare forța reală de compresiune pe sfera cârligului de remorcare (forță teoretică, mai mică decât cea obținută la mașina de tracțiune) se poate spune că rezistența cârligului din aluminiu pur este de aproximativ 12% din cea a cârligului din oțel, diferență care este considerabil mai mare decât în cazul comparării epruvetelor supuse la încovoiere ($\approx 20\%$).

Cârligele realizate din AlSi10MnMg și AlSi12Cu1Fe au comportament asemănător, curbele caracteristice rezultate în urma aplicării forțelor fiind curbilini.

Comparând diagramele de efort ale celor două cârlige de remorcare din aliaje de aluminiu, se confirmă studiul și concluziile din capitolul VI, acolo unde s-a analizat comparativ comportamentul epruvetelor. Din aliajul AlSi10MnMg se obțin componente cu rezistență mai ridicată, dar și cu coeficient de alungire mai mare decât componentele realizate din AlSi12Cu1Fe.

O altă asemănare dintre rezultatele obținute în urma determinărilor experimentale este aceea că ambele au suferit rupere, ba mai mult, chiar în aceeași zonă, lucru dezavantajos în industria constructoare de mașini.

În tabelul 8.2 sunt prezentate rezultatele obținute în urma determinărilor experimentale, alăturându-se masa specifică a cârligelor de remorcare, dar și forța corespunzătoare fiecărui cârlig până în domeniul plastic, respectiv rupere. Valorile tensiunii maxime din tabel se obțin prin analogie la MEF.

Tabelul 8.2 *Proprietățile determinărilor experimentale ale cârligelor de remorcare*

| Tipul de material al cârligului | Forța maximă [kN] | Deplasarea maximă [mm] | Tensiunea maximă [MPa] | Masa specifică [g] | Rupere DA / NU |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------------|-----------------|
| Fibre de carbon | 😊 14,436 | 27,65 | 354,36 | 780 * 😊😊 | 😞 DA & NU ** |
| S355 | 😊😊 24,724 | 13,85 | 606,89 | 😞😞 3.400 | 😊 NU |
| Al99,7 | 5,134 *** 😞😞 2,905 | 54,60 | 71,31 | 😊 1.050 | 😊 NU |
| AlSi10MnMg | 😊 8,504 | 18,80 | 208,74 | 😊 1.050 | 😞 DA |
| AlSi12Cu1Fe | 😞 7,401 | 15,40 | 181,67 | 😊 1.050 | 😞 DA |

Epruvetele care s-au rupt prin solicitare sunt din aceleași materiale precum cel al cârligelor de remorcare care s-au rupt la testare, și anume: AlSi10MnMg și AlSi12Cu1Fe. Încă de la testarea epruvetelor s-a constatat că aceste materiale sunt mai casante, prezentând coeficient de alungire deficitar.

Chiar dacă nu s-a deteriorat complet (așa cum se poate observa în cazul cârligelor din cele două tipuri de siluminuri), integritatea cârligului de remorcare realizat din fibre de carbon a fost afectată considerabil, rămânând doar câteva fibre de legătură nedistruse complet. La fel s-a întâmplat și în cazul epruvetelor realizate din ambele tipuri de materiale compozite, când ruperea la solicitarea de încovoiere a fost aproape completă, cele două părți ale epruvetelor fiind menținute în contact doar de câteva fibre.

Cârligele de remorcare care nu s-au rupt pe parcursul testelor sunt din aceleași materiale precum epruvetele care nu s-au rupt la solicitarea de încovoiere, aceste materiale fiind S355 și Al99,7%. La testarea epruvetelor s-a constatat că aceste materiale sunt mai elastice, prezentând coeficient de alungire mai ridicat.

Transpunerea unor valori din tabelul 8.2 într-un grafic de forțe este prezentată în figura 8.13, acolo unde se observă că pentru același design al cârligelor, cu aceeași formă și aceeași secțiuni, rezistența cea mai mare o prezintă cârligul de remorcare realizat din oțel S355, iar în continuarea capitoului se vor prezenta raportări ale tipurilor de materiale alternative la oțel, oțelul fiind materialul din care în prezent se confecționează cârlige de remorcare la nivel mondial.

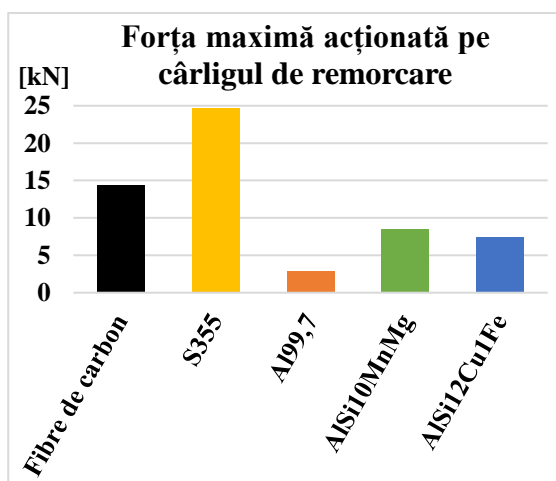


Fig. 8.13 Forța maximă acționată pe cârligul de remorcare

Curbele caracteristice, obținute în urma determinărilor experimentale, specifice celor 5 cârlige de remorcare sunt suprapuse în diagrama din figura 8.14, iar această imagine evidențiază foarte bine diferențele comportamentale ale acestora.

Analizând curbele din figura 8.14, se observă că cel mai rezistent cârlig este cel din oțel, urmat de cel din fibre de carbon, iar cel mai puțin rezistent este cel din aluminiu pur; cele din aliaje sunt superioare celui din Al99,7%, însă avantajele fiecărui tip de material sunt enumerate în continuare, chiar dacă prezintă rezistență precară.

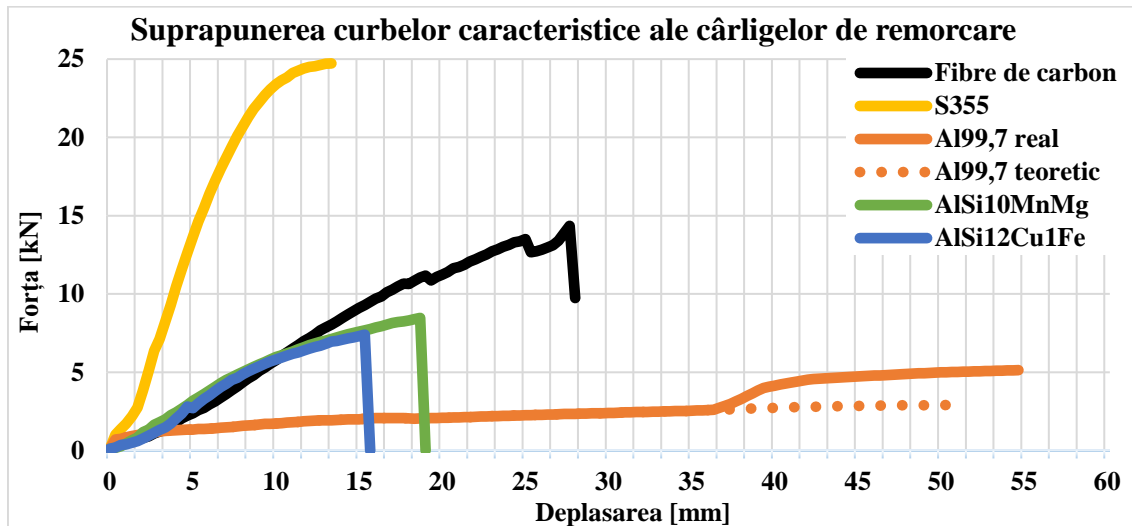


Fig. 8.14 Suprapunerea curbelor caracteristice ale cârligelor de remorcare

8.4 Comparații în determinările experimentale

Comparând comportamentul cârligului de remorcare din oțel testat individual cu comportamentul cârligului de remorcare testat în ansamblul de remorcare se pot prezenta câteva fenomene extrem de interesante întâlnite la cele două procese de încercări experimentale.

