



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București



Centrul Universitar Pitești

Școala Doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

TEZĂ DE DOCTORAT

-rezumat extins-

Manual de bune practici în dezvoltarea pieselor metalice

Ing. Marin-Mihai STIROSU

Conducător științific:

Prof. univ. habil. dr. ing. Ștefan Lucian TABACU

Mentori:

Prof. Univ. Dr. Ing. Dinel POPA

Prof. Univ. Dr. Fiz. Cătălin DUCU

Prof. Univ. Dr. Ing. Viorel NICOLAE

UNST POLITEHNICA BUCUREȘTI

Conf. Univ. Dr. Ing. Laurențiu RĂCILĂ

UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA

PITEȘTI



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București



Centrul Universitar Pitești

Școala Doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

TEZĂ DE DOCTORAT

-rezumat extins-

Manual de bune practici în dezvoltarea pieselor metalice

Ing. Marin-Mihai STIROSU

Conducător științific:

Prof. univ. habil. dr. ing. Ștefan Lucian TABACU

Mentori:

Prof. Univ. Dr. Ing. Dinel POPA

Prof. Univ. Dr. Fiz. Cătălin DUCU

Prof. Univ. Dr. Ing. Viorel NICOLAE

UNST POLITEHNICA BUCUREȘTI

Conf. Univ. Dr. Ing. Laurențiu RĂCILĂ

UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA

PITEȘTI

Cuprins

Introducere	1
Tema specifică a lucrării și justificarea abordării	1
Capitolul I – Dezvoltarea pieselor metalice pentru autovehicule	3
1.1. Contextul industrial actual	3
1.2. Stadiul actual al cunoașterii în domeniu	4
1.3. Tipuri de piese metalice și tehnologii de fabricație	4
1.4. Concluzii	4
Capitolul II – Influența evoluției specificațiilor tehnice asupra dezvoltării de produs	6
2.1. Introducere	6
2.2. Specificație tehnică	6
2.3. Cerințe și specificație tehnică pentru articulația de capotă față	7
2.4. Cerințe și specificație tehnică pentru încuietoarea de capotă	7
2.5. Evoluția proiectării articulațiilor	7
2.5.1. Articulație 2008	7
2.5.2. Articulație capota realizată conform specificațiilor anului 2020	8
2.6. Evoluția proiectării încuietorilor	9
2.6.1. Încuietoare 2007	9
2.6.2. Încuietoare 2021	10
2.6. Concluzii	10
Capitolul III – Cercetarea experimentală a sistemului mecanic de tip articulație capotă	11
3.1. Introducere	11
3.2. Rolul și funcțiile sistemului	11
3.3. Alegerea materialului	13
3.4. Procesul de fabricare a ansamblului articulație capotă	14
3.5. Cercetarea experimentală a ansamblului	15
3.6. Concluzii	16
Capitolul IV – Studiul numeric al sistemului mecanic de tip articulație capotă	17
4.1. Introducere	17
4.2. Simularea numerică a procesului de fabricare a piesei mobile a ansamblului	17
4.2.1. Realizarea modelului numeric al procesului tehnologic	17
4.2.2. Alegerea materialului	17
	III

4.3. Prezentarea modelului numeric pentru analiza structurală	18
4.4. Rezultate obținute prin simularea numerică	18
4.4.1. Simularea numerică a procesului de fabricare	18
4.4.2. Simularea numerică a impactului frontal $FX = 12\text{ kN}$	19
4.5. Integrarea rezultatelor obținute prin simularea procesului de fabricare în modelul pentru analiza structurală	19
4.6. Rezultate numerice	20
4.7. Concluzii	20
Capitolul V – Opritor temporar. Un brevet european	22
5.1. Introducere	22
5.2. Stadiul actual al cunoașterii	22
5.2.1. Identificarea stadiului cunoașterii	22
5.2.2. Identificarea dezavantajelor soluțiilor tehnice existente	22
5.2.3. Problema rezolvată de invenție	23
5.3. Rezumatul invenției	23
5.4. Metoda de utilizare	24
5.5. Metoda de producere a mecanismului	24
5.6. Avantajele invenției	24
5.7. Descriere succintă a desenelor	24
5.8. Simularea numerică a piesei opritor	26
5.9 Validarea experimentală	26
5.10. Concluzii	27
Capitolul VI – Concluzii	29
6.1. Concluzii generale	29
6.2. Contribuții personale	29
6.3 Perspective de cercetare	30
6.4 Lucrări științifice publicate	32
Bibliografie	33

Introducere

Provocările pe care le întâmpină furnizorii de piese și componente auto sunt rezultatul unei continue evoluții a pieței auto, dominată de termene din ce în ce mai reduse, evoluții rapide, modificări legislative și o competiție acerbă.

Datorită nevoii de mobilitate crescută din ultimele decenii, industria constructoare de mașini a cunoscut un avânt considerabil la nivel mondial. Conform Organizației Internaționale a Constructorilor de Autovehicule (OICA), în anul 1999 la nivel global au fost fabricate 56258892 vehicule (autoturisme și vehicule comerciale). 20 de ani mai târziu, în 2019, numărul acestora a crescut cu 63%, ajungând la 91786861 vehicule fabricate.[1].

Noile reglementări în vigoare, referitoare atât la siguranța în domeniul auto precum și cele legate de reducerea emisiilor de carbon au adăugat provocări noi constructorilor pentru a găsi soluții inovatoare de reducere a masei pieselor componente cumulat cu creșterea performanțelor și a caracteristicilor mecanice ale acestora. Materiale inovatoare au fost introduse în fabricație, având caracteristici și performanțe net superioare, cu toate acestea, piesele din metal reprezintă încă aproximativ 65% din masa unui vehicul. Dinamica tot mai accentuată de apariție a unor noi modele de autovehicule pe piață face ca timpii necesari etapelor de dezvoltare de noi produse să fie din ce în ce mai scurți. Plecând de la acest considerent, pentru dezvoltatorii de piese și ansambluri de componente din metal a devenit o adevărată provocare minimizarea timpilor de la demararea dezvoltării până la fabricarea unui produs în condiții de serie. Astfel, anumite etape și iterații se doresc a fi diminuate sau chiar eliminate, folosind în acest sens diverse metode de analiză, comparație sau testare.

Tema specifică a lucrării și justificarea abordării

Tema lucrării se axează pe elaborarea unui set structurat de recomandări, metodologii și proceduri standardizate menite să sprijine procesele de proiectare, fabricație și control al pieselor metalice. Lucrarea vizează integrarea proceselor moderne de inginerie, ergonomie industrială, sustenabilitate și asigurare a calității în cadrul ciclului de viață al produsului metalic. Accentul este pus pe dezvoltarea unor practici reproductibile și eficiente, capabile să asigure performanța tehnică, fiabilitatea și competitivitatea produselor într-un context industrial marcat de inovație tehnologică și standarde internaționale riguroase.

Necesitatea elaborării unui manual de bune practici derivă din complexitatea crescândă a proceselor de fabricație a pieselor metalice, a rolului și formei acestora, precum și din presiunea tot mai accentuată a pieței globale pentru produse de calitate superioară, realizate cu costuri și timpi de producție reduși. În plus, dezvoltarea accelerată a tehnologiilor de prelucrare (precum fabricația aditivă, automatizarea și controlul numeric computerizat) impune adaptarea continuă a specialiștilor la noi paradigme de lucru. Prin urmare, abordarea acestei teme este justificată de:

- Nevoia de standardizare și eficientizare – pentru reducerea erorilor de fabricație, creșterea interoperabilității, reducerea timpilor de proiectare și a numărului de iterații

din fazele de dezvoltare de produs și facilitarea transferului de cunoștințe între diferite echipe și organizații;

- Asigurarea calității și conformității – în raport cu specificațiile tehnice, standardele și reglementările internaționale, aspect esențial pentru competitivitatea pe piețele globale;
- Promovarea sustenabilității – prin abordarea unor practici care optimizează consumul de resurse, reduc pierderile de material și minimizează impactul asupra mediului;
- Dezvoltarea competențelor profesionale – manualul servește ca instrument de formare și perfecționare pentru ingineri, tehnicieni și operatori implicați în industria construcțiilor de mașini.

Capitolul I – Dezvoltarea pieselor metalice pentru autovehicule

1.1. Contextul industrial actual

În prezent, făcând referire la industria constructoare de mașini [2], observăm noi tehnologii și termeni care își fac simțită prezenta: Industry 4.0 [3][4][5], IoT, 3D printing [6][7], producție automatizată [4][8][9], lean manufacturing, electrificare, vehicul autonom. Pentru constructorii din Europa apar provocări noi în fiecare zi, dictate de cerințele pieței [10], de legislația în vigoare, precum și de competiția cu piața din ce în ce mai agresivă a modelelor chinezești.

Conceptul de „Industrie 4.0” a fost folosit pentru prima dată într-un articol publicat în 2011 de către Guvernul German pentru a defini strategia high-tech pentru anul 2020. Industria 4.0, care poate reprezenta cea de-a patra revoluție industrială, este un sistem tehnologic complex ce a fost discutat și cercetat la scară largă, cu o influență majoră asupra sectorului industrial și care introduce noi concepte și tehnologii în dezvoltarea industrială: Internetul Lucrurilor (IoT), Internetul Serviciilor (IoS), Realitatea Augmentată (AR), robotica, fabricația virtuală (Cloud Manufacturing) [11][12][13][14][15].

Una dintre cele mai mari provocări din industria de automobile este reducerea emisiilor poluante și a gazelor cu efect de seră, generate în mare parte de autovehiculele cu motor termic. La momentul de față, normele legislative în vigoare impun emisii de carbon din ce în ce mai reduse, ceea ce conduce la încercarea producătorilor de a găsi echilibrul între masa proprie a autovehiculului și performanțele dinamice și de consum ale acestuia. În 2019, la nivel global, emisiile de CO₂ din transporturi reprezentau 8.22Gt (22.3%) din totalul de 36.87Gt [16]. Astfel, constructorii de automobile sunt în situația de a căuta soluții noi și inovatoare pentru autovehiculele cu motor termic, prin montarea de grupuri motopropulsoare mai mici concomitent cu efortul diminuării masei proprii a automobilului, toate acestea pentru a menține ridicate performanțele dinamice și de consum.

Există deja de câțiva ani și o tendință de trecere către motoarele de tip hibrid sau electric, mai ales având în vedere că începând cu anul 2035, motoarele termice nu vor mai putea fi produse în Europa. Electrificarea aduce la rândul ei noi provocări constructorilor, aceștia având noi obiective de surclasat în ceea ce privește reducerea emisiilor acustice. Zgomotele poluante, vibrațiile și asperitatea (sau NVH) sunt la momentul de față principalii factori ai nemulțumirilor clienților cumpărători de autovehicule [17], analizele cu elemente finite (FEM) permițând identificarea frecvențelor de rezonanță [18] și configurații optime pentru diverse zone ale autovehiculului [19]. Obiectivul de reducere a masei totale a rămas și el la fel de important pentru creșterea autonomiei.

Materiale inovatoare [20][21][22] au fost introduse în fabricație, având caracteristici și performanțe net superioare, cu toate acestea, piesele din metal reprezintă încă aproximativ 65% din masa unui vehicul [23][24]. Dinamica tot mai accentuată de apariție a unor noi modele de autovehicule pe piață face ca timpii necesari etapelor de dezvoltare de noi produse să fie din ce în ce mai scurți.

1.2. Stadiul actual al cunoașterii în domeniu

Regulile de dezvoltare de produs au făcut obiectul a numeroase studii de cercetare, fiind definite diverse metode de verificare. În articolul său legat de regulile de design, R. Radhakrishnan [25] descrie ca și metode de verificare a design-ului transformarea axei mediane și raționamentul geometric. Astfel, încă din fazele timpurii ale design-ului se pot detecta erori de design ce pot conduce la imposibilitatea producerii piesei. Introducând metoda axei mediale, se pot realiza anumite corecții în mod automat. Metoda ingineriei concurențiale a fost descrisă de Liu, Peng și Qin [26]. Astfel, prin această metodă se pot dezvolta simultan produse, procese și utilajele aferente.

În cadrul cercetărilor asupra dezvoltării pieselor din metal și a metodelor de fabricație a fost studiată și influența anumitor factori asupra proceselor de fabricație, cum ar fi temperatura degajată în timpul proceselor de deformare (ambutisare) ”la rece”. Astfel, Pereira și Rolfe au determinat atât prin metoda experimentală cât și în urma analizelor numerice faptul că există o strânsă corelare între viteza de ambutisare, proprietățile mecanice ale materialului și temperatura atinsă de către materia primă și presă [27]. Astfel, pentru ciclurile nominale de funcționare, temperaturile atinse sunt de 180°C pentru matriță și 108°C pentru materia primă, în timp ce în ciclurile de setup valorile atinse sunt cu până la 85% mai mici.

1.3. Tipuri de piese metalice și tehnologii de fabricație

La momentul de față pentru autovehiculele convenționale (autovehicule cu combustie internă sau ICE), sunt achiziționate de la furnizori exterior un procent de aproximativ 70% dintre componentele care sunt folosite pentru fabricarea autovehiculelor. În cazul vehiculelor electrice sau hibride (EV, HEV sau PHEV), procentul poate ajunge până la 85% deoarece apar elemente suplimentare ce pot fi achiziționate precum pachetele de baterii, motoarele electrice și sistemele de control.

