

Materiale inovatoare în construcția de poduri. Contribuții la construcțiile cu materiale compozite armate cu fibre

**Teza de doctorat
Autor: Ing. Lucian Blaga
-rezumat-**

1. Introducere

Materialele compozite câștigă din ce în ce mai mult teren în diferite industrii, de la cea petro-chimică în anii 1940, până la construcția de vapoare și industria aeronautică și construcțiile civile, în ultimii 20 de ani. Principalele avantaje ale acestui tip de material structural sunt greutatea redusă, rezistențele ridicate, durabilitatea și rezistența la intemperii și acțiuni ale diverselor chimicale.

Primele poduri realizate integral din polimeri armați cu fibră de sticlă (GFRP) au fost executate în anii 1980, după cum este cazul podului Ginzi, în Bulgaria, construit în 1982 (Figura 1.1)



Figura 1.1 – Podul Ginzi, Bulgaria

Alte poduri remarcabile realizate integral din GFRP sunt podul Aberfeldy (Scoția, 1992), podul Fiberline (Danemarca, 1997), podul Pontresina (Elveția, 2001), podul Lleida (Spania, 2004).

2. Motivație și obiective

Motivația lucrării de față o constituie podurile pentru situații de urgență. Datorită schimbărilor climatice din ultimii ani, respectiv a frecvenței inundațiilor și viiturilor, dar și a creșterii riscului unor atacuri teroriste și a înmulțirii numărului de accidente, este necesară dotarea inspectoratelor pentru situații de urgență cu mijloace rapide de restabilire a traficului. Podurile de urgență trebuie să fie ușoare, simplu de instalat, modulare, să fie transportabile cu vehicule de gabarit redus și să aibe o comportare în timp similară cu cea a podurilor permanente.

Obiectivul tezei este dezvoltarea unei noi metode de îmbinare aplicabilă podurilor realizate din GFRP. Pentru aceasta va fi studiată fezabilitatea unei noi tehnologii, FricRiveting, adică nituirea prin frecare. FricRiveting este o tehnologie patentată la Helmholtz Zentrum Geesthacht, Germania, dezvoltată pentru îmbinările hibride metal-polimer termoplastic.

3. State of the art

3.1. Polimerii armați cu fibre

Polimerii armați cu fibre sunt materiale compozite, constituite din armătură, matricea polimerică și interfața dintre cele două. Principalele armături dau și denumirea materialului compozit, fibra de sticlă (GFRP, glass fiber reinforced polymer), fibra de carbon (CFRP) sau fibra de aramidă (AFRP). Lucrarea de față se concentrează pe GFRP.

Matricile polimerice se împart în două mari categorii: polimerii termoplastici și polimerii termoset. Polimerii termoset nu pot fi topiți și remodelați după întărire. Cei mai frecvent utilizați polimeri termoset sunt: epoxy, polyester, vinyl ester, phenol.

Polimerii termoplastici sunt în general mai duri decât cei termoset. Aceștia pot fi topiți și remodelați iar cei mai frecvenți sunt: polyamida (nylon), policarbonatul (PC), polyester termoplastic, polyeterimidă (PEI), polyetilenă (PE).

Polimerii armați cu fibră de sticlă (GFRP) pot fi produși prin diferite tehnologii: laminare, pultruziune, autoclavizare, infuzie în vacuum etc.

3.2. Norme

Normele și manualele tehnice disponibile pentru GFRP sunt: EUROCOMP, Fiberline Design Manual, EN 13706, Extern Design Manual, BÜV Empfehlung – Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen, Composites for Construction.

3.3. Îmbinări ale polimerilor armați cu fibră de sticlă

Îmbinările disponibile la ora actuală pentru profile din GFRP sunt: îmbinări cu adezivi, îmbinări mecanice cu șuruburi și îmbinări hibrid. Principalele dezavantaje ale îmbinărilor lipite cu adeziv sunt transferul exclusiv al

eforturilor de forfecare și necesitatea unor timpi de întărire. Principalul dezavantaj al îmbinărilor cu șuruburi îl constituie concentratorii de eforturi.

3.4. FricRiveting

O metodă inovatoare de îmbinare este constituită de FricRiveting – nituirea prin frecare. Aceasta este bazată pe sudură prin frecare și îmbinarea mecanică. Principiul tehnologiei este arătat în Figura 3.1:

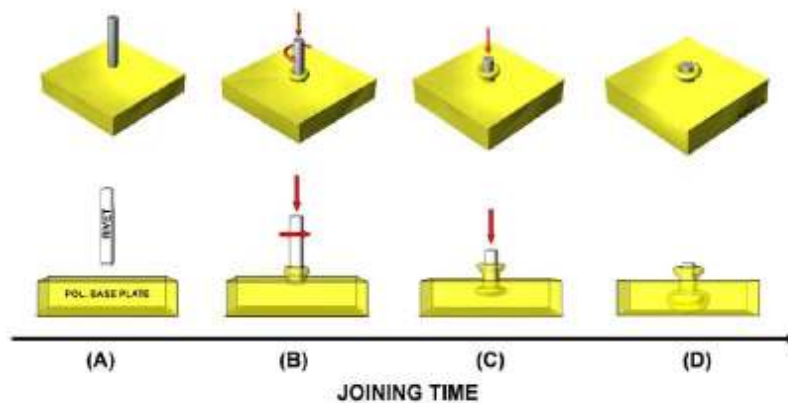


Figura 3.1 – Principiul nituirii prin frecare. (A) Poziționarea elementelor de îmbinat, (B) Inserarea prin rotație a nitului metalic în placa polimerică, (C) Forjarea nitului, (D) Consolidarea îmbinării.

