

STUDIUL STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE ÎN STRUCTURI DE TIP SANDWICH SOLICITATE LA ÎNCOVOIERE ÎN TREI PUNCTE

STRESS AND STRAIN STATE STUDY IN SANDWICH STRUCTURES SUBJECTED TO THREE POINT BENDING

BURTOIU¹ Mircea-Gabriel¹, BADEA² Andrei²,

¹Facultatea: I.M.S.T., Specializarea: Siguranța și Integritatea Structurilor, Anul de studii: Master I, e-mail: mircea.gabriel25@gmail.com

²Facultatea: IMST, Specializarea: Industrial Engineering, Anul de studii: II
Conducător științific: Prof.dr.ing. Gabriel JIGA

REZUMAT: Lucrarea prezintă un studiu comparativ pentru două structuri sandwich și anume, cu miez de tip fagure (honeycomb) și miez de tip ondulat (corrugated), realizate din PLA (acid polilactic) cu învelișuri din oțel. Rezultatele obținute experimental, în urma încovoierii în trei puncte, sunt validate atât printr-un calcul analitic, cât și numeric, printr-o analiză cu elemente finite (FEM) din modulul ANSYS Workbench. Ca rezultate, au fost comparate pentru fiecare tip de miez tensiunile din fețe și deformațiile maxime apărute în punctul de aplicare al forței valorile obținute fiind centralizate într-un tabel.

ABSTRACT: The paper presents a comparative study for two sandwich structures, namely, honeycomb core and corrugated core made of PLA (polylactic acid) with steel skins. The experimental results obtained after the three-point bending test are validated by both analytical and numerical calculation through a Finite Element Analysis (FEM) from the ANSYS Workbench module. As a result, for each type of core, the stresses in the faces and the maximum deformations in the point of force application were compared, the values obtained being centralized in a table.

CUVINTE CHEIE: structuri "sandwich", honeycomb, corrugated, încovoiere în trei puncte, PLA

1. Definiție. Informații generale despre o structură de tip sandwich

O structură compozită de tip sandwich reprezintă o clasă specială de materiale realizate prin atașarea a două fețe subțiri, dar rigide, la un miez ușor, dar gros, prin folosirea unui adeziv special.

Materialul fețelor are de obicei o rigiditate ridicată, în timp ce miezul are în mod obișnuit o rigiditate scăzută, dar cu o rezistență mare la compresiune și forfecare. Solidarizarea prin intermediul stratului de adeziv, conferă structurii sandwich un modul de încovoiere ridicat.

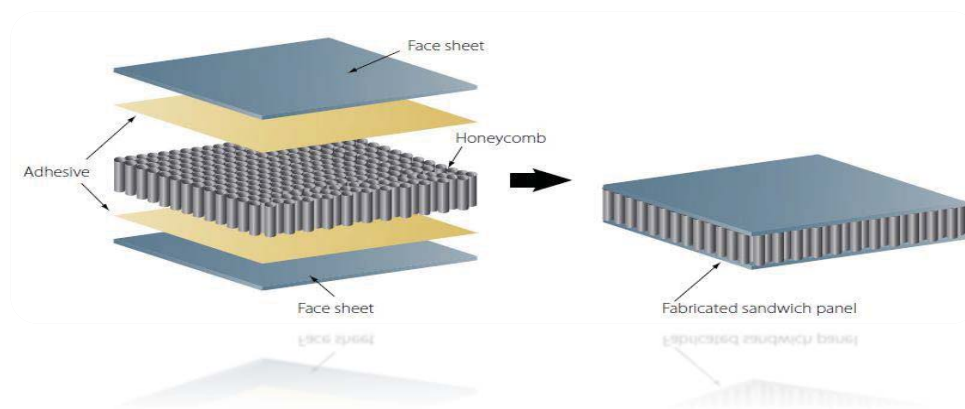


Fig. 1. Structură compozit de tip sandwich [1]