Mecanismele și piesele metalice [28][29] în general fac parte din gama șasiu și caroserie, ele fiind dezvoltate și produse doar de către furnizori terți. Responsabilitatea pentru dezvoltarea acestora aparține în integralitate furnizorilor [30][31].

1.4. Concluzii

Procesul de dezvoltare de produs este o activitate costisitoare pe care furnizorii de componente trebuie să o desfășoare încă din fazele de cerere de ofertă (înainte de a fi numiți). Există cazuri în care activitatea este suportată integral din bugetul furnizorului dar proiectul în sine fie nu este nominalizat (din considerente fie financiare fie de fezabilitate tehnică). De aceea un Manual de bune practici pentru proiectarea pieselor metalice poate fi considerat ca o bază tehnică în activitățile de proiectare, un suport de formare pentru educarea noilor generații de ingineri dar în primul rând pentru a eficientiza și reduce costurile procesului de dezvoltare de produs.

Capitolul II – Influența evoluției specificațiilor tehnice asupra dezvoltării de produs

2.1. Introducere

Sistemele mecanice care sunt utilizate pentru acționarea deschiderilor unui autovehicul îndeplinesc o serie de specificații complexe care sunt fundamentate de cerințe legate de siguranța în exploatare [32][33]. Acest termen se poate interpreta în sensul definirii unei durate de viață a produsului, posibilitatea de integrare facilă în procesul tehnologic și îndeplinirea cerințelor legate de securitatea pasivă a automobilelor [34][35][36].

În ceea ce privește durata de viață [37] a produsului se pot identifica cerințe legate de funcționare și comportament mecanic și fizic al produsului [38]. Procesul tehnologic definește cerințe legate de operațiile de montare/demontare a ansamblurilor asociate deschiderilor și a procesului de realizare a operațiilor de pregătire a protecției anticorozive și definire a aspectului final al produsului. Structura automobilului [39] este realizată plecând de la necesitatea protejării ocupanților și a participanților vulnerabili [40][41] și definește o structură nedeformabilă (habitaclul) completată de construcții al căror rol este acela de a consuma în mod programat energia cinetică [42][43][44].

Evenimentele rutiere care se manifestă cu preponderanță sunt cele în care autovehiculul intră în coliziune cu partea frontală [35]. Așadar, se identifică necesitatea realizării unor construcții speciale care au funcții multiple [45][46][47][48].

Activitatea de proiectare adoptă o abordare multidisciplinară [49][50][51], deoarece în dezvoltarea unei piese trebuie luate în considerare aspecte legate de calitate, preț, fezabilitate [52] și tehnologie [53][54]. Datele de intrare în proiectare includ specificațiile tehnice, un model CAD preliminar, desene de inginerie, cerințe specifice clientului, aspecte legate de siguranță și caracteristici de reglementare, experiența anterioară, înregistrările de calitate, fluxul procesului de fabricație, planificarea generală a clientului și cerințele standardelor din industria auto. Uneori, modelul CAD inițial este doar o schiță a mediului înconjurător al piesei împreună cu punctele de fixare.

2.2. Specificație tehnică

Producătorul de componente pentru industria de automobile are, în dezvoltarea pieselor sau ansamblului, un parcurs specific în care sunt integrate procese diverse care necesită, în anumite condiții, abilități tehnice ce pot avea un caracter de inovare [55][56][57].

Cerințele specificației tehnice sunt necesare inginerilor proiectanți pentru a putea defini nu doar piesa ci și metoda de fabricație, gama de control utilizată, testele de validare, ambalajul și constrângerile legate de manipulare, precum și considerente legate de reciclabilitate și distrugere la finalul de viață [58].

Cerințele specifice ale unui ansamblu sunt corelate cu cele ale pieselor sau ansamblurilor conexe. În cazul unei articulații pentru capotă este necesară corelarea cu cerințele ansamblului care asigură închiderea – deschiderea – menținerea stării închisă.

2.3. Cerințe și specificație tehnică pentru articulația de capotă față

După parcurgerea cerințelor globale ale produsului – capotă față și identificarea specificațiilor particulare ale subansamblurilor asociate acestui produs ansamblu se analizează cerințele particulare [59].

Balamaua pentru capotă față este un ansamblu al unui sistem complex cu implicații în ceea ce definește calitatea percepută a produsului. Fiind o componentă a unui ansamblu care are o anumită mobilitate în raport cu structura sau caroserie autovehiculului este necesară stabilirea condițiilor de utilizare:

- Utilizare urbană;
- Utilizare pe drumuri secundare și naționale;
- Utilizare pe autostradă și drumuri expres;
- Utilizare în zone montane.

2.4. Cerințe și specificație tehnică pentru încuietoarea de capotă

La fel ca și în cazul balamalelor, și pentru articulația de capotă este transmisă în vederea realizării cotației de preț și a modelului piesei o specificație tehnică.

Mediul de utilizare avut în vedere pentru o încuietoare de capotă față este similar cu al unei balamale de capotă:

- Utilizare urbană;
- Utilizare pe drumuri secundare și naționale;
- Utilizare pe autostradă și drumuri expres;
- Utilizare în zone montane.

Ca mediu climatic se consideră:

- Temperaturile: de la zone cu climat rece până la zone cu climat cald și umed;
- Precipitațiile: de la zone cu climat rece până la zone cu climat cald și umed.

2.5. Evoluția proiectării articulațiilor

2.5.1. Articulație 2008

Pornind de la cerințele funcționale și dimensionale (puncte de fixare, unghiuri de deschidere, volum, mediu), este schițat un design preliminar. Modelul inițial de schiță este furnizat de client, având o grosime a materialului de 3 mm atât pentru partea fixă, cât și pentru partea mobilă a balamalei.

Componentele balamalei sunt prezentate în Figura 2.5.

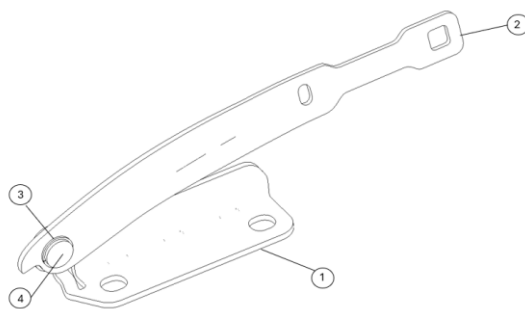


Figura 2.5. Ansamblu balama capotă: 1 – Placă fixă, 2 – Placă mobilă, 3 – Garnitură, 4 – Ax

Pe baza modelului furnizat, proiectantul realizează modelul 3D CAD al piesei, ținând cont de mediul de utilizare și integrând elementele primite din proces [60]. După definirea modelului geometric se dezvoltă modelul numeric al ansamblului (Figura 2.6).

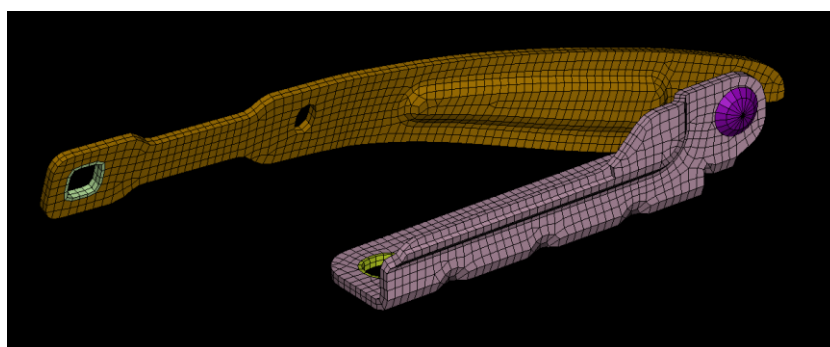


Figura 2.6. Model numeric folosit pentru simularea din analiza cu element finit

Pentru alegerea materialului se realizează un proces iterativ în cadrul căruia sunt evaluate rezultate ale simulării numerice. De asemenea se pot identifica soluții pentru optimizarea modelului geometric [61][62].

2.5.2. Articulație capota realizată conform specificațiilor anului 2020

O schiță inițială a balamalei este prezentată de către client împreună cu cerințele funcționale și dimensionale, așa cum este ilustrat în Figura 2.10.

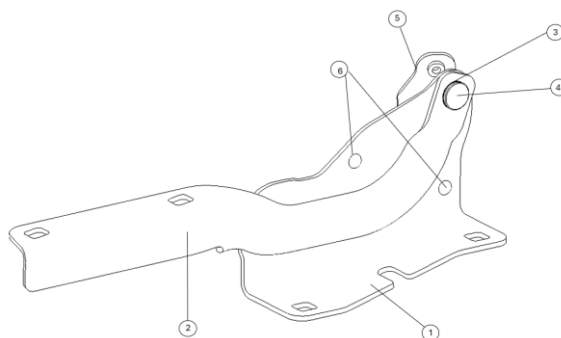


Figura. 2.10. Ansamblu balama capotă: 1 – Placă fixă, 2 – Placă mobilă, 3 – Garnitură, 4 – Ax , 5 – Suport fixare aripă, 6 – Nituri

Urmând aceiași pași ai procesului de proiectare, este realizat un model 3D CAD inițial și simulat pentru a asigura fezabilitatea procesului de fabricare și respectarea caracteristicilor funcționale. Modelul este prezentat în Figura 2.11.

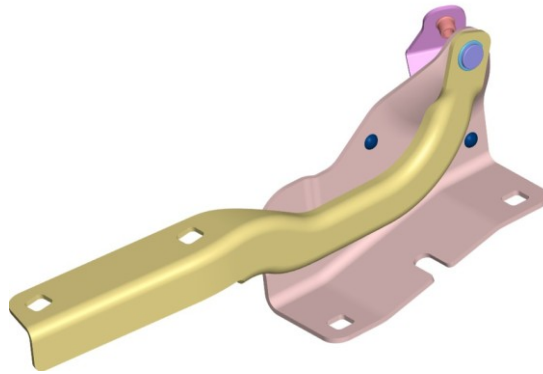


Figura. 2.11. Prima iterație a balamalei de capotă

2.6. Evoluția proiectării încuietorilor

2.6.1. Încuietoare 2007

În cadrul acestei secțiuni se va analiza un model funcțional al piesei încuietoare capotă. Analiza produsului este prezentată în raport cu procesul parcurs pentru realizarea unui produs valid. Modelul inițial al încuietorii este transmis de către client ca fiind o evoluție a unui model existent pe piață. Modelul 3D primit este prezentat în Figura 2.18.

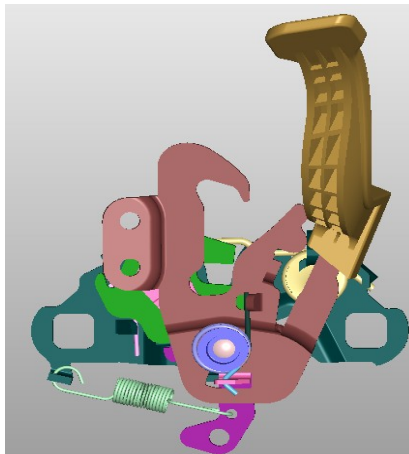


Figura 2.18. Model inițial primit de la client

Modelul numeric folosit este prezentat în Figura 2.19.

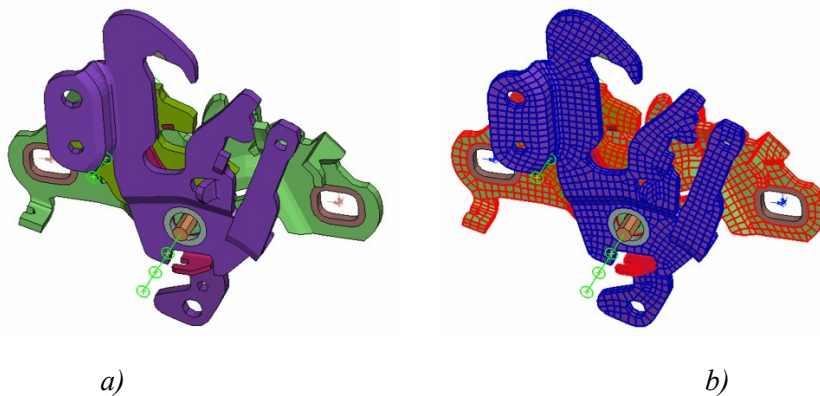


Figura 2.19. Definierea modelului numeric: a) Cuple cinematice, b) definirea zonelor de contact

2.6.2. Încuietoare 2021

Împreună cu specificația tehnică evoluată, clientul pune la dispoziție un model 3D simplificat al interfeței de montaj precum și a unei părți limitate a încuietorii (doar mecanismele de închidere-deschidere și unul dintre arcuri). Modelul 3D primit este reprezentat în Figura 2.22.