La suprapunerea curbelor caracteristice specifice sistemului de remorcare și cârligului de remorcare individual din figura 8.18 se observă variații considerabile de rezistență a componentului principal de dezbatere.

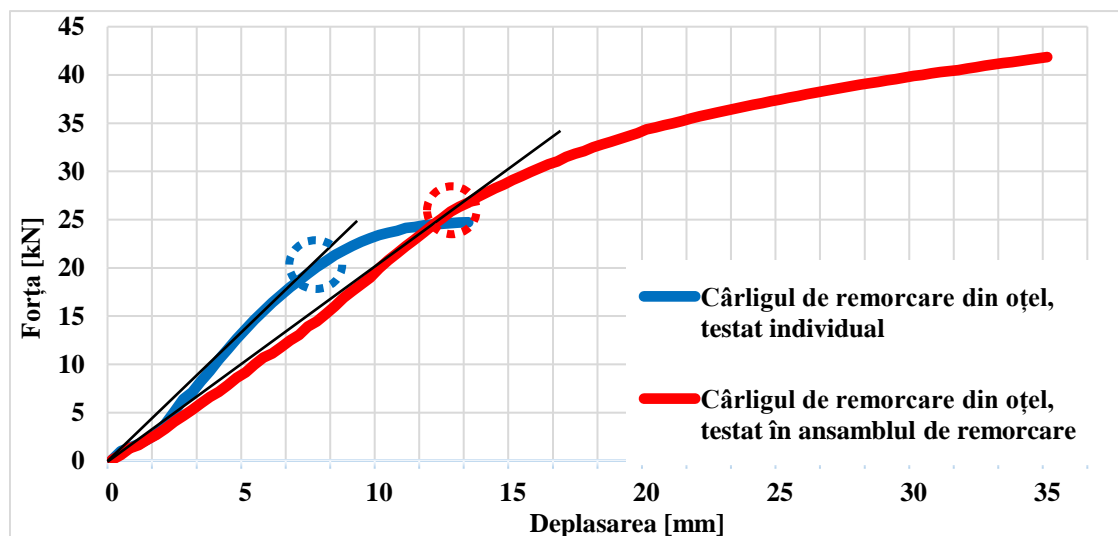


Fig. 8.18 Suprapunerea curbelor caracteristice ale cârligului de remorcare din oțel și sistemului de remorcare

8.5 Soluții de optimizare a cârligului de remorcare

În tehnică se utilizează foarte mult optimizarea structurilor de rezistență, astfel încât să apară cât mai puține zone concentratoare de tensiuni, atât prin adaosuri de material acolo unde tensiunile sunt mai ridicate, dar și prin extragere de material în acele zone cu valorile reduse ale tensiunilor.

Prin urmare, în acest subcapitol se propune o soluție de concept mai avantajoasă privind reducerea tensiunilor din zona critică a cârligului de remorcare, prin modificarea geometriei din secțiunea acestuia, păstrând pentru comparație aceeași arie a secțiunii transversale (ca element de optimizare), dar și același volum de material corespunzătoare cârligului de remorcare de referință.

În același timp se prezintă o soluție de concept inferioară soluției actuale, cea a cârligului de remorcare cu secțiunea circulară, pentru a se demonstra că este foarte importantă alegerea secțiunii la construcția cârligelor de remorcare.

În lucrările [38] și [39] se regăsesc studii individuale de optimizare a formei geometrice pentru secțiuni, privind conceptele cârligelor de remorcare, iar în figura 8.20 este ilustrată imaginea de ansamblu a acestora.

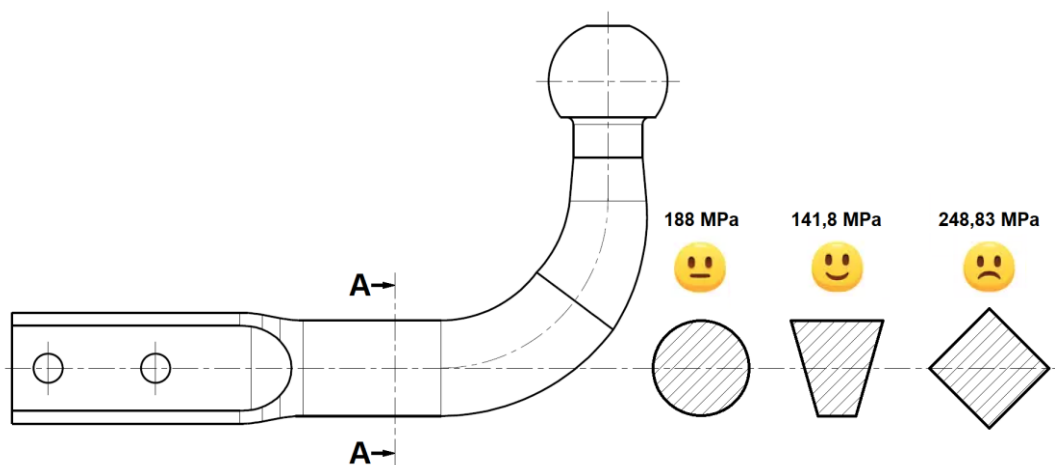


Fig. 8.20 Concepte și propuneri pentru optimizarea cârligului de remorcare

O secțiune trapezoidală poate conduce spre reducerea tensiunii cu cel puțin 25% în comparație cu cea obținută în cazul cârligului cu secțiunea circulară.

În ceea ce privește soluția cu secțiunea pătrată și raza de îndoire după o muchie poate duce la creștere exagerat de mare a tensiunii, chiar și de 1,5 ori valoarea tensiunii din cârligul de referință.

Îmbunătățirea caracteristicilor mecanice ale componentelor realizate pe bază de aluminiu se poate realiza prin aplicarea diverselor tratamente termice.

Este cunoscut faptul că prin turnarea aluminiului și a aliajelor de aluminiu în cochilii la presiuni ridicate cât și gravitațional, se introduc tensiuni interne în masa materialului, în interiorul grăunților, cauzate de solidificare, cât și între atomii dislocați la nivelul rețelei cristaline formate.

8.6 Concluzii

Pentru fixarea sistemului de remorcare, dar și pentru fixarea cârligelor de remorcare pe utilajul de testare a rezistenței la tracțiune cu o forță maximă de 100 tone este nevoie de dispozitive realizate special, iar forța care acționează pe sistem și pe cârlige este mărită treptat până la ruperea sau deformarea semnificativă a acestora.

Fiind un ansamblu cu geometrii complexe, pentru sistemul de remorcare nu se poate ști cu exactitate modalitatea de deformare și nici distribuția tensiunilor interne. Numai după o analiză efectuată în prealabil cu metode teoretice de determinare se poate stabili un potențial mod de deformare și zonele potențiale critice.

Privind testarea întregului sistem de remorcare, după efectuarea analizelor teoretice pe baza calculelor de rezistență, dar și cu ajutorul MEF, se ajunge la concluzia că efortul cel mai ridicat din sistem apare în interiorul razei de curbură a cârligului de remorcare, prin urmare, în experiment se pune accentul pe starea de tensiune și de deformație care apare în zona menționată.

Solicitățile care apar în structura cârligului de remorcare sunt complexe, după cum urmează: încovoiere pe toată lungimea cârligului de la sferă și până în dreptul celei mai îndepărtate găuri de fixare a cârligului, compresiune și tracțiune datorate încovoierei și compresiunii.

Prezentând situația actuală, în care cârligele de remorcare sunt cu design similar, se poate afirma despre cârligul de remorcare din oțel că este cel cu rezistența mecanică cea mai ridicată, cârligul realizat pe bază de fibre de carbon este mai rezistent decât cele realizate pe bază de siluminiiu, iar cârligul alcătuit din aluminiu pur prezintă cele mai slabe caracteristici mecanice privind rezistența.