2. Stadiul actual

Aplicațiile unde este necesară folosirea unor structuri de tip sandwich s-au înmulțit foarte mult în domeniul aeronautic, militar, aerospațial, datorită raportului rezistență ridicată – greutate scăzută. Acest tip de structuri sunt formate din foi subțiri, metalice sau compozite cu rezistențe și rigidități foarte mari, separate de un strat gros median din materiale cu densități scăzute. Stratul median - miezul structurii, poate fi creat din spumă (ex: Nomex) sau poate fi metalic, de tip fagure sau de tip ondulat. Miezul este în general lipit de fețe printr-un strat de adeziv.

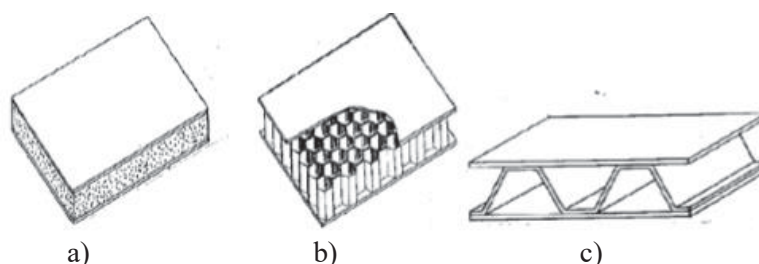


Fig. 2. Tipuri de miezuri (a-spumă, b-fagure, c-ondulat) [2]

O structură de acest tip are următoarele avantaje:

- rigiditate ridicată la încovoiere;
- rezistență ridicată la oboseală;
- bună amortizare în cazul unui șoc;
- izolare termică îmbunătățită;
- lipsa concentratorilor de tensiune datorită absenței organelor de asamblare (nituri, șuruburi ș.a.).

Totodată, regăsim și anumite dezavantaje:

- umiditate crescută din structură ce conferă acesteia un efect coroziv;
- necesitatea unui control amănunțit în urma fabricării pentru a scădea riscul de delaminare.

Astfel, o structură sandwich trebuie să satisfacă mai multe cerințe:

- fețele trebuie să prezinte o rigiditate bună pentru a putea prelua solicitări de întindere, compresiune, forfecare;
- miezul trebuie să fie suficient de rezistent la forfecare;
- materialul miezului trebuie să-și păstreze stabilitatea;
- fețele trebuie să reziste la posibila apariție a eventualelor cute.

3. Materiale utilizate în cadrul studiului

Fețele, realizate din tablă din oțel zincată, cu o grosime de 0,3 mm sunt lipite cu adeziv de tip rășină poliesterică nesaturată Nestrapol 450 de miez, pentru a obține un transfer de sarcini între componentele stratificatului.

În studiul realizat au fost utilizate două tipuri de miez:

- miez tip fagure (« honeycomb core »);
- miez ondulat (« corrugated core »).

Tabelul 1. Proprietățile mecanice ale materialelor folosite

Material	Densitate [kg/m ³]	Modulul de elasticitate longitudinal (E) [MPa]	Coefficientul lui Poisson (ν)
Oțel	7860	200000	0.30
PLA	1300	3500	0.36
Nestrapol	1190	3900	0.29

4. Realizarea miezurilor utilizând tehnica de printare 3D

Cea mai utilizată metoda pentru printarea 3D este FDM (Fusion Deposition Method), care s-a impus ca rezultat al costurilor mici ale imprimantelor/ consumabilelor. Aceasta metodă utilizează ca materie primă filamentul de PLA/ABS.

