

Universitatea Transilvania din Brașov

# **TEZĂ DE ABILITARE**

### CERCETĂRI PRIVIND FIABILITATEA, TESTAREA ACCELERATĂ ȘI FABRICAREA ADITIVĂ A PRODUSELOR INDUSTRIALE

Domeniul: Inginerie industrială

Autor: Șef lucrări. dr. ing. Sebastian-Marian Zaharia Universitatea Transilvania din Brașov

**BRAŞOV, 2020** 

#### CUPRINS

ista de notații	2
ista de abrevieri	4
. Summary	5
1. REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE	8
B1.1. Realizări științifice	8
Capitolul 1. Aspecte teoretice referitoare la fiabilitatea experimentală	. 8
Capitolul 2.Cercetări experimentale privind fiabilitatea și testarea accelerată produselor industriale	<b>a</b> 17
2.1. Fiabilitatea și testarea accelerată a rulmenților radiali cu bile	17
2.2. Metodologia de estimare a duratei de viată la oboseală și de validare	a
testelor accelerate	25
Capitolul 3.Cercetări experimentale privind testarea accelerată și fiabilitatea structurilo	or
sandwich ușoare, fabricate din materiale compozite.	36
<ol> <li>Evaluarea fiabilității și duratei de viață a structurilor sandwich, supus testelor accelerate</li> </ol>	е 36
3.2. Performantele structurilor sandwich, cu învelis din fibră de carbon s	si
miez balsa, supuse testelor accelerate	50
3.3. Evaluarea performantelor mecanice si a indicatorilor de fiabilitate	а
structurilor sandwich, cu învelis din fibră de carbon și miez de fagur	e
Nomex, supuse testelor accelerate	. 64
3.4. Studiu comparativ privind performantele mecanice și indicatorii d	e
fiabilitate ai structurilor sandwich, cu diferite tipuri de învelișuri di	n
, materiale compozite, cu matrice polimerică ranforsată, cu tesătură di	n
fibră de sticlă și miez de fagure Nomex	. 74
Capitolul 4.Cercetări experimentale privind fabricarea prin procedee aditive	a
structurilor sandwich ușoare	89
4.1 Cercetări privind fabricarea prin topire selectivă cu laserul a miezulu	ii
structurilor sandwich ușoare	89
4.2 Efectul tratamentului termic de omogenizare asupra proprietățilo	or
mecanice ale structurilor sandwich, fabricate prin topire selectivă c	u
laserul, din Inconel 718	. 97
4.3 Designul, analiza performanțelor și testarea structurilor sandwich	۱,
fabricate prin procedeul de extrudare termoplastică	110
oncluzii și contribuții personale	128
B1.2. Realizări profesionale	134
2.2 PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE ALE CARIEREI	142
3 BIBLIOGRAFIE	. 145

### LISTA DE NOTAȚII

R(t)	Funcția de fiabilitate;
F(t)	Funcția de nonfiabilitate;
f(t)	Densitatea de probabilitate a timpului de funcționare;
λ(t)	Rata de defectare;
Pr	Probabilitatea evenimentului;
Δt	Mărimea intervalului;
m	Media timpului de funcționare;
D	Dispersia timpului de funcționare;
S	Abatere standard;
CV	Coeficientul de variație;
β	Parametrul de formă, specific repartiției Weibull;
η	Parametrul de scară, specific repartiției Weibull;
$A_F$	Factorul de accelerare;
Lu	Durata de viață în regim normal de testare;
La	Durata de viață în regim accelerat de testare;
L(V)	Durata de viață specifică modelului IPL-Weibull;
V	Nivelul de solicitare specific modelului IPL-Weibull;
k	Primul parametru caracteristic modelului IPL-Weibull;
n	Cel de-al doilea parametru caracteristic modelului IPL-Weibull;
Г	Funcția Gamma;
B10	Parametrul care indică timpul până la care 10% din produse sunt defecte;
$R_{sn}(t)$	Funcția de fiabilitate în regim normal de testare;
R <sub>sa</sub> (t)	Funcția de fiabilitate în regim accelerat de testare;
a(ω)	Funcția de accelerare;
$\beta_n$	Parametrul de formă în regim normal de testare;
$\beta_a$	Parametrul de formă în regim accelerat de testare;
$\eta_n$	Parametrul de scară în regim normal de testare;
$\eta_a$	Parametrul de scară în regim accelerat de testare;
G	Constantă determinată experimental, specifică funcției de accelerare;
q	Constantă determinată experimental, specifică funcției de accelerare;
L	Lungimea specimenului sandwich;

d	Grosimea specimenului structurii sandwich;
b	Lățimea specimenului structurii sandwich;
S	Distanța dintre reazeme;
С	Grosimea miezului structurii sandwich;
f	Grosimea învelișului structurii sandwich;
Р	Forța de încărcare;
g	Panta dreptei care aproximează datele experimentale pe porțiunea liniară a
	curbei caracteristice tensiune – deformație;
$\sigma_{b}$	Rezistența la încovoiere;
E <sub>b</sub>	Modulul de elasticitate la încovoiere;
$ au_{csu}$	Rezistența ultimă (limită) la forfecare a miezului;
$ au_{cy}$	Tensiunea la curgere la forfecare a miezului;
$\sigma_{\mathrm{f}}$	Rezistența la încovoiere a învelișului;
$P_{\hat{1}r}$	Forța maximă înainte de rupere;
Py	Forța maximă la care apare deformația de 2%;
R	Coeficient de asimetrie;
a <sub>cu</sub>	Rezistența la impact;
Ec	Energia consumată pentru ruperea specimenului;
UCL	Limita de control superioară;
LCL	Limita de control inferioară;
$\sigma_c$	Rezistența la compresiune;
Ec	Modulul de elasticitate la compresiune;
Pc	Încărcarea maximă la compresiune;
Ac	Suprafața secțiunii transversale a specimenului sandwich;
D <sub>c</sub>	Dimensiunea celulei hexagonale (fagure);
а	Dimensiunea laturii hexagonale (fagure);
t <sub>c</sub>	Grosimea peretelui celulei hexagonale (fagure).

#### LISTA DE ABREVIERI

AFNOR	Asociația Franceză de Normalizare (Association Française de Normalisation);				
ISO	Organizația Internațională de Standardizare (International Organization for Standardization);				
pdf	Densitatea de probabilitate a timpului de funcționare (probability density function);				
IPL	Modelul Puterii Inverse (Inverse Power Law);				
GFRP	Material compozit cu matrice polimerică ranforsată cu țesătură din fibră de sticlă (Glass Fiber Reinforced Plastic);				
CFRP	Material compozit cu matrice polimerică ranforsată cu țesătură din fibră de carbon (Carbon Fiber Reinforced Plastic);				
3D	Tridimensional;				
CF - Nomex	Structură sandwich cu înveliș din fibră de carbon și miez de fagure Nomex;				
GF – Nomex	Structură sandwich cu înveliș din fibră de sticlă și miez de fagure Nomex;				
SLA	Stereolitografie (Stereolithography);				
FFF/FDM	Procedeul de fabricație prin extrudare termoplastică (Fused Filament				
	Fabrication/ Fused Deposition Modeling);				
SLS	Sinterizare selectivă cu laserul (Selective Laser Sintering);				
SLM	Topire selectivă cu laserul (Selective Laser Melting) ;				
LOM	Fabricarea stratificată prin Iaminare (Laminated Object Manufacturing) ;				
ENEA	talian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable				
	Economic Development;				
NaCl	Clorură de sodiu;				
SSÎP	Structură Sandwich cu Înveliș Perforat;				
SSMP	Structură Sandwich cu Miez Perforat;				
SSÎP-T	Structură Sandwich Tratată Termic cu Înveliș Perforat;				
SSMP-T	Structură Sandwich Tratată Termic cu Miez Perforat;				
SSÎP-NT	Structură Sandwich Netratată Termic cu Înveliș Perforat;				
SSMP-NT	Structură Sandwich Netratată Termic cu Miez Perforat;				
HV	Duritate Vickers (Vickers Hardness);				
PLA-PHA	Acid Polilactic/Polihidroxialcanoat (Polylactic Acid/ Polyhydroxyalkanoate);				
PVA	Alcool polivinilic (PolyVinyl Alcohol)				
NACA	Comitetul Național Consultativ pentru Aeronautică (National Advisory				
	Committee for Aeronautics);				
MEF	Metoda elementelor finite.				

#### A. Summary

The paper presents the author's scientific and professional results, published after obtaining his doctorate in the field of Industrial Engineering in 2010, with the doctorate thesis **Theoretical and experimental research regarding accelerated reliability testing** (scientific advisor: Prof. Dr. Eng. Ionel MARTINESCU).

The habilitation thesis, entitled **Research on the reliability, the accelerated testing and the additive manufacturing of industrial products**, represents a synthesis of the scientific results, published in two research directions: the study of reliability of industrial products and the fabrication of lightweight sandwich structures by additive manufacturing processes (selective laser melting and thermoplastic extrusion).

The current habilitation thesis, entitled **Research on the reliability, the accelerated testing and the additive manufacturing of industrial products**, comprises 3 sections. In the first section, the scientific and professional achievements were emphasized, which represent the main results obtained by the author of the habilitation thesis over the course of the past 10 years. In the second section, the growth and development plans for the teaching, scientific and professional career were presented. The habilitation thesis ends with the third section, which presents a list of the references used in this paper.

**Section B1**, entitled **SCIENTIFIC AND PROFESSIONAL ACHIEVEMENTS**, is structured in two subsections, as follows:

Subsection B1.1, Scientific achievements, is structured in 4 chapters, as follows:

**Chapter 1,** entitled **Theoretical aspects regarding experimental reliability**, presents briefly the current state of research regarding experimental reliability, applied on industrial products. In this chapter the calculation relations of the reliability indicators, that were frequently used in the experimental studies in this habilitation thesis, were presented. A couple of theoretical aspects regarding accelerated testing were also included here (advantages, classification, acceleration models).

In **Chapter 2**, entitled **Experimental research regarding the reliability and accelerated testing of industrial products**, two case studies regarding the accelerated testing of industrial products were presented.

The first case study (subchapter 2.1) refers to the testing and statistical processing of data resulted from accelerated tests. This tests were used to determine the life time and the main reliability indicators of the radial ball bearings.

The second study (subchapter 2.2) comprises an experimental research regarding the testing of pitch links using accelerated fatigue testing. The data obtained from the accelerated tests were statistically processed, pointing out a series of advantages provided by this testing technique.

**Chapter 3**, entitled **Experimental research on the accelerated testing and the reliability of lightweight sandwich structures made from composite materials**, presents four case studies regarding the accelerated testing of composite sandwich structures.

The first case study (subchapter 3.1) is dedicated to determining the mechanical performances and the reliability indicators of the sandwich structures with fiberglass skin and foam core, subjected to three-point bending tests, in static and dynamic regime.

The second case study (subchapter 3.2) describes the accelerated testing of the sandwich specimens with carbon fiber skin and balsa wood core. The results of the accelerated tests were statistically processed and the reliability indicators of the sandwich specimens for normal testing regime were determined. At the same time, the failure modes of the sandwich structures, subjected to three-point bending point tests in static and dynamic regime, were microscopically analyzed.

The third case study (subchapter 3.3) focuses on the testing and the processing of data obtained from the accelerated tests of the composite sandwich structures. The reliability indicators of the specimens with carbon fiber skin and Nomex honeycomb core were also determined.

The last case study of this chapter contains a research on the testing of sandwich specimens with fiberglass skin and Nomex honeycomb core, to which accelerated fatigue testing techniques were applied. The results of the accelerated fatigue testing were statistically processed, pointing out a number of advantages provided by this type of tests.

**Chapter 4** of the habilitation thesis, entitled **Experimental research on the manufacturing by additive processes of the lightweight sandwich structures**, comprises three case studies regarding the fabrication of the sandwich structures by using additive manufacturing processes.

In the first case study (subchapter 4.1), cellular structures from stainless steel 316L, with honeycomb core, were manufactured through the process of selective laser melting. These cellular structures were tested under compression (plane and on edge), with the purpose of determining the mechanical performances. The cellular structures with honeycomb core were sectioned after a specific direction (perpendicular on the manufacturing direction) and the microhardness was measured. In this case study the accelerated corrosion tests of cellular specimens were also implemented, with the purpose of determining the mean life time under normal testing conditions.

In the second case study (subchapter 4.2) the feasibility of manufacturing through the process of selective laser melting of sandwich structures with honeycomb core, with two configurations (with perforated core and with perforated skin), was proven. The two configurations of sandwich structures, made from Inconel 718, were subjected to heat homogenization treatment. The sandwich structures were compression tested, with the purpose of determining the mechanical performances. The microscopic analysis of both heat and as fabricated specimens, after two directions (perpendicular, as well as parallel on the manufacturing direction) was used, obtaining the microstructures typical of the Inconel 718 material. The analysis of the specimens' microhardness showed an obvious change with the increase of the manufacturing height, both for the as fabricated specimens, as well as for the specimens subjected to the homogenization treatment. The failure modes of specimens subjected to compression testing were validated through finite element analysis.

The third case study approached the manufacturing of sandwich structures with three core configurations (honeycomb, diamond and corrugated) through the process of thermoplastic extrusion from the PLA-PHA material. The three specimen configurations were subjected to three types of tests: compression, three-point bending and tensile. The failure modes were investigated using macroscopic analysis. Similarly, the tested specimens were analyzed from the standpoint of the strength-to-mass ratio. Also, the experimental tests at three-point bending were validated using the finite element method. The three core types (honeycomb, diamond and corrugated) were used for the manufacturing through thermoplastic extrusion and the impact testing of some leading edge wing specimens.

**Subsection B1.2, Professional achievements**, encompasses the accomplishments of the author of the habilitation thesis in the following three directions: studies and professional experience, teaching activity and scientific research.

**Section B2** of the habilitation thesis, entitled **Career growth and development plans**, is dedicated to presenting the growth and development plans in the following three directions: teaching career, scientific career and professional career.

Section B3, entitled References, contains a list of the references used in this habilitation thesis.

The scientific results presented in this habilitation thesis are based on 9 papers (8 of them published in ISI journals), published by the author of the habilitation thesis after obtaining his doctorate. The results obtained during the research projects, where he activated as a director or as a member, constituted the basis for publishing these important studies in ISI indexed journals.

#### B1. REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE

#### B1.1. REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE

#### CAPITOLUL 1. ASPECTE TEORETICE REFERITOARE LA FIABILITATEA EXPERIMENTALĂ

Domeniul fiabilității s-a dezvoltat din necesitățile practicii industriale, odată cu evoluția tehnici și prezintă o sferă vastă de probleme teoretice și experimentale, care cuprind principalele faze de dezvoltare ale unui produs industrial: concepție - proiectare, fabricație - execuție și utilizare - exploatare.

"Fiabilitatea ilustrează aptitudinea unui produs de a îndeplini o funcție specificată în condiții de funcționare date, de-a lungul unei perioade de timp determinate" (conform standardului AFNOR X60-500). În conformitate cu standardul ISO 8927:1991, fiabilitatea reprezintă probabilitatea ca un produs să îndeplinească o funcție specificată în condiții definite și într-o perioadă definită, ceea ce este același lucru cu definiția precedentă, având în vedere faptul că fiabilitatea se exprimă printr-o probabilitate.

Fiabilitatea intră într-un nou stadiu de evoluție odată cu apariția avioanelor supersonice, cu începuturile explorării spațiului, cu dezvoltarea electronicii și a centralelor nucleare, precum și cu diversificarea aparatelor de uz casnic. Ca urmare, a fost realizat un număr impresionat de cercetări, de lucrări și de tratate de specialitate, consacrate diferitelor aspecte ale fiabilității și ale domeniilor concrete de aplicare, care aprofundează termenul de știință, conferit fiabilității. Nu în ultimul rând se poate sublinia contribuția pe care software-ul specific și de înaltă performanță a adus-o, și o aduce în prezent la dezvoltarea fiabilității produselor industriale. În figura 1.1 au fost descrise o serie de obiective importante care sunt vizate în studiile de fiabilitate [MAR95, CĂT83].



#### Fig.1.1. Principalele obiective ale fiabilității [MAR95]

Fiabilitatea produselor industriale se stabilește încă din faze timpurii de dezvoltare (proiectare) prin soluția constructivă adoptată. Fiabilitatea se poate exprima în mai multe moduri (Tabelul 1.1).

	Reprezintă fiabilitatea obținută din rezultatele privind		
Fiabilitate previzională	funcționarea produselor similare sau din estimări		
(preliminată, predictivă, proiectată)	specifice domeniului fiabilistic. Acest tip de fiabilitate		
	se obține în faza de design a produsului industrial.		
	Reprezintă fiabilitatea obținută în urma testelor		
Fiabilitate experimentală	realizate în laboratoare de fiabilitate, unde se creează		
(de laborator)	condiții similare cu cele din exploatarea produselor		
	industriale.		
	Constituie fiabilitatea unui produs, determinată pe		
Fiabilitate operațională (din	baza urmăririi statistice a comportării în exploatare a		
exploatare)	unui eșantion de produse industriale, cu caracteristici		
	identice, pe o perioadă determinată de timp.		
Fiabilitatea intrinsecă	Redă fiabilitatea unui produs, bazată pe conexiunea		
	dintre solicitarea aplicată și rezistența produsului		
	analizat. Acest tip de fiabilitate este stabilită la		
	oncepția produsului și este înglobată în fiabilitatea		
	previzională.		
Fiabilitatea extrinsecă	Reflectă fiabilitatea determinată pe baza prelucrării		
	datelor eşantioanelor analizate sau analitic, prin		
	intermediul indicatorilor de fiabilitate.		
Fiabilitatea nominală	Constituie fiabilitatea înscrisă în documentațiile		
	tehnice (standarde, norme, contracte) ale produsului.		
Fiabilitatea estimată	Reprezintă fiabilitatea unui produs, determinată		
	punctual sau pentru un interval de încredere dat, pe		
	baza rezultatelor provenite din testele de laborator		
	sau din exploatare.		

#### Tabelul 1.1. Clasificarea fiabilității [MAR95, PAN03]

Într-un univers confruntat cu racordarea la soluții constructive și economice din ce în ce mai optimizate, trebuie să se acorde o importanță deosebită exigențelor de securitate ale acestor soluții [ZAH18a]. Acest deziderat este impus de variabilitatea aspectelor care concură la realizarea unui produs (materiile prime și materiale, calitatea proiectelor, factorii tehnologici, factorii legați de conservare și depozitare, factorii aferenți exploatării și service-ului etc.)

Domeniul fiabilității este unul costisitor, deoarece presupune cercetare avansată, utilizarea materialelor și produselor testate, mână de lucru calificată, programe de control și analiză

statistică a datelor experimentale complexe. Nivelul optim al fiabilității se poate stabili ținând seama de aspectele economice, de cât de mult este dispusă o companie să plătească pentru a obține un produs fiabil, cu o durată de viață mare sau este mai rentabil să se plătească mai puțin la început, pentru un produs la fel de fiabil, cu o durată de viață mai scurtă, dar care să poată fi înlocuit cu altul nou, mai bun, realizat cu tehnologii moderne, înlocuire realizată după un program riguros stabilit [ZAH12].

Cu ajutorul indicatorilor de fiabilitate, se poate exprima cantitativ fiabilitatea sau o caracteristică a acesteia. În domeniul fiabilității produselor industriale, niciunul dintre indicatorii de fiabilitate nu poate cuantifica total fiabilitatea, dar pot estima o caracteristică a acesteia. Prin intermediul indicatorilor de fiabilitate, se pot efectua următoarele activități: realizarea unor calcule privind fiabilitatea produselor, compararea fiabilității diverselor produse, fundamentarea cerințelor de fiabilitate impuse produselor, analiza influenței diverșilor factori asupra fiabilității produselor [MAR95].

*Funcția de fiabilitate, notată R(t),* reprezintă probabilitatea P, ca un produs să-și îndeplinească funcția specificată până la momentul T, fără defecțiuni, în intervalul (O, t), prescris, în condiții de funcționare date (se presupune că produsul a fost pus în funcționare la t=0). Expresia funcției de fiabilitate este [MOR17]:

$$R(t) = Pr(T > t).$$
 (1.1)

*Funcția de nonfiabilitate, notată F(t),* reprezintă complementara funcției de fiabilitate și este definită ca probabilitatea de defectare a produsului în intervalul (0, t) și pune în evidență lipsa de fiabilitate a produsului supus testării. Ea are următoarea expresie [ZAH19a]:

$$F(t) = Pr(T \le t) = \int_{0}^{t} f(t)dt.$$
 (1.2)

Densitatea de probabilitate a timpului de funcționare, notată f(t), reprezintă, prin definiție, limita raportului dintre probabilitatea de defectare în intervalul  $(t, t + \Delta t)$  și mărimea intervalului, când  $\Delta t \rightarrow 0$ , și are următoarea relație [MAR95, ZAH12]:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{Pr(t < T < t + \Delta t)}{\Delta t}$$
(1.3)

În statistică, indicatorul densitate de probabilitate a timpului de funcționare reprezintă raportul dintre numărul de defectări în unitate de timp și numărul inițial de elemente aflate în experimentare.

*Rata de defectare, notată*  $\lambda(t)$ , reprezintă probabilitatea ca un produs, care a funcționat fără defecțiuni până la momentul t, să se defecteze în intervalul (t, t+ $\Delta$ t). Rata de defectare reprezintă raportul dintre numărul de defectări, care au loc în unitate de timp, la momentul t, și numărul de elemente, care au mai rămas în funcționare la acel moment. Expresia ratei de

defectare este următoarea [MAR95, ZAH12]:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{Pr(t < T < t + \Delta t | T > t)}{\Delta t}.$$
(1.4)

*Media timpului de funcționare, notată m,* reprezintă o caracteristică de fiabilitate, care are o largă utilizare în practica inginerească. Atunci când variația timpului de funcționare se exprimă printr-o formă analitică, valoarea mediei timpului de funcționare se calculează cu relația [MAR95, MOR18, ZAH12]:

$$m = \int_0^\infty t \cdot f(t) \cdot dt.$$
(1.5)

*Dispersia timpului de funcționare, notată D,* reprezintă un indicator utilizat pentru estimarea împrăștierii timpului de funcționare în jurul valorii sale medii. În cazul în care timpul de funcționare prezintă o distribuție continuă, dispersia timpului de funcționare se determină cu relația [MAR95, MOR18, ZAH12]:

$$D = \int_0^\infty (t - m)^2 \cdot f(t) \cdot dt.$$
 (1.6)

*Abaterea medie pătratică a timpului de funcționare, notată*  $\sigma$ , reprezintă un indicator utilizat pentru compararea legilor de distribuție a timpului de funcționare. Prin definiție, abaterea medie pătratică are expresia [MAR95, ZAH17a]:

$$s = \sqrt{D} = \sqrt{\int_0^\infty (t \cdot m)^2 \cdot f(t) \cdot dt}.$$
(1.7)

În practica statistică, de multe ori, se utilizează, în locul abaterii medii pătratice a timpului de funcționare, noțiunea de *abatere standard*.

Deși abaterea standard se exprimă în aceleași unități de măsură ca și valoarea medie, valoarea sa absolută nu reflectă gradul de dispersie al variabilei aleatoare cu respectarea valorii medii. Pentru a reflecta acest aspect, se utilizează un indicator adimensional, numit coeficientul de variație, determinat cu relația [ZAH12]:

$$CV = \frac{s}{m} \cdot 100\% \tag{1.8}$$

O valoare mică a coeficientului de variație reflectă un grad scăzut de incertitudine a variabilei aleatoare, iar o valoare ridicată a acestuia, un grad ridicat de incertitudine. În problemele de inginerie, valoarea coeficientului de variație trebuie să fie mai mică de 30%, pentru ca eșantionul analizat să fie omogen și valoarea medie să fie reprezentativă pentru acesta [ZAH12].

Între principalii indicatori de fiabilitate, se pot stabili o serie de relații de dependență (tabelul 1.2).

Indicator		Exprimat îı	n funcție de:	
de	F(t)	f(t)	R(t)	$\lambda(t)$
fiabilitate				
F(t)	F(t) $f(t)$ $ \int_{0}^{t} f(t) \cdot dt$ $ \int_{0}^{t} f(t) \cdot dt$ $\frac{dF(t)}{dt}$ $ 1 - F(t)$ $\int_{t}^{\infty} f(t) \cdot dt$		1-R(t)	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt}$
f(t)	$\frac{dF(t)}{dt}$	-	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt}$
<i>R</i> ( <i>t</i> )	1-F(t)	$\int_{t}^{\infty} f(t) \cdot dt$	_	$e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt}$
$\lambda(t)$	$\frac{1}{1-F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(t) \cdot dt}$	$-\frac{1}{R(t)}\cdot\frac{dR(t)}{dt}$	-

Tabelul 1.2. Relații între principalii indicatori de fiabilitate [MOR18]

În zilele noastre, nu se mai pot fabrica produse industriale, fără a avea parte de un control sever asupra caracteristicilor de fiabilitate și calitate, utilizând diverse tipuri de încercări, încă din etapele timpurii de fabricare. Între testele realizate de către laboratoarele industriale, se găsesc și testele de fiabilitate. Aceste laboratoare dețin standuri de testare moderne și personal calificat și certificat să realizeze aceste tipuri de teste. În prezent, majoritatea companiilor industriale dispun de laboratoare de încercări de fiabilitate, certificate, astfel încât să ofere o testare cât mai reală a produselor fabricate.

În mod tradițional, analiza comportării în exploatare a produselor se face pe baza duratelor de viață ale acestora, obținute prin urmărirea funcționării, în condiții normale de utilizare. În numeroase situații, însă, deducerea duratei de viață a produselor, într-un interval rezonabil de timp, este dificilă sau chiar imposibil de obținut, din diferite motive, cum ar fi [ZAH19a]:

- durata de viață foarte lungă, în cazul produselor cu fiabilitate ridicată, care, în unele situații, poate fi de ordinul anilor;
- timpul foarte redus între proiectare şi lansarea în fabricație a produselor industriale;
- schimbarea continuă a condițiilor de testare, în care se utilizează regimuri normale de funcționare etc.

Din cauza acestor dificultăți, practicienii din domeniul fiabilității au generat o serie de metode prin care să accelereze producerea mecanismelor de defectare a produselor, având drept consecință reducerea duratei de testare și obținerea caracteristicilor de fiabilitate. Odată cu trecerea anilor, aceste practici s-au materializat prin teste bine definite, numite **încercări accelerate.** Există o varietate de metode, care sunt incluse sub denumirea de **teste (încercări**) **accelerate**, toate având ca scop final deducerea indicatorilor (caracteristicilor) de fiabilitate a produselor, în condiții normale de testare [ZAH 19a].

Anumite produse industriale prezintă o fiabilitate crescută, iar pentru determinarea duratei de viață și a indicatorilor de fiabilitate, în condiții normale de testare, se prevede o durată îndelungată de încercare. De aceea, tehnicile de testare accelerată reprezintă o soluție pentru determinarea indicatorilor de fiabilitate, în condiții de eficiență economică. Aceste tehnici de testare accelerată sunt realizate la niveluri de solicitare mai intense, în comparație cu nivelul normal de testare, cu scopul intensificării proceselor de degradare a produselor industriale. Testele accelerate determină o reducere a duratei de testare și a costurilor aferente testării produselor, cu condiția menținerii acelorași moduri de defectare.

Testele accelerate de fiabilitate [KLY20] se pot diviza în două categorii (figura 1.2)



Fig.1.2. Clasificarea testelor accelerate de fiabilitate [ZAH12]

Avantajele încercărilor accelerate se pot raporta prin [ZAH19a]:

- reducerea timpului de testare: dacă la utilizarea testelor în regim normal de testare, pentru defectarea anumitor produse se poate aştepta o perioadă lungă de timp, testele accelerate pot reduce de 3-50 de ori timpul de testare;
- timpul de lansare pe piață al produselor va fi mai mic, deoarece pentru testarea și omologarea produselor nu se mai așteptă perioade lungi de timp;
- costuri de dezvoltare şi de fabricație ale produselor mai scăzute, deoarece în faza de prototip, acestea sunt testate rapid, scoțând în evidență o serie de defecte, care pot fi corectate prin acțiuni corective corespunzătoare. Tot în faza de prototip, se estimează şi durata de viață a produsului testat;
- costuri de garanție mai mici, produsele având o siguranță în funcționare crescută.

Pentru realizarea unei încercări accelerate este necesar să se verifice următoarele ipoteze de bază [REL07]:

- funcționarea produsului în condiții accelerate trebuie să fie însoțită de aceleaşi procese de degradare ca și în condițiile normale. Altfel spus, mecanismele de defectare provocate în condiții accelerate de testare trebuie să fie reprezentative şi pentru condițiile normale de testare;
- condițiile accelerate de testare trebuie să fie acelea care conduc la aceleaşi defectări majore ca și în condițiile reale de testare;
- regimurile de accelerare trebuie să se situeze deasupra limitelor specificate prin documentația tehnică a produsului şi sub limita de distrugere a acestuia (figura 1.3);



Fig. 1.3. Limitele solicitării pentru un produs industrial [REL07]

distribuția duratelor de viață a produselor – pdf (probability density function) – în condiții accelerate de testare, trebuie să prezinte aceeaşi formă cu cea constatată în condiții normale de testare (de exemplu: pentru repartiția Weibull biparametrică, parametrul de formă β va fi acelaşi, iar parametrul de scara η va fi diferit).

Pentru a se înțelege procesul de extrapolare de la regimul accelerat la cel normal de testare, se consideră, de exemplu, un test simplu. În vederea simplificării, se acceptă că un eşantion de produse a fost supus unei singure solicitări la un nivel constant de accelerare, pentru care s-au colectat o serie de date privind duratele de viață. Pe baza acestora, prin prelucrare statistică, specifică, se poate deduce repartiția densității de probabilitate (pdf) și, în consecință, o serie de indicatori de fiabilitate. În mod frecvent, se determină media timpului de funcționare.

Obiectivul încercării accelerate nu este acela de a obține predicții privind comportarea produsului în regim accelerat, ci la alte regimuri, în mod imperios, la cel normal de testare. Încercările accelerate implică măsurarea performanței produsului, în condiții mai severe de solicitare, decât în cazul testării normale, la diferite niveluri de accelerare. După culegerea datelor din regimul accelerat, corespunzătoare diferitelor niveluri de accelerare, utilizând modele matematice specifice, se poate determina durata de viață a produsului în regim normal de testare, materializată printr-o distribuție corespunzătoare.

Pentru efectuarea încercărilor accelerate, se utilizează mai multe modele. Aceste modele de accelerare permit conversia regimurilor de testare accelerată, la regimul normal de testare. Aplicarea lor se face în concordanță cu natura solicitării produselor: tensiune, temperatură, vibrații etc. Pentru claritatea desfăşurării încercării, precum și pentru precizia formulării rezultatelor, încercările accelerate se efectuează, de regulă, prin intensificarea unui singur parametru de testare. Însă se cunosc și încercări accelerate cu mai mulți parametri, de exemplu temperatură și tensiune electrică.

În figura 1.4 au fost descrise principalele categorii de solicitări utilizate la încercarea accelerată a produselor industriale.



Fig. 1.4. Principalele categorii de solicitări utilizate la testele accelerate [ZAH12]

Pentru determinarea valorilor indicatorilor de fiabilitate, se utilizează testele accelerate, realizate pe prototipuri, serie zero sau produs de serie. În acest scop, trebuie stabilite următoarele cerințe (figura 1.5):



Fig. 1.5. Aspecte stabilite la realizarea încercărilor accelerate [ZAH12]

Pentru obținerea *legii de repartiție a duratei de viață* a produselor, în condiții de solicitare normală, este necesar să se utilizeze un *model de accelerare* sau un *model de viață accelerat*, care să permită estimarea legii de fiabilitate în condiții normale, pornind de la datele acumulate în regim accelerat. Există mai multe categorii de modele de accelerare (figura 1.6), și anume [NELO4, KLY20]:



Fig. 1.6. Clasificarea modelelor de accelerare [NELO4]

- *modele experimentale*, la care, pe baza unui plan de testare, se permite studierea efectelor variabilelor aleatoare (factorilor) asupra performanțelor produselor;
- modele fizice, care au în vedere modurile de degradare ale produselor;
- *modele statistice*, care permit estimări parametrice, semi-parametrice sau nonparametrice.

*Factorul de accelerare, notat A<sub>F</sub>,* reprezintă raportul dintre durata de viață a produsului în regim normal de testare, L<sub>u</sub>, și durata de viață în regim accelerat de testare, L<sub>A</sub>:

$$A_F = \frac{L_U}{L_A}.$$
(1.9)

Variația factorului de accelerare depinde de modelul de accelerare considerat (Arrhenius, Invers Power Low, Eyring etc.). În funcție de aceste modele, se deduc diferite expresii ale factorului de accelerare. Din relația (1.9) rezultă că pentru L<sub>u</sub>=L<sub>A</sub>, valoarea factorului de accelerare este egală cu 1. Pe măsura intensificării solicitării, durata de viață a produselor se reduce, iar factorul de accelerare crește. Se poate constata cu uşurință, că durata de viață, în regim normal de testare, este mai mare decât cea în regim accelerat de testare, și anume [YAN 07]:

$$L_U = A_F \cdot L_A. \tag{1.10}$$

Modelele statistice de accelerare [YANO7, NELO4] se utilizează, atunci când conexiunea dintre solicitările aplicate și valorile timpilor de defectare ale produselor sunt dificil de determinat, pornind de la principiile fizice de degradare ale acestora. În acest caz, produsele sunt supuse unor niveluri de solicitare, iar duratele de viață ale acestora sunt utilizate pentru a determina o distribuție corespunzătoare. Legea de repartiție a timpului de funcționare, în regim accelerat de testare, trebuie să fie identică cu cea din regimul normal de testare. În literatura de specialitate, se întâlnește o mare varietate de modele de accelerare, definite pentru diferite categorii de produse și materiale. Dintre acestea, cele mai cunoscute modele sunt următoarele: modelul Arrhenius; modelul Inverse Power Law; modelul Eyring; modelul temperatură-tensiune.

#### <u>CAPITOLUL 2.</u> CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FIABILITATEA ȘI TESTAREA ACCELERATĂ A PRODUSELOR INDUSTRIALE

#### 2.1. FIABILITATEA ȘI TESTAREA ACCELERATĂ A RULMENȚILOR RADIALI CU BILE

#### 2.1.1. Metodologia de testare accelerată a rulmenților

Încercările accelerate de fiabilitate efectuate asupra rulmenților oferă o multitudine de informații referitoare la calitatea materialelor de bază și auxiliare, la proiectarea constructivă și tehnologică, la metodele de prelucrare utilizate, la precizia de execuție și, bineînțeles, la fiabilitatea lor. Astfel, metodologia de testare accelerată a rulmenților reprezintă un proces complex, care se desfășoară în mai multe etape (figura 2.1):



Fig. 2.1. Metodologia de testare accelerată a rulmenților [ZAH13a]

În cadrul acestui studiu de caz, cea mai importantă etapă este reprezentată de determinarea valorilor indicatorilor de fiabilitate, obținuți din prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale (din încercările accelerate). Datele obținute din experimentele accelerate se extrapolează la regimul normal de testare al rulmenților.

#### 2.1.2. Standuri pentru încercări accelerate de fiabilitate

În funcție de scopul urmărit, încercările accelerate de fiabilitate la rulmenți pot fi: încercări de fiabilitate, încercări privind turația limită, încercări pentru aprecierea pierderilor prin frecare, încercări de vibrații și zgomot [GAF85]. În cele ce urmează, se vor prezenta aspecte legate de încercările de fiabilitate, acestea fiind, în majoritatea aplicațiilor, criteriul principal prin care se

determină durata de viață a rulmenților. Astfel, în colaborare cu *Institutul de Cercetare și Proiectare Rulmenți și Organe de Asamblare – Brașov,* care dispune de standuri de testare a rulmenților, au fost desfășurate teste accelerate de fiabilitate. Această colaborare constă în testarea accelerată a unui lot de 8 rulmenți radiali cu bile de tipul 6205 2RS, urmărindu-se prelucrarea statistică a datelor rezultate din încercările accelerate de fiabilitate. Trebuie menționat faptul că aceste tipuri de teste accelerate au fost cerute, de către furnizorii de rulmenți, datorită avantajelor pe care le conferă acestea. Încercările accelerate de fiabilitate a rulmenților oferă două avantaje majore: scurtarea timpului de testare și, implicit, o reducere semnificativă a costurilor privind testarea.

#### 2.1.3. Realizarea experimentelor accelerate

Principalul scop al testelor accelerate este reprezentat de estimarea distribuției duratei de funcționare și, respectiv, a duratei medii de viață, în condiții normale de testare. În multe cazuri, timpul de testare și numărul total de elemente supuse testării, pentru o încercare accelerată, sunt selectate pe baza următorilor factori: echipamentele de testare disponibile, buget, timpul de introducere a produsului pe piață, ciclul de dezvoltare etc.

În continuare, sunt descrise etapele necesare pregătirii încercărilor accelerate de fiabilitate [ZAH13a]:

- Stabilirea obiectivului încercării accelerate: pentru studiul de caz analizat, se vor realiza teste accelerate cantitative;
- Cunoaşterea solicitărilor ce trebuie aplicate: solicitarea principală, în cazul testării rulmenților, este presiunea, aceasta, în regim normal de testare, are valoarea de 8 bari, iar în regim accelerat de testare este de 30 de bari; turația este constantă și are valoarea de 4000 rot/min.
- Numărul de produse, supuse încercărilor accelerate: 8 rulmenți radiali cu bile.
- Legea de distribuție: Weibull biparametrică. Această distribuție se potrivește studiilor experimentale, unde apare fenomenul de oboseală a materialelor.
- Modelul de accelerare: Puterii Inverse.
- Metoda de accelerare: în cazul testării accelerate a rulmenților, solicitarea aplicată este constantă.
- Cunoașterea mecanismelor de defectare, care vor fi luate în considerare: în cazul testării accelerate a rulmenților radiali cu bile, mecanismul de defectare este oboseala materialului.

Modelul puterii inverse (IPL- Inverse Power Law) este uzitat în studiul produselor mecanice solicitate la teste accelerate și prezintă următoarea relație [REL07]:

$$L(V) = \frac{1}{KV^n} , \qquad (2.1)$$

în care: L – durata de viață; V – nivelul de solicitare; K – primul parametru caracteristic modelului IPL-Weibull (K > 0); n – cel de-al doilea parametru caracteristic modelului IPL-Weibull.

Modelul IPL-Weibull se utilizează pentru testele accelerate, pe o diversitate de produse industriale, supuse fenomenului de oboseală. Factorul de accelerare, specific modelului IPL-Weibull, prezintă următoarea relație [REL07]:

$$A_{F} = \frac{L_{u}(V)}{L_{a}(V)} = \frac{\frac{1}{kV_{u}^{n}}}{\frac{1}{kV_{a}^{n}}} = \left(\frac{V_{a}}{V_{u}}\right)^{n}.$$
 (2.2)

Densitatea de probabilitate pentru repartiția Weibull biparametrică are relația:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}.$$
 (2.3)

Pornind de la relația densității de probabilitate, pentru repartiția Weibull biparametrică (2.3), și admițând că  $\eta = L(V)$ , se poate determina formula de calcul pentru indicatorii de fiabilitate aferenți modelului de accelerare IPL – Weibull (tabelul 2.1).

Indicator de fiabilitate	Relație
1. Densitatea de probabilitate	$f(t,V) = \beta K V^n \cdot (K V^n t)^{\beta - 1} e^{-(K V^n t)^{\beta}}$
2. Funcția de fiabilitate	$R(t,V) = e^{-(KV^n t)^{\beta}}$
3. Funcția de nonfiabilitate	$F(t,V)=1-e^{-(KV^nt)^{\beta}}$
4. Abaterea standard	$s = \frac{1}{KV^n} \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta}+1\right) - \left(\Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right)\right)^2}$
5. Media	$m = \frac{1}{KV^{n}} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$
6. Rata de defectare	$\lambda(t,V) = \beta K V^n \cdot (K V^n t)^{\beta-1}$

#### Tabelul 2.1. Indicatorii de fiabilitate pentru modelul IPL-Weibull [REL07]

### 2.1.4. Prelucrarea statistică a datelor experimentale rezultate în urma încercării accelerate a rulmenților radiali cu bile, utilizând sisteme software specifice

În cadrul cercetărilor experimentale a fost testat, în regim accelerat, un eșantion format din 8 rulmenți radiali cu bile, de tipul 6205 2RS. Aceste experimente accelerate au fost realizate, de către inginerii din cadrul Institutului de Cercetare și Proiectare Rulmenți și Organe de Asamblare - SC ICPROA SA Brașov.

