

UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică

Departamentul de Rezistența Materialelor



REZUMAT
TEZĂ DE DOCTORAT

Studiul teoretic și experimental privind tranziția palei anticuplu a elicopterului IAR330 către o configurație constructivă compozită

Experimental and theoretical study of the transition towards a composite configuration for the IAR330 tail rotor blade

Autor: ing. Andrei-Daniel VOICU

Conducător științific: Prof. dr. ing. Anton HADĂR

București
2022

Cuvinte cheie: materiale compozite ranforsate cu fibre, fabricația manuală a materialelor compozite, fabricație aditivă, extrudare termoplastică, structură fagure, pală anticuplu, încercare la tracțiune, încercare la compresiune, încercare la încovoiere, analize cu metoda elementelor finite, validarea numerică a modelului cu elemente finite, tunel aerodinamic, încărcare aerodinamică.

Cuprins

INTRODUCERE	5
ACTUALITATEA SUBIECTULUI TEZEI	5
IMPORTANȚA SUBIECTULUI TEZEI.....	6
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR.....	7
1.1 Materiale compozite. Clasificare, evoluție și caracteristici principale	7
1.2 Metode de fabricație a palelor din materiale compozite și deteriorările acestora	11
1.3 Soluții constructive existente și aplicabilitatea acestora pentru realizarea palelor anticuplu	12
1.4 Utilizarea fabricației aditive în domeniul aerospațial	14
1.5 Concluzii.....	15
2. OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI	16
2.1 OBIECTIVELE TEZEI	16
2.2 ORGANIZAREA TEZEI	16
3. CAPITOLUL 3 – EVALUAREA PERFORMANȚELOR PALEI ANTICUPLU DE CONSTRUCȚIE METALICĂ	18
3.1 Caracteristici tehnico-tactice ale elicopterului IAR330. Principii de funcționare	18
3.2 Determinarea presiunilor exercitate de curentul de aer pe suprafețele palei, în funcție de incidența acesteia, folosind programul Fluent	19
3.3 Analiza statică a palei rotorului anticuplu	22
3.4 Concluzii.....	23
4. VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A ÎNCĂRCĂRILOR AERODINAMICE FOLOSIND TUNELUL AERODINAMIC.....	25
4.1 Principalele forțe care acționează asupra palei anticuplu în funcție de tipul zborului executat de către elicopter	25
4.2 Principalele regimuri de zbor ale elicopterului.....	26
4.3 Modele de curgere utilizate pentru determinarea distribuției de presiuni. Studiul curgerii bidimensionale	27
4.4 Validarea experimentală a încărcărilor aerodinamice din modulul Fluent.....	28
4.5 Compararea rezultatelor obținute experimental cu rezultatele determinate folosind programul Fluent Flow	31
4.6 Concluzii.....	32

5. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ȘI ELASTICE ALE MATERIALELOR CARE COMPUN PALA ANTICUPLU COMPOZITĂ	33
5.1 Stabilirea soluției constructive și a materialelor de fabricație	33
5.2 Determinarea caracteristicilor mecanice și elastice ale miezului de tip fagure realizat prin extrudare termoplastică, solicitat la întindere și compresiune	34
5.3 Determinarea caracteristicilor de material pentru lonjeronul de rezistență al palei ..	39
5.4 Determinarea caracteristicilor de material pentru invelișul palei anticuplu	39
5.5 Concluzii.....	43
6. Modelarea și analiza cu elemente finite a încercărilor mecanice de material. Validarea rezultatelor numerice pe baza datelor experimentale.	45
6.1 Analiza cu elemente finite a solicitării la compresiune	45
6.2 Analiza cu elemente finite a încercării la tracțiune	46
6.3 Analiza cu elemente finite a încercării la încovoiere.....	48
6.4 Concluzii.....	49
7. Fabricația și încercarea experimentală a palei anticuplu din materiale compozite. Validarea analizelor numerice specifice	50
7.1 Tehnologia de realizare a palei compozite și caracteristicile acesteia.....	50
7.2 Încercarea palei la încovoiere cu forță aplicată la extremitatea liberă. Instrumentare și mod de realizare.....	52
7.3 Analiza comparativă a performanțelor palei încărcate aerodinamic, în funcție de materialul utilizat pentru fabricație.....	53
7.4 Concluzii.....	54
8. Concluzii finale. Contribuții și perspective.....	56
8.1 Considerații.....	56
8.2 Concluzii finale.....	56
8.3 Contribuții și perspective.....	58
BIBLIOGRAFIE	60

INTRODUCERE

ACTUALITATEA SUBIECTULUI TEZEI

În contextul evolutiv al omenirii, progresul tehnologic a constituit motorul de propulsie principal pentru dezvoltarea economică și industrială mondială. Acest progres a fost strâns legat, în special de proximitatea revoluției industriale din secolele XVIII-XIX, de cunoașterea pe de o parte a proprietățile mecanice ale materialelor și pe de altă parte de stabilirea unor relații matematice referitoare la rezistența materialelor. Primele bariere în acest domeniu au fost depășite de personalități de renume din matematică, precum Robert Hooke, Euler, Coulomb și Navier [1], care au clădit treptat drumul către înființarea Institutului Politehnic din Paris în secolul al XVIII-lea, unde au studiat și s-au format numeroase generații de ingineri și de matematicieni de prestigiu.

Materialele compozite reprezintă o categorie distinctă de materiale, care a fost utilizată până și de civilizațiile antice, precum egiptenii, prin combinarea noroiului cu paie, pentru a obține o structură care îmbină proprietățile materialelor constituente. Dezvoltarea și cercetarea mai aprofundată a acestora s-a realizat însă la începutul secolului al XIX-lea, odată cu apariția materialelor plastice, precum poliester, polistirel, vinil, ș.a., reprezentând materiale sintetice cu proprietăți superioare rășinilor obținute din natură. Utilizarea în 1935 de către Owens Corning a fibrei de sticlă pentru a consolida matricea realizată dintr-o rășină sintetică a marcat începutul dezvoltării materialelor compozite plastice ranforsate cu fibre [2]. Din acel moment, materialele compozite au fost subiectul unor studii intense, fiind utilizate împreună cu materialele celulare, precum spumele poliuretanică sau structurile de tip fagure, pentru a forma structurile de tip sandwich, care oferă proprietăți structurale superioare.

Principalele aplicații ale materialelor compozite sunt în cadrul industriilor autovehiculelor, aerospațiale sau navale, datorită rezistenței ridicate pe care o posedă la solicitările din exploatare, oferind în același timp, o scădere considerabilă a masei totale a structurilor.

Fabricația aditivă reprezintă un domeniu în plină dezvoltare, care permite realizarea unor componente cu o geometrie complexă, care nu ar fi putut fi realizate prin mijloacele clasice de fabricație. Diversitatea de tehnologii apărute în acest domeniu permite operațiuni variate, precum realizarea unei prototipări rapide pentru aplicații casnice prin extrudarea termoplastică, denumită din punct de vedere comercial “imprimare 3D”, dar și realizarea unor componente esențiale, precum injectoarele de combustibil din componența motoarelor turboreactoare GE9X ale avioanelor comerciale Boeing 777X [3], fapt care confirmă încrederea acordată acestor tehnologii de fabricație de către industria aerospațială.

Fiecare metodă de fabricație aditivă are propriile avantaje și dezavantaje, în special în ceea ce privește timpul de fabricație, materialele care pot fi utilizate, rezistența finală a structurilor, necesitatea integrării unor suportți temporari de susținere în momentul fabricației și gradul de finisare final al componentelor realizate.

Structurile de tip fagure reprezintă un tip de material celular modern, conceput pentru a satisface cerințele specifice de rezistență și de masă ale beneficiarului. Programele software specializate pentru fabricație aditivă au în componența lor module dedicate, conținând biblioteci de elemente celulare unitare. Astfel, prin intermediul optimizării topologice și a inteligenței artificiale intuitive, în viitorul apropiat vor putea fi fabricate structuri cu geometrii extrem de complexe, imposibil de realizat în prezent.

Actualitatea subiectului tezei constă în combinarea structurilor compozite imprimate 3D, cu avantajele materialelor compozite clasice, ranforsate cu fibre, pentru a dezvolta o pală de rotor anticuplu pentru elicopterul IAR330, superioară celei realizate din aliaj metalic, din punct de vedere al performanțelor.

IMPORTANȚA SUBIECTULUI TEZEI

Creșterea performanțelor elicopterelor IAR330, prin modernizarea anumitor componente, reprezintă un deziderat important al Forțelor Aeriene Române, în contextul geopolitic actual. Elicopterele multirol necesită utilizarea unor tehnologii moderne de fabricație, care să încorporeze materiale performante din punct de vedere al rezistenței la solicitările aerodinamice.

Materialele compozite au devenit în ultimii ani un standard pentru producătorii componentelor din industria aerospațială, fiind demonstrată, atât teoretic, cât și practic, rezistența acestora la condițiile de mediu și la solicitările din timpul zborului aeronavelor. Elicopterele militare sunt nevoite să facă față unor condiții de mediu și unor solicitări mult mai variate comparativ cu aeronavele civile, rezultând astfel necesitatea fabricației acestora din materiale durabile, cu o resursă tehnică practic nelimitată.

Datorită modului de decolare specific al elicopterului, acesta trebuie să își ridice toată masa pentru a se desprinde de sol, de unde rezultă dorința reducerii acesteia. Astfel, conform Airbus, elicopterele au cunoscut un grad foarte ridicat de integrare a materialelor compozite, fiind utilizate în proporție de 80% pentru structura elicopterului Airbus Tiger și de 90% pentru modelul de elicopter NH90. În ceea ce privește avioanele de transport, aproximativ un sfert din structura modelului A380 este realizat din materiale compozite [4]. Astfel, poate fi observată creșterea gradului de adopție al materialelor compozite în rolul de elemente principale de fabricația a structurilor aeronavelor.

În consecință, reducerea masei este un aspect foarte important în fabricația elicopterelor. Suplimentar față de aportul materialelor compozite în această privință, fabricația aditivă a structurii de tip fagure permite utilizarea cât mai eficientă a interiorului structurilor aviatice, astfel încât, să se atingă un raport cât mai bun între rigiditate și masa totală a componentelor fabricate. Utilizarea materialelor compozite laminate ranforsate cu fibre împreună cu materialele termoplastice imprimabile 3D, permite obținerea unor structuri de fabricație hibridă, interesat de studiat în cadrul aplicațiilor aerospațiale.

Utilizarea elementelor celulare cu o geometrie satisfăcătoare, precum celulele cubice, ori cele de tip octaedru, giroid sau diamant, oferă structurii rezistență sporită la solicitările din timpul zborului. Pornind de la un element celular cu o geometrie stabilă, prin intermediul unui program software de optimizare, dimensiunea acesteia poate fi variată în anumite zone din spațiul interior destinat structurii de tip fagure, în cazul în care solicitările materialului sunt mai accentuate.

Validarea experimentală reprezintă etapa finală din dezvoltarea practică a conceptului de pală anticuplu compozită, realizată prin metode de încercare practice, precum utilizarea tunelului aerodinamic subsonic sau încercarea prin aplicarea unei forțe excentrice. Validarea unui astfel de model are o importanță deosebită, deoarece metoda de dezvoltare poate fi adaptată oricărei structuri similare, nu doar din domeniul aerospațial, contribuind astfel la evoluția progresivă a structurilor aviatice către o nouă generație de aeronave performante.

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR

1.1 Materiale compozite. Clasificare, evoluție și caracteristici principale

Materialele compozite reprezintă o clasă relativ modernă de materiale, realizată prin combinarea a două sau mai multe componente, care prezintă caracteristici fizice și chimice diferite, prin combinarea lor rezultând un material cu caracteristici superioare față de fiecare material constituent în parte. Caracteristica principală a acestora este legată de caracterul ortotrop, prin faptul că dețin proprietăți personalizabile în funcție de cerințele utilizatorului, astfel încât, prin poziționarea corespunzătoare a constituenților, materialul final să dețină cele mai bune proprietăți de rezistență pe direcția principală de solicitare.

Palele aeronavelor reprezintă structuri cu o importanță deosebită în construcția acestora, având rol în propulsia și în controlul direcțional al aeronavelor, de a căror bună funcționare depinde capacitatea de a asigura siguranța zborului. Acestea sunt componente aerodinamice active, fiind responsabile pentru generarea forței de tracțiune utilizată pentru propulsia și controlul direcțional al aeronavelor. Materialul de fabricație a cunoscut o evoluție constantă, fiind în legătură directă cu nivelul general de performanțe al aeronavelor.

Cele mai comune categorii de materiale utilizate în construcția structurilor aerospațiale, precum și principalele caracteristici ale acestora sunt [5]:

- metale – reprezintă soluția constructivă clasică, utilizată în special anterior introducerii materialelor compozite în construcția aeronavelor; sunt caracterizate de o rezistență scăzută odată cu creșterea temperaturii de exploatare și de o masă relativ mare, comparativ cu materialele moderne; încă sunt utilizate în prezent de către aeronavele de generații anterioare, aflate încă în exploatare, dar nu mai sunt produse în prezent pentru utilizarea ca elemente propulsive;
- materiale polimerice – sunt materiale realizate din lanțuri repetitive de molecule; pot fi de origine sintetică (materialele plastice) sau naturală (cauciuc, lemn) și sunt rezistente mai ales la temperaturi joase, dar au un cost și o densitate mai mică față de metale; nu sunt folosite, în general, ca elemente structurale;
- materiale ceramice – sunt superioare metalelor și materialelor polimerice în ceea ce privește rezistența la temperaturi ridicate și la expansiune termică, însă sunt mai fragile (casante); industria aerospațială utilizează ca principale materiale cu bază ceramică alumina, materiale policristaline (sticla ceramică) sau materiale compozite cu matrice ceramică;
- materiale compozite – reprezintă categoria cea mai utilizată, în mod curent, în cadrul structurilor aeronautice, datorită proprietăților superioare ale acestora față de celelalte categorii de materiale, precum și datorită posibilității de a personaliza proprietățile materialului final, prin alegerea constituenților optimi, dispuși cu orientarea potrivită; dovada importanței lor rezultă din interesul tot mai crescut pentru utilizarea acestora în construcția aeronavelor și a altor structuri aerospațiale.

În figura 1.1 sunt prezentate principalele materiale utilizate în componența a două aeronave comerciale, dezvoltate recent de către cei mai importanți producători de aeronave la nivel mondial. Tranziția către această categorie de materiale se realizează în contextul necesității obținerii unor performanțe sporite, având la bază un raport rezistență-masă cât mai ridicat al componentelor. După cum se poate observa în aceste figuri, materialele compozite constituie deja ponderea dominantă în cadrul structurilor aviatice, fiind în curs de adopție integrală pe măsură depășirii provocărilor constructive și de fabricație, cu ajutorul avansului tehnologic.

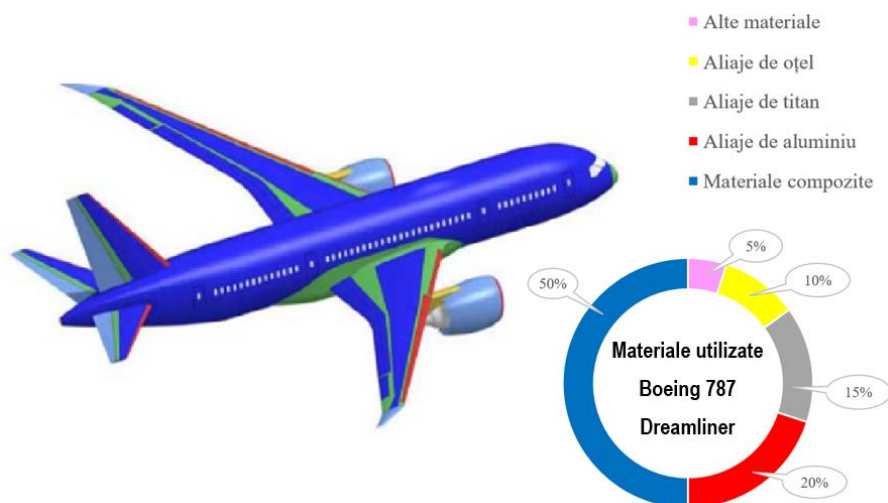


Fig. 1.1 Materiale utilizate în fabricația aeronavei Boeing 787 Dreamliner [6]

Cu toate că folosirea compozitelor prezintă numeroase avantaje, există și numeroase provocări care trebuie depășite, acestea fiind generate de caracterul lor anizotrop și uneori neomogen, impunând dezvoltarea unor procedee de fabricație adaptabile în funcție de caracteristicile materialului. De asemenea, în momentul supunerii acestora la diferite tipuri de încărcări, acestea au o comportare complexă, dificil de previzionat, necesitând folosirea unor instrumente de studiu la fel de complexe.

Programele de analiză cu elemente finite (precum Abaqus, Solidworks, Ansys, Catia etc.) și a metodelor de analiză din cadrul acestora, permit realizarea unor simulări numerice aproximative, în condițiile introducerii unor date inițiale adecvate. Astfel, componentele structurale pot fi modelate, analizate și optimizate într-un interval de timp mult mai redus, urmând ca validarea experimentală să fie realizată prin utilizarea unor instalații de testare care reproduc cât mai precis solicitările standard din timpul exploatarei.

Folosirea sistemelor computaționale moderne în toate etapele de proiectare, fabricare și analiză a acestor materiale, facilitează obținerea unor rezultate precise și ușor de afișat grafic, pentru a ajunge la înălțimea cerințelor de performanță din acest domeniu.

Principalele componente structurale ale unei aeronave realizate integral sau parțial din materiale compozite, sunt următoarele [7]:

- fuselajul aeronavei;
- suprafețele de control ale aeronavei (profundor, direcție);
- elicea motoarelor turbopropulsoare sau ventilatorul motoarelor turboreactoare;
- aripa aeronavei și structura acesteia, la aeronavele moderne;
- componentele interioare, precum podeaua aeronavei, anumite părți din scaunele pasagerilor etc.

Materialele compozite reprezintă o clasă distinctă de materiale, prin natura lor și prin modul de fabricație, putând fi clasificate după cum urmează [8]:

- materiale compozite fibroase – bazate pe materiale fabricate sub forma unor fibre, introduse în interiorul matricei care îmbină structura într-un material unitar; produsul final este un material anizotrop, dar care poate oferi performanțe superioare celorlalte materiale, prin utilizarea unor constituenți cu proprietăți specifice;
- materiale compozite laminate (stratificate) – obținute prin suprapunerea a diferite straturi de materiale; straturile pot fi reprezentate de țesături poziționate la diferite orientări, în funcție de direcția de acționare a forțelor exterioare, fiind îmbinate într-o singură structură solidă, prin intermediul unui adeziv polimeric;

- materiale compozite speciale (armate cu particule) – sunt alcătuite din particule dintr-un material introduse în alt material, numit matrice; sunt rar folosite în industria aerospațială, cel mai comun exemplu de astfel de material fiind cimentul.

Fibrele sunt caracterizate de o rezistență mult mai mare la solicitarea prin tracțiune decât materialul aflat în formă masivă, datorită purității materialului și a structurii interne a acestuia. În funcție de raportul dintre lungimea l și diametrul d , fibrele pot fi continue ($l/d > 1000$) sau discontinue ($l/d < 1000$). Materialele cu cea mai mare aplicabilitate în industria aeronautică sub această formă sunt sticla, carbonul și Kevlarul.

Orientarea fibrelor este o caracteristică importantă care influențează rezistența la rupere a unui material compozit. În cazul fibrei de carbon, rezistența acesteia poate porni de la valori apropiate fibrei de sticlă și poate ajunge până la valori similare titanului, această variație depinzând în principal de modul de orientare a fibrelor față de direcția de aplicare a forțelor. Alegerea corespunzătoare a acestei orientări este importantă pentru a realiza o structură eficientă. De aceea, în cazul reparațiilor care necesită înlocuirea unei lamine, este necesar ca lamina nouă să fie realizată din același material și să prezinte aceeași orientare a fibrelor, precum cea a materialului deteriorat.

Matricea este al doilea element constitutiv al materialelor compozite și are rolul de a uni fibrele într-un material solid unitar, protejându-le totodată prin transferarea tensiunii și prin redistribuirea eforturilor la momentul ruperii fibrele. Aceasta asigură o rigiditate crescută a compozitului și, în același timp, o masă redusă.

Materialele compozite stratificate (cunoscute și sub denumirea de materiale compozite laminate) sunt formate din două sau mai multe materiale, îmbinate prin intermediul unui adeziv. O categoria aparte este reprezentată de materialele compozite laminate ranforsate cu fibre, datorită aplicabilității în construcția elementelor propulsive. Acestea sunt fabricate dintr-o secvență de lamine supraetajate, astfel încât, fibrele unei lamine să fie paralele, iar stratul să fie caracterizat de o anumită orientare, cu scopul obținerii unei rezistențe cât mai ridicate.

Structurile de tip sandviș reprezintă o soluție constructivă folosită la scară largă, datorită numeroaselor avantaje ale acestora, comparativ cu alte tipuri de materiale. Printre acestea se pot enumera: masa redusă, stabilitatea ridicată etc.

O structură de tip sandviș este realizată, în varianta cea mai simplă, din două învelișuri paralele subțiri, lipite de un miez central, care are o masă redusă. Acest element central susține cele două fețe paralele și este caracterizat de o rezistență mare la solicitări prin forfecare și compresiune. Fabricația se realizează cel mai frecvent prin maturarea în autoclave sau prin folosirea unei prese. Pentru structura centrală se folosesc, în general, structurile de tip fagure sau spume cu proprietăți speciale. Structura centrală de tip fagure este utilizată în cadrul următoarelor elemente structurale ale aeronavelor: aripă, spoilere, eleroane, nacele, podeaua cabinei etc.

Structurile de tip sandviș au avantajul unei rezistențe mari la încovoiere, având, în același timp, o masă redusă comparativ cu structurile din aluminiu sau cu materialele compozite laminate. Prin creșterea grosimii structurii centrale de tip fagure se poate mări rigiditatea structurii. Prin urmare, structura nu necesită elemente de rezistență exterioare suplimentare, precum lise sau cadre de rezistență.

Materialele care se folosesc, de regulă, pentru realizarea fețelor exterioare sunt aluminiul, fibra de sticlă, fibra de carbon sau Kevlarul. Fibra de carbon nu este folosită în cazul unei structurii centrale de tip fagure, deoarece, în combinație cu alte metale, ar duce la corodarea acestora. În general, aceste învelișuri au o grosime relativ mică, fiind realizate uneori și din trei-patru lamine și au o rezistență scăzută la impact.

Fibrele reprezintă componenta de ranforsare din materialul compozit, care oferă rigiditate și împiedică propagarea fisurilor. Fibrele subțiri pot avea o rezistență foarte mare, cu

condiția să existe o coeziune bună cu matricea materialului compozit. În funcție de lungimea fibrelor încorporate în materialul compozit, acestea pot fi clasificate în fibre continue sau fibre scurte. Fibrele continue sunt cel mai adesea utilizate pentru a realiza materialele compozite laminate ranforsate cu fibre, pe când cele scurte se utilizează, de regulă, sub formă dispersată în matricea materialului compozit.

Principalele materiale utilizate pentru realizarea fibrelor, cu scopul utilizării acestora în cadrul materialelor compozite sunt: carbon (C), bor, (B), aluminiu (Al) și siliciu (Si). Acestea au număr atomic mic și sunt preferate în astfel de aplicații, datorită legăturilor interatomice puternice. Prelucrarea lor sub formă de fibre se poate realiza integral din același material sau sub forma a diverși compuși (SiO_2 , SIC, Al_2O_3 etc.). Comportarea acestora la rupere diferă în funcție de natura moleculară a materialului.

Matricea din compunerea unui material compozit reprezintă acel element structural care îndeplinește următoarele scopuri:

- preia/transferă solicitările de la/către fibre;
- separă fibrele pentru a preveni ruperea mai multor fibre, în cazul în care unele dintre ele cedază;
- protejează fibrele de factorii de mediu și le integrează în interiorul materialului compozit.

Proprietățile materialului compozit care depind de tipul matricei polimerice sunt următoarele rezistența la compresiune pe axa longitudinală, rezistența la întindere în plan transversal și rezistența la forfecarea interlaminară.

Pentru a îndeplini rolul unei matrice în cadrul unui material compozit utilizat în industria aerospațială, polimerul trebuie să aibe o bună rezistență chimică, în cazul în care intră în contact cu lichide speciale, precum lichid hidraulic, combustibil sau decapant pentru înlăturarea vopselelor. Un aspect foarte important în realizarea materialelor compozite este ca integrarea matricei polimerice în materialul final să nu deterioreze fibrele utilizate pentru ranforsare sau să le modifice poziția/orientarea.

Polimerii termorezistenți reprezintă acei polimeri care se întăresc într-un mod ireversibil în anumite condiții de temperatură și de presiune, prin procesul de maturare a unui lichid vâscos polimeric sau a unei rășini. Polimerul se găsește într-o formă maleabilă/lichidă, pentru a putea fi modelat/turnat în forma finală. Principalele exemple de polimeri termorezistenți sunt:

- rășină poliesterică – materiale compozite laminate;
- rășină poliuretanică – adezivi, spume de izolare, straturi protectoare;
- rășină epoxidică – adezivi, materiale plastice ranforsate cu fibre;
- rășină poliamidică – structuri compozite aerospațiale, plăci electronice;
- rășină siliconică – materiale compozite polimerice;
- rășină vinilesterică – reparații structurale, adeziunea laminelor.

Polimerii termoplastici sunt materiale care sunt maleabile la anumite temperaturi ridicate și se solidifică atunci când se răcesc. Acestea sunt utilizate pentru realizarea diverselor componente structurale, prin procedee de injectare, extrudare sau compresiune. Comparativ cu polimerii termorezistenți, care se solidifică ireversibil, prin încălzirea peste un anumit prag al temperaturii, aceștia revin în starea maleabilă în care pot fi modificați/prelucrați conform cerințelor [9].

Rășinile epoxidice – reprezintă cele mai utilizate rășini termorezistente în cadrul structurilor aerospațiale. Această clasă de compuși este formată din două sau mai multe grupuri epoxidice pe moleculă, au proprietăți chimice și mecanice foarte bune și prezintă o adeziune bună cu majoritatea tipurilor de fibră.