Pe de altă parte, privind situația din punct de vedere al masei specifice al fiecărui tip de cârlig de remorcare, se poate spune că cel mai dezavantajos cârlig este cel din oțel, iar

produsul cu masa cea mai scăzută este cel realizat din fibre de carbon. Cârligele din aluminiu și siluminii au masa mai apropiată de cea a cârligului din fibre de carbon și foarte îndepărtată față de cea a cârligului din oțel.

Raportând fiecare dintre valorile forțelor de acționare asupra cârligelor la valorile corespunzătoare maselor specifice fiecărui cârlig se obține câte un indice de comparație. Valorile ridicate ale indicelui reprezintă o performanță mai mare pentru acel cârlig confecționat din materialul respectiv. Din acest punct de vedere cel mai performant cârlig este de departe cârligul din fibre de carbon, cârligele din siluminii au performanțe asemănătoare cu cel din oțel (AlSi10MnMg ușor mai performant, AlSi12Cu1Fe mai lipsit de performanță), cârligul din Al99,7% performanță foarte slabă.

În ceea ce privește aspectul fizic al cârligelor după testare, făcând abstracție de forțele de acționare, se poate spune că produsele confecționate din oțel și aluminiu pur sunt cele mai avantajoase deoarece nu s-au rupt, acestea s-au deformat doar plastic. Cârligul de remorcă din fibre de carbon nu s-a rupt în mai multe componente, însă acesta s-a deteriorat complet, rupându-se adeziunea dintre inserțiile metalice și fibrele de carbon. Componentele din aliaje de aluminiu sunt totat dezavantajoase la acest capitol deoarece s-au rupt alcătuind două părți independente una față de cealaltă, iar industria auto nu permite acest tip de comportament.

Pentru reducerea disconfortului creat de ruperea cârligelor de remorcă din siluminii s-ar putea realiza studii de aliere a aliajului cu alte elemente chimice în vederea scăderii proprietății materialului de a fi fragil.

O modalitate de creștere a rezistenței mecanice a cârligelor de remorcă este aceea de a optimiza forma constructivă a secțiunii semifabricatului. De asemenea, prin modificarea secțiunii se pot obține caracteristici mecanice mult inferioare soluției actuale, prin urmare optimizarea trebuie realizată minuțios, studiind distribuția tensiunilor apărute în sistem.

Îmbunătățirea proprietăților mecanice ale cârligelor de remorcă realizate din aliaje de aluminiu se poate realiza prin aplicarea unui tratament termic de recoacere. În acest mod, în structura materialului se ajunge la eliminarea tensiunilor interne din structura materialului (din timpul fazei de solidificare).

CAPITOLUL IX

REZULTATE FINALE. COMPARAȚII – CONCLUZII FINALE – CONTRIBUȚII PROPRII – DISEMINAREA REZULTATELOR – DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

9.1 Rezultate finale. Comparații

În acest subcapitol se va pune accent pe compararea rezultatelor obținute în vederea îndeplinirii obiectivelor propuse ale lucrării. Pentru aceasta se va face compararea determinărilor teoretice, specifice tensiunilor apărute asupra sistemului de remorcare integral, dar și a cârligului de remorcare individual, prin cele trei metode (calcul clasic, element finit, fotoelasticimetrie).

Centralizarea datelor se realizează în tabelul 9.1.

Tabelul 9.1 Tensiunile critice obținute prin cele 3 metode de determinare

| Metoda de determinare | Zona de determinare | | |
|-----------------------|---|---|---|
| | Interiorul razei de curbură a cârligului de remorcare, σ_{int} | Exteriorul razei de curbură a cârligului de remorcare, σ_{ext} | Capetele grinzii de rezistență ale întregului sistem de remorcare |
| | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| Calcul clasic | 188 | 117,04 | 63,82 |
| MEF | 184,9 | 118,6 | 63,4 |
| Fotoelasticimetrie | 164,6 | 104,4 | - |

Determinarea tensiunilor apărute în sistemul de remorcare are un rol extrem de important în vederea fiabilității soluției tehnice proiectate. Cu același scop, calculul de rezistență validează sau invalidează soluția, în cazul negativ fiind necesară o redimensionare a elementelor cauzatoare de potențiale riscuri de distrugere. Obținerea unor rezultate foarte avantajoase din punct de vedere a rezistenței mecanice induce ideea unei supradimensionări a soluției tehnice, ceea ce reprezintă exces de material, de costuri directe, dar și încărcătură suplimentară pe autovehicul, cu repercusiunea adaosului de consum energetic și automat a creșterii nivelului de noxe emise de către motorul termic.

Comparând rezultatele obținute prin metoda clasică de determinare a tensiunilor și metoda elementului finit se constată o similitudine foarte apropiată a valorilor, motiv pentru care se consideră validarea reciprocă a celor două metode.

Se observă că valorile tensiunilor maxime sunt la aproximativ 50% din valoarea limitei de elasticitate ($\sigma_e = 355$ MPa) a materialului din care este confecționat sistemul de remorcare, prin urmare, soluția tehnică prezintă un coeficient de siguranță de 2. Sistemul nu este nici subdimensionat și nu este nici supradimensionat, fiind considerat un sistem fiabil cerinței de producător.

De asemenea, rezultatele obținute indică faptul că cel mai solicitat element din întregul ansamblu de remorcare este cârligul de remorcare, iar cu rezultate ridicate, dar mult inferioare celor din cârlig, este grinda de rezistență.

Conform analizelor teoretice, grinda este puțin supradimensionată, însă aceasta are secțiunea de țevă pătrată cu grosimea peretelui de 5 mm, din considerente tehnologice privind integritatea profilului la sudura flanșelor de la capetele și din centrul acesteia, deoarece în industria constructoare de sisteme de tractare se utilizează profile cu grosimea minimă de 5 mm.

Comparând rezultatele obținute prin metoda fotoelastică de determinare a tensiunilor cu celelalte metode menționate anterior, se constată că cele din urmă sunt inferioare cu aproximativ 11%. Rezultatul obținut prin cea de-a treia metodă nu este considerat nesatisfăcător întrucât diferența nu este exagerat de mare, însă metoda fotoelastică este mai permisivă în acest caz.

Beneficiile aduse de metoda fotoelasticității privind stabilirea tensiunilor apărute în cârligul de remorcare, dar și imaginea variației acestora de-a lungul materialului sunt mult mai importante decât necorelarea perfectă dintre tensiunile obținute prin cele trei metode de determinare. Aceste beneficii au fost prezentate în capitolul V, acolo unde este detaliată metoda de calcul, dar și în subcapitolul următor privind concluziile finale ale tezei de doctorat.

9.2 Concluzii finale

Așa cum s-a specificat în capitolele precedente, se observă o similitudine aproape perfectă între valorile tensiunilor obținute prin metodele de calcul clasic și de element finit (tabelul 9.1), motiv pentru care se consideră a fi două metode reciproc validate. De asemenea, valoarea maximă obținută pentru tensiune oferă dreptul de a afirma că dimensionarea sistemului de remorcare este conformă, nefiind nici prea ridicată, nici prea scăzută. O subdimensionare a soluției tehnice propuse poate duce la distrugerea prematură a sistemului, cu riscurile aferente, iar o supradimensionare duce la costuri ridicate și consum suplimentar de energie necesară propulsiei autovehiculului.

Chiar dacă prin metoda fotoelastică s-au obținut valori mai mici ale tensiunilor în raport cu metodele anterioare de calcul, aceasta a oferit o viziune deosebită asupra modului de dispersie a tensiunilor în zona de trecere dintre volumul cilindric de material și volumul de material determinat de geometria de sector de tor, regiuni ale cârligului de remorcare, acolo unde se observă că linia axei neutre se deplasează către interiorul razei de curbură (axa centrelor de greutate ale secțiunilor transversale nu coincide cu axa neutră).