Rezultatele obținute la testarea accelerată a rulmenților radiali cu bile – 6205 2RS, pentru cele două niveluri de solicitare accelerată, au fost prezentate în tabelul 2.2 [ZAH13.a].

Nr.	Timpii de defectare [ore]	Presiune [bari]
1	25	25
2	27	25
ю	28	25
4	30	25
5	9	30
6	11	30
7	13	30
8	15	30

Tabelul 2.2.	. Rezultatele testelo	r accelerare a rulı	menților radial	i cu bile – 62	05 2RS [ZAH13a]

Pentru datele rezultate din testarea accelerată a rulmenților, se alege repartiția Weibull și modelul Inverse Power Law, deoarece sunt cele mai adecvate calculului de fiabilitate a rulmenților. Datele au fost introduse în sistemul software ALTA 7 și au fost determinați cei trei parametri caracteristici modelului de accelerare IPL-Weibull, utilizând metoda verosimilității maxime.

Cei trei parametri, aferenți modelului IPL-Weibull, prezintă valorile:  $\beta$ =8,8; k=6,98E-8; n=4,08. Efectuând produsul dintre timpii de defectare, în regim accelerat de testare, și valorile determinate ale factorilor de accelerare, se determină timpii de defectare în regim normal de testare (tabelul 2.3), pentru rulmenții radiali cu bile 6205 2RS [ZAH13a].

Nr.	Timpii de defectare în condiții	Factorul de	Timpii de defectare în
	accelerate de testare [ore]	accelerare	condiții normale de
			testare [ore]
1.	25	105	2625
2.	27		2835
3.	28		2940
4.	30		3150
5.	9	221	1990
6.	11		2432
7.	13		2874
8.	15		3316

Tabelul 2.3. Determinarea timpilor de defectare în regim normal de testare [ZAH13a]

### 2.1.5. Determinarea și interpretarea dependenței dintre indicatorii de fiabilitate și solicitările aplicate

Principalii indicatori de fiabilitate, urmăriți în cursul încercărilor accelerate de fiabilitate a rulmenților, au fost: B10, media timpului de funcționare, funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, rata de defectare, densitatea de probabilitate a timpului de funcționare. Se cunoște că, pe baza unor relații existente între indicatori de fiabilitate (tabelul 1.2), aceștia pot fi deduși unii din alții [ZAH13.a].

Utilizând relațiile indicatorilor de fiabilitate, specifice modelului IPL-Weibull (tabelul 2.1), au fost determinați indicatori de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, rata de defectare, densitatea de probabilitate), pentru nivelul normal de testare. Aceste valori, ale indicatorilor de fiabilitate, se calculează în funcție de timpii de defectare, în regim normal de testare (tabelul 2.4).

Timpii de defectare în regim normal de testare [ore]	Funcția de fiabilitate R(t)	Funcția de nonfiabilitate F(t)	Rata de defectare λ(t)•10 <sup>-2</sup>	Densitatea de probabilitate f(t) )•10 <sup>-2</sup>
1990	0,917	0,083	0,014	0,086
2432	0,799	0,201	0,069	0,110
2625	0,679	0,321	0,126	0,110
2835	0,560	0,440	0,229	0,081
2874	0,440	0,560	0,256	0,014
2940	0,321	0,679	0,305	0,057
3150	0,201	0,799	0,522	0,111
3316	0,083	0,917	0,781	0,041

Tabelul 2.4. Dependența dintre indicatorii de fiabilitate și timpii de defectare pentru rulmenții radiali cu bile – 6205 2RS [ZAH13a]

Funcția de fiabilitate, pentru nivelul normal de testare, se calculează cu relația din tabelul 2.1. Această relație calculează fiabilitatea în funcție de numărul de ore până la defectare și de nivelul solicitării în regimul normal de testare (8 bari). Valorile calculate ale fiabilității au fost reprezentate grafic 2D și 3D, în figura 2.2.a și, respectiv, în figura 2.2.b. Parcurgând aceleași etape, s-a calculat și reprezentat grafic funcția de nonfiabiliatate (figura 2.3.a, și, respectiv, figura 2.3.b). Densitatea de probabilitate a timpului de funcționare descrie frecvențele relative ale defectărilor, în funcție de timpii de defectare și de solicitarea aplicată (presiune). Reprezentarea grafică, bidimensională și tridimensională, a densității de probabilitate a timpului de funcționare pentru rulmenții radiali cu bile, a fost expusă în figura 2.4.a și în figura 2.4.b [ZAH13a].







Fig. 2.3. Funcția de nonfiabilitate: a) reprezentare bidimensională; b) reprezentare tridimensională [ZAH13a]



Fig. 2.4. Densitatea de probabilitate a timpului de funcționare: a) reprezentare bidimensională; b) reprezentare tridimensională [ZAH13a]

Rata de defectare redă numărul de defectări, care au loc în unitate de timp, la un moment dat, ținând seama de numărul de rulmenți, care se mai găsesc în funcționare în acel moment. În figurile 2.5.a și 2.5.b, a fost prezentată, sub formă grafică bidimensională și tridimensională, dependența dintre timpii de defectare, în regim normal de testare, și rata de defectare.



b) reprezentare tridimensională [ZAH13a]

Scopul testelor accelerate, aplicate rulmenților radiali cu bile, a fost de a evalua durata de viață, în regim normal de testare. Durata medie de viață (figura 2.6), în regim normal de testare, a rulmenților radiali cu bile, a prezentat valoarea de 2775 ore [ZAH13.a].

A	Quick Calculation Pad			
		QCP		
	Basic Calculations Confidence B	ounds Parameter Bounds		
	Options for Calculations	C Warranty (Time) Information		
	C Conditional Calculations	C BX Information		
	Mean Life	C Acceleration Factor		
		C Failure Rate		
	Results Options			
	💿 Results as Reliability	C Results as Probability of Failure		
	Required Input from User			
	Presiune	8		
	Results	Calculate		
	Magalifa	2775 0727 Close		
	Mednuire			
		<u>R</u> eport		
F.		Help		
A	Folio: Folio1 (Data 1)			

Fig. 2.6. Determinarea duratei medii de viață [ZAH13a] a rulmenților radiali în regim normal (la presiunea de 8 bari)

Pentru determinarea timpul de defectare (B10) a rulmenților, aferent regimului normal de testare (presiune - 8 bari), a fost utilizată metoda grafică de estimare. Cel mai important indicator de fiabilitate, în studiile privind fiabilitatea rulmenților, este indicatorul B10. Indicatorul B10 reprezintă timpul până la care 10% dintre rulmenții testați, din cadrul unui eșantion, se defectează. Indicatorul B10 se poate determina grafic, utilizând figura 2.7.a, prin trasarea unei drepte, prin timpii la care 10% dintre rulmenții testați s-au defectat, pentru cele 2 niveluri accelerate (25 de bari și 30 de bari). La intersecția dreptei aferente indicatorului B10, cu dreapta corespunzătoare nivelului de testare normal (8 bari), se găsește valoarea indicatorului B10 =2273 ore. Indicatorul B10 (fig. 2.7.b) se poate determina și cu ajutorul casetei de dialog - Quick Calculation Pad din sistemul software ALTA 7 [ZAH13.a].



Fig. 2.7. Determinarea indicatorului B10 pentru rulmenții radiali cu bile 6205 2RS: a) metoda grafică; b) metoda analitică [ZAH13a]

După efectuarea testelor accelerate și extrapolarea timpilor de defectare, în regim normal de testare, se poate concluziona că durata medie de viață a rulmenților radiali cu bile 6205 2RS a fost de 2775 ore. Pentru studiul de caz analizat, prin utilizarea încercările accelerate de fiabilitate asupra rulmenților radiali cu bile 6205 2RS au fost reduși timpii de testare de aproximativ 100 de ori. Diminuarea semnificativă a timpului de testare determină reduceri importante ale cheltuielilor aferente testării rulmenților radiali cu bile. În concluzie, tehnicile de încercare accelerată se utilizează frecvent în testarea și analiza duratei de viață a produselor industriale. Testele accelerate sunt utilizate pentru a scurta perioada dintre proiectarea produsului și timpul de lansare, dar și pentru a îmbunătăți performanța și fiabilitatea produsului. Determinarea perioadei de garanție, în scopul minimizării costurilor și creșterea satisfacției clienților, se găsesc printre obiectivele testelor accelerate [ZAH13.a].

## 2.2. METODOLOGIA DE ESTIMARE A DURATEI DE VIAȚĂ LA OBOSEALĂ ȘI DE VALIDARE A TESTELOR ACCELERATE

#### 2.2.1. Introducere

Concurența acerbă a provocat producătorii să fabrice produse industriale care să prezinte fiabilitate ridicată, caracteristici funcționale multiple, la costuri reduse, într-un timp cât mai scurt. Testele accelerate de fiabilitate impun anumite constrângeri, cum ar fi [ZAH19b]:

- natura defecțiunilor, pentru regimurile accelerate de testare, să fie aceeași cu cele obținute din testele în regim normal;
- specimenele supuse încercărilor accelerate trebuie să fie similare cu cele utilizate la nivelurile normale de solicitare;
- adoptarea modelului de accelerare trebuie să fie în concordanță cu parametrii de funcționare a produselor încercate;
- fiecare eşantion încercat la un anumit nivel al solicitării trebuie să fie omogen din punct de vedere statistic;
- rezultatele încercărilor accelerate nu trebuie extrapolate la nivelurile parametrilor situați în afara limitelor de aplicabilitate a modelelor de accelerare;
- modelul de accelerare dintre solicitare şi durata de viață să fie într-o concordanță structurală şi funcțională pentru produsul testat;
- regimurile de accelerare nu trebuie să modifice modul de defectare a produselor în condiții normale de testare (nu se modifică tipul repartiției timpului de funcționare, adică nu se schimbă forma densității de probabilitate).

Testele accelerate de fiabilitate sunt dezvoltate într-un număr foarte mare de variante. Fiecare companie are libertatea de a alege, pentru produsele sale, nivelul solicitărilor aplicate, deoarece acestea sunt considerate încercări de uz intern, beneficiarului comunicându-se numai rezultatele echivalente (indicatori de fiabilitate), determinate prin extrapolarea acestora din regim accelerat, în regim normal de testare.

#### 2.2.2. Detalii experimentale

Investigațiile, în cazul cedării produselor aeronautice, scot în evidență necesitatea completării și implementării unor metode moderne de calcul și de testare a acestora, în regim static și dinamic. Testele la oboseală au o influență hotărâtoare asupra fiabilității produselor aeronautice și trebuie luat în considerare caracterul statistic al calculelor de rezistență la acest gen de solicitări, inclusiv caracterul statistic al solicitărilor [ZAH19b]. Dacă pentru provocarea unei defectări, a unui produs aeronautic, este nevoie de o durată de testare de 10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup> cicluri, prin implementarea testelor accelerate, durata de testare se va reduce la 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> cicluri [ZAH19b].

În studiul de caz (bieleta de pas din structura rotorului elicopterului), analizat în acest subcapitol, a fost aplicată o solicitare mecanică, în regim ciclic. Componentele și sistemele metalice sunt frecvent solicitate, în regim ciclic, iar principalul factorul degradator este oboseala.

Produsele aeronautice (palele elicopterelor, bielete de pas, specimenele din platina suplă, aripile, lonjeroanele, trenul de aterizare) supuse testelor la oboseală, pot avea durate de testare, fără defectare, până la milioane de cicluri. Astfel, prin implementarea testelor accelerate, se reduce timpul de testare a produselor și, totodată, sistemul de testare se eficientizează [ZAH19b].

Bieleta de pas (figura 2.8.a) reprezintă un element vital, care se găsește pe aparate de zbor de tip elicopter. Variațiile de incidență ale palelor rotorului anticuplu sunt comandate prin intermediul unei servocomenzi [IARO4]. Servocomanda acționează asupra unui platou de comandă, conectat la manșoanele palelor prin bieletele de pas. În figura 2.8.b se prezintă: butucul rotorului anticuplu, compus dintr-un corp (2) și cinci ansambluri fuzetă-manșon (3), care permit: mișcarea batantă a palelor, variația de pas a palelor, prin intermediul platoului de comandă (1) și bieletelor (4) de legătură la platou – levier de pas (5).



Fig. 2.8. Produs aeronautic: a) bieleta de pas; b) ansamblul butucului rotor anticuplu [IAR04]

Dispozitivul testare la tracțiune a bieletelor de pas se compune din următoarele componente (figura 2.9):

- dispozitiv de fixare a bieletelor de pas (3), cu rolul de a permite încastrarea bieletelor de pas (2), asemănătoare cu cea de pe elicopter;
- dispozitiv de tensionare a bieletelor de pas (1) prin intermediul unui electromotor (4), care, prin curelele trapezoidale, antrenează mecanismul cu excentric, care, prin lanțul cinematic, imprimă bieletelor o mișcare alternativă de 2-4 cm. Această mișcare alternativă generează, utilizând un element elastic, o forță dinamică în bieleta testată;
- un contor de cicluri (5), care indică numărul de cicluri la oboseală a bieletei de pas;
- instalația de control și automatizare (6), reprezintă o parte a standului experimental, care are rolul de a porni motorul electric și de a opri funcționarea standului de testare atunci când apare o fisură, prin decuplarea forței și a motorului.



Fig. 2.9. Standul de testare a bieletelor de pas [ZAH19b]

Standul experimental, pentru testarea la oboseală a bieletelor de pas, se găsește în Laboratorul de încercări statice și dinamice, din cadrul companiei S.C. IAR S.A. Brașov. Proiectarea experimentelor accelerate necesită o atenție sporită din partea practicienilor, deoarece aceștia trebuie să se decidă cu privire la nivelurile de solicitare, care ar trebui folosite și asupra numărului de produse testate, care trebuie să fie alocate, la diferite niveluri de solicitare.

Planul de testare prevede detalii asupra metodei de aplicare a solicitării, nivelurilor de solicitare, numărului de produse necesar la fiecare nivel de solicitare și un model statistic de testare accelerat, care să facă conexiunea între regimul accelerat și regimul normal de testare.

#### 2.2.3. Metoda funcției de accelerare

Echivalența, dintre încercările accelerate și cele normale, presupune îndeplinirea următoarelor condiții [PAN03]:

- solicitările aplicate nu trebuie să modifice mecanismul fizic de producere a defectelor: în cadrul încercărilor accelerate, nu trebuie să apară alte tipuri de defecte sau defecte noi, legate de producerea degradărilor;
- conservarea legilor de repartiție a timpilor de defectare: funcțiile de repartiție (distribuția duratelor de viață) specifice regimurilor accelerate trebuie să rămână aceleași cu cele din regimurile normale, cu condiția creșterii vitezei de apariție a defectelor.

Primul principiu stă la baza adoptării nivelului suprasolicitării aplicate, iar al doilea principiu este o atestare a faptului că nivelul acestei suprasolicitări nu depășește limita admisibilă [PANO3]. Analiza statistică a rezultatelor încercărilor accelerate de fiabilitate se face în raport cu datele din regimul normal de testare cunoscut (din fișa de testare a produsului). Interpretarea rezultatelor testelor, în condiții accelerate, se face în raport cu rezultatele testelor, în condiții normale sau în condiții de funcționare cunoscute (standardizate). Este necesară cunoașterea caracteristicilor privind fiabilitatea la condițiile normale ( nominale).

În cadrul acestui studiu, încercările accelerate se vor valida prin modelarea legilor de repartiție (Weibull) a timpilor de defectare și a parametrilor specifici acesteia. Când modelarea se referă la legea de distribuție Weibull, a timpilor de defectare, se impune să existe o valoarea apropiată între parametrul de formă  $\beta$ , în cazul testării în regim normal (din fișa de testare a produsului), dar în cazul testării în regim accelerat, în schimb parametrul de scară variază [ZAH19b].

Cel mai important aspect, ce vizează aceste tipuri de încercări accelerate de fiabilitate, este echivalența dintre acestea și încercările în regim normal de testare. Relația de echivalență se poate obține pe baza postulatului fiabilităților egale, care constituie baza teoretică a încercărilor accelerate. Dacă pentru toate valorile pozitive ale lui t există inegalitatea, Rs<sub>n</sub>(t) > Rs<sub>a</sub>(t) atunci S<sub>n</sub>>S<sub>a</sub>.

Postulatul fiabilităților egale exprimă faptul că pentru două niveluri de solicitare ( $S_n$  – normal și  $S_a$  – accelerat) există egalitatea funcțiilor de fiabilitate, așa cum se observă în relația [PAN03]:

$$Rs_n(t) = Rs_a(\omega).$$
(2.4)

Această ecuație are o corespondență grafică prin figura 2.10 și implică o relație între momentele (t,  $\omega$ ), printr-o funcție de accelerare:

$$t=a(\omega).$$
 (2.5)



Fig. 2.10. Funcția de accelerare [ZAH19b]

În cazul realizării testelor accelerate, funcția de accelerare a(ω) este monotonă, crescătoare și are următoarele proprietăți:

$$\begin{cases} a(0)=0\\ \lim_{\omega \to \infty} a(\omega) \to \infty \end{cases}$$
(2.6)

Echivalența, dintre testele accelerate și testele în regim normal, se face cu ajutorul funcției de accelerare a(ω). Funcția a(ω) poate fi exprimată analitic, dacă se cunoaște legea de distribuție a variabilei aleatorii. În cazul legii de repartiție Weibull biparametrică, se obțin relațiile:

$$Rs_{n}(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_{n}}\right)^{\beta_{n}}}.$$

$$Rs_{a}(\omega) = e^{-\left(\frac{\omega}{\eta_{a}}\right)^{\beta_{a}}}.$$
(2.7)

Din relațiile (2.4) și (2.7) rezultă relația funcției de accelerare, pentru legea de distribuție Weibull biparametrică:

$$t = \eta_n \cdot \left(\frac{\omega}{\eta_a}\right)^{\frac{\beta_a}{\beta_n}} = G \cdot \omega^q = a(\omega),$$
(2.8)

în care: mărimile G și q sunt constante (pentru condițiile date de testare) și se pot determina experimental. Astfel, pe baza relației (2.8) se pot deduce valorile variabilelor aleatorii și ale indicatorilor legilor de distribuție corespunzătoare solicitărilor normale, dacă se cunosc valorile respective pentru solicitările accelerate.

#### 2.2.4. Analiza statistică a datelor accelerate

După ce etapele premergătoare realizării încercărilor accelerate de fiabilitate au fost parcurse, se va urmări algoritmul de prelucrare statistică a datelor rezultate din încercările accelerate, care a fost prezentat în figura 2.11. Acest algoritm de prelucrare statistică a datelor pornește de la achiziția datelor experimentale și se finalizează cu determinarea indicatorilor de fiabilitate pentru regimul normal de testare [ZAH19b].



Fig. 2.11. Algoritmul de prelucrare statistică a datelor rezultate din încercările accelerate [ZAH19b]

Rezultatele obținute la testarea accelerată a bieletelor de pas, pentru cele 3 regimuri de solicitare accelerată, au fost exemplificate în tabelul 2.5 [ZAH19b].

Numărul	Numărul de cicluri până la defectare	Forța de tracțiune
specimenului testat	(condiții accelerate de testare)	[kN]
1	321518	17
2	384320	17
3	415470 17	
4	423218	17
5	453514	17
6	214012	20
7	256080	20
8	276980	20
9	282012	20
10	302076	20
11	71437	22
12	85490	22
13	92327	22
14	94164	22
15	100891	22

Tabelul 2.5. Rezultatele testelor accelerate [ZAH	119b]
---	-------

Pentru a se verifica ipoteza, că legea de repartiție a numărului de cicluri până la defectare este Weibull, se poate utiliza unul din testele de verificare și de validare a ipotezelor statistice. Pentru verificarea repartiției statistice a datelor obținute din testarea accelerată, s-a utilizat testul de concordanță Anderson-Darling. Testul de concordanță Anderson-Darling s-a aplicat asupra datelor experimentale (din cele trei regimuri accelerate de testare), considerând cele mai uzitate repartiții statistice, utilizate în studiul fiabilității produselor industriale: repartiția normală, repartiția log-normală, repartiția Weibull biparametrică, repartiția exponențială. În urma analizei și prelucrării statistice a datelor experimentale, pentru cele trei niveluri de solicitare accelerată, s-a constat că repartiția Weibull biparametrică permite modelarea cu acuratețe a datelor experimentale obținute în regim accelerat a bieletelor de pas. În figura 2.12 au fost reprezentate densitățile de probabilitate pentru cele trei regimuri accelerate.



Fig. 2.12. Reprezentările grafice ale densităților de probabilitate pentru cele 3 regimuri accelerate [ZAH19b]

Cel mai adecvat model de accelerare, pentru datele obținute din teste accelerate, la care factorul degradator este fenomenul de oboseală, este modelul Inverse Power Law (IPL)-Weibull. Prelucrarea statistică a datelor experimentale s-a realizat cu ajutorul sistemelor software Weibull & ALTA PRO. Astfel, a fost determinat numărul de cicluri până la defectare și principalii indicatori de fiabilitate, în regim normal de testare (F=14 kN), pentru bieletele de pas. Parametrii modelului de accelerare IPL – Weibull au fost calculați prin metoda verosimilității maxime, pentru datele obținute din testele accelerate, rezultând următoarele valori:  $\beta$ = 3,73; k=2,18E-12; n= 4,86. Factorul de accelerare, pentru bieletele de pas, utilizând modelul IPL-Weibull, are următoarea reprezentare grafică (figura 2.13). Factorul de accelerare reprezintă raportul dintre durata de viața a unui produs, la nivelul de testare normal și durata de viață, la nivelul de testare accelerat. Factorul de accelerare, pentru studiul de caz analizat, se obține pentru o forța de tracțiune de 22 KN și o valoare maximă de aproximativ 9 [ZAH19b].



Fig. 2.13. Variația factorului de accelerare în funcție de forța de tracțiune [ZAH19b]

După cum se poate observa din tabelul 2.6, factorul de accelerare și abaterea standard se calculează cu relația modelului de accelerare (IPL-Weibull), iar rezultatele acestora au fost determinate în funcție de valoarea forței de tracțiune, aplicată bieletelor de pas [ZAH19b].

Tabelul 2.6. Dependența dintre indicatorii de fiabilitate și valoarea forței de tracțiune aplicată bieletelor de pas [ZAH19b]

Forța de tracțiune	Factorul de accelerare	Abaterea standard	
נגואן	(AF)	(5)	
14	1,000	332521,584	
15	1,398	237777,906	
16	1,914	173750,704	
17	2,570	129402,939	
18	3,393	98011,964	
19	4,412	75359,802	
20	5,662	58729,505	
21	7,177	46329,456	
22	8,998	36953,067	

Indicatorii de fiabilitate, în regim normal de testare (F=14 kN), pentru bieletele de pas se determină cu relațiile specifice modelului Inverse Power Law (IPL) – Weibull, în funcție de numărului de cicluri până la defectare. Reprezentarea tridimensională a fiabilității, în funcție de timp și forța de tracțiune, a fost redată grafic în figura 2.14 [ZAH19b].



Fig. 2.14. Reprezentarea grafică tridimensională a funcției de fiabilitate în regim normal de testare pentru bieletele de pas [ZAH19b]

În figurile 2.15.a și 2.15.b au fost prezentate, sub formă tridimensională, densitatea de probabilitate și rata de defectare, a bieletelor de pas, în regim normal de testare [ZAH19b].





Valorile principalilor indicatori de fiabilitate, ai bieletelor de pas (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, rata de defectare, densitatea de probabilitate a timpului de funcționare), pentru regimul normal de testare (14 kN), au fost descriși în tabelul 2.7. Determinarea duratei medii de viața a bieletelor de pas, din structura rotorului, reprezintă unul dintre obiectivele principale ale studiului de caz. Se poate observa, din figura 2.16.a, că numărul mediu de cicluri, pentru regimul normal de testare a bieletelor de pas, din structura rotorului, a fost de 1112257. Utilizând metoda grafică, la intersecția curbei, care estimează media (50%), cu axa nivelului normal de testare (forța de tracțiune de 14 kN), se găsește numărul mediu de cicluri și densitatea de probabilitate a bieletelor de pas, în regim normal de testare [ZAH19b].

Numărul de cicluri până la defectare (condiții normale de testare)	R(t)	F(t)	λ(t)·10 <sup>-6</sup>	f(t)·10⁻⁵
642824	0,954	0,046	2,617	0,469
769280	0,890	0,110	4,223	0,704
826192	0,825	0,175	5,133	0,811
830803	0,760	0,240	5,212	0,820
847333	0,695	0,305	5,504	0,850
907866	0,630	0,370	6,672	0,954
987571	0,565	0,435	8,468	1,067
1067616	0,500	0,500	10,596	1,139
1087526	0,434	0,566	11,180	1,149
1165376	0,369	0,631	13,688	1,154
1211718	0,304	0,696	15,360	1,130
1449903	0,239	0,761	26,367	0,754
1568237	0,174	0,826	33,557	0,501
1596728	0,109	0,891	35,480	0,443
1710329	0,045	0,955	43,949	0,248

Tabelul 2.7. Dependența dintre indicatorii de fiabilitate și valoarea forței de tracțiune
aplicată bieletelor [ZAH19b]

Pentru a determina caracteristica de viață (η=63,2), specifică distribuției Weibull, s-a utilizat metoda analitică (figura 2.16.b), aceasta prezentând valoarea de 1232193 de cicluri.



Fig. 2.16. Determinarea indicatorilor de fiabilitate în regim normal de testare a bieletelor de pas [ZAH 19b]: a) metoda grafică de determinare a numărului mediu de cicluri; b) metoda analitică de determinare a caracteristicii de viață (η)

#### 2.2.5. Metodologia de validare a testelor accelerate de fiabilitate

Validarea testării accelerate a bieletelor de pas s-a realizat astfel [ZAH19b]: din punct de vedere statistic, prin echivalența dintre încercările accelerate și încercările în regim normal de testare a bieletelor de pas, utilizând grafic funcțiile de fiabilitate. Pentru validarea testelor, se impune existența unei valori apropiate între parametrul de formă  $\beta$ , în cazul testării în regim normal, precum și în cazul testării în regim accelerat. Funcțiile de fiabilitate au fost reprezentate grafic, pentru numărul de cicluri, până la defectare determinate utilizând încercările accelerate și numărul de cicluri până la defectare, obținut de producătorul bieletelor de pas, în cadrul încercărilor normale de laborator. După cum se poate observa din figura 2.17, parametrul de forma  $\beta$ , pentru numărul de cicluri până la defectare determinați, utilizând încercările accelerate, are valoarea de 4,0523 și parametrul de formă, pentru numărul de cicluri până la defectare determinați, attilizând încercările accelerate, obținut de producătorul bieletelor de pas, are valoarea de 4,0526 [ZAH19b]. Astfel, se poate afirma că testele accelerate au fost validate atât prin alura funcțiilor de fiabilitate, cât și prin valoarea parametrului de formă ( $\beta$ ).



Fig. 2.17. Reprezentarea grafică a funcțiilor de fiabilitate – validarea testelor accelerate [ZAH19b]

Încercările de fiabilitate, realizate în regim normal de testare, presupun o perioadă îndelungată de testare. Pentru a înlătura acest neajuns, se implementează tehnicile accelerate de fiabilitate. Deoarece componentele elicopterului sunt supuse simultan la diverse solicitări, pentru a reduce timpul de testare, se vor intensifica acele solicitări care pot determina defectarea elementelor, fără a modifica procesul de degradare. În cadrul acestui studiu, validarea testelor accelerate a fost realizată prin intermediul celor două principii: mecanismul fizic de producere a defectelor să nu se modifice și conservarea legilor de repartiție a ciclurilor de defectare. Prin cumularea numărului de cicluri din regim normal (obținut de la producător) și numărul de cicluri obținut în regim accelerat, rezultă că prin utilizarea încercărilor accelerate asupra bieletelor de pas, a fost scăzut numărul de cicluri până la defectare de 4,5 ori. Această reducere a timpului de încercare determină, în primul rând, scăderea cheltuielilor materiale aferente procedurilor de testare [ZAH19b].
# <u>CAPITOLUL 3.</u> CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND TESTAREA ACCELERATĂ ȘI FIABILITATEA STRUCTURILOR SANDWICH UȘOARE, FABRICATE DIN MATERIALE COMPOZITE

# 3.1. Evaluarea fiabilității și a duratei de viață a structurilor sandwich, supuse testelor accelerate

#### 3.1.1. Introducere

În mod tradițional, analiza comportării în exploatare a produselor aerospațiale se face pe baza duratelor de viață ale acestora, obținute prin urmărirea funcționării componentelor în condiții normale de operare. În numeroase situații, însă, deducerea duratei de viață a produselor aeronautice, într-un interval rezonabil de timp, este dificilă sau chiar imposibil de obținut, din diferite motive, cum ar fi [ZAH19a]: durată de viață foarte lungă, în cazul sistemelor foarte fiabile, care, în unele situații, poate fi de ordinul anilor; schimbarea continuă a condițiilor de testare, în care se utilizează regimuri normale de testare; timpul foarte scurt între etapa de proiectare și lansarea în fabricație a produsului aeronautic. Solicitările extrem de variate și complexe, impuse produselor aeronautice, au condus la studii experimentale, cu scopul asigurării bunei funcționări și a fiabilității necesare în regim cu solicitări maxime, în condițiile unui consum de material și de manoperă minim. Metodele de estimare a fiabilității produselor aeronautice iau în calcul tot mai mult proprietățile structurale efective ale materialelor, din care sunt fabricate, pe de o parte, iar pe cealaltă parte, se impune efectuarea unor teste într-un spectru de solicitări cât mai similar cu condițiile reale de funcționare [ZAH19c]. Implementarea încercărilor accelerate, în domeniul aerospațial, a fost imperios necesară, deoarece majoritatea componentelor, precum: trenul de aterizare, tijele de comandă, palele de elicopter, platina suplă, prezintă o durată de viață îndelungată.

Scopul acestui studiu a fost de a investiga comportamentul și performanțele, în regim static și dinamic, a unor specimene de structuri sandwich. Aceste structuri au fost decupate din inima lonjeronului principal, din componența unui planor fabricat din materiale compozite. Structurile sandwich, cu înveliș din fibră de sticlă (GFRP- Glass Fiber Reinforced Plastic) și miez din spumă, au fost testate în regim static la: încovoiere în trei puncte și au fost determinate principalele caracteristici mecanice (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere, rezistența ultimă la forfecare a miezului, tensiunea la curgere la forfecare a miezului, rezistența la încovoiere a învelișului). Pentru regimul dinamic, au fost introduse tehnicile accelerate de fiabilitate, unde se accelerează regimul de testare a structurilor sandwich, prin intensificarea frecvenței de încărcare. Utilizând această metodologie de accelerare, se poate determina, într-un timp scurt, durata medie de viață și indicatorii de fiabilitate pentru specimenele sandwich cu înveliș din fibră de sticlă și miez din spumă [ZAH20a].

#### 3.1.2. Detalii experimentale

Structura planorului experimental, construit la Brașov, a fost realizată integral din materiale compozite. Specimenele, care au fost testate, în cadrul acestui studiu, au fost decupate din lonjeronul principal al aripii planorului. Aripa prezintă o structură compozită, fabricată în principal din fibră de sticlă și rășină termorigidă (figura 3.1). Lonjeronul principal prezintă o structură sandwich cu un miez de plastic spumos, acoperit de două învelișuri lipite. Miezul lonjeronului este realizat din spumă Divinycell F40, iar talpa acestuia este fabricată din fibră de sticlă roving. Învelișurile inimii lonjeronului sunt confecționate din țesătură de fibră de sticlă (Interglas Style 92140) și rășină epoxidică [ZAH20a].



Fig. 3.1. Structura Ionjeronului compozit [ZAH2Oa]

Pentru testele statice și la oboseală, la încovoiere în trei puncte, a specimenelor sandwich din fibră de sticlă și miez din spumă, au fost decupate 30 de specimene din structura lonjeronului compozit. Astfel, 10 specimene au fost testate la încovoiere statică în trei puncte, în conformitate cu standardul ASTM C393. Încercările statice, la încovoiere în trei puncte, au fost efectuate pe mașina de testare WDW-150S, care se găsește în cadrul centrului de cercetare Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite MMC a Institutului de Cercetare - Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov. Viteza de încărcare a fost stabilită la 2 mm/min. Specimenele sandwich au fost poziționate pe cele două reazeme, la o distanță de 110 mm între ele. Realizarea testelor statice, la încovoiere în trei puncte, a avut ca principal obiectiv determinarea performanțelor mecanice (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere) ale structurilor sandwich compozite. Dimensiunile specimenelor sandwich, testate în regim static și la oboseală, la încovoiere în trei puncte, au fost prezentate în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Dimensiunile specimenelor sandwich, testate la încovoiere în trei puncte, în regim static și
dinamic [ZAH20a]

	Lungime	Grosime	Lățime	Distanța dintre	Grosime	Grosime
Material	(L)	(d)	(b)	reazeme (S)	miez (c)	înveliș (f)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Fibră de sticlă - Spumă	150	10	15	110	9	0,5

Modelul fizic, utilizat la testarea la încovoiere în trei puncte, a specimenelor sandwich din fibră de sticlă și miez din spumă, a fost descris în figura 3.2.a. Figura 3.2.b prezintă o vedere în secțiune a structurii sandwich testate.



Fig. 3.2. Condițiile de testare a structurilor compozite: a) principiul încercării la încovoiere în trei puncte a specimenelor din fibră de sticlă – spumă; c) testarea la încovoiere în trei puncte a specimenelor sandwich, fabricate din fibră de sticlă – spumă [ZAH20a]

Utilizând ecuațiile (3.1) și (3.2) și dimensiunile specimenelor sandwich, sistemul software al mașinii de testare determină automat caracteristicile [AST93] principale la încovoiere în trei puncte (rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere).

$$\sigma_b = \frac{3PS}{2bd^2} \tag{3.1}$$

$$E_b = \frac{S^3 g}{4bd^3} \tag{3.2}$$

în care: P este încărcarea (forța), la un punct dat, pe curba de deviere a încărcării (N), S este distanța dintre reazeme (mm), b este lățimea specimenului sandwich (mm), d este grosimea specimenului sandwich (mm) și g este panta dreptei, care aproximează datele experimentale, pe porțiunea liniară a curbei de tensiune - deformație.

Standardul ASTM C393 prevede ecuațiile pentru calculul următoarelor caracteristici mecanice, specifice structurilor sandwich, testate la încovoiere în trei puncte: rezistența ultimă (limită) la forfecare a miezului -  $\tau_{csu}$  (3.3), tensiunea la curgere la forfecare a miezului -  $\tau_{cy}$  (3.4) și rezistența la încovoiere a învelișului -  $\sigma_{f}$  (3.5):

$$\tau_{csu} = \frac{P_{\hat{1}r}}{(d+c)b}$$
(3.3)

$$\tau_{cy} = \frac{P_y}{(d+c)b} \tag{3.4}$$

$$\sigma_f = \frac{PS}{2f(d+c)b} \tag{3.5}$$

în care: P<sub>îr</sub> este forța maximă înainte de rupere; c este grosimea miezului (mm), P<sub>v</sub> este forța la care apare deformația de forfecare a miezului (N) și f este grosimea învelișului (mm).

Structurile sandwich compozite prezintă o durată de testare la oboseală, în condiții normale de solicitare, îndelungată, de aceea, în cadrul acestui studiu, se vor utiliza tehnicile de încercare accelerată. În cadrul tehnicilor de testare accelerată, structurile sandwich compozite sunt supuse unor condiții de testare mai severe, în comparație cu nivelul normal de testare, urmărindu-se descoperirea mecanismelor de defectare, a indicatorilor de fiabilitate și a duratei de viață, într-un timp cât mai scurt. Pentru testarea la oboseală, prin încovoiere în trei puncte, s-au decupat 20 de specimene, din structura sandwich fibră de sticlă – spumă, a lonjeronului. Metodologia de testare a acestor specimene a fost în conformitate cu standardul MIL-STD-401B. Testele accelerate la oboseală a specimenelor au fost realizate la patru regimuri de încărcare a frecvenței: 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz și 5 Hz, utilizând mașina de testare WDW-150S. Testele de oboseală, în regim accelerat, au fost realizate la temperatura camerei, la 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz și 5 Hz la o încărcare ciclică sinusoidală și la un coeficient de asimetrie de R = 0,1. Datele accelerate la oboseală, ale specimenelor sandwich din fibră de sticlă – spumă, au fost generate la un nivel de solicitare de 50%, din încărcarea statică limită [ZAH20a].

#### 3.1.3. Rezultate și discuții

#### 3.1.3.1. Teste în regim static la încovoiere în trei puncte

Testele în regim static, la încovoiere în trei puncte, au fost realizate pe zece specimene decupate din structura lonjeronului planorului, fabricat din materiale compozite, până la apariția ruperii acestora. Utilizând sistemul software al mașinii de testare WDW-150S, au fost determinate și reprezentate grafic, principalele proprietățile mecanice (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere) ale structurilor sandwich analizate (figura 3.3.a). Cele trei caracteristici principale (rezistența ultimă la forfecare a miezului -  $\tau_{csu}$ , tensiunea la curgere la forfecare a miezului -  $\tau_{cy}$  și rezistența la încovoiere a învelișului -  $\sigma_{f}$ ), descrise în standardul ASTM C393, au fost calculate și reprezentate grafic în figura 3.3.b și figura 3.3.c.





Pentru fiecare serie de date (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere, rezistența ultimă la forfecare a miezului, tensiunea la curgere la forfecare a miezului și rezistența la încovoiere a învelișului), obținute din testele la încovoiere în trei puncte, au fost determinați indicatorii statistici (media, abaterea standard, coeficientul de variație), pentru specimenele sandwich, conform relațiilor statistice prevăzute în standardul ASTM C393. Pentru seriile de date de mai sus, a fost calculat coeficientul de variație, pentru a avea o imagine asupra omogenității datelor experimentale. Din rezultatele descrise în tabelul 3.2 se

poate observa că valoarea coeficientul de variație se prezintă între 12.492% și 14.285%. Astfel, se poate aprecia că media este reprezentativă pentru cele 5 seturi de date experimentale [ZAH20a].

Structură sandwich	Media	Abatere standard	Coeficientul de variație
fibră de sticlă-spumă	(m)	(s)	(CV)%
Rezistența la încovoiere (MPa)	26,500	3,300	12,452
Modulul de elasticitate la încovoiere (GPa)	2,800	0,400	14,285
Rezistența ultimă la forfecare a miezului (MPa)	0,843	0,105	12,455
Tensiunea la curgere la forfecare a miezului (MPa)	0,069	0,009	13,043
Rezistența la încovoiere a învelișului (MPa)	92,800	11,600	12,500

Tabelul 3.2. Indicatorii statistici specifici testelor la încovoiere în trei puncte [ZAH20a]

Analizele microscopice au fost realizate în cadrul centrului de cercetare, denumit Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite MMC, utilizând microscopul Nikon Eclipse. Testele la încovoiere în trei puncte, ale specimenelor din fibră de sticlă-spumă, au indicat că învelișurile nu au suferit defecte majore, rămânând intacte și menținându-și caracteristicile inițiale (figura 3.4.a). Modul de defectare a întregii structuri sandwich a fost determinat, în principal, de fenomenul de forfecare rapidă a miezului din spumă, care a fost urmat de strivire și de crearea unor goluri în miezul de spumă. Datorită concentratorilor de tensiune din miezul din spumă, propagarea fisurilor are loc rapid, odată cu creșterea încărcării și, în cele din urmă, determină deteriorarea structurală a întregului miez.