Filamentul din PLA este cel mai utilizat, acest lucru datorându-se în mare parte faptului că este ușor de tipărit, nu emite tot atâtea particule ca și alte materiale și este biodegradabil. [3]

Proprietăți chimice și mecanice ale PLA-ului:

- Denumire tehnică: Acid Polilactic (Polylactic Acid – PLA)
- Formula chimică: $(C_3H_4O_2)_n$
- Temperatură de topire ; 157 - 170 °C
- Rezistență la tracțiune: (61 – 66) MPa
- Rezistență la încovoiere: (48 – 110) MPa
- Modulul de elasticitate longitudinal E: 3500 MPa
- Modulul de forfecare G: 1287 MPa

Pentru printare s-a folosit programul Simplify 3D, în care au fost introduse modelele realizate în suita Catia V5 și exportate în format ‘.stl’, softul fiind conectat la imprimanta 3D Creality CR10 S4.

La o viteză de printare de până la 200 mm/s, procesul a durat aproximativ 12 ore.

Pentru miezul de tip fagure s-au ales următoarele dimensiuni de printare :

- Lungime totală: 300 mm
- Lățime totală: 30 mm
- Înălțime totală: 20 mm
- Forma celulei: hexagonală regulată
- Grosimea peretelui celulei: 1 mm
- Lungimea peretelui celulei: 5 mm



Fig. 3. Miezul de tip fagure real

Pentru miezul ondulat s-au ales următoarele dimensiuni de printare:

- Lungime totală: 300 mm;
- Lățime totală: 30 mm;
- Înălțime totală: 20 mm;
- Forma ondulației: trapezoidală;
- Grosime perete: 2 mm;
- Lungimea bazei mari: 12 mm;
- Lungimea bazei mici: 6 mm.



Fig. 4. Miezul de tip ondulat real

5. Realizarea epruvetelor și încercările efectuate

Pentru îmbinarea miezului cu fețele s-a folosit rășină poliestică NESTRAPOL 450. În urma aplicării acesteia, epruvetele au stat la uscat timp de aproximativ 24 de ore la temperatura camerei (20°C). După uscare, grosimea totală a stratului de rășină măsurată se situa în jurul valorii de 0.225 mm pentru epruveta cu miez de tip figure și în jurul valorii de 0.15 mm pentru epruveta cu miez ondulat.



Fig. 5. Vederi ortogonale ale modelului real al structurii sandwich de tip figure



Fig. 6. Vederi ortogonale ale modelului real al structurii sandwich cu miez ondulat

Încercarea s-a efectuat pe mașina INSTRON 8801. S-a recurs la încovoierea în trei puncte, unde au fost folosiți doi suporturi cilindrici pe care s-a realizat rezemarea, cu o încărcare aplicată în centrul epruvetei.

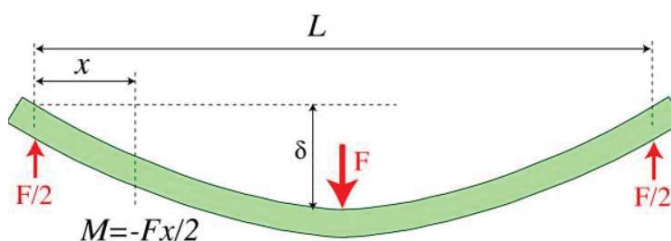


Fig. 7. Schema încercării de încovoiere în trei puncte [4]

Având în vedere dimensiunile de gabarit ale celor două epruvete, au fost respectate dimensiunile din standardul ASTM D790. Astfel, dimensiunea dintre reazeme L a fost aleasă de 180 mm pentru ambele cazurile. [5]