Deplasarea axei neutre este conformă teoriei de bară curbă cu curbură mare, teoria lui E. Winkler. Această teorie a fost folosită pentru distribuția tensiunii la încovoiere care este hiperbolică, trecând prin 0 în axa centrelor de curbură.

O altă semnificație a deplasării axei neutre este faptul că tensiunea din interiorul razei de curbură este mai mare decât tensiunea exterioară a razei de curbură (efectul de concentrare a tensiunilor).

În ceea ce privește partea experimentală, debutul se realizează cu cercetarea comportamentală a epruvetelor realizate din fibre de carbon (FC) cu două tipuri de rășini epoxidice, două tipuri de aliaje de aluminiu (AAI), aluminiu pur și bineînțeles oțel.

Concluziile privind compararea determinărilor experimentale ale epruvetelor sunt următoarele:

Tracțiune [cap. 6.4]

- epruvetele din FC au rezistență considerabil superioară celor din oțel, epruvetele din FC cu rășină tip Epoxy fiind simțitor mai performante decât cele în amestec cu rășină tip Sikadur [fig. 6.16 și 6.17];

- epruvetele din AAl au comportament aproximativ similar, AlSi10MnMg fiind ușor superior celui AlSi12Cu1Fe, ambele având rezistența pe la jumătatea celor din oțel [fig. 6.16 și 6.17];

- epruvetele din aluminiu pur au comportament extrem de deficitar [fig. 6.16 și 6.17].

Încovoiere [cap. 6.5]

- rezistența epruvetelor din FC se apropie de cea a oțelului, fiind ușor inferioară, însă epruvetele din FC cu rășină Epoxy sunt mai performante decât cele realizate cu rășină Sikadur [fig. 6.22 și 6.23];

- rezistența epruvetelor din AAl este mai avantajoasă pentru cele pe bază de AlSi10MnMg, ambele având rezistența sub jumătate față de cea a oțelului [fig. 6.22 și 6.23];

- și de această dată epruvetele din aluminiu pur sunt cele mai deficitare, lipsite de performanță și interes [fig. 6.22 și 6.23].

Tot în ceea ce privește comportamentul epruvetelor se poate spune că cele realizate din FC și AAl sunt foarte casante, având coeficienți de alungire foarte scăzuți, iar curbele caracteristice aproape liniare, în comparație cu cea a epruvetelor din oțel și aluminiu pur [fig. 6.19].

Un dezavantaj major în comportamentul epruvetelor îl constituie lipsa de omogenitate a acestora, existând diferențe considerabile între epruvetele de același tip cu excepția celor din S355; cu o pregătire foarte documentată a proceselor de obținere s-ar putea realiza rezultate mult mai satisfăcătoare în acest sens [fig. 6.17, 6.18, 6.23 și 6.24].

Analizând comportamentul epruvetelor s-a deschis interesul în vederea realizării de cârlige de remorcare din FC în amestec cu rășină tip Epoxy, aliaj AlSi10MnMg (acest material prezentând performanțe mai ridicate decât cel din AlSi12Cu1Fe), dar din dorința de confirmare s-a realizat și un cârlig din cel de-al doilea tip de AAl și bineînțeles acestea au fost comparate cu un cârlig confecționat din oțel S355 [cap.7.2].

Privind interesul de a studia comportamentul unui cârlig de remorcare cu deplasarea dusă la extrem, fără rupere și fără a impune pericole de pagube materiale asupra utilajului de testare a rezistenței mecanice, s-a decis realizarea unui cârlig de remorcare din aluminiu pur (Al99,7%), deoarece s-a observat că este foarte maleabil și nu ajunge la rupere [cap. 7.2].

Din calcule a reieșit faptul că forța minimă care acționează pe cârligul de remorcare trebuie să fie 7,5 kN pentru a valida rezistența necesară a cârligului din timpul frânării autoturismului [cap. 3.2.1].

De departe cea mai bună rezistență a prezentat-o cârligul de remorcare din oțel, dar cârligul de remorcare din FC a avut un comportament foarte avantajos, forța de rupere fiind aproape dublă decât cea necesară validării produsului [cap. 8.3 și tab. 8.2].

Cârligele de remorcare din AAl au fost foarte aproape de limita de validare, cel din AlSi10MnMg trecând testul prin depășirea cu lejeritate a forței necesare, celălalt fiind mai deficitar, așa cum s-au comportat și epruvetele din acel aliaj, picând testul, însă fiind foarte aproape de limită [cap. 8.3 și tab. 8.2].

În ceea ce privește deplasările sferei, comportamentul cel mai avantajos l-a prezentat tot cârligul din oțel, cu deplasarea cea mai redusă, cârligul de remorcare din FC având cea mai generoasă săgeată [cap. 8.3 și tab. 8.2].

Aspectele nesatisfăcătoare prezentate de cârligele de remorcare din AAl sunt date de plasticitatea scăzută pe care o comportă, materialul fiind foarte fragil, iar ruperea se realizează brusc [cap. 8.3 și tab. 8.2].

Dacă până acum s-a vorbit doar la superlativ despre comportamentul cârligului de remorcare din oțel, urmează să se scoată în evidență avantajele materialelor alternative care surclasează S355 [fig. 8.16 și fig. 8.17].

Atunci când se raportează rezistența cârligului la masa acestuia (în cazul aceluiași material) se obțin indici de performanță ai materialelor, care arată că modelul realizat din FC este de 2,5 ori mai performant decât S355, AlSi10MnMg cu 11% mai performant, iar AlSi12Cu1Fe cu 3% sub performanța oțelului [fig. 8.16 și fig. 8.17].

Acești indici oferă satisfacția cercetărilor în domeniul materialelor alternative pentru confecționarea cârligelor de remorcare [fig. 8.16 și fig. 8.17].

Cu siguranță, dacă s-ar îmbunătăți procesele de fabricație atât pentru producerea cârligelor de remorcare din FC, dar și din AAl, în vederea obținerii unor modele mai omogene, s-ar obține performanțe și mai ridicate în comparație cu cele ale oțelului.

Pentru a obține rezultate mai avantajoase ale componentelor realizate din AAl sunt mai multe modalități, fie prin tratamente termice, acolo unde se vor obține recristalizări în structura materialului în vederea îmbunătățirii proprietăților de plasticitate, pentru a nu mai fi la fel de casante și a prezenta rezistențe superioare, fie prin reducerea conținutului de siliciu pentru o mai bună plasticitate. Pe de altă parte, siliciul ajută baia metalică pentru a fi mai fluidă, motiv pentru care nu trebuie scăzut foarte mult nivelul din compoziția chimică a aliajului.

Tratamentele termice de recoacere în vederea eliminării tensiunilor interne de la nivelul structurilor pe bază de aluminiu, tensiuni rezultate în urma solidificării după procesul de turnare, pot îmbunătăți considerabil proprietățile mecanice ale componentelor din aliaje de aluminiu sau aluminiu pur.

Comparând comportamentul cârligului de remorcare din oțel testat individual cu cel testat în ansamblul sistemului de remorcare, se observă un lucru foarte interesant. Torsionarea grinzii de rezistență a ansamblului de remorcare facilitează și ajută cârligul de remorcare pentru a suferi o săgeată mai scăzută, deci testarea cârligului de remorcare în ansamblu este de mare importanță și aduce o garanție mai mare a modului de deformare [fig. 8.18 și 8.19].

Analizând comparativ compoziția chimică a celor două tipuri de aliaje de aluminiu, dar mai ales câmpul de toleranțe admisibil fiecărui element de aliere, se observă că aliajul marca AlSi10MnMg este mai restrictiv, având limite admisibile într-un câmp de toleranță foarte scăzut. Din acest considerent elaborarea aliajului AlSi10MnMg implică anumite costuri suplimentare, în primul rând datorită necesității de a utiliza ca materie primă o cantitate mai mare de aluminiu în stare pură.