La majoritatea structurilor testate la încovoiere, s-a observat dezlipirea învelișurilor din fibră de sticlă de miezul din spumă. În ceea ce privește modul în care are loc dezlipirea, pentru specimenele testate, s-a observat că spuma aderă la învelișul din fibră de sticlă, ceea ce indică faptul că lipirea dintre miez și învelișul structurii sandwich este eficientă. Prima fază (figura 3.4.b) constă în dezlipirea învelișului superior, în zona în care a fost aplicată forța de încovoiere. Astfel, învelișul superior a fost supus efortului de compresiune, în timp ce învelișul inferior a fost supus efortului de întindere. A doua fază constă în apariția fisurii în miezul din spumă (figura 3.4.c) și propagarea ulterioară a fisurii spre învelișul inferior (figura 3.4.d). Deoarece au fost utilizate aceleași materii prime și aceeași tehnologie de fabricație la realizarea structurilor sandwich, se poate afirma că specimenele testate au prezentat un comportament de defectare similar, în urma încercărilor la încovoiere în trei puncte. Din modul principal de defectare (forfecarea miezului) a structurilor sandwich, se poate deduce

că învelișurile sunt bine dimensionate, suficient de groase și de puternice, acestea rămânând neafectate după realizarea testelor la încovoiere [ZAH20a].



Fig. 3.4. Imagini macroscopice (mărire 25X) ale propagării fisurilor, în timpul încercărilor la încovoiere în trei puncte a specimenelor: a) învelișul inferior nedeteriorat b) dezlipirea învelișului superior din fibră de sticlă de miezul de spumă; c) propagarea fisurilor prin miezul din spumă; d) dezlipirea miezului din spumă de învelișul inferior [ZAH20a]

# 3.1.3.2. Teste accelerate privind durata de viață la oboseală a specimenelor cu înveliș din fibră de sticlă și miez din spumă

În condițiile actuale, testele statice ale structurilor sandwich compozite trebuie dublate de teste dinamice. Deoarece structurile sandwich compozite prezintă o durată de viață îndelungată, în acest studiu s-au utilizat teste accelerate, cu scopul determinării duratei de viață la oboseală. Astfel, au fost propuse teste accelerate, asupra specimenelor sandwich compozite, care constau în intensificarea frecvenței de încărcare (2 Hz, 3 Hz, 4 Hz și 5 Hz), în comparație cu condițiile normale de testare (1,5 Hz), cu scopul de a intensifica procesele de degradare. Regimul normal de testare, a materialelor compozite și a structurilor sandwich compozite, se realizează la o frecvență de încărcare de 1,5 Hz, conform studiilor anterioare [MIY06, MIY08, NAK09, RAJ16]. În cadrul testelor accelerare, 20 de specimene au fost încercate la patru niveluri de testare accelerată, la următoarele frecvențe de încărcare: 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz și 5 Hz. În tabelul 3.3, au fost descrise rezultatele testelor accelerate, privind numărul de cicluri până la defectare, în funcție de încărcarea aplicată, pentru fiecare specimen sandwich [ZAH20a].

Număr	Numărul de cicluri până la defectare	Nivelul de frecvență accelerat
specimen	(condiții accelerate de testare)	(Hz)
1	20756	2
2	22321	2
3	24759	2
4	26098	2
5	27479	2
6	14389	3
7	16342	3
8	17743	3
9	19902	3
10	21872	3
11	2763	4
12	3473	4
13	4093	4
14	5764	4
15	6034	4
16	1234	5
17	1456	5
18	1789	5
19	2021	5
20	2341	5

#### Tabelul 3.3. Rezultatele testelor accelerate, privind durata de viață, la oboseală, a specimenelor sandwich [ZAH20a]

## 3.1.3.3. Analiza fiabilității datelor rezultate din testele accelerate

Inconvenientul principal al încercărilor de fiabilitate efectuate, în regim normal de testare, este legat de durata îndelungată a acestora. Soluția reducerii duratei de testare constă în accelerarea solicitărilor aplicate. Un aspect important, în realizarea încercărilor accelerate, este acela al echivalenței dintre testele în condiții accelerate și testele în condiții normale. Relația de echivalență se obține pe baza postulatului fiabilităților egale, care constituie baza teoretică a acestor tipuri de încercări [ZAH2Oa]. În figura 3.5.a, se consideră trei niveluri de solicitare în condiții accelerate, cărora le corespund cele trei funcții de fiabilitate ( $R_{AC}(t_3)$ ,  $R_{AC}(t_2)$ și  $R_{AC}(t_1)$ ) și nivelul de solicitare, în condiții normale de testare, cu funcția de fiabilitate ( $R_U(t_0)$ ). Postulatul fiabilităților egale se exprimă prin ecuația 3.6.

$$R_{AC}(t_3) = R_{AC}(t_2) = R_{AC}(t_1) = R_U(t_0)$$
(3.6)



Fig. 3.5. Echivalența testelor accelerate: a) variația funcției de fiabilitate, în condiții de testare accelerate și în condiții de testare normale; b) variația funcției densitate de probabilitate, în condiții de testare accelerate și în condiții de testare normale [ZAH20a]

O relație de echivalență se poate stabili pentru repartiția statistică Weibull, în ceea ce privește densitatea de probabilitate. În figura 3.5.b, se prezintă patru densității de probabilitate, specifice repartiției Weibull, unde parametrul de formă prezintă aceeași valoare ( $\beta$ =2), pentru toate distribuțiile, iar parametrul de scara  $\eta$  va avea valori diferite: pentru condițiile accelerate de testare ( $\eta_3$ =100, $\eta_2$ =200 și  $\eta_1$ = 300), iar pentru condițiile normale de testare ( $\eta_0$  = 400). Astfel că, pentru validarea testelor accelerate, densitatea de probabilitate, în condiții accelerate de testare, trebuie să prezinte aceeași formă cu cea constatată în condiții normale de testare. Altfel spus, pentru echivalarea testelor accelerate, parametrul de formă trebuie să prezinte aceeași valoare, atât în condiții accelerate, cât și în condiții normale de testare. În ceea ce privește parametrul de scară, acesta prezintă valori diferite în condiții accelerate, comparativ cu condiții normale de testare. În figura 3.6, a fost descrisă metodologia de prelucrare statistică a specimenelor sandwich, supuse încercărilor accelerate [ZAH20a].



Fig. 3.6. Algoritmul de prelucrare statistică a specimenelor sandwich [ZAH20a]

Testele accelerate implică măsurarea performanțelor produselor aeronautice la diferite niveluri de accelerare, altele decât în cazul testării în condiții normale. Această tehnică de accelerare determină reducerea duratei de viață a produselor aeronautice, prin intensificarea mecanismelor de defectare ale acestora. După culegerea datelor din regimul accelerat, corespunzător diferitelor niveluri de accelerare, utilizând modele matematice specifice (modelele de accelerare), se poate determina durata de viață a produselor aeronautice în regimul normal de testare, materializată printr-o distribuție corespunzătoare [ZAH20a].

Pentru a realiza conexiunea, între datele din regim accelerat de testare și cele din regim normal de testare, a fost utilizată tehnica de extrapolare. Astfel că, rezultatele testelor accelerate au fost extrapolate pentru nivelul normal de testare de 1.5 Hz. La cele patru regimuri accelerate (2 Hz, 3 Hz, 4 Hz și 5 Hz), au fost testate, la oboseală prin încovoiere în trei puncte, câte cinci specimene. Datele din testele accelerate (numărul de cicluri până la defectare) au fost introduse în sistemul software ALTA 7 (Accelerated Life Testing Analysis), iar acestea au fost extrapolate, utilizând modelul Puterii Inverse și distribuția Weibull, la nivelul de testare normal de testare de 1,5 Hz.

Pentru prelucrarea statistică, a fost utilizat modelul IPL – Weibull. Acest model se pretează cel mai bine pentru tehnicile de accelerare a produselor aeronautice, unde modul de defectare este reprezentat de fenomenul de oboseală. Cei trei parametri caracteristici modelului de accelerare IPL-Weibull, sunt determinați prin metoda verosimilității maxime pentru datele accelerate, obținând următoarele valori:  $\beta = 2,496$ ; k = 2.366E-6; n = 3,191. Numărul de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare, a specimenelor sandwich (Tabel 3.4), se obține ca produs între numărul de cicluri până la defectare, în condiții accelerate de testare și factorul de accelerare [ZAH20a].

Studierea fiabilității unui produs aeronautic constă în studierea duratei de viață, scursă de la punerea în funcționare a acestuia și până la defectare. Această durată de viață este o mărime aleatoare, iar caracteristicile numerice ale acesteia poartă numele de indicatori de fiabilitate. Indicatorii de fiabilitate caracterizează cantitativ fiabilitatea produselor aeronautice. În acest studiu, se consideră un eşantion, de 20 de specimene sandwich, care a fost supus unei singure solicitări (încovoiere în trei puncte), la un nivel constant de accelerare, pentru care s-a colectat o serie de date privind numărul de cicluri până la defectare [ZAH20a].

Pe baza numărului de cicluri până la defectare, în regim normal de testare, prin prelucrare statistică, specifică, se poate deduce repartiția densității de probabilitate și, în consecință, o serie de indicatori de fiabilitate. În mod frecvent, se determină durata de viață medie. Obiectivul încercării accelerate nu este acela de a obține predicții privind comportamentul produsului aeronautic în regim accelerat, ci la alte regimuri, în mod imperios, la cel normal de testare [ZAH20a].

Tabel 3.4. Determinarea numărului de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare (frecvența
de încărcare de 1,5 Hz), a specimenelor compozite [ZAH20a]

Număr	Numărul de cicluri până	Nivelul de	Factorul	Numărul de cicluri
specimen	la defectare (condiții	frecvență	de	până la defectare
	accelerate de testare)	accelerat	accelerare	(condiții normale de
		(Hz)		testare)
1	20756			51973
2	22321			55892
3	24759	2	2,504	61997
4	26098			65349
5	27479			68807
6	14389			131415
7	16342			149251
8	17743	3	9,133	162047
9	19902			181765
10	21872			199757
11	2763			63190
12	3473			79428
13	4093	4	22,870	93607
14	5764			131823
15	6034			137998
16	1234			57522
17	1456			67870
18	1789	5	46,614	83392
19	2021			94207
20	2341			109123

În tabelul 3.5, a fost descrisă dependența dintre numărul de cicluri până la defectare, în regim normal de testare, și cei mai importanți indicatori de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare -pdf și rata de defectare) ai structurilor sandwich. Indicatorii de fiabilitate, în condiții normale de testare (nivelul normal de testare prezintă o frecvență de 1,5 Hz), ai specimenelor sandwich compozite sunt determinați utilizând ecuațiile specifice IPL - modelul Weibull, în funcție de numărul de cicluri până la defectare. Pentru reprezentarea grafică a indicatorilor de fiabilitate, s-a ales modelul tridimensional, pentru care s-a obținut o suprafață ce prezintă dependența dintre indicatorul de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare - pdf și rata de defectare) – timp – nivelul de solicitare [ZAH20a].

Numărul de cicluri până la	Fiabilitate	Nonfiabilitate	Densitate de	Rata de
defectare (condiții	R(t)	F(t)	probabilitate	defectare
normale de testare)	140		f(t)·10⁻⁵	λ(t)·10⁻⁵
51973	0,965	0.035	5,670	21,698
55892	0,917	0,083	6,154	23,796
57522	0,868	0,132	6,347	24,688
61997	0,819	0,181	6,850	27,197
63190	0,770	0,230	6,977	27,880
65349	0,721	0,279	7,196	29,133
67870	0,672	0,328	7,437	30,622
68807	0,622	0,378	7,522	31,182
79428	0,573	0,427	8,291	37,807
83392	0,524	0,476	8,480	40,408
93607	0,475	0,525	8,701	47,434
94207	0,426	0,574	8,702	47,862
109123	0,377	0,623	8,324	59,007
131415	0,327	0,673	6,613	77,548
131823	0,278	0,722	6,574	77,909
137998	0,229	0,771	5,957	83,458
149251	0,180	0,82	4,796	94,021
162047	0,131	0,869	3,533	106,741
181765	0,082	0,918	1,950	127,820
199757	0,034	0,966	0,992	148,622

Tabelul 3.5. Dependența indicatorilor de fiabilitate, în funcție de numărul de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare [ZAH20a]

Reprezentarea tridimensională, a dependenței dintre fiabilitate – frecvența de încărcare – timpul, a fost descrisă în figura 3.7.a. Funcția de fiabilitate reprezintă un indicator cantitativ și prezintă o utilitate practică importantă în studiul încercărilor accelerate. Prin intermediul reprezentării grafice, tridimensionale, a funcției de fiabilitate, se poate estima numărul de cicluri, în regim normal de testare a unui produs aeronautic, pentru o anumită valoare a fiabilității și a solicitării (frecvența, în acest studiu de caz) [ZAH20a].

Funcția de nonfiabilitate reprezintă probabilitatea ca structurile sandwich să se defecteze înainte de un timp prestabilit. Din graficul 3D al funcție de nonfiabilitate (figura 3.7.b) se pot obține informații utile privind numărul de cicluri, în regim normal de testare a structurilor sandwich, în funcție de nonfiabilitate și solicitare [ZAH20a].

Comportarea produselor aeronautice, în jurul unui moment dat, este descrisă de densitatea de probabilitate a timpului de funcționare (pdf), considerată și viteza instantanee de

defectare. Reprezentarea grafică 3D, a densității de probabilitate, a structurilor sandwich (figura 3.7.c.), se face pe baza datelor privind momentele de apariție a defectelor, în funcție de legea de distribuție care guvernează procesul respectiv [ZAH20a].

Rata de defectare este o caracteristică utilizată pentru a estima comportamentul produselor aeronautice. Rata de defectare, din punct de vedere statistic, se determină ca raport între numărul de defectări, ce apar într-o unitate de timp și numărul produselor, care a rămas în funcționare la acel moment [ZAH12].

În figura 3.7.d, a fost descris comportamentul ratei de defectare, a structurilor sandwich, în funcție de numărul de cicluri, în regim normal de testare și nivelul de solicitare.



Fig. 3.7. Indicatorii de fiabilitate ai specimenelor sandwich: a) funcția de fiabilitate; b) funcția de nonfiabilitate; c) funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare; d) rata de defectare [ZAH20a]

Cunoașterea comportamentului la oboseală al produselor aeronautice, și deci, a duratei de viață, este utilă pentru a alege momentele cele mai potrivite pentru înlocuirea acestora, pentru a se obține un cost de mentenanță cât mai scăzut și pentru a avea o siguranță maximă în funcționare. Evaluarea caracteristicii de viață (η=63,2), a structurilor sandwich compozite, s-a realizat cu ajutorul calculatorului rapid, din cadrul sistemului software ALTA 7, aceasta având valoarea de 115867 de cicluri (figura 3.8.a). Evaluarea duratei de viață, pentru specimenele de tip sandwich compozite, reprezintă unul dintre obiectivele principale ale acestui studiu. Pentru a determina durata medie de viață, specifică distribuției Weibull, s-a utilizat metoda grafică [ZAH20a]. La intersecția liniei, care estimează durata medie de viață (50%), cu axa de la nivelul de solicitare normală (frecvență de 1,5 Hz), se găsește numărul mediu de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare, a specimenelor sandwich, care prezintă valoare de 102814 (figura 3.8.b).





Produsele aeronautice sunt supuse unor teste complexe, riguroase și care prezintă o durată îndelungată de testare. Dezideratul principal, în domeniul aviației, este de a avea componente cu o fiabilitate și o calitate ridicată și care să îndeplinească cerințele și regulamentele impuse [ZAH19a]. Utilizarea conceptului de fiabilitate, în domeniul materialelor compozite și al comportării structurilor, constituie o problemă de o complexitate și o importanță deosebite, căreia i se acordă o atenție sporită. Aplicarea conceptului de fiabilitate în inginerie, în general, și în construcția de aeronave, în special, constituie o necesitate tot mai evidentă, urmărindu-se, atât din considerente tehnice, cât și din considerente economice, transformarea noțiunii de fiabilitate în una dintre principalele caracteristici ale unui produs aeronautic [ZAH19a].

# 3.2. Performanțele structurilor sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez balsa, supuse testelor accelerate

#### 3.2.1. Introducere

Structurile sandwich compozite sunt formate din doua suprafețe exterioare, numite învelişuri (fețe), lipite cu un adeziv de un miez (inimă) care are rolul de a menține constantă poziția relativă a celor două învelişuri. Structurile sandwich compozite sunt structuri complexe, care prezintă: rigiditate ridicată, greutate redusă, o izolare termică și fonică bună, durabilitate – rezistență bună la coroziune și oboseală, tehnologie de reparație simplă, absorbție foarte scăzută de apă [LIJ14]. Lemnul de balsa prezintă: o rezistență bună la forfecare, costuri reduse de achiziție, rezistență la oboseală ridicată, ușurință în fabricare, prelucrare și asamblare, performanțe superioare privind absorbția energiei. Structurile sandwich, analizate în cadrul acestui studiu, au miezul din lemn de balsa și învelișul din fibră de carbon (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer), aceste două elemente au fost lipite cu ajutorul unui film adeziv (figura 3.9). Datorită avantajelor pe care le conferă aceste structuri sandwich cu miez din lemn de balsa, ele se bucură de o largă utilizare în industrii precum: aviație, auto, maritimă, construcții, energii regenerabile [JOV14, TOS14].





În exploatare, aceste structuri stratificate sunt supuse la diferite tipuri de solicitări, precum: compresiune, tracțiune, încovoiere și la impact. Pentru evaluarea defectelor, care apar în utilizare, este necesară înțelegerea comportamentului mecanic, al structurilor sandwich, în diverse condiții de solicitare (statice si dinamice), similare cu cele din exploatare, prin utilizarea testelor în laboratoare specializate. Scopul acestui studiu este de a investiga comportamentul, în regim static și la oboseală, la solicitarea de încovoiere în trei puncte, al structurilor sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez din lemn de balsa. Pentru regimul static, au fost determinate caracteristicile mecanice la încovoiere în trei puncte și la impact ale structurilor sandwich compozite. Deoarece aceste structuri sandwich prezintă durate de testare îndelungate la testele de oboseală, se impune utilizarea tehnicilor de testare accelerată. Această tehnică implică extrapolarea numărului de cicluri, din regim accelerat de testare, în regim normal de testare. Etapa finală constă în determinarea principalilor indicatori de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, rata de defectare,

densitatea de probabilitate, durata de viață), în regim normal de testare, la încovoiere în trei puncte, a specimenelor sandwich compozite [ZAH17b].

#### 3.2.2. Detalii experimentale

#### 3.2.2.1. Teste la încovoiere în regim static

O serie de specimene dintr-o structură de tip sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez din lemn de balsa, au fost investigate. Structura sandwich a fost fabricată prin lipirea straturilor de fibră de carbon preimpregnată, pe fiecare față a miezului balsa. Dintr-o placă de sandwich, cu dimensiunile 300 mm x 160 mm, au fost decupate specimenele pentru testele în regim static și la oboseală, utilizând încovoierea în trei puncte. Învelișul structurilor sandwich este fabricat din țesătură de tip 282, din fibră de carbon. Miezul balsa prezintă următoarele caracteristici: densitate 0,16 g/cm³, grosime 5,8 mm, rezistența la compresiune 0,012 MPa, rezistență la forfecare 3 MPa. Specimenele din structura sandwich au fost decupate dintr-o placă, cu ajutorul Maxiem 1530 Abrasive Waterjet System. Specimenele sandwich au fost decupate având următoarele dimensiuni: lungime 160 mm; lățime 16 mm; grosime 6 mm, conform standardului ASTM C393. Testele la încovoiere în trei puncte au fost efectuate pe mașina de testare WDW-150S, având o viteză de încărcare de 6 mm/min. Metoda de testare la încovoiere în trei puncte a specimenelor sandwich determină caracteristicile la forfecare, atât ale fețelor cât și ale miezului structurilor sandwich. Această metodă se utilizează pentru a investiga și performanțele mecanice ale structurilor sandwich (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere și ale altor aspecte legate de relația încărcare - deplasare). În tabelul 3.6, au fost descrise principalele caracteristici dimensionale ale specimenelor testate la încovoierea în trei puncte. Au fost testate, la încovoiere în trei puncte, 10 specimene, iar dimensiunile acestora sunt în conformitate cu cerințele standardului ASTM C393 [ZAH17b].

Material	Lungime (L) [mm]	Grosime (d) [mm]	Lățime (b) [mm]	Distanța dintre reazăme (S) [mm]	Grosime miez (c) [mm]	Grosime înveliș (f) [mm]
Fibră de carbon - balsa	160	6	16	110	5,5	0,25

Tabelul 3.6. Dimensiunile specimenelor testate la încovoiere în trei puncte [ZAH17b]

În figura 3.10.a, a fost reprezentată o secțiune transversală asupra specimenelor utilizate la testarea la încovoiere în trei puncte. Schema testelor la încovoiere în trei puncte a specimenelor și modul de organizare a experimentelor sunt redate în figura 3.10.b.



Fig. 3.10. Structură sandwich cu înveliș din fibră de carbon și miez balsa: a) secțiune transversală a structurii sandwich; b) stabilirea parametrilor de testare la încovoiere în trei puncte [ZAH17b]

Pentru calculul caracteristicilor la încovoiere în trei puncte (rezistența ultimă la forfecare a miezului -  $\tau_{csu}$  și rezistența la încovoiere a învelișului -  $\sigma_f$ ) ale specimenelor sandwich, s-au utilizat relațiile (3.3) și, respectiv, (3.5).

## 3.2.2.2. Testarea la impact

O metodă importantă de testare dinamică, a structurilor sandwich, este reprezentată de încercarea la impact a specimenelor crestate sau necrestate. Testul de impact Charpy este folosit pentru a determina comportamentul materialelor la viteze de deformare mari. În cazul metodei Charpy, factorii principali, care influențează rezultatele determinării, sunt: grosimea specimenelor, forma crestăturii și poziționarea specimenelor pe suporții dispozitivului de testat. În timpul testului cu ciocanul Charpy, specimenul este așezat pe două reazeme ale batiului, iar ciocanul cade de la o înălțime și lovește specimenul, pe care îl rupe, consumând astfel o parte din energia cinetică a pendulului, restul de energie este folosită de pendul pentru a se ridica la o anumită înălțime [ATA82]. Specimenele structurilor sandwich, utilizate la testarea de impact, sunt în conformitate cu dimensiunile prevăzute de standardul ISO 179-1 (tabelul 3.7).

Tabelul 3.7.	Dimensiunile specimenelor testate la impact [ZAH17b]
--------------	--

Material	Lungime (L)	Grosime (d)	Lățime (b)
	[mm]	[mm]	[mm]
Fibră de Carbon - Balsa	150	6	10

Structurile sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez balsa, au fost testate la impact, ciocanul lovind specimenul pe direcția 1, așa cum se poate observa în figura 3.11.a. Dispozitivul, utilizat pentru testarea la impact a structurilor sandwich, a fost ciocanul Charpy (Fig. 3.11.b), iar datele inițiale ale acestuia au fost următoarele: greutate ciocan 6,784 kg, lungimea brațului este de 380 mm, iar energia potențială inițială este de 49 J.





Fig. 3.11. Testarea la impact a specimenelor sandwich: a) procedura de testare a specimenelor; b) dispozitivul Charpy utilizat în cadrul testelor la impact [ZAH17b]

Pentru specimenele fără crestătura, rezistența la impact Charpy, a<sub>cu</sub>, exprimată în kJ/m<sup>2</sup>, se determină cu relația (3.7):

$$a_{CU} = \frac{E_c}{d \cdot b} \cdot 10^3 [kJ/m^2] \tag{3.7}$$

în care: E<sub>c</sub> este energia consumată pentru ruperea specimenului [J]; d grosimea specimenului [mm]; b este lățimea specimenului [mm].

#### 3.2.2.3. Teste la încovoiere în regim dinamic

Structurile sandwich compozite prezintă o durată de testare îndelungată, astfel că pentru determinarea unor informații, privind durata de viață, se poate aștepta până la milioane de cicluri. De aceea, cea mai simplă metodă, de a determina performanțele structurilor sandwich, în regim dinamic, o reprezintă tehnica de testare accelerată. Prin utilizarea tehnicilor accelerate la oboseală, se poate estima durata de viață a structurilor sandwich compozite, prin intensificarea frecvenței de încărcare [ZAH17b]. Procedura, de testare la oboseală a specimenelor sandwich, a fost realizată conform standardului MIL-STD-401B Secțiunea 5.3 [MIL01]. Specimenele sandwich au prezentat următoarele dimensiuni (tabelul 3.8).

Tabelul 3.8. Dimensiunile specimenelor testate, în regim dinamic, la încovoiere în trei puncte [ZAH17b]

Material	Lungime (L)	Grosime (d)	Lățime (b)
	[mm]	[mm]	[mm]
Fibră de Carbon - Balsa	160	6	20

Testele la oboseală la încovoiere au fost efectuate la două niveluri de frecvență de: 2,5 Hz și 3 Hz. Au fost realizate teste de oboseală, la încovoiere în regim accelerat, sub o sarcină ciclică sinusoidală și un coeficient de asimetrie de R = 0,1 (raport utilizat adesea în testarea componentelor aeronautice). Datele accelerate la oboseală au fost generate la nivelul maxim de solicitare a încărcării statice limită. Rezultatele au fost extrapolate, pentru nivelul normal de testare, la o frecvență de 1,5 Hz. La cele două niveluri accelerate (2,5 Hz și 3 Hz) au fost testate, la oboseală, prin încovoiere în trei puncte (figura 3.12), câte cinci specimene sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez de lemn balsa [ZAH17b].



Fig. 3.12. Testarea specimenelor sandwich, la încovoiere în trei puncte, în regim dinamic [ZAH17b]

## 3.2.3. Rezultate și discuții

#### 3.2.3.1. Performanțele structurilor sandwich supuse testelor la încovoiere în trei puncte

Curba caracteristică încărcare (forță) – deplasare a fost construită prin realizarea mediei valorilor, pentru setul de date (încărcare–deplasare), obținute din testele experimentale. Această curbă a fost prezentată sub formă grafică în figura 3.13.



Fig. 3.13. Media valorilor curbei forță – deplasare, a specimenelor sandwich supuse la încovoiere în trei puncte [ZAH17b]

Comportamentul din punct de vedere al forței - deplasării pentru cele 10 specimene, în regim static la încovoiere, prezintă două etape principale: creșterea liniară, între forța aplicată și deplasare, cu un oarecare comportament neliniar, spre maximul curbei și apoi o scădere bruscă, la forță maximă, în momentul ruperii specimenelor. Se poate observa faptul că forța maximă, până în momentul în care a apărut deteriorarea ireversibilă în materialul structurii sandwich, a fost de aproximativ 140 N. De asemenea, deplasarea, la care a avut loc deteriorarea ireversibilă, în materialul structurii sandwich, a fost de 3,5 mm. Testarea, la încovoiere în trei puncte, a structurilor sandwich, a permis determinarea următoarelor caracteristici: rezistența ultimă la forfecare a miezului ( $\tau_{csu}$ ) și rezistența la încovoiere a învelișului ( $\sigma_f$ ). Forțele înainte de rupere, au fost determinate experimental, pe baza testelor la încovoiere, pentru cele 10 specimene testate. Valorile, celor două caracteristici, au fost expuse în tabelul 3.9 [ZAH17b].

Nr.	Forțele înainte	Rezistența ultimă la forfecare	Rezistența la încovoiere
specimen	de rupere [N]	a miezului [MPa]	a învelișului [MPa]
1	141	0,760	16,858
2	137	0,740	16,380
3	134	0,720	16,021
4	144	0,780	17,217
5	139	0,750	16,619
6	142	0,770	16,978
7	145	0,780	17,336
8	137	0,740	16,380
9	139	0,750	16,619
10	142	0,770	16,978

#### Tabelul 3.9. Caracteristicile specimenelor sandwich, supuse testelor la încovoiere în trei puncte [ZAH17b]

Pentru structurile sandwich CFRP-balsa, sistemul software al mașinii permite calculul următoarelor caracteristici: rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere (figura 3.14).



Fig. 3.14. Rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere, ale specimenelor sandwich [ZAH17b]

După cum se poate observa din figura 3.14, rezistența la încovoiere variază între 24 MPa și 30 MPa, iar modulul de elasticitate la încovoiere se încadrează în domeniul de valori de 3 GPa și 6 GPa. O diagramă de probabilitate a fost creată, folosind sistemul software Minitab 16, pentru datele privind rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere ale specimenelor sandwich. Pentru verificarea ipotezei de normalitate a datelor, pentru rezistență la încovoiere și a modului de elasticitate, se va utiliza testul statistic Anderson–Darling [ZAH17b].

Analizând figura 3.15, se poate observa că punctele, care reprezintă datele (valorile rezistenței la încovoiere și ale modulului de elasticitate la încovoiere), se află în interiorul celor 2 curbe, care reprezintă limita superioară și limita inferioară corespunzătoare intervalului de încredere (95%). Acest fapt arată că datele sunt distribuite în mod normal și se poate parcurge următoarea etapă și, anume, verificarea datelor cu testul statistic Anderson– Darling. Valoarea P, a testului de normalitate Anderson – Darling, este 0,541. Ambele serii de date (valorile rezistenței la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere) trec testul de normalitate Anderson – Darling este 0,0541. Ambele serii de mormalitate Anderson – Darling, este 0,541.





Coeficientul de variație este un indicator statistic și conferă informații importante privind dispersia variabilei aleatorii, raportat la valoarea medie. O valoare mică, a coeficientului de variație, reflectă un grad scăzut de incertitudine a variabilei aleatoare, iar o valoare ridicată a acestuia determină un grad ridicat de incertitudine.

În studiile de caz, din domeniul ingineriei, valoarea coeficientului de variație trebuie să fie mai mică de 30%.

După cum rezultă din informațiile, care au fost prezentate în tabelul 3.10, incertitudinea, celor două seturi de date experimentale (valorile rezistenței la încovoiere și ale modulului de elasticitate la încovoiere), este relativ scăzută și prezintă valorile CV=7,966% (pentru rezistența la încovoiere) și CV=24.627% (pentru modulul de elasticitate la încovoiere).

În cadrul acestui studiu de caz, s-a calculat limita de control superioară (UCL) și limita de control inferioară (LCL) pentru rezistența la încovoiere și pentru modulul de elasticitate la încovoiere, cu relațiile (3.8) și (3.9).

$$UCL = m + 3 \cdot s \tag{3.8}$$

$$LCL = m - 3 \cdot s \tag{3.9}$$

în care: m și s reprezintă valorile estimate ale parametrilor repartiției normale, determinați prin metoda momentelor.

Indicator statistic	Media	Abaterea	Coeficientul	Limita de	Limita de
	(m)	standard	standard de		control
		(s)	variație	superioară	inferioară
Caracteristică			(CV) %	(UCL)	(LCL)
Rezistența la		2 110	7.066	22.056	76 761
încovoiere [MPa]	20,000	2,119	7,900	52,900	20,501
Modulul de elasticitate	( 200	1.050	24 627	7 / 70	
la încovoiere [GPa]	4,300	1,059	24,027	7,478	3,301

## Tabelul 3.10. Indicatorii statistici pentru rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate [ZAH17b]

La specimenele testate, lipirea miezului de înveliș nu a prezentat probleme, iar ruperea s-a produs pe întreaga suprafața a structurii sandwich. Ruperea s-a produs de la învelișul superior al specimenului sandwich, fisura s-a propagat prin întregul miez balsa și s-a oprit în partea inferioară, unde a determinat o dezlipire a învelișului (figura 3.16).



Fig. 3.16. Analiza macroscopică a zonei de rupere (mărire 25X):

a) specimenul sandwich; b) ruperea învelișului superior; c) propagarea fisurii prin miezul balsa; d) dezlipirea învelișului de miezul balsa [ZAH17b]

# 3.2.3.2. Performanțele structurilor sandwich supuse testelor la impact

Cele 10 specimene, testate la impact, au avut, ca principal mod de degradare, ruperea completă, astfel, pentru calculul rezistenței la impact Charpy, se pot considera rezultatele valide. Utilizând relația (3.7) s-au determinat rezistențele la impact Charpy, pentru cele 10 specimene cu înveliș din fibră de carbon și miez balsa. În figura 3.17, sunt descrise rezultatele rezistențelor la impact Charpy, care sunt cuprinse între valorile 40.8 kJ/m<sup>2</sup> și 73.5 kJ/m<sup>2</sup> [ZAH17b].



Fig. 3.17. Rezistența la impact a specimenelor sandwich [ZAH17b]

Pentru specimenele sandwich, testate la impact, au fost determinați principalii indicatori statistici (tabelul 3.11). Dacă coeficientul de variație (CV) este apropiat de valoarea zero (CV < 30%), atunci datele studiate statistic (pentru rezistențele la impact valoarea lui CV=16,706%) sunt omogene și media (m=55,86) este reprezentativă pentru acest set de valori.

Indicator statistic	Media	Abaterea Coeficientul		Limita de	Limita de
	(m)	standard	de	control	control
		(s)	variație	superioară	inferioară
Caracteristică			(CV) %	(UCL)	(LCL)
Rezistența la impact [kJ/m²]	55,860	9,332	16,706	83,855	55,359

Tabelul 3.11. Indicatorii statistici pentru rezistența la impact [ZAH17b]

Specimenele sandwich, testate la impact, au prezentat în zona de rupere o fisură în miezul balsa, care s-a propagat și a determinat o dezlipire a învelișului superior al structurii sandwich (suprafața care a intrat prima în contact cu ciocanul Charpy), pe o lungime de 35 mm (figura 3.18).





#### 3.2.3.3. Teste accelerate la încovoiere în regim dinamic

Metodologia, propusă în acest studiu, constă în intensificarea nivelului de testare la încovoiere în trei puncte, în comparație cu nivelul normal de testare, cu scopul de a amplifica procesele de defectare a structurilor sandwich compozite. Aceste intensificări se desfășoară în condițiile menținerii acelorași moduri de defectare. Cercetările experimentale s-au efectuat pe 10 specimene, decupate dintr-o placă de structură sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez din lemn de balsa. Specimenele au fost testate la două niveluri accelerate (la frecvențe de 2,5 Hz și 3 Hz), iar rezultatele au fost extrapolate, pentru regimul normal de testare de 1,5 Hz. În lucrările de specialitate [MIY06, MIY08, RAJ16], în cadrul testelor accelerate la oboseală ale structurilor compozite, valoarea frecvenței de încărcare, pentru regimul normal de testare, a fost situată între 1,5 Hz – 2 Hz. Având în vedere structurile sandwich analizate și performanțele reduse la solicitări mecanice, ale miezului din lemn de balsa, a fost ales nivelul de solicitare normal al frecvenței de încărcare de 1,5 Hz.

Datele experimentale au fost prelucrate statistic, utilizând sistemul software ALTA 7 – Accelerated Life Testing Analysis. Pentru a realiza extrapolarea datelor, din regim accelerat, a fost utilizat un model de accelerare, care face conexiune între durata de viață și solicitările accelerate. Pentru studiul de caz analizat, se pretează modelul de accelerare Inverse Power Law și distribuția Weibull biparametrică. Acest model de accelerare se utilizează pentru investigarea proceselor de defectare, prin oboseală, la următoarele tipuri de materiale: plastice, metalice și compozite. Pentru determinarea factorului de accelerare, pentru modelul Inverse Power Law – Weibull, s-a utilizat relația (2.2). Factorul de accelerare, corespunzător modelului Inverse Power Law – Weibull, se calculează pentru fiecare nivel accelerat al frecvenței de încărcare [ZAH17b]. Datele, rezultate din testele accelerate, au fost extrapolate și a fost estimat numărului de cicluri până la defectare a specimenelor sandwich, în condiții normale de testare (frecvența de încărcare 1,5 Hz).

Din analiza statistică, au rezultat următoarele valori ale parametrilor modelului Inverse Power Law - Weibull:  $\beta$ =4,718; k=0,0000005; n=4,239. Realizând produsul dintre factorul de accelerare, specific fiecărui nivel accelerat, și numărul de cicluri până la defectare, în condiții accelerate, a fost determinat numărul de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare (tabelul 3.12), pentru specimenele sandwich compozite [ZAH17b].

Tabelul 3.12. Determinarea numărului de cicluri până la defectare [ZAH17b], în condiții
normale de testare ( frecvență de 1.5 Hz)

Număr specimen	Numărul de cicluri până la defectare (condiții accelerate de	Nivelul de frecvență accelerat	Factorul de accelerare	Numărul de cicluri până la defectare (condiții normale de
	testare)	(Hz)		testare)
1	30056			262148
2	34536			301223
3	37576	2,5	8,722	327738
4	44678			389682
5	55672			485571
6	12087			228384
7	14065			265758
8	19983	3,0	18,895	377579
9	21898			413763
10	24567			464193

În figura 3.19.a, se poate observa principiul de extrapolare a datelor, din regim accelerat, în regim normal, care stă la baza tehnicilor accelerate. Sunt reprezentate, cele două niveluri de solicitare accelerată (2,5 Hz și 3 Hz), iar prin utilizarea relației de accelerare, a modelului Inverse Power Law – Weibull, se pot extrapola rezultatele din regim accelerat, în regim normal de testare. Tehnica, de extrapolare a rezultatelor, este următoarea: se determină numărul de cicluri până la defectare, pentru cele două niveluri de solicitare accelerată (la frecventele de 2,5 Hz si 3 Hz), corespunzător caracteristicii de viată (n=63,2); o dreaptă se trasează prin aceste puncte; prin extinderea dreptei, până la valoarea nivelului normal de testare (frecvență de 1,5 Hz), s-a determinat numărul de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare, ale specimenelor sandwich compozite, corespunzător caracteristicii de viață ( $\eta$ =63,2). Pentru determinarea duratei de viață, în regim normal de testare, se pot utiliza două metode: analitică și grafică. Evaluarea analitică, a numărului mediu de cicluri, se bazează pe relația mediei, corespunzătoare modelului de accelerare IPL – Weibull. Pentru evaluarea caracteristicii de viață (figura 3.19.a), s-a utilizat metoda grafică și algoritmul de extrapolare a rezultatelor, menționat anterior, rezultând numărul de cicluri până la defectare, în regim normal de testare (la frecvența de 1,5 Hz). Durata de viață medie a specimenelor

(figura 3.19.b), determinată cu calculatorul sistemului software ALTA 7, a fost de 352216 de cicluri [ZAH17b].





În tabelul 3.13, a fost descrisă dependența dintre numărul de cicluri până la defectare, în regim normal de testare, și cei mai importanți indicatori de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare - pdf și rata de defectare) ai structurilor sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez balsa.

Tabelul 3.13. Dependența indicatorilor de fia	abilitate, în funcție de nι	ımărul de cicluri pâı	nă la defectare, în
condiții normale de testare	e, pentru specimenele s	andwich [ZAH17b]	
			1

Numărul de cicluri până la defectare (condiții normale de testare)	Fiabilitate R(t)	Nonfiabilitate F(t)	Densitate de probabilitate f(t)·10 <sup>-6</sup>	Rata de defectare λ(t)·10⁻⁵
228384	0,933	0,067	1,616	28,637
262148	0,837	0,163	2,497	45,821
265758	0,741	0,259	2,598	48,045
301223	0,644	0,356	3,598	74,726
327738	0,548	0,452	4,221	101,351
377579	0,451	0,549	4,579	171,295
389682	0,355	0,645	4,447	193,004
413763	0,258	0,742	3,929	242,654
464193	0,162	0,838	2,187	379,626
485571	0,066	0,934	1,458	453,683

Indicatorii de fiabilitate, în condiții normale de testare (nivelul normal de testare prezintă o frecvență de încărcare de 1,5 Hz), ai specimenelor sandwich compozite, au fost determinați utilizând ecuațiile specifice modelului IPL – Weibull, în funcție de numărul de cicluri până la defectare. Pentru reprezentarea grafică a indicatorilor de fiabilitate, s-a ales modelul tridimensional, pentru care se obține o suprafață ce prezintă dependența dintre indicatorul de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare - pdf și rata de defectare) – timpul – nivelul de solicitare. Reprezentarea tridimensională, a funcției de fiabilitate, în funcție de frecvența de încărcare și de timpul de defectare (cicluri), a fost descrisă în figura 3.20.a. Reprezentarea grafică tridimensională, a funcției de nonfiabilitate, în funcție de solicitare și de frecvența de încărcare, a fost prezentată în figura 3.20.b [ZAH17b].