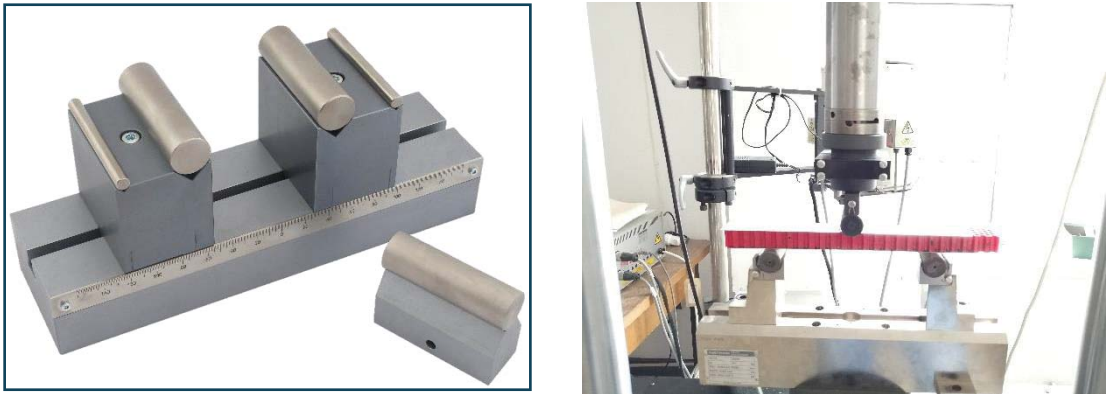


Fig. 8. Standul experimental pentru încercarea la încovoiere în trei puncta (stânga) și epruveta din structură de tip fagure montată pe dispozitivul de încercare (dreapta)

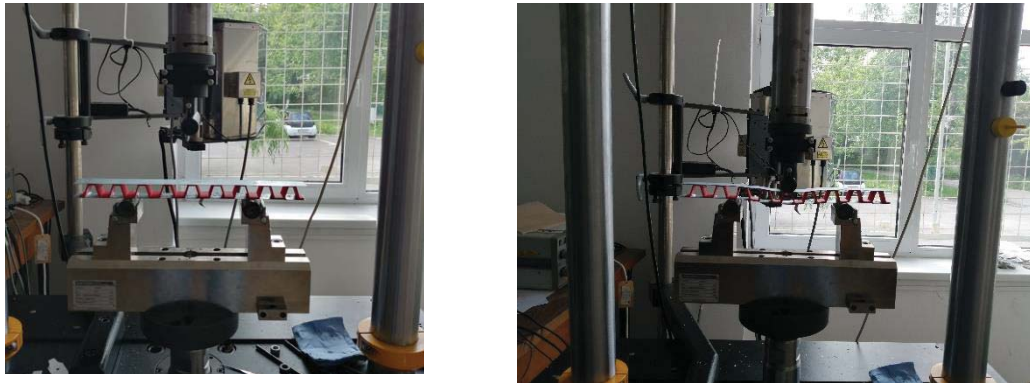


Fig. 9. Epruveta din structură de tip ondulat montată pe dispozitivul de încercare înainte și după deformare

6. Rezultate experimentale

În urma încercărilor experimentale au fost obținute două grafice care arată dependența deformației în funcție de forța aplicată:

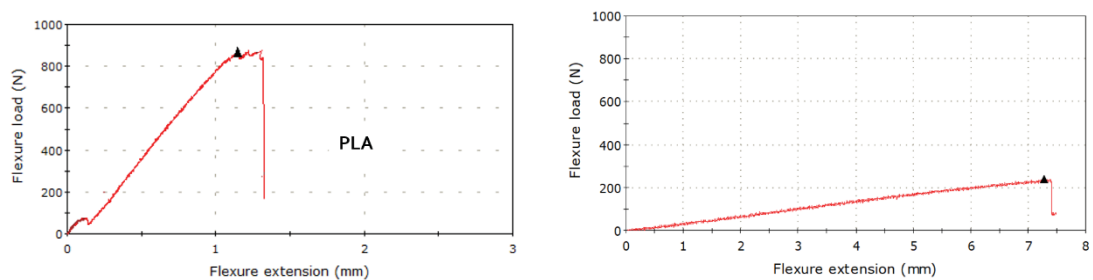


Fig. 10. Dependența deformației structurii sandwich cu miez tip figure (stânga) și miez de tip ondulat (dreapta) în funcție de forța aplicată

Astfel, se pot observa momentele în care s-au produs primele cedări majore în structură, momente în care forța are o cădere bruscă.