Proprietățile finale ale unei matrice realizată din rășină epoxidică sunt dependente de următoarele aspecte principale:

- alegerea rășinii epoxidice corespunzătoare;
- alegerea agentului de maturare (întărire) corespunzător;
- adăugarea unor aditivi specifici.

Rășinile termoplastice utilizate în industria aerospațială sunt mai costisitoare de produs decât rășinile termorezistente, din cauza necesităților de a asigura funcționarea la temperaturi și presiuni ridicate. Dezvoltarea și îmbunătățirile recente aduse rășinilor termorezistente au început să umbrească avantajul rășinilor termoplastice de a fi mai rezistente, preluând o parte din sarcinile avute anterior de acestea, în ceea ce privește realizarea anumitor elemente structurale. Însă, polimerii termoplastici vor fi în continuare utilizați în cadrul elementelor structurale importante, unde rezistența la impact și rezistența la solicitările din exploatare sunt o condiție esențială.

1.2 Metode de fabricație a palelor din materiale compozite și deteriorările acestora

Există numeroase metode folosite pentru fabricația materialelor compozite destinate industriei aeronautice. Alegerea metodei de fabricație pentru o componentă specifică depinde de: materialele folosite, geometria piesei și modul de funcționare a acesteia.

Procesul de fabricație presupune, în majoritatea cazurilor, utilizarea unei matrițe sau a unui dispozitiv, pentru a oferi materialului prelucrat forma dorită. Această etapă este realizată înaintea și pe durata procesului de maturare. O variantă de realizare a acestui proces este prin folosirea unei matrițe tip piston. Pentru a obține un laminat de o calitate superioară este important să se știe cantitatea de fibre de armare necesare pentru a umple matrița.

O modalitate de fabricație a materialelor compozite este prin infuzia unei rășini în interiorul unei matrițe [10]. O elice realizată prin această metodă trebuie să fie aibă caracteristicile corespunzătoare pe toate cele trei dimensiuni ale acesteia.

O altă variantă a procesului de fabricație presupune folosirea unei pompe de vacuum, pentru aspirarea rășinii dintr-un rezervor, în vederea umplerii matriței [11]. Fibrele uscate, indiferent de tipul acestora (unidireționale sau țesături) sunt plasate într-o membrană sigilată din interiorul unei matrițe.

Această metodă oferă rezultate satisfăcătoare din punct de vedere calitativ, fiind viabilă pentru componente cu dimensiuni mari, însă are un grad de complexitate mai ridicat față de alte tehnici de fabricație. Densitatea rășinii folosite joacă un rol important în procesul de fabricație, existând necesitatea folosirii unor rășini cu densitate redusă, fapt care duce la obținerea unor proprietăți mecanice mai slabe decât în cazul rășinilor dense.

O metoda mai simplistă, dar eficientă, de realizare a palelor din materiale compozite este prin plasarea manuală a laminelor de către operator, într-o succesiune prestabilită în funcție de orientarea fibrelor unidireționale sau a țesăturii. Poziționarea fiecărei lamine individuale este urmată de impregnarea acesteia cu rășină și de uniformizarea acesteia, folosind un dispozitiv cu rolă. Maturarea are loc la temperatura camerei sau la 70-100°C, pentru rășina epoxidică.

Principalele tipuri de deteriorări cu care se confruntă materialele compozite sunt cele apărute pe timpul funcționării normale sau în timpul procesului de fabricație. Asemănător materialelor clasice utilizate pentru diverse structuri de rezistență, materialele compozite, având în componență mai mulți constituenți și un caracter anizotrop pronunțat, nu sunt ferite de astfel de defecte sau deteriorări.

În procesul de fabricație sunt numeroși factori care influențează calitatea materialului final, iar printre defectele apărute pe timpul acestui proces se pot regăsi [12]:

- lamine poziționate neuniform;
- rășină distribuită neuniform;
- fibre lipsă sau tăiate;

- rășină nesolidificată complet;
- pori, incluziuni de aer sau impurități în interiorul materialului;
- impactul cu corpuri străine pe timpul fabricației;
- factori ai mediului de fabricație, poluanți externi;
- voalarea fibrelor sau a țesăturii etc.

De asemenea, în procesul de exploatare există numeroși factori care pot duce la deteriorarea materialului, în funcție de condițiile de funcționare ale materialului. Unele dintre acestea pot fi:

- ruperea rășinii;
- delaminarea;
- dezlipirea;
- ruperea sau smulgerea fibrelor;
- micro-voalarea;
- sarcini exterioare apărute pe timpul exploatării;
- sarcini apărute pe timpul montării/demontării ansamblului;
- vibrații ale structurii pe timpul transportului;
- impactul cu corpuri străine, etc.

Fisurarea matricei este tipul de deteriorare care apare între două sau mai multe straturi ale materialului compozit, poziționate paralel cu fibrele țesăturii. De regulă, acest tip de deteriorare nu reprezintă o problemă imediată pentru integritatea structurală a materialului compozit, fiind doar un punct de pornire pentru alte moduri de rupere a materialelor compozite [13].

Ruperea fibrelor reprezintă o deteriorare care duce la reducerea atât a modulului de elasticitate al materialului, cât și a capacității portante a acestuia. Inițierea fenomenului de rupere a fibrelor are un efect mai pronunțat asupra tensiunii la care apare voalarea materialului, decât reducerea rigidității acestuia. Astfel, din motive de siguranță, este important să se investigheze capacitatea portantă a materialului compozit în momentul în care se observă apariția acestui tip de deteriorare.

1.3 Soluții constructive existente și aplicabilitatea acestora pentru realizarea palelor anticuplu

Pala rotorului anticuplu reprezintă una dintre componentele elicopterului supuse la solicitări continue pe durata funcționării acesteia, gradul de solicitare fiind influențat de numeroase aspecte, precum:

- factorii de mediu (temperatură, presiune atmosferică, umiditate);
- impactul/interferența cu diferite corpuri străine;
- modificarea caracteristicilor aerodinamice de-a lungul palei (distribuția de presiuni, curgerea aerului în jurul palei), din cauza unor rafale de vânt sau din cauza modificării incidenței palei;
- modificarea incidenței palei.

Datorită geometriei pe care o posedă, pala anticuplu a elicopterului poate fi modelată în unul din următoarele trei moduri: model geometric tridimensional - realizat cu metoda elementelor finite, model geometric bidimensional - având la bază secțiunea transversală a palei și lungimea acesteia sau model geometric unidimensional - de tipul unei grinzi. Există studii referitoare la modalitatea optimă de modelare a geometriei palei anticuplu, astfel încât, rezultatul obținut în urma analizelor numerice să fie cât mai aproape de realitate. În principiu, modelul tridimensional este cel care oferă rezultatele cele mai precise, dar timpul de calcul este mult mai mare, în comparație cu celelalte două variante. Pe de altă parte, realizarea

geometriei într-un mod simplificat bidimensional sau unidimensional are avantajul unui durate de calcul mult mai mici, iar prin folosirea unor programe special concepute pentru acest scop, rezultatele finale pot fi suficient de apropiate de cele reale.

- A. *Încărcarea exterioară pe care trebuie să o preia pala* – Principalele forțe care acționează pe timpul zborului asupra palei anticuplu a elicopterului IAR330 și la care trebuie supusă pala realizată din materiale compozite, sunt:
- Greutatea – are o valoare fixă, fiind proporțională cu masa palei. Datorită poziționării rotorului anticuplu în plan vertical, forța de greutate acționează în acest plan, având o orientare diferită în raport cu poziția palei rotorului anticuplu, aflată în mișcare de rotație.
 - Portanța – reprezintă forța aerodinamică generată de curgerea unui fluid în jurul unei suprafețe, fiind, ca orientare, perpendiculară pe direcția de curgere a fluidului. Portanța generată de un profil aerodinamic este influențată de: viteza curentului de aer, densitatea aerului, caracteristicile profilului aerodinamic și unghiul de atac format de coarda profilului cu direcția de curgere a curentului de aer.
 - Rezistența la înaintare – reprezintă forța care se opune deplasării palei prin aer și este, ca direcție, opusă forței de tracțiune și curentului de aer. Principalele tipuri de rezistență la înaintare sunt: rezistența de profil, rezistența indusă și rezistența parazită.
 - Tracțiunea – reprezintă forța generată de funcționarea motoarelor elicopterului. Această forță este variabilă ca mărime, în funcție de cum este variată incidența palelor, de către pilot, prin intermediul palonierelor.
- B. *Condiții la limită și ipoteze inițiale* – Zborul elicopterului reprezintă un fenomen complex, în care sunt implicați foarte mulți factori externi, precum: condițiile de mediu (temperatură, umiditate, precipitații), tipul zborului, acțiunea unor agenți externi imprevizibili, precum rafale de vânt sau impactul cu corpuri străine.
- C. *Elementele structurale* – în funcție de caracteristicile geometrice și de proprietățile acestora, conferă rigiditate palei pentru a putea rezista la solicitările din exploatare. Principalele elemente structurale sunt următoarele:
- învelișul – reprezintă componenta cu pereți subțiri care intră în contact cu mediul exterior. Din acest motiv, acesta trebuie proiectat pentru a rezista impactului cu obiecte străine, care pot provoca deteriorări și pentru a rezista la cele mai aspre condiții de mediu (temperaturi extreme, umiditate ridicată, precipitații etc.). În cazul palelor elicopterelor confecționate din materiale compozite, învelișul este realizat prin suprapunerea țesăturilor cu fibre impregnate cu rășini termoplastice/termorezistente.
 - lonjeronul – reprezintă elementul structural de rezistență principal care se întinde pe toate lungimea palei. Acesta are scopul de a prelua solicitările aerodinamice și forța de greutate a palei, care diferă în funcție de poziționarea acesteia în timpul zborului. În cadrul unei pale pot exista mai multe asemenea elemente structurale, în funcție de solicitările care trebuie preluate.
 - structura de umplere – reprezintă materialul utilizat pentru umplerea cavității interioare a palei, având proprietăți structurale adecvate sarcinilor pe care trebuie să le preia pala. Materialele utilizate cel mai frecvent pentru acest scop sunt structurile de tip fagure sau spumele polimerice.
- D. *Masă minimă și performanțe maxime* – reprezintă un principiu de bază în realizarea elementelor structurale aerospațiale, putând fi realizat prin optimizări succesive ale structurii acesteia, care să permită preluarea aceluiași solicitări, având însă o masă redusă.
- E. *Costul și complexitatea fabricației* – au fost discutate în subcapitolul anterior, pentru majoritatea materialelor utilizate în realizarea materialelor compozite.

Palele metalice reprezintă o soluție depășită din punct de vedere tehnologic, având în vedere necesitățile elicopterelor moderne. Acestea oferă performanțe mai slabe, o durată de viață mai mică, riscul de apariție a deteriorărilor fiind mult mai mare, comparativ cu palele compozite moderne.

În cadrul studiului realizat de către Kovalovs A. [14], pentru optimizarea caracteristicilor de vibrație și de zgomot ale palelor elicopterelor a fost utilizată o pală echipată cu un lonjeron cu profil "C" și profil aerodinamic NACA23012, modelată conform caracteristicilor structurale ale palei MBB Bo105. Metodologia de optimizare se bazează pe utilizarea metodei elementelor finite, structura fiind echipată cu actuatori piezoelectrice, pe toată lungimea ei.

În articolul lui Rasuo [15], realizat în colaborare cu Departamentul Aeronautic al Facultății de Inginerie Mecanică din Belgrad, a fost realizat un studiu al rezistenței la oboseală a unei pale compozite. Pala are în componență învelișul exterior realizat prin suprapunerea țesăturilor din fibră de sticlă orientate la 45° și $0/90^\circ$ în raport cu axa longitudinală, un lonjeron de rezistență realizat din roving-uri, iar pentru structura de umplere a fost utilizată spuma fenolică sau spuma poliuretanică, în funcție de varianta modelului realizat.

În articolul lui Pflumm T. [16] a fost analizată pala compozită a elicopterului UH-60A. Studiul acestuia presupune analiza influenței incertitudinilor de material și identificarea răspunsului structural și a frecvențelor proprii ale palei. Autorul propune o abordare multidisciplinară de optimizare prin utilizarea a trei programe de calcul (DYMORE, VABS și SONATACBM), în urma căreia concluzionează faptul că incertitudinile au un efect considerabil asupra comportamentului dinamic al palei și asupra solicitărilor produse de vibrații.

În lucrarea lui Miller și al lui Narkiewicz [17] referitoare la utilizarea sistemelor de control activ al torsionării palelor, cu scopul reducerii vibrațiilor și a zgomotului, autorii prezintă modul în care pot fi încorporați actuatori piezoelectrice și piezo-compozitele, pentru a crea pale de rotor cu geometrie controlabilă. În articol este prezentat modul în care, pentru o pală având același profil NACA0012, sunt integrate materiale compozite active, ranforsate cu fibre în învelișul laminat al palei, care au permis torsionarea palei cu aproximativ $\pm 0,4^\circ$, în timpul poziționării în tunelul aerodinamic.

1.4 Utilizarea fabricației aditive în domeniul aerospațial

Conform standardului internațional ISO/ASTM 52900 din 2015, fabricația aditivă este definită ca fiind procesul de unire/îmbinare a materialelor pentru a realiza componente pe baza unui model 3D, fiind fabricat, de regulă, prin suprapunerea succesivă a straturilor de material [18].

Fabricația aditivă este considerată ca fiind una dintre revoluțiile industriale încă în curs de realizare. Tehnologiile de fabricație clasice presupun utilizarea unor cantități mari de energie și de resurse pentru a obține un nivel ridicat de precizie în fabricația pieselor, prin procese care presupun extragerea, îmbinarea, sudarea și modelarea materialelor. Procesele de fabricație aditivă dezvoltate recent au adus în prim plan o metodă de fabricație care presupune suprapunerea succesivă a straturilor de material, având la bază un model 3D proiectat în programe software specializate.

În alegerea metodei optime de fabricație aditivă, trebuie să se aibă în vedere următoarele aspecte:

- Gradul de finisare (aspectul fizic) al pieselor fabricate;
- Materialele care pot fi utilizate;
- Rezistența pieselor fabricate;
- Viteza de imprimare;

- Temperatura de fabricație;
- Caracterul practic.

În cadrul sectorului aerospațial, principalele cerințe privitoare la imprimarea 3D se referă la rezistența termică și mecanică ridicată și la o masă cât mai redusă. Folosirea polimerilor, precum și a diferitelor metale, precum titanul sau aliajul de nichel, reprezintă principalele direcții actuale de implementare a proceselor de imprimare 3D în fabricația structurilor aerospațiale.

Fabricația aditivă oferă câteva avantaje competitive față de metodele clasice de fabricație, precum adaptabilitatea la geometria complexă și personalizarea modelului care va fi fabricat. De asemenea, în funcție de cerințele tehnice, produsele sunt construite astfel încât să aibă o masă redusă, pot fi realizate din mai multe materiale, au un caracter ergonomic, fiind bazate pe o combinație adecvată a diferitelor procese de fabricație și pe utilizarea materialului optim. Datorită dezvoltării acestor procese de fabricație, în prezent metodele de fabricație aditivă sunt comparabile cu metodele clasice de fabricație, care presupun înlăturarea materialului.

Fabricația prin extrudarea termoplastică (FDM) reprezintă un proces dezvoltat de Scott Crump și implementat de firma Stratasys Ltd., în anii 1980. Această metodă reprezintă cea mai accesibilă metodă pentru prototiparea rapidă din perspectivă comercială, precum și financiară. Produsele sunt realizate prin extrudarea filamentului încălzit până la temperatura de topire a acestuia, prin suprapunerea succesivă a straturilor de material. Principalele avantaje ale metodelor de fabricație aditivă a structurilor aerospațiale au fost prezentate mai amplu, în Buletinul Științific al Forțelor Navale [19].

O caracteristică importantă a pieselor realizate prin fabricație aditivă, care trebuie avută în vedere, este anizotropia acestora și anume, dependența proprietăților fizice de orientarea piesei în momentul fabricației. Efectul poate fi observat în special la piesele realizate prin extrudare termoplastică.

1.5 Concluzii

Materialele compozite sunt folosite în prezent pe o scară foarte largă în industria aeronautică și permit depășirea unor bariere de performanță, fapt care nu ar fi fost posibil folosind materialele clasice. Materialul creat folosind diferiți constituenți este un material “hibrid”, care are proprietăți structurale îmbunătățite.

Cel mai important avantaj al materialelor compozite este reducerea semnificativă de masă, pe care acestea o aduc structurilor aeronautice, reprezentând o pondere tot mai mare din structura aeronavelor. De asemenea, compozitele laminate armate cu fibre sunt mai rezistente decât aluminiul, folosit pe majoritatea aeronavelor ca principal material structural de rezistență, oferind în plus caracteristici aerodinamice satisfăcătoare, în măsură să contribuie la reducerea rezistenței la înaintare și implicit, la reducerea consumului de combustibil. Materialele compozite nu sunt afectate de coroziune, precum structurile metalice și au o durată de exploatare (resursă tehnică) mai mare decât componentele din aluminiu, ceea ce înseamnă costuri reduse de mentenanță.

În prezentul capitol s-au analizat configurațiile constructive disponibile pentru palele aeronautice, cu scopul îmbunătățirii caracteristicilor de performanță ale acestora, în vederea înlocuirii materialelor actuale de fabricație cu unele cu proprietăți superioare.

Structura actuală a palei anticuplu oferă un caracter echilibrat pentru condițiile de exploatare ale elicopterului IAR330, fiind astfel viabilă menținerea caracteristicilor aeronamice și structurale, creșterea performanțelor acesteia realizându-se prin introducerea unor materiale compozite performante.

2. OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI

2.1 OBIECTIVELE TEZEI

Obiectivul general al tezei de doctorat este de a dezvolta o soluție constructivă alternativă, din materiale compozite, cu scopul de a înlocui pala anticuplu metalică utilizată în prezent de elicopterele IAR330 din cadrul Forțelor Aeriene Române. Soluția constructivă propusă va cuprinde avantajele utilizării materialelor compozite moderne, împreună cu tehnologia fabricației aditive prin imprimare 3D, pentru a obține un produs final, cu o masă considerabil redusă, dar cu caracteristici mecanice superioare.

Obiectivele specifice urmărite sunt următoarele:

- Studiul variantelor constructive existente, a varietății de materiale, precum și a metodelor de fabricație disponibile pentru realizarea palelor din materiale compozite, în vederea alegerii variantei optime, care să satisfacă cerințele de rezistență și de masă;
- Validarea experimentală prin intermediul tunelului aerodinamic a distribuției de presiuni aerodinamice de pe suprafețele exterioare ale palei, determinate numeric prin folosirea un program software pentru modelarea cu elemente finite a curgerii fluidului;
- Determinarea caracteristicilor mecanice pentru fiecare tip de material utilizat în componența palei și utilizarea rezultatelor obținute în vederea validării analizelor numerice realizate cu metoda elementelor finite;
- Realizarea palei anticuplu la scară 1:3, prin raportare la pala anticuplu reală și evaluarea performanțelor din punct de vedere experimental, prin aplicarea unei forțe excentrice, la extremitatea liberă a acesteia;
- Reproducerea, în cadrul unei analize numerice, a încercării experimentale de aplicare a unei forțe verticale pe extremitatea liberă a palei anticuplu și validarea acesteia pe baza rezultatelor experimentale;
- Modelarea cu elemente finite a palei anticuplu, atât în varianta compozită, cât și în varianta metalică și analiza comparativă a tensiunilor și deformațiilor pentru diferite incidențe ale curentului de aerul din intervalul de variație a pasului palei anticuplu;

2.2 ORGANIZAREA TEZEI

Teza de doctorat este organizată în opt capitole distincte, dezvoltate în funcție de obiectivele specifice asumate și de direcțiile de studiu propuse, în vederea atingerii scopului principal, de a demonstra viabilitatea unei configurații compozite pentru pala anticuplu a elicopterului IAR330.

Prezenta lucrare conține un număr de 133 de referințe bibliografice, preponderent din literatura de specialitate și patru anexe cu desenele de execuție utilizate în cadrul încercărilor experimentale.

➤ **CAPITOLUL 1 – STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR**, reprezintă o sinteză a principalelor materiale utilizate în construcția elementelor propulsive cu pale destinate industriei aeronautice, din punct de vedere al apariției cronologice a acestora, dar și din punct de vedere al caracteristicilor mecanice. În acest capitol este prezentată o analiză comparativă a materialelor curente utilizate pentru fabricarea palelor, cu accent pe evidențierea principalelor avantaje și dezavantaje, precum și a defectelor caracteristice materialelor din componența acestora.

➤ **CAPITOLUL 2 – OBIECTIVELE ȘI ORGANIZAREA TEZEI**, conține o descriere sumară și logică a principalelor obiective (cel general și cele specifice) urmărite prin tema de doctorat, cu prezentarea detaliată și argumentată a cercetărilor teoretice și experimentale tratate în fiecare capitol.

➤ **CAPITOLUL 3 – EVALUAREA PERFORMANTELOR PALEI ANTICUPLU DE CONSTRUCȚIE METALICĂ** are ca principal obiectiv studierea comportamentului mecanic al palei anticuplu realizată în conformitate cu dimensiunilor reale, preluate din desenele de execuție ale producătorului. Componentele interne ale palei sunt caracterizate de proprietățile materialelor curente utilizate de producător, cu scopul de a oferi un set de valori de referință al parametrilor mecanici esențiali (masă, solicitări, deformații), în vederea comparării cu o structură compozită.

➤ **CAPITOLUL 4 - VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A ÎNCĂRCĂRILOR AERODINAMICE FOLOSIND TUNELUL AERODINAMIC**, are rolul de a prezenta instrumentarul experimental și metodologia folosită pentru a determina câmpul de presiuni care acționează asupra palei pe timpul curgerii constante a fluidului în jurul palei, la incidențe și cu viteze prestabilite.

➤ **CAPITOLUL 5 – DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ȘI ELASTICE ALE MATERIALELOR CARE COMPUN PALA ANTICUPLU COMPOZITĂ**, debutează prin justificarea alegerii setului de materiale care vor compune pala în configurație compozită. Sunt prezentate principalele tipuri de încercări experimentale utilizate pentru determinarea caracteristicilor specifice fiecărui material, realizate în funcție de tipul predominant de solicitare (întindere, compresiune, încovoiere). Este prezentat instrumentarul de laborator utilizat, cu un accent deosebit pe tehnica de corelare imagistică folosită pentru determinarea tensiunilor și a deformațiilor.

Încercările experimentale s-au realizat în conformitate cu cerințele standardelor internaționale pentru fiecare tip de încercare, respectiv ASTM C365 pentru încercarea la compresiune a structurilor sandviș, ASTM D790 pentru încovoierea în trei puncte a materialelor compozite ranforsate cu fibre și ASTM 3039 pentru încercarea la tracțiune a materialelor compozite cu matrice polimerică. Pentru polimerul termoplastice utilizat pentru realizarea miezului de tip fagure a fost studiat caracterul ortotrop al materialului în funcție de direcția de extrudare termoplastică.

➤ **CAPITOLUL 6 – MODELAREA ȘI ANALIZA CU ELEMENTE FINITE A ÎNCERCĂRILOR MECANICE DE MATERIAL. VALIDAREA REZULTATELOR PE BAZA DATELOR EXPERIMENTALE**, prezintă reproducerea prin metoda elementelor finite a fiecărui tip de solicitare mecanică studiată experimental și validarea acesteia în raport cu valorile determinate practic. Reprezintă o etapă premergătoare analizelor numerice ale palei compozite, care oferă un plus de încredere în ceea ce privește capacitatea acesteia de a furniza rezultate verosimile, cu un grad de precizie cât mai ridicat.

➤ **CAPITOLUL 7 – FABRICAȚIA ȘI ÎNCERCAREA EXPERIMENTALĂ A PALEI ANTICUPLU DIN MATERIALE COMPOZITE. VALIDAREA ANALIZELOR NUMERICE SPECIFICE**, descrie principalele etape parcurse pentru realizarea palei compozite la scară 1:3, în raport cu dimensiunile reale. Sunt descrise tehnologiile de fabricație pentru fiecare componentă individuală a palei: metoda “hand lay-up” pentru învelișul și pentru lonjeronul de rezistență și extrudarea termoplastice pentru miezul fagure. Prima etapă de evaluare a performanțelor a presupus încercarea experimentală a palei compozite prin aplicarea unei forțe excentrice și validarea analizei numerice specifice pe baza datelor experimentale. Având la bază o similitudine mulțumitoare a rezultatelor validării comparative, s-a studiat efectul forțelor aerodinamice asupra palei compozite, pentru diferite incidențe și viteze de curgere ale aerului.

➤ **CAPITOLUL 8 – CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE. REZULTATE NOTABILE**, are rolul de a evidenția principalele realizări ale parcursului științific de cercetare. Sunt prezentate principalele concluzii survenite cronologic pe timpul realizării tezei de doctorat, care justifică și susțin varianta constructivă aleasă pentru pala compozită, precum și viabilitatea implementării practice a acestui model.

3. CAPITOLUL 3 – EVALUAREA PERFORMANȚELOR PALEI ANTICUPLU DE CONSTRUCȚIE METALICĂ

3.1 Caracteristici tehnico-tactice ale elicopterului IAR330. Principii de funcționare

IAR330 este un elicopter produs începând cu anul 1974 de Întreprinderea Aeronautică Română - S.C. IAR S.A. Brașov, în baza licenței achiziționate de la societatea franceză Aérospatiale. Fabrica a produs în total peste 160 exemplare, dintre care, aproximativ 57 au fost destinate exportului către diverse țări, precum: Pakistan, Coasta de Fildeș, Sudan, Ecuador, E.A.U. etc.

Rotorul anticuplu reprezintă ansamblul montat în capătul grinzii de coadă a elicopterului, care se rotește pe o axa orizontală sau aproximativ orizontală. Poziționarea acestuia și distanța față de centrul de greutate al elicopterului, îi permit să dezvolte o forță de tracțiune care să compenseze cuplul reactiv generat de rotorul principal al elicopterului.

Construcția rotorului anticuplu este mai simplă decât cea a rotorului principal, deoarece, permite până la două grade de libertate: mișcarea de bătaie și mișcarea de variație a pasului. Comanda acestuia se realizează prin intermediul palonierului, care dozează puterea transmisă rotorului prin modificarea pasului palelor, controlând astfel aeronava pe axa sa de rotație.