Fig. 3.20. Indicatorii de fiabilitate ai specimenelor sandwich: a) funcția de fiabilitate; b) funcția de nonfiabilitate; c) funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare; d) rata de defectare [ZAH17b]

Reprezentarea grafică tridimensională, a densității de probabilitate, a structurilor sandwich, a fost prezentată în figura 3.20.c. În figura 3.20.d, a fost descris comportamentul ratei de defectare, a structurilor sandwich, în funcție de numărul de cicluri, în regim normal de testare și nivelul de solicitare [ZAH17b].

Lipirea învelișului, din fibră de carbon de miezul balsa, prezintă un rol esențial la testarea la oboseală, a structurilor compozite, de tip sandwich. Pe măsura creșterii numărului de cicluri, la testele la oboseală, ale specimenelor sandwich, se intră într-o etapă de viață, pe parcursul căreia apar fisurile învelișului și apoi dezlipirile miezului, ce pornesc, în special, de la margini sau din interior. Cauza inițierii dezlipirii, în imediata vecinătate a fisurilor miezurilor sandwich, este starea complexă de tensiuni, produsă de redistribuirile locale ale sarcinilor. Pentru testele accelerate la oboseală, specimenele sandwich prezintă patru etape distincte, înainte de ruperea totală (figura 3.21). O primă etapă constă în dezlipirea învelișului, în zona de mijloc a specimenului, unde a fost aplicată forța, pe învelișul superior care este supus la compresiune. A doua etapă constă în inițierea fisurii miezului balsa și apoi propagarea fisurii, până la învelișul inferior. În cadrul acestei etape, fisura a provocat și o dezlipire de 12 mm pe suprafața învelișului superior. A treia etapă constă în dezlipirea învelișului inferior, a structurii sandwich, pe o porțiune de aproximativ 60 mm [ZAH17b].



Fig. 3.21. Imagini macroscopice (mărirea 25X) privind analiza modurilor de defectare a specimenelor sandwich, testate accelerat: a) specimenul analizat; b) dezlipirea învelișului superior de miezul balsa; c) propagarea fisurilor prin miezul balsa; d) dezlipirea miezului de învelișul superior; e) propagarea fisurilor spre învelișul inferior; f) dezlipirea miezul balsa de învelișului inferior; g) dezlipirea, până la extremitatea specimenului, a învelișului inferior de miezul balsa [ZAH17b] 3.3. Evaluarea performanțelor mecanice și a indicatorilor de fiabilitate a structurilor sandwich cu înveliș din fibră de carbon și miez de fagure Nomex, supuse testelor accelerate

# 3.3.1. Introducere

Structurile sandwich compozite se compun din doua suprafețe exterioare, numite învelişuri, unite de un miez uşor. Între cele două învelişuri, se pot introduce următoarele structuri de miez: lemn (balsa, mahon, brad, pin, molid), fagure (hârtie, aliaje de aluminiu, aliaje de titan, aliaje de cupru, aliaje pe bază de nichel, aliaje pe bază de fier, fibre de sticlă, fibre de carbon, kevlar) și spume: cu polimeri expandați, din polistiren, poliuretanică [LUK16].

În cadrul acestui studiu, a fost investigat cel mai utilizat miez de structura sandwich, cu multiple aplicații în domeniul ingineriei, și anume: fagurele din hârtie aramidică, impregnată cu rășina fenolică, cunoscut sub numele de fagure din hârtie NOMEX fenolic.

Fagurele Nomex prezintă: proprietăți electrice, termice și la oboseală, excelente; deformabilitate bună; rezistent la flacără; rezistență la foc foarte bună; proprietăți excelente de izolare și de rezistență la apă [LIU15]. Aplicații ale structurilor sandwich, cu miez Nomex, sunt des întâlnite, în domeniul aviației, la componente precum: podele, uși, flapsuri, carenaje pentru structura aripilor și nacele [GI012].

Pentru a putea utiliza aceste structuri sandwich în diferite aplicații, cunoașterea numai a proprietăților lor, în regim static, nu este suficientă și este nevoie de informații suplimentare, cu privire la proprietățile lor privind fenomenul de oboseală și durata de viață la oboseală. Acest studiu prezintă rezultatele unei investigații experimentale, privind comportamentul și performanțele în regim static și dinamic, a unor structuri sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez de fagure Nomex [ZAH17c].

În continuare, în acest studiu, se va utiliza, pentru specimenele sandwich cu înveliș din fibră de carbon și miez de fagure Nomex, abrevierea, specimene sandwich CF-Nomex.

Specimenele sandwich CF-Nomex au fost testate la: încovoiere în trei puncte, la compresiune plană și la impact. Pentru cele trei tipuri de teste, au fost determinate principalele caracteristici mecanice (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere, rezistența la compresiune, modulul de elasticitate la compresiune și rezistența la impact).

Pentru regimul dinamic, a fost propusă metodologia prin care se accelerează regimul de testare a structurilor sandwich. Utilizând această metodologie de accelerare, se pot determina, într-un timp scurt, indicatorii de fiabilitate pentru specimenele sandwich CF-Nomex [ZAH17c].

# 3.3.2. Detalii experimentale

Structurile sandwich CF-Nomex prezintă două învelișuri din rășină epoxidică, armată cu fibră de carbon și miez de fagure Nomex. Învelișurile au fost fabricate din țesătură din fibră de carbon preimpregnată (style 282) cu rășină epoxidică. Miezul structurii sandwich este alcătuit din faguri hexagonali Nomex, cu dimensiunea celulei de 5 mm, densitatea acesteia fiind de 48 kg/m<sup>3</sup>. Această structura, formată din două învelișuri din țesătură din fibră de carbon preimpregnată cu rășină epoxidică și miez de fagure Nomex, a fost supusă procesului de asamblare prin presare la cald, rezultând o grosime finală a structuri sandwich de 9 mm [ZAH17c].

Specimenele utilizate la teste statice, la încovoiere în trei puncte, au fost decupate din panoul sandwich CF-Nomex. Zece specimene au fost testate la încovoiere în trei puncte, acestea respectând dimensiunile și procedura de testare din standardul ASTM C393. Încercările statice, la încovoiere în trei puncte, au fost efectuate pe mașina de testare WDW-150S, iar viteza de încărcare a fost stabilită la 3 mm/min. Scopul acestor teste a fost de a determina performanțele mecanice (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere și a altor aspecte legate de relația încărcare - deplasare), specifice structurilor sandwich fabricate. În tabelul 3.14 sunt descrise principalele caracteristici dimensionale ale specimenelor testate static, la încovoierea în trei puncte [ZAH17c].

Tabelul 3.14. Dimensiunile specimenelor CF-Nomex, testate la încovoiere în trei puncte [ZAH17c]

Material	Lungime	Grosime	Lățime	Distanța dintre	Grosime	Grosime
Ivialeria	(L)	(d)	(b)	reazeme (S)	miez (d)	înveliș (f)
sandwicn	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
CF - Nomex	160	9	16	110	8	0,5

În figura 3.22 se poate observa modul de organizare a testelor statice, la încovoiere în trei puncte, pentru specimenele sandwich CF-Nomex.



Fig. 3.22. Realizarea testelor, la încovoiere în trei puncte, în regim static [ZAH17c]

Testele la compresiune plană au fost realizate pe cinci specimene din structura sandwich CF-Nomex, utilizând mașina de testare WDW-150S (figura 3.23). Dimensiunile specimenelor, testate la compresiune plană, sunt în concordanță cu standardul MIL-STD-401B. Scopul acestor teste este de a determina proprietățile la compresiune (rezistența la compresiune și modulul de elasticitate la compresiune) ale specimenelor sandwich CF-Nomex. Specimenele au fost testate cu o viteză de încărcare de 3 mm/min, având dimensiunile de 5 cm x 5 cm [ZAH17c].

Ecuațiile (3.10) și (3.11) au fost utilizate pentru a determina valorile rezistenței la compresiune ( $\sigma_c$ ), și, respectiv, ale modulului de elasticitate la compresiune ( $E_c$ ).

$$\sigma_C = \frac{P_C}{A_C} \tag{3.10}$$

$$E_c = \frac{g \cdot d}{A_c} \tag{3.11}$$

în care: P<sub>c</sub> este încărcarea maximă la compresiune (N); A<sub>c</sub> este suprafața secțiunii transversale a specimenelor sandwich (mm<sup>2</sup>); g este panta porțiunii liniare a curbei de încărcare-deplasare (N/mm); d este grosimea specimenului (mm).



Fig. 3.23. Testarea la compresiune plană a specimenelor sandwich CF-Nomex [ZAH17c]

De asemenea, au fost testate zece specimene, fără crestătură, la impact utilizând ciocanul Charpy. Specimenele, supuse testelor la impact, au fost decupate în conformitate cu dimensiunea specificată de standardul ISO 179-1 (tabelul 3.15).

Material	Lungime	Grosime	Lățime
sandwich	[mm]	[mm]	[mm]
CF-Nomex	150	9	10

Tabelul 3.15. Dimensiunile specimenelor testate la impact [ZAH17c]

Specimenele sandwich CF-Nomex, testate la oboseală, au respectat metodologia descrisă în standardul MIL-STD-401B și au prezentat următoarele dimensiuni (tabelul 3.16).

		•	
Material	Lungime	Grosime	Lățime
sandwich	[mm]	[mm]	[mm]
CF-Nomex	200	9	20

## Tabelul 3.16. Dimensiunile specimenelor supuse testelor dinamice, la încovoiere în trei puncte [ZAH17c]

Încercările accelerate la oboseală, utilizând testele la încovoiere, au fost realizate la trei niveluri accelerate ale frecvenței de încărcare: 2,5 Hz, 3 Hz și 3,5 Hz. Datele, rezultate din testele accelerate, au fost extrapolate pentru regimul normal de testare de 1,5 Hz. La cele trei niveluri accelerate (2,5 Hz, 3 Hz și 3,5 Hz), au fost testate, la oboseală, la încovoiere în trei puncte, câte cinci specimene sandwich CF-Nomex. Au fost realizate teste la încovoiere în regim accelerat, sub o sarcină ciclică sinusoidală și un coeficient de asimetrie de R = 0,1 (raport utilizat frecvent în testarea componentelor aeronautice). Datele, accelerate la oboseală, au fost generate pentru nivelul maxim de solicitare a încărcării statice limită. Rezultatele au fost extrapolate, pentru nivelul normal de testare, la frecvența de 1,5 Hz

## 3.3.3. Rezultate și discuții

## 3.3.3.1. Teste statice la încovoiere în trei puncte

Zece specimene, prelevate din structura sandwich CF-Nomex, au fost testate la încovoiere în trei puncte, până la apariția ruperii. Cu ajutorul sistemului software, corespunzător mașinii de testat WDW-150S, au fost determinate curbele încărcare-deplasare și caracteristicile mecanice ale specimenelor sandwich analizate. Pentru specimenele compozite, a fost construită curba caracteristică încărcare-deplasare, prin realizarea mediei valorilor pentru setul de date (încărcare-deplasare), obținute din testele experimentale. Această curbă caracteristică încărcare-deplasare, a fost prezentată în figura 3.24, pentru specimenele sandwich CF-Nomex.



Fig. 3.24. Curba medie a valorilor forță – deplasare, specifică specimenelor CF-Nomex [ZAH17c]

Din punct de vedere al comportamentului forței și al deplasării, cele zece specimene testate în regim static, la încovoiere în trei puncte, au prezentat o creștere liniară între forța aplicată și deplasare, urmată de o scădere a forței, în momentul ruperii specimenelor. Forța maximă medie, la care a apărut deteriorarea ireversibilă a specimenelor sandwich, a fost de aproximativ 170 N. În urma testelor, la încovoiere în trei puncte, deplasările maxime au fost de aproximativ 3,5 mm, pentru specimenele sandwich CF-Nomex [ZAH17c]. Au fost analizate specimenele sandwich, testate la încovoiere în trei puncte și s-a constatat că lipirea, dintre învelișul din fibră de carbon și miezul de fagure Nomex, nu a prezentat probleme. Astfel că, specimenele sandwich au prezentat o rupere completă, fără delaminări ale învelișului din fibră de carbon. Sistemul software al mașinii de încercat a determinat, pe baza dimensiunii specimenelor sandwich CF-Nomex și a relațiilor de calcul (3.1) și (3.2), caracteristicile mecanice: rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere (figura 3.25).



Fig. 3.25. Rezultatele testelor, la încovoiere în trei puncte, a specimenelor sandwich CF-Nomex [ZAH17c]

Pentru valorile rezistenței la încovoiere și ale modulului de elasticitate la încovoiere, ale specimenelor sandwich CF-Nomex, au fost calculați principalii indicatori statistici (tabelul 3.17). Dacă coeficientul de variație (CV) este aproape de zero (CV<30%), atunci datele prelucrate statistic (valoarea coeficientului de variație CV este între 5,688% și 11,515%) sunt omogene și media calculată este reprezentativă pentru aceste seturi de valori [ZAH17c].

Tabelul 3.17. Indicatorii statistici determinați, în urma testelor la încovoiere în trei puncte, ai specimenelor CF-Nomex [ZAH17c]

Structură sandwich	Media	Abaterea standard	Coeficientul de variație	
CF-Nomex	(m)	(s)	(CV%)	
Rezistența la	E/ E00	2 100	E 600	
încovoiere [MPa]	54,500	3,100	000,0	
Modulul de				
elasticitate la	8,250	0,950	11,515	
încovoiere [GPa]				

# 3.3.3.2. Proprietățile la compresiune plană ale specimenelor sandwich CF-Nomex

Cele zece specimene sandwich au fost supuse încercărilor la compresiune plană, iar în urma testelor, au fost determinate caracteristicile mecanice: rezistența la compresiune și modulul de elasticitate la compresiune (figura 3.26). Valorile, rezistenței la compresiune, sunt cuprinse între 2-4 MPa, iar valorile, modulului de elasticitate la compresiune, variază între 0,02 și 0,04 GPa [ZAH17c]. Pentru cele zece valori, ale rezistenței la compresiune și ale modulului de elasticitate, au fost determinați indicatorii statistici cei mai reprezentativi (tabelul 3.18).





Valorile determinate, ale coeficientului de variație, se situează sub valoarea de 30%, astfel se poate concluziona că eșantionul format din cele zece specimene sandwich, testate la compresiune plană, este unul omogen și, totodată, media valorilor datelor experimentale este reprezentativă din punct de vedere statistic [ZAH17c].

Tabelul 3.18. Indicatorii statistici, determinați în urma testelor la compresiune plană, ai specimenelor CF-Nomex [ZAH17c]

Structură sandwich CF-Nomex	Media (m)	Abaterea standard (s)	Coeficientul de variație (CV%)
Rezistența la compresiune [MPa]	2,600	0,699	26,884
Modulul de elasticitate la compresiune [GPa]	0,028	0,006	21,428

# 3.3.3.3. Rezultatele testelor la impact

Pentru a aprecia rezistența la impact a specimenelor sandwich CF-Nomex, au fost realizate teste, utilizând ciocanul Charpy. Rezistența medie la impact, a specimenelor sandwich CF-

Nomex, a fost de 54,4 kJ/m<sup>2</sup>. Specimenele, testate la impact, au fost analizate vizual și s-a observat că toate au suferit o rupere completă, fără dezlipiri a învelișului din fibră de carbon, de miezul Nomex. În figura 3.27, se pot observa valorile rezistenței la impact, pentru cele zece specimene CF-Nomex fără crestătură, determinate cu relația (3.7).



Fig. 3.27. Rezultatele testelor la impact ale specimenelor sandwich CF-Nomex [ZAH17c]

## 3.3.3.4. Teste accelerate de oboseală, la încovoiere în trei puncte

În cadrul acestui studiu, a fost propusă metodologia de testare accelerată, a specimenelor sandwich CF-Nomex, care constă în accelerarea nivelului de testare, în comparație cu regimul normal de testare (frecvență de 1,5 Hz), cu scopul de a intensifica procesele de degradare a specimenelor sandwich compozite. În cadrul încercărilor la încovoiere în trei puncte, au fost testate 15 specimene, la trei regimuri accelerate ale frecvenței de încărcare: 2,5 Hz, 3 Hz și 3,5 Hz [ZAH17c].

Utilizând metodologia de accelerare s-a obținut, în urma testelor accelerate la încovoiere în trei puncte, în regim dinamic, numărul de cicluri până la defectare, pentru fiecare specimen testat. Aceste rezultate (număr de cicluri până la defectare), obținute din testele accelerate, au fost extrapolate pentru regimul normal de testare (frecvență de încărcare 1,5 Hz), utilizând prelucrarea statistică a datelor experimentale, prin intermediul sistemului software ALTA 7 – Accelerated Life Testing Analysis. Pentru analiza statistică a datelor experimentale, s-a utilizat modelul de accelerare Inverse Power Law și repartiția statistică Weibull.

Datele experimentale au fost introduse în sistemul software ALTA – Accelerated Life Testing Analysis și, din analiza statistică, au rezultat următoarele valori ale parametrilor modelului IPL - Weibull:  $\beta$ =11,18; k=0,0000007; n=4,105. Numărul de cicluri până la defectare, în regim normal de testare, al specimenelor CF-Nomex, se determină ca produs dintre numărul de cicluri până la defectare, în regim normal de testare și factorul de accelerare (tabelul 3.19). Acest număr de cicluri până la defectare, în regim normal de testare (frecvența de 1,5 Hz), este corespunzător modelului IPL – Weibull [ZAH17c].

Număr specimen	Numărul de cicluri până la defectare (condiții accelerate de testare)	Nivelul de frecvență accelerat	Factorul de accelerare	Numărul de cicluri până la defectare (conditii normale de
		(Hz)		testare)
1	31826			259032
2	32015			260570
3	34699	2,5	8,139	282415
4	35798			291360
5	36619			298042
6	15052			258940
7	15301			263223
8	15471	3,0	17,202	266148
9	16730			287806
10	16999			292434
11	6199			200779
12	7237			234399
13	7360	3,5	32,388	238383
14	8556			277120
15	9867			319582

Tabelul 3.19. Calculul numărului de cicluri până la defectare, pentru nivelul normal de testare (frecvență de încărcare de 1,5 Hz ) al specimenelor CF-Nomex [ZAH17c]

Numărul mediu de cicluri până la defectare, al specimenelor CF-Nomex, în condiții normale de testare (frecvență de încărcare de 1,5 Hz), a fost determinat pornind de la datele obținute din experimentele accelerate. Principiul, după care se realizează extrapolarea datelor rezultate din încercările accelerate, pentru specimenele CF-Nomex, a fost reprezentat în figura 3.28. Utilizând datele obținute la cele trei niveluri de solicitare accelerată (2,5 Hz, 3 Hz și 3,5 Hz) și prin utilizarea legii de accelerare a modelului Inverse Power Law, au fost extrapolate rezultatele din regim accelerat de testare, în regim normal de testare (1,5 Hz). Tehnica, de extrapolare a rezultatelor, cuprinde următoarele etape: determinarea duratelor medii de viață, aferente celor trei regimuri de testare accelerată; trasarea unei drepte prin valorile medii ale celor trei regimuri accelerate; prin extinderea dreptei, până la valoarea nivelului normal de testare, a specimenelor CF-Nomex [ZAH17c]. Numărul mediu de cicluri până la defectare, în regim normal de testare, în regim normal de încărcare de 1,5 Hz) s-a determinat cu ajutorul relației mediei, aferente modelului Inverse Power Law – Weibull, și prezintă valoarea de 268682 (figura 3.28).


Fig. 3.28. Determinarea grafică a numărului mediu de cicluri până la defectare, al specimenelor sandwich CF-Nomex, în regim normal de testare [ZAH17c]

Dependența, dintre numărul de cicluri până la defectare, în regim normal de testare, și cei mai importanți indicatori de fiabilitate, ai structurilor sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez de fagure Nomex, a fost prezentată în tabelul 3.20.

Tabelul 3.20. Dependența indicatorilor de fiabilitate, în funcție de numărul de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare, pentru specimenele sandwich CF-Nomex [ZAH17c]

Numărul de cicluri până la defectare (condiții normale de testare)	Fiabilitate Nonfiabilitate R(t) F(t)		Densitate de probabilitate f(t)·10 <sup>-6</sup>	Rata de defectare λ(t)·10⁻⁵
200779	0,954	0,046	1,269	12,980
234399	0,890	0,110	5,505	62,790
238383	0,825	0,175	6,359	74,540
258940	0,760	0,240	11,590	17,304
259032	0,695	0,305	11,618	17,378
260570	0,630	0,370	12,004	18,458
263223	0,565	0,435	12,635	20,450
266148	0,500	0,500	13,272	22,885
277120	0,434	0,566	14,672	34,524
282415	0,369	0,631	14,539	41,890
287806	0,304	0,696	13,742	50,749
291360	0,239	0,761	12,844	57,538
292434	0,174	0,826	12,526	59,697
298042	0,109	0,891	10,496	72,480
319582	0,045	0,955	2, 183	147,366

Principalii indicatorii de fiabilitate, ai specimenelor sandwich CF-Nomex, în condiții normale de testare (frecvență de încărcare de 1,5 Hz), au fost determinați, utilizând ecuațiile specifice modelului de accelerare IPL – Weibull, în funcție de numărul de cicluri până la defectare. Indicatorii de fiabilitate au fost reprezentați grafic tridimensional și a fost obținută o suprafață ce prezintă dependența dintre indicatorul de fiabilitate: funcția de fiabilitate (figura 3.29.a), funcția de nonfiabilitate (figura 3.29.b), funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare – pdf (figura 3.29.c), rata de defectare (figura 3.29.d) – timpul – frecvența de încărcare [ZAH17c].



Fig. 3.29. Indicatorii de fiabilitate ai specimenelor sandwich CF-Nomex: a) funcția de fiabilitate; b) funcția de nonfiabilitate; c) funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare; d) rata de defectare [ZAH17c]

3.4. Studiu comparativ privind performanțele mecanice și indicatorii de fiabilitate ai structurilor sandwich, cu diferite tipuri de învelișuri din materiale compozite, cu matrice polimerică ranforsată, cu țesătură din fibră de sticlă și miez de fagure Nomex

# 3.4.1. Introducere

Panourile sandwich sunt frecvent utilizate ca elemente structurale în diverse aplicații industriale, datorită rigidității lor ridicate în raport cu greutatea, dar și a avantajelor pe care le conferă, în comparație cu structurile metalice convenționale sau cu structurile compozite laminate [MAT14]. În cadrul acestui studiu, structurile analizate prezintă învelișuri din materiale compozite, cu matrice polimerică ranforsată, cu țesătură din fibră de sticlă și miez din fagure Nomex fenolic. În acest studiu, au fost investigate performanțele în regim static și dinamic ale unor structuri sandwich, cu două tipuri de învelișuri din fibra de sticlă (GF) și miez Nomex. Structurile sandwich GF - Nomex au fost testate, în regim static, la: încovoiere în trei puncte, la compresiune plană și la impact. În urma testelor, au fost determinate principalele caracteristici mecanice (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere, rezistența la compresiune, modulul de elasticitate la compresiune și rezistența la impact). Pentru regimul dinamic, a fost propusă tehnica accelerată, prin care se intensifică regimul de testare a structurilor sandwich, prin amplificarea frecvenței de încărcare. Utilizând această tehnică de accelerare, au fost determinați principalii indicatori de fiabilitate ai specimenelor sandwich GF-Nomex [ZAH18b].

# 3.4.2. Detalii experimentale

Prima structură sandwich GF1-Nomex prezintă două învelișuri din țesătură din fibră de sticlă și miez fagure Nomex. Structura GF1-Nomex este realizată din două învelișuri din țesătura din fibră de carbon preimpregnată (style 7781), cu un conținut de rașină de 44%. Miezul structurii GF1-Nomex a fost realizat din faguri Nomex hexagonali, cu dimensiunea celulei de 4,8 mm și densitatea de 32 kg/m<sup>3</sup>. Această structură, formată din două învelișuri din fibră de sticlă preimpregnată și miez de fagure Nomex, a fost supusă procesului de asamblare, prin presare la cald, rezultând o grosime finală a structuri sandwich de 8 mm [ZAH18b].

Cea de-a doua structură sandwich GF2-Nomex este compusă din două învelișuri, realizate din țesătură din fibră de sticlă, cu o greutate specifică de 300 g/m<sup>2</sup> și miez Nonex hexagonal, cu dimensiunea celulei de 4,8 mm și densitatea de 32 kg/m<sup>3</sup>. Pentru fabricarea acestei structurii, a fost nevoie de o placă din lemn, pe care se așază o folie laminată, pentru a da structurii o suprafață cât mai fină. Se pun două straturi de țesătură din fibră de sticlă și, cu ajutorul unei pensule, se aplică uniform rășina epoxidică. Se poziționează miezul Nomex și apoi se adaugă cele două straturi de țesătură din fibră de sticlă, prin aplicarea unor straturi uniforme de rășină epoxidică. Peste ultimul strat de fibră de sticlă, se pune o folie laminată și

un material textil, cu o grosime de cel puțin 20 mm. Materialul textil este folosit pentru a nu se lipi sacul de vid (vacuum) de structură și pentru a se înlătura tot aerul din rășină. Această structură formată se introduce într-un sac de vid și se realizează polimerizarea compozitului, rezultând o structură sandwich de grosime 9 mm [ZAH18b].

Pentru testele statice, la încovoiere în trei puncte, au fost decupate câte zece specimene din panourile sandwich GF1-Nomex și GF2-Nomex. Cele zece specimene au fost testate la încovoiere statică în trei puncte, în conformitate cu standardul ASTM C393. Pentru efectuarea testelor, a fost utilizată mașina de testare WDW-150S, la o viteză de încărcare de 3 mm/min. Realizarea testelor la încovoiere în trei puncte a avut, ca principal obiectiv, determinarea performanțelor mecanice (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere și a relației dintre încărcare-deplasare) ale structurilor sandwich fabricate. Principalele caracteristici dimensionale, ale specimenelor (GF1-Nomex și GF2-Nomex) testate în regim static, la încovoiere în trei puncte, au fost prezentate în tabelul 3.21.

Tabelul 3.21. Dimensiunile specimenelor testate în regim static, la încovoiere în trei puncte [ZAH18b]

Material sandwich	Lungime (L) [mm]	Grosime (d) [mm]	Lățime (b) [mm]	Distanța dintre reazeme (S) [mm]	Grosime miez (d) [mm]	Grosime înveliș (f) [mm]
GF1-Nomex	160	8	16	110	7,5	0,25
GF2-Nomex	160	9	16	110	7,5	0,75

Modul de realizare a testelor statice, la încovoiere în trei puncte, ale specimenelor GF1-Nomex, a fost descris în figura 3.30. În mod similar, au fost realizate testele și pentru specimenele GF2-Nomex.



Fig. 3.30. Testarea specimenelor sandwich, la încovoiere în trei puncte [ZAH18b]

Cinci specimene, din cele două structuri sandwich GF1-Nomex și GF2-Nomex, au fost testate la compresiune, utilizând mașina de testare WDW-150S (figura 3.31). Dimensiunile specimenelor și modul de organizare a testelor la compresiune plană, au fost în concordanță cu standardul MIL-STD-401B Sec.5.2.4. Aceste tipuri de teste au fost realizate, cu scopul de a determina caracteristicile de bază, la solicitarea de compresiune (rezistența la compresiune și modulul de elasticitate la compresiune), ale celor două tipuri de specimene sandwich (GF1-Nomex și GF2-Nomex). Dimensiunile specimenelor sandwich, testate la compresiune, au fost de 5 cm x 5 cm [ZAH18b].



Fig. 3.31. Testarea specimenelor sandwich la compresiune plană [ZAH18b]

Pentru testarea, specimenelor sandwich GF-Nomex, la impact a fost utilizat ciocanul Charpy, care prezintă următoarele caracteristici: greutate ciocan 66,55 N, lungimea brațului este de 380 mm, iar energia potențială inițială este de 49 J. Pentru analiza specimenelor la impact, au fost testate câte zece specimene (din cele două panouri sandwich GF1-Nomex și GF2-Nomex), utilizând ciocanul Charpy (tabelul 3.22).

Material sandwich	Lungime [mm]	Grosime [mm]	Lățime [mm]
GF1-Nomex	150	8	10
GF2-Nomex	150	9	10

Tabelul 3.22. Dimensiunile specimenelor testate la impact [ZAH18b]

Pentru testarea la oboseală, la încovoiere în trei puncte, s-au decupat câte 15 specimene, din cele două panouri sandwich GF1-Nomex și GF2-Nomex [ZAH18b]. Metodologia de testare și dimensiunile acestor specimene au fost în conformitate cu standardul MIL-STD-401B (tabelul 3.23).

Tabelul 3.23. Dimensiunile specimenelor supuse la teste dinamice, la încovoiere în trei puncte [ZAH18b]

Material sandwich	Lungime [mm]	Grosime [mm]	Lățime [mm]
GF1-Nomex	180	8	20
GF2-Nomex	200	9	20

Noutatea acestui studiu constă în metodologia de testare accelerată, în regim dinamic, propusă și validată, prin care se accelerează regimul de testare a structurilor sandwich, prin intensificarea frecvenței de încărcare. Utilizând această metodologie de testare accelerată, implementată, în premieră, pe structuri sandwich compozite, se poate determina, într-un timp scurt, durata medie de viață, pentru specimenele sandwich GF-Nomex [ZAH18b]. Utilizarea experimentelor accelerate implică folosirea unui regim intens al solicitărilor, cu scopul de a reliefa principalii factori degradatori, rezultând o serie de date experimentale, într-un timp cât mai scurt. În etapele timpurii ale ciclului de viață, această metodologie conduce la evidențierea principalelor moduri de defectare, la determinarea performanțelor mecanice și la o evaluare rapidă a duratei de viață a structurilor sandwich compozite. Testele, accelerate la oboseală, au fost realizate la trei regimuri de încărcare a frecvenței: 2 Hz, 2,5 Hz și 3 Hz, utilizând mașina de testare WDW-150S. Datele, rezultate din testele accelerate la oboseală, ale structurilor sandwich, au fost extrapolate pentru regimul normal de testare (frecvența de încărcare) de 1,5 Hz. La cele trei regimuri accelerate (2 Hz, 2,5 Hz și 3 Hz) au fost testate, la oboseală, la încovoiere în trei puncte, câte cinci specimene din fiecare structura sandwich (GF1-Nomex și GF2-Nomex). Au fost realizate teste de oboseală, la încovoiere în regim accelerat, sub o sarcină ciclică sinusoidală și un coeficient de asimetrie de R = 0,1. Datele, accelerate la oboseală, au fost generate la nivelul maxim de solicitare a încărcării statice limită [ZAH18b].

# 3.4.3. Rezultate și discuții

# 3.4.3.1. Teste statice, la încovoiere în trei puncte, ale specimenelor sandwich

Testele în regim static, la încovoiere în trei puncte, au fost realizate pe câte zece specimene, prelevate din cele două structuri sandwich GF1-Nomex și GF2-Nomex, până la apariția ruperii acestora. Prin utilizarea sistemului software al mașinii de testare WDW-150S, au fost determinate curbele încărcare – deplasare și caracteristicile mecanice ale structurilor sandwich analizate. Graficele încărcare – deplasare au fost construite prin realizarea mediei valorilor dintre încărcare și deplasare, pentru specimenele GF1-Nomex (figura 3.32.a) și GF2-Nomex (figura 3.32.b).



Curbele încărcare – deplasare, pentru cele două tipuri de specimene, se manifestă similar, dar totuși, în anumite faze ale testării, se pot observa diferențe în comportament. Aceste diferențe sunt: la specimenele GF1-Nomex, scăderea este bruscă, la atingerea forței maxime, în schimb, la specimenele GF2-Nomex, scăderea este mai lină, determinând chiar un palier de tranziție. Această diferență apare, în primul rând, deoarece degradarea învelişului specimenelor GF1-Nomex se declanșează mult mai repede și prezintă o rigiditate mai scăzută, în comparație cu învelişul specimenelor GF2-Nomex [ZAH18b].

Forța maximă, la care a apărut deteriorarea ireversibilă a structurilor sandwich analizate, a fost de aproximativ 100 N, pentru specimenele GF1-Nomex și, respectiv, 350 N, pentru specimenele GF2-Nomex. În urma testelor la încovoiere în trei puncte, s-au determinat si deplasările maxime. Astfel că, valoarea deplasării maxime a fost de 2 mm, pentru specimenele GF1, iar pentru specimenele GF2, a fost de 6 mm. La ambele structuri sandwich (GF1-Nomex și GF2-Nomex) testate, lipirea, dintre învelișul GF și miezul fagure Nomex, nu a prezentat probleme, ci ruperea specimenelor s-a produs pe întreaga suprafața a structurii sandwich, fără dezlipiri ale învelișului. Pe baza dimensiunii specimenelor sandwich și a relațiilor de calcul (3.1) și (3.2), au fost determinate principalele caracteristici mecanice ale structurilor sandwich: rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere. După cum se poate observa din figurile 3.33.a și 3.33.b, rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere, ale specimenelor sandwich GF1-Nomex, a fost de aproximativ 3,5 ori mai mică, în comparație cu cele obținute pentru specimenele GF2-Nomex. Analizând valorile proprietăților mecanice, a rezultat că specimenele GF2-Nomex prezintă caracteristicii mult mai bune, în comparație cu specimenele GF1-Nomex, datorită, în primul rând, grosimii învelișului, care este de 3 ori mai mare, dar și a modului de fabricație al acestuia [ZAH18b].



Fig. 3.33. Rezultatele testelor la încovoiere în trei puncte: a) specimenele GF1-Nomex; b) specimenele GF2-Nomex [ZAH18b]

Principalii indicatori statistici au fost calculați, pentru valorile rezistenței la încovoiere și a modulului de elasticitate la încovoiere, în regim static, ai specimenelor GF1-Nomex și GF2-Nomex (tabelul 3.24). Dacă coeficientul de variație (CV) este aproape de zero (CV < 30%), atunci datele prelucrate statistic (valoarea coeficientului de variație CV este în domeniul 7,746% și 9,746%) sunt omogene și media calculată este reprezentativă pentru aceste seturi de valori. În urma testelor statice, la încovoiere în trei puncte, s-au determinat caracteristicile mecanice ale structurilor sandwich. Performanțele structurilor sandwich GF2-Nomex, la testele statice la încovoiere în trei puncte, au fost superioare, în comparație cu cele ale structurii GF1-Nomex, datorită grosimii învelișului și a modului de fabricație utilizat.

Structură sandwich	Media	Abaterea standard	Coeficientul de variație	
	(m)	(s)	(CV%)	
GF1-Nomex	17 000	1 / 1 /	0 217	
Rezistența la încovoiere [MPa]	17,000	1,414	8,317	
GF2-Nomex	61 200	E / EQ	000	
Rezistența la încovoiere [MPa]	01,500	5,456	دەد,ە	
GF1-Nomex				
Modulul de elasticitate la	1,704	0,132	7,746	
încovoiere [GPa]				
GF2-Nomex				
Modulul de elasticitate la	6,105	0,595	9,746	
încovoiere [GPa]				

Tabelul 3.24. Indicatorii statistici, determinați în urma testelor, la încovoiere statică în trei puncte, ai specimenelor GF-Nomex [ZAH18b]

# 3.4.3.2. Proprietățile specimenelor sandwich la compresiune plană

Scopul principal, al testelor la compresiune plană asupra structurilor sandwich, a fost acela de a determina capacitatea acestora de a suporta o sarcină aplicată, pe o perioadă scurtă de timp și, totodată, pentru determinarea caracteristicilor mecanice, specifice acestor teste (rezistența la compresiune și modulul de elasticitate la compresiune). În continuare, au fost reprezentate grafic valorile rezistenței la compresiune (figura 3.34.a) și ale modulului de elasticitate la compresiune testate. După cum se poate observa din figura 3.34.a, rezistența la compresiune este de 2,3 ori mai mare la structurile GF2-Nomex, în comparație cu structurile GF1-Nomex.



Fig. 3.34. Rezultatele testelor la compresiune: a) specimenele GF1-Nomex; b) specimenele GF2-Nomex [ZAH18b]

Performanțele la compresiune, ale celor două structuri, nu prezintă diferențe semnificative, precum în cazul testelor la încovoiere în trei puncte, deoarece comportamentul la

compresiune este influențat, în primul rând, de structura și de caracteristicile miezului Nomex, care este aceeași la ambele structuri [ZAH18b].

Analizând din punct de vedere statistic, rezultatele determinate din testele experimentale, sa constatat o valoare redusă a coeficientului de variație (CV<30%). Aceasta determină omogenitatea datelor experimentale și o reprezentativitate bună a mediei pentru aceste informații (tabelul 3.25).

Tabelul 3.25. Indicatorii statistici, determinați în urma testelor la compresiune plană, ai specimenelor
GF-Nomex [ZAH18b]

Structură sandwich	Media	Abaterea standard	Coeficientul de variație
	(m)	(s)	(CV%)
GF1-Nomex			
Rezistența la compresiune	1,820	0,192	10,549
[MPa]			
GF2-Nomex			
Rezistența la compresiune	4,160	0,358	8,605
[MPa]			
GF1-Nomex			
Modulul de elasticitate la	0,150	0,032	21,333
compresiune [GPa]			
GF2-Nomex			
Modulul de elasticitate la	0,310	0,023	7,419
compresiune [GPa]			

La testele de compresiune, grosimea învelișului și modul de fabricație, nu au mai fost la fel de importante, deoarece o mare parte din încărcarea aplicată a fost preluată de miezul de fagure Nomex, care prezintă aceleași caracteristici, la ambele structuri sandwich. În urma testelor la compresiune, se poate afirma că cele două structuri sandwich GF-Nomex oferă o rezistență bună la compresiune și forfecare [ZAH18b].

# 3.4.3.3. Performanțele specimenelor sandwich la testarea la impact

Pentru a determina rezistența la impact a structurilor sandwich, au fost realizate teste, utilizând pendulul Charpy. Rezultatele acestor teste includ: rezistența la impact Charpy, mecanismul de defectare și examinarea microscopică a specimenelor GF-Nomex. Testele la impact se realizează prin balansarea ciocanului Charpy, de la o înălțime de 710 mm. După ce ciocanul Charpy este lăsat să cadă, acesta parcurge o traiectorie de arc de cerc și ia contact cu specimenul sandwich. După ruperea specimenului sandwich, ciocanul Charpy se ridică până la o anumită poziție. Diferența dintre energia potențială a ciocanului, în poziția inițială și în poziția finală, constituie energia de rupere a specimenului sandwich. Valorile rezistenței la

impact Charpy, pentru specimenele GF1-Nomex și GF2-Nomex, determinate în urma testelor experimentale, au fost descrise în figura 3.35 [ZAH18b].



Fig. 3.35. Rezultatele testelor la impact [ZAH18b]

Din calculul indicatorilor statistici, rezultați din testele la impact, s-a putut constata că structurile GF2-Nomex au prezentat valori mult mai ridicate, în comparație cu GF1-Nomex. S-a concluzionat faptul, că structura învelișului specimenelor sandwich reprezintă un factor determinant, în stabilirea performanțelor la impact. Valorile rezistenței la impact Charpy, pentru structura GF1-Nomex, sunt de aproximativ 6,75 ori mai mici, în comparație cu cele ale structurii GF2-Nomex (tabelul 3.26). Din valorile calculate ale coeficientului de variație, s-a putut observa că datele, rezultate din testele la impact, sunt omogene și media calculată este reprezentativă, pentru întregul set de date [ZAH18b].