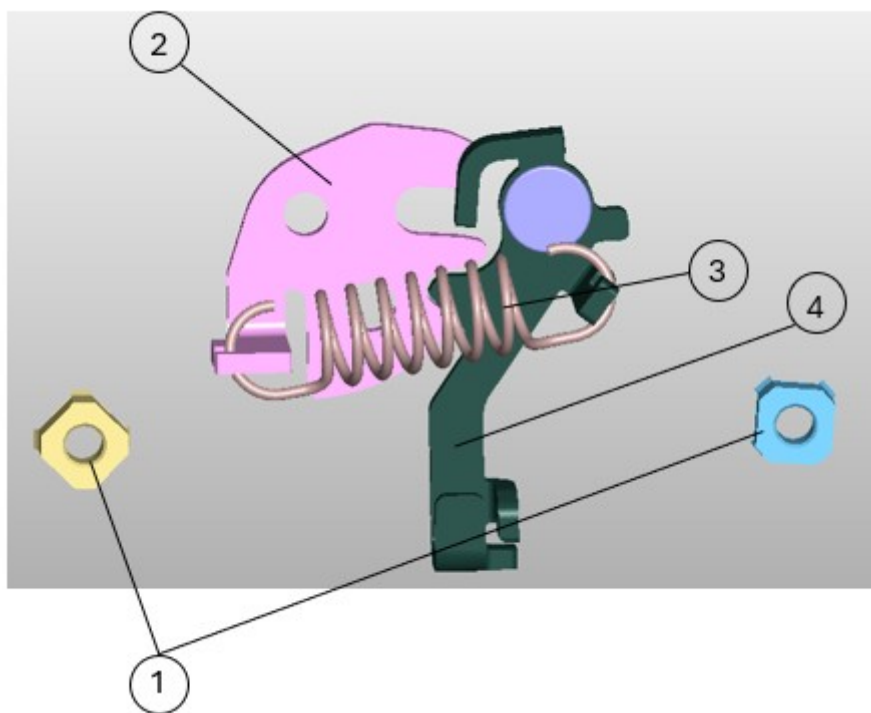


Figura 2.22. Structura ansamblului: 1 – interfață fixare, 2 – cârlig închidere, 3 – arc, 4 – levier deschidere

2.6. Concluzii

Evoluțiile specificațiilor tehnice, timpii de dezvoltare reduși, evoluțiile de design ale mașinii, constrângerile mediului înconjurător, tendințele generale de reducere a costurilor dar și personalul puțin și neexperimentat sunt contributorii principali ai creșterii numărului de iterații în activitățile de dezvoltare de produs. Experiența pe proiectele anterioare și păstrarea strictă a unui istoric al modificărilor a fost cheia pentru a putea susține solicitările clientului dar activitatea de căutare a trebuit simplificată. Astfel, în lucrarea de față au fost analizate proiectele anterioare și au fost sintetizate informații relevante pentru fiecare proiect în parte, legate de componente și tipul acestora, materiale și grosimi folosite, număr de operații de proces și tipul acestora, cerințe tehnice, masă și gabarit, număr de iterații și conținut.

Capitolul III – Cercetarea experimentală a sistemului mecanic de tip articulație capotă

3.1. Introducere

În cadrul acestui capitol va fi analizat un ansamblu mecanic de tip articulație capotă. Simplificând rolul funcțional al acestui ansamblu se poate preciza faptul că îndeplinește funcțiile unei articulații cilindrice care permite mișcarea de rotație a capotei (compartimentului motor sau compartimentului pentru bagaje) astfel încât să se permită accesul în acest spațiu al automobilului.

3.2. Rolul și funcțiile sistemului

Cerințele de funcționare ale sistemului mecanic sunt prevăzute în documente specifice care sunt întocmite de beneficiar, constructorul automobilului, și sunt analizate și validate în acord cu performanțele furnizorului. În Figura 3.1 sunt prezentate elementele componente ale ansamblului articulație capotă.

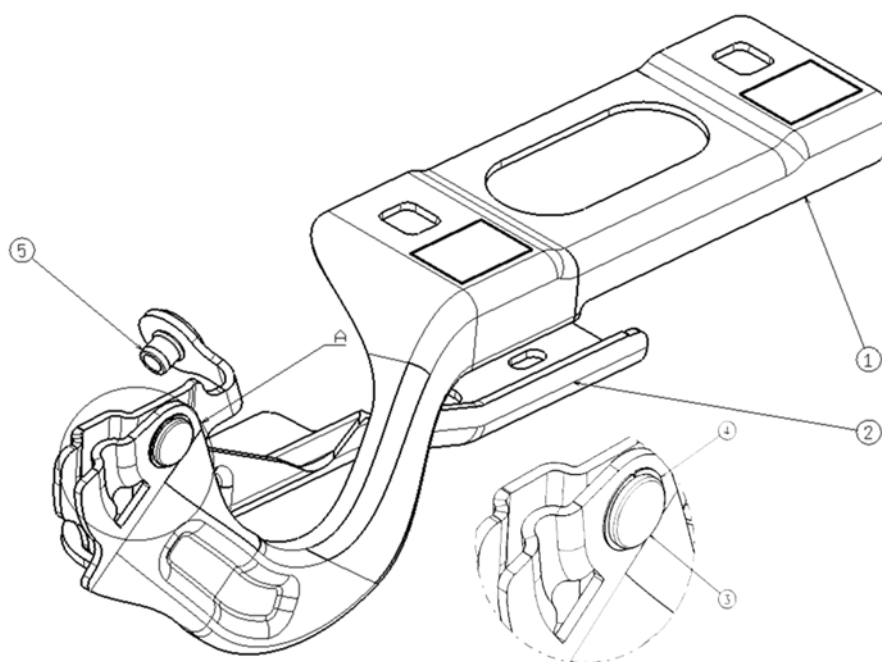


Figura 3.1. Ansamblul articulație capotă

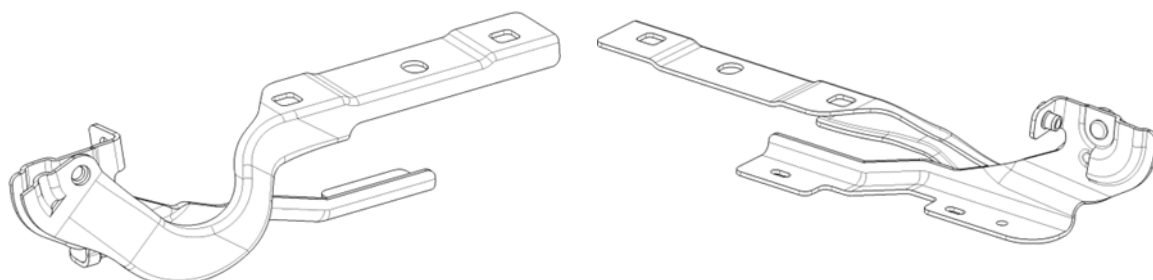
1 – partea mobilă; 2 – partea fixă; 3 – ax; 4 – garnituri; 5 – piesă legătură.

Trebuie precizat faptul că în prezent, din motive care sunt legate de optimizarea costurilor, producătorii de automobile doresc reducerea numărului de repere și utilizarea unui ansamblu pentru un număr cât mai mare de modele. De aici apar o serie de constrângeri ale modelului geometric care determină o atenție suplimentară pentru îndeplinirea cerințelor determinate de securitatea automobilului.

In acest caz, informațiile fiind limitate, beneficiarul a prezentat un model de baza. Validarea tehnică este in sarcina furnizorului astfel că a fost necesară intervenția pentru consolidarea structurală a piesei.

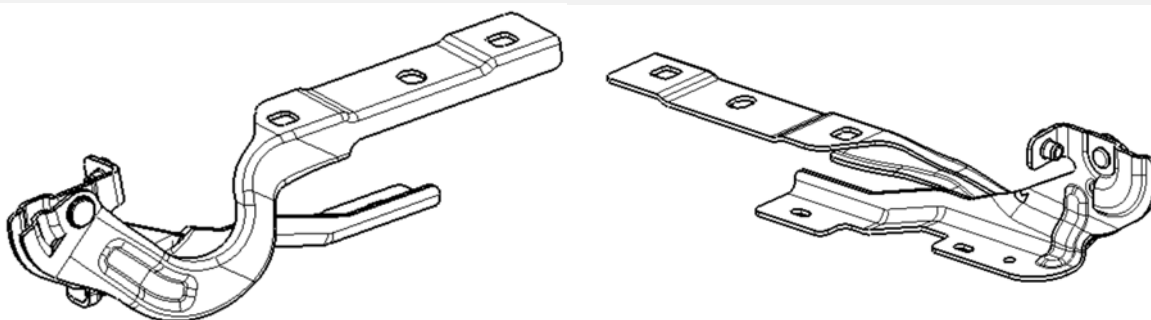
Iterația 1 indica adăugare unor elemente de consolidare. Iterația 2 are ca scop eliminarea de masă. Iterația 3 a fost realizată pentru evaluare unei soluții alternative a opritorului. Iterația 4 a fost realizată pentru optimizarea suplimentară a masei piesei.

Model inițial



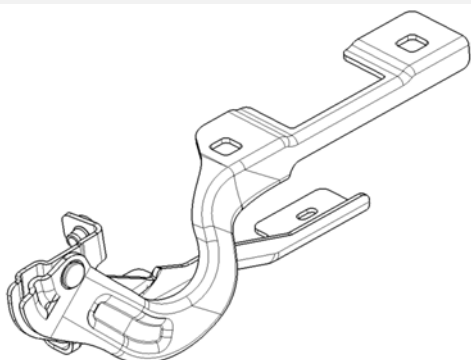
Iterația 1

Acțiune: adăugare zone consolidare



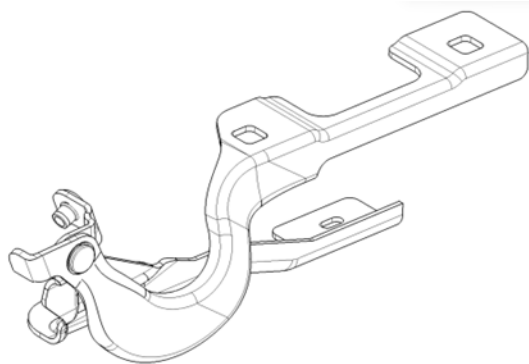
Iterația 2

Acțiune: evaluare parte mobilă / reducere masa



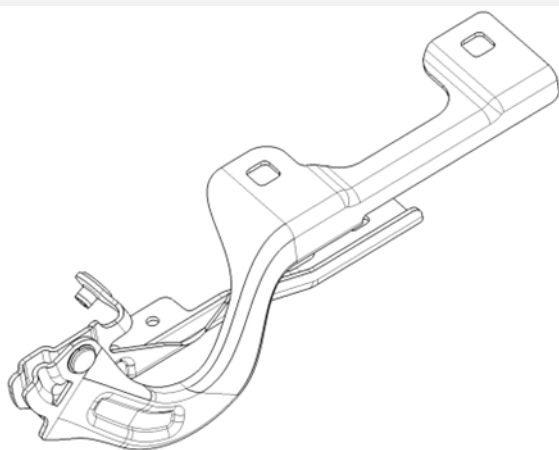
Iterația 3

Acțiune: Evaluare configurație zona opritor



Iterația 4

Acțiune: evaluare parte mobilă / reducere masă



Model final

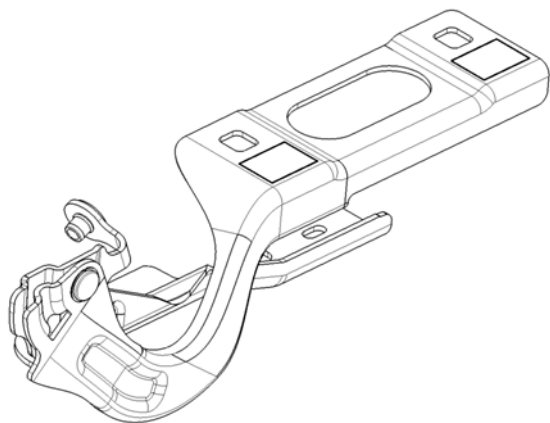


Figura 3.3. Etapele iterative ale procesului de proiectare ale ansamblului

Reiterând specificațiile tehnice menționate în Tabelul 3.1 în concordanță cu fluxul prezentat în Figura 3.2 se relevă faptul că modelul virtual de validare are un rol critic pentru asigurarea unei produs conform, așa cum reiese din Figura 3.3

3.3. Alegerea materialului

Analiza diagramei prezentate în Figura 3.2 indică faptul că materialul ales pentru realizarea componentelor ansamblului are un rol determinat pentru îndeplinirea cerințelor structurale și este determinant pentru procesul tehnologic de fabricare [63] [64].

Investigarea portofoliului ansambluri și componente realizate are un rol determinat în alegerea unor soluții potrivite.

Alegerea materialului se realizează prin realizarea unei serii de simulări numerice în conformitate cu specificațiile tehnice prezentate în Tabelul 3.1. În urma acestor analize materialul ales este S460 MC.

3.4. Procesul de fabricare a ansamblului articulație capotă

Ansamblul analizat este constituit din două piese metalice realizate prin ambutisare care sunt cuplate într-o articulație cilindrică cu ajutorul unui ax.

Din punct de vedere procesului de validare structurală (Figura 3.2) componentele critice sunt piesele realizate prin procesul de ambutisare. Expertiza acumulata la nivelul întreprinderii a dovedit faptul că articulația (axul) nu reprezintă o componentă cu grad de risc. În consecință, analiza procesului de fabricare a fost orientată către studiul componentele realizate prin ambutisare. Dintre cele două componente elementul critic este definit de piesa mobilă (Figura 3.1).