Transmiterea puterii către rotorul anticuplu se realizează pornind de la cutia de transmisie principală, prin intermediul unor arbori de transmisie, către cutia de transmisie spate, poziționată în capătul rotorului anticuplu. Arborii de transmisie sunt îmbinați prin cuplaje, care oferă flexibilitate transmisiei orizontale. Cutia de transmisie spate are rolul de a reduce puterea oferită de motoare, conform unui raport de reducere bine stabilit, cu scopul de a furniza viteza optimă de rotație a rotorului anticuplu.

Mecanismul de modificare a pasului palelor utilizează un sistem de control bazat pe cabluri/tije de control, care leagă comanda primită de la paloniere, de mecanismul de acționare din cadrul rotorului anticuplu. Sistemul utilizează un dispozitiv acționat hidraulic, pentru a micșora efortul pilotului la manșa elicopterului.

Principalele componente ale rotorului anticuplu, sunt:

- 1) palele rotorului anticuplu - prin poziționarea lor pe butucul rotor spate, oferă rotorului anticuplu un diametru de 3,042 m;
- 2) - butuc rotor spate - servește ca suport pentru montarea palelor și permite modificarea pasului acestora;
- 3) - cutie transmisie spate - transferă puterea primită de la motoare către rotorul anticuplu și reduce turația la 1278 rot/min, pentru a permite funcționarea în parametri optimi.

În prezent, elicopterele IAR330 aflate în dotarea Forțelor Aeriene Române utilizează pale de rotor anticuplu realizate din aliaje de aluminiu. Deși există posibilitatea înlocuirii acestora cu pale confecționate din materiale compozite, prin modernizările anterioare ale elicopterelor, trecerea s-a făcut doar pentru palele principale ale elicopterului.

Principalele elemente structurale ale palelor rotorului anticuplu prezentate în figura 3.1 sunt: lonjeronul, învelișul și somonul. Lonjeronul reprezintă elementul structural principal de rezistență al palei. Acesta are două orificii la baza sa, care permit montarea palei la butucul rotor spate al rotorului anticuplu. La capătul opus sunt montate contragreutățile de echilibrare ale palei. Învelișul este cel care oferă palei forma profilului aerodinamic, fiind dispus de la bordul de atac al palei către bordul de fugă, atât pe intradosul, cât și pe extradossul palei. Rigiditatea palei este obținută prin utilizarea miezului NIDA. Somonul este un element dispus la extremitatea de vârf a palei și are rol în aerodinamica acesteia.

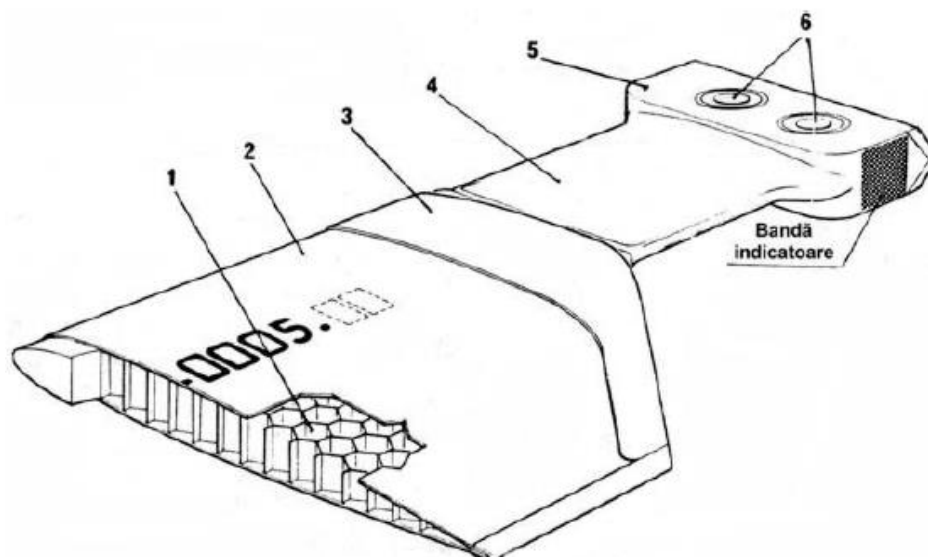


Fig. 3.1 Principalele elemente structurale ale palei rotorului anticuplu [21]

Elicopterul IAR330 utilizează, în prezent, pale metalice pentru echiparea rotorului anticuplu. Principalele aliaje metalice utilizate în construcția acestor pale, clasificate în funcție de componentele structurale, sunt:

- A. *Învelișul* - realizat din aluminiu 6061-T4, cu grosimea de 0,5 mm. Aliajul a fost dezvoltat în anul 1935, având ca principale elemente componente magneziul și siliciul. Acesta are proprietăți mecanice bune, este ușor de sudat și este cel mai des extrudat pentru obținerea componentelor necesare.
- B. *Lonjeronul* - elementul de rezistență principal al palei rotorului. Acesta este realizat din aliaj de aluminiu 6061-T6511, supus unui tratament termic și de îmbătrânire artificială. Componenta finală realizată din acest aliaj este obținută prin extrudare.
- C. *Structura de tip fagure* - realizată din aliaj de aluminiu 5052, extrem de rezistent la coroziune și utilizat îndeosebi în mediul maritim. Acesta are o concentrație mare de magneziu, făcându-l cel mai rezistent aliaj de aluminiu netratat termic. Materialul este ușor de prelucrat pentru realizarea componentelor mecanice, este ușor de sudat și ușor de utilizat pentru realizarea structurilor intrinseci. Structurile de tip fagure fabricate din acest material oferă industriei aerospațiale și mediului comercial, un material cu un grad ridicat de flexibilitate, pentru realizarea structurilor care necesită o masă relativ mică. Materialul utilizat pentru realizarea miezului de tip fagure al elicopterului IAR330 este NIDA 2.3-3/8-.0015 P(5052).

3.2 Determinarea presiunilor exercitate de curentul de aer pe suprafețele palei, în funcție de incidența acesteia, folosind programul Fluent

Rotorul anticuplu al elicopterului are, în timpul zborului la punct fix al elicopterului, o turație constantă de aproximativ **1278 rot/min**. Acest fapt determină creșterea presiunii statice exercitate de curgerea aerului în jurul palelor. Valoarea acestor presiuni poate fi determinată prin folosirea modulului "Fluent - Fluid Flow" din cadrul programului Ansys.

Datorită faptului că incidența palei joacă un rol esențial în distribuția diferențiată a presiunilor determinate de curentul de aer pe suprafețele palei, în studiul curgerii aerului și pentru determinarea presiunilor pe suprafețele palei, trebuie să se țină cont de variația acesteia. Rotorul anticuplu al elicopterului IAR330 permite o variație a incidenței (α) de aproximativ 18° , în gama de valori $+2,5^\circ \div -15,5^\circ$. Studiul aerodinamic al curgerii

tridimensionale, prezentat în acest subcapitol s-a realizat pentru următoarele patru valori ale incidenței palei anticuplu:

- a. $\alpha = +2,5^\circ$ - reprezintă incidența pozitivă maximă pe care o poate adopta pala anticuplu, în baza comenzii permise de la manșa pilotului;
- b. $\alpha = 0^\circ$ - valoarea la care distribuția presiunilor este simetrică pe ambele fețe ale palei rotorului anticuplu, încărcarea maximă fiind preluată de bordul de atac;
- c. $\alpha = -6,5^\circ$ - importantă din punct de vedere practic, deoarece reprezintă incidența la care elicopterul își menține poziția stabilă în jurul axei de rotație (axa verticală) a acestuia;
- d. $\alpha = -15,5^\circ$ - reprezintă incidența negativă maximă pe care o poate adopta pala anticuplu, în baza comenzii permise de la manșa pilotului.

Simetria profilului aerodinamic folosit pentru realizarea palei face ca incidența acesteia să poate fi modificată fără a ține cont de semnul acesteia (pozitiv/negativ). Motivația este reprezentată de faptul că studiul realizat urmărește determinarea distribuției presiunilor exercitate de curentul de aer, cât și, ulterior, determinarea deformațiilor și a tensiunilor maxime, fiind astfel irelevant pentru acest studiu pe care dintre fețele palei (extrados/intrados) acționează presiunea fluidului de lucru.

Ținând cont de faptul că, distanța de la baza palei la axa de rotație a acesteia este de aproximativ 276,7 mm și cunoscând lungimea palei de 1266,30 mm, rezultă că, distanța totală de la vârful palei la axa de rotație este de 1543 mm. Se obține astfel viteza de curgere a aerului în jurul palei de aproximativ 206,50 m/s, care este corespunzătoare pentru extremitatea liberă a palei. Pentru analiza curgerii aerului în cadrul simulărilor numerice se va utiliza o viteză a aerului de 50 m/s, deoarece această valoare a vitezei reprezintă maximum care poate fi validat experimental, în cadrul tunelului aerodinamic, fără a risca deteriorarea ireversibilă a modelului de pală anticuplu.

În cadrul programului Fluent, pentru determinarea presiunilor create de curgerea curentului de aer pe suprafețele palei, se utilizează un model de curgere cu vâscozitate turbulentă, de tip k- ϵ standard. Acest model matematic este unul dintre cele mai utilizate și mai complete variante pentru studiul curgerii turbulente. Este un model semi-empiric, care utilizează ecuații de transport pentru determinarea energiei cinetice a turbulențelor (notat cu "k") și a ratei de disipare a acestora (notat cu „ ϵ ”).

În cadrul mediului de curgere, fluidul de curgere se consideră a fi aerul, pentru calcule fiind utilizați parametrii standard de presiune și de temperatură măsurați la nivelul mării:

- Presiunea fluidului – 101,325 kPa;
- Temperatura fluidului – 15°C;
- Densitatea fluidului – 1,225 Kg/m³.

Pentru realizarea analizei se fac următoarele ipoteze simplificatoare: nu există schimb de căldură cu mediul exterior, iar viteza de curgere a aerului este constantă pe toată lungimea palei.

Simularea curgerii fluidului având incidență nulă în raport cu pala anticuplu este caracterizată de o curgere potențială (irotatională), unde toate componentele vitezei unghiulare de rotație sunt aproximativ nule. Presiunea statică maximă are valoarea de 15,25 kPa și este localizată pe bordul de atac al palei rotorului anticuplu, iar presiunea minimă se regăsește pe piciorul palei. Presiunea statică negativă maximă se regăsește într-o zonă limitată, în partea inferioară a piciorului palei și se datorează modelării geometrice, fapt pentru care în cadrul analizei statice nu se va ține cont de aceasta.

Curgerea aerului în jurul palei cu unghi de atac nul este ilustrată în figura 3.2, unde se poate observa stratul limită de curgere și dispunerea acestuia în jurul profilului aerodinamic al palei.

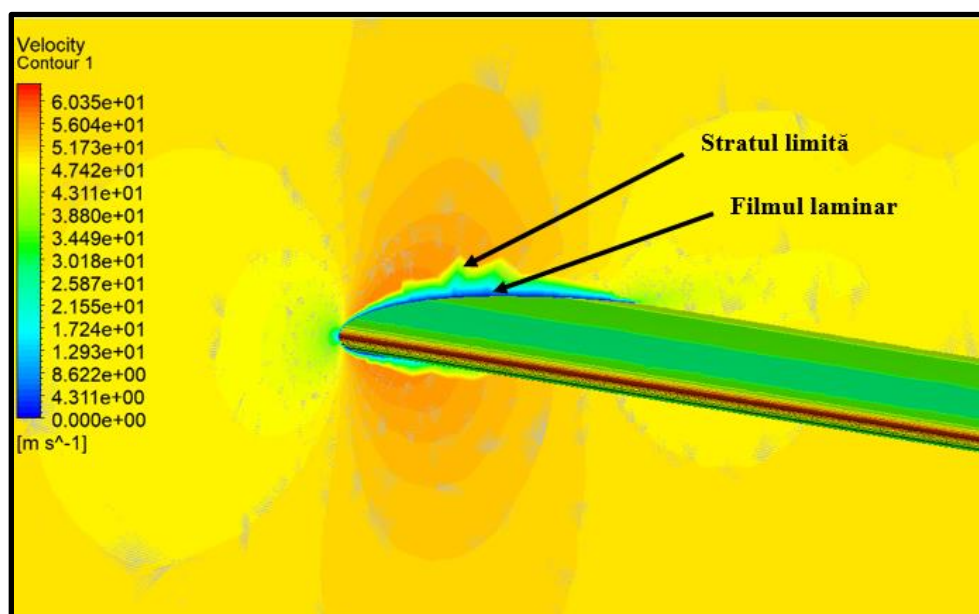


Fig. 3.2 Variația vitezei fluidului care străbate învelișul palei anticuplu la $\alpha = 0^\circ$

Stratul limită reprezintă regiunea în care viteza fluidului se modifică datorită interacțiunii cu profilul aerodinamic, fiind localizată între suprafața învelișului palei și zona în care gradientul de viteză devine nul. Reprezintă zona în care se manifestă efectul de frânare a pereților, având ca rezultat disiparea energiei mecanice a fluidului.

Filmul laminar este zona imediat adiacentă învelișului, în care curgerea rămâne laminară. Pentru cazul incidenței nule, acesta se extinde de la bordul de atac către bordul de fugă, având o dimensiune aproximativ constantă. Desprinderea stratului limită are loc la intersecția fluidului cu bordul de atac, determinând apariția zonei de turbulență localizată pe ambele fețe ale palei, la o anumită distanță față de filmul laminar.

Apariția turbulențelor poate fi observată pe ambele fețe ale învelișului palei, fiind rezultatul impactului fluidului de învelișul palei. Dat fiind profilul aerodinamic simetric, deplasarea fluidului se realizează identic pe ambele fețe ale palei anticuplu. Liniile de contur ale distribuției de presiune au o formă aproximativ liniară, contribuind la o delimitare clară a principalelor zone de presiune, conform codurilor de culoare. Valorile dominante, conform rezultatelor obținute, sunt cele aflate în zona mediană a intervalului de presiuni.

De principiu, desprinderea stratului limită are loc când presiunea fluidului exterior acestuia crește în direcția deplasării, viteza fluidului schimbându-se brusc. În acest caz, desprinderea are loc la intersecția fluidului cu bordul de atac, determinând apariția zonei de turbulență localizată în vecinătatea bordului de atac. Curgerea turbulentă nu se amplifică până la înveliș datorită vitezei reduse, care nu poate întreține turbulențele.

Se poate observa prezența curgerii turbulente, caracterizată de o deplasare pe traiectorii neregulate a fluidului, cu viteze diferite. Trecerea de la zona de curgere laminară la cea turbulentă se realizează treptat, remarcându-se prezența unei zone de deplasare tranzitorie a fluidului.

Prin intermediul unei analize numerice parametrice, a fost determinată variația presiunii aerodinamice în raport cu incidența curentului de aer, pentru viteza de 50 m/s utilizată în vederea validării presiunilor aerodinamice, precum și pentru viteza de 206,5 m/s corespunzătoare vitezei tangențiale maxime la vârful palei.

Evoluția principalelor forțe aerodinamice care acționează asupra palei anticuplu, reprezentate de portanță și de rezistența la înaintare, a fost reprezentată grafic în raport cu variația unghiului de incidență făcut de pala anticuplu cu direcția de curgere a aerului.

Evoluția grafică indică o scădere a valorii medii a presiunii statice, odată cu creșterea incidenței α , datorită intensificării zonelor cu presiune negativă, ca efect al desprinderii stratului laminar și al apariției turbulențelor. De asemenea, se observă faptul că presiunea maximă se manifestă pentru orientarea simetrică a palei în curentul de aer ($\alpha=0^\circ$), în zona bordului de atac al palei anticuplu.

Valoarea forței de portanță corespunzătoare incidenței maxime este aproximativ de zece ori mai mare decât în cazul incidenței nule. Efectele distructive ale curentului de aer se resimt pentru valorile mari ale incidențelor și forțelor aerodinamice. Rezultatele obținute folosind programul Fluent vor fi introduse în analizele statice, pentru a evalua răspunsul palei metalice la solicitările aerodinamice de acest tip.

3.3 Analiza statică a palei rotorului anticuplu

Pala rotorului anticuplu reprezintă una dintre componentele elicopterului supuse la solicitări continue pe timpul zborului elicopterului, gradul de solicitare fiind influențat de numeroși factori, printre cei mai notabili numărându-se:

- factori de mediu (temperatură, presiune atmosferică, umiditate);
- impactul/interferența cu diferite corpuri străine;
- modificarea caracteristicilor aerodinamice de-a lungul palei (distribuția de presiuni, curgerea aerului în jurul palei), cauzate de rafale de vânt sau de modificarea incidenței palei;
- modificarea incidenței palei, comandată controlat de pilotul elicopterului.

În cadrul acestui subcapitol, analiza cu elemente finite a palei anticuplu se bazează pe modelul geometric al palei poziționat în plan vertical, curentul de aer având o direcție uniaxială de curgere, dinspre bordul de atac spre bordul de fugă. Această dispunere a fost aleasă din considerente practice, date fiind posibilitățile limitate de validare a încărcărilor aerodinamice în cazul rotirii palei anticuplu la turația nominală din exploatare. Astfel, analiza statică a fost realizată pentru aceeași dispunere a palei în interiorul tunelului aerodinamic, care va fi prezentată în capitolul următor, pentru validarea experimentală a presiunilor exercitate de curentul de aer pe învelișul palei. Analiza statică a fost realizată pentru cele patru valori de referință din gama de incidențe a palei anticuplu a elicopterului IAR330, respectiv 0° , $2,5^\circ$, $6,5^\circ$, $15,5^\circ$.

Proprietățile mecanice furnizate de fabricant pentru fiecare tip de aliaj de aluminiu sunt atribuite fiecărei componente structurale în cadrul analizei numerice cu elemente finite, după cum urmează:

- lonjeronul – Aliaj de aluminiu 6061-T6511;
- miezul fagure – Aliaj de aluminiu NIDA 2.3-3/8-.0015 P(5052);
- învelișul – Aliaj de aluminiu 6061-T4.

În cazul zborului la punct fix, viteza de înaintare a elicopterului se consideră a fi nulă, elicopterul fiind practic suspendat în aer, la o distanță constantă față de sol. Pala rotorului este solicitată de către presiunea aerodinamică generată de curentul de aer, în condițiile unei curgeri cu viteză constantă, de aproximativ de 50 m/s. Această viteză a fost aleasă din considerente practice, din cauza limitărilor impuse de vibrația palei anticuplu, cunoscută în termeni aerodinamici sub denumirea de “flutter”. Aceasta reprezintă o stare de instabilitate pentru structura aerodinamică, stare care determină oscilația susținută a structurii, prin preluarea energiei necesare de la curentul de aer.

A fost determinată distribuția de presiuni aerodinamice de-a lungul palei pentru o incidență a curentului de aer $\alpha = 0^\circ$, zonele fiind delimitate de liniile de presiune constantă. Presiune statică maximă este resimțită în zona frontală a palei anticuplu, în raport cu direcția de curgere a curentului de aer, îndeosebi în zona bordului de atac.

Tensiunile echivalente maxime sunt prezente pe corpul structurii fagure, în zonele de intersecție ale celulelor hexagonale atingând valoarea maximă de 9,11 MPa, pentru cazul de curgere descris anterior. Lonjeronul de rezistență, ca element de rigidizare principal, preia încărcarea aerodinamică, fiind supus unui moment încovoietor care comprimă piciorul palei pe partea opusă direcției de curgere. Tensiunile sunt de asemenea distribuite pe bordul de atac al lonjeronului, similar învelișului exterior, fiind zona principală de contact a fluxului de aer cu pala anticuplu.

Tendința de creștere a tensiunii maxime odată cu creșterea incidenței palei a fost prezentată comparativ pentru fiecare dintre cele patru valori studiate ale incidenței, în raport cu două viteze de curgere ale aerului:

- curgerea liniară a curenului de aer, cu o viteză constantă $v=50$ m/s;
- curgerea liniară a curenului de aer, cu o viteză constantă $v=206,5$ m/s, corespunzătoare unei vitezei liniare obținută la vârful palei, în cazul funcționării rotorului anticuplu la o turație de 1278 rot/min.

Conform rezultatelor obținute, curgerea liniară a aerului la viteza tangențială de 206,5 m/s duce la apariția unor tensiuni mult peste limita de rezistență a aliajelor de aluminiu utilizate pentru pală, nefiind deci viabilă de reprodus din punct de vedere practic, prin studierea curgerii cu ajutorul tunelului aerodinamic. Curgerea liniară este realizată strict cu rol comparativ, în vederea evaluării performanțelor palei compozite finale.

Dintre cele trei componente structurale, lonjeronul de rezistență și fagurele preiau ponderea cea mai mare a deformațiilor specifice, la polul opus fiind situat învelișul palei. Deformația maximă a fost identificată pe miezul de tip fagure, în zona bordului de fugă, în proximitatea unor suprafețe relativ mici ca dimensiune.

Analiza numerică efectuată asupra palei de rotor anticuplu realizată din aliaj de aluminiu scoate în evidență faptul că mărirea incidenței palei are ca efect o creștere direct proporțională a valorilor tensiunilor și deformațiilor aferente. Deplasarea maximă obținută în cazul curgerii liniare se situează la extremitatea liberă a palei anticuplu, aceasta fiind deformată conform direcției de deplasare a curenului de aer.

În toate cazurile de calcul s-a putut observa distribuția unor tensiuni semnificative pe piciorul palei, în zona cu secțiunea transversală cea mai mică, motiv pentru care fabricantul a utilizat cel mai rezistent material din toată structura (aliajul de aluminiu 6061-T6511) pentru a rezista momentului încovoietor creat de încărcarea aerodinamică. Indiferent de regimul de zbor al elicopterului, lonjeronul reprezintă structura de rezistență cea mai solicitată, care preia cea mai mare pondere a tensiunilor. Influența diferitelor materiale interioare de umplere a fost studiată de asemenea, pentru a evalua influența acestora asupra performanțelor generale ale palei [22].

Având în vedere rezultatele analizelor numerice, referitoare la efectul încărcării aerodinamice a palei la diferite incidențe și viteze de curgere ale aerului, se poate afirma faptul că viteza maximă, din punct de vedere al siguranței, pentru care se va realiza validarea practică a încărcării aerodinamice este de 50 m/s, pentru o incidență maximă $\alpha=6,5^\circ$. Până în aceste praguri, materialele care compun modelul palei anticuplu se află în limita admisibilă de rezistență furnizată de producător.

3.4 Concluzii

Elicopterul IAR330 aflat în dotarea Forțelor Aeriene Române este un elicopter de transport, fabricat în multiple variante de echipare, în funcție de misiunea acestuia. Acesta deservește Forțele Aeriene Române de peste patru decenii, timp în care și-a demonstrat capacitățile practice, trecând prin mai multe etape de modernizare. Rotorul principal al elicopterului utilizează pale realizate din materiale compozite, în timp ce palele rotorului

anticuplu sunt metalice. Elicopterul SA 332 reprezintă varianta franceză îmbunătățită a elicopterului IAR330, care utilizează pale anticuplu compozite.

Prin utilizarea programelor software de analiză cu elemente finite a fost posibilă crearea unui model geometric la scară reală al palei elicopterului IAR330, care respectă dimensiunile și caracteristicile structurale generale. Modelarea a presupus proiectarea principalelor elemente de rezistență ale palei (lonjeron, miez fagure și înveliș), urmată de îmbinarea acestora în cadrul unui singur ansamblu.

Analizele numerice efectuate indică intensificarea deformațiilor maxime și tensiunile echivalente maxime, odată cu mărirea incidenței palei. Având în vedere rezultatele analizelor numerice efectuate, se impune limitarea cazurilor experimentale la valoarea de 50 m/s, pentru viteza de curgere a aerului și $\alpha=6,5^\circ$, pentru incidența palei, astfel încât încercările experimentale să se desfășoare în condiții de siguranță, fără ca modelul palei anticuplu să fie deteriorat complet. Caracteristicile mecanice ale materialelor utilizate permit efectuarea unor astfel de încercări, conform rezultatelor obținute în cadrul analizelor statice.

Avantajele folosirii materialelor compozite, precum reducerea masei adusă structurii elicopterului, rezistența la coroziune și caracteristicile de rezistență superioare, comparativ cu metalele tradiționale utilizate, fac ca acestea să fie soluția dezirabilă pentru orice aeronavă modernă. În cazul aeronavelor realizate din componente metalice, marea majoritate a operatorilor optează, în măsura în care structura de rezistență permite, pentru trecerea la componente realizate din materiale compozite. Caracteristicile mecanice oferite de aceste materiale sunt net superioare oricărui alt material utilizat anterior pentru structurile aviatice, iar posibilitatea utilizării lor împreună cu sisteme de monitorizare a stării de integritate structurală, le dau ocazia de a deveni materiale “inteligente”, în adevăratul sens al cuvântului.

4. VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A ÎNCĂRCĂRILOR AERODINAMICE FOLOSIND TUNELUL AERODINAMIC

4.1 Principalele forțe care acționează asupra palei anticuplu în funcție de tipul zborului executat de către elicopter

Principalele forțe aerodinamice care acționează asupra elicopterului sunt: tracțiunea, rezistența la înaintare, portanța și greutatea (fig. 4.1). Înțelegerea modului în care acționează aceste forțe și a modului în care pot fi controlate, corelat cu folosirea corespunzătoare a comenzilor de zbor, reprezintă aspecte esențiale pentru siguranța zborului elicopterului.