Aliajul marca AlSi12Cu1Fe prezintă un câmp de toleranță mai generos al elementelor, prin urmare elaborarea acestuia se realizează în principal din deșeuri de alte mărci de aliaje, motiv pentru care costurile de fabricație sunt mai reduse decât cele pentru elaborarea aliajului AlSi10MnMg.

Concluzionând asupra comercializării aliajelor de aluminiu, AlSi10MnMg se va regăsi în comerț cu un preț mai ridicat decât AlSi12Cu1Fe, însă oferă proprietăți mai avantajoase.

9.3 Contribuții originale

Lucrarea de doctorat și-a propus un studiu minuțios al materialelor, posibil alternative la materialul folosit în prezent pentru confecționarea sistemelor de remorcare utilizate la autovehicule. Materialele alternative cercetate sunt materiale compozite pe bază de fibre de carbon în amestec cu rășină epoxidică și două tipuri de aliaje pe bază de aluminiu. Concluzia studiului constă în validarea materialelor propuse ca alternative viabile ale sistemelor actuale utilizate.

De-a lungul cercetării și elaborării tezei de doctorat au fost conturate numeroase contribuții proprii, atât teoretice cât și experimentale.

9.3.1 Contribuții originale teoretice

Printre contribuțiile teoretice se amintesc următoarele realizări:

- Studii amănunțite ale compozitelor și aliajelor de aluminiu [cap. I];
- Clasificarea soluțiilor actuale privind cârligele de remorcare. Tipologia acestora [subcap. 2.3];
- Modelarea eșantioanelor, cârligelor de remorcare analizate și a dispozitivelor necesare cercetărilor experimentale utilizând softul Inventor [subcap. 4.1, fig. 6.4, 6.5, 6.6, 6.13, 6.15];
- Conceperea fluxurilor tehnologice ale eșantioanelor alcătuite din diversele tipuri de materiale studiate;
- Conceperea fluxurilor tehnologice ale cârligelor de remorcare alcătuite din diversele tipuri de materiale studiate [subcap. 7.2.1, 7.2.2];
- Analiza prin metoda de calcul clasic a comportamentului sistemului de remorcare [subcap. 3.2];
- Analiza prin metoda elementului finit a comportamentului sistemului de remorcare [subcap. 4.3];
- Analiza prin metoda fotoelastică a comportamentului cârligului de remorcare [subcap. 5.3].

9.3.2 Contribuții originale experimentale

Contribuțiile experimentale sunt următoarele:

- **Proiectarea și confecționarea epruvetelor din oțel, două tipuri de fibre de carbon, două tipuri de aliaje de aluminiu și aluminiu pur, prin diverse procese tehnologice detaliate în conținutul lucrării de cercetare [fig. 6.7, 6.11, 6.12];**

- **Proiectarea și confecționarea cârligelor de remorcă din oțel, fibră de carbon cu rășină epoxidică tip Epoxy L385, aliaje de aluminiu (AlSi10MnMg și AlSi12Cu1Fe) și aluminiu pur 99,7% [fig. 7.5, 7.10, 7.13, 7.14, 7.15];**

- **Proiectarea și confecționarea dispozitivelor de testare ale epruvetelor destinate încercării la încovoiere. Epruvetele destinate încercării la tracțiune s-au testat pe dispozitivele utilajului de încercare a rezistenței mecanice prin tracțiune [fig. 6.4];**

- **Proiectarea și confecționarea unei matrițe destinate turnării sub presiune a epruvetelor realizate din aliaje de aluminiu;**

- **Proiectarea și confecționarea dispozitivelor necesare fabricației cârligelor de remorcă din compozite. Matrițe din fibre de sticlă necesare modelării formei geometrice a cârligului din fibre de carbon, dar și matrițe din PAL necesare modelării matrițelor din fibre de sticlă [fig. 7.8];**

- **Proiectarea și confecționarea ramelor necesare în alcătuirea amestecului de formare pentru turnarea atât a cârligelor de remorcă pe bază de aluminiu, cât și pentru turnarea epruvetelor din aluminiu 99,7% [fig. 7.11, 7.12];**

- **Proiectarea și confecționarea dispozitivelor necesare pentru testarea cârligelor de remorcă pe utilajul de încercare a rezistenței mecanice prin tracțiune [fig. 6.5, fig. 6.6];**

- **Proiectarea, confecționarea și testarea modelului fotoelastic cu metoda dată de fotoelasticimetrie privind starea de tensiuni din cârlig [fig. 5.7, 5.9];**

- **Verificarea compoziției chimice a aliajelor de aluminiu cu ajutorul spectrometrului (anexa 4);**

- **Testarea efectivă a eșantioanelor, cârligelor de remorcă și sistemului de remorcă [fig. 8.1];**

- **Interpretarea și compararea rezultatelor obținute în urma determinărilor experimentale și a noțiunilor teoretice [figurile 6.14, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.22, 6.23, 6.24, 8.2, 8.3, 8.4, 8.6, 8.7, 8.9, 8.10, 8.13, 8.14, 8.15, 8.16, 8.17, 8.18, 8.19, 8.20, 8.21 și tabelele 6.1, 6.2, 8.1, 8.2, 9.1 și anexele 1, 2 și 3].**

9.4 Diseminarea rezultatelor

Pe parcursul stagiului doctoral s-au realizat o serie de lucrări publicate în diverse reviste de specialitate. Lista lucrărilor originale publicate este următoarea:

[L1] **PETRICI Andrei Victor**, RADU N. Gheorghe, *Studies on the behavior of the towbars in static applications. Part. 1 – Theoretical studies*, **SIAR-SMAT 2014, Craiova**;

[L2] **PETRICI Andrei Victor**, RADU N. Gheorghe, *Studies on the behavior of the towbars in static applications. Part. 2 – Finite element method and experimental determinations*, **SIAR-SMAT 2014, Craiova**;

[L3] **PETRICI Andrei Victor**, RADU N. Gheorghe, COMĂNESCU Ioana, *Stress and deformation in detachable towbar of vehicles in dynamic conditions of load. Part. 1 Theoretical study – static & dynamic strain*, **OPROTEH 2015, Bacău**;

[L4] **PETRICI Andrei Victor**, RADU N. Gheorghe, COMĂNESCU Ioana, *Manufacturing, tests and finite element analysis – stress and deformation in detachable towbar of vehicles in dynamic conditions of load – Part. 2*, **OPROTEH 2015, Bacău**;

[L5] **PETRICI Andrei Victor**, RADU N. Gheorghe, ITU Călin, *Theoretical studies (FEA) and experimental determinations used at a towing assembly*, **OPROTEH 2016 – Bacău, eMECH 2016 – Braşov, SIAR-SMAT 2016 - Braşov**;

[L6] **PETRICI Andrei Victor**, RADU N. Gheorghe, COMĂNESCU Ioana, *Theoretical studies used at a towing assembly*, **COMAT & ICMSAV 2016, Braşov**;

[L7] **PETRICI Andrei Victor**, RADU N. Gheorghe, COMĂNESCU Ioana, *Experimental determinations used at a towing assembly*, **COMAT & ICMSAV 2016, Braşov**;

[L8] RADU N. Gheorghe, **PETRICI Andrei Victor**, *Determination of stress on motor vehicles towbars using Inventor software. Practical method of calculation*, **ARMR 2014, Ploieşti**;

[L9] RADU N. Gheorghe, **PETRICI Andrei Victor**, *Finite Element Method and experimental determinations in study of autovehicles towbars*, **ARMR 2014, Ploieşti**;

[L10] RADU N. Gheorghe, **PETRICI Andrei Victor**, *On the safety in operation of the towing system of vehicles in the conditions of manufacture made of steel and made of composite materials based on carbon fibers and resin*, **OPROTEH 2019, Bacău**;

9.5 Direcții viitoare de cercetare

Analizând concluziile rezultate în lucrarea de față, se pot desprinde mai multe direcții pe care s-ar putea canaliza cercetările.