Pentru miezul de tip figure, la o forță maximă aplicată (F_{\max}) de 850 N, deformația maximă (δ_{\max}) înregistrată a fost de 1.125 mm, în timp ce pentru cel ondulat, la o forță maximă aplicată (F_{\max}) de 240 N, a corespuns o deformație (δ_{\max}) de 7.28 mm.

7. Calculul analitic al structurii cu miez omogen din PLA

Pentru calculul analitic al unei structuri sandwich cu miez de tip figure, supusă la o încovoiere în trei puncte s-a calculat inițial rigiditatea structurii, considerând un miez omogen din PLA de dimensiuni 270 x 28,85 x 19,95 mm³. [6]

$$D = \frac{2 \cdot E_f \cdot b \cdot t_f^3}{12} + \frac{E_f \cdot b \cdot t_f \cdot h^2}{2} + \frac{E_c \cdot b \cdot t_c^3}{12} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 28,85 \cdot 0,5^3}{12} + \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 28,85 \cdot 0,5 \cdot 20,4^2}{2} + \frac{3500 \cdot 28,85 \cdot 19,9^3}{12} = 66674,3 \cdot 10^4 \text{ Nmm}^2 \quad (1)$$

$$S = b \cdot h \cdot G_c = 28,85 \cdot 20,4 \cdot 1287 = 75,745 \cdot 10^4 \text{ N} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{k_b \cdot P \cdot \ell^3}{D} + \frac{k_s \cdot P \cdot \ell}{S} = \frac{850 \cdot 180^3}{48 \cdot 66674,3 \cdot 10^4} + \frac{850 \cdot 180}{4 \cdot 75,745 \cdot 10^4} = 0,205 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\frac{P \cdot \ell}{4} \cdot E_i}{\sum_i E_i I_i + \sum_i E_i A_i \cdot (z_i - z_G)^2} = 117,4 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$\sigma_f = \frac{M}{h \cdot t_f \cdot b} = \frac{P \cdot \ell}{4 \cdot h \cdot t_f \cdot b} = \frac{850 \cdot 180}{4 \cdot 20,4 \cdot 0,5 \cdot 28,85} = 130 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$\tau_c = \frac{P}{2 \cdot h \cdot b} = \frac{850}{2 \cdot 20,4 \cdot 28,85} = 0,72 \text{ MPa}$$