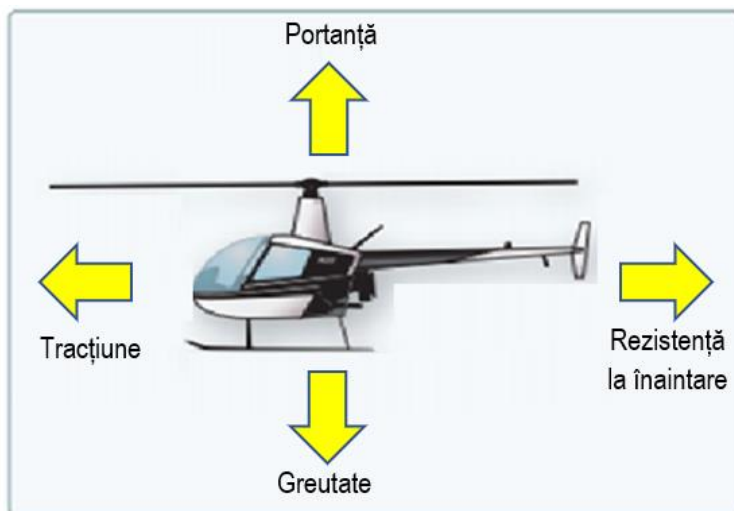


Fig. 4.1 Principalele forțe aerodinamice care acționează asupra elicopterului

Tracțiunea reprezintă forța produsă de motoarele elicopterului. Aceasta este, ca sens, opusă rezistenței la înaintare și ca mărime, mai mare decât aceasta. De principiu, aceasta acționează paralel cu axa longitudinală a elicopterului.

Greutatea reprezintă forța care acționează asupra aeronavei din centrul de greutate, pe direcție verticală, în jos, fiind opusă portanței, ca orientare. Se consideră valoarea acesteia ca fiind fixă, determinată în funcție de masa elicopterului, a combustibilului și a pasagerilor. Pentru a se putea deplasa, elicopterul trebuie să genereze suficientă portanță, astfel încât, să poată depăși valoarea totală a greutateii elicopterului.

Portanța reprezintă forța produsă de efectul dinamic al aerului asupra profilului aerodinamic, care acționează din centrul aerodinamic al profilului și este orientată perpendicular pe direcția de zbor a elicopterului. Aceasta este generată în momentul în care un corp modifică direcția de curgere a fluidului. În momentul în care, corpul și fluidul se află într-o mișcare relativă de deplasare unul față de celălalt, iar corpul face ca sensul fluidului de lucru să devină perpendicular în raport cu cel inițial, apare o forță opusă ca sens, numită portanță.

Un profil aerodinamic simetric trebuie să aibă un unghi de atac pozitiv, astfel încât, portanța să fie generată. În cazul unui unghi de atac nul, nu este generată portanță, iar în cazul unui unghi de atac negativ, portanța este și ea, la rândul ei, negativă. În cazul profilelor aerodinamice cambrate sau care nu sunt simetrice, portanța poate fi produsă chiar și la incidență zero sau ușor negativă.

Rezistența la înaintare reprezintă forța orientată în sensul opus direcției curentului de aer, fiind cea care se opune deplasării elicopterului prin aer și este cauzată de neuniformitatea curgerii în jurul aripilor, rotorului, fuselajului etc. [23].

Coeficientul rezistenței la înaintare este un coeficient adimensional, care depinde de geometria corpului studiat, în determinarea lui ținându-se cont atât de fricțiunea învelișului, cât și de rezistența de profil. Acesta depinde în general de numărul Reynolds.

Rezistența la înaintare totală reprezintă suma celor trei componente ale rezistenței (rezistența indusă, rezistența parazită și rezistența de formă). Pe măsura creșterii vitezei, rezistența parazită crește, în timp ce rezistența indusă scade. Rezistența de profil însă, rămâne relativ constantă în toată gama de viteze, cu o ușoară creștere la viteze mari.

4.2 Principalele regimuri de zbor ale elicopterului

Zborul la punct fix reprezintă cel mai dificil tip de zbor care trebuie executat de un elicopter, din perspectiva unui pilot. Acest lucru se datorează faptului că, elicopterul generează propriul flux de aer, care acționează pe direcția verticală, în jos, împotriva fuselajului elicopterului. Pentru a putea menține elicopterul într-o poziție fixă, este necesar ca pilotul sau sistemele de control automat al comenzilor de zbor să efectueze corecții și modificări în mod continuu. De regulă, zborul la punct fix se realizează la o distanță relativ mică față de sol.

Rotorul anticuplu al elicopterului are scopul de a produce o forță de tracțiune opusă ca orientare cuplului generat de rotorul principal [24, 25]. Această forță este suficientă pentru a deplasa lateral elicopterul. Conform principiului al treilea al lui Newton, care spune că pentru orice acțiune există o reacțiune egală în modul și de sens opus, mișcarea de rotație a rotorului principal într-un anumit sens face ca fuselajul elicopterului să se rotească în același sens. Mărimea cuplului depinde în mare măsură de puterea de care dispun motoarele la momentul respectiv. Pentru a controla acest fenomen, s-a impus dezvoltarea rotorului anticuplu, tracțiunea generată de acesta putând fi controlată de către pilot prin intermediul palonierelor.

Tendința de translație reprezintă fenomenul prin care, în timpul zborului unui elicopter cu un singur rotor principal, acesta are tendința de a se deplasa în direcția tracțiunii rotorului anticuplu. Pentru a preveni apariția acestui fenomen, există mai multe soluții constructive care pot fi adoptate, precum montarea transmisiei orizontale la un anumit unghi, astfel încât, rotorul anticuplu să aibă un anumit grad de înclinare.

Zborul pe verticală al elicopterului se realizează pornind de la zborul la punct fix. Prin creșterea incidenței palelor rotorului în timp ce turația este menținută constantă, elicopterul capătă o viteză ascensională, iar dacă incidența palelor scade, elicopterul va coborî.

Zborul cu înaintare este acel zbor în care nu există modificări ale vitezei aerului, iar cele patru forțe aerodinamice se găsesc în echilibru. În cadrul zborului cu înaintare neaccelerat, pe o traiectorie constantă și la viteză constantă, portanța este egală în modul cu greutatea iar tracțiunea este egală în modul cu rezistența la înaintare.

Fluxul aerului peste rotorul elicopterului diferă în funcție de regimul de zbor al elicopterului. În zborul cu înaintare, fluxul de aer curge în sensul opus direcției de deplasare a elicopterului, viteza aerului fiind egală cu viteza de deplasare a elicopterului. Datorită faptului că rotorul se află într-o mișcare circulară, viteza fluxului de aer peste o pală depinde de: poziția palei în planul de rotație într-un anumit moment de timp, de viteza rotațională și de viteza elicopterului.

Zborul lateral presupune înclinarea planului rotorului principal în direcția în care se dorește deplasarea elicopterului. În cazul acestui zbor, orientările forțelor de portanță și greutate rămân neschimbate, dar tracțiunea acționează în direcția în care este dorită deplasarea, cu rezistența la înaintare acționând în sens opus acesteia. Acest tip de zbor poate fi instabil, din cauza rezistenței la înaintare parazite a fuselajului, în combinație cu lipsa stabilizatorilor orizontali utilizați în mod normal pentru a facilita deplasarea în direcția de zbor. Creșterea altitudinii facilitează realizarea acestui tip de zbor.

Zborul înapoi presupune înclinarea înapoi a planului rotorului principal în direcția înapoi, rezultanta vectorială a forțelor de tracțiune și a portanței fiind astfel orientată în același sens. Acest zbor necesită o atenție crescută, deoarece grinda de coadă a elicopterului are tendința de a se înclina în jos. Trebuie realizată o cercetare în prealabil a zonei în care se dorește realizarea acestui tip de zbor, zborul la o înălțime mai ridicată fiind indicat în astfel de situații.

4.3 Modele de curgere utilizate pentru determinarea distribuției de presiuni. Studiul curgerii bidimensionale

Curgerea fluidelor este un domeniu în care există numeroase variabile care trebuie avute în vedere pentru a se putea realiza un studiu aerodinamic eficient. Variația anumitor parametri, precum densitatea sau viteza fluidului, duce la clasificarea diferitelor tipuri de curgere, necesare pentru înțelegerea cât mai bună a modului în care fluidul interacționează cu diferite corpuri aerodinamice.

Curgerea incompresibilă este acel tip de curgere a unui fluid care își menține densitatea constantă. Din punct de vedere practic, curgerea incompresibilă nu este posibilă, dar în studiul aerodinamicii, atunci când viteza aerului este mai mică de 0,3 Mach (aproximativ 370 km/h), se presupune că procesul de curgere a fluidului este unul izocor (volum constant). Incompresibilitatea fluidului presupune ca densitatea acestuia să rămână constantă pe o anumită porțiune de fluid, care se deplasează cu viteza întregului flux.

Curgerea compresibilă este caracterizată de modificări ale densității fluidului în raport cu distanța parcursă de fluid. Un caz concret ar fi cel al fluidului care curge peste un corp, având loc o creștere a densității fluidului în locul de impact al fluidului cu corpul [26]. Curgerile cu un număr Mach mai mic decât 0,3 sunt considerate curgeri incompresibile, deoarece modificarea densității datorită vitezei este de aproximativ 5%.

În simulările numerice, curgerea turbulentă la numere Reynolds mici poate fi descrisă folosind ecuațiile Navier-Stokes. Principalele restricții în realizarea unei astfel de simulări sunt puterea de calcul a unității de procesare și eficiența algoritmului folosit pentru determinarea soluției. În numeroase cazuri, s-a demonstrat că rezultatele experimentale coincid cu rezultatele analizei numerice. Valoarea numărului Reynolds este cea care stabilește dacă o curgere este laminară sau turbulentă.

Deplasarea oricărui fluid reprezintă o problemă de dinamică a fluidelor, care poate fi descrisă folosind ecuațiile Navier-Stokes [27]. Această ecuație reprezintă rezultatul aplicării legii a doua a lui Newton asupra fluidului.

Profile aerodinamice laminare, precum cel al palei rotorului anticuplu sunt caracterizate de un strat laminar preponderent pe extradrosul profilului. Aceste profile prezintă totuși separarea curentului de aer și turbulențe, dar la valori mai mari ale unghiului de incidență α . Pentru valori reduse, fluxul de aer accelerează și gradientul de presiune negativ de pe extradros face ca separarea să fie evitată.

Curgerea în plan bidimensional (transversal) facilitează vizualizarea din profil a deplasării fluidului din domeniul de curgere, raportat la unghiul de incidență al palei. Astfel, putem determina anumite caracteristici ale curgerii, precum: condițiile care facilitează apariția turbulențelor, desprinderea stratului limită de corpul solidului aerodinamic, localizarea și evaluarea intensității curgerii turbulente etc.

Condițiile prestabilite pentru a caracteriza tipul curgerii sunt următoarele:

- temperatura mediului ambiant: 15°C;
- densitatea aerului: 1,225 kg/m³;
- numărul Reynolds: $3 \cdot 10^6$;
- unghiul de incidență al curentului de aer față de pala anticuplu: $0^\circ \div 15,5^\circ$;

- model de curgere: k- ϵ ;
- număr Mach: 0,15 (corespunzător unei viteze de 50 m/s).

Numărul Reynolds precizat anterior a fost ales ținând seamă de viteza curgerii și de dimensiunea corzii profilului aerodinamic. Această mărime caracterizează vâscozitatea, precum și compresibilitatea fluidului prin care se deplasează solidul aerodinamic, care în cazul de față este aerul. Valoarea acestuia este caracteristică unei curgeri turbulente, variabilă în funcție de vâscozitatea aerului. De menționat ar fi faptul că vâscozitatea fluidului dispare pentru curgeri cu numere Reynolds mai mari de $10 \cdot 10^6$.

Presiunea statică este reprezentată de forța care acționează asupra profilului aerodinamic, raportate la unitatea de suprafață. Practic, această mărime reprezintă presiunea exercitată de fluid pe suprafață profilului NACA0012, atunci când aerul nu se deplasează. Dacă se determină valoarea presiunii dinamice, parametru dependent de densitatea și viteza aerului, se poate determina și presiunea totală a fluxului de aer, care este variabilă în cadrul curgerii rotaționale.

Variația presiunii statice este ilustrată grafic pentru incidențele cuprinse în intervalul $0^\circ \div 15^\circ$. Astfel, se poate observa cum, plecând de la o incidență nulă, în care distribuția presiunilor este identică pe ambele fețe ale palei, se ajunge la o presiune pozitivă maximă pe partea inferioară a bordului de atac, fapt care dă naștere unei zone de presiune negativă pe extradados. Aria afectată de presiunea negativă scade în dimensiune pe măsura creșterii unghiului de atac, favorizând apariția curgerii turbulente, după valoarea de $12,5^\circ$.

Presiunea dinamică este o mărime care depinde exclusiv de densitatea aerului, precum și de viteza acestuia. Comparativ cu imaginile prezentate anterior, se poate observa faptul că acționează opus raportat la intensitatea presiunii statice. Astfel, zonele în care presiunea statică este maximă, aflate pe direcția curentului de aer, sunt caracterizate de o presiune dinamică redusă, dată fiind reducerea vitezei fluidului la momentul intersecției acestuia cu profilul aerodinamic. Se poate observa faptul că, zona cu presiune dinamică redusă se propagă pe fața opusă direcției din care acționează curentul de aer, fiind extradadosul profilului aerodinamic, în acest caz. Presiunea care se resimte pe extradadosul profilului crește, iar viteza fluidului scade, fapt care se traduce prin creșterea presiunii dinamice.

Rezultatele confirmă o parte dintre concluziile anterioare privitoare la presiunea statică și la presiunea dinamică a fluidului. Creșterea vitezei în zona bordului de atac are ca efect creșterea presiunii statice, iar reducerea vitezei pe față opusă direcției curentului de aer are ca efect reducerea presiunii dinamice. Se poate observa apariția unei ușoare desprinderi a stratului limită, începând cu valoarea de 10° a unghiului de atac, curgerea devenind turbulentă la atingerea valorii de 15° . Acest prag reprezintă limita variației incidenței utilizată preponderent în cazuri de urgență, pentru a executa o manevră de control rapid în jurul axei de rotație a elicopterului.

4.4 Validarea experimentală a încărcărilor aerodinamice din modulul Fluent

Tunelele aerodinamice reprezintă echipamente științifice extrem de avansate, utilizate pentru a reproduce condițiile de zbor ale unei aeronave sau ale unei părți componente a acesteia. În vederea realizării acestor încercări experimentale, se pot utiliza modele la o anumită scară iar dacă dimensiunile tunelului aerodinamic permit, se pot utiliza modele reale.

Dezvoltarea acestor echipamente a decurs în paralel cu dezvoltarea aeronavelor, fiind astăzi utilizate nu doar pentru studiul aeronautic, cât și pentru automobile, trenuri de mare viteză, dar și echipamente sportive [28].

În funcție de modul de deplasare a aerului, tunelele aerodinamice pot fi clasificate ca având circuit închis sau circuit deschis. Pentru a studia interacțiunea palei anticuplu cu fluidul,

un model al palei anticuplu a fost introdus în tunelul aerodinamic cu circuit închis aparținând INCAS (Institutul Național de Cercetări Aerospațiale) București.

Principiul de funcționare a unui tunel aerodinamic, în majoritatea cazurilor, constă în deplasarea unui volum mare de aer prin interiorul unui tub în care modelul supus studiului este încastrat. Studiarea deplasării fluidului în jurul diferitelor corpuri poate fi facilitată prin utilizarea fumului sau a unui colorant, care permit vizualizarea curentului de aer. Măsurarea vitezei cu care se deplasează aerul în tunelul aerodinamic se realizează folosind principiul lui Bernoulli, iar direcția curentului de aer poate fi determinată prin dispozitive atașate pe suprafețele aerodinamice ale corpului. De asemenea, pot fi introduse și bule de lichid în amonte curentului de aer, pentru a putea urmări traiectoria acestora în jurul corpului studiat.

Distribuția presiunii pe suprafețele modelului testat a fost determinată încă de la începutul realizării acestui tip de experiment, prin prelucrarea a numeroase orificii în zonele de interes de pe corpul studiat, unde se conectează tuburi cu rol de manometre, care permit măsurarea presiunii în fiecare orificiu. O variantă alternativă ar fi utilizarea unei vopsele fluorescente, care își modifică intensitatea luminoasă în funcție de nivelul presiunii.

Proprietățile aerodinamice ale unui obiect realizat la o scară mai mică față de cea reală diferă. Însă, prin determinarea unor tipare de similaritate, se poate obține o corespondență satisfăcătoare între modelul realizat la scară reală și cel realizat la scară redusă. Cei mai utilizați parametri de similaritate sunt:

- similaritatea geometrică, în care toate dimensiunile trebuie realizate la scara stabilită;
- numărul Mach, care ar trebui să fie același pentru ambele modele;
- numărul Reynolds, prin respectarea raportului dintre forțele inerțiale și cele de vâscozitate, pentru ambele modele.

Analiza experimentală a fost realizată în cadrul tunelului aerodinamic subsonic, care permite o funcționare continuă la presiunea atmosferică, viteza maximă a curentului de aer generat de tunel aerodinamic fiind 110 m/s (Mach = 0,32). Secțiunea de testare are pereți solizi și are o dimensiune utilă de aproximativ 2,5 m x 2,0 m x 4 m. Circuitul de lucru al tunelului este de tip închis și permite atingerea unor numere Reynolds de până la 1,5 milioane [84]. Principalul avantaj al acestui tip de tunel este faptul că necesită un consum mai mic de energie, comparativ cu cel de tip deschis, dar nu permite utilizarea fumului pentru vizualizarea curenților din secțiunea de testare.

Parametrii principali ai curgerii în interiorul tunelului aerodinamic sunt următorii:

- Vâscozitate cinematică – $14,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, la o temperatura ambiantă de 16°C;
- Coarda profilului aerodinamic – 186,5 mm, pentru pala la scara 1:1;
- Presiune atmosferică - 101300 Pa, determinată la nivelul laboratorului;
- Viteza sunetului - 340 m/s;
- Densitatea aerului – $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- Viteza de curgere a fluidului - 30 m/s, 40 m/s, 50 m/s;
- Numărul Mach – 0,08824, 0,11764 sau 0,14705, în funcție de viteza de curgere a fluidului;
- Numărul Reynolds - 380612, 507483, respectiv 634354, pentru cele trei viteze de curgere utilizate.

În învelișul modelului de pală au fost create orificii care să permită introducerea tuburilor de măsurare a presiunii statice, de pe suprafețele palei. A fost aleasă această dispunere pentru a nu influența caracteristicile curgerii aerodinamice din jurul palei, astfel încât datele furnizate să fie cât mai apropiate de realitate.

Tuburile de presiune au fost poziționate, astfel încât, să preia valoarea presiunii exercitate de curentul de aer, după care, să transmită această valoare către unitatea de prelucrare și de afișare a tunelului aerodinamic. Au fost utilizate zece tuburi de presiune,

corespunzătoare fiecărui punct de măsurare de pe învelișul palei, toate fiind direcționate pentru a transmite presiunea către piciorul palei, pentru a influența cât mai puțin deplasarea curenților de aer.

Înainte de introducerea palei în tunelul aerodinamic, tuburile de presiune au fost acoperite cu o folie specială, în vederea reducerii, cât mai mult posibil, a rezistența la înaintare cauzată de această excrescență.

Datorită simetriei profilului aerodinamic NACA0012 al palei și pentru simplificarea procesului de prelucrare al palei, toate orificiile de preluare a presiunii aerodinamice au fost poziționate pe o singură față a palei. În vederea obținerii distribuției totale a presiunii de lucru pe toate suprafețele palei, incidența palei va fi modificată, astfel încât, suprafața pe care sunt prezente orificiile, să se comporte pe rând, atât ca intrados, cât și ca extradados.

Pala în forma finală a fost introdusă în interiorul tunelului aerodinamic și a fost încastrată, pentru a i se putea asigura stabilitatea pe durata efectuării testelor. Aceasta a fost poziționată la un unghi de 90° raportat la direcția orizontală, cu bordul de atac orientat către direcția din care acționează curentul de aer. Dispozitivul de încastrare este conectat la un mecanism de acționare, care să permită variația incidenței palei în raport cu direcția de curgere a fluxului de aer.

Poziționarea orificiilor de măsurare a presiunii aerodinamice s-a realizat în trei secțiuni transversale, în puncte esențiale din cadrul bordului de atac, al bordului de fugă, cât și în zona mediană, aparținând extradadosului/intradosului. Dispunerea exactă a acestora, în raport cu dimensiunile palei, este prezentată în figura 4.2.

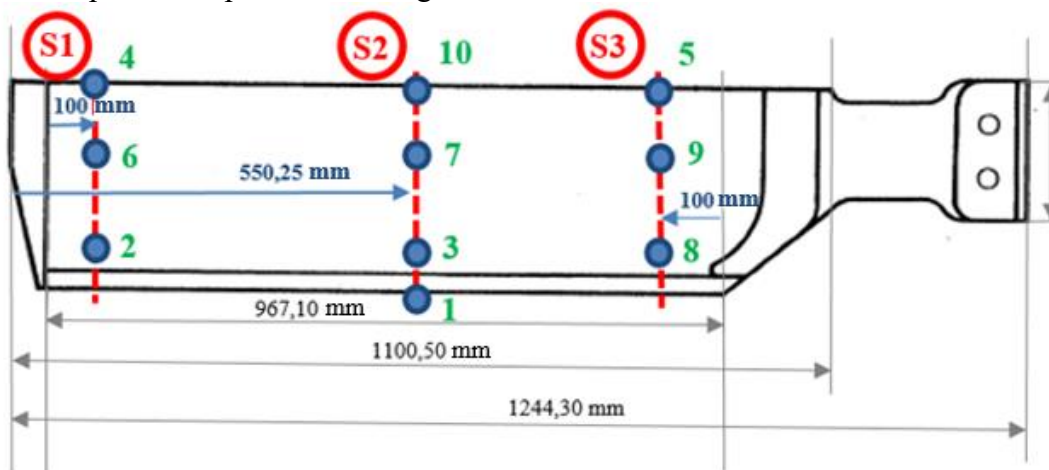


Fig. 4.2 Dispunerea orificiilor realizate pentru măsurarea presiunii aerodinamice

Incidența palei în raport cu direcția de deplasare a curentului de aer reprezintă un parametru extrem de important, de modificarea căruia depinde variația distribuției de presiuni pe suprafețele palei.

În realizarea analizei experimentale efectuate în vederea validării rezultatelor obținute cu programul Fluid Flow, s-au utilizat trei valori de referință din cadrul intervalului de variație a incidenței palei $+2,5^\circ \div -15,5^\circ$. Acestea sunt următoarele:

- 0° - specific unei distribuții simetrice a presiunilor pe cele două fețe ale palei;
- $2,5^\circ$ - valoarea maximă pozitivă a palei;
- $6,5^\circ$ - valoarea la care elicopterul își menține poziția stabilă în raport cu axa de rotație.

Având în vedere faptul că valoarea incidenței de $15,5^\circ$ este extrem de rar întâlnită în exploatarea elicopterelor, atât în analiza numerică, cât și în cea experimentală, această valoare nu a fost luată în considerare. De asemenea, valoarea ridicată a incidenței implică supunerea palei anticuplu la tensiuni mult mai mari, iar pentru a evita deteriorarea sau ruperea materialului s-a preferat realizarea validării experimentale pentru valori de maximum $6,5^\circ$.

Variația incidenței palei s-a realizat în raport cu centrul de presiune al palei, care, pentru profile aerodinamice simetrice, este localizat la 25% din coarda aerodinamică, față de bordul de atac, adică la o distanță de 46,625 mm.

Al doilea parametru în raport cu care a fost realizată analiza experimentală este viteza curentului de aer. Deși, viteza reală la vârful palei, în timpul zborului la punct fix al elicopterului, poate ajunge până la o valoare maximă de 206,5 m/s, analiza experimentală a fost realizată doar pentru viteze reduse ale curentului de aer (30 m/s, 40 m/s, 50 m/s), cu scopul de a proteja integritatea structurală a palei supusă solicitărilor aerodinamice.

4.5 Compararea rezultatelor obținute experimental cu rezultatele determinate folosind programul Fluent Flow

Compararea valorilor determinate experimental cu rezultatele analizelor numerice de curgere a fluidului în jurul palei reprezintă o etapă esențială pentru validarea rezultatelor analizei numerice, astfel încât să existe certitudinea că structura studiată este încărcată similar cazurilor reale. Deși, în cazul incidenței nule, distribuția de presiuni este simetrică pe ambele fețe ale palei, valoarea maximă fiind atinsă în zona bordului de atac, creșterea incidenței duce la mărirea ariei afectate de impactul direct al curentului de aer și, simultan, la apariția unei presiuni pozitive, pe suprafața opusă fiind generată o presiune aerodinamică negativă.

Pentru a facilita comparația dintre rezultatele determinate experimental și rezultatele determinate prin analiza numerică, sunt necesare următoarele specificații:

- porturile de presiune cu numerele 4, 5 și 10 sunt utilizate pentru a determina presiunea pe bordul de atac al palei;
- portul de presiune numărul 1 este utilizat pentru a determina valoarea presiunii pe bordul de fugă al palei;
- porturile de presiune cu numerele 2, 3, 6, 7, 8, 9 sunt utilizate pentru determinarea presiunii de lucru pe intradosul/extradosul palei, în funcție de incidența palei.

Având în vedere aceste mențiuni, comparația poate fi realizată între cele două seturi de rezultate, pentru principalele zone de interes ale palei: bordul de atac al palei anticuplu, bordul de fugă al palei anticuplu și extradosul/intradosul palei anticuplu.

Rezultatele obținute în ambele cazuri (analiză numerică și experimentală) indică o tendință de creștere a presiunii, proporțional cu creșterea vitezei aerului, valorile maxime fiind atinse pentru o viteză de curgere a aerului egală cu 50 m/s.

Presiunea pozitivă maximă este localizată pe toată lungimea bordului de atac al palei, în timp ce presiunile pe extrados, pe intrados și pe bordul de fugă au valori predominant negative, fapt confirmat și prin analiza experimentală.

În ceea ce privește incidența palei, tendința generală este de creștere a presiunii pe pală odată cu creșterea incidenței, pentru incidențele pozitive, respectiv de scădere a presiunii aerodinamice, odată cu scăderea incidenței, pentru incidențele negative.

Referitor la erorile relative determinate, se poate afirma faptul că diferențele constatate între valorile determinate experimental și rezultatele aflate folosind analiza numerică se datorează aproximărilor dimensionale ale palei modelate folosind metoda elementelor finite, presiunile aerodinamice determinate fiind totuși realiste ca valoare și putând fi folosite pentru analizele numerice ulterioare ale unei pale anticuplu, realizată din materiale compozite. Rezultatele obținute pentru zona bordului de atac al palei sunt cele mai apropiate ca valoare de datele obținute experimental, în timp ce pe extradosul, intradosul și bordul de fugă al palei apar, în anumite situații, diferențe relativ mari, din cauza apariției și intensificării turbulențelor în avalul palei și de asemenea, urmare a suprafețelor neregulate localizate pe modelul palei utilizată în cadrul analizei experimentale.