Tabelul 3.26. Indicatorii statistici, determinați în urma testelor la impact,	
ai specimenelor GF-Nomex [ZAH18b]	

Structură sandwich	Media	Abaterea standard	Coeficientul de variație	
	(m)	(s)	(CV%)	
GF1-Nomex	7 071	0.919	10.262	
Rezistența la impact [kJ/m²]	1,511	0,010	10,202	
GF2-Nomex	52 026	כרד כ	C 01C	
Rezistența la impact [kJ/m²]	55,820	5,723	סופ,ס	

În cazul testelor la impact, majoritatea specimenelor au prezentat o rupere completă, fără dezlipirea învelișului GF de structura miezului fagure Nomex. Câte un specimen, din fiecare structură (GF-Nomex și GF2-Nomex), a prezentat o rupere incompletă. Cele două structuri sandwich, care au prezentat o rupere incompletă, au fost analizate cu ajutorul microscopului Nikon Eclipse MA 100. Structura GF1-Nomex a prezentat o rupere parțială (figura 3.36.a,e) a învelișului superior și o fisurare a miezului Nomex, pe toată suprafața de contact cu ciocanul Charpy. Chiar dacă specimenul nu a prezentat o rupere completă, s-a observat o distrugere a

miezului Nomex și modul în care fisura s-a accentuat și s-a propagat de-a lungul suprafeței de contact cu ciocanul Charpy (figura 3.36.b,c,d). De asemenea, s-a putut observa că învelișul din fibră de sticlă nu a prezentat dezlipiri sau delaminări (figura 3.36..b,d), în imediata vecinătate a suprafeței de rupere parțială [ZAH18b].

Structura GF2-Nomex a prezentat o rupere parțială (figura 3.37.a) a învelișului și fisurarea miezului de fagure Nomex, până la capătul specimenului (figura 3.37.e). La o analiză macroscopică a învelișul superior (cel care ia primul contact cu ciocanul Charpy și care este supus solicitării de compresiune), s-a putut constata că acesta s-a rupt pe o porțiune mică. De la această fisură minoră, structura învelișului superior a prezentat două zone de desprindere a straturilor unde s-a produs delaminarea (figura 3.37.c). Din această zonă de rupere a învelișului superior, s-a propagat fisura prin miezul Nomex și a ajuns la învelișul inferior (figura 3.37.d). Învelișul inferior s-a dezlipit de miezul Nomex și a determinat o delaminare a straturilor de fibră de sticlă [ZAH18b].





Fig. 3.36. Modurile de defectare ale specimenelor GF1-Nomex: a) vedere de sus; b), c), d) imagini macroscopice cu mărire 25X; e) vedere laterală a specimenului [ZAH18b]

Fig. 3.37. Modurile de defectare ale specimenelor GF2-Nomex: a) vedere de sus; b), c), d) imagini macroscopice cu mărire 25X; e) vedere laterală a specimenului [ZAH18b]

În cadrul testelor la impact, performanțele specimenelor sandwich au fost influențate semnificativ, de grosimea învelișului din fibră de sticlă. Astfel, comportamentul la impact, al structurilor sandwich, este diferit, acesta determinând moduri de defectare și valori cantitative diferite ale rezistenței la impact. Se poate observa că structura sandwich GF2-Nomex a prezentat, în mod constant, cea mai mare rezistență la împact, în comparație cu structura sandwich GF1-Nomex [ZAH18b].

# 3.4.3.4. Testarea accelerată la oboseală a specimenelor sandwich

Pentru determinarea indicatorilor de fiabilitate și a mecanismelor de defectare, structurile sandwich compozite necesită teste de durată îndelungată. Pentru a se obține cât mai rapid astfel de informații, se utilizează metodologiile de testare accelerată la oboseală. Degradarea structurilor sandwich compozite este total diferită de degradarea unui panou sandwich, cu structură metalică. Se poate afirma că distrugerea, din cauza oboselii, poate să apară mai repede și mai frecvent la structurile sandwich metalice, în comparație cu structurile sandwich compozite [SHI18, ZEN11, BOU14].

Durata de viață a structurilor sandwich variază în funcție de tipul de fibre, de rășina utilizată, de dispunerea laminelor în materialul compozit utilizat, de adezivul utilizat, de tipul de miez utilizat și de tehnologia de asamblare. În cazul acestui studiu, au fost realizate teste accelerate de oboseală, la încovoiere în trei puncte, pe două structuri sandwich diferite (GF1-Nomex și GF2-Nomex). Învelișurile structurilor sandwich au fost fabricate prin două metode distincte și prezintă același tip de miez de fagure Nomex. La încovoierea ciclică la oboseală, a structurilor sandwich, apar solicitări simultane de: compresiune (pe învelișul superior), întindere (pe învelișul inferior) și de forfecare a miezului de fagure Nomex [ZAH18b].

Structurile sandwich analizate, în cadrul acestui studiu, au fost testate în regim accelerat, la diferite frecvențe de încărcare: 2,5 Hz, 3 Hz și 3,5 Hz. Datele, din regim accelerat (numărul de cicluri până la defectare), au fost extrapolate în regim normal de testare, la o frecvență de 1,5 Hz. Pentru extrapolarea datelor, a fost utilizat sistemul software ALTA 7 și modelul de accelerare Inverse Power Law și distribuția Weibull (se pretează foarte bine studiilor, unde modul principal de degradare este oboseala) [ZAH18b].

Testele la oboseală au fost realizate pe câte 15 specimene, din fiecare structură sandwich (GF1-Nomex și GF2-Nomex). Rezultatele testelor la oboseală, utilizând încovoierea în trei puncte a specimenelor GF1-Nomex și GF2-Nomex, au fost descrise în tabelul 3.27. Factorul de accelerare a fost determinat, utilizând relația cunoscută pentru modelul Inverse Power Law – Weibull. Prin înmulțirea dintre factorul de accelerare și numărul de cicluri în regim accelerat, a fost determinat numărul de cicluri, în regim normal de testare, al specimenelor GF1-Nomex și GF2-Nomex [ZAH18b].

Nr.	Numărul de	Numărul de	Nivelul de	Factorul de	Factorul de	Numărul de cicluri	Numărul de cicluri
	cicluri până la	cicluri până la	frecvență	accelerare	accelerare	până la defectare	până la defectare
	defectare GF1-	defectare GF2-	accelerat	GF1-Nomex	GF2-Nomex	(condiții normale de	(condiții normale
	Nomex (condiții	Nomex (condiții	(Hz)			testare)	de testare)
	accelerate)	accelerate)				GF1-Nomex	GF2-Nomex
1	15307	38826				64840	197236
2	16404	40015				69487	203276
3	18854	41699	2,500	4,236	5,080	79866	211831
4	19578	43798				82932	222494
5	21776	46619				92243	236825
6	10363	20752				73494	188324
7	10573	21071				74984	191219
8	11053	22801	3,000	7,092	9,075	78388	206919
9	11759	24373				83395	221185
10	12236	24599				86778	223236
11	4366	10199				47873	151159
12	5105	11237				55976	166544
13	6892	13360	3,500	10,965	14,821	75571	198009
14	8012	14556				87852	215734
15	8431	16867				92446	249986

### Tabelul 3.27. Determinarea numărului de cicluri, în regim normal de testare, al specimenelor sandwich GF1-Nomex și GF2-Nomex [ZAH18b]

Prin metodologia de accelerare a frecvenței de încărcare, propusă în cadrul acestui studiu, au fost obținute informații privind comportamentul, în regim normal de testare (1,5 Hz) al specimenelor GF1-Nomex și GF2-Nomex. Principalul scop al testelor accelerate a fost acela de a determina durata de viață, în regim normal de testare, la o frecvență de încărcare de 1,5 Hz, pentru specimenele GF1-Nomex și GF2-Nomex. Cea mai utilizată metodă de determinare a duratei de viață, din testele accelerate, este metoda grafică. Utilizând această metodă, a fost extrapolat numărul de cicluri, din regim accelerat în regim normal de testare și au fost determinate duratele medii de viață (figura 3.38), ale celor două tipuri de specimene GF1-Nomex și GF2-Nomex. Din figura 3.38, s-a constat că specimenele GF1-Nomex au prezentat o durată de viață de 2,69 ori mai mică, în comparație cu specimenele GF2-Nomex. De asemenea, s-a putut observa, în timpul testelor la oboseală, o comportare bună și a specimenelor GF1-Nomex. Acest avantaj se traduce prin faptul că aceste tipuri de teste sunt influențate și de structura miezului, nu numai de cea a învelișului din care au fost fabricate. Prin implementarea testelor accelerate la oboseală, a fost scurtată perioada de testare de 6,35 ori, pentru specimenele GF1-Nomex și, respectiv, de 7,9 ori, pentru specimenele GF2-Nomex. Cedarea structurilor sandwich, sub acțiunea solicitărilor mecanice ciclice, se datorează apariției, creșterii și propagării fisurilor, a dezlipirilor și a delaminărilor. Comportarea structurilor sandwich la oboseală depinde atât de natura materialelor componentelor, cât și de forma materialului de ranforsare și de nivelul de solicitare utilizat [ZAH18b].



Fig. 3.38. Determinarea duratei de viață a specimenelor sandwich [ZAH18b]

În tabelul 3.28, a fost descrisă dependența dintre numărul de cicluri până la defectare, în regim normal de testare, și cei mai importanți indicatori de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare - pdf și rata de defectare) pentru structurile sandwich cu înveliș din fibră de sticlă și miez Nomex.

Tabelul 3.28. Dependența dintre indicatorii de fiabilitate și numărul de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare, pentru specimenele sandwich GF1-Nomex [ZAH18b]

Numărul de cicluri până la defectare GF1-Nomex (condiții normale de testare)	Fiabilitate R(t)	Nonfiabilitate F(t)	Densitate de probabilitate f(t)·10⁻⁵	Rata de defectare λ(t)·10⁻⁵
47873	0,954	0,046	2,377	2,411
55976	0,890	0,110	6,832	7,185
64840	0,825	0,175	17,050	20,069
69487	0,760	0,240	24,512	32,539
73494	0,695	0,305	30,897	48,124
74984	0,630	0,370	32,910	55,358
75571	0,565	0,435	33,605	58,433
78388	0,500	0,500	35,967	75,481
79866	0,434	0,566	36,373	86,011
82932	0,369	0,631	34,985	111,896
83395	0,304	0,696	34,504	116,302
86778	0,239	0,761	28,926	153,532
87852	0,174	0,826	26,548	167,220
92243	0,109	0,891	15,336	236,547
92446	0,045	0,955	15,038	238,721

Indicatorii de fiabilitate, în condiții normale de testare (frecvență de încărcare de 1,5 Hz), ai specimenelor sandwich GF-Nomex, au fost determinați utilizând relațiile specifice modelului IPL – Weibull, în funcție de numărul de cicluri până la defectare. Pentru reprezentarea grafică a indicatorilor de fiabilitate, s-a ales modelul tridimensional, pentru care se obține o suprafață ce prezintă dependența dintre indicatorul de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare - pdf și rata de defectare) – timpul – nivelul de solicitare. Reprezentarea tridimensională, a funcției de fiabilitate, în funcție de frecvența de încărcare și timpul de defectare (cicluri), a fost descrisă în figura 3.39.a. Reprezentarea grafică tridimensională, a funcției de nonfiabilitate, în funcție de frecvență, a fost descrisă în figura 3.39.b [ZAH18b].





Fig. 3.39. Indicatorii de fiabilitate ai specimenelor sandwich GF1-Nomex: a) funcția de fiabilitate; b) funcția de nonfiabilitate; c) funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare; d) rata de defectare [ZAH18b]

Densitatea de probabilitate, a structurilor sandwich GF1-Nomex, a fost reprezentată grafic tridimensional în figura 3.39.c. Utilizând sistemul software ALTA 7 a fost reprezentată, sub formă grafică (figura 3.39.d), rata de defectare, în funcție de timp și de frecvența de încărcare [ZAH18b].

Corelația, dintre numărul de cicluri până la defectare, în regim normal de testare, și cei mai importanți indicatori de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare - pdf și rata de defectare) ai structurilor sandwich cu înveliș din fibră de sticlă și miez de fagure Nomex (GF2-Nomex), a fost descrisă în tabelul 3.29 [ZAH18b].

Numărul de cicluri până la defectare GF2-Nomex (condiții normale de testare)	Fiabilitate R(t)	Nonfiabilitate F(t)	Densitate de probabilitate f(t)·10⁻⁵	Rata de defectare λ(t)·10 <sup>-6</sup>
151159	0,954	0,046	1,907	1,966
166544	0,890	0,110	4,247	4,594
188324	0,825	0,175	10,389	13,477
191219	0,760	0,240	11,388	15,403
197236	0,695	0,305	13,431	20,212
198009	0,630	0,370	13,674	20,900
203276	0,565	0,435	15,208	26,321
206919	0,500	0,500	16,013	30,733
211831	0,434	0,566	16,630	37,762
215734	0,369	0,631	16,630	44,272
221185	0,304	0,696	15,796	55,092
222494	0,239	0,761	15,443	58,046
223236	0,174	0,826	15,224	59,728
236825	0,109	0,891	8,789	100,254
249986	0,045	0,955	2,608	160,834

Tabelul 3.29. Corelația dintre indicatorii de fiabilitate și numărul de cicluri până la defectare, în condiții normale de testare, pentru specimenele sandwich GF2-Nomex [ZAH18b]

Principalii indicatori de fiabilitate, în condiții normale de testare (nivelul normal de testare prezintă o frecvență de 1,5 Hz), ai specimenelor sandwich GF2-Nomex, au fost determinați utilizând relațiile specifice modelului IPL – Weibull, în funcție de numărul de cicluri până la defectare. Pentru reprezentarea grafică a indicatorilor de fiabilitate, s-a ales modelul tridimensional, pentru care se obține o suprafață, ce prezintă dependența dintre indicatorul de fiabilitate (funcția de fiabilitate, funcția de nonfiabilitate, funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare - pdf și rata de defectare) – timpul – nivelul de solicitare. Reprezentarea tridimensională a funcției de fiabilitate, în funcție de frecvență și de timpul de

defectare (numărul de cicluri până la defectare), a fost prezentată în figura 3.40.a. Corelația, dintre funcția de nonfiabilitate – numărul de cicluri – frecvență, a fost descrisă în figura 3.40.b, utilizând reprezentarea grafică tridimensională [ZAH18b].

Funcția densității de probabilitate, a structurilor sandwich GF2-Nomex, a fost prezentată tridimensional în figura 3.40.c. În figura 3.40.d, a fost descris comportamentul ratei de defectare, a structurilor sandwich GF2-Nomex, în funcție de numărul de cicluri, în regim normal de testare și nivelul de solicitare.





Fig. 3.40. Indicatorii de fiabilitate ai specimenelor sandwich GF2-Nomex: a) funcția de fiabilitate; b) funcția de nonfiabilitate; c) funcția densitate de probabilitate a timpului de funcționare; d) rata de defectare [ZAH18b]

# <u>CAPITOLUL 4.</u> CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FABRICAREA PRIN PROCEDEE ADITIVE A STRUCTURILOR SANDWICH UȘOARE

# 4.1. Cercetări privind fabricarea prin topire selectivă cu laserul a miezului structurilor sandwich ușoare

### 4.1.1. Introducere

O metodă modernă, de fabricare a miezului structurilor celulare, utilizate în componența panourilor sandwich, este reprezentată de tehnologia aditivă. Tehnologia aditivă este capabilă să realizeze modele tridimensionale, cu forme complexe, pornind de la modelele tridimensionale digitale, adăugând straturi succesive de material, în câteva ore, cu o intervenție minimă din partea factorului uman. Principalele procedee de fabricație aditivă sunt [ROU06]: stereolitografia (Stereolithography – SLA), extrudare termoplastică (Fused Filament Fabrication – FFF), sinterizare selectivă cu laser (Selective Laser Sintering – SLS), topire selectivă cu laser (Selective Laser Melting – SLM), fabricarea stratificată prin laminare (Laminated Object Manufacturing – LOM).

În cadrul acestui studiu, se va utiliza procedeul de topire selectivă cu laserul, prin care se fabrică structuri celulare multistratificate, prin consolidarea unor straturi succesive de material de tip pudră, prin utilizarea unui laser, pentru a topi și solidifica geometria cerută, pornind de la un model tridimensional. Procedeul de topire selectivă cu laserul, permite fabricarea unor structuri celulare sau componente, utilizând o gamă largă de materiale: titan, aliaje de titan, aliaje de cobalt-crom, oțel inoxidabil, aliaje de nichel și aliaje de aluminiu [ZAH17d].

Studiile recente, privind structurile celulare fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, se pot împărți în câteva direcții principale: influența parametrilor de fabricație asupra performanțelor mecanice [AHM16, CHE15], fabricarea unor implanturi utilizând structurile celulare [WAN16a, YAN15], fabricarea și optimizarea geometrilor structurilor celulare [GÜM13, YAN12], testarea structurilor celulare [FEN16, USH11, XIO15], analiza cu elemente finite a structurilor celulare [SMI13, TSO10].

O mare parte a studiilor, privind structurile celulare, sunt direcționate către fabricarea și apoi determinarea mecanismelor de defectare și a caracteristicilor mecanice, urmate de diverse analize microscopice. Analiza performanțelor mecanice, rezultate din testele experimentale, a structurilor celulare, realizate prin diverse procedee de fabricație aditivă, reprezintă o provocare pentru specialiștii în domeniu. În prezent, se fac teste pentru determinarea caracteristicilor mecanice, la diverse tipuri de solicitări (compresiune, încovoiere, tracțiune, impact), ale structurilor celulare, obținute prin procedeele SLM [ZAH17d].

În contextul științific actual, în care companii mari (din domeniul aviației, transportului auto, maritim, feroviar și al energiilor regenerabile) doresc să realizeze în următorii ani produse industriale (aeronave, mașini de curse, trenuri, pale pentru turbine eoliene) cu minim 50% componente funcționale, realizate prin procedeele aditive, fabricarea și testarea, unor astfel de structuri celulare, reprezintă un domeniu de cercetare vast și intens studiat [ZAH17d].

Scopul acestui studiu a fost de a determina comportamentul mecanic al unor structuri celulare, de tip miez fagure, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul. O primă etapă experimentală a constat în caracterizarea mecanică a structurilor celulare, de tip miez fagure, utilizând testele de microduritate [ZAH17d]. În acest studiu, se vor extinde cercetările experimentale și se vor determina performanțele la compresiune (rezistența la compresiune și modulul de elasticitate) ale structurilor celulare, de tip miez fagure, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, din oțel inoxidabil 316L. O atenție deosebită s-a acordat testelor accelerate la coroziune, a structurilor celulare, de tip fagure, în vederea determinării duratei de viață și a pierderii de greutate, pe o perioadă îndelungată de timp [ZAH17d].

# 4.1.2. Detalii experimentale

Structurile celulare, de tip miez fagure, au fost modelate utilizând sistemul software SolidWorks 2016 și apoi exportate în format stl., pentru fabricarea acestora utilizând echipamentul SLM 250 HL, la compania SLM Solutions Germania (tabelul 4.1). Pentru generarea datelor privind procedeul de fabricație SLM, al structurilor celulare, de tip miez fagure, s-a utilizat sistemul software AutoFab.

Parametru	Valoare
Puterea laserului [W]	100
Grosimea stratului de fabricație [µm]	50
Viteza de scanare [mm/s]	150
Distanța dintre două trasee diferite ale laserului [mm]	0,175
Dimensiunea particulelor din pulbere [µm]	20-40

Tabelul 4.1. Parametrii de fabricație pentru structurile celulare [ZAH17d]
--

Structurile celulare, de tip miez, au fost fabricate prin depunerea unor straturi subțiri de pulbere metalică, din oțel inoxidabil, care sunt succesiv topite și solidificate, la nivel microscopic. Aceste structuri au fost fabricate în interiorul unei camere de construcție închisă, ce conține gaz inert, de tip argon, la compania SLM Solutions Germania. Pulberea de oțel inoxidabil 316L, utilizată pentru realizarea structurilor celulare de tip fagure, are următoarea compoziție: C  $\leq$  0,03%; Mn  $\leq$  2,0%; Si $\leq$  0,75; Ni  $\approx$ 12%-14%; Cr $\approx$ 16%-18%; Mo $\approx$ 2%-3%; S  $\leq$  0,03; P  $\leq$  0,045; Fe balanță [www01].

Pentru acest studiu, au fost fabricate 20 de structuri celulare din oțel inoxidabil 316L. Specimenele fagure sunt de formă hexagonală (figura 4.1.a) și prezintă următoarele dimensiuni: lungime de 70 mm, lățime de 50 mm, înălțime de 12 mm. Elementele dimensionale specifice, ale miezului fagure, au fost descrise în figura 4.1.b. Astfel, dimensiunea celulei ( $D_c$ ), definită ca distanța dintre doi pereți opuși ai miezului fagure, are valoarea de 14 mm; lungimea unei laturi a miezului hexagonal (a) este de 8 mm, la o grosime a peretelui ( $t_c$ ) de 1,5 mm.





Fig. 4.1. a) Structura celulară, de tip miez fagure, fabricată prin procedeul SLM, din oțel inoxidabil 316L; b) caracteristicile dimensionale ale celulei fagure [ZAH17d]

În cadrul acestui studiu, pentru structurile celulare, s-au realizat trei tipuri de teste: la microduritate, la compresiune și la coroziune. La determinarea valorilor, privind microduritatea structurilor celulare, s-a utilizat metoda Vickers. Această metodă se bazează pe măsurarea mărimii diagonalei câmpului, obținut prin imprimarea cu sarcini mici, a unei piramide de diamant, în grăunții materialului analizat.

Pentru testele de microduritate ale structurilor celulare, specimenele au fost tăiate transversal (din planul perpendicular pe direcția de fabricație), înglobate în rășină epoxidică și apoi s-a realizat o șlefuire a acestora cu hârtie abrazivă, prin schimbarea treptată a granulației (1500, 2000 și 2500), utilizând mașina de șlefuit - polișat Buehler Phoenix Beta Grinder. Este foarte important ca piesele tăiate să prezinte o suprafață netedă și fără semne rămase după operația de debitare, deoarece aceste imperfecțiuni pot influența valorile și acuratețea testelor de microduritate. Determinările, privind microduritatea, s-au efectuat cu dispozitivul de măsurare a microdurității FM 700. Pentru măsurarea microdurității specimenelor, a fost aplicată o sarcină de 300 gf, timp de 15 secunde. Miezul fagure este des întâlnit, în foarte multe aplicații inginerești, iar efortul de compresiune reprezintă principala solicitare preluată. Câte cinci structuri celulare, din oțel inoxidabil 316L, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, au fost testate la compresiune plană (figura 4.2.a), și, respectiv, la compresiune pe muchie (4.2.b), utilizând mașina de testare WDW-150S. Dimensiunile structurilor celulare, testate la compresiune, în acest studiu, au fost fabricate astfel încât să fie în concordanță cu standardele în vigoare ASTM C365 (compresiune plană) și ASTM C364 (compresiune pe muchie). Toate testele la compresiune au fost efectuate cu o viteză de încărcare de 2 mm/min.

#### Teză de abilitare



Fig. 4.2. Testarea la compresiune a structurilor celulare fagure: a) compresiune plană; b) compresiune pe muchie [ZAH17d]

Principala cauză a deteriorării structurilor sandwich, și în special a miezului fagure metalic, o reprezintă coroziunea, care impune o atenție deosebită. Aceste structuri celulare sunt supuse, în timpul exploatării, următoarelor solicitări: compresiune, forfecare, încovoiere, impact. Structurile celulare sunt supuse, în timpul exploatării, la oboseală și la impactul cu mediul în care evoluează și care devine din ce în ce mai poluant (cu un conținut crescut de salinitate). Fenomenele de oboseală, coroborate cu agresivitatea mediului, în care structurile celulare sunt exploatate, conduc la apariția fenomenului de coroziune.

Structurile celulare din oțel inoxidabil 316L, fabricat prin procedeul de topire selectivă cu laserul, au fost supuse la teste accelerate la coroziune. Testele accelerate la coroziune au fost realizate în laboratoarele Institutului de cercetare ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) – Italia, utilizând o cameră de ceață salină. Înainte de începerea testării la coroziune a structurilor celulare, au fost analizate procedurile de testare din standardul ISO 9227 (Corrosion Tests in Artificial Atmospheres – Salt Spray Test). Deoarece procedeele de fabricație aditive sunt recente, foarte multe informații, din exploatarea componentelor fabricate prin topire selective cu laserul, sunt necunoscute.

Datorită perioadelor de testare îndelungate, necesare obținerii informațiilor asupra structurilor celulare, se impune implementarea testelor accelerate la coroziune. Prin utilizarea acestor tipuri de teste accelerate, asupra materialelor fabricate prin procedeul SLM, se poate stabili comportamentul la coroziune. Totodată, prin utilizarea tehnicilor accelerate, sunt reduse costurile privind testarea și se îmbunătățește siguranța în funcționare a structurilor testate. Testele la coroziune accelerată, în ceață salină, a structurilor celulare, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, au ca direcții principale de cercetare estimarea duratei de viața și analiza pierderii de masă. Au fost realizate două seturi de teste, la care au fost supuse câte cinci structuri celulare, având un timp de expunere de 240 ore. Primul set de specimene a fost supus testelor accelerate la coroziune la o concentrație de 5% NaCl (clorură de sodiu), iar cel de-al doilea set, la o concentrație de 10% NaCl.

# 4.1.3. Rezultate și discuții

# 4.1.3.1. Teste la microduritate

Metoda Vickers se pretează foarte bine la determinarea microdurității pieselor subțiri sau a pieselor cu straturi superficiale subțiri, de grosime mică. Sarcina, aplicată în aceste cazuri, devine din ce în ce mai mică, în funcție de grosimea stratului. Pentru testele de microduritate, au fost prelevate trei probe (din planul perpendicular pe direcția de fabricație), din structurile miezului fagure, fabricat prin procedeul de topire selectivă cu laserul, cu scopul de a determina caracteristicile de microduritate. În tabelul 4.2, au fost descrise rezultatele testelor de microduritate.

Nr.	Microduritate proba 1	Microduritate proba 2	Microduritate proba 3
	[HV <sub>0.3</sub> ]	[HV <sub>0.3</sub> ]	[HV <sub>0.3</sub> ]
1.	218,90	220,30	223,80
2.	216,80	213,50	235,80
3.	216,90	209,60	231,00
4.	231,00	234,50	226,00
5.	228,50	234,50	216,00
6.	210,50	217,50	227,00
7.	232,50	226,50	218,00
8.	224,50	231,40	214,00
9.	236,50	228,00	237,00
10.	235,60	225,00	234,00

Tabelul 4.2. Microduritatea structurilor celulare fagure [ZAH17d]

Principalii indicatori statistici au fost determinați pentru cele trei probe analizate privind microduritatea (tabelul 4.3). Dacă coeficientul de variație este aproape de zero (CV < 30%), atunci datele prelucrate statistic (valoarea coeficientului de variație este între 3,666% și 3,997%) sunt omogene și media calculată este reprezentativă pentru aceste seturi de date.

		1	
Nr.	Media	Abaterea standard	Coeficientul de variație
probă	(m)	(s)	(CV%)

9,002

8,641

8,295

3,997

3,856

3,666

225,170

224,080

226,260

1

3

Tabelul 4.3. Indicatorii statistici determinați în urma testelor la microduritate [ZAH17d]
--

În urma testării la microduritate a structurilor celulare de tip fagure, fabricate prin procedeul de fabricație SLM, s-a obținut o variație scăzută a valorilor privind microduritatea (225±15 HV<sub>0.3</sub>) probelor analizate.

# 4.1.3.2. Teste la compresiune a specimenelor fagure fabricate prin procedeul SLM

În cadrul acestui studiu, au fost testate câte cinci structuri celulare de tip fagure, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, la: compresiune plană și compresiune pe muchie. Scopul acestor teste a fost de a determina performanțele la compresiune plană și pe muchie, ale structurilor celulare de tip fagure, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul [ZAH17d].

Valorile rezistenței la compresiune, pentru cele zece specimene testate, au fost prezentate în figura 4.3.a. Rezultatele testelor la compresiune au indicat că specimenele, supuse la compresiune plană, prezintă o rezistență de 15 ori mai mare, în comparație cu cele supuse la compresiune pe muchie. De asemenea, din figura 4.3.b, se poate observa că valoarea modulului de elasticitate, pentru specimenele testate la compresiune plană, este mai mare de 22 de ori, decât valoarea modulului de elasticitate, pentru specimenele testate, pentru specimenele testate la compresiune pe muchie [ZAH17d].



Fig. 4.3. Rezultatele testelor la compresiune ale structurilor celulare: a) rezistența la compresiune; b) modulul de elasticitate la compresiune [ZAH17d]

Pentru o caracterizare detaliată a comportamentului la compresiune al structurilor celulare, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, a fost utilizată curba caracteristică tensiune – deformație specifică. Se observă că la compresiune plană (figura 4.4.a), se obține o dreaptă, care reprezintă răspunsul continuu al materialului față de forța aplicată, în acest caz, deformațiile specifice sunt proporționale cu tensiunile apărute [ZAH17d]. În privința comportamentului la compresiunea pe muchie (figura 4.4.b), se constată că apare o zona de proporționalitate, între deformațiile specifice și tensiuni, după parcurgerea palierului de curgere, curba caracteristică a prezentat o porțiune de întărire (ecruisare), iar creșterea deformațiilor specifice, în aceasta porțiune, este datorată creșterii tensiunilor [ATA82]. La atingerea punctul maxim, s-a produs îndesarea miezului celular, iar curba caracteristică prezintă o traiectorie descendentă, până la deteriorarea totală a miezului celular.



Fig. 4.4. Curba caracteristică la compresiune a structurilor celulare: a) compresiune plană; b) compresiune pe muchie [ZAH17d]

Utilizând microscopul optic Nikon Eclipse MA-100, au fost analizate modurile de defectare ale structurilor celulare de tip fagure, fabricate prin procedeul SLM, din oțel inoxidabil 316L, supuse testelor de compresiune pe muchie. După cum se poate observa în figura 4.5.a, care indică rezultatele testului de compresiune pe muchie, structura celulară a prezentat o deformare totală și multe zone cu fisuri. Cele mai multe fisuri s-au produs în zona centrală a specimenului fagure, ceea ce a provocat deformarea totală a acestuia [ZAH17d].



Fig. 4.5. Analiza modurilor de defectare ale structurilor celulare [ZAH17d]: a) specimenul analizat microscopic; b) zonă superioară cu fisuri (mărire 200 X); c) zona inferioară cu fisuri (mărire 200X)

### *4.1.3.3. Teste accelerate la coroziune ale structurilor celulare de tip fagure*

Mecanismele proceselor de degradare prin coroziune, ale structurilor celulare, sub acțiunea factorilor agresivi specifici mediului marin, reprezintă o cauză importantă a degradării componentelor utilizate în diferite domenii inginerești. La unele structuri metalice, la care fiabilitate prezintă o valoare ridicată, evaluarea duratei de viață, în regim normal, necesită o durată mare de testare. Din acest considerent, pentru analiza la degradare a structurilor celulare, din cadrul acestui studiu, s-au utilizat tehnicile de testare accelerată la coroziune. Astfel, au fost expuse la două niveluri de accelerare, cu soluție salină cu concentrație de 5% NaCl și respectiv 10% NaCl, cele zece structuri celulare. În procesul de coroziune accelerată al structurilor celulare, s-a utilizat metoda determinărilor prin pierdere de masă. Specimenele, după ce au fost extrase din camera salină, au fost curățate de produșii de coroziune. Acești produși reprezintă sărurile acumulate pe suprafața specimenelor și s-au înlăturat prin curățare în timpul inspecțiilor intermediare (după fiecare 48 de ore). În figura 4.6 [ZAH17d], au fost descrise pierderile de masă, în funcție de timpul de expunere, de pe suprafața miezului celular, pentru cele două niveluri de accelerare (5% NaCl și 10% NaCl).



Fig. 4.6. Variația pierderii de masă, în funcție de timpul de expunere al structurilor celulare [ZAH17d]

Pentru analiza statistică, datele, rezultate din testele accelerate de coroziune, ale structurilor celulare, au fost introduse în sistemul software ALTA 9. La prelucrarea statistică a datelor, sa utilizat ca model de accelerare Inverse Power Law (care este adecvat solicitărilor nontermice) și legea de distribuție Weibull. Rezultatele obținute, din testele accelerate de coroziune, au fost analizate statistic și apoi extrapolate, pentru a se obține durata de viață a structurilor celulare, în condiții normale de testare (0,05% NaCl). Principalul indicator, determinat la aceste tipuri de teste accelerate la coroziune, este durata medie de viața. Pentru structurile celulare, s-a obținut o durată medie de viață de 49638 de ore (aproximativ cinci ani și jumătate). Această durată de viață este estimată pentru utilizarea structurilor celulare, în apropierea mărilor și a oceanelor, unde salinitatea prezintă un regim normal de 0,05% NaCl [ZAH17d].

# 4.2. Efectul tratamentului termic de omogenizare asupra proprietăților mecanice ale structurilor sandwich, fabricate prin topire selectivă cu laserul, din Inconel 718

### 4.2.1. Introducere

Procedeul de topire selectivă cu laserul (SLM), are capacitatea de a realiza componente metalice, cu geometrii complexe, care sunt dificil de fabricat prin metodele de producție convenționale. Pe parcursul procedeului SLM, particulele de pulbere metalice sunt topite selectiv de un fascicul laser, după care, acestea se răcesc rapid și se solidifică. După solidificare, un nou strat de pulbere este depus și expus din nou la fasciculul laser. Acest proces se repetă, până când piesa este complet construită [HOS19, WAN19].

Fabricarea super-aliajului pe bază de nichel – Inconel 718, prin procedeul SLM, reprezintă un domeniu intens cercetat și răspândit, deoarece mulți producători de echipamente SLM oferă acest tip de pulbere metalică. Datorită avantajelor, pe care le conferă aliajul Inconel 718 (rezistență excelentă la fluaj, rezistență bună la oxidare, coroziune la temperaturi ridicate și durată de viață ridicată la oboseală), acesta este utilizat pe scară largă în industrii precum [POL06, POP17a, POP17b]: auto, aerospațială (palete de turbină, motoare de rachetă), nucleară (reactoare) și petrochimică. Tratamentele termice convenționale, pentru Inconel 718, cuprind omogenizarea și apoi tratamente de îmbătrânire multiple, utilizate în mod obișnuit pentru specimene forjate sau turnate. Ciclurile de încălzire și răcire termică rapidă, repetate, ale pieselor fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, au determinat, de asemenea, un nivel ridicat de solicitări termice reziduale, în zonele superioare. Prin urmare, specimenele, fabricate prin procedeul SLM, au nevoie de tratament termic, ulterior fabricației, pentru a se omogeniza microstructura și pentru a elimina tensiunile reziduale, cu scopul de a obține microstructura și proprietățile mecanice dorite. Procedeul de fabricație SLM oferă oportunităti de proiectare si de fabricare ale structurilor sandwich complexe si, de asemenea, a structurilor celulare. Din analiza studiilor recente, se poate concluziona că nu există structuri sandwich, cu miez fagure, fabricate direct prin procedeul SLM. Aceste tipuri de structuri sandwich nu pot fi fabricate, deoarece în interiorul celulelor fagure ar rămâne pulbere metalică, care nu poate fi eliminată și, astfel, ar determina o creștere semnificativă a masei structurilor. Fabricarea directă, prin procedeul SLM, a structurilor sandwich, cu miez fagure, se poate realiza în două moduri [ZAH20b]:

- primul mod constă în fabricarea separată a învelişurilor şi a miezului fagure, urmată apoi de lipirea acestora;
- al doilea mod de fabricare a structurilor sandwich, cu miez fagure, constă în proiectarea structurilor având găuri, pentru eliminarea pulberii metalice.

În acest studiu, au fost proiectate două tipuri de structuri sandwich, cu miez fagure, având prevăzute găuri, în înveliș sau în miez, pentru a elimina pulberea metalică cu ușurință. O analiză comparativă a microstructurii și a performanțelor mecanice (compresiune, microduritate), între structurile sandwich netratate și structurile sandwich supuse tratamentului termic de omogenizare, a fost investigată în acest studiu. Testele la compresiune au fost validate prin analiza cu elemente finite, pentru cele două structuri sandwich (cu miez perforat și cu înveliș perforat), fabricate prin procedeul SLM [ZAH20b].

### 4.2.2. Detalii experimentale

### 4.2.2.1. Modelarea structurilor sandwich

Structurile sandwich, cu miez fagure, au fost modelate în sistemul software SolidWorks 2016. Modelarea structurilor sandwich, cu miez fagure, a pornit de la limitările privind fabricarea, prin procedeul SLM, a acestora. Structurile sandwich nu pot fi direct fabricate prin procedeul SLM, deoarece interiorul miezului hexagonal fagure va fi plin cu pulbere metalică. Pentru eliminarea acestui inconvenient, în acest studiu, s-a optat pentru perforarea învelișului sau a miezului structurilor sandwich, cu scopul eliminării pulberii metalice. Astfel, au fost modelate două tipuri de structuri sandwich identice, pentru care au fost inserate găuri de diametru 2 mm în înveliş (figura 4.7.a) sau în miezul fagure (figura 4.7.b). Specimenele au dimensiunile de 30 mm x 30 mm x 15 mm, iar grosimea învelișul este de 1 mm. În continuarea studiului, cele două structuri vor avea următoarele abrevieri: structura sandwich cu înveliş perforat (SSÎP) și structura sandwich cu miez perforat (SSMP). În acest studiu, structurile sandwich, cu miez hexagonal (figura 4.7.c), au fost fabricate folosind procedeul SLM, având următoarele dimensiuni: celula fagurelui (D<sub>c</sub>) este de 8,98 mm, lungimea unei laturi a miezului hexagonal (a) este de 5,19 mm, grosimea peretelui (t<sub>c</sub>) este de 0,6 mm [ZAH20b].





#### 4.2.2.2. Fabricarea structurilor sandwich prin topire selectivă cu laserul

Structurile sandwich au fost fabricate, folosind sistemul SLM 280HL, la compania SLM Solution (Luebeck,Germania), din pulbere de Inconel 718, în cadrul contractului de mobilitate pentru cercetători PN-III-P1-1.1-MC-2017-0418. Compoziția chimică, a pulberii metalice de Inconel 718, a fost descrisă în tabelul 4.4.

Ni	Cr	Ta + Nb	Мо	Ti	AI	Fe
50-55	17–21	4,75–5,50	2,80–3,30	0,65–1,15	0,20–0,80	
Cu	С	Si, Mn	В	Со	P, S	balanță
0,30	0,08	0,35 fiecare	0,006	1,00	0,015 fiecare	

### Tabelul 4.4. Compoziția chimică a pulberii de Inconel 718, utilizată la fabricarea structurilor sandwich [www02]

În tabelul 4.5, au fost descriși principalii parametri de fabricație utilizați la fabricarea, prin procedeul de topire selectivă cu laserul, a structurilor sandwich. Pentru acest studiu, au fost fabricate 20 de structuri sandwich, realizate din Inconel 718 (10 specimene SSÎP și 10 specimene SSMP).

Tabelul 4.5. Parametrii de fabricație pentru structurile sandwich [ZAH20b]

Parametru	Valoare
Puterea laserului [W]	200
Grosimea stratului de fabricație [µm]	30
Viteza de scanare [mm/s]	300
Distanța dintre două trasee diferite ale laserului [mm]	0,120
Dimensiunea particulelor din pulbere [µm]	10-45

# 4.2.2.3. Tratamentul termic de omogenizare a specimenelor sandwich

Structurile sandwich, fabricate prin procedeul SLM, au fost tratate termic după următorul program: tratamentul cu omogenizare (1080 °C, 1,5 h/ răcire în aer), călire de punere în soluție (980° C, 1 h/răcire în aer), dublă îmbătrânire (720°C, 8 h/ răcire în cuptor la 55°C/ h până la 620°C, 8h/răcire în aer), în conformitate cu tratamentul termic standard pentru Inconel 718 [RA003]. În figura 4.8, a fost reprezentată grafic planificarea tratamentului termic de omogenizare a structurilor sandwich. Analiza microscopică a specimenelor sandwich a fost realizată cu ajutorul microscopului metalografic Nikon Eclipse MA 100.