Această componentă este realizată prin tehnologia de ambutisare cu ștanță progresivă. Pentru realizarea sunt prevăzute șase operații tehnologice (prima fiind reprezentată de procesul de decuparea a semifabricatului). În Figura 3.19a sunt prezentate echipamentele tehnologice pentru primele patru operații de îndoire, iar în Figura 3.19b sunt prezentate echipamentele tehnologice pentru operația finală de decupare.



a)



b)

Figura 3.19. Procesul tehnologic de realizarea a piesei mobile. a) echipamentul tehnologic pentru operațiile de îndoire; b) echipamentul tehnologic pentru operațiile de decupare

3.5. Cercetarea experimentală a ansamblului

Ansamblul fizic a fost montat pe un dispozitiv care să permită deplasarea exclusiv pe direcția indicată în norma de încercare.

Pentru cercetarea experimentală a fost utilizată o mașina universală de încercare la tracțiune a cărei forță aplicată ajunge la 50 kN.

După montarea dispozitivului pe mașina de încercare la tracțiune, au fost setate la valoarea „zero” indicațiile referitoare la deplasare și forță (tara). Bacul mobil al mașinii de încercat de tracțiune s-a deplasat cu o viteză constantă de 5 mm/min.

Procesul a fost înregistrat video cu ajutorul unui camere fotografice digitale [65], fixată pe un suport. În Figura 3.22 este prezentat ansamblul montat pe mașina universală.



Figura 3.22. Testarea experimentală a ansamblului

Pentru determinarea cu precizie a deplasării piesei de încărcare a fost elaborată o procedură pentru prelucrarea imaginilor digitale [66] [67] [68].

3.6. Concluzii

În cadrul acestui capitol a fost realizată o analiză complexă a unui ansamblu de tip articulație capotă. În acest sens au fost parcurse următoarele etape:

- analiza ansamblului și identificarea elementelor constructive;
- studiul specificațiilor tehnice;
- realizarea unei sinteze a elementelor constructive și tehnice și identificarea modului de corelare pentru îndeplinirea cerințelor de funcționare;
- alegerea materialului;
- caracterizarea mecanică a materialului:
 - Prin metode experimentale (încercarea la tracțiune) a fost determinată curba specifică $\sigma - \varepsilon$.
 - Modelul matematic al materialului a fost extins pentru determinarea mecanismelor care conduc la degradare (rupere).
 - A fost definită cartela de material pentru utilizarea în programul Ls-Dyna. Modelul numeric al materialului a fost validat prin compararea cu rezultatele obținute experimental.
- procesul tehnologic de fabricare a componentei piesa mobilă a fost cercetat și au fost prelevate piese semifabricat după fiecare etapă;
- ansamblul fizic a fost cercetat experimental:
 - a fost realizat sistemul de adaptare pentru mașina universală de încercare;
 - procesul experimental a fost analizat prin înregistrare video;
 - au fost realizate aplicații MATLAB pentru prelucrarea imaginilor digitale;
 - au fost realizate seturi cu rezultate ale încercărilor experimentale.

Capitolul IV – Studiul numeric al sistemului mecanic de tip articulație capotă

4.1. Introducere

În cadrul acestui capitol va fi analizat numeric un ansamblu mecanic de tip articulație capotă. Pentru definirea comportamentului mecanic al ansamblului sunt utilizate informațiile obținute în urma investigațiilor experimentale..

4.2. Simularea numerică a procesului de fabricare a piesei mobile a ansamblului

Evaluarea numerică [69][70] a performanțelor structurale ale ansamblului poate fi realizată de la simplu la complex. Pentru a justifica o soluție eficientă a fost elaborat un scenariu complex care presupune activitatea de simulare a procesului tehnologic de fabricare.

4.2.1. Realizarea modelului numeric al procesului tehnologic

Elementele necesare pentru realizarea modelului numeric al procesului de fabricare a piesei mobile sunt definite în raport cu modelul geometric final (etapa *freeze design*). În Figura 4.1 este prezentat modelul CATIA în care se pot identifica piesa de referință și suprafețe construite care reprezintă zonele active ale dispozitivelor utilizate în procesul tehnologic de realizare a piesei.

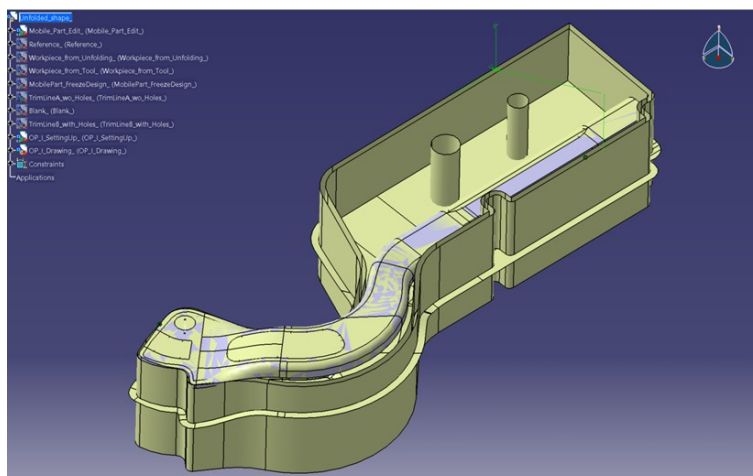


Figura 4.1. Model CATIA pentru definirea etapelor procesului tehnologic.

Modelul numeric este realizat cu ajutorul pachetului software ANSYS Forming care utilizează ca solver programul Ls-Dyna [71][72].

4.2.2. Alegerea materialului

Așa cum a fost prezentat în Capitolul III, materialul utilizat pentru realizarea componentelor fizice este S460MC [73]. Definirea caracteristicilor necesare pentru procesul tehnologic necesita echipamente de cercetare specializate. Astfel, pentru procesul de simulare a fost identificat în baza de date a ANSYS Forming un material compatibil. Acest materialul

utilizat pentru definirea piesei semifabricat este HC420LA. În Figura 4.2 sunt prezentate caracteristici mecanice specifice ale acestui material [74][75][76][77].

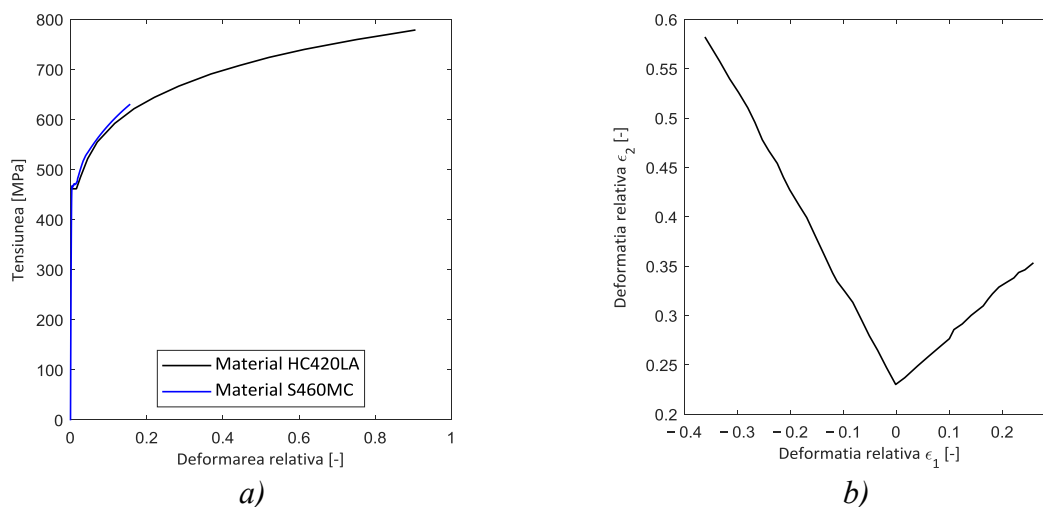


Figura 4.2. Caracteristici material: *a)* curba tensiune – deformare relativă: S460MC vs. HC420LA; *b)* curba de formabilitate

Valorile indicate în Figura 4.2a arată faptul că pentru caracteristica mecanică $\sigma - \varepsilon$ nu se înregistrează diferențe substanțiale ale valorilor (pentru $\varepsilon = 0.15$, $\Delta\sigma = 1,4\%$).

4.3. Prezentarea modelului numeric pentru analiza structurală

Modelul numeric pentru analiza structurală este construit în raport cu specificațiile tehnice ale procedurii de încercare și cerințele programului pentru simulare [78][79].

Se face precizarea că în procesul de realizarea a modului numeric au fost avute în vedere rezultate obținute pentru alte tipuri de produse care determină modalitatea de discretizare (definire a rețelei de elemente finite) pentru modelul curent [80].

Scenariul de simulare investigat este **Impact frontal la viteza mare** (Tabelul 3.1). În acest caz o pereche de balamale este așezată conform poziției de autovehicul. O forță de 12 kN este aplicată pe direcție longitudinală. Rezultatul probei este că să nu se producă rupturi ale componentelor ansamblului [81].

4.4. Rezultate obținute prin simularea numerică

În cadrul acestei secțiuni se analizează rezultatele obținute prin aplicarea proceselor de simulare numerică.

4.4.1. Simularea numerică a procesului de fabricare

Pentru verificarea rezultatelor obținute în urma procesului de simulare au fost analizate piesele prelevate după fiecare etapă a procesului tehnologic (Figura 3.20).

Forma geometrică a fost obținută prin scanare 3D cu lumină polarizată. Modele au fost definite în format stereolitografic (.stl). Fiecare model geometric a fost verificat și au fost eliminate referințele scanate ale sistemului de fixare a fiecărei piese (Figura 4.19).

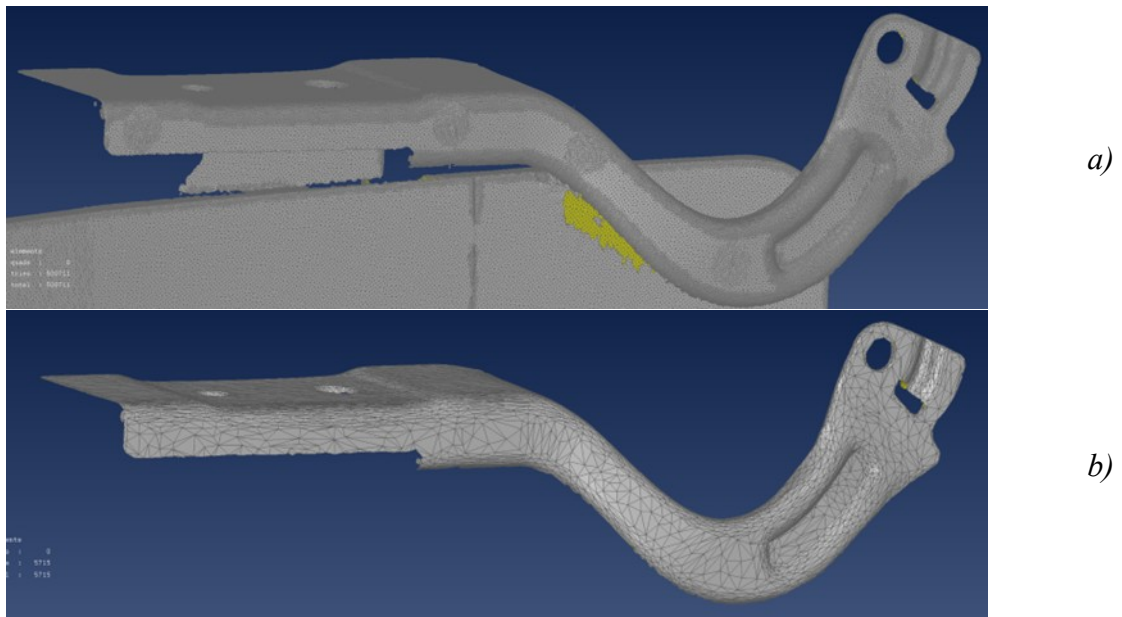


Figura 4.19. Model stl: a) model geometric brut; b) model prelucrat

Scanarea 3D a fost realizată simplificat, fără stabilirea unei referințe a piesei de interes. Pentru integrarea în modelul numeric a fost elaborată și utilizată o aplicație MATLAB pentru orientarea modeleului geometric.

4.4.2. Simularea numerică a impactului frontal ($F_x = 12 \text{ kN}$)

Modelul prezentat a fost rezolvat pentru evaluarea performanțelor structurale. Programul Ls-Dyna a fost configurat pentru rezolvare în modul *implicit* care impune cerințe speciale din punct de vedere al convergenței procesului de obținere a soluției numerice [82][83].

Analiza preliminară a rezultatelor obținute cu ajutorul modelului numeric conduc la concluzia ca din punct de vedere structural ansamblul este validat și complet funcțional.

4.5. Integrarea rezultatelor obținute prin simularea procesului de fabricare în modelul pentru analiza structurală

În cadrul acestei secțiuni se va discuta o procedură pentru integrarea rezultatelor procesului de simulare a procesului de fabricare în modelul numeric pentru analiza structurală.

Pentru obținerea unor rezultate corespunzătoare prin simularea procesului de fabricare, modelul numeric utilizează capacități implementate în Ls-Dyna pentru rafinarea rețelei de discretizare. Aceasta tehnică (*CONTROL_ADAPTIVE) implică divizarea unui element finit într-o serie de elemente finite cu dimensiune redusă în momentul în care se îndeplinește un criteriu de formă sau de stare de tensiune. Astfel numărul de elemente finite al modelului numeric crește semnificativ.