Având în vedere faptul că eroarea medie pentru fiecare punct de măsurare a presiunii este, la nivel global, sub 20%, se poate concluziona că cele două cazuri studiate sunt comparabile ca mărime și că rezultatele experimentale validează rezultatele obținute folosind analiza numerică.

4.6 Concluzii

În vederea realizării studiului aerodinamic al unei pale anticuplu, este necesară înțelegerea modului în care se realizează curgerea fluidului în jurul acesteia și a modului în care fluidul interacționează cu pala studiată.

Analiza numerică prin intermediul modulului Fluid Flow din cadrul programului Ansys Workbench reprezintă o modalitate bună de determinare a distribuției de presiune pe suprafețele palei anticuplu. Aceste valori pot fi întrebuințate ulterior în vederea studierii comportamentul mecanic al palei în condiții similare celor din timpul zborului.

Utilizarea tunelului aerodinamic aparținând INCAS a condus la o bună validare experimentală a rezultatelor analizelor numerice. Pentru a permite realizarea comparației între analiza numerică și analiza experimentală și, în același timp, pentru a realiza validarea rezultatelor analizei numerice, cele două analize au fost realizate pentru o viteză constantă în lungul palei, din cauza faptului că, prin utilizarea tunelului aerodinamic în cadrul studiului experimental, nu este permisă variația vitezei în lungul palei, similar cu funcționarea rotativă a rotorului anticuplu, la o turație de 1278 rot/min.

Pentru a prezerva integritatea structurală a palei, analiza experimentală a fost realizată numai pentru următoarele viteze reduse de curgere a aerului: 30 m/s, 40 m/s și 50 m/s.

Presiunile aerodinamice obținute în urma analizei numerice sunt similare ca valoare cu cele obținute în urma încercărilor experimentale, motivele principalelor diferențe constatate între cele două seturi de rezultate fiind micile aproximări dimensionale realizate în modelarea palei, apariția și intensitatea turbulențelor, posibila modificare ușoară a aerodinamicii palei ca urmare a prelucrării învelișului în vederea realizării încercărilor experimentale etc.

În concluzie, cele două seturi de rezultate sunt similare, făcând astfel posibilă o analiză ulterioară a comportamentului mecanic al palei anticuplu, utilizând încărcarea aerodinamică determinată prin intermediul analizei numerice.

5. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ȘI ELASTICE ALE MATERIALELOR CARE COMPUN PALA ANTICUPLU COMPOZITĂ

5.1 Stabilirea soluției constructive și a materialelor de fabricație

Cercetarea materialelor compozite cu aplicabilitate în structuri aeronautice, realizată în capitolul 1, a condus la alegerea următoarelor materiale, pentru fiecare componentă a palei anticuplu:

- material compozit laminat ranforsat cu fibre de carbon pentru învelișul palei anticuplu, având la bază următoarele componente:
 - matricea din rășina epoxidică Momentum 470-300 produsă de firma Derakane, indicată în special pentru materiale compozite ranforsate cu fibre fabricate manual prin metoda “hand lay-up”; conform fișei tehnice oferite de producător, aceasta are proprietăți mecanice foarte bune la temperaturi ridicate, o rezistență chimică deosebită și o maleabilitate mai bună comparativ cu alte produse similare.
 - țesătura twill 2/2 din fibră de carbon 0°/90°, model GG285T, fabricată de producătorul Castro Composites, având 3000 fibre de carbon pe filament și o densitate liniară a țesăturii de 200 tex.
- fibre de carbon unidirecționale (roving) pentru lonjeronul palei anticuplu, fiind ales modelul T300 de la Torayca; materialul a fost utilizat în aplicații aerospațiale în ultimii 30 de ani, fiind astfel pretabil pentru aplicații cu solicitări ridicate.
- filament din polietilenă clorurată, conținând microfibre de carbon, pentru realizarea prin extrudare termoplastică a miezului de tip fagure al palei anticuplu; modelul CPE CF112 Carbon produs de Fillamentum Manufacturing a oferit cel mai bun raport calitate-preț pentru realizarea acest obiectiv, fiind indicat pentru aplicații cu încărcare de lungă durată, datorită rezistenței ridicate la uzură [29].

Din cauza complexității comportamentului ortotrop al materialelor compozite în comparație cu materialele izotrope, există numeroase moduri în care acestea pot ceda, cele mai importante fiind:

- *Ruperea materialului compozit la întindere* - se poate datora ruperii fibrelor, din cauza solicitărilor mari pe direcția de dispunere a acestora sau din cauza ruperii matricei, urmare a concentrării tensiunii în jurul fibrelor sau ca urmare a tensiunilor transversale mari pe direcția fibrelor;
- *Ruperea materialului compozit la compresiune:*
 - Compresiunea pe direcția fibrelor poate duce la ruperea sau la voalarea acestora, precum și la cedarea matricei din cauza forțelor tăietoare;
 - Compresiunea în planul transversal direcției fibrelor poate duce la zdrobirea matricei și/sau a fibrelor sau la apariția delaminărilor;
- *Ruperea materialului prin forfecare* - apare datorită concentratorilor de tensiune aflați la nivelul fibrelor sau al matricei.

Descrierea tehnică a fiecărui material a fost realizată în subcapitolele următoare, precedând încercarea experimentală a acestora, pentru determinarea principalelor caracteristici mecanice și elastice.

5.2 Determinarea caracteristicilor mecanice și elastice ale miezului de tip fagure realizat prin extrudare termoplastică, solicitat la întindere și compresiune

Structura fagure realizată prin extrudare termoplastică este folosită pentru realizarea miezului interior al palei, situat între lonjeronul de rezistență și învelișul din pereți subțiri.

Materialul de bază ales pentru această structură, în baza cercetărilor efectuate în capitolele anterioare, este un elastomer din polietilenă clorinată (CPE) ranforsat cu fibre de carbon măcinate, cu dimensiuni aproximative de 100 μm lungime. Acest material are caracteristici optime pentru aplicații cu încărcări continue de lungă durată, fiind caracterizat de o rezistență deosebită la uzură, duritate mare și rezistență satisfăcătoare la majoritatea agenților chimici.

În vederea determinării caracteristicilor mecanice la întindere a fost utilizat sistemul pentru încercări axiale statice și dinamice INSTRON 8872, prevăzut cu extensometru digital. Un tip de epruvetă specifică fiecărei direcții de extrudare a materialului a fost studiat folosind sistemul de corelare digitală a imaginilor, în vederea evaluării modului de variație a proprietățile materialului în funcție de direcția de fabricație, precum și pentru a determina coeficientul lui Poisson.

Astfel, pentru a ține seama de caracterul ortotrop al acestui material, dată fiind distribuția aleatoare a microfibrilor de carbon în interiorul acestuia și a modului în care prezența și orientarea acestora afectează comportarea materialului, extrudarea termoplastică a epruvetelor s-a realizat pe trei direcții principale (fig 5.1).

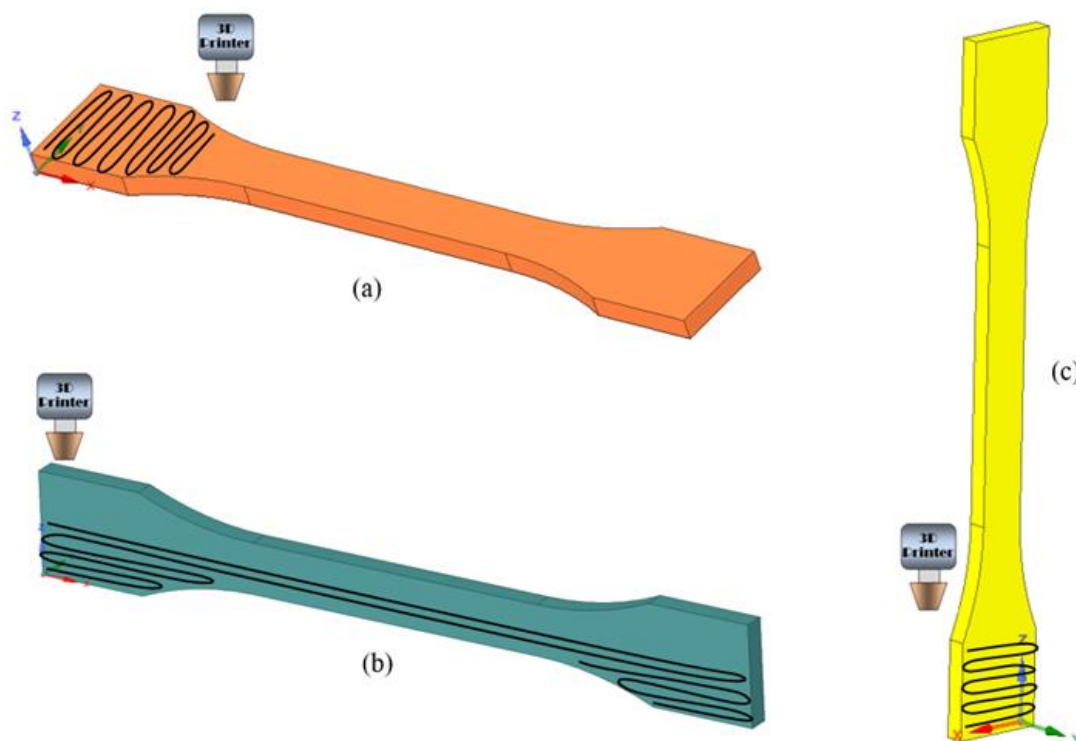


Fig. 5.1 Principalele direcții de realizare a epruvetelor: (a) epruvetă orizontală (în planul XY), b) epruvetă laterală (în planul XZ), c) epruvetă verticală (în planul XZ)

Pentru a permite o identificare mai ușoară a tipului de epruvetă, au fost utilizate următoarele notații: *epruvete XY* – pentru cele fabricate în plan orizontal (fig. 5.1(a)), *epruvete XZ1* – pentru cele fabricate în plan lateral (fig. 5.1(b)) și *epruvete XZ2* pentru cele extrudate în plan vertical (fig. 5.1(c)).

A. Evaluarea răspunsului mecanic sub acțiunea forțelor de tracțiune pentru epruvetele XY fabricate în plan orizontal

Primele patru epruvete au fost construite pe baza orizontală a imprimantei 3D, poziționată conform figurii 5.1 (a). Această orientare permite o definire satisfăcătoare a profilului exterior al piesei, dată fiind poziționarea facilă. Determinarea caracteristicilor mecanice se va efectua folosind sistemul INSTRON 8872 și extensometrul digital.

Graficul tensiuni-deformații denotă faptul că epruvetele XY-3 și XY-4 au o rezistență mai mare la rupere comparativ cu XY-1 și XY-2, ruperea materialului intervenind la o deformație specifică de peste 3%. Variația, în ceea ce privește deformațiile specifice maxime, se datorează dispersiei microfibrilor de carbon în interiorul filamentului termoplastice, care au ca rezultat creșterea performanțelor sau diminuarea performanțelor, în funcție de alinierea microfibrilor cu direcția de tracțiune.

Principala caracteristică a acestei orientări, care rezultă din măsurătorile efectuate, este gradul ridicat de elasticitate. Alungirea specifică medie pe care o suportă epruvetele încercate este de aproximativ 1,85%, fapt care denotă o comportare elastică satisfăcătoare a materialului extrudat pe această direcție.

Rezultatele experimentale au reliefat obținerea unor proprietăți mecanice de tracțiune relativ similare epruvetelor XY extrudate în plan orizontal. Cu o rezistență medie la rupere de 47,29 MPa, aceste epruvete sunt cu 50% mai rezistente decât epruvetele fabricate vertical și cu 5,15% mai rezistente decât epruvetele imprimate în planul orizontal. Curba tensiuni-deformații specifice prezintă o scădere ușoară a tensiunii după trecerea de punctul corespunzător tensiunii maxime, urmată de cedarea materialului.

Caracteristicile mecanice obținute în urma încercărilor la tracțiune pentru acest tip sunt marcate de o precizie ridicată, datorită coeficientului de variație foarte redus, aflat sub valoarea de 5%.

Comparativ cu valorile oferite de producător prin fișa tehnică a filamentului CPE CF112 Carbon, rezultate sunt similare cu cele obținute pentru direcția de imprimare XZ1, oferind astfel o comportare mecanică similară pe cele două direcții de fabricație. Secțiunea centrală are o arie aproximativ constantă, de 10 mm x 4 mm. Fenomenul de gătuire nu a fost observat în cazul niciuneia dintre epruvetele extrudate încercate la tracțiune.

Rezultatele obținute pot fi considerate corecte prin prisma faptului că ruperea materialului are loc, cel mai frecvent, în secțiunea centrală a epruvetelor de tracțiune. Lipsa unei zone de gătuire este o confirmare a faptului că materialul compozit are o ductilitate redusă, fiind mai degrabă caracterizat de un comportament fragil.

B. Evaluarea răspunsului mecanic sub acțiunea forțelor de tracțiune pentru epruvetele XZ1 fabricate în plan lateral

Modalitatea de imprimare pe lateralul epruvetei a fost realizată folosind suporturi de susținere, pentru a prezerva geometria epruvetei și pentru a corespunde orientării din figura 5.1 (b).

A rezultat o evoluție similară a graficului tensiuni-deformații specifice pe segmentul 0,05 % - 0,15 %, pentru toate cele patru epruvete studiate. Acest fapt se datorează unei densități constante de material în corpul epruvetei, în corelație cu modulul de elasticitate, a cărui valoare medie este de 4783,22 MPa, având o variație foarte redusă, de doar 0,65%. Comparativ cu epruvetele tip XY și XZ2, acest tip de epruvete deține cel mai ridicat modul de elasticitate.

Tensiunea de curgere corespunzătoare unei deformații plastice de 0,2% are valoarea medie de aproximativ 38,86 MPa. Importanța acestui parametru constă în faptul că este folosit frecvent de către producătorii de materiale din domeniul ingineresc pentru a caracteriza comportarea mecanică a materialului.

Ruperea s-a produs printr-o secționare aproximativ orizontală a materialului, la o valoare medie a tensiunii de 44,97 MPa, prezentând o deviație standard relativ redusă, de 1,87 MPa. Valoarea redusă a deviației confirmă faptul că materialul are o comportare

mecanică aproape constantă, precum și faptul că nu există factori implicați în procesul de fabricație care ar putea să determine valori inconstante.

Coeficientul de variație are o valoare sub 5%, pentru toate încercările experimentale efectuate și pentru toți parametrii de referință măsurati, indicând un grad de precizie ridicat al testelor. Justificarea practică o reprezintă calitatea procesului de extrudare termoplastică, proces care produce componente similare din punct de vedere calitativ.

Prin compararea rezultatelor cu datele oferite de producător, se poate observa faptul că epruvetele fabricate în această direcție au un modul de elasticitate dublu față de cel prezentat de producător. Pe de altă parte, valoarea medie a limitei de curgere este cu 34% mai redusă față de datele afișate în fișa tehnică. Date fiind deviația standard și coeficientul de variație reduse, rezultatele obținute pot fi considerate ca fiind în limita de acceptabilitate.

Cedarea materialului s-a produs subit, în proximitatea secțiunii centrale, în cazul unor epruvete și către capete în cazul altor epruvete. Dat fiind faptul că acestea sunt imprimate cu filamentul extrudat pe direcția de încercare la tracțiune a materialului, materialul va deține proprietăți superioare în cazul direcțiilor tip XY și XZ1, având un caracter continuu, comparativ cu direcția de imprimare XZ2.

Având în vedere faptul că această direcție de imprimare oferă cel mai mare modul de elasticitate, se poate deduce faptul că structurile fabricate astfel își vor păstra mai bine caracteristicile geometrice inițiale sub efectul prelungit al solicitărilor exterioare.

C. Evaluarea răspunsului mecanic sub acțiunea forțelor de tracțiune pentru epruvetele XZ2 imprimate în plan vertical

Epruvetele de tracțiune realizate pe direcția verticală, conform figurii 5.1 (c) constituie ultima direcție de imprimare abordată. Ținând seama de modalitatea de suprapunere a straturilor de material, secțiunea de rupere va fi localizată în zona adeziunii dintre straturile de filament extrudat, datorită legăturilor intermoleculare slabe dintre straturile elastomerului din polietilenă clorinată. Astfel, microfibrele de carbon joacă un rol mai puțin important în rezistența materialului, datorită faptului că nu pot prelua încărcarea.

După pragul tensiunii de 31,50 MPa intervine ruperea epruvetelor prin desprinderea straturilor de material, în secțiunea unde adeziunea dintre straturi este cea mai slabă. În contextul lipsei defectelor de fabricație, ruperea materialului se produce când forța de întindere depășește forța de adeziune a materialului. Totuși, erorile de fabricație, precum maturarea incompletă, variațiile de temperatură sau apariția porozităților, pot diminua performanțele materialului și pot reprezenta factorul declanșator al ruperii.

Limita de curgere corespunzătoare unei deformații plastice de 0,2% este de aproximativ 29,56 MPa, rezistența la rupere medie are valoarea de 31,50 MPa, în timp ce deformația specifică a epruvetelor este mai redusă, comparativ cu direcțiile de imprimare anterioare. Comparativ cu epruvetele anterioare încercate la întindere, ruperea intervine mult mai rapid, cele două secțiuni ale materialului detașându-se complet. Se poate remarca evoluția predominant liniară a curbei tensiuni-deformații specifice, comparativ cu testele de tracțiune anterioare. Performanțele reduse ale epruvetelor XY2 se confirmă prin valoarea medie a modulului de elasticitate longitudinal, fiind mai redusă cu 29,62% decât epruvetele fabricate în plan lateral și cu 33,62% mai mică decât în cazul epruvetelor fabricate în plan orizontal.

Coeficientul de variație are o valoare sub 1,40%, pentru primele trei caracteristici mecanice elastice determinate, în timp ce deformația specifică are o variație de 6,53%. Acest aspect poate fi rezultatul diferenței timpului de maturare a fiecărei epruvete, prima epruvetă având un timp mai mare alocat pentru uniformizarea materialului în timp ce ultima a avut un timp mai redus, toate fiind preluate simultan din interiorul dispozitivului de fabricație. Variațiile relativ reduse oferă un grad de ridicat de încredere, în ceea ce privește precizia rezultatelor experimentale.

În raport cu datele oferite de către producător, caracteristicile mecanice sunt în ansamblu mai slabe, excepție făcând modulul de elasticitate, care are valori similare. Comparativ cu epruvetele studiate anterior, această orientare oferă performanțe net inferioare. Astfel, în cadrul palei compozite se va evita orientarea direcției de fabricație perpendicular pe direcția de tracțiune.

D. Evaluarea încercărilor la tracțiune folosind procedeul DIC

În vederea obținerii unui set de date cât mai precis și relevant pentru materialele studiate, câte un tip din epruvetele corespunzătoare celor trei orientări studiate anterior, au fost supuse aceluiași solicitări la tracțiune, caracteristicile mecanice rezultând din procesul imagistic digital (DIC). În acest mod, se poate realiza o evaluare comparativă a celor două procedee de măsurare a caracteristicilor de material.

Prin compararea datelor obținute de la extensometrul digital, cu rezultatele determinate folosind corelarea imagistică digitală a rezultat o diferență minoră în ceea ce privește deformația materialului, acest lucru fiind mai degrabă o caracteristică a epruvetei și nu a metodei de măsurare utilizate. Evoluția curbelor tensiuni-deformații specifice se încadrează, ca alură, cu încercările anterioare efectuate pentru fiecare tip de epruvetă în parte.

Caracteristicile mecanice măsurate folosind sistemul DIC au valori similare cu cele din încercările anterioare, neexistând diferențe notabile în ceea ce privește valorile măsurate. Astfel, se poate concluziona faptul că metodele de evaluare au un nivel similar de precizie, setul de date curent putând fi utilizat pentru determinarea valorilor medii necesare în cadrul simulărilor numerice.

E. Evaluarea răspunsului mecanic sub acțiunea solicitărilor de compresiune. Analiza comparativă dintre CPE și aliajul de aluminiu 5052

Proprietățile mecanice ale materialelor ductile sunt aproape identice în ceea ce privește încercările la tracțiune și la compresiune. Rezultatele sunt totuși diferite în ceea ce privește materialele fragile, precum compozitele armate cu fibre, fiind astfel necesare ambele tipuri de încercări pentru a obține o caracterizare completă a proprietăților mecanice.

Caracteristicile de compresiune ale structurii fagure au fost determinate folosind sistemul de încercare experimentală INSTRON 8872, echipat cu adaptoare specifice tipului de încercare. Încercarea experimentală la compresiune s-a realizat pentru 12 epruvete cubice, cu celule hexagonale, dintre care patru au fost fabricate prin extrudarea termoplastică a filamentului CPE ranforsat cu microfibre de carbon, iar opt au fost realizate din aluminiu, conform specificațiilor NIDA 2.3-3/8-.0015 P(5052).

Tensiunile și deformațiile pentru încercarea la compresiune a ambelor materiale, au fost determinate folosind sistemul de corelare digitală a imaginilor, epruvetele fiind anterior vopsite în culori contrastante pentru a facilita efectuarea măsurătorilor de către sistem.

Forța aplicată are o evoluție aproximativ liniară pentru toate cele patru epruvete supuse solicitărilor la compresiune. Maximul acesteia este atins în intervalul 1,2892÷1,4065 kN, rezultând o forță de acționare medie de aproximativ 1,3614 kN.

Deplasarea maximă realizată pe timpul compresiunii are valori similare pentru toate epruvetele, fiind situată în proximitatea pragului de 1,30 mm. Raportat la înălțimea structurii fagure de 80 mm, rezultă faptul că la momentul cedării materialului, epruveta a fost comprimată cu aproximativ 1,625 % din înălțimea inițială.

Variația aproximativ liniară a graficului reprezintă efectul aplicării uniforme a forței de compresiune, fiind corespunzătoare unei valori de 2 mm/minut, respectiv 0,0325 mm/secundă. Condiția de rupere a epruvetelor a survenit după aproximativ 38 de secunde, sub acțiunea solicitărilor de compresiune.

Comportamentul mecanic al epruvetelor studiate este similar pentru toate cele patru încercări experimentale. Panta de urcare a curbei tensiuni-deformații specifice este relativ identică pe toată durata încercărilor. Tensiunea echivalentă minimă a fost identificată la

epruveta numărul 3, având valoarea de 1,2567 MPa, corespunzătoare unei deformații specifice de aproximativ 30,89 %. În schimb, rezistența la rupere maximă corespunde epruvetei numărul 4, cu o valoare de 1,4617 MPa la o deformația echivalentă de 31,47%.

Cedarea materialului pe timpul solicitării la compresiune este caracterizată de apariția delaminării între straturile de material extrudat. Rigiditatea materialului are ca efect deplasarea straturilor de material în direcțiile laterale, conducând astfel la deformarea celulelor hexagonale ale fagurilor. Caracterul pregnant al delaminărilor este cel mai vizibil pe laturile libere ale fagurelui, unde structura are cel mai mic nivel de consolidare. Ruperea propriu-zisă a cordoanelor de material extrudat nu a fost localizată pentru niciuna dintre epruvetele solicitate. Deformația materialului a avut un caracter progresiv, direct proporțional cu forța de compresiune aplicată, nefiind identificat niciun punct propriu-zis de cedare a materialului.

Valoarea medie a modulului de elasticitate la compresiune, rezultat în urma încercărilor experimentale, este mai ridicată decât valoarea de 2200 MPa prezentată în fișa tehnică a materialului. Această diferență denotă faptul că materialul evoluează mai bine în condiții de compresiune decât în condiții de întindere, fiind astfel pretabil pentru utilizarea ca miez central în interiorului palei anticuplu.

În schimb, tensiunea normală medie la compresiune reprezintă 83% din valoarea prezentată de producător pentru încercarea la întindere, la momentul cedării materialului. Această tensiune atinge valori mai mari la solicitarea prin întindere datorită microfibrilor de carbon dispersate în material și orientate pe direcția încărcării.

Încercarea la compresiune a fagurilor din aliaj de aluminiu 5052 s-a realizat în aceleași condiții precum încercarea la compresiune a materialului extrudat termoplastic. Opt epruvete de tip fagure au fost extrase dintr-un panou NIDA 2.3-3/8-.0015 P(5052) în vederea determinării caracteristicilor mecanice la solicitarea prin compresiune.

Dimensiunea totală a acestora a fost măsurată astfel încât, suprafața totală pe care este aplicată forța de compresiune de către celula de forță, să fie comparabilă pentru epruvetele de tip fagure realizate din ambele categorii de materiale.

Având în vedere coeficientul de variație de doar 8,26%, se poate deduce faptul că aliajul de aluminiu sub forma fagurelui NIDA are o comportare mecanică relativ constantă.

Din analiza rezultatelor obținute pentru cele două tipuri de materiale supuse analizei, se pot afirma următoarele aspecte:

- aliajul de aluminiu permite atingerea unei forțe de compresiune mai mari în domeniul liniar-elastic al materialului, într-un interval de timp semnificativ mai scurt, în comparație cu polimerul extrudat, în condițiile unei solicitări identice; Acest aspect denotă o încărcare mai rapidă, precum și o cedare mai rapidă a acestui material;
- curba tensiuni-deformații a filamentului extrudat termoplastic indică o evoluție constantă odată cu creșterea solicitărilor aplicate, ruperea materialului intervenind la o deformație mult superioară aliajului din aluminiu;
- date fiind densitățile celor două materiale, se poate concluziona faptul că polimerul termoplastic reduce masa totală a miezului fagure cu aproximativ 34,1% față de aliajul de aluminiu; de asemenea, alte îmbunătățiri induse de această modificare sunt rezistența chimică, rezistența la coroziune, precum și rezistența la solicitări prelungite.

Având în vedere natura solicitărilor, precum și comportamentul aeroelastic al structurilor aviatice, se poate concluziona faptul că filamentul din polietilena clorinată ranforsată cu microfibre de carbon este un bun înlocuitor pentru fagurele NIDA fabricat din aliaj de aluminiu 5052, oferind performanțe bune în vederea utilizării ca miez fagure pentru pala anticuplu realizată din materiale compozite.