# 4.2.2.4. Teste la compresiune

Douăzeci de structuri sandwich, cu miez fagure din Inconel 718, fabricate prin procedeul SLM, au fost supuse încercării la compresiune, utilizând mașina de testare WDW-150S (figura 4.9). Toate testele de compresiune au fost efectuate cu o viteză de încărcare de 2 mm/min. Dimensiunile structurilor sandwich, testate la compresiune, au fost fabricate conform standardelor: ASTM C365 și MIL 401.B. Pentru testele de compresiune, au fost introduse în sistemul software al mașinii de testat dimensiunile structurilor sandwich. Utilizând relațiile de calcul (3.10) și (3.11), specifice testării la compresiune, au fost determinate valorile rezistenței la compresiune și ale modulului de elasticitate la compresiune, pentru specimenele sandwich, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul [ZAH20b].



Fig. 4.9. Testarea la compresiune a specimenelor sandwich [ZAH20b]

# 4.2.2.4. Măsurarea microdurității Vickers a specimenelor sandwich

Pentru analiza microdurității structurilor sandwich, au fost tăiate probele în secțiune verticală - paralel cu direcția de fabricație (figura 4.10). Probele au fost înglobate în rășină epoxidică și apoi șlefuite cu hârtie abrazivă, care prezintă granulație din ce în ce mai mică (600, 1200, 1500, 2000 și 2500), utilizând mașina de șlefuit Buehler Phoenix Beta Grinder.



Fig. 4.10. Vedere schematică asupra zonei de unde au fost decupate probele pentru determinarea microdurității Vickers [ZAH20b]

Pentru determinarea microdurității, au fost realizate zece măsurători, pentru fiecare specimen, folosind dispozitivul de măsurare a microdurității FM 700. Sarcina de încărcare a fost de 100 gf, la un timp de încărcare de 15 secunde [ZAH20b].

# 4.2.3. Rezultate și discuții

# 4.2.3.1. Caracterizarea microstructurală a specimenelor din Inconel 718

Pentru analiza microstructurală, cele două tipuri de specimene (netratate termic și tratate termic) au fost tăiate din partea inferioară a structurilor sandwich. Specimenele lustruite au fost tratate cu apă regală, pentru a evidenția structura internă a materialului Inconel 718. În figura 4.11, au fost descrise planurile specifice fabricației structurilor sandwich, obținute prin procedeul SLM [ZAH20b].



Fig. 4.11. Detalii asupra modului de fabricație al structurilor sandwich [ZAH20b]

Microstructura tipică a materialului Inconel 718, fabricat prin topire selectivă cu laserul [KAR19, POP15, TIA18, YAO17, ZHA18], netratat termic, în plan paralel cu direcția de fabricație, a fost descrisă în figura 4.12.a. De asemenea, în figura 4.12.b, a fost prezentată microstructura caracteristică materialului Inconel 718, netratată termic, în plan perpendicular pe direcția de fabricație. Microstructura specimenelor, netratate termic din Inconel 718, a prezentat grăunți de tip coloane cu bazine de topire (figura 4.12.a și figura 4.12.b). În urma investigației microscopice, a specimenelor supuse tratamentului termic de omogenizare [ZAH20b], s-a observat că imaginile obținute sunt tipice materialului Inconel 718, în funcție de cele două planuri analizate: planul paralel cu direcția de fabricație (figura 4.12.c) și planul perpendicular pe direcția de fabricație (figura 4.12.d).

Microstructura materialului Inconel 718, după omogenizare, diferă semnificativ de microstructura specimenelor, înainte de aplicarea tratamentului termic. Cu toate acestea,

după procesul de omogenizare, imaginea optică, a microstructurii materialului Inconel 718, ilustrează o structură relativ omogenă, dar și grăunți care prezintă forme neregulate (figura 4.12.c și figura 4.12.d). A fost evident că tratamentul de omogenizare, al specimenelor din Inconel 718, a prezentat un efect semnificativ asupra îmbunătățirii proprietăților microstructurale. După tratamentul termic de omogenizare, grăunții de tip coloane și traiectoriile laserului, nu se mai pot identifica, dar, în schimb, au apărut grăunți cu suprafețe de separație, de dimensiuni mai mici și mai numeroși. În plus, după tratamentul de omogenizare al specimenelor au apărut grăunți alungiți, cu dimensiuni diferite și precipitări, adunate, în principal, în zonele de separație ale grăunților [ZAH20b].



Fig. 4.12. Imagini microscopice ale specimenelor din Inconel 718 [ZAH20b]: a) plan paralel cu direcția de fabricație a specimenului netratat termic (mărire 200X); b) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului netratat termic (mărire 200X); c) plan paralel cu direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație a specimenului tratat termic (mărire 200X); d) plan perpendicular pe direcția de fabricație

# 4.2.3.2. Comportamentul la compresiune al specimenelor sandwich

Pentru testele de compresiune, au fost utilizate patru seturi a câte cinci specimene fiecare, după cum urmează: cinci structuri sandwich, cu înveliș perforat, netratate termic (SSÎP-NT); cinci structuri sandwich, cu miez perforat, netratate termic (SSMP-NT); cinci structuri sandwich, cu înveliș perforat, tratate termic (SSÎP-T tratat termic); cinci structuri sandwich, tratate termic, cu miez perforat (SSMP-T). Cu ajutorul mașinii de testare WDW-150S și prin

intermediul sistemului software integrat al acesteia, au fost determinate curbele de încărcare-deplasare și caracteristicile mecanice (rezistență la compresiune și modul de elasticitate la compresiune) ale structurilor sandwich, din Inconel 718. Curba caracteristică încărcare – deplasare, la compresiune, a fost creată utilizând valorile medii, provenite din testarea celor cinci specimene. Această curbă a fost prezentată, sub formă grafică, în figura 4.13.a. Comportamentul, din punct de vedere al încărcării – deplasării, a celor douăzeci de specimene, testate la compresiune, indică o relație liniară între forța aplicată și deplasare și apoi o scădere a forței maxime, la momentul degradării structurii sandwich. După cum a fost prezentat în figura 4.13.b, rezistența la compresiune a variat între 56,65 MPa (SSMP-NT) și 139,4 MPa (SSÎP-T), iar modulul de elasticitate la compresiune s-a situat în intervalul 2,2 GPa și 5,4 GPa [ZAH20b].



Fig. 4.13. Rezultatele testelor la compresiune: a) curba caracteristică încărcare – deplasare; b) caracteristicile mecanice; c) modul de deformare al specimenelor [ZAH20b]

Pentru structurile sandwich testate la compresiune, au fost determinați principalii indicatori statistici (tabelul 4.6 și tabelul 4.7). Corespunzător datelor prezentate în tabelul 4.6 și în tabelul 4.7, la cele patru seturi de date experimentale (rezistență la compresiune și modul de elasticitate la compresiune), valoarea coeficientului de variație este scăzută CV = 4,716% (pentru rezistența la compresiune) și CV = 6,363% (pentru modulul de elasticitate la compresiune). Se poate concluziona că, pentru cele două caracteristici, valoarea coeficientului de variație este scăzută, iar eșantionul este omogen [ZAH20b].

Tipul de	Media (m)	Abatere standard (s)	Coeficientul de variație
specimen	[MPa]	[MPa]	(CV)%
SSMP-NT	56,650	1,780	3,142
SSÎP-NT	95,600	2,920	3,054
SSMP-T	84,800	4,000	4,716
SSÎP-T	139,400	3,710	2,661

Tabelul 4.6. Indicatorii statistici [ZAH2Ob], determinați în urma testelor la compresiune, ai specimenelor sandwich – rezistența la compresiune [MPa]

Tabelul 4.7. Indicatorii statistici [ZAH2Ob], determinați în urma testelor la compresiune, ai specimenelor sandwich – modulul de elasticitate la compresiune [GPa]

Tipul de	Media (m)	Abatere standard (s)	Coeficientul de variație
specimen	[GPa]	[GPa]	(CV)%
SSMP-NT	2,200	0,140	6,363
SSÎP-NT	3,800	0,220	5,789
SSMP-T	3,300	0,100	3,030
SSÎP-T	5,400	0,308	5,703

Analizând rezultatele testelor la compresiune ale specimenelor netratate termic, se poate afirma că specimenele cu înveliș perforat (SSÎP-NT), prezintă performanțe superioare, în comparație cu specimenele cu miez perforat (SSMP-NT). În plus, din figura 4.13.b, se poate observa că specimenele cu înveliș perforat, tratate termic (SSÎP-T), au prezentat performanțe mai bune (din punct de vedere al rezistentei la compresiune și al modulului de elasticitate la compresiune) la testele de compresiune, în comparație cu specimenele cu miez perforat, tratate termic (SSMP-T). Valorile medii ale rezistențelor de compresiune, obținute pentru specimenele netratate și pentru specimenele tratate, păstrează proporții similare, în privința rezultatelor (pentru ambele structuri). Astfel, valorile rezistenței la compresiune, pentru cele două structuri sandwich (SSÎP și SSMP), după tratamentul termic de omogenizare, au indicat o creștere de aproximativ 50%. Rezistența la compresiune, în cazul specimenelor cu înveliș perforat, a fost superioară, în comparație cu cea a specimenelor cu miez perforat, deoarece miezul fagure prezintă cel mai important rol, în cadrul testelor la compresiune, fiind asimilat cu o structură principală, care preia cea mai mare parte a sarcinii. În schimb, învelișul structurii sandwich este asimilat unei structuri secundare, ce preia sarcina și o transmite miezului fagure. Astfel, rezistența la compresiune a fost, în mod normal, mai mare, în cazul miezului fără găuri, în comparație cu miezul perforat. Introducerea găurilor, în miezul structurii sandwich, determină concentratori de tensiune și zone cu deformare semnificativă la flambaj. Se poate concluziona că: specimenele sandwich cu înveliș perforat, netratate termic, prezintă o rezistență la compresiune cu 69% mai mare, în comparație cu specimenele sandwich cu miez perforat, netratate termic. După tratamentul termic de omogenizare, se poate deduce că: specimenele sandwich cu înveliș perforat, tratate termic, prezintă o rezistență la compresiune cu 65% mai mare, în comparație cu specimenele sandwich cu miez perforat, tratate termic. Toate structurile sandwich, testate la compresiune, au prezentat același mecanism de deformare și anume, flambajul miezului fagure (figura 4.13.c). Astfel, structurile sandwich au suferit o comprimare a miezului fagure, în timp ce învelișul nu a prezentat niciun mod de degradare. În acest studiu, structurile sandwich au fost fabricate, pentru a putea observa comportamentul de compresiune al ambelor configurații, și anume: miezul fagure complet și miezul fagure deschis. În urma testelor de compresiune, s-a observat același mod de deformare, la ambele structuri, și anume: flambajul local al miezului. În plus, se poate observa o deformare mai mare a miezului fagure deschis, datorită redistribuirii sarcinii pe miezul fagurelui, în special în zonele cu colț sau cu celule deschise [ZAH20b].

# 4.2.3.3. Microduritatea structurilor sandwich fabricate prin procedeul SLM

Dintre proprietățile mecanice, testarea microdurității specimenelor, fabricate prin procedeul SLM, reprezintă un domeniu intens cercetat. În numeroase studii [GRI16, HOS19, KON16, STE17], a fost raportată o diferență neglijabilă a microdurității, în funcție de planurile de fabricație (paralel sau perpendicular pe direcția de fabricație) ale specimenelor realizate prin topire selectivă cu laserul din Inconel 718. Studii recente au indicat o variație neglijabilă a microdurității, în funcție de înălțimea de fabricație a pieselor [STR11, ZHA11]. În schimb, alte investigații au menționat, că microduritatea pieselor scade, odată cu creșterea înălțimii de fabricație [LUO20, WAN16b], a pieselor fabricate prin procedeul SLM, din Inconel 718.

Pentru testarea microdurității Vickers, au fost analizate patru probe, decupate din structurile sandwich, fabricate prin procedeul SLM, cu scopul de a determina caracteristicile privind microduritatea acestora. Testele la microduritate au fost efectuate pe câte două probe (netratate termic și tratate termic), secționate după un plan paralel cu direcția de fabricație. Probele au fost tăiate, din partea superioară și din partea inferioară ale structurilor sandwich, pentru a analiza variația microdurității, odată cu creșterea înălțimii de fabricație.

Rezultatele testelor au indicat că a existat o schimbare evidentă a valorilor microdurității, odată cu creșterea înălțimii de fabricație, atât pentru specimenele netratate termic, cât și pentru specimenele supuse tratamentului termic de omogenizare. În cazul specimenelor netratate termic, valoarea medie a microdurității, în secțiunea de jos, a fost de 369,59 HV<sub>0.1</sub>, prezentând o creștere de aproximativ 13%, în comparație cu valoarea microdurității, obținută în secțiunea superioară. În cazul specimenelor, supuse procesului de omogenizare, valoarea medie a microdurității, în secțiunea de jos, a fost de 521,15 HV<sub>0.1</sub>, prezentând o creștere cu aproximativ 14%, în comparație cu valoarea microdurității, obținută în secțiunea superioară. Valoarea medie a microdurității specimenului, din Inconel 718, tratat termic, pentru secțiunea

de jos, a fost de 521,15 HV<sub>0.1</sub> și, respectiv, pentru secțiunea superioară, a fost de 456,01 HV<sub>0.1</sub>. Prin urmare, s-a confirmat faptul că, și în cazul specimenelor tratate termic, microduritatea scade (13,5%) odată cu creșterea înălțimii de fabricație. Se poate observa că valoarea microdurității specimenelor, tratate termic, a crescut cu aproximativ 40%, pentru specimenele analizate în secțiunea superioară și cu aproximativ 41%, pentru specimenele analizate în secțiunea în comparație cu specimenele netratate termic [ZAH 20b].

Valoarea mai mare a microdurității, în partea inferioară a structurii sandwich, a fost atribuită durificării prin precipitare, datorită ciclurilor repetate de încălzire, la care a fost supusă suprafața inferioară, în timpul procedeului de fabricație SLM. Suprafața inferioară, a structurii sandwich, a fost supusă unui ciclu de încălzire repetitiv, care a fost asimilat unui tratament termic, ce determină o microduritate mai mare. Valoarea mai mică a microdurității, în partea de sus a structurii sandwich, poate fi cauzată de o scădere a fazei de durificare. În partea de sus a structurii sandwich, laserul circulă pe suprafață doar o singură dată și nu au existat tratamente termice ulterioare [HOS19, STE17, TIA18]. Caracteristicile mecanice (rezistența la compresiune și microduritatea) superioare, ale specimenelor din Inconel 718, tratate termic, în comparație cu specimenele netratate, au fost atribuite, în principal, procesului de durificare prin precipitare, obținut în urma aplicării procesului de omogenizare, după cum a fost menționat și în alte studiile anterioare [CHL15, KAR19, RAG17].

În tabelul 4.8, au fost descriși principalii indicatori statistici, determinați în urma analizei microdurității specimenelor sandwich fabricate, prin procedeul SLM, din Inconel 718. Valorile coeficientului de variație, pentru rezultatele analizelor la microduritate, au fost cuprinse între 1,319% și 5,138%, ceea ce determină omogenitatea datelor experimentale, iar valoarea medie a fost reprezentativă pentru valorile experimentale obținute [ZAH20b].

Tipul de specimen	Medie (m) [HV <sub>0.1</sub> ]	Abatere standard (s) [HV <sub>0.1</sub> ]	Coeficientul de variație (CV)%
Specimen netratat termic – secțiune superioară	324,900	4,287	1,319
Specimen netratat termic – secțiune inferioară	369,590	9,066	2,452
Specimen tratat termic – secțiune superioară	456,010	12,685	2,781
Specimen tratat termic – secțiune inferioară	521,150	26,778	5,138

Tabelul 4.8. Indicatorii statistici, determinați în urma testelor la microduritate, ai specimenelor sandwich [ZAH20b]

# 4.2.3.4. Analiza cu elemente finite a structurilor sandwich din Inconel 718

Analiza cu elemente finite, a structurilor sandwich din Inconel 718, a fost efectuată în modulul static al sistemului software ANSYS Workbench 19 R3. În modelul de simulare, dimensiunea structurilor sandwich, proprietățile materialului Inconel 718, placa superioară și ce-a inferioară a mașinii de testat, au fost stabilite în concordanță cu testele la compresiune. Modelul elasto-plastic a fost utilizat pentru analiza cu elemente finite a structurii sandwich cu miez fagure. Contactele, dintre placa superioară și structura sandwich, au fost stabilite cu opțiunea frictionless support (figura 4.14.a). Această opțiune nu permite specimenului deplasarea sau rotația, pe direcția normală (Z), ci doar după direcțiile tangențiale (X și Y). S-a luat în considerare un coeficient de frecare de 0,15, între placa superioară și învelișul superior al structurii sandwich. Între placa inferioară și structura sandwich, a fost utilizată opțiunea fixed support - încastrare (anularea tuturor gradelor de rotație și de translație). Valoarea coeficientului de frecare, pentru contactul dintre placa superioară și învelișul structurii sandwich, a fost aleasă 0,15, deoarece platanul superior este fabricat din oțel călit, iar fețele plăcii au fost curățate cu ulei, pentru a minimaliza frecarea [ZAH20b].

S-a considerat că învelișurile au fost perfect fixate de miezul fagure, deoarece structurile au fost fabricate direct prin topire selectivă cu laserul, fără a se interveni cu procedee suplimentare de asamblare. În plus, viteza de deplasare, a platanului superior, a fost stabilită la 2 mm/min, iar platanul inferior a fost încastrat, în concordanță cu testele la compresiune, ale structurilor sandwich [ZAH2Ob]. Figura 4.14.b prezintă discretizarea modelului sandwich cu miez fagure, din Inconel 718. Cele două placi au fost discretizate, utilizând elemente hexaedrice cu 20 de noduri, cu dimensiunea elementului de 2 mm. Elemente tetraedrice, cu zece noduri, având o dimensiune a elementului de discretizare de 0,5 mm, au fost utilizate pentru miezul fagure și pentru învelișurile structurii sandwich [ZAH2Ob].



Fig. 4.14. Analiza cu elemente finite a specimenelor sandwich cu miez fagure: a) aplicarea solicitărilor și stabilirea condițiilor la limită, impuse structurilor sandwich; b) modelul discretizat [ZAH20b]
Analiza cu elemente finite a structurilor sandwich, a fost realizată, urmărind următoarele rezultate: analiza comparativă dintre comportamentului la deformare al specimenelor testate la compresiune și cel rezultat din analiza cu elemente finite; analiza comparativă a distribuției tensiunilor rezultate din testele experimentale și din analiza cu elemente finite; studiu comparativ între forțele maxime, apărute la testele la compresiune și forțele de reacțiune, apărute în platanul inferior, din modelul cu elemente finite. Această analiză cu elemente finite, a fost realizată pentru specimenele sandwich, fabricate prin procedeul SLM, netratate termic, pentru cele două modele: specimen sandwich cu înveliş perforat (SSÎP) și specimen sandwich cu miez perforat (SSMP). Astfel că, în urma investigării specimenelor supuse testelor la compresiune și a analizelor cu elemente finite, se poate afirma faptul că, modul de deformare apare, în cele două cazuri, la miezul structurii (figura 4.15.a și figura 4.15.b). Astfel, se poate observa că miezul celor două structuri sandwich, analizate prin metoda cu elemente finite, prezintă același mod de deformare, cu cele testate la compresiune, și anume, flambajul miezului fagure. Deplasarea totală prezintă valoarea maximă, în zona de mijloc a miezului structurii [ZAH 20b].



Fig. 4.15. Rezultatele analizei cu elemente finite a structurilor sandwich, netratate termic: a) distribuția deplasărilor totale a specimenelor cu înveliș perforat; b) distribuția deplasărilor totale a specimenelor cu miez perforat; c) distribuția tensiunilor echivalente Von Mises a specimenelor cu înveliș perforat; d) distribuția tensiunilor echivalente Von Mises a specimenelor cu miez perforat [ZAH20b] Mecanismul de degradare, a structurii sandwich, din testele experimentale, a fost în strânsă legătură cu distribuția tensiunilor echivalente, din analiza cu elemente finite. Structurile sandwich cu înveliș perforat (figura 4.15.c), au prezentat valoarea maximă, a tensiunii echivalente, la îmbinarea dintre miez și înveliș, deoarece această structură prezintă o rigiditate bună a miezului. În schimb, tensiunea maximă echivalentă, pentru structurile sandwich cu miez perforat, prezintă valoarea maximă, în zona găurilor miezului fagure. Tensiunea maximă echivalentă, apărută în acest caz (figura 4.15.d), se datorează concentratorilor de tensiune, care apar în zona găurilor miezului fagure. Forțele de reacțiune, ale structurii sandwich, au fost studiate, folosind sistemul software de analiză cu elemente finite, ANSYS Workbench 19 R3. Rezultatele studiului comparativ, între forțele de reacțiune, rezultate din testele experimentale (compresiune) și forțele de reacțiune, apărute pe placa inferioară, din analiza cu elemente finite (tabelul 4.9), prezintă o validare adecvată, iar erorile relative, care apar între aceste rezultate, s-au încadrat între 2,71% și 3,32%. Modelele cu elemente finite au oferit rezultate bune, iar forțele de reacțiune, calculate cu metoda elementelor finite, au prezentat valori apropiate de forțele de reacțiune, obținute din testele experimentale [ZAH20b].

Tabelul 4.9. Analiza comparativă, a erorilor relative, dintre forțele de reacțiune, rezultate din testele experimentale și analiza cu elemente finite [ZAH20b]

Tipul de	Forțe de reacțiune –	Forțe de reacțiune –	Eroare relativă
specimen	teste experimentale [kN]	MEF [kN]	(%)
SSÎP-NT	86,06	83,20	3,32
SSMP-NT	50,06	48,70	2,71

În figura 4.16, au fost comparate curbele încărcare-deplasare, rezultate din testele experimentale și din analiza cu elemente finite. Se poate observa că a existat o concordanță bună între curbele de încărcare-deplasare, obținute din testele experimentale și cele obținute din analiza cu elemente finite, ale specimenelor sandwich [ZAH20b].



Fig. 4.16. Studiu comparativ între curbele caracteristice, obținute din testele la compresiune și cele obținute din analiza cu elemente finite [ZAH20b]

## 4.3. Designul, analiza performanțelor și testarea structurilor sandwich, fabricate prin procedeul de extrudare termoplastică

### 4.3.1. Introducere

Metodele clasice, de fabricație și asamblare, ale structurilor sandwich ușoare, implică multe etape, care fac ca producția să fie scumpă și care necesită achiziția unor dispozitive complexe și uneori greu de utilizat. O metodă modernă, de fabricație a structurilor sandwich ușoare, realizate din materiale plastice, compozite și metalice, este reprezentată de tehnologia de fabricație aditivă.

Procedeul de fabricație, prin extrudare termoplastică (FDM - Fused Deposition Modeling sau FFF - Fused Filament Fabrication), reprezintă unul dintre cele mai utilizate procedee deoarece: prezintă o gamă vastă de materiale, este silențios și sigur, se pot produce obiecte și componente utilizabile, prețul imprimantelor 3D este accesibil, procedeul de fabricație este simplu de utilizat [SIN18]. Cu ajutorul procedeului de fabricare prin extrudare termoplastică, se pot realiza geometrii complexe și structuri dificil de realizat prin metodele tradiționale. Prin intermediul procedeului FFF, pot fi realizate, testate și eventual modificate rapid, prototipurile de produs.

Cercetările, privind fabricarea structurilor sandwich, utilizând procedeul FFF, se pot împărți în câteva direcții principale: testarea și analiza numerică a miezului structurilor [PAN18, PIE18]; fabricarea prin extrudare termoplastică și analiza structurilor celulare [JOW17, MOH16]; fabricarea structurilor sandwich, prin lipirea fețelor din material compozit cu miezul fabricat prin procedeele aditive [LUC18, ELO18, HOU18, GAL18]; printarea 3D a unor structuri sandwich, în scopul testării performanțelor mecanice [BAC20, BRI18, RAJ18, SAR18].

Cu toate acestea, în urma investigării stadiului actual al cunoașterii, se poate afirma că există provocări științifice, cu caracter interdisciplinar, care pot fi exploatate, generând metodologii originale, în domeniul testării performanțelor mecanice a unor structuri sandwich, fabricate prin procedeul de extrudare termoplastică. Dificultatea principală, la fabricarea prin extrudare termoplastică, a structurilor sandwich cu miez fagure, provine din faptul că învelișul superior este fabricat deasupra spațiilor de miez. Prin urmare, sunt necesare structuri suport pentru o fabricație cu o calitate bună. La realizarea structurilor sandwich, miezul fagure devine un spațiu închis, iar materialul suport nu poate fi îndepărtat ulterior. Astfel că, rezultă o structură sandwich, cu un adaos de material, care determină o creștere semnificativă în greutate a acesteia [ZAH20c].

În acest studiu, au fost proiectate și fabricate pe muchie (în planul XZ), fără suport, prin procedeul de fabricație FFF, structuri sandwich ușoare, cu trei configurații de miez: fagure, pătrat și ondulat. Acest studiu a evaluat performanțele mecanice ale structurilor sandwich ușoare, prin efectuarea unor teste mecanice (compresiune, încovoiere în trei puncte și tracțiune). După determinarea caracteristicilor mecanice, aceste tipuri, de structuri sandwich ușoare, au fost implementate în structura bordului de atac a aripii de avion, cu scopul determinării fezabilității și a caracteristicilor la impact ale acestora. La final, s-a realizat un studiu comparativ, între valorile forțelor, apărute la ruperea specimenelor testate la încovoiere în trei puncte și valorile forțelor de reacțiune, apărute în structura suporților de fixare, din modelul MEF [ZAH20c].

## 4.3.2. Detalii experimentale

#### 4.3.2.1. Proiectarea structurilor sandwich

Ţinând cont de standardele (MIL-STD-401 și ASTM C393) actuale, aplicate structurilor sandwich ușoare, cu ajutorul sistemului software SolidWorks 2016, au fost proiectate specimenele specifice testelor la compresiune, tracțiune și încovoiere în trei puncte, analizate în acest studiu. Specimenele, testate la compresiune, au fost proiectate în conformitate cu reglementările actuale și prezintă următoarele caracteristici: lungime 50 mm, lățime 50 mm, înălțime 15 mm și o grosime a învelișului de 0,75 mm. Pentru testele la tracțiune și la încovoiere în trei puncte, specimenele prezintă următoarele dimensiuni: lungime 150 mm, lățime 20 mm, înălțime 15 mm și grosimea învelișului 0,75 mm. Configurațiile de miez, care au fost utilizate la specimenele testate, au prezentat următoarele dimensiuni: fagure (figura 4.17.a), pătrat (figura 4.17.b), ondulat (figura 4.17.c). Specimenele, specifice testelor la tracțiune, au prezentat o configurație clasică, cu rază de racordare și o zona de prindere a acestora pe mașina de testare (Fig.1.d).



Fig. 4.17. Caracteristicile specimenelor (dimensiuni în mm): a) miezul fagure; b) miezul pătrat; c) miezul ondulat; d) dimensiunile specimenelor testate la tracțiune [ZAH20c]

Specimenele structurilor sandwich ușoare, cu cele trei tipuri de miezuri (fagure, pătrat și ondulat), specifice testelor mecanice, proiectate în sistemul software SolidWorks 2016, au fost prezentate în tabelul 4.10.

Test	Specimen testat la	Specimen testat la tracțiune	Specimen testat la încovoiere
Miez	compresiune		în trei puncte
Fagure		100000000000000000000000000000000000000	17575757575757575757575
Pătrat		(ALL ALL ALL ALL ALL ALL ALL ALL ALL ALL	
Ondulat		NANA AA	AAAAAAAA

Tabelul 4.10. Specimenele supuse testelor mecanice [ZAH2Oc]

4.3.2.2. Proiectarea specimenelor de bord de atac utilizând cele trei configurații de miez

În aviație, structurile sandwich se folosesc în componența aripilor, la bordul de atac al acestora. Structurile sandwich urmăresc conturul profilului aerodinamic al aripii, cu scopul de a rigidiza aripa. Modelarea, bordului de atac al aripii, a fost realizată în sistemul software SolidWorks 2016, pornind de la introducerea coordonatelor profilului aerodinamic NACA 0018 (tabelul 4.11).

	Miez fagure	Miez pătrat	Miez ondulat
Bordul de atac al aripii			



Structurile, de bord de atac al aripii, prezintă aceleași dimensiuni, dar cu trei configurații de miez diferite: fagure, pătrat și ondulat. Grosimea învelișurilor a fost de 1,5 mm, iar distanța

dintre cele două învelișuri, unde a fost introdusă structura sandwich, a fost de 10 mm. Dimensiunile configurațiilor de miez, ale acestor specimene de bord de atac, au prezentat aceleași dimensiuni ca și cele din figura 4.17.a,b,c.

## 4.3.2.3. Stabilirea parametrilor de fabricație a procedeului de extrudare termoplastică

Specimenele au fost fabricate, utilizând imprimanta BCN3D Sigma, din materialul PLA (Acid Polilactic)/PHA (polihidroxialcanoat), acest tip de filament fiind complet biodegradabil. Amestecul PLA/PHA este relativ ieftin și prezintă o duritate mai mare, în comparație cu materialul PLA. Proprietățile mecanice și termice ale filamentului PLA/PHA, furnizate de producător - FKuR Kunststoff GmbH, au fost prezentate în tabelul 4.12 [ZAH2Oc].

Tabelul 4.12. Proprietățile mecanice	și termice ale filamentului utilizat la	a printarea 3D [www03]
--------------------------------------	---	------------------------

Proprietățile mecanice și termice - PLA/PHA	Valoare	Standard
Rezistența la tracțiune [MPa]	61,50	ISO 527-1:2019
Modulul de elasticitate la tracțiune [GPa]	2,96	ISO 527-1:2019
Rezistența la încovoiere [MPa]	88,80	ISO 178:2019
Modulul de elasticitate la încovoiere [GPa]	3,29	ISO 178:2019
Rezistența la impact [kJ/m²]	30,80	ISO 179-1:2010
Densitate [g/cm³]	1,24	ISO 1183:2019
Temperatura de topire [ºC]	>155	ISO 3146-C:2000

BCN3D Sigma este o imprimantă 3D de înaltă calitate, caracterizată de abordarea sa inovatoare, cu extrudare termoplastică duală, cu volum de fabricație de 210 mm x 297 mm x 210 mm. Parametrii de fabricație, ai procedeului de extrudare termoplastică, al specimenelor sandwich, au fost prezentați în tabelul 4.13.

Tabelul 4.13 Parametrii de fabricație ai procedeului de extrudare termoplastică a specimenelor [ZAH20c]

Parametrul de fabricație	Valoare
Diametru filament [mm]	2,85
Înălțimea stratului de fabricație [mm]	0,15
Gradul de umplere a stratului [%]	100
Viteza de fabricație [mm/sec]	50
Viteza de deplasare [mm/sec]	200
Temperatura de fabricație [°C]	200
Temperatura platformă de fabricație [°C]	60
Diametru duză de fabricație [mm]	0,4

În mod normal, o structură sandwich este formată din două învelișuri și un miez, materialul, din care este confecționat miezul, poate fi același sau diferit de cel al învelișurilor. În cazul structurilor sandiwch, realizate prin procedeul de extrudare termoplastică, materialul, utilizat pentru miez și învelișuri, a fost același (PLA/PHA), fabricarea realizându-se într-o singură etapă, așa cum s-a realizat în acest studiu de caz [ZAH2Oc]. O altă variantă de fabricație, a structurilor sandwich, ar utiliza materiale diferite, situație în care învelișurile vor fi ulterior lipite de miez. Sistemul software al imprimantei BCN3D Cura convertește modelul digital într-un set de instrucțiuni pentru imprimanta 3D și, cu ajutorul acestuia, au fost stabiliți parametrii de fabricație [ZAH2Oc].

Specimenele, supuse la compresiune (figura 4.18.a) și încovoiere în trei puncte (figura 4.18.b), nu au necesitat material suport pentru fabricație. În schimb, fabricarea specimenelor la tracțiune (figura 4.18.c) s-a realizat cu suport de material. Astfel, s-a ales utilizarea unui material suport solubil în apă – PVA, în scopul obținerii unor suprafețe cu o calitate superioară. Procedeul tehnologic de extrudare termoplastică, a bordului de atac al aripii (figura 4.18.d), a prezentat aceiași parametri de fabricație și același material (PLA/PHA), cu cei ai specimenelor sandwich, care au fost prezentați în tabelul 4.13 [ZAH20c].







Fig. 4.18. Procedeul de fabricație prin extrudare termoplastică; a) specimene testate la compresiune; b) specimene testate la încovoiere în trei puncte; c) specimene testate la tracțiune; d) specimene de bord de atac testate la impact [ZAH2Oc]

În procesul de fabricație al specimenelor, nu au apărut probleme, iar calitatea și precizia acestora este una ridicată, fără dezlipiri ale straturilor sau alte defecte.

#### 4.3.2.4. Condițiile de testare ale specimenelor sandwich

Testarea la compresiune, tracțiune și încovoiere în trei puncte, a specimenelor structurilor sandwich, s-a realizat pe mașina de testat WDW-150S. Pentru testarea structurilor sandwich, au fost fabricate, câte cinci specimene, pentru fiecare configurație a miezului structurii (fagure, pătrat, ondulat), în funcție de tipul de test la care va fi supus specimenul. Astfel, au fost fabricate câte 15 specimene pentru fiecare categorie de teste, care includ compresiune, încovoiere în trei puncte și tracțiune, în total 45 de specimene. Testele la compresiune, a structurilor sandwich (figura 4.19.a), fabricate prin procedeul de extrudare termoplastică, au avut ca scop principal determinarea caracteristicilor mecanice (rezistența la compresiune și modulul de elasticitate la compresiune), în conformitate cu standardul ASTM C365. Toate testele la compresiune au fost efectuate cu o viteză de încărcare de 5 mm/min [ZAH20c].

Încercările la încovoiere în trei puncte (figura 4.19.b) au fost efectuate conform standardului ASTM C 393, iar viteza de deplasare a poansonului a fost de 5 mm/min, până la apariția ruperii specimenelor. Pentru testele la încovoiere, au fost fabricate 15 specimene, câte cinci pentru fiecare tip de configurație a miezului structurii (fagure, pătrat și ondulat). Această metodă de testare se utilizează pentru a investiga performanțele mecanice ale structurilor ușoare sandwich (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere și aspecte legate de curba caracteristică încărcare - deplasare).

Testarea, la tracțiune a structurilor sandwich, se realizează în scopul determinării: rezistenței la tracțiune, a modulului de elasticitate la tracțiune și a caracteristicilor legate de curba încărcare - deplasare. Specimenele sunt solicitate în lungul axei lor principale (figura 4.19.c), cu o viteză constantă de 2 mm/min, până la rupere, în conformitate cu condițiile din standardul MIL-STD-401B. Pentru testele la tracțiune, au fost fabricate 15 specimene, câte cinci pentru fiecare tip de configurație a miezului structurii (fagure, pătrat și ondulat).

Pentru cele trei tipuri de configurații de miez, din structura bordurilor de atac, au fost realizate teste la impact, utilizând ciocanul Charpy (figura 4.19.d). Motivarea acestor teste provine din faptul că bordul de atac al aripii este predispus impactului cu diverse obiecte, atât în zbor, cât și la sol. Astfel, au fost testate 15 structuri de bord de atac, câte cinci pentru fiecare configurație de miez (fagure, pătrat, ondulat), având dimensiunile: lungime 70 mm, lățime 45,7 mm și înălțime 50 mm [ZAH20c].





Fig. 4.19. Testarea specimenelor sandwich la: a) compresiune; b) încovoiere în trei puncte; c) tracțiune; d) impact [ZAH20c]

## 4.3.3. Rezultate și discuții

## 4.3.3.1. Performanțele la compresiune ale specimenelor sandwich

Au fost realizate un număr de cinci teste, pentru fiecare configurație de miez studiat (fagure, pătrat și ondulat), iar rezultatele numerice au fost prezentate în figura 4.20 [ZAH20c].



Fig. 4.20. Rezultatele testelor la compresiune [ZAH20c]

Aceste rezultate (figura 4.20) reprezintă valorile medii ale rezistenței la compresiune și ale modulului de elasticitate la compresiune, provenite din cele cinci teste experimentale. Media, valorilor rezistenței la compresiune, variază între 1 MPa (miez ondulat) și 3 MPa (miez pătrat). De asemenea, media, valorilor modulului de elasticitate la compresiune, se încadrează în domeniul de valori 0,074 GPa (miez ondulat) și 0,140 GPa (miez pătrat). Din figura 4.20, se observă că structura cu miez pătrat a prezentat performanțele cele mai bune, în cadrul testelor la compresiune, având o rezistență la compresiune și un modul la compresiune mai ridicat, în comparație cu celelalte două tipuri de structuri (fagure și ondulat). Performanța, ridicată la încovoiere a specimenelor cu miez pătrat, se datorează rețelei dense de structuri, care au determinat, desigur, și o greutate mai mare a acestor specimene. Masa, celor trei tipuri de specimene sandwich, fabricate prin extrudare termoplastică, a prezentat următoarele valori: 12 g specimenele sandwich cu miez de fagure, 16 g specimenele sandwich cu miez pătrat, 9 g specimenele sandwich cu miez ondulat. În urma testelor la compresiune, s-a observat că învelișul superior (figura 4.21), unde poansonul apasă pe structura sandwich, s-a deformat. Deformațiile apar în miezul specimenelor, ceea ce indică faptul că aceste structuri sandwich s-au deteriorat local. Principalul mecanism de defectare, apărut la specimenele testate la compresiune, a fost forfecarea miezului structurii. În cazul structurilor sandwich, supuse testelor de compresiune, învelișul a prezentat o structură rigidă, prin urmare forfecarea miezului a reprezentat principalul mecanism de defectare [ZAH20c].



Fig. 4.21. Flambajul prin forfecare al miezului structurilor sandwich supuse testelor la compresiune: a) miez fagure; b) miez pătrat; c) miez ondulat [ZAH20c]

Imaginile optice, ale specimenelor sandwich, au fost realizate cu microscopul metalografic Nikon Eclipse MA 100. Specimenele, prezentate în figura 4.21, au fost analizate microscopic. Astfel, în figura 4.22.a și în figura 4.22.b, s-a depistat o dezlipire a straturilor de material extrudat, ceea ce a determinat flambajul prin forfecare al miezului. În figura 4.22.c, forfecarea miezului nu a determinat dezlipirea straturilor de material extrudat, deoarece miezul a prezentat o flexibilitate ridicată [ZAH20c].



Fig. 4.22. Imagini macroscopice ale specimenelor sandwich defecte supuse testelor la compresiune (mărire 25X): a) miez fagure; b) miez pătrat; c) cu miez ondulat [ZAH20c]

Curbele caracteristice încărcare - deplasare la compresiune (figura 4.23), pentru fiecare configurație de miez (fagure, pătrat și ondulat), au prezentat o tendință similară: răspunsul structurii este unul liniar, până la inițierea forfecării miezului, când are loc scăderea bruscă a încărcării. Se poate observa faptul că forța maximă, până în momentul în care a apărut deteriorarea ireversibilă, a materialului PLA/PHA al structurii sandwich, a fost de aproximativ 10 kN, la structurile cu miez pătrat. De asemenea, deplasarea, la care a avut loc deteriorarea ireversibilă, a fost de 1,3 mm la miezul pătrat [ZAH20c].



Fig. 4.23. Curbele încărcare – deplasare ale specimenelor sandwich testate la compresiune: a) miez fagure; b) miez pătrat; c) miez ondulat [ZAH20c]

Indicatorii statistici (media, abaterea standard și coeficientul de variație) au fost determinați, pentru structurile sandwich, cu diferite tipuri de miez (fagure, pătrat și ondulat), conform relațiilor statistice prevăzute în standardul ASTM C365, pentru fiecare serie de date (rezistența la compresiune și modulul de elasticitate la compresiune).