4.6. Rezultate numerice

Conform specificației tehnice a produsului acesta trebuie să susțină o forță aplicată pe direcție longitudinală fără apariția unor rupturi.

Pentru evidențierea performanțelor modelelor elaborate se construiesc graficele de variație a deplasării elementelor de fiare a piesei mobile în raport cu forța aplicată.

Aceste rezultate pot evidenția definirea unor factori de scalare:

$$s_{f,i} = \frac{d_{max}}{d_{max,ref}} \quad (4.7)$$

unde:

- d_{max} este deplasarea maximă determinată într-un caz complex;
- $d_{max,ref}$ este deplasarea maximă calculată pentru cazul de referință.

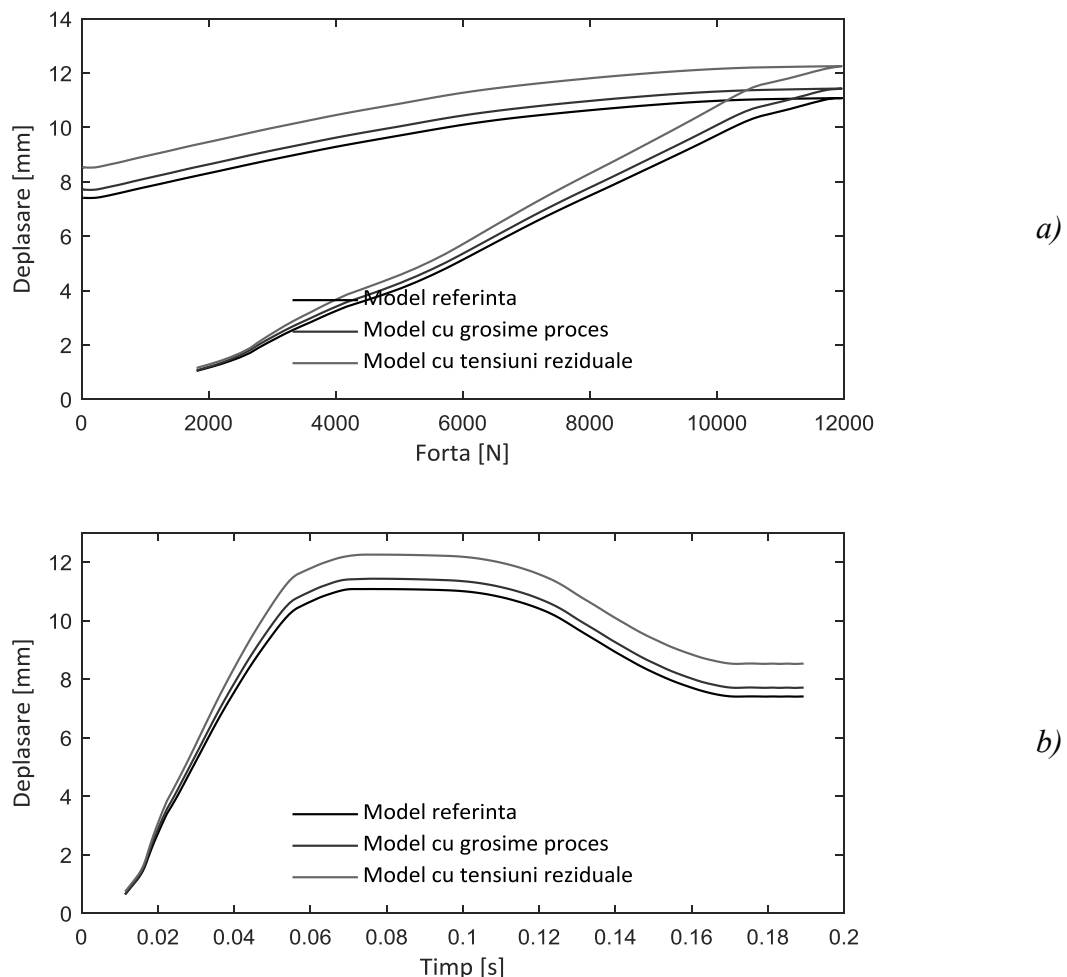


Figura 4.41. Rezultate: a) deplasare vs. forța aplicată; b) deplasare vs. timp

4.7. Concluzii

În cadrul acestui capitol a fost realizată o analiză complexă a unui ansamblu de tip articulație capotă. În acest sens au fost parcurse următoarele etape:

- a fost elaborat un model numeric al procesului de fabricare a piesei mobile cu ajutorul programului ANSYS Forming:
 - Pentru definirea etapelor specifice a fost analizat modelul CAD al produsului finit.
 - Etapele procesului de simulare numerice au fost elaborate în concordanță cu etapele procesului tehnologic.
 - Pentru fiecare etapă au fost prezentate rezultate semnificative care influențează performanțele structurale ale produsului.
- a fost elaborat un model numeric al produsului pentru evaluarea performanțelor structurale:
 - sunt prezentate metodele elaborate pentru procesarea modelului geometric;
 - sunt prezentate metodele elaborate pentru realizarea modelului numeric;
 - sunt prezentate comenzile specifice pentru rezolvare cu ajutorul programului Ls-Dyna;
- au fost investigate piesele semifabricat corespunzătoare etapelor procesului tehnologic:
 - Au fost realizate modele CAD prin scanare optică 3D;
 - A fost elaborată o aplicație MATLAB care permite alinarea modelului geometric în raport cu referința globală;
 - Modele CAD ale pieselor scanate au fost comparate cu cele obținute prin simularea numerică a procesului de fabricare.
- prin simularea numerică a procesului de fabricare se obțin informații referitoare la modificarea de grosime a piesei precum și la starea de tensiune reziduală consecință a procesului tehnologic:
 - Pentru integrarea în modelul numeric au fost elaborate programe MATLAB care permit interogarea fișierelor cu rezultate;
 - A fost elaborată o procedură de transpunere (mapare) a rezultatelor obținute în urma simulării procesului tehnologic pentru modelul structural;
 - A fost elaborată o procedură de realizare a modelului cu elemente finite 3D pentru analiza structurală care să includă rezultate specifice ale procesului tehnologic;
- au fost definiți scenariii specifice pentru simularea numerică:
 - model convențional (referință);
 - model cu grosime variabilă (mapare);
 - model cu tensiuni reziduale.
- rezultatele experimentale au fost comparate cu rezultatele obținute numeric:
 - se identifică o bună corelare;
 - se definește un parametru pentru scalarea mărimii de referință (F_X) pentru utilizarea unui model convențional de simulare.

Capitolul V – Opritor temporar. Un brevet european

5.1. Introducere

În cadrul acestui capitol sunt prezentate informații referitoare la procesul de proiectare a unei piese de tip opritor temporar [84]. Piesa este obiectul unui brevet european în curs (Figura 5.1).


(19)		
		(11) EP 4 155 494 A1
(12)	EUROPEAN PATENT APPLICATION	
(43) Date of publication: 29.03.2023 Bulletin 2023/13	(51) International Patent Classification (IPC): E05D 11/10 (2006.01)	
(21) Application number: 21198259.0	(52) Cooperative Patent Classification (CPC): E05D 11/1014; E05Y 2600/53; E05Y 2600/56; E05Y 2800/692; E05Y 2800/694; E05Y 2900/531	
(22) Date of filing: 22.09.2021		
(84) Designated Contracting States: AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR Designated Extension States: BA ME Designated Validation States: KH MA MD TN	• DINU, Nicolae Pitesti (RO) • INAL, Cagri Calinesti (RO)	(74) Representative: Vasilescu, Raluca Cabinet M. Oproiu Patent and Trademark Attorneys 42, Popa Savu Street Sector 1, P.O. Box 2-229 011434 Bucharest (RO)
(71) Applicant: AKA AUTOMOTIV S.R.L. Judetul Arges (RO)		<u>Remarks:</u> Amended claims in accordance with Rule 137(2) EPC.
(72) Inventors: • STIROSU, Marin-Mihai Argeselu, Maracineni (RO) • TABACU, Stefan-Lucian Stefanesti (RO)		
(54) TEMPORARY CLAMPING MECHANISM		

Figura 5.1. Cererea de acordare a brevetului: Antet

5.2. Stadiul actual al cunoașterii

5.2.1. Identificarea stadiului cunoașterii

Etapa preliminară în activitatea de elaborare a conținutului tehnic a constat în cercetarea soluțiilor similare disponibile în baze de date specializate. Au fost identificate o serie de referințe care prezintă soluții tehnice ale unor dispozitive care să permită menținerea în poziție specifică a unei deschideri („ușa”). În Tabelul 5.1 sunt prezentate datele specifice identificate.

5.2.2. Identificarea dezavantajelor soluțiilor tehnice existente

Tehnica anterioară prezintă unele dezavantaje, printre care se numără următoarele:

- dispozitivele sunt fixate cu ajutorul șuruburilor pe ușă, ceea ce duce la creșterea timpului de fabricație;
- piesele sunt costisitoare și trebuie reutilizate de mai multe ori, necesitând îndepărtarea lor după procesul de vopsire și o fază de curățare înainte de reutilizare;
- după prindere, din cauza limitărilor de fabricație, interfața de prindere nu se potrivește perfect cu bolțul, îngreunând respectarea unghiului de deschidere al balamalei;
- formele sunt prea complexe, necesitând procese de fabricație complicate;

- după prima manevră, din cauza brațelor de prindere inegale, brațul exterior se va deforma plastic, iar opritorul temporar nu va mai putea menține același cuplu pentru mai multe manevre.

5.2.3. Problema rezolvată de invenție

Dezavantajele tehnicii anterioare pot fi rezolvate prin furnizarea unui mecanism de prindere temporară cu un design robust și simplificat, capabil să mențină ușa fixată ferm într-o poziție predeterminată, să permită mai multe cicluri de fixare și eliberare a ușii fără a se deteriora și să permită reutilizarea unei părți a mecanismului de prindere pentru o altă ușă.

5.3. Rezumatul invenției

Pentru a rezolva problema, într-un prim aspect al invenției, inventatorii au conceput un mecanism de prindere temporară care cuprinde:

- balama care include:
 - o un element mobil al balamalei cu o suprafață destinată montării pe o ușă;
 - o un element fix al balamalei cu o suprafață destinată fixării pe cadrul unei ușii;
 - o un ax de balama dispus paralel cu suprafața elementului mobil, având un ax de rotație „a” și cuprinzând:
 - un capăt de ax care permite rotația elementului mobil între pozițiile închis și deschis ale ușii;
 - un al doilea capăt de ax prevăzut cu un filet destinat montării unei piulițe.
 - o porțiune intermediară a axului destinată montării unui opritor temporar printr-un orificiu special.
- un bolț amplasat pe elementul fix al balamalei, cu axul său central paralel cu axul de rotație „a” la o distanță prestabilită.
- opritorul temporar este plasat într-un plan perpendicular pe axul balamalei și pe suprafața elementului mobil al balamalei și cuprinde:
 - o un orificiu de montare pentru ax;
 - o o cavitate de tip **E-clip** cu două capete deschise și o porțiune centrală circulară cu diametru interior ϕE ;
 - o o distanță prestabilită între centrul orificiului și centrul cavității circulare,
 - o două capete deschise delimitând o linie de încovoiere,
 - o găuri interioare dimensionate pentru a reduce contactul cu bolțul și frecarea în cavitate;
 - o un pinten median și două caneluri arcuite ce definesc liniile de îndoire ale capetelor deschise;
 - o o zonă de limitare pentru fixarea solidară a opritorului temporar pe elementul mobil al balamalei;
 - o un spațiu între cavitatea **E-clip** și orificiul central, a cărui lățime definește deplasarea capetelor deschise.

5.4. Metoda de utilizare

Într-un al doilea aspect al invenției, este furnizată o metodă de utilizare a mecanismului de prindere temporară menționat în primul aspect al invenției, metoda cuprinzând următorii pași:

- fixarea opritorului temporar în porțiunea intermediară a axului balamalei ușii unui vehicul;
- fixarea piuliței pe filetul capătului secundar al axului balamalei, în scopul prinderii opritorului temporar;
- deschiderea ușii din poziția închisă până la o poziție deschisă prestabilită la un unghi predeterminat;
- fixarea ușii prin angajarea bolțului în cavitatea de tip E-clip cu un cuplu de deschidere prestabilit, astfel încât să se asigure menținerea poziției deschise;
- eliberarea ușii din poziția deschisă prin dezangajarea bolțului din cavitatea E-clip cu un cuplu de închidere prestabilit;
- demontarea piuliței și îndepărtarea opritorului temporar.

5.5. Metoda de producere a mecanismului

Într-un al treilea aspect al invenției, este furnizată o metodă de producere a mecanismului de prindere temporară, care conține un opritor temporar realizat din oțel. Metoda include un pas de fabricare a opritorului temporar, acest pas fiind selectat din următoarele tehnici: ștanțare din foi metalice, tăiere cu laser și descărcare electrică prin fir (EDM).