5.3 Determinarea caracteristicilor de material pentru lonjeronul de rezistență al palei

Lonjeronul palei reprezintă structura principală de rezistență înglobată în interiorul palei, fiind cuprins de învelișul din compozit laminat și de fagurele obținut prin extrudare termoplastică, pe aproximativ toată lungimea acestuia.

Această structură este fabricată din roving de carbon, reprezentând gruparea filamentelor de fibre de carbon, paralele unele față de celelalte, ținute împreună prin intermediul unui adeziv. Fabricația roving-urilor se realizează manual prin îmbinarea progresivă a filamentelor de carbon cu rășină epoxidică.

Data fiind poziționarea fibrelor de carbon pe axa longitudinală a lonjeronului, capacitatea portantă a acestora este maximă, întinderea fibrelor datorată forței centrifuge și a solicitărilor aerodinamice având loc pe această direcție.

Comportarea mecanică a materialului a fost studiată experimental pentru cazul încercărilor la tracțiune. Testele de tracțiune au fost realizate pe sistemul de încercare uniaxială INSTRON 8872, pentru un număr total de cinci epruvete de tip halteră (“dog-bone”). Sistemul de încercare măsoară, prin intermediul traductoarelor încorporate, valorile forței aplicate, ale deplasării, precum și durata încercărilor.

Graficul tensiuni-deformații specifice relevă o evoluție similară pentru toate epruvetele fabricate din roving de carbon, pentru intervalul deformațiilor specifice 0,01% – 0,7%. Determinarea modulului de elasticitate, ca pantă a curbei tensiuni-deformații s-a realizat pentru intervalul deformațiilor 0,01 % - 0,5 %, rezultând o valoare medie de 65,839 GPa. Rezistența la rupere medie determinată în momentul care precede cedarea materialului are o valoare de 587,77 MPa și se manifestă prin ruperea matricei și prin apariția delaminării.

Curba tensiuni-deformații specifice are un caracter elastic biliniar pentru toate epruvetele încercate la tracțiune, aspect cel mai vizibil pentru epruvetele nr. 2, 4 și 5.

A șasea epruvetă de acest tip a fost utilizată pentru o încercare provizorie, pentru a stabili condițiile de desfășurare a testului și capacitatea sistemului de a rupe materialul ales. Timpul necesar pentru atingerea rezistenței la rupere variază în intervalul 65÷100,6 secunde, media fiind de 79,82 secunde.

Cedarea materialului intervine la deformații specifice diferite ale materialului, variind pe o plajă de valori cuprinsă între 0,86% ÷ 1,42%. Rezultatele obținute se situează la un nivel mai redus, comparativ cu valorile de rezistență ale fibrelor oferite de fabricant. Ținând cont de acest aspect și de faptul că vizual nu a putut fi identificată ruperea fibrelor, rezultă faptul că cedarea materialului compozit este rezultatul ruperii matricei din rășină epoxidică, manifestată local prin apariția delaminării straturilor de material.

5.4 Determinarea caracteristicilor de material pentru învelișul palei anticuplu

Învelișul reprezintă structura care înglobează componentele de rezistență principale, oferind palei anticuplu rezistență și forma sa aerodinamică. Acesta este fabricat dintr-un material compozit multistratificat, care are la bază următoarele materiale:

- Țesatură din fibre de carbon twill 2/2, care asigură un nivel ridicat de rezistență, oferind performanțe egale la tracțiune atât pe direcția bătăturii, cât și pe direcția urzelii.
- Rășina epoxidică utilizată ca adeziv este cea mai indicată în vederea realizării materialelor compozite ranforsate cu fibre de carbon, deoarece asigură o aderență foarte bună, oferind, în același timp, un raport rezistență-masă foarte bun.

Epruvetele de tracțiune au fost realizate din 12 lamine de țesătură de fibră de carbon, îmbinate cu rășină epoxidică, rezultând o grosime totală de aproximativ 3,96 cm a

epruvetelor. Învelișul palei compozite a fost realizat dintr-un număr de trei lamine suprapuse, rezultând astfel un material compozit laminat unitar, cu o grosime aproximativă de 1 mm.

A. Evaluarea comportării mecanice la tracțiune a materialului realizat dintr-o singură lamină

Prin studiul unei singure lamine compozite pot fi analizate caracteristicile deformațiilor și tensiunilor care se manifestă la nivelul componentelor elementare ale unei țesături din fibre de carbon (bătătură și urzeală), dispuse perpendicular una față de alta. Programul de procesare a imaginilor Istra 4D a fost programat pentru a prelua până la 500 de cadre în momentul încercării experimentale, la o frecvență de 5Hz.

Extremitățile epruvetelor unilaminare au fost ranforsate prin lipirea cu un adeziv puternic a unor segmente din aluminiu pe ambele fețe ale epruvetei, astfel încât, să se evite ovalizarea orificiilor de prindere (fapt constatat din încercările preliminare) și să se permită încărcarea corespunzătoare a compozitului.

Țesătura twill 2/2 utilizează fibre de carbon de tip 3K, pe două direcții de bătătură și două direcții de urzeală, rezultând astfel efectul vizual al unor linii diagonale. Dat fiind numărul ridicat de fibre utilizate, țesătura are un caracter opac, o grosime consistentă și o durabilitate ridicată.

Au fost utilizate în total zece epruvete, pentru acest tip de încercare experimentală, cinci dintre acestea fiind tăiate de-a lungul bătăturii urzelii (fiind notate cu litera „U” în figura anterioară), iar celelalte cinci au fost tăiate de-a lungul bătăturii (notate cu litera „B”).

Încercările experimentale au fost realizate cu scopul determinării caracteristicilor mecanice ale materialului (modulului lui Young și coeficientul lui Poisson). Dată fiind rezistența ridicată a țesăturii, precum și puterea redusă a motorului de tracțiune, nu a fost posibilă atingerea rezistenței la rupere a materialului. Forța de tracțiune maximă aplicată epruvetelor este cuprinsă în intervalul 493-602 N.

Valoarea medie a modulului de elasticitate longitudinal este 23585,49 MPa, relativ similară cu valoarea medie a epruvetelor tăiate pe direcția urzelii, în timp ce coeficientul lui Poisson are o valoare medie de 0,3495. Datorită valorii relativ mari a coeficientului de contracție transversală pentru epruveta B₁ comparativ cu restul testelor, aceasta nu a fost folosită pentru determinarea valorilor medii specificate anterior.

Proximitatea valorilor obținute pentru cele două tipuri de epruvete confirmă faptul că materialul poate fi considerat izotrop pe două direcții. Astfel, poate fi estimată o valoare medie pentru proprietățile mecanice ale unei singure lamine, care vor constitui baza simulărilor numerice viitoare.

Graficul tensiuni-deformații relevă o variație similară pentru toate cele cinci epruvete studiate, diferența majoră constând în cazul epruvetei U₂, ale cărei variații liniar-elastice sunt mult mai reduse decât media generală. Datorită consolidării cu aluminiu a extremităților epruvetelor, se poate deduce că variația curbei tensiuni-deformații specifice este neregulată pe prima porțiune a solicitării, până când se realizează tensionarea corespunzătoare a materialului.

Raportat la forța aplicată, de aproximativ 500 N, tensiunile maxime rezultate în cadrul încercărilor experimentale se situează în jurul valorii de 120 MPa. Având în vedere caracteristicile celor două materiale de bază, această valoare este suficientă pentru a rupe sau a produce fisurarea rășinii epoxidice întărite, însă este mult prea mică pentru a depăși limita de elasticitate a țesăturii din fibră de carbon.

În vederea studierii comportării microscopice a epruvetelor de tracțiune, au fost prezentate mai multe secvențe din cadrul programului Istra 4 D. Deplasările pe direcția Z (perpendicular pe planul epruvetelor) sunt determinate de programul de analiză cu eliminarea mișcării de corp rigid (RMBR - Rigid Body Movement Removed), pentru o vizualizare mai precisă a deplasării fibrelor din componența țesăturii (5.2). Se poate observa tensionarea

bătăturii celor două epruvete, care se poziționează pe toată lungimea materialului. Deplasarea maximă este reliefată prin culoarea roșie, fiind fibrele de bățură, care se retrag către planul orizontal al materialului, timp în care fibrele de urzeală rămân într-o postură mai detensionată. Deplasarea fibrelor de carbon produce efectul unor linii diagonale, dată fiind construcția twill 2/2 a țesăturii. Efectul similar este prezentat și în cazul deformațiilor, pentru epruvetele având urzeala pe direcția de tracțiune, cu mențiunea că, direcțiile diagonale care reflectă tensionarea sunt poziționate în oglindă față de setul anterior de epruvete.

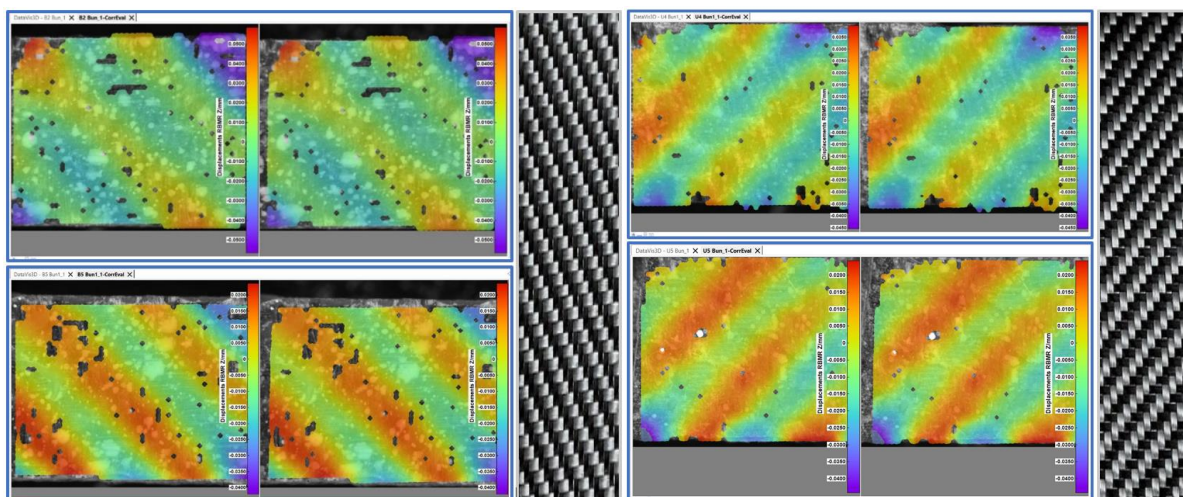


Fig. 5.2 Deplasarea pe direcția Z a epruvetelor B₂, B₅ și U₄, U₅

Deformația specifică a materialelor prezintă o distribuție similară a codurilor de culoare, reliefând prezența valorilor maxime pe componentele țesăturii, unde solicitarea este maximă. În partea dreaptă a figurilor se poate observa poziționarea țesăturii twill 2/2 din fibră de carbon, de unde reiese corespondența valorilor maxime din program cu modul de îmbinare a țesăturii.

Segmentele din figuri care nu sunt colorate, indică nodurile discretizării care nu au putut fi urmărite de către programul software pe timpul încercărilor experimentale, fără a modifica efectul global asupra materialului, care rămâne clar vizibil.

Deplasările materialului pe direcția Z sunt un indicator al retracției acestuia către planul orizontal de simetrie, reducând grosimea materialului pe măsura rigidizării progresive. În cadrul unui compozit laminat multistratificat, efectul local observat poate conduce la apariția delaminării între straturile de material adiacente, datorită slăbirii adeziunii rășinii epoxidice.

B. Evaluarea comportării mecanice, sub acțiunea forțelor de întindere, a compozitului laminat multistratificat

Materialul utilizat pentru realizarea învelișului palei este un compozit laminat, realizat din țesătură de carbon și rășină epoxidică, oferind o rezistență la întindere mult mai mare decât filamentul extrudat termoplastic. Au fost utilizate în total cinci epruvete de tip halteră (“dog-bone”), patru fiind caracterizate conform datelor oferite de celula de forță a echipamentului, iar ultima a fost studiată folosind sistemul DIC Q400. Astfel de compozite laminate sunt utilizate frecvent în aplicații aeronautice, unde încărcările structurale sunt foarte ridicate.

Ruperea fibrelor a fost aproape inexistentă, în principal datorită faptului că rezistența la rupere a țesăturii de carbon (declarată de producător în fișa tehnică) este de aproximativ zece ori mai mare decât rezistența la rupere medie, măsurată experimental la epruvetele investigate.

Diagrama tensiuni-deformații specifice rezultată din variația forței aplicate cu deplasarea rezultată, permite determinarea principalelor caracteristici de material, precum modulul de elasticitate sau tensiunea de rupere. Dată fiind comportarea elastică biliniară a materialului, modulul de elasticitate a fost determinat pentru două intervale de referință din evoluția grafică, respectiv $0,05 \div 0,15\%$ și $1,1 \div 1,3\%$.

Valorile principalelor caracteristici mecanice de rezistență se situează sub cele ale roving-ului din fibre de carbon încercat anterior, dat fiind faptul că fibrele sunt orientate pe două direcții. Valoarea deviației standard este sub 5% pentru majoritatea mărimilor măsurate, folosind celula de forță, de unde rezultă un nivel ridicat de acuratețe a încercărilor efectuate.

Valorile prezentate anterior sunt apropiate ca ordin de mărime de datele furnizate de producătorul materialelor. Deformația medie din fișa tehnică este de aproximativ 1,3%, comparativ cu media de 1.42% obținută experimental, iar rezistența de rupere medie de 480,57 MPa reprezintă aproximativ o treime din valoarea de 1,86 GPa prezentată în fișa tehnică. Diferențele constatate se datorează, cel mai probabil, metodologiilor diferite de încercare a compozitului laminat, dat fiind faptul că rășina epoxidică și țesătura sunt produse de firme diferite care au utilizat standarde de încercare diferite.

Utilizarea sistemului imagistic non-contact DIC are ca principal avantaj posibilitatea determinării coeficientului de contracție transversală al materialului, fără a mai fi necesară utilizarea unor dispozitive suplimentare. Astfel, a rezultat valoarea de 0,353 a coeficientului lui Poisson pentru materialul compozit laminat, foarte apropiat ca valoare de media obținută pentru materialul unilaminar.

Din cauza tensiunilor mari la întindere, adeziunea dintre țesătură și rășină scade treptat până la momentul cedării acesteia, rezultând separarea laminelor pe toată porțiunea centrală, paralelă cu fibrele de carbon.

Avantajul practic al acestui tip de material este faptul că nu este caracterizat de o rupere bruscă, putând asigura funcționarea provizorie a unei componente de elicopter până la momentul aterizării în siguranță (în funcție de gravitatea deteriorării).

C. Evaluarea comportării mecanice la încovoiere

Solicitările aerodinamice variate din timpul zborului elicopterului determină necesitatea dezvoltării unui material care să aibă o rezistență bună la momentul încovoierii dezvoltat la extremitatea liberă a palei de către forțele aerodinamice. Învelișul palei reprezintă al doilea element ca lungime, după lonjeronul de rezistență, care trebuie să prezinte o aeroelasticitate rezonabilă.

Încovoierea reprezintă rezultatul unor sarcini transversale, care produc atât moment încovoietor, manifestat prin tensiuni normale liniar distribuite pe înălțimea secțiunii palei, cât și forță tăietoare, care produce tensiuni tangențiale nule la extremități și maxime la centrul secțiunii.

Încovoierea în trei puncte reprezintă o metodă frecvent utilizată pentru încercarea materialelor încărcate cu un moment încovoietor, putând fi realizată fie după standarde ASTM sau fie după standarde ISO, pentru a asigura reproductibilitatea testelor și o caracterizare cât mai eficientă a proprietăților de material.

Pe suprafața de interes a epruvetelor a fost aplicat un strat de vopsea albă, conform metodologiei descrisă anterior pentru măsurătorile efectuate cu sistemul digital de corelare a imaginilor. Peste stratul alb au fost pulverizate particule fine de vopsea neagră, astfel încât, să fie create punctele contrastante necesare, pe care sistemul DIC le va urmări în vederea evaluării deformațiilor produse.

Deformațiile în plan longitudinal ale epruvetelor solicitate la încovoiere sunt caracterizate de întinderea fibrelor inferioare ale țesăturii și de comprimarea fibrelor superioare, cele două secțiuni fiind despărțite de un plan neutru, în care, teoretic, deformația longitudinală este nulă. În practică, deformațiile longitudinale sunt însoțite și de contracții

transversale, în așa fel încât în zona întinsă scade grosimea barei, iar în zona comprimată se mărește grosimea barei, conform fenomenului de curbură anticlastică.

În figura 5.3 sunt prezentate două secvențe din programul Istra 4D, în care este surprinsă faza incipientă a solicitării la încovoiere (a), precum și secvența finală, în care este vizibilă ruperea materialului (b).

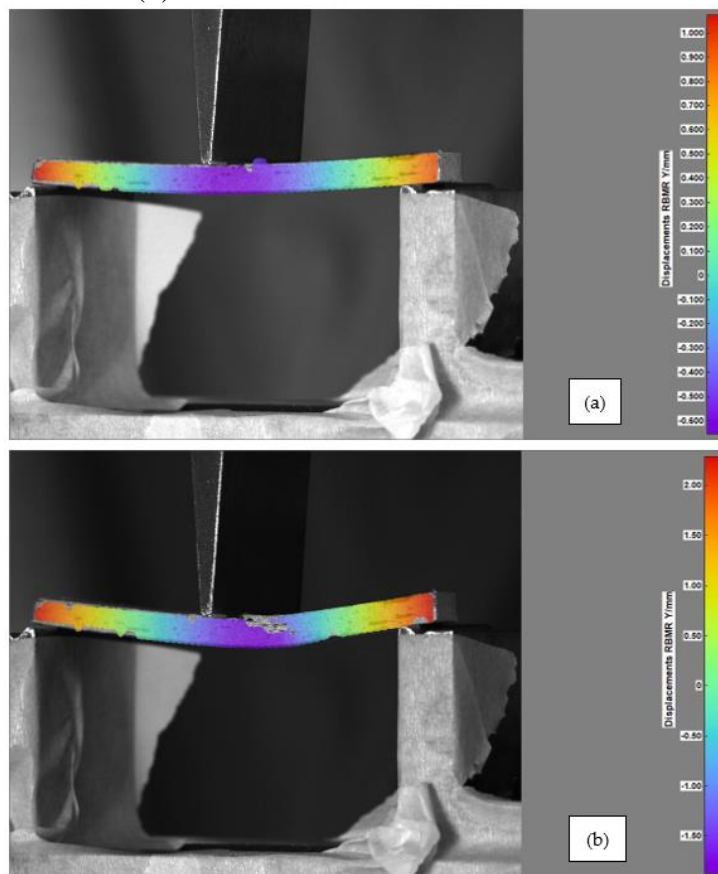


Fig. 5.3 Începutul și finalul testării la încovoiere, văzută în programul Istra 4D

Ruperea materialului este vizibilă în zona în care spectrul cromatic al programului software dispăre. Variația pe porțiunea liniar elastică este similară pentru toate cele trei epruvete. Evoluția segmentului liniar elastic al graficelor este similară până la valoarea tensiunii maxime înregistrată pe timpul încercărilor, de 0.5966 kN. Primele două epruvete sunt caracterizate de un palier constant de deformație, după atingerea tensiunii maxime, în timp ce a treia epruvetă înregistrează un declin, urmat de cedarea materialului.

Tensiunea maximă medie resimțită de material pe timpul încercării experimentale are valoarea de 311,47 MPa, fiind urmată de un palier de plasticitate liniar în scădere, conform evoluției grafice. Deformația specifică a materialului are valoarea maximă medie de 0,7988 %. Aceste date vor servi în scop comparativ, pentru validarea viitoarelor analize numerice realizate cu metoda elementelor finite.

Încercările efectuate au condus la determinarea unui modul de elasticitate mediu de 92,212 GPa. Forța maximă utilizată pentru solicitarea epruvetelor la încovoiere a fost de 590 N, rezultând o deplasare maximă înregistrată de 1,34 mm.

5.5 Concluzii

Încercările experimentale realizate la tracțiune, compresiune și încovoiere au ținut cont de specificul solicitării din exploatare a fiecărei componente structurale a palei anticuplu.

Determinarea proprietăților de material pentru miezul de tip fagure al viitoarei palei compozite s-a realizat prin intermediul încercărilor experimentale la întindere și la compresiune. Elastomerul selecționat pentru această structură este realizat din polietilenă clorinată, ranforsată cu microfibre de carbon CPE CF112 Carbon, material care prezintă caracteristici foarte bune de masă și de rezistență, dezirabile pentru structuri aeronautice.

Încercarea materialului la tracțiune s-a realizat pe un număr de 15 epruvete imprimare 3D, câte cinci pentru fiecare dintre cele trei direcții de fabricație, în vederea evaluării caracterului ortotrop al materialului. Rezultatele experimentale relevă o comportare mecanică similară pentru direcțiile de fabricație XY și XZ1 (construite în plan orizontal, respectiv laterale), date fiind valorile apropiate ale rezistenței la rupere, limitei de curgere și ale modulelor de elasticitate, cu o ușoară diferență în favoarea epruvetelor XY. În schimb, epruvetele realizate în plan vertical (XZ2) prezintă caracteristici net inferioare, cu până la 50% mai slabe decât direcțiile anterioare de printare, motiv pentru care nu sunt viabile pentru solicitarea prin tracțiune.

Învelișul materialului reprezintă structura rigidă cu pereți subțiri care oferă palei atât caracteristicile aerodinamice, cât și caracteristicile de rezistență, pentru a rezista la diferitele solicitări întâlnite în funcționarea elicopterului.

Realizat sub forma unui compozit laminat din țesătura de fibre de carbon 3K GG 285 T și rășină epoxidică Derakane Momentum 470-300, materialul a fost supus încercărilor la tracțiune și la încovoiere în trei puncte, în vederea determinării caracteristicilor de material, esențiale pentru o caracterizare cât mai completă și cât mai fidelă.

Încercarea laminatului la tracțiune a fost realizată inițial pentru epruvete unilaminare, plasate sub microscopul digital, rezultatele fiind apoi corelate la o scară mai mare cu epruvetele compozite multilaminare.

Determinarea rezultatelor experimentale este esențială pentru realizarea analizelor cu elemente finite, moment în care structura modelată geometric va fi solicitată similar condițiilor de zbor, pentru a determina eficiența acesteia din punct de vedere practic.

6. Modelarea și analiza cu elemente finite a încercărilor mecanice de material. Validarea rezultatelor numerice pe baza datelor experimentale

Încercările experimentale reprezintă o etapă fundamentală pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale componentelor folosite în fabricația palei anticuplu. Dat fiind acest aspect, au fost realizate mai multe analize numerice, ale căror rezultate vor fi comparate cu încercările experimentale, pentru fiecare tip de material.

În cadrul analizelor cu metoda elementelor finite, realizate în programul ANSYS, s-a urmărit reproducerea cât mai fidelă a condițiilor de încercare ale materialelor. Modelele geometrice ale epruvetelor au fost realizate folosind valorile medii ale dimensiunilor epruvetelor încercate experimental.

S-a urmărit obținerea următoarelor rezultate, care vor constitui baza validării comparative:

- valorile maxime ale tensiunii echivalente von Mises;
- valorile maxime ale deformațiilor;
- forța de reacțiune în punctul de încastrare a epruvetelor.

Prin procesul de validare a analizelor statice, specifice fiecărui material, se va putea determina eroarea medie pentru fiecare tip de solicitare, nivelul de similitudine a analizelor numerice raportat la încercările experimentale, constituind astfel fundamentul modelării și analizei numerice a palei compozite în ansamblul ei. Bază pentru validarea comparativă o constituie media datelor măsurate experimental, pentru tensiuni și deformații fiind utilizate valorile reale.

6.1 Analiza cu elemente finite a solicitării la compresiune

Încercarea la compresiune a epruvetelor de tip fagure din filament extrudat CPE CF112 Carbon a fost realizată pe același model geometric CAD utilizat în imprimarea 3D, asigurându-se astfel o corelare precisă între modelul fizic și cel proiectat.

Epruveta a fost încastrată pe suprafața inferioară a celulelor hexagonale, iar pe suprafața exterioară a fost aplicată deplasarea verticală maximă de 1,3489 mm, obținută pe durata încercărilor experimentale, ca medie a deplasărilor maxime aferente celor patru epruvete cu celule hexagonale solicitate la compresiune.

Prin aplicarea deplasării maxime pe suprafața superioară, s-a putut determina forța de reacțiune resimțită în suprafața încastrată inferioară. Forța de reacțiune obținută are valoarea de 15251 N, fiind cu 17,8 % mai mare decât valoarea măsurată de celula de forță a sistemului Instron, respectiv 12936 N. Principalele rezultate obținute în urma analizei statice pentru epruveta tip fagure sunt prezentate în figura 6.1.

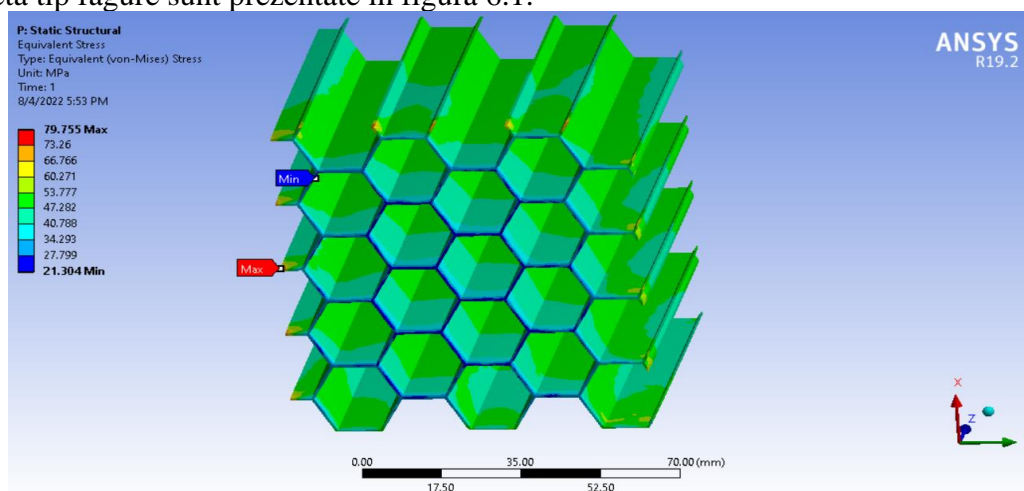


Fig. 6.1 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises pe corpul epruvetei

Tensiune echivalentă maximă rezultată în urma analizei numerice are valoarea de 79,75 MPa fiind cu aproximativ 12,77% mai mare decât valoarea de 70,71 MPa determinată experimental. Localizarea tensiunilor maxime și minime în secțiunea inferioară a epruvetei este în concordanță cu efectul vizibil real, fiind similar unui fenomen de voalare a pereților celulelor hexagonale.