Valoarea coeficientul de variație prezintă o imagine clară a omogenității datelor experimentale. Coeficientul de variație, după cum se poate observa în tabelul 4.14, are valori cuprinse între 5,405% și 10,000%. Astfel, se poate afirma că media este reprezentativă pentru cele șase seturi de date experimentale [ZAH20c].

Indicator statistic	Media (m)	Abatere standard	Coeficientul de variație
Tipul de miez		(5)	(CV)%
Fagure – Rezistența la compresiune [MPa]	1,600	0,154	9,625
Pătrat – Rezistența la compresiune [MPa]	3,000	0,244	8,133
Ondulat – Rezistența la compresiune [MPa]	1,000	0,077	7,700
Fagure – Modulul de elasticitate la compresiune [GPa]	0,080	0,007	8,750
Pătrat – Modulul de elasticitate la compresiune [GPa]	0,140	0,014	10,000
Ondulat – Modulul de elasticitate la compresiune [GPa]	0,074	0,004	5,405

Tabelul 4.14. Indicatorii statistici, determinați din testarea la compresiune, ai specimenelor sandwich [ZAH20c]

## 4.3.3.2. Performanțele specimenelor sandwich supuse la încovoiere în trei puncte

Această metodă de testare se utilizează pentru a investiga performanțele mecanice (rezistența la încovoiere, modulul de elasticitate la încovoiere și analiza comportamentul rezultat din curba încărcare-deplasare) ale structurilor sandwich ușoare. Structurile sandwich cu miez pătrat au prezentat cele mai bune rezultate la testele la încovoiere în trei puncte. Specimenele sandwich cu miez ondulat au prezentat cea mai mică valoare medie a rezistenței la încovoiere, de aproximativ 5,4 MPa [ZAH20c]. Specimenele sandwich cu miez pătrat au prezentat o valoarea medie a rezistenței la încovoiere de două ori mai mare, în comparație cu rezistența la încovoiere a specimenelor sandwich cu miez fagure (figura 4.24).



Fig. 4.24. Rezultatele testelor la încovoiere în trei puncte [ZAH20c]

Testarea, la încovoiere în trei puncte, a structurilor sandwich, a permis determinarea următoarelor caracteristici: rezistența ultimă la forfecare a miezului ( $\tau_{csu}$ ) și rezistența la încovoiere a învelișului ( $\sigma_f$ ). Rezistența ultimă la forfecare a miezului (figura 4.25.a) și rezistența la încovoiere a învelișului (figura 4.25.b) au fost calculate cu relațiile (3.3) și (3.5), conform standardului ASTM C393. Masa, celor trei tipuri de configurații de miez, fabricate prin extrudare termoplastică, a fost: specimenele cu miez de fagure 14 g, specimenele miez pătrat 16 g, specimenele cu miez ondulat 9 g [ZAH20c].





În figura 4.26, au fost descrise principalele moduri de defectare ale structurilor sandwich, supuse testelor la încovoiere în trei puncte. Rezultatele, testelor la încovoiere în trei puncte, pentru specimenele sandwich cu miez fagure, au prezentat o încrețire a celor două învelișuri, supuse la eforturile de compresiune (învelișul superior) și de întindere (învelișul inferior).



Fig. 4.26. Modurile de defectare ale specimenelor sandwich, obținute din testele la încovoiere în trei puncte: a) miez fagure; b) miez pătrat; c) miez ondulat [ZAH20c]

Modul de defectare prin încrețirea învelișurilor (figura 4.26.a) este cunoscut sub denumirea de flambaj local al învelișului. Învelișurile, structurii sandwich cu miez pătrat, preiau aproape toate eforturile de compresiune și de întindere, în urma testelor la încovoiere în trei puncte. La specimenele cu miez pătrat, care au prezentat un înveliș subțire și un miez rezistent la eforturile de compresiune și de forfecare, defectarea, prin cedarea (ruperea) învelișului superior, reprezintă o prima etapă (figura 4.26.b). A doua etapă constă în inițierea fisurii

miezului, urmată apoi de propagarea fisurii prin miez, până la învelișul inferior. Structurile sandwich cu miez ondulat au indicat o dezlipire între înveliș și miez, în principal datorită suprafeței mici de contact dintre acestea (figura 4.26.c). Figura 4.27.a prezintă dezlipirea straturilor de material extrudat, care a determinat defectarea specimenului sandwich. Pentru specimenele sandwich cu miez pătrat (figura 4.27.b), în timpul testelor la încovoiere, a apărut ruperea completă a structurii. Figura 4.27.c prezintă dezlipirea învelișului superior, de miezul ondulat al structurii sandwich [ZAH20c].



Fig. 4.27. Imagini macroscopice ale specimenelor sandwich defecte supuse testelor la încovoiere în trei puncte (mărire 25X): a) miez fagure; b) miez pătrat; c) cu miez ondulat [ZAH20c]

Comportamentul, din punct de vedere al curbelor încărcare – deplasare, al celor 15 specimene, testate la încovoiere în trei puncte (figura 4.28), prezintă două etape principale: creșterea liniară, între forța aplicată și deplasare, cu un oarecare comportament neliniar, spre maximul curbei și apoi o scădere bruscă, la forță maximă, în momentul ruperii specimenelor [ZAH20c]. Curbele încărcare – deplasare au prezentat o alură similară, pentru cele trei tipuri de miez studiate (fagure, pătrat și ondulat). Analizând aceste curbe, se observă că forța maximă înregistrată a fost de aproximativ 0,428 kN, la o deplasare de 4,357 mm, a specimenelor sandwich cu miez pătrat. Performanțele ridicate, la încovoiere, ale specimenelor cu miez pătrat, se datorează rețelei dense de structuri pătrate, ceea ce a determinat și o masă mai mare a specimenelor fabricate prin extrudare termoplastică (12 g specimenele cu miez fagure, 16 g specimenele cu miez pătrat, 9 g specimenele cu miez ondulat).



Fig. 4.28. Curbele încărcare – deplasare ale specimenelor sandwich testate la încovoiere: a) miez fagure; b) miez pătrat; c) miez ondulat [ZAH20c]

Indicatorii statistici, pentru rezultatele obținute din testele la compresiune (rezistența la încovoiere și modulul de elasticitate la încovoiere), pentru specimenele sandwich cu configurații de miez diferite (fagure, pătrat și ondulat), au fost prezentați în tabelul 4.15. Astfel, datele experimentale obținute sunt omogene, iar media este reprezentativă, deoarece valoarea coeficientul de variație a fost mai mică de 30% [ZAH20c].

Indicator statistic Tipul de miez	Media (m)	Abatere standard (s)	Coeficientul de variație (CV)%
Fagure – Rezistența la încovoiere [MPa]	8,800	0,836	9,500
Pătrat – Rezistența la încovoiere [MPa]	16,200	0,908	5,604
Ondulat – Rezistența la încovoiere [MPa]	5,400	0,547	10,129
Fagure – Modulul de elasticitate la încovoiere [GPa]	0,500	0,035	7,000
Pătrat – Modulul de elasticitate la încovoiere [GPa]	1,000	0,079	7,900
Ondulat – Modulul de elasticitate la încovoiere [GPa]	0,300	0,035	11,666

Tabelul 4.15. Indicatorii statistici, determinați din testarea la încovoiere în trei puncte, ai specimenelor sandwich [ZAH20c]

## 4.3.3.3. Comportamentul la tracțiune al specimenelor sandwich

Structurile sandwich cu miez ondulat au prezentat cele mai bune rezultate la tracțiune. Performanțele ridicate, ale acestor tipuri de specimene, se datorează miezului elastic ondulat, care, la solicitarea de tracțiune, a fost complet aplatizat, astfel rezultând valori superioare ale rezistenței la tracțiune și ale modulului de elasticitate la tracțiune (figura 4.29).



Fig. 4.29. Rezultatele testelor la tracțiune [ZAH20c]

După cum se poate observa din figura 4.29, rezistența la tracțiune variază între 2,4 MPa (miez fagure) și 5,4 MPa (miez ondulat), iar modulul de elasticitate se situează în domeniul de valori 0,36 GPa (miez fagure) și 0,68 GPa (miez ondulat). Masa celor trei tipuri de specimene, fabricate prin extrudare termoplastică, a fost: specimene cu miez fagure 18 g, specimene cu miez pătrat 21 g, specimene cu miez ondulat 17 g. Toate specimenele sandwich, testate la tracțiune, s-au deteriorat prin cedarea învelișurilor, după care a urmat forfecarea miezului (figura 4.30). Cedarea specimenelor sandwich s-a produs la învelișul superior, fisura s-a propagat prin întregul miez și s-a oprit la nivelul inferior, unde a provocat o ruptură a învelișului inferior [ZAH20c].



Fig. 4.30. Modurile de defectare ale specimenelor sandwich, supuse testelor de tracțiune: cedarea învelișurilor și forfecarea miezului [ZAH20c]

După cum se poate observa în figurile 4.31.a și 4.31.b, specimenele au prezentat o rupere completă a întregii structuri sandwich, pornind de la învelișul superior, la miez și, în final, la învelișul inferior [ZAH20c].



a)



Fig. 4.31. Imagini macroscopice ale specimenelor sandwich deteriorate, supuse testelor la tracțiune (mărire 25X): a) miez fagure; b) miez pătrat [ZAH20c]

Curbele încărcare – deplasare, specifice fiecărui tip de miez fagure (figura 4.32.a), pătrat (figura 4.32.b) și ondulat (figura 4.32.c), au urmat aceeași alură, pentru toate seriile de structuri sandwich. Din reprezentările grafice ale curbelor încărcare – deplasare, se poate observa că forța maximă (0,874 kN), a fost atinsă de specimenele sandwich cu miez ondulat [ZAH20c].





Valorile coeficientului de variație (tabelul 4.16), pentru datele experimentale obținute (rezistența la tracțiune și modulul de elasticitate la tracțiune), sunt relativ scăzute. Coeficientul de variație maxim, pentru rezistența la tracțiune, a fost de 10,120%, iar modul de elasticitate la tracțiune, a fost de 8,611%. Astfel, se poate aprecia că datele experimentale sunt omogene și media este reprezentativă [ZAH20c].

Indicator statistic Tipul de miez	Media (m)	Abatere standard (s)	Coeficientul de variație (CV)%
Fagure – Rezistența la tracțiune [MPa]	2,400	0,200	8,333
Pătrat – Rezistența la tracțiune [MPa]	2,800	0,273	9,750
Ondulat – Rezistența la tracțiune [MPa]	5,400	0,547	10,120
Fagure – Modulul de elasticitate la tracțiune [GPa]	0,360	0,031	8,611
Pătrat – Modulul de elasticitate la tracțiune [GPa]	0,400	0,028	7,000
Ondulat – Modulul de elasticitate la tracțiune [GPa]	0,680	0,024	3,529

Tabelul 4.16. Indicatorii statistici, determinați din testele la tracțiune, ai specimenelor
sandwich [ZAH20c]

## 4.3.3.4. Analiza raportului specific rezistență-masă a specimenelor sandwich

Pentru o comparație mai eficientă a caracteristicilor mecanice ale structurilor sandwich, a fost utilizată o analiză a raportului specific rezistență-masă. Raportul dintre rezistență și masă a fost determinat pentru fiecare tip de test (compresiune, încovoiere în trei puncte și

tracțiune) și, de asemenea, pentru toate cele trei configurații de bază (fagure, pătrat și ondulat). Analizând din punct de vedere al raportului rezistență-masă (figura 4.33), au fost desprinse următoarele concluzii [ZAH20c]:

- Pe baza rezultatelor testelor de compresiune, structurile sandwich cu miez pătrat au prezentat cele mai bune performanțe;
- Pe baza testelor la încovoiere în trei puncte, structurile sandwich cu miez pătrat au prezentat cele mai bune performanțe, iar celelalte două configurații de miez (fagure și ondulat) au prezentat caracteristici apropiate;
- Pe baza testelor de tracțiune, structurile sandwich cu miez de fagure și structurile sandwich cu miez pătrat au prezentat performanțe apropiate, iar structurile sandwich cu miez ondulat au prezentat performanțele cele mai ridicate.



a) raportul rezistență-masă; b) rezistența medie [ZAH2Oc]

## 4.3.3.5. Proprietățile la impact ale specimenelor de bord de atac

Rezistența la impact, pentru cele 15 specimene, a fost determinată utilizând relația 3.7. În figura 4.34, au fost reprezentate grafic valorile rezistenței la impact, pentru cele trei tipuri de specimene de bord de atac. Se poate observa că valorile rezistenței la impact au fost cuprinse între 6,8 kJ/m<sup>2</sup> (miezul fagure) și 16 kJ/m<sup>2</sup> (miezul ondulat).

Specimenele cu miez ondulat au prezentat o rezistență la impact de aproximativ de două ori mai mare, în comparație cu celelalte două configurații de miez (fagure și pătrat), datorită structurilor longitudinale, de tip înveliș, care creează o rigiditate crescută [ZAH20c].

Specimenele de bord de atac, fabricate prin extrudare termoplastică, testate la impact, au prezentat o rupere completă. Ruperea a fost inițiată din zona de mijloc a specimenelor și s-a propagat în întreaga structură [ZAH20c].



Fig. 4.34. Rezultatele testelor la impact ale specimenelor de bord de atac [ZAH20c]

# 4.3.3.6. Analiza cu elemente finite a specimenelor sandwich supuse testării la încovoiere în trei puncte

În modelul din analiza cu elemente finite, dimensiunea specimenelor, proprietățile materialului, raza poansonului și a reazemelor, distanța dintre reazeme au fost stabilite în acord cu încercările la încovoiere în trei puncte. În acest studiu, au fost investigate forțele de reacțiune, care apar la testarea structurile sandwich, folosind sistemul software de analiză cu elemente finite ANSYS 19.1 [ZAH20c].

În analiza cu elemente finite, modelul elasto-plastic a fost utilizat pentru componentele structurii sandwich, atât pentru cele două învelișuri, cât și pentru miez (fagure, pătrat și ondulat). Discretizarea modelului a fost realizată cu elemente tridimensionale, de tip SOLID 45, cu 8 noduri și cu o dimensiune a elementului de discretizare de 0,2 mm (figura 4.35.a). Poansonul și cele două reazeme au fost discretizate, cu același tip de element SOLID 45 și cu o dimensiune a elementelor de discretizare de 2 mm (figura 4.35.a).

Pentru cele trei componente (un poanson și două reazăme), au fost atribuite proprietăți de corpuri rigide (care nu se deformează sub acțiunea forțelor), în cadrul analizei cu elemente finite. Deplasarea a fost aplicată pe mijlocul specimenului sandwich, având o valoare de 5 mm/min (figura 4.35.b), în aceleași condiții ca și în cazul testelor experimentale [ZAH2Oc]. S- a luat în considerare frecarea între poanson, reazeme și suprafața specimenului, iar coeficientul de frecare a fost de 0,1 [HOU16].

Analiza cu elemente finite a fost realizată urmărind următoarele două aspecte [ZAH20c]:

 studiu comparativ între comportamentul la defectare a specimenelor sandwich, testate la încovoiere în trei puncte și rezultatul obținut din analiza cu elemente finite a acelorași specimene;  studiu comparativ al forțelor maxime, apărute la ruperea specimenelor testate la încovoiere în trei puncte și forțele de reacțiune, apărute în structura reazemelor, din modelul cu elemente finite.

Astfel că, în urma investigării specimenelor supuse testelor experimentale și din analiza cu elemente finite, se poate afirma faptul că, ruperea apare, în cele două cazuri, la învelișul superior al structurii, unde tensiunea este maximă (figura 4.35.c). După examinarea specimenelor sandwich cu un miez pătrat, supuse testelor la încovoiere în trei puncte și a celor analizate cu elemente finite, se poate afirma că ruperea are loc, în ambele cazuri, la nivelul învelișului superior al structurii (figura 4.35.c). Tensiunea echivalentă Von Mises prezintă valoarea maximă (75,095 MPa), în zona de mijloc a învelișului superior. Astfel, se poate observa că învelișul superior al specimenelor sandwich, testate la încovoiere și modelul cu elemente finite, au prezentat același mod de defectare, și anume cedarea învelișului superior [ZAH20c].

Rezultatul studiului comparativ, dintre forțele maxime, apărute în cadrul testelor la încovoiere și forțele de reacțiune, apărute în reazemele modelului cu elemente finite (figura 4.35.d), prezintă o validare adecvată a datelor rezultate din testele la încovoiere ale specimenelor și din modelul cu elemente finite. Erorile apărute, între rezultate experimentale și cele simulate, prin metoda elementelor finite, se încadrează între 0,4%-3% [ZAH20c].



Fig. 4.35. Rezultatele analizei cu elemente finite: a) modelul MEF utilizat la încovoiere în trei puncte; b) deplasarea specimenului; c) distribuția tensiunilor echivalente Von Mises d) studiu comparativ al forțelor de reacțiune [ZAH20c]

## Concluzii și contribuții personale

Rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale, obținute după susținerea tezei de doctorat, permit evidențierea următoarelor concluzii.

În ceea ce privește cercetările referitoare la fiabilitatea experimentală a produselor industriale (Capitolul 1), se poate concluziona că:

- indicatorii de fiabilitate ai produselor se pot estima, fie pe baza urmăririi în timp, a funcționării produselor în diferite sisteme, în aceleaşi condiții de solicitare şi de mediu (fiabilitatea operațională), fie prin încercări de laborator (fiabilitatea experimentală);
- încercările de fiabilitate simulează condițiile din exploatare, a produselor industriale, atât prin simularea unor solicitări interne, cât şi ambientale, având drept scop determinarea principalilor indicatori de fiabilitate;
- problema esențială, a încercărilor de fiabilitate, o constituie durata de testare îndelungată, care este, în general, comparabilă cu însăşi durata de viață a produsului. Durata prea mare de testare poate face inutilă testarea. La anumite produse industriale, la care se estimează o durată mare de testare, se decide implementarea tehnicilor de testare accelerată;
- tehnicile de testare accelerată sunt realizate la niveluri de solicitare mai intense, în comparație cu nivelul normal de testare, cu scopul de a intensifica procesele de degradare ale produselor industriale;
- aceste tehnici, de testare accelerată, au ca rezultate principale: reducerea perioadei de testare și a costurilor aferente testării;
- tehnicile accelerate de testare sunt privite cu interes de către marile companii industriale, deoarece, prin utilizarea acestora, se pot determina, într-un timp scurt, indicatorii de fiabilitate;
- cercetările, privind extinderea tehnicilor de testare accelerată la produse industriale, care necesită un timp îndelungat de testare, sunt în plină ascensiune.

În urma realizării cercetărilor experimentale, privind fiabilitatea și testarea accelerată a produselor industriale (Capitolul 2), se pot evidenția următoarele contribuții personale:

a. În cadrul direcției de cercetare privind fiabilitatea și testarea accelerată a rulmenților radiali cu bile (Subcapitolul 2.1):

- implementarea tehnicilor de testare accelerată, asupra rulmenților radiali cu bile;
- prelucrarea statistică a datelor experimentale, utilizând modelul de accelerare IPL-Weibull;
- determinarea și reprezentarea grafică, a principalilor indicatori de fiabilitate, pe baza datelor experimentale, pentru regimul normal de testare, ai rulmenților radiali cu bile;
- prin utilizarea încercărilor accelerate de fiabilitate, asupra rulmenților radiali cu bile, au fost reduși timpii de testare de aproximativ de 140 ori, ceea ce determină reducerea cheltuielilor materiale aferente acestor tipuri de teste.

b. În cadrul direcției de cercetare privind metodologia de estimare a duratei de viață la oboseală și de validare a testelor accelerate de fiabilitate (Subcapitolul 2.2)

- introducerea tehnicilor de testare accelerată, asupra unui produs aeronautic, care prezintă durată de testare, fără a se defecta, până la milioane de cicluri;
- stabilirea algoritmului de prelucrare statistică a datelor, rezultate din testele accelerate;
- determinarea și reprezentarea grafică a indicatorilor de fiabilitate, pe baza datelor experimentale, pentru regimul normal de testare a bieletelor de pas;
- validarea obiectivului principal al acestui studiu, privind reducerea duratei de testare, utilizând testele accelerate, după cum urmează: pentru bieletele de pas, a rezultat o scădere a timpului de testare de aproximativ de 4,5 ori;
- utilizarea metodologiei de validare a rezultatelor, din testele experimentele accelerate și din testele, în condiții normale, a bieletelor de pas.

În urma realizării cercetărilor experimentale, privind testarea accelerată și fiabilitatea structurilor sandwich ușoare, fabricate din materiale compozite (capitolul 3), se pot identifica următoarele contribuții personale:

a. În cadrul direcției de cercetare privind evaluarea fiabilității și a duratei de viață a structurilor sandwich supuse testelor accelerate (Subcapitolul 3.1):

- realizarea testelor, la încovoiere în trei puncte, în regim static, ale specimenelor sandwich, fabricate cu înveliş din fibră de sticlă și miez din spumă, decupate din lonjeronului aripii planorului;
- determinarea performanțelor mecanice, ale specimenelor sandwich compozite, la încovoiere în trei puncte;
- determinarea și interpretarea indicatorilor statistici (media, abaterea standard și coeficientul de variație), rezultați din testele, la încovoiere în trei puncte, ale specimenelor sandwich cu înveliș din fibră de sticlă și miez din spumă;

- efectuarea analizelor macroscopice, cu privire la modul de defectare, a specimenelor sandwich testate, la încovoiere în trei puncte;
- implementarea tehnicile accelerate, în testarea structurilor sandwich compozite;
- prelucrarea statistică a datelor experimentale, rezultate din testele accelerate la oboseală, a structurilor sandwich compozite;
- determinarea și reprezentarea grafică, a indicatorilor de fiabilitate, pe baza datelor experimentale, pentru regimul normal de testare al specimenelor sandwich compozite;
- prin aplicarea metodologiei de testare accelerată, a fost determinat numărul mediu de cicluri până la defectare, a specimenelor sandwich compozite, în condiții normale de testare, având valoarea de 102814;
- validarea obiectivul principal al acestui studiu, privind reducerea duratei de testare, utilizând testele accelerate, după cum urmează: pentru specimenele sandwich, cu înveliş din fibră de sticlă și miez de spumă, a rezultat o reducere a timpului de testare de aproximativ de aproximativ 8,5 ori.

b. În cadrul direcției de cercetare privind performanțele structurilor sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez balsa, supuse testelor accelerate de fiabilitate (Subcapitolul 3.2):

- realizarea testelor la: încovoiere în trei puncte, la impact și la oboseală, ale specimenelor sandwich, fabricate cu înveliş din fibră de carbon și miez din lemn de balsa;
- determinarea performanțelor mecanice, ale specimenelor sandwich compozite, la testele la încovoiere în trei puncte și la impact;
- realizarea analizelor macroscopice, cu privire la modul de defectare, al specimenelor sandwich testate la: încovoiere în trei puncte în regim static, încovoiere în trei puncte în regim dinamic accelerat, impact;
- determinarea și interpretarea indicatorilor statistici (media, abaterea standard și coeficientul de variație), ai specimenelor sandwich, rezultați din testele la: încovoiere în trei puncte în regim static și impact;
- determinarea și reprezentarea grafică, a indicatorilor de fiabilitate, pe baza datelor experimentale, pentru regimul normal de testare, al specimenelor sandwich compozite;
- prin aplicarea tehnicilor de testare accelerată, a fost determinat numărul mediu de cicluri până la defectare, al specimenelor sandwich compozite, în condiții normale de testare, având valoarea de 352216;
- validarea obiectivul principal al acestui studiu, privind reducerea timpului de testare, utilizând testele accelerate, după cum urmează: pentru specimenele

sandwich cu înveliș din fibră de carbon și miez din lemn balsa, a rezultat o scădere a timpului de testare de aproximativ de 11,9 ori.

c. În cadrul direcției de cercetare privind evaluarea performanțelor mecanice și a indicatorilor de fiabilitate ai structurilor sandwich, cu înveliș din fibră de carbon și miez de fagure Nomex, supuse testelor accelerate (Subcapitolul 3.3):

- realizarea testelor la: încovoiere în trei puncte, la compresiune și la oboseală, ale specimenelor sandwich, fabricate din înveliş din fibră de carbon și miez de fagure Nomex;
- determinarea performanțelor mecanice, ale specimenelor sandwich compozite, la testele la încovoiere în trei puncte și de compresiune plană;
- determinarea și interpretarea indicatorilor statistici (media, abaterea standard și coeficientul de variație), ai specimenelor sandwich, rezultați din testele la: încovoiere în trei puncte în regim static și compresiune;
- determinarea și reprezentarea grafică, a indicatorilor de fiabilitate, pe baza datelor experimentale, pentru regimul normal de testare, al specimenelor sandwich compozite;
- prin aplicarea tehnicilor de testare accelerată, a fost determinat numărul mediu de cicluri până la defectare, al specimenelor sandwich compozite, în condiții normale de testare, având valoarea de 268682;
- validarea obiectivului principal al acestui studiu, privind reducerea timpului de testare, utilizând experimentele accelerate, după cum urmează: pentru specimenele sandwich, cu înveliş din fibră de carbon şi miez de fagure Nomex, a rezultat o reducere a duratei de testare de aproximativ de 13,9 ori.

d. În cadrul direcției de cercetare privind studiul comparativ asupra performanțelor mecanice și a indicatorilor de fiabilitate, ale structurilor sandwich, cu diferite tipuri de învelișuri din materiale compozite, cu matrice polimerică ranforsată, cu țesătură din fibră de sticlă și miez de fagure Nomex (Subcapitolul 3.4):

- realizarea testelor la: încovoiere în trei puncte, la compresiune, la impact, la oboseală, ale specimenelor sandwich, fabricate cu înveliş din fibră de sticlă și miez de fagure Nomex;
- determinarea performanțelor mecanice, ale specimenelor sandwich compozite, la testele de: încovoiere în trei puncte, compresiune, impact.
- realizarea unor analize macroscopice, cu privire la modul de defectare al specimenelor sandwich, testate la impact;

- determinarea și interpretarea indicatorilor statistici (media, abaterea standard și coeficientul de variație), ai specimenelor sandwich, rezultați din testele la: încovoiere în trei puncte în regim static, compresiune și impact;
- determinarea și reprezentarea grafică, a indicatorilor de fiabilitate, pe baza datelor experimentale, pentru regimul normal de testare al specimenelor sandwich compozite;
- prin aplicarea tehnicilor de testare accelerată, a fost determinat numărul mediu de cicluri până la defectare, al specimenelor sandwich compozite, în condiții normale de testare, având valoarea de 76408 (GF1-Nomex) și, respectiv, de 205598 (GF2-Nomex);
- validarea obiectivului principal al acestui studiu, privind reducerea timpului de testare, utilizând testele accelerate, după cum urmează: pentru specimenele sandwich, cu înveliş din fibră de sticlă și miez de fagure Nomex, a rezultat o scădere a timpului de testare de aproximativ de 6,35 ori (GF1-Nomex) și, respectiv, de aproximativ 7,9 ori (GF2-Nomex).

În urma realizării cercetărilor experimentale, privind fabricarea prin tehnologii aditive a structurilor sandwich ușoare (Capitolul 4), se pot evidenția următoarele contribuții personale:

a. În cadrul direcției de cercetare privind fabricarea prin topire selectivă cu laserul a miezului structurilor sandwich ușoare (Subcapitolul 4.1):

- testarea la compresiune plană și pe muchie, a structurilor celulare cu miez fagure, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul;
- determinarea caracteristicilor mecanice, la compresiune plană și pe muchie, ale structurilor fagure;
- determinarea microdurității Vickers, a specimenelor fagure, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, din oțel inoxidabil 316L;
- analiza statistică a datelor privind microduritatea specimenelor;
- realizarea analizelor microscopice privind modul de defectare al specimenelor cu miez fagure, testate la compresiune pe muchie;
- implementarea testelor accelerate la coroziune și determinarea duratei medii de viață, în condiții normale de testare.

b. În cadrul direcției de cercetare privind efectul tratamentului termic de omogenizare asupra proprietăților mecanice ale structurilor sandwich, fabricate prin topire selectivă cu laserul, din Inconel 718 (Subcapitolul 4.2):

- demonstrarea fezabilității fabricării structurilor sandwich, cu înveliș sau miez perforat, prin procedeul de topire selectivă cu laserul, din Inconel 718;
- analiza microscopică a specimenelor sandwich, în plan paralel cu direcția de fabricație și în plan perpendicular pe direcția de fabricație, realizate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, înainte și după aplicarea tratamentului termic de omogenizare;
- testarea și determinarea performanțelor la compresiune, a specimenelor sandwich, pentru cele două tipuri de configurații (înveliș perforat și miez perforat), înainte și după aplicarea tratamentului termic de omogenizare;
- determinarea microdurității Vickers, a specimenelor sandwich, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul, din Inconel 718;
- evidențierea influenței creșterii înălțimii de fabricație, asupra microdurității specimenelor sandwich, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul;
- determinarea indicatorilor statistici (media, abaterea standard și coeficientul de variație), aferenți testelor la compresiune, ai specimenelor sandwich;
- realizarea unor analize cu elemente finite ale structurilor sandwich, fabricate prin topire selectivă cu laserul, din Inconel 718, testate la compresiune.

c. În cadrul direcției de cercetare privind designul, analiza performanțelor și testarea structurilor sandwich, fabricate prin procedeul de extrudare termoplastică (Subcapitolul 4.3):

- demonstrarea fezabilității fabricării structurilor sandwich, cu diferite configurații de miez (fagure, pătrat și ondulat), prin procedeul de extrudare termoplastică, din materialul PLA-PHA;
- testarea și determinarea performanțelor specimenelor sandwich la: compresiune, încovoiere în trei puncte, tracțiune;
- demonstrarea fezabilității fabricării unor specimene de bord de atac, utilizând structurile sandwich, cu diferite configurații de miez (fagure, pătrat și ondulat);
- testarea la impact a specimenelor de bord de atac;
- analiza microscopică a modului de defectare a specimenelor sandwich, în urma testelor mecanice;
- determinarea indicatorilor statistici (media, abaterea standard și coeficientul de variație), aferenți testelor mecanice (compresiune, încovoiere în trei puncte, tracțiune, impact), ai specimenelor sandwich;
- analiza raportului specific rezistență-masă, al structurilor sandwich, fabricate prin procedeul de extrudare termoplastică;
- realizarea unor analize cu elemente finite, ale structurilor sandwich, fabricate prin extrudare termoplastică, din PLA-PHA, testate la încovoiere în trei puncte.

## B1.2. REALIZĂRI PROFESIONALE

## B.1.2.1. Studii și experiență profesională

Autorul tezei de abilitare a absolvit Facultatea de Inginerie Tehnologică, a Universității Transilvania din Brașov, programul de studii Construcții Aerospațiale, în anul 2006. În anul 2008, a absolvit programul de masterat Ingineria și Managementul Calității, din cadrul Facultății de Inginerie Tehnologică, a Universității Transilvania din Brașov. Activitatea didactică și științifică, a autorului tezei de abilitare, a început în octombrie 2006, după obținerea diplomei de inginer, când a fost admis la studiile de doctorat cu frecvență, la Catedra de Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Facultatea de Inginerie Tehnologică, Universitatea Transilvania din Brașov, în domeniul fundamental Științe Inginerești, domeniul Inginerie Industrială, sub îndrumarea științifică a d-lui prof. dr. ing. Ionel MARTINESCU. În martie 2010, și-a susținut teza de doctorat, cu titlul: *Cercetări teoretice și experimentale privind încercările accelerate de fiabilitate*, în domeniul Inginerie industrială. În perioada ianuarie – iunie 2008, a urmat cursul de pregătire a personalului didactic, obținând certificatul de absolvire.

O altă activitate importantă, desfășurată de autorul tezei de abilitare, a fost participarea, în calitate de cercetător postdoctoral, la proiectul POSDRU Burse postdoctorale pentru dezvoltare durabila POSDRU/89/1.5/S/59323, în perioada 2010 - 2013 cu tema: *Managementul încercărilor accelerate de fiabilitate,* în domeniul **Produse și procese inovative**, sub coordonarea d-lui prof. dr. ing. Ionel MARTINESCU.

În anul 2012, autorul tezei de abilitare a susținut concursul pentru ocuparea unui post de șef de lucrări, din cadrul departamentului de Ingineria fabricației, Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial, Universitatea Transilvania din Brașov. În data de 01.10. 2012, a fost numit, prin concurs, în funcția de șef de lucrări universitar.

În vederea îmbunătățirii activității profesionale, autorul prezentei teze de abilitare a participat la cursuri de specializare, în domeniul ingineriei fabricației, după cum urmează:

- Curs de specializare: Introduction to CREO, organizat de INAS SA, 2013;
- Curs de specializare: Introduction to Ansys Workbench, organizat de INAS SA, 2013;
- Curs de specializare Procedeul de topire selectivă cu laserul SLM GMBH, Lubeck, Germania 2018;
- Curs de specializare printare 3D Procedeul de extrudare termoplastică, 2018, pentru imprimantele 3D: Zortrax M200 Plus și BCN3D Sigma R19.

În ceea ce privește experiența de management, analiză și evaluare în învățământ, autorul prezentei teze de abilitare a avut responsabilități de conducere, după cum urmează:

• 2016 – prezent, membru în consiliul departamentului Ingineria fabricației;

- 2016 prezent, responsabil managementul calității, al programului de studii Construcții aerospațiale;
- Membru în comisia de îndrumare a doctorandului Buican George Răzvan, coordonator științific prof. dr. ing. OANCEA Gheorghe, domeniul de doctorat Inginerie industrială, teză de doctorat susținută în anul 2019.

## B.1.2.2. Activitatea didactică

Activitatea didactică s-a desfășurat în cadrul departamentul de Ingineria fabricației, unde a susținut cursuri și ore de aplicații (seminar, laborator sau proiect) la următoarele discipline:

- *Fiabilitate*, programul de studii de masterat Managementul calității, anul I.
- *Analiza fiabilității și securității sistemelor*, programul de studii de masterat Managementul calității, anul II.
- *Fiabilitate și securitatea sistemelor aeronautice*, programul de studii de licență Construcții Aerospațiale, anul III.
- *Metoda elementelor finite*, programele de studii de licență Ingineria și managementul calității și Tehnologia construcțiilor de mașini, anul III.
- *Managementul și resursele în proiectele de cercetare*, programul de studii de masterat Ingineria Fabricației Inovative, anul II.
- *Tehnologii performante de fabricație*, programul de studii de masterat Ingineria Fabricației Inovative, anul I.
- *Calculul și proiectarea structurilor aeronautice*, programul de studii de licență Construcții Aerospațiale, anul IV.

Disciplinele la care autorul tezei de abilitare este titular sunt acoperite în totalitate cu materiale didactice (cărți/manuale/îndrumare de laborator/cursuri în format electronic). Astfel, în perioada 2012 - prezent, au fost elaborate următoarele cărți de specialitate și materiale didactice:

- 2 cărți de specialitate (unic autor) publicate la editură internațională [ZAH19a, ZAH19c];
- 3 cărți de specialitate (2 prim autor) publicate la edituri naționale [ZAH12, ZAH18a, MOR18];
- 4 îndrumare de laborator/cărți de aplicații (la toate prim autor) publicate la edituri naționale [ZAH17a, ZAH17e; ZAH18c, ZAH20d].

O parte importantă a activității didactice, desfășurate de către autorul tezei de abilitare, o reprezintă coordonarea proiectelor de diplomă/disertație. În perioada 2012 - prezent, a

coordonat 88 de lucrări de diplomă/disertație, dintre acestea 15 lucrări de diplomă au fost realizate în colaborare cu companii industriale. În ultimii 2 ani, odată cu achiziția imprimantelor 3D, la departamentul de Ingineria fabricației, studenții coordonați de către autorul tezei de abilitare, au elaborat lucrări de diplomă/disertație cu aplicații practice, utilizând procedeul de extrudare termoplastică. Două dintre temele de diplomă propuse studenților, de către autorul tezei de abilitare, au fost selectate în cadrul concursului denumit Proiectul meu de diplomă desfășurat la nivelul Universității Transilvania din Brașov și finanțate cu suma de 10000 de lei.

Studenții, pe care i-a coordonat, au participat la sesiunile cercurilor științifice (aproximativ 50 de lucrări) și la concursuri studențești naționale, iar o parte dintre lucrările susținute au fost premiate. Astfel, se pot remarca următoarele rezultate:

- 2 lucrări, care au obținut premiul I, pe facultate, la sesiunile cercurilor științifice;
- 2 lucrări, care au obținut premiul I, la conferința AFCO Absolvenții în Fața Companiilor, secțiunea Inginerie mecanică, Inginerie tehnologică, Inginerie economică;
- 1 lucrare, care a obținut premiul I, la concursul intitulat Student Design Competition – SDC, desfășurat la Universitatea "Dunărea de Jos", din Galați, Facultatea de Inginerie, Centrul de Excelență Prelucrarea Polimerilor CE – PP. Universitatea Transilvania din Brașov a fost reprezentată, la acest concurs, de o echipă formată din doi studenți: Ionuț Stelian PASCARIU şi Marian AGAFIȚEI, din cadrul Facultății de Inginerie tehnologică și management industrial, de la programul de masterat Ingineria fabricației inovative. Cei doi studenți s-au remarcat prin competențe teoretice și practice deosebite, în direcția proiectării și fabricării, prin procedee aditive, a produselor industriale, reușind să proiecteze, să fabrice și să testeze în zbor, un avion radiocomandat (figura 5.1).



Fig. 5.1. Avion radiocomandat, fabricat prin extrudare termoplastică

Din anul 2019, coordonează Laboratorul didactic de Sisteme CAD/CAM și tehnologii aditive, din cadrul departamentului de Ingineria fabricației, care este dotat cu sisteme performante de fabricație (4 imprimante 3D) și tehnică IT performantă (17 stații grafice). În perioada 1-10 iulie 2018, a susținut cursuri la școala de vară *Aircraft: There's no flying without wings*, desfășurată în cadrul departamentului de Ingineria fabricației, la care au participat 27 de studenți din 11 țări. Autorul tezei de abilitare, a participat, în calitate de profesor invitat (CEEPUS), la Universitatea de Tehnologie din Bratislava-Trnava, Slovacia în anii 2017, 2018. În activitatea didactică, evaluarea cadrelor didactice de către studenți reprezintă o componentă importantă, deoarece studenții reprezintă principalii beneficiari ai procesului didactic. Astfel, autorul tezei de abilitare a obținut, la acest tip de evaluare, calificativul Foarte bine. De asemenea, în ultimii doi ani a fost desemnat, în cadrul programului Cel mai apreciat profesor, de către absolvenții programelor de studii, la care a susținut activități didactice.

Autorul tezei de abilitare a câștigat următorele proiecte de mobilitate:

1. Curs de specializare pentru învățarea și înțelegerea tehnologiei inovative de topire selectivă cu laserul (SLM) utilizând echipamentul SLM 250HL, proiect de mobilitate pentru cercetători, cod proiect: PN-III-P1-1.1-MC-2017-0418, Agenția de finanțare: UEFISCDI, valoarea proiectului: 17094 lei, perioada 26.10.2017-11.02.2018. În cadrul proiectul, au fost desfășurate cercetări experimentale, utilizând echipamentul SLM 280, cu privire la pregătirea fabricației pieselor, analiza materialelor și fabricarea unor structuri sandwich, prin procedeul de topire selectivă cu laserul. Utilizând rezultatele obținute, în cadrul proiectului de mobilitate, a fost elaborat un articol publicat [ZAH 20b], într-un jurnal situat în cuartila Q1 (zona roșie).

**2. Proiect de mobilitate pentru cercetători,** cod proiect: PN-III-P1-1.1-MC-2020-0029, Agenția de finanțare: UEFISCDI, valoarea proiectului: 6781 lei, perioada 19.06.2020-10.12.2020.

## B.1.2.3. Activitatea de cercetare științifică

Pe lângă activitatea didactică, desfășurată în cadrul departamentului de Ingineria fabricației, cercetarea științifică a reprezentat o componentă importantă a activității sale, care a debutat cu perioada în care a fost admis la doctorat cu frecvență (2006).