5.6. Avantajele invenției

Principalele avantaje ale mecanismului de prindere temporară conform invenției sunt următoarele:

- are un design robust și simplu;
- este ușor de fixat ferm și precis în poziția predeterminată, ușor de montat pe cadrul ușii folosind balamalele existente și de demontat, precum și ușor de adaptat la configurațiile existente ale balamalelor;
- menține același cuplu pentru un număr predeterminat de cicluri de deschidere-închidere;
- permite un număr predeterminat de cicluri de fixare și eliberare a ușii;
- este utilizabil pentru un număr predefinit de cicluri de deschidere-închidere a ușii;
- permite utilizarea facilă atât de către un operator uman, cât și de către roboți;
- asigură o interacțiune delicată cu suprafețele cadrului ușii și ale ușii în sine; nu este necesară revopsirea sau repararea cadrului sau a ușii după îndepărtarea opritorului temporar.

5.7. Descriere succintă a desenelor

Figura 5.4 reprezintă o vedere în perspectivă a unei prime soluții tehnice a mecanismului de prindere temporară în poziție deschisă.

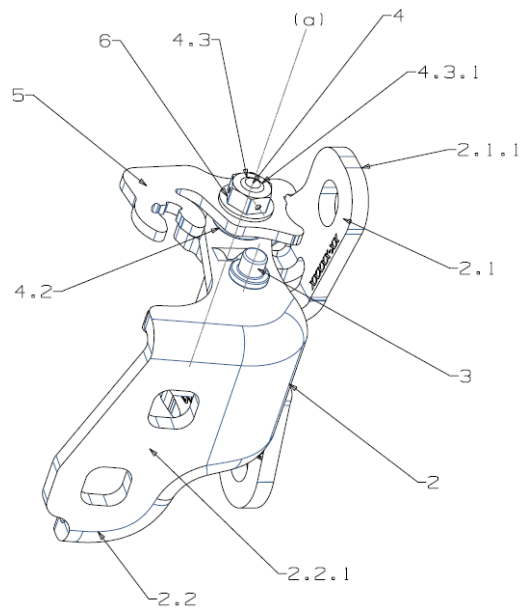
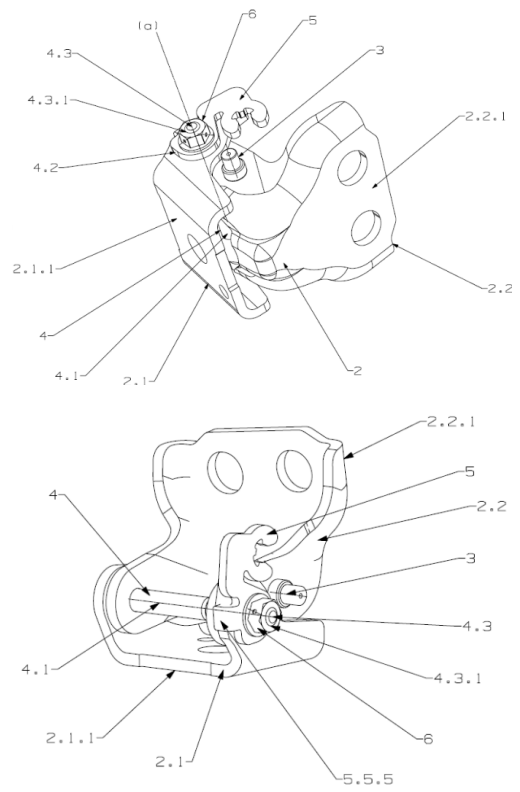


Figura 5.4. Soluția tehnică 1 a piesei de fixare

Figura 5.5a și Figura 5.5b reprezintă o vedere în perspectivă a unei a doua soluții tehnice a mecanismului de prindere temporară 1 în poziție deschisă. Figura 5.5c reprezintă o vedere în perspectivă a unei balamale 2 corespunzătoare celei de-a doua soluții tehnice a invenției.



a)

b)

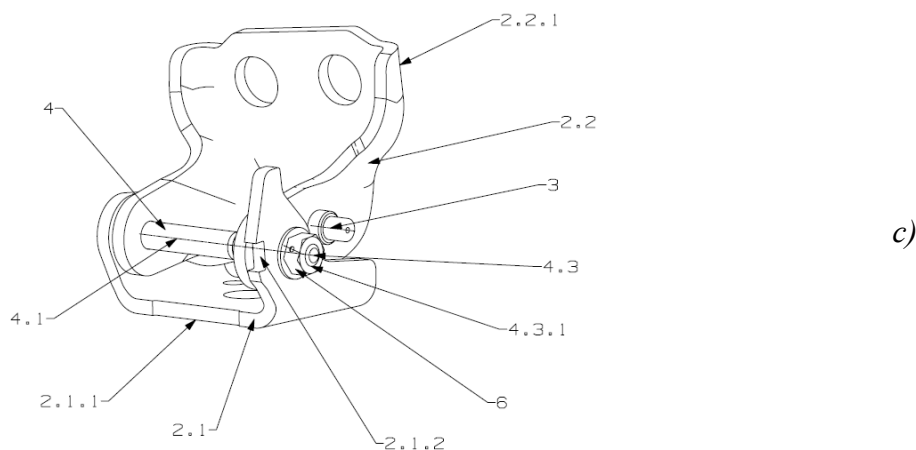


Figura 5.5. Soluția tehnică 2 a ansamblului balama: *a)* vedere poziție montaj; *b)* vedere 3D
c) detaliu fabricare balama

5.8. Simularea numerica a piesei opritor

Cercetări preliminare au condus la forma actuală a piesei. Au fost realizate modele numerice ale reperului pentru evaluare performanțelor structurale. În Figura 5.10*a)* este prezentat ansamblu articulației de tip balama ușa. În Figura 5.10*b)* sunt prezentate elemente selectate pentru realizare modelului numeric.

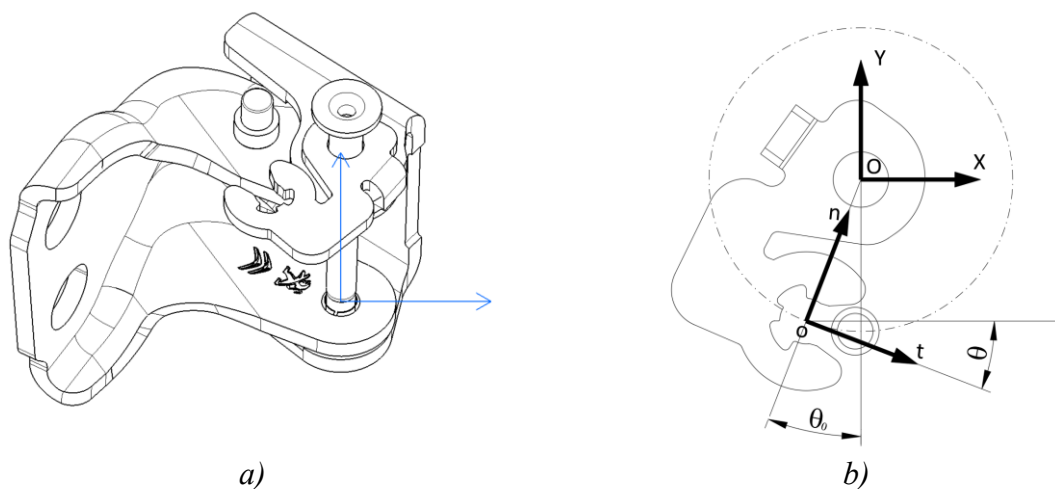


Figura 5.10. Modelul geometric: *a)* ansamblul articulație; *b)* opritor temporar

5.9 Validarea experimentală

Procesul de validare a fost complex și a constat în evaluarea individuală a componentelor și realizarea unor instalații experimentale complexe.

Mașina universală de încercare permite realizarea unor cicluri programate. Înregistrarea video a experimentului a fost corelată cu datele înregistrate de mașina de încercare.

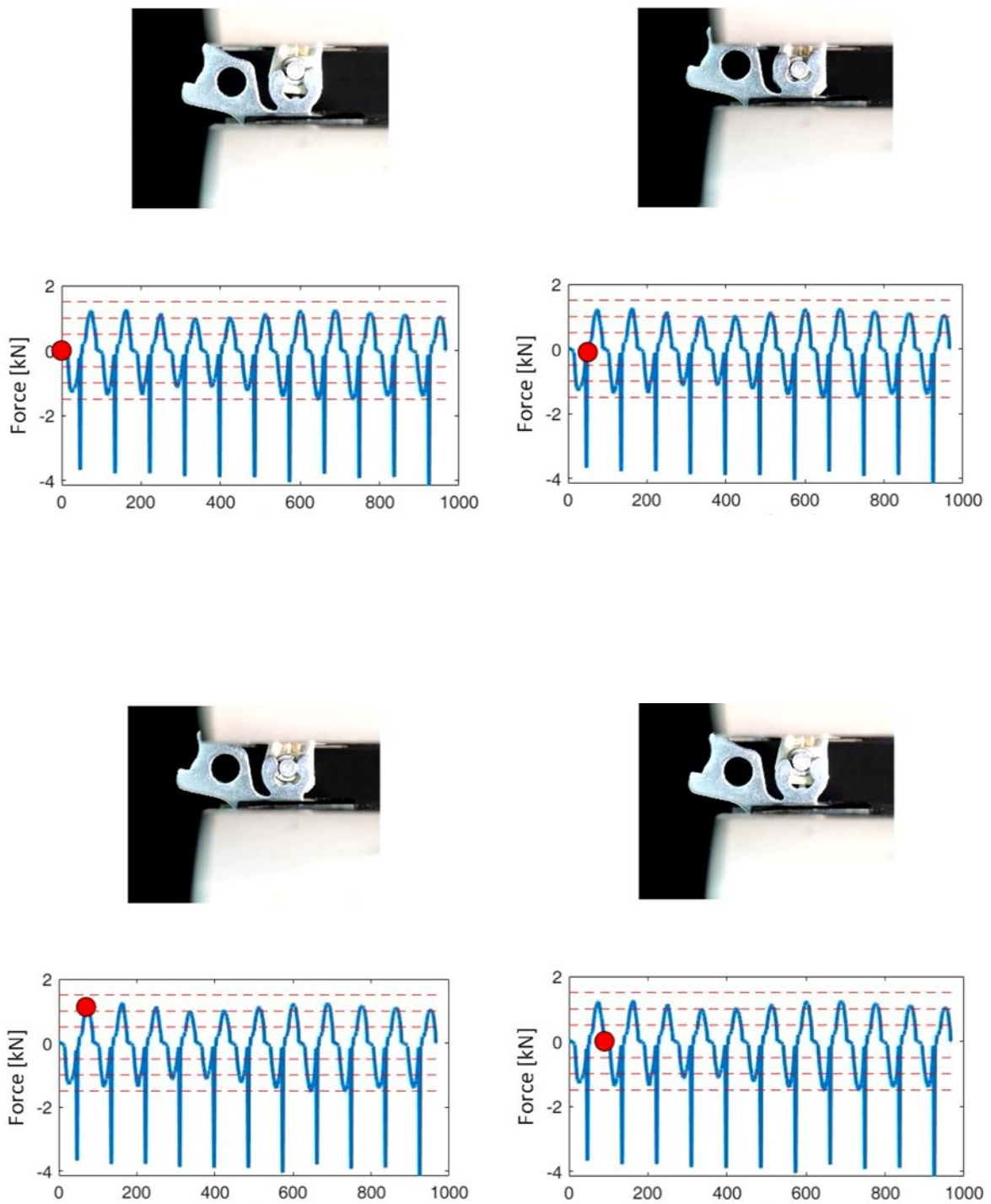


Figura 5.19. Cercetare experimentală a piesei

5.10. Concluzii

În cadrul acestui capitol sunt prezentate informațiile complete legate de protejarea drepturilor de proprietate intelectuală prin întocmirea și depunerea unui Brevet de Invenție European. În acest sens au fost parcurse următoarele etape:

- A fost identificat stadiul actual al cunoașterii prin cercetarea soluțiilor similare în baze de date specializate;

- În baza analizei au fost identificate și detaliate dezavantajele soluțiilor tehnice existente și a fost definit scopul invenției și problema pe care aceasta o rezolvă;
- A fost prezentat rezumatul invenției împreună cu metodele de producere și metoda de utilizare
- Au fost prezentate avantajele invenției față de soluțiile similare
- Au fost descrise desenele și schițele folosite precum și elementele principale și complementare ale soluției tehnice
- A fost realizată simularea numerică a piesei opritor:
 - sunt prezentate metodele elaborate pentru realizarea modelului numeric;
 - sunt prezentate metodele elaborate pentru realizarea modelului teoretic;
 - sunt corelate rezultatele obținute numeric cu cele obținute prin analiza teoretică
- A fost realizată validarea experimentală :
 - sunt prezentate metodele și mijloacele folosite la validarea experimentală
 - sunt prezentate rezultatele valorilor obținute și corelarea acestora cu specificația tehnică.

Capitolul VI – Concluzii

6.1. Concluzii generale

Teza de doctorat „Manual de bune practici în proiectarea pieselor metalice” a avut ca obiectiv principal însușirea studiilor teoretice, înțelegerea studiilor experimentale și colectarea și sintetizarea acestora. Astfel, plecând de la un produs ce trebuie să îndeplinească o anumită funcțiune, având în vedere cerințele client aplicabile respectivului produs dar și normativele și reglementările în vigoare, au fost determinate și analizate metodele de fabricație, tipurile de materiale utilizate, metodele de verificare a dezvoltării de produs și au fost realizate încercări experimentale în vederea validării metodelor numerice descrise.