Din cercetările experimentale asupra cârligelor de remorcare realizate din materialele alternative studiate se poate desprinde o serie lungă de avantaje, dar în același timp și o listă cu posibile acțiuni de îmbunătățire a comportamentului materialelor.

Comparând cercetările experimentale cu cele teoretice se va obține completarea listei de posibile acțiuni de îmbunătățire.

Mai jos se regăsește lista cu posibile direcții viitoare de cercetare:

- Întrucât cârligul de remorcare realizat din fibre de carbon a suferit crăpături în zona bolțurilor de fixare, se propune optimizarea formei de la coada cârligului, pentru a obține o rezistență și mai convenabilă la efort, chiar dacă rezistența de la testare a fost satisfăcătoare;

- Deoarece procesul de fabricație al cârligului de remorcare realizat din fibre de carbon a fost anevoios, odată cu propunerea anterioară de modificare a formei geometrice, s-ar putea ca optimizarea să țină cont și de aspectele greoaie ale tehnologiei, astfel printr-o schimbare de design s-ar putea rezolva două inconveniente;

- Cârligele de remorcare realizate din aliaje de aluminiu pot suferi modificări geometrice în vederea îmbunătățirii rezistenței mecanice, deoarece procesul de turnare este mai convenabil decât întregul flux al obținerii cârligelor de remorcare din oțel;

- De asemenea, procesul de turnare în amestec de formare este foarte anevoios, prin urmare se propune o matriță de injecție sub presiune, atât pentru optimizarea procesului de turnare, cât și pentru obținerea unei structuri mai compacte a materialului din componența cârligelor de remorcare realizate pe bază de siluminii;

- Tot în vederea îmbunătățirii caracteristicilor date de rezistența cârligelor de remorcare realizate din siluminii se propun atât studii privind alierea cu diverse alte materiale care oferă rezistență mai ridicată (ex.: Cu), cât și testări privind tratarea termică a materialului din care este alcătuit modelul;

- Dacă tot s-au propus modificări geometrice asupra formei cârligului de remorcare în vederea îmbunătățirii procesului de fabricație și al rezistenței mecanice, ar trebui ca optimizarea să țină cont de studiul privind secțiunea favorabilă din punct de vedere al rezistenței.

- Pentru a obține rezultate cu acuratețe mai bună a comportamentului cârligelor de remorcare, în viitor ar trebui realizate teste cu întregul ansamblu de remorcare, deoarece s-a demonstrat experimental și teoretic că în ansamblul de remorcare, cârligul are comportament diferit, mai favorabil;

- În ceea ce privește omologarea pentru producția de serie a cârligelor de remorcare din materialele alternative propuse, este obligatoriu a se cerceta comportamentul acestora la oboseală, așa cum se testează fiecare gamă nouă de sisteme de remorcare;

- Într-un viitor, după stabilirea celor mai optime procese și materiale în vederea construcției cârligelor de remorcare, se propune extinderea studiului asupra reducerii masei celorlalte componente din întregul ansamblu de remorcare, prin utilizarea de materiale alternative și viabile;

- Solicități dinamice la oboseală (testul Carlos) a sistemului de remorcare confecționat din materiale alternative;

- Solicități dinamice cu șoc.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Alămoreanu E., Chiriță R., *Bare și plăci din materiale compozite*, Editura Tehnică, ISBN 973-31-1105-8, București, 1997;
- [2] Alămoreanu E., Chiriță R., *Proiectarea plăcilor compozite laminate*, Editura Tehnică, ISBN 973-27-1189-2, București, 2005;
- [3] Anglin J. M., *Aircraft Applications, Engineered Materials Handbook – Composites*, Vol. 1, 1989;
- [4] Arthur O., Țierean M. H., *Alegerea materialelor*, Curs, Editura Universității Transilvania din Brașov, Brașov, 2002;
- [5] Berthelot J. M., *Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures*, Masson, 1992;
- [6] Boldor (căș. Demian) C., *Îmbunătățirea caracteristicilor aliajului AlSi9Cu3 turnat, prin degazare, filtrare și aplicare de tratamente termice*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2013;
- [7] Bratu P. P., *Sisteme elastice de rezemare pentru mașini și utilaje*, Editura Tehnică, București, 1990;
- [8] Bratu P. P., *Mecanica teoretică*, Editura Impuls, 2006;
- [9] Bratu P. P., *Analiza structurilor elastice: comportarea la acțiuni statice și dinamice*, Editura Impuls, 2011;
- [10] Calienchiug A., *Cercetări privind bara parașoc pentru autovehicule confecționată din materiale compozite noi*, Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov, 2012;
- [11] Carcea I., Gherghe M., *Aliaje neferoase de turnătorie*, Editura Performantica, Iași, 2009;
- [12] Carcea I., *Materiale compozite: Fenomene la interfață*, Editura Politehniun, ISBN 978-973-621-207-9, Iași, 2008;
- [13] Cerbu C., Curtu I., *Mecanica materialelor compozite*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-635-951-4, Brașov, 2007;
- [14] Chiriacescu S., Balcu, I., *Introducere în teoria elasticității și rezistența materialelor*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-598-244-7, Brașov, 2008;
- [15] Deutsch I., Goia I., Curtu I., Neamțu T., Sperchez F., *Probleme de rezistența materialelor*, Editura didactică și pedagogică București, București, 1979;
- [16] Deutsch I., *Rezistența materialelor*, Editura didactică și pedagogică București, București, 1979;
- [17] Dogaru F., *Mecanica compozitelor laminate. Aspecte privind rezistența la impact*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-598-251-5, Brașov, 2008;
- [18] Faur N., *Elemente finite. Fundamente*, Timișoara, 2002;
- [19] Gâdea S., Protopopescu M., *Aliaje neferoase*, Editura Tehnică, București, 1965;

- [20] Gheorghe V., *Structuri cu rigiditate ridicata, din materiale compozite, utilizate in construcția de autovehicule*, Universitatea Transilvania din Brașov, 2013;
- [21] Ghita E., Marșavina L., *Fotoelasticimetria, metodă modernă de analiză experimentală a tensiunilor*, Editura Eurostampa, Timișoara, 2002;
- [22] Hadăr A., *Probleme locale la materiale compozite*, Teză de doctorat, Universitatea Politehnică din București, 1997;
- [23] Hadăr A., *Structuri din compozite stratificate*, Editura Academiei Române, București, 2002;
- [24] Hadăr A., *Structuri din compozite stratificate: metode, algoritmi și programe de calcul*, Editura Academiei Române, București, 2002;
- [25] Hendry A. W., *Photoelastic Analysis*, Editura Pergamon Press, Londra, 1966;
- [26] Ienciu M., Moldovan P., Panait N., Buzatu M., *Elaborarea și turnarea aliajelor neferoase speciale*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985;
- [27] Itu C., *Contribuții privind îmbunătățirea plăcilor circulare realizate din materiale compozite stratificate*, Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov, 2014;
- [28] Maksay Ș. I., Bistriean D. A., *Introducere în metoda elementelor finite*, Editura Cermi Iași, ISBN 987-973-667-324-5, Iași, 2007;
- [29] Marin C., Popa I.F., Hadăr A., *Modelarea cu elemente finite a structurilor mecanice*, Editura Academiei Române, București, 2002;
- [30] Nicolae O. I., *Impactul materialelor compozite utilizate in construcții asupra mediului*, Teza de doctorat, Universitatea Tehnică de construcții București, 2013;
- [31] Pascu A. M., Sofonea G., *Rezistența Materialelor – part. I*, Universitatea Lucian Blaga din Sibiu, 2006;
- [32] Pascu A. M., Sofonea G., *Rezistența Materialelor – part. II*, Universitatea Lucian Blaga din Sibiu, 2007;
- [33] Pascu A. M., *Comportarea mecanică a materialelor*, Universitatea Lucian Blaga din Sibiu, ISBN 978-606-12-1613-0, Sibiu, 2018;
- [34] Pavel R., *Contribuții privind implementarea materialelor compozite in construcția de mașini*, Teza de doctorat, București, 1999;
- [35] **Petrici A.V.**, Radu, Gh. Al., *Studiu privind construcția, fabricarea și testarea cârligelor de remorcare utilizate la autovehicule*, Lucrare de disertație, Universitatea Transilvania din Brașov, 2014;
- [36] **Petrici A. V.**, Radu, N. Gh., Itu, C., *Theoretical studies (FEA) and experimental determination used at a towing assembly*, OPROTEH, Bacău, 2016;
- [37] **Petrici A. V.**, Radu, N. Gh., Comanescu, I., *Stress and deformation in detachable towbar of vehicles in dynamic conditions of load. Part. 1 Theoretical study – static & dynamic strain*, OPROTEH, Bacău, 2015;
- [38] **Petrici A. V.**, Radu, N. Gh., *Studies on the behavior of the towbars in static applications, Part 1 – Theoretical studies*, SIAR-SMAT, Craiova, 2014;