Elaborarea proiectelor de cercetare, depuse în competiții naționale și internaționale, a reprezentat o direcție de interes major a autorului. Astfel, următoarele proiecte de cercetare, depuse în competiții naționale și internaționale, au fost câștigate, în calitate de **director**, de către autorul tezei de abilitare:

**1. Cercetări teoretice si experimentale privind încercările de fiabilitat**e, Agenția de finanțare: UEFISCDI, Tip proiect: RU – TD (Tineri Doctoranzi), nr. înregistrare UEFISCDI 142/1.10.2007, valoarea proiectului: 33142 lei, durata proiectului: 2007–2009, pagina web: <u>https://uefiscdi.gov.ro/userfiles/file/TD2007\_DOCUMENTE\_COMUNE/PROIECTE%20FINALI</u> <u>ZATE%20-%20actualizare%20mai%202011.pdf</u>. 2. Behaviour and lifetime prediction of materials for renewable energy systems under accelerated reliability and durability testing, Agenția de finanțare: European Comission – Seventh Framework Programme (FP7), Tip proiect: Solar Facilities for the European Research Area – SFERA, No. 228296, nr. de înregistrare: P12030800040257, valoarea proiectului: 12832,29 euro, perioada: 2012, centrul de cercetare ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) – Italia, pagina web: <u>http://sfera.sollab.eu/index.php?page=access\_selected</u>. Proiectul a vizat determinarea duratei de viață și a comportamentului la solicitările ambientale (temperatura, umiditate și ceață salină) ale unor specimene din colectoare cu jgheaburi parabolice, supuse testelor accelerate la coroziune, iar rezultatele au fost publicate la conferința internațională ICMERA [ZAH14].

3. Model experimental de avion fără pilot din materiale compozite fabricate prin tehnologii aditive, Agenția de finanțare: UEFISCDI, Tip proiect: PED (PROIECT EXPERIMENTAL DEMONSTRATIV), nr. contract: 413PED din 01/11/2020 (PN-III-P2-2.1-PED-2019-0739), , Etapa I – 2020 (a fost finanțată și finalizată); valoarea etapei I -18928 euro (curs 4,8643 lei = 1 Euro din 02.11.2020), durata proiectului: 2020–2022, valoarea proiectului: 600000 lei, pagina web: https://uefiscdi.gov.ro/resource-821165 d2\_rezerva.pdf?&wtok=&wtkps=XY5RbsIwEETv4m8IWRvHYfPTE1RInMCyHbo0kGAHQotyd 2wLqYWvnd2dNxqNCu8BBbJAIjUBJSDbV1zdpB0Dpt91VZ0PhrynrtUTbWD97Q/0pX6Whg9T C8uqt+PJJzSSICZHJtVTflys0fFzz+/j/yV6CWsoN8085wbGhnQSiqcwhcza4bTdrYQqec3rUtY5N KJ/IwUHkAJAgMgVZKY+3xgokb0aY7XJJSGi0vb20rmi9/vi4loKxIJxJTcV209k+o418wM=&wchk =d43d9997541250b4dac0a36daa1bc92bd446b23c

Autorul tezei de abilitare a fost membru în următoarele proiecte de cercetare:

1. Researches about the corrosion resistance of different materials used for building sustainable energy systems, Director de proiect: Lancea Camil; Agenția de finanțare: European Comission – Seventh Framework Programme (FP7), Tip proiect: Solar Facilities for the European Research Area – SFERA, No. 228296, nr. de înregistrare: P13042500040296, valoarea proiectului: 12002,69 euro, perioada: 2013, centrul de cercetare ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) – Italia, pagina web: <u>http://sfera.sollab.eu/index.php?page=access\_selected</u>. Proiectul a vizat determinarea duratei de viață și a comportamentului la solicitările ambientale (temperatura, umiditate și ceață salină) ale unor specimene, fabricate prin topire selectivă cu laserul, supuse testelor accelerate la coroziune. În urma finalizării proiectului, au fost publicate 2 articole în jurnale ISI [LAN18, ZAH17d] și 1 articol la conferință ISI [LAN16].

**2. Concentrated Solar Energy for Heat Treatment of Selective Laser Melted Ti6Al4V**, Director de proiect: Chicoș Lucia-Antoneta; Agenția de finanțare: European Comission – Seventh Framework Programme (FP7), Tip proiect: Solar Facilities for the European Research Area –

SFERA, No. 312643, nr. de înregistrare: P1702060268, valoarea proiectului: 5679,99 euro, perioada: 2017, centrul de cercetare CIEMAT-PSA (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas - The Plataforma Solar de Almería), pagina web: <u>https://sfera2.sollab.eu/access/access\_selected.html</u>. Proiectul a studiat influența tratamentul termic, utilizând energie solară concentrată, asupra caracteristicilor structurale și mecanice ale specimenelor, din aliaj de Ti6Al4V, fabricate prin procedeul de topire selectivă cu laserul. În urma finalizării proiectului, a fost publicat 1 articol [CHI 18] în jurnal indexat ISI, situat în cuartila Q1 (zona roșie).

Cele mai importante rezultate științifice, obținute în cadrul stagiului de pregătire postdoctorală (2010 - 2013) au fost: 3 lucrări publicate în jurnale ISI [MOR13, ZAH16, ZAH19b]; 4 lucrări științifice de tip ISI Proceedings [ZAH11a, ZAH11b, ZAH11c, ZAH 11d]; 1 proiect de cercetare științifică, câștigat în competiție internațională; 1 brevet de invenție [ZAH20e]; 1 carte [ZAH 12a].

Proiectele de cercetare, coordonate, de către autorul tezei de abilitare, au fost încheiate și valorificate, toate obligațiile contractuale fiind îndeplinite fără probleme. Un rezultat important, în activitatea de cercetare, obținut de autorul tezei de abilitare, a fost obținerea unui **brevet de invenție Nr. 129022 B1**, cu titlul: Stand de testare a rezistenței la oboseală a palelor și metodă de testare, care a fost publicat în buletinul BOPI nr.6/2020, autori: Zaharia Sebastian Marian și Stamate Valentin Marian. Standul (figura 5.2) permite testarea palelor de elicopter sau a palelor turbinelor eoliene, într-un mediu cât mai apropiat de condițiile reale de funcționare. Standul de testare cuprinde cilindri pneumatici și cleme ghidate prin tije, care pot primi comenzi programabile, având ca rezultat solicitarea palei în plan orizontal (mișcarea de bătaie), în plan vertical (mișcarea de baleiaj) și de rotație. Acest stand permite solicitarea palelor în regim accelerat și determinarea indicatorilor de fiabilitate, pentru regimul normal de testare.



Figura 5.2. Stand de testare a rezistenței la oboseală a palelor și metodă de testare

Acest proiect a fost acceptat la finanțare, urmând ca brevetul de invenție să fie protejat pe o perioadă de 10 ani. Relevanța și impactul cercetărilor, realizate de autorul tezei de abilitare, pot fi apreciate prin calitatea și cantitatea articolelor, publicate în jurnale de specialitate și la conferințe internaționale.

Cele mai importante rezultate științifice, obținute de autorul tezei de abilitare, se pot cuantifica astfel:

- 19 articole publicate în reviste cotate ISI/Clarivate Analytics (11 articole în calitate de prim autor);
- din totalul articolelor publicate în jurnale ISI/Clarivate Analytics, 8 sunt situate în zona galbenă sau roșie: 4 articole în zona galbenă (2 ca prim autor), 4 articole în zona roșie (2 ca prim autor);
- 8 articole publicate la conferințe internaționale indexate ISI/Clarivate Analytics (6 prim autor);
- 25 de articole publicate în jurnale/conferințe, indexate în baze de date internaționale (21 ca prim autor);
- 22 de articole publicate în jurnale/conferințe neindexate în baze de date internaționale (20 ca prim autor);
- 1 brevet de invenție;
- 5 proiecte de cercetare (3 în calitate de director de proiect).

De asemenea, activez, în calitate de membru, în asociații profesionale și științifice, internaționale și naționale, precum:

- Society of Reliability Engineers (SRE);
- The Polish Safety and Reliability Association (PSRA);
- International Association of Engineers (IAENG);
- Association of Computer Science and Information Technology (IACSIT);
- Universal Association of Mechanical and Aeronautical Engineers (UAMAE);
- Asociația Universitară de Ingineria Fabricației (AUIF);
- Asociația Română de Mecanica Ruperii (ARMR);
- Asociația Română de Tribologie (ART).

O direcție importantă, în activitatea de cercetare, este reprezentată de implicarea studenților masteranzi în activitatea de cercetare științifică. Astfel, studenții masteranzi au fost implicați în anumite teme de cercetare, iar rezultatele obținute au fost publicate în jurnale indexate ISI [ZAH20c - jurnal situat în quartila Q1 – zona roșie; PAS20 – jurnal situat în quartila Q2 - zona galbenă].

Autorul tezei de abilitare a participat, în calitate de:

- recenzor la jurnale indexate ISI:
  - Reliability Engineering & System Safety;
  - Additive Manufacturing;
  - Solar Energy;
  - Journal Tehnički vjesnik Technical Gazette (TV-TG);
  - Latin American Journal of Solids and Structures;

- Acta Polytechnica Hungarica;
- Metals;
- Materials;
- Coatings;
- Applied Sciences;
- Materials Research Ibero-american Journal of Materials.
- membru în colectivele de organizare ale unor manifestări științifice:
  - The 3rd China-Romania Science and Technology Seminar CRSTS 2018, <u>http://old.unitbv.ro/crsts2018/Committees.aspx;</u>
  - International Conference Computing and Solutions in Manufacturing Engineering – CoSME '16, November 3÷4, Braşov, Romania, 2016, <u>http://old.unitbv.ro/cosme16/en/scope.html;</u>
  - 13th International Conference Standardization, protypes and quality: a means of balkan countries' collaboration, 2016, <u>https://itmi.unitbv.ro/%C8%99tiri-%C8%99i-evenimente/119-13th-international-conference-standardization,-protypes-and-quality-a-means-of-balkan-countries%E2%80%99-collaboration.html
    </u>
  - International Conference Computing and Solutions in Manufacturing Engineering – CoSME '12, September 16÷18, Braşov, Romania, 2012, <u>http://www.unitbv.ro/cosme12/en/index.html;</u>
  - International Conference Computing and Solutions in Manufacturing Engineering – CoSME '08, September 25÷27, Braşov, Romania, 2008, <u>http://www.cosme.ro/fisiere/lstoric/CoSME\_papers\_program08\_final.pdf</u>

Capacitatea de lucru în echipă, capacitatea de a coordona proiecte de cercetare, naționale și internaționale, colaborarea profesională și științifică, cu membrii departamentului, sunt atuurile care reies din activitățile de cercetare științifică, desfășurate de autorul tezei de abilitare. Activitatea de cercetare științifică internațională, a autorului tezei de abilitare, s-a concretizat prin colaborări cu cercetători din Italia, de la institutul de cercetare ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) și din Spania, de la institutul de cercetare CIEMAT-PSA (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas - The Plataforma Solar de Almería).

Atât în activitatea didactică, cât și în activitatea de cercetare științifică, autorul tezei de abilitare a menținut o colaborare benefică, cu companii din domeniile testării și fabricării produselor industriale, precum: Institutul de Cercetare - Proiectare Rulmenți și Organe de Asamblare - ICPROA-S.A. Brașov; SC IAR SA BRAȘOV; CONSARO ENGINEERING SRL; Aerostar SA Bacău, SC Electroprecizia Electrical Motors SRL Săcele; Schaeffler Romania.

## B2. PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE ALE CARIEREI

Planurile de evoluție și de dezvoltare ale carierei vizează trei direcții principale: activitatea didactică, activitatea de cercetare științifică și activitatea profesională.

## a. Planuri de dezvoltare ale activității didactice

În cadrul instituțiilor de învățământ superior, activitatea didactică reprezintă o sarcină importantă. Astfel, dezvoltarea activității didactice, a autorului tezei de abilitate, se va baza pe următoarele principii:

- aplicarea strategiilor de predare-învățare, centrate pe student, urmărind următoarele principii: implicarea activă și responsabilă a studentului în procesul de învățare; accent pe învățare profundă și înțelegere; conservarea unei relații de respect reciproc între student și profesor; responsabilitate profesională și personală, atât din partea studentului, cât și din partea profesorului; studentul devine un subiect activ în procesul didactic, și este considerat partener al cadrului didactic;
- dezvoltarea gândirii critice și a gândirii creative prin metode didactice de tip interactiv;
- oferirea unor oportunități de învățare şi formare adaptate continuu la schimbările rapide ale ştiinței, tehnicii şi pieței muncii, studenților;
- stimularea exersării deprinderilor de lucru în echipă a studenților, a capacității de exprimare liberă a opiniilor proprii, în vederea integrării cât mai facile pe piața muncii;
- eliminarea conceptului de învățare prin memorare și reproducere și înlocuirea acestuia cu învățare prin gândire critică și rezolvare de aplicații practice;
- actualizarea suporturilor de curs și a lucrărilor practice, precum și a prezentărilor pe suport electronic;
- integrarea tehnologiilor educaționale moderne în procesul didactic;
- intensificarea activității de coordonare a studenților la sesiunea cercurile științifice studențești, concursuri naționale și internaționale, conferințe;
- îmbunătățirea continuă a activității de coordonare a proiectelor de diplomă/disertație, prin stabilirea unor teme cu aplicații practice, care să răspundă așteptărilor mediului economic, în strânsă legătură cu activitățile de cercetare desfășurate de autorul tezei de abilitate;
- intensificarea relațiilor cu mediul economic, facilitând desfășurarea unor stagii de practică adresate studenților;
- îmbinarea activităților didactice cu activitățile de cercetare științifică, cu scopul de atragere a studenților către activități practice de cercetare, care să determine creșterea capacității de integrare a acestora pe piața muncii.

## b. Planuri de dezvoltare ale activității de cercetare științifică

Activitatea educațională, din universități, nu trebuie separată de activitatea de cercetare științifică, astfel că personalul didactic trebuie să posede capacitatea de a ține pasul cu tehnologiile moderne.

În acest sens, direcțiile principale de dezvoltarea ale activității de cercetare științifică, în scopul de a crește relevanța și impactul cercetărilor autorului tezei de abilitare, sunt următoarele:

- creșterea impactului și a vizibilității rezultatelor, prin publicarea cercetărilor în jurnale indexate ISI, situate în zonele Q1 și Q2;
- participarea la conferințe, desfășurate în țară sau în străinătate, în domeniul fabricației;
- publicarea rezultatelor cercetărilor în jurnale ale asociațiilor de fiabilitate și ingineria fabricației, din țară și străinătate;
- participarea, în calitate de coordonator sau de membru, în proiecte de cercetare naționale, internaționale și cu terți;
- depunerea unor proiecte de cercetare, la competițiile naționale și internaționale, în scopul atragerii de fonduri, pentru îmbunătățirea infrastructurii de cercetare a departamentului;
- intensificarea implicării studenților masteranzi în activitățile de cercetare științifică;
- atragerea masteranzilor și a doctoranzilor în activitatea de cercetare a autorului tezei de abilitare și implicarea acestora în proiecte de cercetare științifice sau în proiecte cu parteneri industriali;
- dezvoltarea unui laborator de cercetare, destinat fabricării, prin tehnologii aditive, a produselor industriale;
- consolidarea legăturilor cu partenerii industriali și stabilirea unor direcții de cercetare comune;
- protejarea ideilor cu potențial creativ, prin depunerea unor brevete de invenție;
- consolidarea legăturilor cu membrii centrelor de cercetare din străinătate (ENEA Italia și CIEMAT-PSA Spania) și elaborarea unor proiecte de cercetare împreună cu aceștia;
- continuarea colaborărilor cu alte departamente din cadrul Institutului de Cercetare
   Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov;
- publicarea unor cărți de specialitate, care să prezinte cercetările obținute în cadrul proiectelor de cercetare.
Direcțiile de cercetare, avute în vedere, sunt în concordanță cu expertiza autorului tezei de abilitare și pot reprezenta o bază pentru temele viitorilor doctoranzi:

1. extinderea studiilor, privind testele accelerate, la alte produse industriale, care prezintă durate îndelungate de încercare;

2. influența variației parametrilor de fabricație asupra performanțelor structurilor sandwich, fabricate prin procedeul de extrudare termoplastică, din materiale compozite (fibră de sticlă și fibră de carbon);

3. extinderea cercetărilor, privind încercările accelerate, la produse industriale, fabricate prin tehnologii aditive de fabricație;

4. fabricarea prin tehnologii aditive și testarea unor produse industriale funcționale;

5. fabricarea utilizând tehnologia de printare 4D și testarea unor structuri celulare.

## c. Planuri de evoluție și dezvoltare ale carierei profesionale

Continuarea activității de cercetare științifică și a activității didactice constituie axa prioritară în dezvoltarea viitoarei cariere profesionale. Cadrul, în care se va desfășura activitatea profesională, a autorului tezei de abilitare, se va baza, în continuare, pe un set de valori importante, care se regăsesc la nivelul departamentului de Ingineria fabricației: responsabilitate, comunicare, integritate, transparență și colaborare. Autorul tezei de abilitare apreciază că planul personal de dezvoltare, al carierei didactice și științifice, este în acord cu planul de dezvoltare al departamentului de Ingineria fabricației, din care face parte.

În ceea ce privește activitatea profesională, autorul tezei de abilitare va continua procesul permanent de formare și de dezvoltare personală, prin cursuri de instruire, care să mențină contactul cu noutățile tehnice și cu problemele științifice actuale.

Își exprimă convingerea, că obiectivele didactice, științifice și cele profesionale, propuse în planul de evoluție și de dezvoltare al carierei autorului tezei de abilitare, vor contribui la dezvoltarea departamentului și, implicit, la creșterea vizibilității domeniului de doctorat **Inginerie industrială**, din cadrul Universității Transilvania din Braşov.

Desigur, pentru îndeplinirea acestor planuri de evoluție și dezvoltare ale carierei, autorul tezei de abilitare, se bazează pe colaborarea cu membrii departamentului de Ingineria fabricației și pe sprijinul nemijlocit al Universității Transilvania din Braşov.

## **B3. BIBLIOGRAFIE**

- [AHM16] Ahmadi, A., Mirzaeifar, R., Moghaddam, N.S., Turabi, A.S., Karaca, H.E., Elahinia,
  M., (2016). Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of
  316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: A
  computational framework, Materials & Design, vol. 112, pag. 328–338
- [AST93] ASTM C393 *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure.*
- [ATA82] Atanasiu, C, ș.a., *Încercarea materialelor*, vol.1, Editura Tehnică, București, 1982.
- [BAC20] Baca Lopez, D.M.; Ahmad, R. *Tensile Mechanical Behaviour of Multi-Polymer Sandwich Structures via Fused Deposition Modelling*. Polymers 2020, 12, 651.
- [BOU14] Boukharouba, W., Bezazi, A., Scarpa, F., (2014). *Identification and prediction of cyclic fatigue behaviour in sandwich panels*, Measurement, vol. 53, pag. 161-170.
- [BRI18] Brischetto, S., Ferro, C.G., Torre, R., Maggiore, P., (2018). *3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores*, Curved Layer Structure, vol. 5, pag. 80–94.
- [CAT83] Cătuneanu, V.M., Mihalache, A., *Bazele teoretice ale fiabilității*, Editura Academiei, București, 1983.
- [CHE15] Cherry, J.A., Davies, H.M., Mehmood, S., Lavery, N.P., Brown, S.G.R., Sienz, J., (2015). *Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 76, pag. 869–879.
- [CHL15] Chlebus, E., Gruber, K., Ku, B., Kurzac, J., Kurzynowski, T., (2015). Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting, Materials Science and Engineering: A, vol. 639, pag. 647–655.
- [CHI18] Chicoş, L.A., Zaharia, S.M., Lancea, C., Pop, M.A., Canadas, I., Rodriguez, J., Galindo, J., (2018). Concentrated solar energy used for heat treatment of Ti6Al4V alloy manufactured by selective laser melting, Solar Energy, vol.173, pag. 76-88.
- [ELO18] Eloy, F.S., Gomes, G.F., Ancelotti, J.R.A.C., Cunha, J.R.S.S., Bombard, A.J.F., Junqueira, D.M., (2018). *Experimental dynamic analysis of composite sandwich beams with magnetorheological honeycomb core*, Engineering Structures, vol. 176, pag. 231–242.
- [FEN16] Feng, Q., Tang, Q., Liu, Z., Liu, Y., Setchi R., (2016). *An investigation of the mechanical properties of metallic lattice structures fabricated using selective*

*laser melting,* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 11, pag. 1719-1730.

- [GAF85] Gafițanu, M., ş.a., *Rulmenți, Proiectare și tehnologie*, vol. I și II, Editura Tehnică, București, 1985.
- [GAL18] Galatas, A., Hassanin, H., Zweiri, Y., Seneviratne, L., (2018), *Additive* manufactured sandwich composite/ABS parts for unmanned aerial vehicle applications, Polymers, vol. 10, 1262.
- [GI012] Giglio, M., Gilioli, A., Manes, A., (2012). *Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex*<sup>™</sup> *honeycomb core,* Computational Materials Science, vol. 56, pag. 69-78.
- [GRI16] Gribbin, S., Bicknell, J., Jorgensen, L., Tsukrov, I., Knezevic, M., (2016). Low cycle fatigue behavior of direct metal laser sintered Inconel alloy 718, International Journal of Fatigue, vol. 93, pag. 156–167.
- [GÜM13] Gümrük, R., Mines, R.A.W., Karadeniz, S., (2013). *Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions*. Materials Science and Engineering: A, vol. 586, pag. 392–406.
- [HOS19] Hosseini, E., Popovich, V.A., (2019). A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718, Additive Manufacturing, 2019, vol. 30, 100877.
- [HOU16] Hou, Z., Fan, L., Zhang, X., Zhai, S., Zhang, C., Li, C., Du, Y., Zhao, H., (2016). Failure mechanism of brass with three V-notches characterized by acoustic emission in in situ three-point bending tests. Advanced Engineering Materials, vol. 18, pag. 1–10.
- [HOU18] Hou, S., Li, T., Jia, Z., Wang, L., (2018). Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact. Materials & Design, vol. 160, pag. 1305–1321.
- [IAR04] *Manualul de mentenanță a elicopterului IAR 330*, 2004.
- [JOV14] Jover, N., Shafiq, B., Vaidya, U., (2014). *Ballistic impact analysis of Balsa core sandwich composites*, Composites Part B- Engineering, vol. 67, pag. 160-169.
- [JOW17] Jo, W., Yoon, B.J., Lee, H., Moon, M.W., (2017). 3D Printed Hierarchical Gyroid Structure with Embedded Photocatalyst TiO2 Nanoparticles. 3D Print. Additive Manufacturing, vol. 4, pag. 222–230.
- [KAR19] Karabulut, Y., Tascioglu, E., Kaynak, Y., (2019). *Heat treatment temperatureinduced microstructure, microhardness and wear resistance of Inconel 718 produced by selective laser melting additive manufacturing*, Optik, 163907.
- [KLY20] Klyatis, L,M., *Trends in Development of Accelerated Testing for Automotive and Aerospace Engineering*, Elsevier, Londra, 2020.
- [KON16] Konecna, R., Kunz, L., Nicoletto, G., Baca, A., (2016). *Long fatigue crack growth in Inconel 718 produced by selective laser melting,* International Journal of

Fatigue, vol. 92, pag. 499–506.

- [LAN16] Lancea, C., Chicoș, L.A., Zaharia, S.M., Pop, M.A., (2016). *Microstructure and micro hardness analyses of titanium alloy Ti-6Al-4V parts manufactured by Selective Laser Melting*, MATEC Web of Conferences Journal.
- [LAN18] Lancea, C., Chicoş, L.A., Zaharia, S.M., Pop, M.A., Semenescu, A., Florea, B., Chivu, O.R., (2018). Accelerated Corrosion Analysis of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Selective Laser Melting (SLM), Revista de Chimie, vol. 69, nr. 4, pag. 975-981.
- [LIJ14] Li, J.H., Hunt, J.F., Gong, S.Q., Cai, Z.Y., (2014). *High strength wood-based sandwich panels reinforced with fiberglass and foam.* BioResources vol. 9, nr. 2, pag. 1898-1913.
- [LIU15] Liu, L., Wang, H., Guan, Z., (2015). Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading, Composite Structures, vol. 121, pag. 304-314.
- [LUC18] Lu, C., Qi, M., Islam, S., Chen, P., Gao, S., Xu, Y., Yang, X., (2018). Mechanical performance of 3D-printing plastic honeycomb sandwich structure. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, vol 5, pag. 47–54.
- [LUK16] Luke, C., Dyre, A.F., (2016). *The effect of foam core density at various slenderness ratios on axial strength of sandwich panels with glass-FRP skins*, Composites Part B: Engineering, vol. 106, pag. 129–138.
- [LUO20] Luo, Z., Zhao, Y., (2020). *Efficient thermal finite element modeling of selective laser melting of Inconel 718*, Computational Mechanics, vol. 65, pag. 763–787.
- [MAR95] Martinescu, I., Popescu, I., *Fiabilitate*, Editura Gryphon, Brașov, 1995.
- [MAT14] Mathieson, H., Fam, A., (2014). *High cycle fatigue under reversed bending of sandwich panels with GFRP skins and polyurethane foam core*, Composite Structures, vol. 113, pag. 31-39.
- [MIL01] MIL-STD-401B *Military standard: sandwich constructions and core materials, general test methods.*
- [MIY06] Miyano, Y., Nakada, M., Nishigaki, K., (2006). Prediction of long-term fatigue life of quasi-isotropic CFRP laminates for aircraft use, International Journal of Fatigue, vol. 28, pag. 1217–1225.
- [MIY08] Miyano, Y., Nakada, M., Ichimura, J., Hayakawa, E., (2008). *Accelerated testing for long-term strength of innovative CFRP laminates for marine use*, Composites Part B: Engineering, vol. 39, pag. 5–12.
- [MOH16] Mohammed, M.I., Badwal, P.S., Gibson, I., (2016). Design and fabrication considerations for three dimensional scaffold structures, In Proceedings of the International Conference on Design and Technology, KEG, Geelong, Australia, 5–8 Decembrie, pag 120–126.
- [MOR13] Morariu C.O., Zaharia S.M., (2013). A New Method for Determining the

*Reliability Testing Period Using Weibull Distribution*, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 10, nr. 7, pag. 171-186.

- [MOR17] Morariu, C.O., *Cercetări privind fiabilitatea produselor industriale*, Teză de abilitare, Universitatea Transilvania din Brașov, 2017.
- [MOR18] Morariu, C.O., **Zaharia, S.M.,** *Fiabilitatea și testarea rulmenților*, Editura Printech, București, 2018.
- [NAK09] Nakada, M., Miyano, Y., (2009). Accelerated testing for long-term fatigue strength of various FRP laminates for marine use, Composites Science and Technology, vol. 69, pag. 805–813.
- [NEL 04] Nelson, W., *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*, Wiley, New Jersey, 2004.
- [PANO3] Panaite, V., Popescu, M.O., *Calitatea produselor și fiabilitate*, Editura Matrix Rom, București, 2003.
- [PAN18] Panda, B., Leite, M., Biswal, B.B., Niu, X., Garg, A., (2018). Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures, Measurement, vol. 116, pag. 495–506.
- [PAS20] Pascariu, I.S., Zaharia, S.M., (2020). Design and Testing of an Unmanned Aerial Vehicle Manufactured by Fused Deposition Modeling, Journal of Aerospace Engineering, vol. 33, nr.4, 06020002.
- [PIE18] Piekło, J., Małysza, M., Dańko, R., (2018). Modelling of the material destruction of vertically arranged honeycomb cellular structure. Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 18, pag. 1300–1308.
- [POL06] Pollock, T.M., Tin, S., (2006). Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties, Journal of Propulsion and Power, vol. 22, pag. 361–374.
- [POP15] Popovich, A.A., Sufiiarov, V.S., Polozov, I.A., Borisov, E.V., (2015) *Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment*, Key Engineering Materials, vol. 651, pag. 665–670.
- [POP17a] Popovich, V.A., Borisov, E.V., Popovich, A.A., Sufiiarov, V.S., Masaylo, D.V., Alzina, L., (2017). Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties, Materials & Design, vol. 114, pag. 441–449.
- [POP17b] Popovich, V.A., Borisov, E.V., Popovich, A.A., Sufiiarov, V.S., Masaylo, D.V., Alzina, L., (2017). Impact of heat treatment on mechanical behaviour of Inconel 718 processed with tailored microstructure by selective laser melting. Materials & Design, vol. 131, pag. 12–22.
- [RAG17] Raghavan, S., Zhang, B., Wang, P., Sun, C.N., Nai, M.L.S., Li, T., Wei, J., (2017). *Effect of different heat treatments on the microstructure and mechanical properties in selective laser melted INCONEL 718 alloy.* Materials and

Manufacturing Processes, vol. 32, pag. 1588–1595.

- [RAJ16] Rajaneesh, A., Satrio, W., Chai, G.B., Sridhar, I., (2016). Long-term life prediction of woven CFRP laminates under three point flexural fatigue, Composites Part B: Engineering, vol. 91, pag. 539–547.
- [RAJ18] Rajpal, R., Lijesh, K.P., Gangadharan, K.V., (2018). Parametric studies on bending stiffness and damping ratio of sandwich structures. Additive Manufacturing, vol. 22, pag. 583–591.
- [RA003] Rao, G.A., Kumar, M., Srinivas, M., Sarma, D.S., (2003). Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy inconel 718, Materials Science and Engineering: A, vol. 355, pag. 114–125.
- [REL07] *Reliasoft Accelerated Life Testing Reference* [Online book], 2007, disponibilă la adresa: http://www,weibull,com/acceltestwebcontents.htm.
- [ROU06] Rousseeuw, P.J., Leroy, A.M., *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*, Editura John Wiley & Sons, New York, 2006.
- [SAR18] Sarvestani, H.Y., Akbarzadeh, A., Mirbolghasemi, A., Hermenean, K., (2018). 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability, Materials & Design, vol. 160, pag. 179–193.
- [SHI18] Shi, H., Liu, W., Fang, H., Bai, Y., Hui, D., (2018). Flexural responses and pseudoductile performance of lattice-web reinforced GFRP-wood sandwich beams, Composites Part B: Engineering, vol. 108, 364-376.
- [SIN18] Singh, K., (2018). Experimental study to prevent the warping of 3D models in fused deposition modelling, International Journal of Plastics Technology, vol. 22, pag. 177–184.
- [SMI13] Smith, M., Guan, Z., Cantwell W. J., (2013). Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 67, pag. 28–41.
- [STE17] Stevens, E.L., Toman, J., To, A.C., Chmielus, M., (2017). *Variation of hardness, microstructure and laves phase distribution in direct laser deposited alloy 718 cuboids*, Materials & Design, vol. 119, pag. 188–198.
- [STR11] Strondl, A., Palm, M., Gnauk, J., Frommeyer, G., (2011). Microstructure and mechanical properties of nickel based superalloy IN718 produced by rapid prototyping with electron beam melting (EBM), Materials Science and Technology, vol. 27, pag. 876–883.
- [TIA18] Tian, C., Li, X., Liu, Z., Zhi, G., Guo, G., Wang, L., Rong, Y., (2018). Study on grindability of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting (SLM), Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, vol. 64, pag. 319– 328.

- [TOS14] Toson, B., Viot, P., Pesqué, J.J., (2014). *Finite element modeling of balsa wood structures under severe loading*, Engineering Structures, vol. 70, pag. 36-52.
- [TSO10] Tsopanos, S., Mines, R.A.W., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W. J., Brooks, W., Sutcliffe, C.J., (2010). *The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 132, pag. 041011:1–041011:12.
- [USH11] Ushijima, K., Cantwell, W.J., Mines, R.A.W., Tsopanos, S., Smith, M., (2011). *An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures*, Journal of Sandwich Structures and Materials, vol. 13, pag. 303–329.
- [WAN16a] Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., Qian, M., Brandt, M., Xie, Y.M., (2016). *Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review*, Biomaterials, vol. 83, pag. 127-141.
- [WAN16a] Wang, X., Keya, T., Chou, K., (2016). *Build Height Effect on the Inconel 718 Parts Fabricated by Selective Laser Melting*, Procedia Manufacturing, vol. 5, pag. 1006–1017.
- [WAN19] Wang, X., Chou, K., (2019). Microstructure simulations of Inconel 718 during selective laser melting using a phase field model, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 100, pag. 2147–2162.
- [www01] https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user\_upload/200EN180924-02-POWDER\_WEB.pdf
- [www02] https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user\_upload/MDS\_Ni-Alloy \_IN718\_2.4668\_0219.pdf.
- [www03] https://colorfabb.com/files/FKUR/TD\_BIO-FLEX\_V\_135001\_en.pdf
- [XIO15] Xiao, L., Song, W., Wang, C., Liu, H., Tang, H., Wang, J., (2015). *Mechanical behavior of open-cell rhombic dodecahedron Ti–6AI–4V lattice structure*, Materials Science and Engineering: A, vol. 640, pag. 375-384.
- [YAN07] Yang, G., *Life Cycle Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2007.
- [YAN12] Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Raymont D., (2012). Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 62, pag. 32-38.
- [YAN15] Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young P., (2015). *Ti–6AI–4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting*, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, vol. 51, pag. 61-73.
- [YAO17] Yao, X., Moon, S.K., Lee, B.Y., Bi, G., (2017). *Effects of heat treatment on microstructures and tensile properties of IN718/TiC nanocomposite fabricated*

*by selective laser melting*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing vol. 18, pag. 1693–1701.

- [ZAH11a] Zaharia, S.M., Martinescu, I., (2011). *Using accelerated tests in estimating the reliability indicators of machine tools*, Proceedings of the 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Inovation, Chişinău, ModTech 2011, pag. 1193-1196.
- [ZAH11b] Zaharia, S.M., Martinescu, I., (2011). Research on accuracy of different methods regarding estimating reliability indicators, Proceedings of the 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Inovation, Chişinău, ModTech 2011, pag. 1189-1192.
- [ZAH11c] Zaharia, S.M., Martinescu, I., Morariu, C.O., (2011), Optimization the reliability testing using product lifecycle and cost management, International Conference on Manufacturing Science and Education - MSE 2011, Sibiu-Romania, vol.1, pag. 373-376.
- [ZAH11d] Zaharia, S.M., Martinescu, I., Morariu, C.O., (2011). Analyzing Accelerated Life Testing With Censored Data, International Conference on Manufacturing Science and Education - MSE 2011- Sibiu-Romania, vol.1, pag. 377-380.
- [ZAH12] Zaharia, S.M., Martinescu, I., *Încercări de fiabilitate*, Editura Universității Transilvania, Brașov, 2012.
- [ZAH13a] Zaharia, S.M., Morariu C.O., (2013). *Reliability and lifetime estimation of ball bearings under accelerated reliability and durability testing*, Revista Metalurgia International, nr. 5, pag. 90-96.
- [ZAH14a] Zaharia, S.M., Lancea C., Chicoş, L.A., Caputo, G., (2014). Behaviour and Mean Life Prediction of Solar Mirrors from Parabolic Trough Collectors Under Accelerated Degradation/Reliability Testing, Applied Mechanics and Materials, vol. 656, pag. 442-449.
- [ZAH16] Zaharia, S.M., Martinescu, I., (2016). *Management of accelerated reliability testing*, Tehnicki Vjesnik Technical Gazette, vol. 23, nr. 5, pag. 1447–1455.
- [ZAH17a] Zaharia, S.M., Morariu, C.O., *Fiabilitatea Îndrumar de laborator*, Editura Risoprint, Cluj-Napoca, 2017.
- [ZAH17b] Zaharia, S.M., Morariu, C.O., Nedelcu, A., Pop, M.A., (2017). Experimental Study of Static and Fatigue Behavior of CFRP-Balsa Sandwiches under Three-point Flexural Loading, BioResources, vol. 12, nr. 2, pag. 2673 – 2689.
- [ZAH17c] Zaharia, S.M., Pop, M.A., Semenescu, A., Florea, B., Chivu, O.R., (2017). Mechanical Properties and Fatigue Performances on Sandwich Structures with CFRP Skin and Nomex Honeycomb Core, Materiale Plastice, vol. 54, nr. 1, pp. pag. 67-72.
- [ZAH17d] Zaharia, S.M., Lancea, C., Chicoș, L.A., Pop, M.A., Caputo, G., Serra, E., (2017)

*Mechanical properties and corrosion behaviour of 316L stainless steel honeycomb cellular cores manufactured by selective laser melting.* Transactions of FAMENA, vol. 41, nr. 4, pag. 11–24.

- [ZAH17e] Zaharia, S.M., Morariu C.O., Elemente de calculul probabilităților aplicate în analiza riscurilor industriale, Teorie și aplicații. Editura Risoprint, Cluj – Napoca, 2017.
- [ZAH18a] Zaharia, S.M., Martinescu, I., *Fiabilitatea și securitatea sistemelor industriale*, Editura Printech, București, 2018.
- [ZAH18b] Zaharia, S.M., Morariu, C.O., Pop, M.A. (2018). A comparative study about static and fatigue behaviour on sandwich structures with different types of glass fiber reinforced polymer skins and nomex honeycomb core. Revista Romana de Materiale-Romanian Journal of Materials, vol. 48, nr.1, pag. 91–100.
- [ZAH18c] Zaharia, S.M., *Analiza fiabilității și securității sistemelor Îndrumar de laborator*, Editura Risoprint, Cluj Napoca, 2018.
- [ZAH19a] Zaharia, S.M., *Reliability, maintenance and testing of aerospace systems*, Editura LAP Lambert Academic, Berlin, 2019.
- [ZAH19b] Zaharia, S.M., (2019). The methodology of fatigue lifetime prediction and validation based on accelerated reliability testing of the rotor pitch links, Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, vol. 21, nr. 4, pag. 638–644.
- [ZAH19c] Zaharia, S.M., *Reliability and Maintenance Engineering : Theory, simulation techniques and applications*, Editura LAP Lambert Academic, Berlin, 2019.
- [ZAH2Oa] Zaharia, S.M., Pop, M.A., Udroiu, R., (2020). *Reliability and Lifetime Assessment* of Glider Wing's Composite Spar through Accelerated Fatigue Life Testing, Materials, vol. 13, 2310.
- [ZAH20b] Zaharia, S.M., Chicoş, L.A., Lancea, C., Pop, M.A., (2020). Effects of Homogenization Heat Treatment on Mechanical Properties of Inconel 718 Sandwich Structures Manufactured by Selective Laser Melting, Metals, vol. 10, 645.
- [ZAH2Oc] Zaharia, S.M., Enescu, L.A., Pop, M.A., (2020). *Mechanical Performances of Lightweight Sandwich Structures Produced by Material Extrusion-Based Additive Manufacturing*, Polymers, vol. 12, 1740.
- [ZAH2Od] Zaharia, S.M., *Construcția, proiectarea și calculul structurilor aeronautice-Aplicații MEF*, Editura Printech, București, 2020.
- [ZAH20e] Zaharia S.M., Stamate, V.M., (2020). *Stand de testare a rezistenței la oboseală a palelor și metodă de testare*, brevet de invenție nr. 129022 B1.
- [ZEN11] Zenkert, D., Burman, M., (2011). *Failure mode shifts during constant amplitude fatigue loading of GFRP/foam core sandwich beams*, International Journal of

Fatigue, vol. 33, nr. 2, 217-222.

- [ZHA11] Zhang, Q.L., Yao, J.H., Mazumder, J., (2011). *Laser direct metal deposition technology and microstructure and composition segregation of Inconel 718 superalloy,* Journal of Iron and Steel Research International, vol. 18, pag. 73–78.
- [ZHA18] Zhang, D., Feng, Z., Wang, C., Wang, W., Liu, Z., Niu, W., (2018). Comparison of microstructures and mechanical properties of Inconel 718 alloy processed by selective laser melting and casting, Materials Science and Engineering: A, vol. 724, pag. 357–367.