Concluziile cercetărilor prezentate în această lucrare sugerează faptul că, plecând de la o clasă de produse cu funcțiuni similare, analizând modul în care acestea au fost dezvoltate și soluțiile alese pentru subcomponente, procesul de realizare și materialele utilizate, se pot identifica etapele critice din procesul de dezvoltare a pieselor metalice (proiectare, alegerea materialelor, analiza cu element finit, tehnologii de prelucrare, asigurarea calității, testare) și pot fi generate bune practici pentru fiecare etapă cu accent pe eficiență, reducerea numărului de iterații, minimizarea riscurilor tehnologice și reducerea costurilor. Procesul de proiectare este susținut prin utilizarea unei colecții de fișe aferente diverselor clase de produse cu materiale utilizate în comun și tipuri de procese de folosit pentru fiecare component în parte.

O sarcină continuă în procesul industrial o reprezintă protejarea proprietății intelectuale prin brevetarea soluțiilor tehnice ale anumitor piese. În lucrare este prezentat în detaliu modul de întocmire a unui Brevet European de Invenție.

6.2. Contribuții personale

În cadrul cercetărilor teoretice și experimentale desfășurate pe parcursul conceperii și realizării prezentei lucrări, au fost aduse și o serie de contribuții personale ale autorului, din care se menționează:

- studiul contextului industrial actual,
- studiul provocărilor curente din domeniul dezvoltării pieselor metalice
- studiul lucrărilor existente în domeniul proceselor de fabricație;
- studiul cerințelor reglementărilor europene (în special al regulamentului UN-ECE R011-3 privind articulațiile și încuietorile precum și UN-ECE R127-4 privind siguranța pietonilor);
- centralizarea și sistematizarea informațiilor relevante prin realizarea diagramelor tip cu datele de intrare, datele de ieșire, metodele și mijloacele de realizare precum și indicatorii de performanță pentru procesul de dezvoltare de produs;
- studiul specificațiilor tehnice și a evoluției cerințelor acestora pentru încuietorile de capotă față respectiv articulațiile de capotă față, incluzând aici studiile de caz specifice și metodele de validare utilizate pentru cele două clase de produse, realizarea comparațiilor și elaborarea de concluzii;

- elaborarea modelelor numerice pentru ansamblul articulație de capotă și încuietoare, validarea acestora prin metode bazate pe analizele cu elemente finite;
- cercetarea tehnică și funcțională a unui ansamblu mecanic de tip articulație de capotă, parcurgând etapele de definire a rolului și funcțiilor sistemului, realizarea modelului geometric și a iterațiilor necesare plecând de la specificațiile client, alegerea și validarea materialelor;
- cercetarea experimentală a materialelor folosind epruvete create conform standard ASTM E8/E8M orientate în mod orizontal, vertical și cu o înclinație la 45° precum și corelarea rezultatelor cu cele obținute în validarea numerică a modului de material;
- proiectarea numerică a procesului de fabricație al componentelor metalice ale articulației de capotă față;
- simularea numerică a respectivului proces de fabricație prin realizarea modelului numeric al procesului tehnologic pentru fiecare operație în parte, analiza structurală a modelului numeric și compararea rezultatelor cu rezultatele experimentale;
- realizarea unui set reprezentativ care conține 35 de fișe de produs cu informații legate de materialele utilizate, tipul și numărul de operații precum și modificările aduse în fazele de dezvoltare de produs și cele ulterioare;
- prezentarea metodei de întocmire a unui brevet european cu toate etapele necesare, plecând de la stadiul actual al cunoașterii și dezavantajelor soluțiilor curente, întocmirea rezumatului invenției, al metodelor de utilizare și de producere precum și al studiilor, simulărilor numerice și validării experimentale a piesei definită prin brevet.

La data de 17.06.2025 Oficiul European pentru Brevete a emis intenția de acordare a acestui brevet european pentru care autorul lucrării este declarat ca inventator principal;

6.3 Perspective de cercetare

Prin realizarea prezentei lucrări de doctorat, autorul a încercat să își aducă contribuția la realizarea unui set structurat de recomandări, metodologii și proceduri standardizate, menite să sprijine procesele de proiectare, fabricație și control. Lucrarea a vizat integrarea proceselor moderne de inginerie, ergonomie industrială, sustenabilitate și asigurarea calității în cadrul ciclului de viață al produsului metalic. Accentul a fost pus pe dezvoltarea unor practici reproductibile și eficiente, capabile să asigure performanța tehnică, fiabilitatea și competitivitatea produselor, stabilind următoarele direcții care sunt considerate a fi de perspectivă:

- studiul similar al etapelor de dezvoltare și proceselor de fabricație pentru alte clase și tipuri de piese metalice;
- extinderea manualului către alte industrii (aeronautică, feroviară, energie), prin transferul de bune practici interdisciplinare;
- dezvoltarea de soluții sustenabile prin cercetarea utilizării materialelor reciclate și a proceselor cu amprentă redusă de carbon;
- testarea avansată prin digital twin, simularea având rolul de a reduce numărul de teste fizice realizate, eficientizând astfel costurile de validare;

- integrarea fabricației aditive metalice, explorarea aplicațiilor imprimării 3D pentru piese structurale și de siguranță;
- extinderea bazei de date a manualului cu studii de caz suplimentare, pentru a deveni standard de referință.

Documentul elaborat va fi integrat în sistemul de calitate al întreprinderii ca parte integrantă a proceselor de analiză a cererilor, proiectare a produselor, realizare, validare și industrializare viață-serie.

6.4 Lucrări științifice publicate

M. Stirosu, A. Badea, A.I. Sandu, S. Tabacu, *Development of a coupled process – design numerical model for an automotive assembly*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1311, The 32nd International Congress of SIAR of Automotive and Transport Engineering Timisoara, Romania 2022

M. Stirosu, S. Tabacu, *Experimental and numerical analysis and validation of S460 Steel*, Buletin științific - Universitatea din Pitești. Seria Autovehicule rutiere, vol. 34, 2024

M. Stirosu, S. Tabacu, *From conventional hinges to passive safety: how evolving passenger car requirements shape hood-opening mechanism design*, SIAR Magazine „Ingineria Automobilului” – ISSN 1842-4074, Decembrie 2025

M. Stirosu, S. Tabacu, N. Dinu, C. Inal, *Temporary clamping mechanism – European Patent Application EP 4 155 494 A 1*, European Patent Office, 2025

M. Stirosu, S. Tabacu, *An experimental investigation of a Mechanical System of the Hood Hinge Type*, The 35th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering, AMMA 2025, Cluj-Napoca, Romania, 2025

I.A. Aparaschivei, A. G. Badea, **M. Stirosu**, S. Tabacu, *Optimal manufacturing process and parameters using AM*, The 35th SIAR International Congress of Automotive and Transport Engineering, AMMA 2025, Cluj-Napoca, Romania, 2025

Bibliografie

- [1] OICA, <https://www.oica.net/category/production-statistics/2019-statistics/> (2021).
<https://www.oica.net/category/production-statistics/2019-statistics/> (accessed September 18, 2021).
- [2] A. Giampieri, J. Ling-Chin, Z. Ma, A. Smallbone, A.P. Roskilly, A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective, *Appl Energy* 261 (2020) 114074. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114074>.
- [3] O. Bongomin, M.C. Mwape, N.S. Mpofo, B.K. Bahunde, R. Kidega, I.L. Mpungu, G. Tumusiime, C.A. Owino, Y.M. Goussongtogue, A. Yemane, P. Kyokunzire, C. Malanda, J. Komakech, D. Tigalana, O. Gumisiriza, G. Ngulube, Digital twin technology advancing industry 4.0 and industry 5.0 across sectors, *Results in Engineering* 26 (2025) 105583. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105583>.
- [4] J. Dalzochio, R. Kunst, E. Pignaton, A. Binotto, S. Sanyal, J. Favilla, J. Barbosa, Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges, *Comput Ind* 123 (2020) 103298. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103298>.
- [5] S. D'Avella, C.A. Avizzano, P. Tripicchio, ROS-Industrial based robotic cell for Industry 4.0: Eye-in-hand stereo camera and visual servoing for flexible, fast, and accurate picking and hooking in the production line, *Robot Comput Integr Manuf* 80 (2023) 102453. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102453>.
- [6] N. Zhao, M. Parthasarathy, S. Patil, D. Coates, K. Myers, H. Zhu, W. Li, Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications, *J Manuf Syst* 68 (2023) 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.04.008>.
- [7] W.D. Hartley, D. Garcia, J.K. Yoder, E. Poczatek, J.H. Forsmark, S.G. Luckey, D.A. Dillard, H.Z. Yu, Solid-state cladding on thin automotive sheet metals enabled by additive friction stir deposition, *J Mater Process Technol* 291 (2021) 117045. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117045>.
- [8] A.E. Marques, T.G. Parreira, A.F.G. Pereira, B.M. Ribeiro, P.A. Prates, Machine learning applications in sheet metal constitutive Modelling: A review, *Int J Solids Struct* 303 (2024) 113024. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.113024>.
- [9] H.-T. Thai, Machine learning for structural engineering: A state-of-the-art review, *Structures* 38 (2022) 448–491. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.003>.
- [10] M. Iglesias-Émbil, A. Ortego, A. Valero, G. Villalba, Evolution in the content of strategic metals in a passenger car and its implications for the circular economy, *J Clean Prod* 495 (2025) 145048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145048>.

- [11] A.C. Pereira, F. Romero, A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept, *Procedia Manuf* 13 (2017) 1206–1214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>.
- [12] S. Chen, E. Turanoglu Bekar, J. Bokrantz, A. Skoogh, AI-enhanced digital twins in maintenance: Systematic review, industrial challenges, and bridging research–practice gaps, *J Manuf Syst* 82 (2025) 678–699. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.07.006>.
- [13] H. Elmousalami, M. Maxy, F.K.P. Hui, L. Aye, AI in automated sustainable construction engineering management, *Autom Constr* 175 (2025) 106202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106202>.
- [14] M. Madanchian, H. Taherdoost, AI-Powered Innovations in High-Tech Research and Development: From Theory to Practice, *Computers, Materials and Continua* 81 (2024) 2133–2159. <https://doi.org/https://doi.org/10.32604/cmc.2024.057094>.
- [15] S. Le Clainche, E. Ferrer, S. Gibson, E. Cross, A. Parente, R. Vinuesa, Improving aircraft performance using machine learning: A review, *Aerosp Sci Technol* 138 (2023) 108354. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108354>.
- [16] Climatewatchdata.org, www.climatewatchdata.org, (2022). https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=gas&end_year=2019§ors=total-including-lucf&start_year=1990.
- [17] E. Armentani, V. Giannella, A. Parente, M. Pirelli, Design for NVH: Topology optimization of an engine bracket support, *Procedia Structural Integrity* 26 (2020) 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.024>.
- [18] R.F. Gibson, Modal vibration response measurements for characterization of composite materials and structures, *Compos Sci Technol* 60 (2000) 2769–2780. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00092-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00092-0).
- [19] A. Pavlović, D. Sintoni, G. Minak, C. Fragassa, On the modal behaviour of ultralight composite sandwich automotive panels, *Compos Struct* 248 (2020) 112523. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112523>.
- [20] W. Zhang, J. Xu, Advanced lightweight materials for Automobiles: A review, *Mater Des* 221 (2022) 110994. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>.
- [21] Y. Li, Z. Lin, A. Jiang, G. Chen, Use of high strength steel sheet for lightweight and crashworthy car body, *Mater Des* 24 (2003) 177–182. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00021-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00021-9).
- [22] X. Wang, B. Zhuang, D. Smyl, H. Zhou, M.Z. Naser, Machine learning for design, optimization and assessment of steel-concrete composite structures: A review, *Eng Struct* 328 (2025) 119652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119652>.