- [39] **Petrici A. V.**, Radu, N. Gh., *Studies on the behavior of the towbars in static applications, Part 2 – FEA and experimental determinations*, SIAR-SMAT, Craiova, 2014;
- [40] **Petrici A. V.**, Radu, N. Gh., *On the safety in operation of the towing system of vehicles in the conditions of manufacture made of steel and made of composite materials based on carbon fibers and resin*, OPROTEH, Bacău, 2019;
- [41] Radu N. Gh., Munteanu M. G., Biț C., *Rezistența materialelor și elemente de teoria elasticității*, vol. I – 1994 – ISBN 973-96141-7-5, vol. II – 1995 – ISBN 973-96988-7-5, vol. III – 1998 – ISBN 973-9372-00-7, Editura Macarie, Târgoviște;
- [42] Radu N. Gh., *Rezistența materialelor și elemente de teoria elasticității*, Editura Universității Transilvania din Brașov, vol. 1, ISBN 973-9474-36-5, vol. 2, ISBN 973-9474-37-3, Brașov, 2002;
- [43] Radu N. Gh., *Elasticitate, plasticitate, rupere. Teorie și aplicații*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-598-216-4, Brașov, 2009;
- [44] Radu N. Gh., *Rezistența materialelor. Teorie și aplicații*, Editura Lux Libris, ISBN 978-973131-252-1 – vol. I – 2013, ISBN 978-973-131-295-8 – vol. II – 2014, Brașov;
- [45] Radu N. Gh., *Teoria plasticității. Principii și relații de calcul*, Editura Lux Libris, ISBN 973-9458-49-1, Brașov, 2005;
- [46] Teodorescu P. P., Ille V., *Teoria elasticității și introducerea în mecanica solidelor deformabile*, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1980;
- [47] Theocaris P. S., Buga M., Burada C., Băltănoiu M. Constantinescu I. Horbaniuc D. Iliescu N., Mocanu D. R., Modiga N., Năilescu N., Pascariu I., Popovici V., Tripa M., *Analiza experimentală a tensiunilor*, Editura Tehnică București, București, 1978;
- [48] Tripa P., *Metode experimentale pentru determinarea deformațiilor și tensiunilor mecanice*, Editura Mirton, Timișoara, 2010;
- [49] Untaru M., Câmpian V., Ionescu E., Pereș Gh., Ciolan, Gh., Todor I., Filip N., Câmpian O., *Dinamica Autovehiculelor*, Reprografia Universității Transilvania din Brașov, ISSN 1109-2750, Brașov, 1989;
- [50] Zichil V., Catană V., Polosanu G., Puiu V. Gh., *Tehnologia proceselor industriale: note de curs: pentru uzul studenților*, Universitatea din Bacău, 1993;
- [51] Zichil V., Pintilie Gh., Schnakovszky C., *Vibrații mecanice: curs*, Universitatea din Bacău, 1996;
- [52] Zichil V., Judele A., Coseru A., Schnakovszky C., Herghelegiu E., *The Effect of the Deformations Produced by the Impact upon the Breaking Tenacity of AL-P2014, T42*, Buletinul Universității de Petrol și Gaze din Ploiești, 2006;
- [53] Zienkiewicz O. C., *The Finite Element Method in Engineering Science*, Editura McGRAW-HILL, Londra, 1977;
- [54] www.resist.pub.ro/Cursuri_master/SMC/CAP.1.DOC - accesat în 04.01.2017
- [55] http://www.academia.edu/5598969/Materiale_compozite - Sorina Istodorescu - accesat în 06.01.2017
- [56] http://chimiegenerala.3x.ro/Capitolul3/Curs/c3_1_16.htm – accesat în 12.01.2017
- [57] http://chimiegenerala.3x.ro/Capitolul3/Curs/c3_1_17.htm – accesat în 13.01.2017

- [58] http://chimiegenerală.3x.ro/Capitolul3/Curs/c3_1_18.htm – accesat în 15.01.2017
- [59] http://ro.instalbiz.com/resources/100-resource-materiale-compozite-cu-matrice-ceramica-mcc_65.html – accesat în 17.01.2017
- [60] <http://sites.brunel.ac.uk/grow2build/knowledge-database/fibre-composites> – accesat în 25.01.2017 – grafic domeniilor compozite
- [61] <http://www.autosaga.ro/lectia-auto/discurile-de-frana-carbon-ceramice-pentru-un-stop-perfect.html> – accesat în 29.01.2017
- [62] <http://www.autosaga.ro/lectia-auto/placute-de-frana-functionare-si-tipuri-de-placute-frana-sport-ceramice-organice-metalice.html> – accesat în 29.01.2017
- [63] http://www.americanmuscle.com/frpp-gt350-intake-manifold.html#product_pics-0 – accesat în 30.01.2017
- [64] <http://www.racingvo.fr/pneu-marseille/> – accesat în 30.01.2017
- [65] http://www.piata-romaneasca.ro/index.php?page=detalii_produs_pf&produs=985 – accesat în 30.01.2017
- [66] <https://www.casa-gradina.ro/panourile-sandwich-avantaje-si-dezavantaje/> – accesat în 31.01.2017
- [67] https://en.wikipedia.org/wiki/Sandwich_panel – accesat în 31.01.2017
- [68] <https://sistemeortopedice.ro/cada-cu-usa-de-acces/179-cada-baie-cu-usa-acces.html> – accesat în 02.02.2017
- [69] <http://gripen4canada.blogspot.ro/> – accesat în 03.02.2017
- [70] https://en.wikipedia.org/wiki/Rockwell_B-1_Lancer – accesat în 03.02.2017
- [71] https://en.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rospatiale_Gazelle – acc.06.02.2017
- [72] <http://www.descopera.ro/stiinta/5441152-constelatia-k-1-a-dragonului-cum-evolueaza-navele-spatiale-nasa> – accesat în 06.02.2017
- [73] https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_automobile#External_links – accesat în 09.02.2017
- [74] https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas-Joseph_Cugnot – accesat în 09.02.2017
- [75] https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_automobile – acc. în 09.02.2017
- [76] https://ro.wikipedia.org/wiki/Motor_%C3%AEn_patru_timpi – acc. 09.02.2017
- [77] https://ro.wikipedia.org/wiki/Motor_diesel – accesat în 09.02.2017
- [78] https://ro.wikipedia.org/wiki/Karl_Benz – accesat în 10.02.2017
- [79] http://www.ehow.com/about_5163365_history-manual-transmissions.html – accesat în 10.02.2017
- [80] https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_brake – accesat în 10.02.2017
- [81] https://ro.wikipedia.org/wiki/Aurel_Persu – accesat în 10.02.2017
- [82] <https://www.bizoo.ro/firma/atasamente/vanzare/1713427/remorca-tractor-farmtech-ddk-18023> – accesat în 13.02.2017