Deformația maximă are o manifestare similară cu distribuția tensiunilor echivalente maxime, în ceea ce privește localizarea acesteia. Zonele de culori alternative de pe pereții celulelor hexagonale sunt specifice unui fenomen de voalare, caracterizat prin deplasarea laterală a straturilor suprapuse de material extrudat.

Rezultatele obținute prin analiza numerică relevă o similitudine satisfăcătoare pentru principalele caracteristici mecanice ale materialului studiat, existând, per ansamblu o eroare sub 15% în raport cu valorile experimentale. Dată fiind concordanța rezultatelor simulării numerice cu datele experimentale și cu datele oferite de producător în ceea ce privește caracteristicile de material și comportarea mecanică, se poate concluzia faptul că rezultate sunt corespunzătoare și pot fi utilizate în analizele numerice viitoare pentru studiul performanțelor palei compozite.

6.2 Analiza cu elemente finite a încercării la tracțiune

A. Analiza statică a încercării la tracțiune a compozitului laminat ranforsat cu fibre

Învelișul palei compozite, realizat dintr-un material compozit ranforsat cu fibre, având la bază o matrice polimerică din rășine epoxidică și țesătura twill 2/2 din fibre de carbon orientate la $0^{\circ}/90^{\circ}$, reprezintă elementul structural al palei solicitat în principal la tracțiune pe timpul zborului elicopterului.

Materialul compozit solicitat la tracțiune a prezentat o evoluție biliniară a curbei tensiuni-deformații specifice, aspect care s-a avut în vedere la definirea proprietăților de material ale modelului numeric.

Prin aplicarea deplasării maxime de 1,7926 mm obținută ca medie a deplasărilor maxime ale tuturor epruvetelor încercate la tracțiune, a rezultat o forță de reacțiune în suprafața de încastrare a epruvetei de 24,528 kN, cu aproximativ 8% mai mare decât cea măsurată de celula de forță a sistemului INSTRON. Valorile celor mai importanți indicatori de performanță ai analizei statice sunt redată grafic în figura 6.2 pentru epruveta supusă încercării la tracțiune.

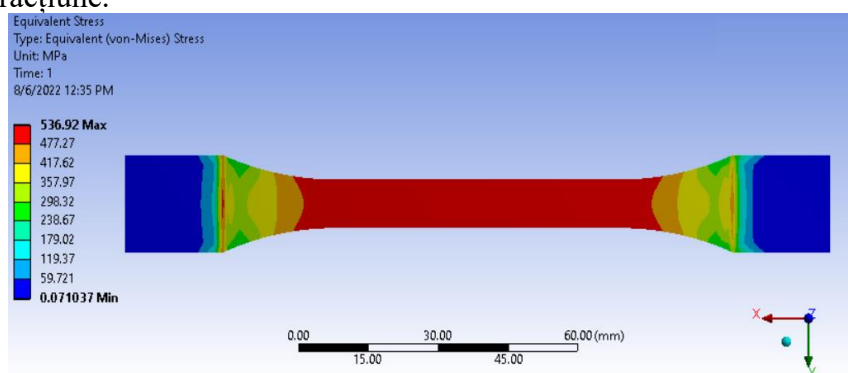


Fig. 6.2 Distribuția tensiunilor maxime pe corpul epruvetei din compozit laminat

Având în vedere modul de încastrare a epruvetelor, se poate observa faptul că, tensiunea maximă se resimte în zona centrală, precum și în adiacența trecerii de la piciorul epruvetelor către zona gâtuită, atingând valoarea maximă de 536,92 MPa. Deformația cea mai mare se produce în zona centrală și are valori similare cu cele determinate experimental.

Analiza statică a fost realizată folosind două abordări principale. În primul caz, epruveta halteră a fost realizată sub forma unui model geometric solid, iar în al doilea caz, a

fost utilizat modulul ACP al programului Ansys, pentru a defini proprietățile de material pentru o singură lamină, în conformitate cu rezultatele testelor de tracțiune pentru epruvetele unilaminare, fiind ulterior definite caracteristicile materialului compozit laminat (număr lamine, orientare, mod dispunere etc.).

Rezultatele reflectă o convergență mai mare în ceea ce privește simularea realizată pentru modelul geometric solid, dat fiind faptul că s-a dispus de un set mai mare de date experimentale pentru caracterizarea materialului, comparativ cu încercările de tracțiune unilaminare. Acestea din urmă au fost realizate folosind un dispozitiv de tracțiune cu capacitate redusă, care nu a putut atinge o forță suficient de mare pentru ruperea materialului, datele de caracterizare ale materialului fiind, deci, relativ succinte.

Eroarea medie pentru simularea numerică bazată pe corp solid are valori sub 10% pentru toți parametrii de interes, în timp ce caracterizarea unilaminară a materialului a dus la diferențe situate între 10-15% pentru toți parametrii de interes.

Rezultatele analizei numerice indică o apropiere admisibilă pentru principalii parametri de interes ai validării comparative. Dat fiind faptul că materialul este unul compus, având pe de o parte o matrice polimerică și pe de altă parte fibrele de ranforsare, caracteristicile mecanice ale acestuia se situează, atât din punct de vedere experimental, cât și din punct de vedere al analizelor numerice, între proprietățile materialelor constituente. Astfel, rezistența la rupere a materialului compozit laminat este 484,495 MPa, peste valoarea de 85 MPa a rășinii epoxidice și sub valoarea de 4410 MPa a țesăturii din fibre de carbon. Dată fiind corespondența relativ strânsă a rezultatelor numerice cu măsurătorile efectuate experimental, se poate susține credibilitatea datelor, precum și posibilitatea utilizării acestora în analizele numerice pentru determinarea performanțelor palei anticuplu.

B. Analiza statică de încercare la tracțiune a roving-ului din fibre de carbon

Lonjeronul palei anticuplu reprezintă elementul de rezistență cel mai important al palei anticuplu. Poziționarea acestuia pe toată lungimea palei, precum și prezența orificiilor de încastrare la baza acestuia, conduc la necesitatea unor caracteristici de performanță foarte bune. Dat fiind acest fapt, s-a optat pentru fabricația lui din fibre unidirecționale de carbon (roving) cu proprietăți de rezistență superioare la întindere.

Curba caracteristică a materialului, determinată prin încercarea practică la tracțiune, prezintă o evoluție biliniară, cu o porțiune liniar elastică și o porțiune liniar plastică, fiecare având propriul modul de elasticitate longitudinal.

Modelul geometric al epruvetei de tip halteră este încastrat la unul dintre capete, în timp ce forța medie maximă determinată experimental este aplicată celuilalt capăt, în vederea determinării deplasării maxime și a valorilor tensiunilor și deformațiilor.

În figura 6.3 sunt prezentate principalele caracteristici mecanice care s-au urmărit pentru validarea încercării la tracțiune a epruvetei din roving de carbon, determinate pentru cazul aplicării unei forțe de 2307,43 kgf, respectiv 22628,12 N.

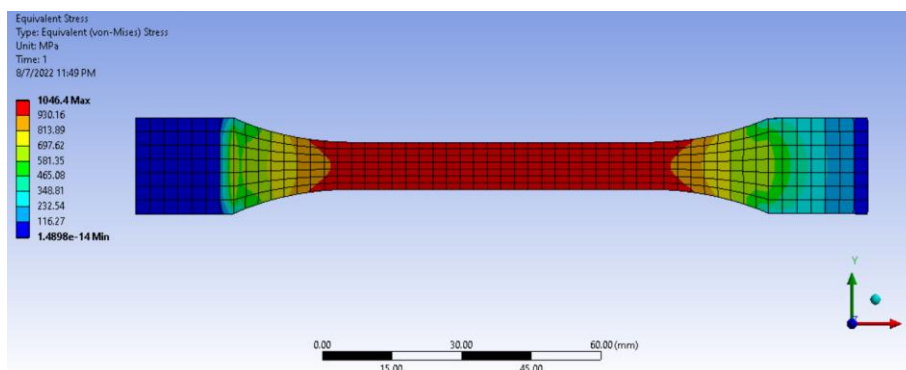


Fig. 6.4 Distribuția tensiunilor echivalente von Mises pe corpul epruvetei din roving de carbon

Analiza statică a condus la obținerea unei deplasări maxime de 1,3876 mm pentru forța aplicată, cu doar 4,5% mai mare decât valoarea experimentală măsurată. Tensiunea echivalentă maximă și deformația specifică maximă se manifestă pe zona centrală a epruvetei de tracțiune, cu diferențe de până în 20% față de măsurătorile experimentale.

Comparația rezultatelor anterioare indică o corespondență satisfăcătoare între rezultatele analizei numerice și rezultatele experimentale, având în vedere faptul că datele experimentale reprezintă de fapt o medie a celor cinci epruvete încercate la tracțiune. În conformitate cu datele tehnice oferite de fabricantul Torayca, fibrele au o rezistență la rupere de 3530 MPa, iar materialul compozit ranforsat cu aceste fibre are o rezistență la tracțiune de 1860 MPa, valoare relativ apropiată de rezultatul obținut experimental.

6.3 Analiza cu elemente finite a încercării la încovoiere

Data fiind lungimea relativ mare a învelișului palei anticuplu, care reprezintă o structură aeroelastică flexibilă, este de interes să se cunoască proprietățile materialului de fabricație în cazul solicitării prin încovoiere.

Încovoierea în trei puncte reprezintă varianta cea mai facilă de determinare a caracteristicilor mecanice, dat fiind faptul că fenomenul este unul local și este ușor de pus în practică.

Analiza cu elemente finite a fenomenului de încovoiere s-a realizat, similar solicitării la tracțiune, atât în cazul modelului geometric solid, cât și în cazul modelului laminar, definind toate caracteristicile materialului compozit. Modelul laminar definit folosind modulul ACP respectă caracteristicile reale ale compozitului, fiind realizat din 10 lamine suprapuse, păstrând aceeași orientare pe toată dispunerea acestuia.

Pentru a reproduce condițiile experimentale de încercare, în cadrul programului cu elemente finite s-a dispus încastrarea modelului geometric în dreptul uneia dintre extremități (pe muchia inferioară), iar în capătul opus au fost restrânse toate libertățile de mișcare, cu excepția deplasării de-a lungul axei longitudinale a epruvetei.

Deplasarea medie maximă determinată experimental, cu valoarea de 1,351 mm, a fost aplicată pe secțiunea centrală a epruvetei, conform figurii 6.5, unde poate fi observat și conturul nedeformat al acesteia. Pentru a surprinde apariția efectelor locale, în cadrul programului software s-a optat pentru utilizarea a 30 de sub-pași pentru calculul rezultatelor.

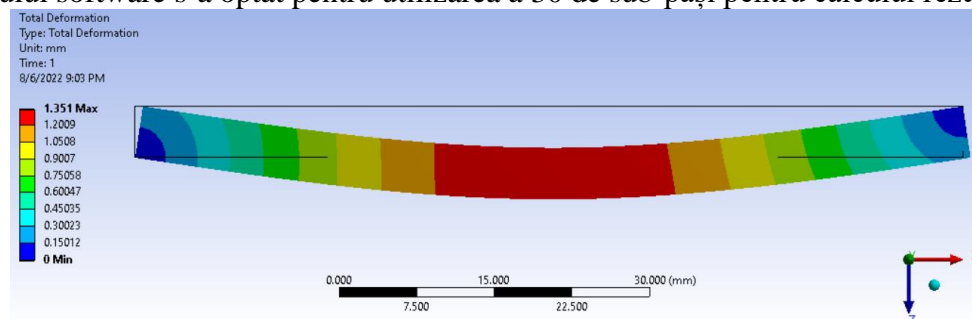


Fig. 6.5 Deplasarea maximă a epruvetei supuse la încovoiere

Deformația specifică maximă a epruvetei rectangulare are loc pe suprafața superioară a acesteia, în punctul central de aplicare a forței externe, atingând valoarea maximă de 0,741%. Distribuția tensiunilor indică modul în care suprafața superioară se comprimă, suprafața inferioară se întinde, iar fibra mediană prezintă deformațiile cele mai scăzute.

Conformitatea cu datele experimentale este redată de valoarea acceptabilă a erorii, de aproximativ 13% pentru tensiunile echivalente și de doar 6,89% pentru forța de reacțiune, măsurată în punctul de încastrare a epruvetei.

Având în vedere rezultatele analizelor numerice realizate atât pentru modelul solid, cât și pentru modelul compozit laminar, se poate concluziona validitatea rezultatelor obținute în raport cu datele experimentale. Acest aspect este susținut de încadrarea majorității rezultatelor analizelor numerice între valorile minime și maxime ale setului de încercări experimentale. De asemenea, în ceea ce privește datele tehnice oferite de producători, rezultatele numerice se situează, în mod similar analizei la tracțiune, între valorile de performanță specifice pentru rășina epoxidică, pe de o parte și valorile de performanță ale țesăturii din carbon, pe de altă parte.

6.4 Concluzii

Încercarea materialelor la solicitările de bază prezente pe timpul exploatării normale reprezintă o condiție esențială pentru determinarea limitelor de rupere și de deformație ale acestora, informații care stau la baza analizelor cu elemente finite, necesare în vederea evaluării performanțelor palei anticuplu. Pentru a întări încrederea în analizele statice complexe ale palei compozite, a fost mai întâi realizată o corelare a datelor experimentale în raport cu rezultatele analizelor numerice, pentru reproducerea solicitărilor experimentale de tracțiune, compresiune și încovoiere.

Analizele numerice realizate au avut valori apropiate față de rezultatele experimentale, cu o eroare maximă sub 15% pentru majoritatea cazurilor abordate, fiind astfel corespunzătoare pentru studiul performanțelor palei anticuplu în cadrul condițiilor similare zborului.

7. Fabricația și încercarea experimentală a palei anticuplu din materiale compozite. Validarea analizelor numerice specifice

7.1 Tehnologia de realizare a palei compozite și caracteristicile acesteia

Fabricația palei anticuplu din materiale compozite, la scara 1:3 în raport cu dimensiunile reale ale palei metalice, s-a realizat manual, prin metoda “hand lay-up”, din materialele compozite supuse încercărilor experimentale, în vederea determinării caracteristicilor acestora. Fabricația compozitelor prin prelucrare manuală reprezintă metoda clasică de producție, care presupune urmărirea unor etape succesive și are la bază experiența practică a celui care realizează operațiunea. Principalele etape care au fost parcurse în vederea fabricației palei compozite sunt următoarele:

- a) Construirea unui model provizoriu al palei anticuplu la scara 1:3 dintr-o rășină maleabilă;
- b) Definirea planului de separație al ansamblului matriței;
- c) Fabricarea primei jumătăți a matriței;
- d) Fabricarea celei de-a doua semimatrițe;
- e) Realizarea unui model al palei anticuplu din materiale compozite ranforsate cu fibre de sticlă, pentru a verifica și ajusta procedeul de matrițare;
- f) Confeccionarea învelișului pe suprafețele celor două semimatrițe;
- g) Poziționarea miezului de tip fagure în interiorul matriței și îmbinarea acestuia cu învelișul;
- h) Construirea lonjeronului de rezistență din fibre unidirecționale de carbon;
- i) Îmbinarea tuturor elementelor și închiderea matrițelor în șuruburi în vederea etanșării;
- j) Extragerea palei compozite din matriță după trecerea timpului de polimerizare, urmată de finisarea exterioară.

Construcția palei compozite a reprezentat un proces de fabricație laborios, care a presupus un set extins de cunoștințe practice, necesare în vederea prelucrării materialelor compozite. Scopul demersului practic a fost asamblarea, într-un material compozit unitar, a următoarelor componente principale, ale căror caracteristici de material au fost determinate în capitolele anterioare:

- învelișul exterior, realizat dintr-un material compozit laminat ranforsat cu fibre de carbon, constând în trei straturi de țesătură de carbon twill 285 gr/m², îmbinate cu rășină epoxidică; învelișul palei compozite înglobează elemente centrale și are o grosime totală de aproximativ 1 mm;
- lonjeronul de rezistență a fost realizat din fibre unidirecționale de carbon (roving), impregnate cu rășină epoxidică, fiind dispuse împrejurul bușelor de încastrare ale palei anticuplu, cu extindere longitudinală spre extremitatea liberă.
- miezul de tip fagure, cu celule hexagonale, realizat prin extrudare termoplastică.

Suplimentar, în zona de încastrare a palei au fost plasate două bușe cu diametrul interior de 0,6 mm, realizate dintr-un oțel similar, din punct de vedere al caracteristicilor mecanice cu cel utilizat pentru pala reală. Acestea sunt îmbinate cu lonjeronul palei și servesc ca punct de prindere la ansamblul rotor spate al elicopterului.

Procesul de fabricație a palei compozite a debutat prin realizarea unui model provizoriu din rășină epoxidică maleabilă, având la bază profilul aerodinamic al palei anticuplu. Pe acest profil aerodinamic alungit au fost construite cele două semimatrițe simetrice, având planul de separație la nivelul cozii profilului NACA0012. Modelul provizoriu a fost realizat pornind de la cotele de gabarit preluate din desenul tehnic de

execuție al palei anticuplu a elicopterului IAR330, completate cu măsurători locale, realizate pe o pală metalică reală, scoasă din exploatare.

Cele două semimatrițe realizate din tablă de aluminiu dispun de bucșe și de zone de ghidare, precum și de găuri de strângere cu șuruburi. La momentul închiderii semimatrițelor, șuruburile vor fi strânse progresiv pe direcții opuse, pentru a asigura o bună etanșeitate a modelului interior. Pe fața interioară a uneia dintre semimatrițe au fost realizate două orificii, pe care vor fi dispuși suportii bucșelor de încastrare, la momentul fabricației lonjeronului din roving de carbon. Bucșele vor reprezenta o parte integrantă a lonjeronului de rezistență, fibrele unidirecționale fiind poziționate în jurul acestora, iar îmbinarea lor într-un corp solid fiind realizată cu ajutorul rășinii epoxidice.

Miezul de tip fagure a fost realizat prin extrudare termoplastică, fiind asigurată fixarea acestuia la tot ansamblul structurii, prin îmbinarea lui cu rășina epoxidică Derakane 470-300. Această componentă este realizată, în corespondență cu semimatrițele anterioare, tot sub forma unor semiplanuri simetrice față de axa central-orizontală, fiind poziționate etapizat în interiorul palei compozite. Îmbinarea celor două semimatrițe se va realiza la nivelul planului central al semimatrițelor.

Polimerizarea rășinii durează aproximativ 24 de ore, fiind realizată la temperatura camerei, după care se procedează la tăierea și la ajustarea țesăturilor de carbon care depășesc nivelul matrițelor.

Lonjeronul din carbon unidirecțional a fost realizat cu ajutorul unui șablon, prin amplasarea acestuia în semimatriță, peste stratul de ceară laminată. Rovingul din carbon s-a înfășurat în jurul bucșelor de oțel până când matrița de extradados s-a umplut cu rășină epoxidică până la nivelul bordului de atac. Aceleași operațiuni descrise anterior au fost executate și pentru matrița de intrados a palei anticuplu. Rășina și agentul întăritor, aplicate peste carbonul unidirecțional, au fost cântărite și dozate cu grijă, în vederea impregnării acestuia.

Durata de polimerizare a materialelor compozite este de 24 de ore, timp în care cele două semimatrițe sunt strânse cu șuruburi de prindere pe contur. A fost concepută o structură din lemn, care să permită închiderea uniformă a semimatrițelor pe tot conturul acestora. Procesul de polimerizare se realizează în condițiile mediului ambiant, la o temperatură de aproximativ 23°C și cu o umiditate scăzută a aerului.

După trecerea timpului de polimerizare, pala compozită este extrasă din interiorul celor două matrițe (fig. 7.1). Finisarea palei, în vederea obținerii formei finale, presupune debavurarea suprafețelor rămase în exces, curățarea agentului de demulare și aplicarea unui lac protector.



Fig. 7.1 Pala anticuplu realizată la scara 1:3 din materiale compozite

7.2 Încercarea palei la încovoiere cu forță aplicată la extremitatea liberă. Instrumentare și mod de realizare

În vederea verificării experimentale a palei anticuplu realizată din materiale compozite la scara 1:3, s-a optat pentru solicitarea acesteia prin aplicarea unei forțe verticale poziționate către extremitatea liberă. Obiectivul acestei tip de încercare este acela de a urmări modul de comportare a palei anticuplu, rezultatele experimentale urmând a fi utilizate pentru a valida analiza numerică având la bază același tip de încercare.

Tipul acesta de testare experimentală, reprezintă de fapt o adaptare simplificată a încercării la oboseală a palelor fabricate din materiale compozite, conform metodologiei de testare descrisă de publicațiile de specialitate [30, 31, 32]. Astfel de încercări au la bază dispozitive echipate cu unul sau mai multe actuatoare monoaxiale sau biaxiale (în funcție de tipul de solicitare dorit), care încarcă și descarcă pala pe durata unui număr predefinit de cicluri de încercare. Încercarea la oboseală a palelor realizate din materiale compozite prin această modalitate reprezintă varianta cea mai des utilizată, atât pentru palele din industria aeronautică, precum și pentru palele turbinelor eoliene.

Utilizarea echipamentului Instron 8872 ca dispozitiv de măsurare, precum și pentru aplicarea deplasării impuse, a reprezentat cea mai bună soluție din punct de vedere practic, datorită faptului că precizia celulei de forță a echipamentului Instron utilizat în testarea palei este mult mai mare comparativ cu restul alternativelor existente (micrometru, telemetru laser, corelare digitală a imaginii etc.).

Pala compozită a fost încastrată de o grindă din aluminiu suficient de solidă, pentru a preveni încovoierea acesteia în momentul încărcării palei, situație în care s-ar obține rezultate eronate. Încăstrarea s-a realizat prin utilizarea a două șuruburi strânse cu fermitate, poziționate în interiorul bușelor metalice, astfel încât pala să revină la poziția inițială la momentul încetării deplasării, dată fiind încărcarea din domeniul elastic al materialelor utilizate (fig.7.2).



Fig. 7.2 Poziționarea palei compozite în interiorul echipamentului de încercare

Suportul metalic cu profil rectangular a fost ulterior prevăzut cu un șurub de fixare la extremitatea opusă zonei de încastrare. Prin intermediul acestui șurub, suportul a fost fixat în bacul hidraulic inferior al echipamentului Instron 8872, iar în bacul hidraulic superior a fost

fixat un element metalic, prin intermediul căruia se va solicita pala anticuplu până la atingerea unei deplasări maxime de 10 mm.

În total au fost realizate cinci încercări experimentale, în configurația prezentată anterior. În programul software de interfață al echipamentului a fost introdusă o deplasare constantă de 2 mm/min, echipamentul fiind oprit de către operator la atingerea deplasării de 10 mm. Graficul prezentat indică un răspuns liniar constant pentru fiecare caz în parte, forța maximă măsurată fiind situată în intervalul 10,049÷12,092 N. Durata totală a fiecărei încercări a fost de aproximativ 300 de secunde. Pe timpul efectuării testelor nu s-a constatat nicio deformare remanentă, pala revenind de fiecare dată în dreptul poziției inițiale.

Datele precizate anterior vor fi utilizate pentru realizarea analizei numerice corespunzătoare acestui tip de încercare, în vederea validării modelului numeric care va fi utilizat în realizarea simulărilor numerice viitoare.

7.3 Analiza comparativă a performanțelor palei încărcate aerodinamic, în funcție de materialul utilizat pentru fabricație

Performanțele palei anticuplu din materiale compozite au fost evaluate în cadrul unor analize statice efectuate cu programul cu elemente finite Ansys, în contextul utilizării unor condiții similare analizelor numerice efectuate asupra palei metalice.

Data fiind dificultatea practică, precum și nivelul ridicat de pericolozitate asociate montării palei compozite pe un rotor capabil să reproducă fidel caracteristicile specifice unui zbor la punct fix sau unui zbor cu înaintare, s-a optat pentru verificarea comportării la solicitări aerodinamice prin utilizarea unui tunel aerodinamic subsonic. Astfel, în capitolele precedente au fost determinate solicitările aerodinamice folosind modulul Fluent al programului Ansys și ulterior, aceste valori au fost validate pe baza rezultatelor experimentale, urmând a fi utilizate pentru realizarea unei analize comparative, în cazul fabricației palei din aliaje de aluminiu, respectiv din materiale compozite.

Determinarea încărcării aerodinamice a palei în vederea introducerii în analiza statică structurală s-a realizat prin simularea curgerii curențului de aer în jurul palei, în cadrul modulului Fluent, fiind identică pentru ambele tipuri de pală studiate. Încărcările aerodinamice au fost determinate pentru viteza de curgere a aerului de 50 m/s, liniar distribuite pe lungimea palei modelate geometric la scara 1:1. Au fost abordate toate cele patru valori de referință ale incidenței palei din intervalul de variație specific rotorului anticuplu al elicopterului IAR330 (+2,5° ÷ -15,5°).

Modelul de curgere utilizat pentru determinarea presiunilor aerodinamice este k-ε realizabil, având vâscozitatea turbulentă. Acesta reprezintă una dintre cele mai comune și mai complete variante pentru realizarea calculului unei curgeri turbulente, care utilizează ecuații de transport pentru determinarea energiei cinetice a turbulențelor (notat cu “k”) și a ratei de disipare a acestora (notat cu „ε”).

Învelișul palei modelate la scara 1:1 este discretizat cu elemente de tip SHELL, fiind format dintr-un total de nouă lamine din țesătură de fibră de carbon și rășină epoxidică. Modelarea învelișului sub forma unui compozit laminat s-a realizat în cadrul modulului ACP Pre al programului Ansys.