- [23] M. Grujicic, V. Sellappan, S. Kotrika, G. Arakere, A. Obieglo, M. Erdmann, J. Holzleitner, Suitability analysis of a polymer–metal hybrid technology based on high-strength steels and direct polymer-to-metal adhesion for use in load-bearing automotive body-in-white applications, *J Mater Process Technol* 209 (2009) 1877–1890. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.050>.
- [24] G. Sun, D. Chen, G. Zhu, Q. Li, Lightweight hybrid materials and structures for energy absorption: A state-of-the-art review and outlook, *Thin-Walled Structures* 172 (2022) 108760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108760>.
- [25] R. Radhakrishnan, A. Amsalu, M. Kamran, B.O. Nnaji, Design rule checker for sheet metal components using medial axis transformation and geometric reasoning, *J Manuf Syst* 15 (1996) 179–189. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(96\)89570-7](https://doi.org/10.1016/0278-6125(96)89570-7).
- [26] Y. Liu, X. Peng, Y. Qin, FE simulation for concurrent design and manufacture of automotive sheet-metal parts, *J Mater Process Technol* 150 (2004) 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.050>.
- [27] M.P. Pereira, B.F. Rolfe, Temperature conditions during “cold” sheet metal stamping, *J Mater Process Technol* 214 (2014) 1749–1758. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.020>.
- [28] W. Liao, X. Lu, Y. Fei, Y. Gu, Y. Huang, Generative AI design for building structures, *Autom Constr* 157 (2024) 105187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105187>.
- [29] R.-Y. Tang, R. Ding, J.-S. Fan, Machine learning-based investigation on the relation between the design parameters and impact behaviour of SSC structures, *Eng Struct* 337 (2025) 120552. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120552>.
- [30] X. He, T. Welo, J. Ma, In-process monitoring strategies and methods in metal forming: A selective review, *J Manuf Process* 138 (2025) 100–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.011>.
- [31] Z. Gronostajski, Z. Pater, L. Madej, A. Gontarz, L. Lisiecki, A. Łukaszek-Sołek, J. Łuksza, S. Mróz, Z. Muskalski, W. Muzykiewicz, M. Pietrzyk, R.E. Śliwa, J. Tomczak, S. Wiewiórowska, G. Winiarski, J. Zasadziński, S. Ziółkiewicz, Recent development trends in metal forming, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19 (2019) 898–941. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.04.005>.
- [32] Y. Lin, W. Qian, L. Lei, Y. Liu, J. Zhang, J. Liu, W. Kong, Y. Hu, Y. Shi, Z. Wu, H. Liu, S. Wu, Structural integrity issues of composite materials and structures in future transportation equipment, *Compos Struct* 358 (2025) 118943. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118943>.
- [33] M. Stirosu, S. Tabacu, From conventional hinges to passive safety: how evolving passenger car requirements shape hood-opening mechanism design, *Ingineria Automobilului* (2025).

- [34] J.G. Thacker, S.W. Reagan, J.A. Pellettiere, W.D. Pilkey, J.R. Crandall, E.M. Sieveka, Experiences during development of a dynamic crash response automobile model, *Finite Elements in Analysis and Design* 30 (1998) 279–295. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(98\)00043-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-874X(98)00043-2).
- [35] X. Lv, Z. Xiao, J. Fang, Q. Li, F. Lei, G. Sun, On safety design of vehicle for protection of vulnerable road users: A review, *Thin-Walled Structures* 182 (2023) 109990. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109990>.
- [36] A. Torkestani, M. Sadighi, R. Hedayati, Effect of material type, stacking sequence and impact location on the pedestrian head injury in collisions, *Thin-Walled Structures* 97 (2015) 130–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.09.015>.
- [37] I.T. Teke, A.H. Ertas, Fatigue Resistance in Engineering Components: A Comprehensive Review on the Role of Geometry and Its Optimization, *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences* 144 (2025) 201–237. <https://doi.org/https://doi.org/10.32604/cmes.2025.066644>.
- [38] D. Li, J. Tian, S. Shi, S. Wang, J. Deng, S. He, Lightweight Design of Commercial Vehicle Cab Based on Fatigue Durability, *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences* 136 (2023) 421–445. <https://doi.org/https://doi.org/10.32604/cmes.2023.024133>.
- [39] S. Yin, H. Chen, Y. Wu, Y. Li, J. Xu, Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood, *Compos Struct* 201 (2018) 131–140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.038>.
- [40] D.-H. Kim, K.-H. Jung, D.-J. Kim, S.-H. Park, D.-H. Kim, J. Lim, B.-G. Nam, H.-S. Kim, Improving pedestrian safety via the optimization of composite hood structures for automobiles based on the equivalent static load method, *Compos Struct* 176 (2017) 780–789. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.016>.
- [41] M.H. Shojaeefard, A. Najibi, M. Rahmati Ahmadabadi, Pedestrian safety investigation of the new inner structure of the hood to mitigate the impact injury of the head, *Thin-Walled Structures* 77 (2014) 77–85. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.11.003>.
- [42] Z. Zhang, Y. Gu, H. Wu, Q. Chen, Investigation on the energy absorption characteristics of novel graded auxetic re-entrant honeycombs, *Compos Struct* 352 (2025) 118633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118633>.
- [43] F. Khan, N. Hossain, J.J. Mim, S.M.M. Rahman, Md.J. Iqbal, M. Billah, M.A. Chowdhury, Advances of composite materials in automobile applications – A review, *Journal of Engineering Research* 13 (2025) 1001–1023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>.
- [44] E. Armentani, M. Perrella, M. Cepollaro, F. Cepollaro, G. D’Errico, V. Giannella, Numerical-experimental study on the crashworthiness of a windshield A-pillar, *Forces in Mechanics* 15 (2024) 100273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.finmec.2024.100273>.

- [45] B. Golanbari, A. Mardani, N. Farhadi, G. Reina, Machine learning applications in off-road vehicles interaction with terrain: An overview, *J Terramech* 116 (2024) 101003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jterra.2024.101003>.
- [46] R. Yao, T. Pang, B. Zhang, J. Fang, Q. Li, G. Sun, On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials: State of the art and prospects, *Thin-Walled Structures* 189 (2023) 110734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110734>.
- [47] A. Baroutaji, M. Sajjia, A.-G. Olabi, On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, *Thin-Walled Structures* 118 (2017) 137–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018>.
- [48] Z. Cao, L. Zhan, B. Ma, S. Li, M. Xie, J. Guo, The key technologies for fiber-reinforced polymer composites manufacturing: A state-of-the-art review, *Thin-Walled Structures* 217 (2025) 113773. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113773>.
- [49] V. Rangasamy, J.-B. Yang, AI-driven generative design and optimization in prefabricated construction, *Autom Constr* 177 (2025) 106350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106350>.
- [50] S. Boria, S. Pettinari, Mathematical design of electric vehicle impact attenuators: Metallic vs composite material, *Compos Struct* 115 (2014) 51–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.04.010>.
- [51] X. Zhang, X. Jin, Y. Li, G. Li, Improved design of the main energy-absorbing automotive parts based on traffic accident analysis, *Mater Des* 29 (2008) 403–410. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.022>.
- [52] S. Boria, S. Pettinari, F. Giannoni, G. Cosimi, Analytical and numerical analysis of composite impact attenuators, *Compos Struct* 156 (2016) 348–355. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.032>.
- [53] C. You, Y. Cai, W. Wu, H. Zhang, X. Gao, Y. Song, Applications of Machine Learning in Structural Analysis and Design of Aerospace Composite Materials, *Thin-Walled Structures* (2025) 113914. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113914>.
- [54] B. Liu, J. Yang, X. Zhang, Q. Yang, J. Zhang, X. Li, Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs: A review, *Journal of Magnesium and Alloys* 11 (2023) 15–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.12.015>.
- [55] S. Douimia, A. Bekrar, A. Ait El Cadi, Y. El Hillali, D. Fillon, Machine learning and deep learning applications in the automotive manufacturing industry: A systematic literature review and industry insights, *Robot Comput Integr Manuf* 96 (2025) 103034. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103034>.
- [56] A. Sadat Mirhakimi, D. Dubey, M.A. Elbestawi, Laser powder bed fusion of bio-inspired metamaterials for energy absorption applications: A review, *Journal of*

- Materials Research and Technology 31 (2024) 2126–2155.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.234>.
- [57] K.P. Logakannan, J. Rengaswamy, S. Kumar, V. Ramachandran, D. Ruan, Mechanical response of a novel hybrid tube composed of an auxetic outer layer, *Thin-Walled Structures* 171 (2022) 108649.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108649>.
- [58] M. Dalle Mura, G. Dini, An augmented reality approach for supporting panel alignment in car body assembly, *J Manuf Syst* 59 (2021) 251–260.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.004>.
- [59] A. Mohammadi Niaei, F. Mashiri, O. Mirza, M. Hosseini, Review on the static, low-cycle and high-cycle fatigue behaviour of shear connectors in sustainable steel-concrete composite structures: experimental studies, *Structures* 78 (2025) 109188.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109188>.
- [60] Y. Liu, X. Peng, Y. Qin, FE simulation for concurrent design and manufacture of automotive sheet-metal parts, *J Mater Process Technol* 150 (2004) 145–150.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.050>.
- [61] M.H. Parsa, S. Nasher al ahkami, H. Pishbin, M. Kazemi, Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming, *Mater Des* 41 (2012) 326–337.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.009>.
- [62] N. Narasimhan, M. Lovell, Predicting springback in sheet metal forming: an explicit to implicit sequential solution procedure, *Finite Elements in Analysis and Design* 33 (1999) 29–42. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(99\)00009-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-874X(99)00009-8).
- [63] U.S. Dixit, S.N. Joshi, J.P. Davim, Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review, *Mater Des* 32 (2011) 3655–3670.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.049>.
- [64] S. Walzer, M. Liewald, Novel approach to decrease sheet thinning during sheet metal forming by using embossing technique, *Procedia Manuf* 50 (2020) 795–799.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.143>.
- [65] T. Liu, P. Zheng, J. Bao, Deep learning-based welding image recognition: A comprehensive review, *J Manuf Syst* 68 (2023) 601–625.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.026>.
- [66] D. Leonetti, H. Baarssen, G.P. Pucillo, B.H.H. Snijder, Measurement of crack paths using digital image correlation, *Eng Fract Mech* 327 (2025) 111391.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111391>.
- [67] J.-A. Almazán-Lázaro, E. López-Alba, F.-A. Díaz-Garrido, Indentation measurement of thin plates using 3D digital image correlation and experimental validation, *Results in Engineering* 25 (2025) 104246.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104246>.

- [68] D. Li, B. Cheng, L. Shi, E. Zhang, Q. Zhao, Propagation measurement for visually thin fatigue crack using homography mapping error and digital image correlation, *Mech Syst Signal Process* 220 (2024) 111628. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111628>.
- [69] J. Pan, C. Song, Prediction of fracture toughness using small specimens based on machine learning, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 132 (2024) 104493. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104493>.
- [70] H.A. Rahman, J.A. Ghani, M.R.M. Rasani, W.Mohd.F. Wan Mahmood, S. Yaaqob, M.S.A. Aziz, Application of finite element analysis and computational fluid dynamics in machining AISI 4340 steel, *Tribol Int* 207 (2025) 110616. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110616>.
- [71] W. Rust, K. Schweizerhof, Finite element limit load analysis of thin-walled structures by ANSYS (implicit), LS-DYNA (explicit) and in combination, *Thin-Walled Structures* 41 (2003) 227–244. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(02\)00089-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-8231(02)00089-7).
- [72] A. Arriaga, R. Pagaldai, A.M. Zaldua, A. Chrysostomou, M. O'Brien, Impact testing and simulation of a polypropylene component. Correlation with strain rate sensitive constitutive models in ANSYS and LS-DYNA., *Polym Test* 29 (2010) 170–180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.10.007>.
- [73] M. Vormwald, Fatigue of Constructional Steel S460 under Complex Cyclic Stress and Strain Sequences, *Procedia Eng* 10 (2011) 270–275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.047>.
- [74] N. Kotkunde, A.D. Deole, A.K. Gupta, Prediction of Forming Limit Diagram for Ti-6Al-4V Alloy Using Artificial Neural Network, *Procedia Materials Science* 6 (2014) 341–346. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.043>.
- [75] S. Lu, X. Zhang, Y. Hu, J. Chu, Q. Kan, G. Kang, Machine learning-based constitutive parameter identification for crystal plasticity models, *Mechanics of Materials* 203 (2025) 105263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2025.105263>.
- [76] B. Starman, T. Pepelnjak, A. Maček, M. Halilović, S. Coppieters, Inverse calibration of out-of-plane shear anisotropy parameters of sheet metal, *Int J Solids Struct* 313 (2025) 113313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2025.113313>.
- [77] I.-I. Ailinei, S.-V. Galatanu, L. Marsavina, Influence of anisotropy on the cold bending of S600MC sheet metal, *Eng Fail Anal* 137 (2022) 106206. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106206>.
- [78] H.Y. Miao, S. Larose, C. Perron, M. Lévesque, Numerical simulation of the stress peen forming process and experimental validation, *Advances in Engineering Software* 42 (2011) 963–975. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.05.025>.

- [79] R. Porcaro, A.G. Hanssen, M. Langseth, A. Aalberg, Self-piercing riveting process: An experimental and numerical investigation, *J Mater Process Technol* 171 (2006) 10–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.048>.
- [80] C. Cong, W. Zhu, J. Liu, X. Wei, A review on the analytical and numerical models for ballistic limit of fiber-reinforced composites, *Compos Struct* 345 (2024) 118392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118392>.
- [81] L. Chen, B. Zhu, Z. Wu, B. Hu, Y. Li, Y. Guo, Deformation and failure behavior of 2024-T42 sheet under impact loading, *Thin-Walled Structures* 203 (2024) 112230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112230>.
- [82] Z. Kazancı, K.-J. Bathe, Crushing and crashing of tubes with implicit time integration, *Int J Impact Eng* 42 (2012) 80–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.10.003>.
- [83] H. Hu, Z. Zhong, Explicit–Implicit Co-Simulation Techniques for Dynamic Responses of a Passenger Car on Arbitrary Road Surfaces, *Engineering* 5 (2019) 1171–1178. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.09.003>.
- [84] M. Stirosu, S. Tabacu, N. Dinu, C. Inal, Temporary clamping mechanism for maintaining e.g. car door, open in fixed position, has temporary stopper placed in plane perpendicularly to hinge shaft and perpendicular to mobile hinge element surface, 2023.