8. Calculul numeric al structurii cu miez omogen din PLA

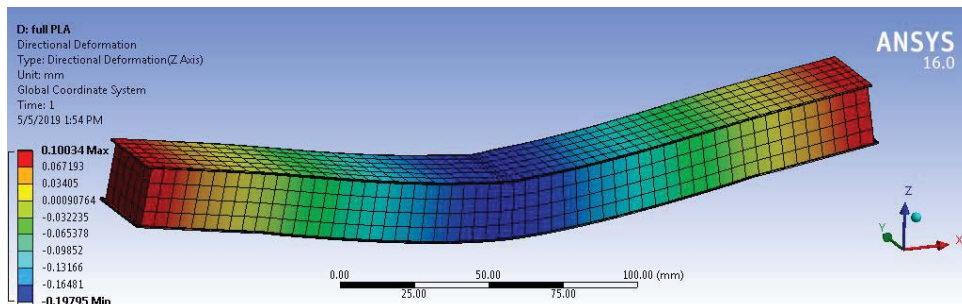


Fig. 12. Deformația maximă a structurii cu miez omogen din PLA

$$F_{\max} = 850 \text{ N}$$

$$\delta_{\max} = 0.19795 \text{ mm}$$

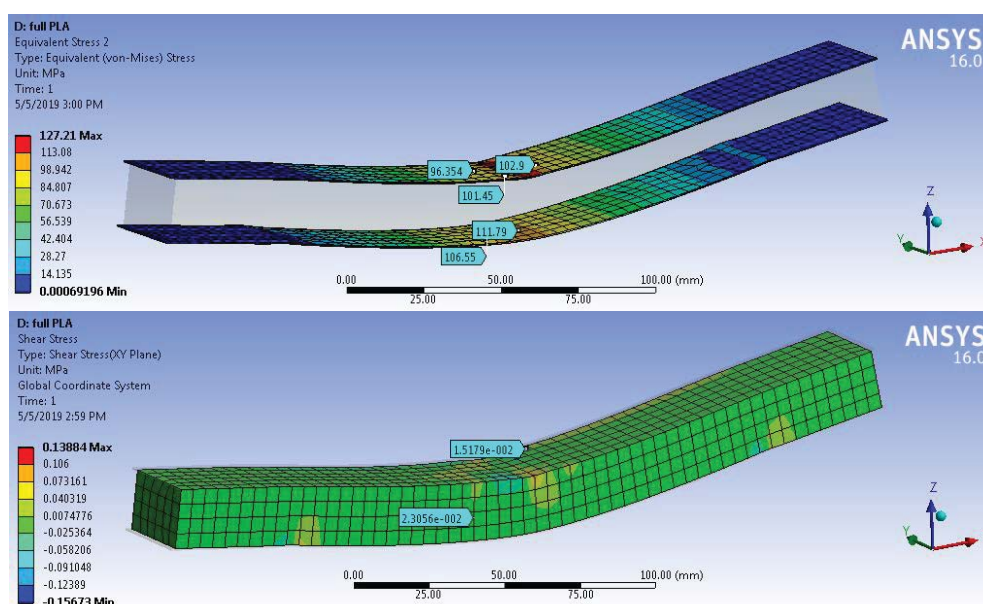


Fig. 13. Tensiunile din fețe (sus) și tensiunea de forfecare din miez (jos)