- [83] <http://portalsm.ro/2013/05/ranit-in-timp-ce-transporta-nisip-cu-o-caruta-trasa-de-tractor/> – accesat în 13.02.2017
- [84] <http://www.cargobikesystem.com/> – accesat în 13.02.2017
- [85] <http://www.consumerreports.org/cro/news/2009/05/bicycle-seats-vs-bike-trailers-for-children/index.htm> – accesat în 13.02.2017
- [86] <http://www.agrosez.ro/Remorca-dubluax-basculanta-14-T-util/455/ro/product/> – accesat în 20.02.2017
- [87] <http://reperautotrans.ro/carlig-remorcare-tip-ochi-diametru-50mm-5cm-fixare-in-8-gauri-5t-rpr-2317> – accesat în 20.02.2017
- [88] <https://www.amazon.com/Truck-Accessories-Automotive/b?ie=UTF8&node=162302011> – accesat în 20.02.2017
- [89] <https://www.uhaul.com/MovingSupplies/Hitch-Balls-Mounts/Hitch-Balls/2-Hitch-Ball-With-1-Diameter-Shank?id=9328> – accesat în 20.02.2017
- [90] <http://www.jacksall.com/product/tri-ball-trailer-hitch-mount-with-u-clevis.html> – accesat în 20.02.2017
- [91] <http://www.newmantools.com/gauge/wghowto.htm> – accesat în 27.02.2017
- [92] <http://www.ssab.us/products/commercial-steel/products/en-10149-2> – accesat în 06.03.2017
- [93] <http://www.mairon.ro/produse/tevi-6/tevi-sudate-pentru-constructii-20> – accesat în 06.03.2017
- [94] <http://www.h-metal.ro/blog/standard-en-10025-2/> – accesat în 06.03.2017
- [95] <http://www.mistal.pl/en/2013-05-08-10-30-17/pn-en-10305-2-cold-drawn-steel-tubes-for-precision-applications> – accesat în 07.03.2017
- [96] <http://www.3dprint-lab.nl/wp-content/uploads/2013/05/Datasheet-ISO.pdf> – accesat în 20.02.2017
- [97] <http://www.tmf.de/bilder/Toleranzen.pdf> – accesat în 07.03.2017
- [98] http://www.iso-iran.ir/standards/iso/ISO_2553_2013_Welding_and_Allied.pdf – accesat în 07.03.2017
- [99] http://www.scalofrios.es/soldadura/pag/pdf/ISO_5817.pdf – acc. în 07.03.2017
- [100] <http://www.dexintube.com/korean/pdf/3.pdf> – accesat în 07.03.2017
- [101] <http://www.sinclairaudi.co.uk/new-audi/q5-range/q5/details.aspx> – 22.03.2017
- [102] http://www.quattroruote.it/news/primato_contatto/2015/09/07/mercedes_benz_glc_vs_audi_q5_vs_bmw_x3_super_test_tra_suv_tedesche/jcr_content/content/article_structure_2/body/article_attachment/file.res/Q5-X3-glc.pdf – accesat în 23.03.2017
- [103] <http://www.referatele.com/referate/chimie/online4/Aluminiu-si-aliajele-din-aluminiu-proprietati-fizice-si-caracteristicile-mecanice--intrebuintari-ref.php> - accesat în 05.08.2019
- [104] <http://www.qreferat.com/referate/chimie/Aluminiu-si-aliajele-din-alumini751.php> - accesat în 05.08.2019

- [105] <https://de.wikipedia.org/wiki/Aluminium> - accesat în 21.08.2019
- [106] <http://www.essentialchemicalindustry.org/metals/aluminium.html> – acc. 24.08.2019
- [107] <https://www.slideshare.net/EmadMayor/resistance-welding-of-aluminium-and-aluminium-alloys-group-16> - accesat în 24.08.2019
- [108] <https://aluminiuminsider.com/steel-versus-aluminium-whos-winning-lightweighting-battle-cars/> - accesat în 24.08.2019
- [109] https://www.aluminiumleader.com/focus/aluminium_carriages_help_provide_high_speed_rail_service/ - accesat în 24.08.2019
- [110] <https://www.indiamart.com/proddetail/aluminium-extrusion-sheet-plate-railway-coach-body-12919050391.html> - accesat în 24.08.2019
- [111] <http://www.amardeepsteel.com/blog/SpecificBlog/uses-of-aluminium/benefits-of-using-aluminum-in-marine-industry.html> - accesat în 24.08.2019
- [112] <http://www.koala-al.com/products/market-application/ship-aluminium.html> - accesat în 24.08.2019
- [113] <https://www.yachting-pages.com/content/guide-on-aluminium-boat-hulls-vs-steel-boat-hulls.html> - accesat în 24.08.2019
- [114] <https://www.metalsupermarkets.com/history-of-aluminum-in-the-aerospace-industry/> - accesat în 24.08.2019
- [115] <https://www.aluminum.org/product-markets/building-construction> – acc. în 26.08.2019
- [116] <http://greenbuilding.world-aluminium.org/benefits/economic/farnborough-airport/> - accesat în 26.08.2019
- [117] <https://www.aluminiumleader.com/application/packaging/> - acc. în 30.08.2019
- [118] <http://packcon.org/index.php/en/articles/114-2018/233-aluminum-alloys-in-packaging> - accesat în 30.08.2019
- [119] http://cfdp.utcb.ro/uploads/files/Curs%20MEF%202012%20Nr_%201.pdf - accesat în 04.04.2020
- [120] <https://eng.nahrainuniv.edu.iq/medical/photo-elastic-experiments-with-a-transmission-polariscope/> - accesat în 29.04.2020
- [121] <https://ro.wikipedia.org/wiki/Dirijabil> - accesat în 16.05.2020
- [122] https://ro.wikipedia.org/wiki/Fra%C8%9Bii_Wright - accesat în 16.05.2020
- [123] https://en.wikipedia.org/wiki/Junkers_J_1 - accesat în 16.05.2020
- [124] https://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Ford - accesat în 16.05.2020

REZUMAT

Analizând tendința mondială de reducere a gradului de încălzire globală, provocată de creșterea exponențială a nivelului de poluare din atmosferă, în această lucrare se propune reducerea masei unui element din alcătuirea autovehiculelor (cârligul de remorcare), dorindu-se astfel o scădere a consumului de carburant necesar propulsiei.

Obiective propuse sunt în concordanță cu satisfacerea scopului lucrării, realizând cercetări teoretice și experimentale asupra unor epruvete din materiale compozite și aliaje de aluminiu, raportându-se în final prin comparație la comportamentul epruvetelor din oțel. Pe același principiu de comparare s-au efectuat studii privind comportamentul cârligelor de remorcare realizate din aceleași tipuri de materiale care au alcătuit specițiile testate.

Încheierea tezei constă din prezentarea și concluzionarea rezultatelor obținute în urma studiilor teoretice și experimentale, dar și dintr-o serie de recomandări privind îmbunătățirea metodelor analizate.

ABSTRACT

Analyzing the global trend of reducing the degree of global warming, caused by the exponential increase in the level of air pollution, this paper aims to reduce the mass of an element in the composition of vehicles (towball), thus wanting a decrease in fuel consumption. necessary for propulsion.

Proposed objectives are consistent with meeting the purpose of the paper, conducting theoretical and experimental research on specimens of composite materials and aluminum alloys, finally relating by comparison to the behavior of steel specimens. On the same comparison principle, studies were performed on the behavior of towball made of the same types of materials that made up the tested specimens.

The end of the thesis consists in presenting and concluding the results obtained from theoretical and experimental studies, but also in a series of recommendations on improving the analyzed methods.