Datorită modului de solicitare al palei, orientarea fibrelor la un unghi de 0° este importantă, deoarece, materialul preia solicitarea datorată forței centrifuge produse de rotirea palei la turația de 1278 rot/min, iar orientarea fibrelor la 90° este importantă, datorită solicitărilor aerodinamice frontale ale curențului de aer. Totuși, alți factori, precum modificarea incidenței palei, prezența rafalelor de vânt necontrolate sau vibrațiile din timpul funcționării, fac ca pala să fie solicitată pe aproximativ toate direcțiile, motiv pentru care este necesară fie dispunerea optimă a laminelor în ceea ce privește numărul acestora, secvența de

suprapunere și orientarea fibrelor, fie alegerea unor materiale care să ofere proprietăți de rezistență bune, indiferent de direcția încărcării/solicitării palei.

De asemenea, având în vedere natura identică a solicitărilor, deplasarea maximă a palei compozite este localizată la extremitatea liberă a acesteia.

Încercările experimentale relevă o rezistență la rupere mai bună pentru două dintre componentele palei compozite, comparativ cu pala metalică, fiind capabilă astfel să suporte solicitări superioare ca intensitate. Rezistența la rupere a miezului de tip fagure, realizat prin extrudare termoplastică este mai mică, dar pala compozită în ansamblul ei compensează prin rigiditatea crescută a celorlalte două componente, precum și printr-o grosime mai mare a învelișului din compozit laminat (2,7 mm pentru pala compozită la scara 1:1, comparativ cu 1 mm pentru pala metalică).

Mărirea unghiului de incidență duce la o creștere direct proporțională a tensiunii echivalente măsurate pe pala compozită. Principala zonă solicitată a acesteia este piciorul palei, parte integrantă a lonjeronului de rezistență, pe direcția opusă curentului de aer materialul fiind comprimat, ca urmare a încovoierii palei. La nivelul învelișului, tensiunile maxime se regăsesc preponderent în zona bordului de atac, iar în cazul miezului de tip fagure, principalele zone solicitate sunt intersecțiile pereților celulelor hexagonale.

Se poate observa cum creșterea deplasării maxime este relativ constantă, în cazul incidenței maxime admise în exploatare $\alpha = 15,5^\circ$ aceasta atingând o valoare relativ mare. Însă, acest aspect nu reprezintă un factor de risc, deoarece tensiunile echivalente maxime sunt scăzute în raport cu rezistența la rupere a fiecăreia dintre cele două componente solicitate mai intens: lonjeronul din carbon unidirecțional și învelișul din compozit laminat. Valorile mari ale deplasărilor se pot traduce printr-un grad mai mare de elasticitate a palei compozite.

În mod similar deplasărilor maxime, deformațiile specifice determinate prin analiza numerică a palei compozite, au valori mai mari decât în cazul palei metalice. Dintre componentele palei compozite, deformația specifică maximă este întâlnită în cazul miezului de tip fagure, în zona bordului de fugă, unde grosimea profilului NACA0012 se îngustează iar pereții celulelor hexagonale au dimensiuni relativ mici, acționând similar unor concentratori de tensiune.

Utilizarea soluției constructive propuse prin prezentul studiu, având la bază materiale compozite, a condus la reducerea totală a masei cu aproximativ 41,54 %. Defalcat, pentru fiecare dintre componente, masa lonjeronului a scăzut cu aproximativ 34,82 %, masa miezului de tip fagure a scăzut cu aproximativ 56,70 %, iar masa învelișului a înregistrat o scădere de 45,33 %.

7.4 Concluzii

În urma încercărilor experimentale și a analizelor numerice efectuate asupra palei anticuplu din materiale compozite, pot fi evidențiate următoarele concluzii importante, care justifică și susțin ideea modernizării rotorului anticuplu al elicopterului IAR330, prin tranziția palei către o configurație constructivă compozită:

- **Cost de fabricație redus** – conform metodologiei prezentate în subcapitolul 7.1, procesul de fabricație a palei anticuplu prin metoda manuală (“hand lay-up”) oferă avantajul unui cost general redus. Astfel, valoarea totală necesară fabricației unei pale anticuplu din materiale compozite se ridică la aproximativ 12.000 lei, la momentul redactării lucrării, pe când valoarea unei pale anticuplu metalice, achiziționate prin furnizorul certificat de piese pentru elicopterele IAR330 este de aproximativ 25.000 lei. Investiția inițială presupune un cost mai mare, având în vedere faptul că este necesară realizarea unor matrițe pe care se vor dispune materialele compozite din compunerea palei. Procesul de fabricație poate fi îmbunătățit semnificativ, prin

introducerea unei pompe cu vacuum pentru infuzia rășinii, în vederea obținerii unui produs final standardizat (de serie).

- **Complexitate de fabricație redusă** – fabricația palei compozite prin metoda descrisă în acest capitol implică o complexitate semnificativ mai redusă, fiind bazată, în primul rând, pe experiența practică și pe cunoștințele teoretice ale executantului, spre deosebire de procesul de fabricație a palei metalice, care implică mai multe echipamente și dispozitive speciale, precum și personal specializat/certificat pe mai multe domenii.
- **Performanțe superioare** – având în vedere încercările experimentale realizate prin încărcarea extremității libere a palei, precum și datorită performanțelor superioare rezultate în urma analizei comparative a palei compozite și a palei metalice, se poate concluziona faptul că, această configurație de fabricație a palei compozite oferă performanțe superioare palei metalice utilizată în prezent. Performanțele mai bune ale materialelor compozite presupun o fiabilitate ridicată, aspect care, pentru industria aeronautică, reprezintă o condiție esențială.
- **Eliminare necesitate resursă tehnică** – implementarea materialelor compozite în structura palei anticuplu are potențialul de a permite trecerea de la o resursă tehnică în timp stabilită de producător, la o resursă tehnică după stare (“on-condition”), dată fiind fiabilitatea mai ridicată a acestei categorii de materiale.

8. Concluzii finale. Contribuții și perspective

8.1 Considerații

Teza de doctorat intitulată “*Studiul teoretic și experimental privind tranziția palei anticuplu a elicopterului IAR330 către o configurație constructivă compozită*” a avut ca principal obiectiv oferirea unei alternative practice de modernizare a rotorului anticuplu al elicopterului IAR330, în sensul utilizării materialelor compozite performante.

Alegerea soluției constructive avantajoase a presupus un studiu extins în ceea ce privește varietatea materialelor compozite existente și modul de fabricație a acestora, pentru a produce o componenta fiabilă din punct de vedere al aeronavigabilității.

Activitatea de cercetare, desfășurată atât pe fundamente teoretice, cât și din punct de vedere practic, a necesitat un set complet de cunoștințe interdisciplinare, precum: rezistența materialelor, mecanica fluidelor, știința materialelor, corelarea digitală a imaginilor, metoda elementelor finite, etc. Studiile experimentale, realizate atât la nivel local, pentru determinarea proprietăților de material, cât și la nivel global, pentru evaluarea performanțelor generale, au servit ca bază pentru validarea simulărilor numerice care probează capacitatea structurii din materiale compozite de a performa în condiții normale de zbor.

8.2 Concluzii finale

Teza de doctorat debutează cu o serie de informații teoretice introductive, menite să evidențieze actualitatea temei de doctorat, precum și importanța ei, atât din punct de vedere științific, cât și privind exploatarea elicopterelor IAR330, destinate Forțelor Aeriene Române.

În *capitolul 1 – “Stadiul actual al cercetărilor”* s-a realizat o sinteză a principalelor informații disponibile în literatura de specialitate, referitoare la evoluția materialelor compozite și la aplicațiile aerospațiale specifice, de unde au rezultat următoarele concluzii:

1. Fibrele de carbon și cele de sticlă sunt cel mai des întâlnite în componența structurilor aeronautice, datorită gradului ridicat de ranforsare. Fabricația unei structuri compozite ranforsate cu fibre de carbon permite atingerea unui nivel foarte ridicat de rezistență.
2. Rășina epoxidică reprezintă polimerul termorezistent care asigură cea mai bună compatibilitate în utilizarea, alături de fibrele de carbon, producând materiale compozite deosebit de rezistente la solicitări.
3. Fabricația palelor din materiale compozite reprezintă un proces laborios, bazat preponderent pe experiența practică a fabricantului. În vederea construcției unui prototip singular este indicată metoda manuală de laminare (“hand lay-up”).
4. Soluțiile constructive de pale compozite identificate în cursul cercetării presupun utilizarea unui lonjeron longitudinal, ca element de rezistență principal, a unui miez interior cât mai ușor, pentru a minimiza masa totală, precum și a unui înveliș din material compozit stratificat.
5. Fabricația aditivă reprezintă o soluție modernă de prototipare și fabricație a unor componente calitative. Fabricația prin extrudare termoplastică reprezintă cea mai accesibilă soluție curentă pentru construcția unor geometrii complexe.

În cadrul *capitolului 2 – “Obiectivele și organizarea tezei”* au fost evidențiate principalele obiective generale și specifice propuse a fi atinse prin prezenta teză de doctorat. A fost prezentată, de asemenea, structura de ansamblu a tezei, cu o descriere succintă a fiecărui capitol în parte.

Capitolul 3 – “Evaluarea performanțelor palei anticuplu de construcție metalică” a presupus prezentarea principalelor caracteristici tehnico-tactice și a modului de funcționare a elicopterelor. Având ca reper dimensiunile palei reale și principalele materiale utilizate de

fabricant, s-a procedat la modelarea palei anticuplu, evaluându-i performanțele în cadrul unei analize numerice realizate prin metoda elementelor finite. Astfel, s-au putut desprinde următoarele concluzii:

6. Printre umeroasele avantaje ale tranziției către o structură compozită se pot menționa: reducerea masei totale a palei, crescând astfel masa utilă a elicopterului, trecerea de la o resursă tehnică măsurată în timp la o resursă tehnică după stare (“on-condition”), creșterea nivelului de siguranță a zborului, precum și îmbunătățirea rezistenței totale a palei la solicitările exterioare.
7. Simularea numerică a curgerii s-a realizat pentru o viteză de 50 m/s, reprezentând viteza maximă utilizată în tunelul aerodinamic, precum și pentru o viteză de 206,5 m/s, reprezentând viteza tangențială la vârful palei în timpul rotirii palei, la turația nominală a rotorului anticuplu.
8. Analiza statică a palei metalice la scara 1:1 a permis obținerea unor tensiuni echivalente și a unor deformații specifice care vor servi ca referință pentru evaluarea performanțelor palei compozite viitoare.
9. Studiul curgerii aerodinamice bidimensionale în jurul profilului palei, precum și studiul deplasării fluidului în jurul modelului tridimensional al palei au facilitat vizualizarea modificărilor curgerii, în corespondență cu modificarea unghiului de incidență al palei anticuplu.

Trecerea în revistă a principalelor considerente teoretice referitoare la studiul curgerii aerodinamice și la principalele regimuri de zbor ale elicopterului se prezintă în **capitolul 4 – “Validarea experimentală a încărcărilor aerodinamice folosind tunelul aerodinamic”**. Principalele concluzii care reies din studiul efectuat sunt:

10. Forțele aerodinamice și coeficienții aerodinamici asociați acestora reprezintă baza efectuării studiului curgerii fluidului în jurul oricărei structuri aeroelastice. Variația acestora în funcție de incidența profilului aerodinamic, permite identificarea zonelor de curgere turbulentă, periculoase pe timpul zborului.
11. Regimul de zbor la punct fix al elicopterului este cel mai facil de abordat numeric, din punct de vedere al factorilor externi care pot influența condiția palei anticuplu.
12. Tunelul aerodinamic subsonic, prin caracteristicile dimensionale și de viteză, satisface condițiile de similitudine necesare validării analizei numerice realizate în modulul Fluent.
13. Din analiza comparativă a rezultatelor determinate experimental în raport cu rezultatele analizei numerice, au reieșit valori similare pentru punctele de pe învelișul palei, stabilite ca referință.

Capitolul 5 – “Determinarea caracteristicilor mecanice și elastice ale materialelor care compun pala anticuplu compozită” cuprinde cel mai extins set de date experimentale, obținut în urma încercărilor de tracțiune, compresiune și încovoiere, realizate cu scopul determinării caracteristicilor mecanice ale materialelor care compun pala anticuplu compozită. Se pot desprinde următoarele concluzii importante:

14. Testele de tracțiune efectuate asupra materialului unilaminar, utilizând configurația micro-DIC, facilitează observarea comportării fibrelor și a matricei sub acțiunea solicitărilor exterioare la nivel microscopic, rezultatele fiind strâns legate de cele ale comportării la tracțiune a materialului compozit multistratificat.
15. Din analiza comparativă a solicitării la compresiune a fagurelui extrudat termoplastic, în raport cu fagurele din aluminiu, a rezultat o rezistență mai mare a aliajului din aluminiu, materialul extrudat termoplastic compensând, pe de altă parte, printr-o masă mai redusă, cost de fabricație redus și prin rezistență la coroziune.
16. Variația caracteristicilor de material în funcție de direcția de fabricație a condus la necesitatea evaluării caracterului ortotrop al materialului extrudat termoplastic, fiind

determinată astfel direcția de fabricație optimă a miezului de tip fagure, care să permită o capacitate portantă maximă.

17. Setul complet de caracteristici mecanice determinate experimental, permite o definire cât mai fidelă a modelului numeric al palei compozite, în vederea validării analizelor numerice realizate cu metoda elementelor finite.

În cadrul *capitolului 6 – “Modelarea și analiza cu elemente finite a încercărilor mecanice din materiale compozite”*, a fost realizată o serie de analize numerice menite să verifice corelarea rezultatelor simulărilor cu elemente finite cu rezultatele obținute experimental. Rezultate identificate arată următoarele aspecte:

18. Prin abordarea fiecărui tip de încercare experimentală în parte (tracțiune, compresiune, încovoiere), a fost realizată o validare preliminară a comportării mecanice a materialelor compozite studiate, rezultatele fiind satisfăcătoare în ceea ce privește eroarea determinată.

Capitolul 7 – “Fabricația și încercarea experimentală a palei anticuplu din materiale compozite. Validarea analizelor numerice specifice” prezintă principalele etape parcurse pentru realizarea practică a palei anticuplu și încercarea ei, astfel încât, să poată fi realizată o analiză comparativă în raport cu pala reală. Principalele aspecte care se pot concluziona sunt:

19. Fabricația palei a reprezentat un proces minuțios și de durată, având la bază numeroase cunoștințe tehnice, cu caracter practic. Procesul de fabricația a fost special adaptat pentru a obține prototipul palei compozite la scara 1:3, fiind necesare multiple accesorii de fabricație, realizate special pentru acest scop (matrițe, modele pentru ajustare etc.)
20. Din analiza comparativă a simulărilor numerice efectuate pentru pala anticuplu în varianta metalică, cât și în varianta fabricată din materiale compozite, a reieșit faptul că, înlocuirea aliajelor din aluminiu cu materialele compozite propuse oferă o rezistență sporită la solicitările aerodinamice.
21. Prin comparație cu pala metalică, procesul de fabricație a palei compozite presupune un nivel de complexitate mai redus, fiind implicate mai puține echipamente și dispozitive speciale.
22. Încercarea experimentală, prin aplicarea în plan vertical a unei forțe excentrice la extremitatea liberă, a reprezentat testul final care a validat modelul numeric al palei compozite, putând fi utilizat în simulări numerice viitoare, pentru evaluarea performanțelor.

8.3 Contribuții și perspective

Teza de doctorat “*Studiul teoretic și experimental privind tranziția palei anticuplu a elicopterului IAR330 către o configurație constructivă compozită*” a avut ca principal obiectiv determinarea pe cale experimentală a unei soluții constructive viabile, fabricată din materiale compozite, pentru a moderniza pala anticuplu a elicopterului, crescând gradul de fiabilitate, precum și nivelul de siguranță zborului.

Prin activitatea de cercetare științifică efectuată, atât la nivel teoretic, cât și la nivel practic, se pot deduce următoarele **contribuții personale**, referitoare la creșterea performanțelor palei anticuplu a elicopterului IAR330:

- a) Realizarea unui studiu bibliografic referitor la materialele compozite utilizate în construcția palelor de elicopter, din perspectiva naturii, a modului de fabricație și a proprietăților fizice generale, în vederea cercetării compatibilității dintre elementele constituente ale materialele compozite utilizate în cadrul palei.

- b) Sintetizarea principalelor metode de fabricație a materialelor compozite, precum și a soluțiilor constructive identificate pentru pale compozite similare aflate în exploatare.
- c) Analiza numerică (CFD) de tip bidimensional și tridimensional pentru studiul curgerii aerodinamice în jurul palei anticuplu anticuplu, poziționată la diferite incidente din intervalul practic de orientare în exploatare ($2,5^{\circ}$ ÷ $-15,5^{\circ}$), precum și pentru diferite viteze ale aerului.
- d) Utilizarea tunelului aerodinamic pentru validarea presiunilor obținute prin intermediul analizelor numerice, pe un model geometric al palei realizat la scară reală și special prelucrat pentru a permite instalarea accesoriilor de măsurare a presiunilor pe suprafața exterioară a învelișului.
- e) Studiul caracterului ortotrop al materialului extrudat termoplastic, în vederea determinării orientării optime pentru preluarea încărcărilor aerodinamice.
- f) Realizarea unei analize comparative privind încercarea la tracțiune a unui material compozit laminat realizat din țesătură din fibre de carbon și rășină epoxidică, pentru corelarea efectelor constatate la nivel microscopic (material unilaminar) și la nivel macroscopic (material multilaminar).
- g) Realizarea unei structuri hibride din punct de vedere al tehnicii de fabricație, conținând materiale compozite laminate și materiale realizate prin fabricație aditivă.
- h) Stabilirea soluției constructive avantajoase de fabricație a palei compozite, păstrând caracteristicile geometrice exterioare ale palei anticuplu inițiale.
- i) Realizarea unei metodologii de fabricație a palelor compozite prin metoda “hand lay-up”, care poate fi reutilizată pentru fabricația unor pale viitoare.
- j) Realizarea palei compozite la scara 1:3 și încercarea experimentală a aceste prin aplicarea unei forțe la extremitatea liberă, folosind celula de forță a echipamentului INSTRON și un dispozitiv de încastrare special conceput pentru acest scop.
- k) Realizarea unei analize comparative a unor structuri de tip fagure cu celule hexagonale, realizată din filament de polietilenă clorinată ranfosată cu microfibre de carbon, pe de o parte, și din aliaj de aluminiu 5052 tip NIDA, pe de altă parte.

Având în vedere realizările curente ale prezentei teze de doctorat, pot fi evidențiate următoarele **perspective de cercetare** numerică și experimentală, în vederea aprofundării temei curente și pentru stabilirea aeronavigabilității palei compozite:

- a) Realizarea analizelor numerice necesare pentru simularea fidelă a condițiilor de zbor întâlnite în cadrul regimului de zbor la punct fix, precum și în cadrul regimului de zbor cu înaintare.
- b) Integrearea în structura palei compozite a unor senzori polimerici de înaltă precizie, în vederea monitorizării stării de integritate structurală a palei și pentru identificarea imediată a deteriorărilor suferite pe timpul exploatării.
- c) Îmbunătățirea procesului de fabricație prin utilizarea unei pompe cu vacuum pentru infuzia uniformă a rășinii în structura internă a palei compozite.
- d) Extinderea metodologiei pentru încercarea palei compozite, prin aplicarea forței excentrice în vederea studierii rezistenței la oboseală.
- e) Parcurgerea etapelor impuse de reglementările specifice Autorității Aeronautice Militare Naționale (A.A.M.N.), în vederea obținerii certificării de calitate pentru catalogarea palei anticuplu din materiale compozite ca produs aeronavigabil.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Timoshenko, S. P., *History of Strength of Materials*, Dover Publications Inc., New York, 2019, ISBN-13: 978-0-486-61187-7.
- [2] <https://www.owenscorning.com>, accesat la data de 14.05.2022 ora 18.30.
- [3] <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/industries/aviation-aerospace>, accesat la data de 16.05.2022 ora 14.20.
- [4] <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/02/Material-evolution.html>, accesat la data de 16.05.2022 ora 18.00.
- [5] Federal Aviation Administration - AMT Airframe Handbook Volume 1 (FAA-H-8083-31), ISBN-13: 978-1548241834.
- [6] Ghobadi, A., *Common Type of Damages in Composites and Their Inspections*, World Journal of Mechanics, 2017, vol. 07, pag. 24-33.
- [7] http://www.appropedia.org/Composites_in_the_Aircraft_Industry, accesat la data de 17.05.2022 ora 10.00.
- [8] Hadăr, A., *Structuri din compozite stratificate*, Editura Academiei și Editura AGIR, București, 2002, ISBN 973-27-0961-8 și ISBN 973-8466-25-3
- [9] Baker, A. A., Scott, M., *Composite Materials for Aircraft Structures*, AIAA - American Institute of Aeronautics, ISBN: 9781624103261.
- [10] Gunkler, A., Archibald, M. C., *Composite Propeller Construction*, 2011 ASEE NC & IL/IN Section Conference, 2011.
- [11] Hou, W., Zhang, W., *Advanced Composite Materials defects/damages and health monitoring*, Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing), pp. 1-5, Beijing, 2012.
- [12] Amafabia, D. M., Montalvão, D., David-West, O., Haritos, G., *A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite Structures*, Structural Durability & Health Monitoring Journal, vol. 11(2), 2017.
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Spar_\(aeronautics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Spar_(aeronautics)), accesat la data de 26.05.2022 ora 14.00.
- [14] Kovalovs A., Barkanov E., Rucevskis S., Wesolowski M., *Optimisation Methodology of a Full-Scale Active Twist Rotor Blade*, 16th Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat'2016, Riga, Latvia, 19-22 October, 2016.
- [15] Rasuo B., Full-Scale Fatigue Testing of the Helicopter Blades from Composite Laminated Materials in the Development Process, Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 19(5), October 2009.
- [16] Pflumm, T., Rex, W., Willem RexManfred HajekManfred Hajek, Propagation of Material and Manufacturing Uncertainties in Composite Helicopter Rotor Blades, 45th European Rotorcraft ForumAt: Warsaw, September 2019
- [17] Miller M., Narkiewicz J., Kania W., Czechyra T., The application of helicopter rotor blade active control systems for noise and vibration reduction and performance, Materials Science, 2006.
- [18] ISO/ASTM 52900:2015, Additive manufacturing - General principles – Terminology.
- [19] Voicu, A.-D., Hadăr, A., Vlăsceanu, D., *Benefits of 3D printing technologies for aerospace lattice structures*, Scientific Bulletin of Naval Academy, Vol. XXIV 2021, pg.8-16, ISSN: 2392-8956, dată publicare: 22.07.2021, doi: 10.21279/1454-864X-21-II-001.
- [20] Manualul de zbor al elicopterului IAR330 emis de Societatea IAR S.A. Brașov.
- [21] Baker, C., Johnson, T., Flynn, D., Hemida, H., Quinn, A., Soper, D., Sterling, M., *Train Aerodynamics*, ISBN 9780128133101, 2019.
- [22] http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIScBANG/Composite%20Materials/pdf/Lecture_Notes/LNm1.pdf, accesat la data de 30.06.2022 ora 15.00.
- [23] <https://www.flight-mechanic.com/helicopter-flight-conditions-part-one/>, accesat la data de 10 februarie 2022.
- [24] Bramwell, A.R.S., *Helicopter Dynamics*, Edward Arnold Ltd., London, 1976.

- [25] G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, June 2012, ISBN: 9780511800955.
- [26] Aydın, N., Çalışkan, M.E., Karagoz, I., *Numerical Simulation of Flow Over Different Types of Airfoils*, 8th International Conference on Advanced Technologies, ICAT 2019.
- [27] ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [28] ASTM C365, Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores.
- [29] ASTM D790, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- [30] Fișă date tehnice oferită de producătorul Fillamentum Industrial pentru filamentul CPE CF112 Carbon.
- [31] Fișă date tehnice oferită de producătorul Torayca Carbon Fibers America Inc. pentru materialul T300.
- [32] Fișă date tehnice oferită de producătorul Derakane pentru rășina epoxidică Momentum 470-300.
- [33] Fișă date tehnice oferită de producătorul Castro Composites pentru țesătura GG285T.
- [34] Hadăr, A., Baci, F., **Voicu, A.-D.**, Vlăsceanu, D., Tudose, D. I., Adetu, C., *Mechanical Characteristics Evaluation of A Single Ply and Multi-Ply Carbon Fiber-Reinforced Plastic Subjected to Tensile and Bending Loads*, *Polymers* 2022, 14, 3213, ISSN 2073-4360, <https://doi.org/10.3390/polym14153213>, Factor de impact - 4.967, clasificare Scopus - Q1 pe domeniul "Polymer Science".
- [35] **Voicu, A.-D.**, Hadăr, A., Vlăsceanu, D., *Aspects regarding interlaminar stress distribution on the composite laminated skin of a tail rotor blade exposed to aerodynamic forces*, Vol. 12, no. 1, 2020, *Annals Series on Engineering Sciences*, ISSN: 2066-8570.
- [36] **Voicu, A.-D.**, Hadăr, A., Vlăsceanu, D., *Improving the Mechanical Behavior of a Helicopter Tail Rotor Blade Through the Use of Polyurethane Foams*, *Revista de Chimie (Rev. Chim.)*, Year 2019, Volume 70, Issue 11, 4123-4127, dată publicare: 15.12.2019, ISSN: 2668-8212, <https://doi.org/10.37358/RC.70.19.11.7716>.
- [37] **Voicu, A.-D.**, Hadăr, A., Vlăsceanu, D., Tudose, D. I., *Vibrational Study of a Helicopter Tail Rotor Blade with Different Polymer Inner Core Materials*, *Materiale Plastice (Mater. Plast.)*, Year 2020, Volume 57, Issue 2, 169-178, dată publicare: 01.07.2019, ISSN: 2668-8220, <https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5363>.
- [38] **Voicu, A.-D.**, Hadăr, A., Pastramă, Ș., Vlăsceanu, D., *SHM Monitoring Methods and Sensors with Applications to Composite Helicopter Blades: A Review*, *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series, Sciendo*, 2020, dată publicare: 01.12.2020, ISSN: 1583-7149.