9. Calculul numeric al structurii cu miez de tip fagure din PLA

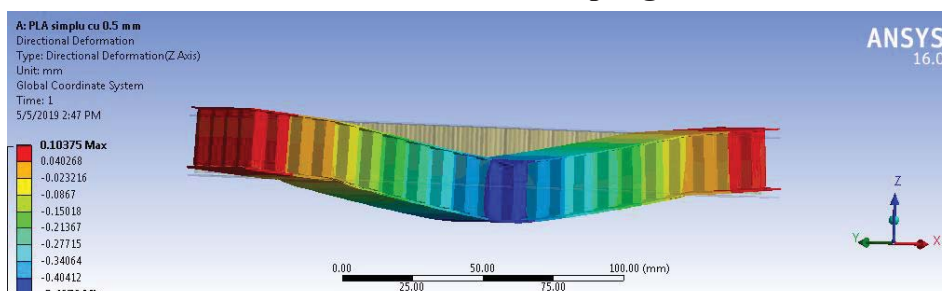


Fig. 14. Deformația maximă la structura cu miez fagure

$$\delta_{\max} = 0.4676 \text{ mm}$$

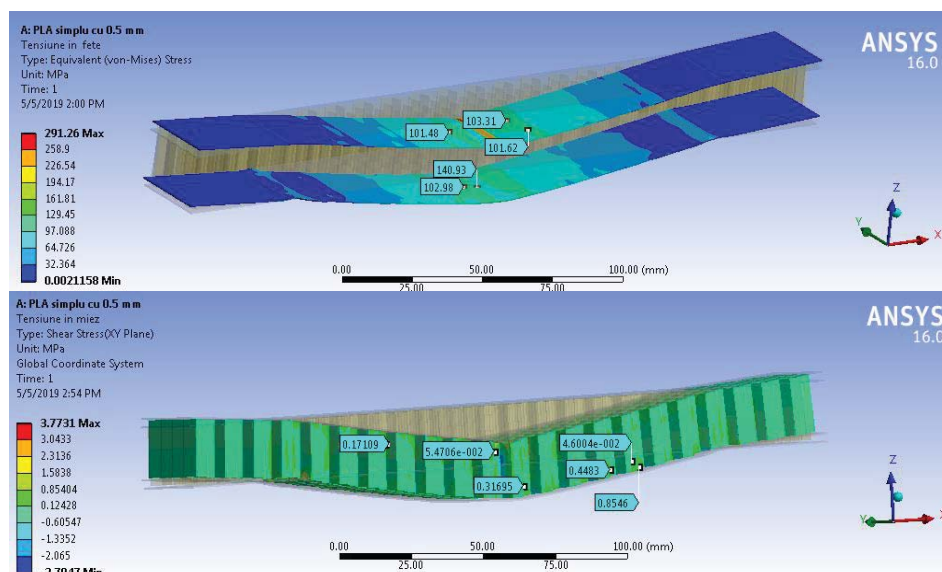


Fig. 15. Tensiunile din fețe și miez pentru structura cu miez de tip fagure

10. Calculul numeric al structurii cu miez ondulat din PLA

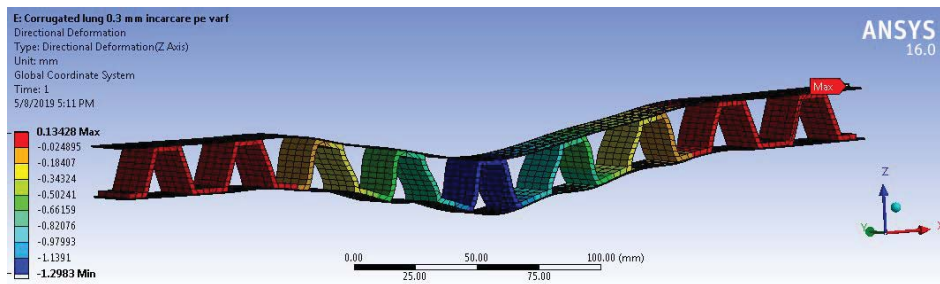


Fig. 16. Deformația maximă la structura cu miez ondulat

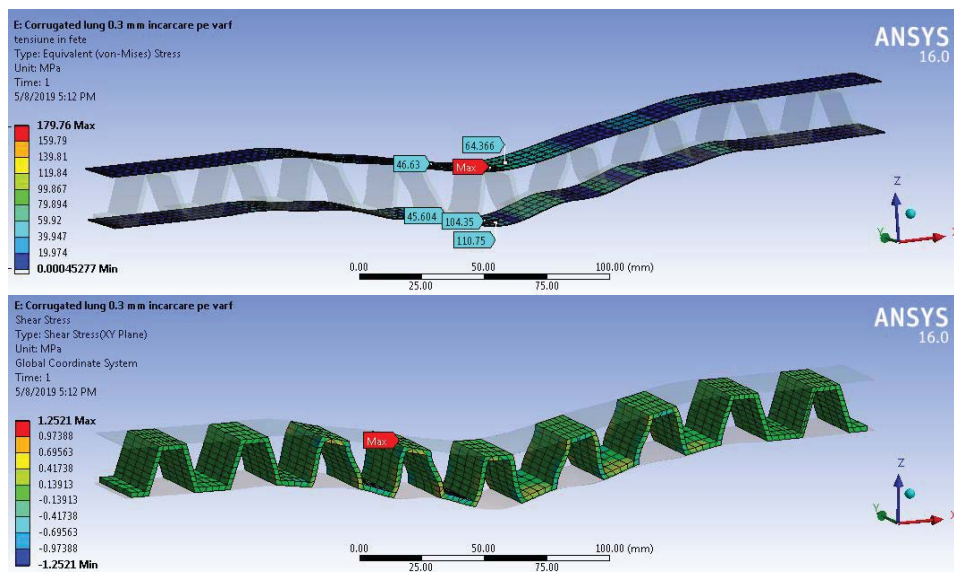


Fig. 17. Tensiunile din fețe și miez pentru structura cu miez ondulat

11. Rezultatele obținute

Tabelul 2. Studiul comparativ al deformațiilor maxime obținute prin cele trei metode

Tipul compozitului	Experimental	Analitic	Numeric
Oțel + PLA omogen	-	0.205 mm	0.198 mm
Otel + PLA tip fagure	1.125 mm	-	0.467 mm
Otel + PLA tip ondulat	7.28 mm	0.084 mm	1.298 mm

Tabelul 3. Studiul comparativ al tensiunilor obținute prin calcul numeric și cel analitic

Tipul compozitului	Tensiuni în fețe		Tensiuni în miez	
	Analitic	Numeric	Analitic	Numeric
Otel + PLA omogen	117.4 MPa	111.79 MPa	0.04 MPa	0.023 MPa
Otel + PLA tip fagure	130 MPa	140.93 MPa	0.72 MPa	0.854 MPa
Otel + PLA tip ondulat	-	110.75 MPa	-	0.8 MPa

12. Concluzii

- Au fost studiate două tipuri de structuri sandwich – una cu miez fagure din PLA, iar cea de-a doua cu miez ondulat din PLA;
- În vederea validării modelului numeric în raport cu cel analitic s-a modelat o structură sandwich cu miez omogen din PLA. Rezultatele au fost extrem de apropiate;
- Pentru studiul structurii cu miez fagure s-au păstrat condițiile la limită (rezemare în capete cu o forță concentrată la mijlocul deschiderii);
- Pentru calculul tensiunilor, acestea s-au determinat atât în fețe cât și în miez. În acest sens, rezultatele numerice au fost validate prin calcul analitic, atât pentru grinda cu miez omogen din PLA cât și pentru grinda cu miez tip fagure.
- În privința structurii cu miez ondulat, rezultatele nu au putut fi validate analitic, din cauza formei complexe a miezului ondulat.
- În privința deformațiilor obținute în structura cu miez ondulat, calculate atât prin calcul analitic, prin încercări experimentale cât și prin modelare numerică se observă o neconcordanță între valorile obținute.
- În timpul încercării experimentale s-a constatat că, deși curba prezintă la prima vedere un comportament liniar, succesiunea de cedări din structura au dus la obținerea unei deformații mult mai mari decât în analiza numerică;
- Delaminarea produsă în structura ondulată a condus la o deformare mai mare a stratului superior din oțel (în vecinătatea aplicării forței);
- Din cauza reazemelor cilindrice, a existat un fenomen de lunecare treptată a platbandei inferioare din oțel pe reazeme, favorizând amplificarea săgeții maxime.
- Deoarece deformațiile reale obținute în structură au fost mari, rezultatele calculate analitic dau erori, deoarece contrazic ipoteza micilor deformații din Rezistența materialelor.

13. Bibliografie

- [1] *** http://www.admatis.com/eng/competencies_material_science_sandwich.html
- [2] Bucur, C., Bucur, A.M., *Survey of the state of the art composites and sandwich structures*, 2015, Cluj-Napoca
- [3] *** <https://store3d.ro/care-este-diferenta-intre-filamentele-abs-si-cele-pla/>
- [4] *** https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/beam_bending/3_point_bending.php
- [5] D790 - *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*
- [6] Davies, J.M., *Lightweight sandwich construction*, 2001, Manchester, U.K.

14. Notații

Următoarele simboluri sunt utilizate în cadrul lucrării:

P = forța aplicată = 850 [N];

D = modulul de rigiditate la încovoiere [Nmm^2];

S = modulul de rigiditate la forfecare [N];

t_f = grosimea fețelor = 0,5 [mm];

t_c = grosimea miezului = 19,9 [mm];

G_c = modulul de forfecare al miezului = 1287 [MPa];

E_f = modulul de elasticitate al fețelor = $2 \cdot 10^5$ [MPa];

b = lățimea epruvetei = 28,85 [mm];

l = distanța dintre suporturi = 180 [mm]

$h = t_c + t_f = 20,4$ [mm]

k_b = coeficientul săgeții datorate efectului de încovoiere = 1/48;

k_s = coeficientul săgeții datorate efectului de forfecare = 1/4;