Parametrii procesului sunt: viteza de rotație, timpul de frecare, timpul de forjare, presiunea de frecare și presiunea de forjare. Avantajele procedurii sunt:

- nu este necesară pregătirea suprafețelor de îmbinare
- nu este necesară găurirea prealabilă a elementelor
- realizarea de îmbinări ermetice
- număr redus de pași ai procesului
- timpi scurți de realizare a îmbinărilor
- posibilitatea unor aplicații automatizate
- performanțe mecanice bune la tracțiune și forfecare

Cercetarea pornește de la studiile anterioare asupra îmbinărilor dintre polimeri termoplastici nearmați cu nituri metalice din aluminiu și titan.

3.5. Exemple de poduri pentru situații de urgență

Podurile de urgență cele mai cunoscute și utilizate sunt Podul Bailey și Podul D, ambele modulare și realizate din oțel. În anul 2004, un colectiv format din cercetători de la Universitatea Tehnică din Aachen împreună cu armata germană a propus un proiect de pod din GFRP, pentru situații de urgență, podul Pioneer, care putea susține un camion de 40 t.

4. Programul experimental

Abordarea experimentală a tezei este axată pe studiul de fezabilitate a nituirii prin frecare pentru diferite combinații de materiale: PEI-GF/AA 2024, PEI-GF/Ti gr2, P-GF/Ti gr 3.

După stabilirea aplicabilității tehnologiei pentru combinațiile selectate, se evaluează performanța de ancorare a nitului și rezistența la tracțiune, urmând ca ulterior combinația cea mai favorabilă să fie testată la forfecare și supusă unui proces de optimizare de tip Taguchi și este măsurată temperatura degajată în timpul procesului, cu ajutorul unei camere infraroșii. Figura 4.1 prezintă un specimen încercat la testele de forfecare, realizat dintr-un cupon din polieterimidă armată cu fibră de sticlă (PEI-GF), nit din titan grade 2, nituit prin frecare, cupon din aluminiu AA2198 și piuliță cu șaibă din oțel inoxidabil:



Figura 4.1 – Specimen de forfecare

5. Rezultate și discuții

5.1. Perspectivă

Rezultatele vor fi prezentate conform procedurii și abordării descrise în capitolul 4. În final, combinația de materiale care se va fi dovedit cea mai favorabilă după studiul de fezabilitate va fi supusă unui proces de optimizare pentru performanță mecanică la forfecare.

5.2. Studiul de fezabilitate

Studiul de fezabilitate a nituirii prin frecare a fost efectuat pentru combinațiile:

- PEI-GF / Aluminu AA 2024
- PEI-GF / Titan grade 2
- P-GF / Titan grade 3, Titan grade 5

Influența parametrilor procesului asupra realizării zonei de ancorare a nitului metalic este prezentată în figura 5.1

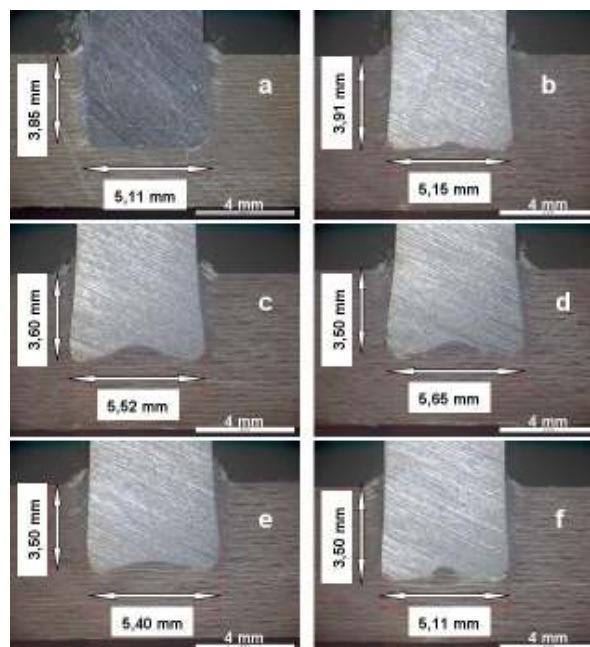


Figura 5.1 – Influența timpului de forjare (FOT) asupra microstructurii îmbinării PEI-GF / Ti gr.2: a - 1200 ms, b - 1500 ms, c - 2000 ms, d - 2500 ms, e - 3000 ms, f - 3500 ms

5.3. Selectarea combinațiilor de materiale

Interacțiunea dintre forța ultimă de tracțiune și raportul dimensiunilor (Aspect ratio – raportul dintre deformația maximă a nitului și adâncimea de inserție a acestuia în polimer) este prezentată în figura 5.2:

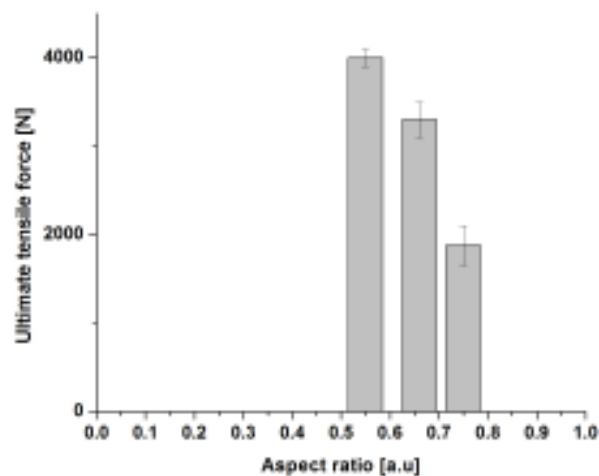


Figura 5.2 – Interacțiunea dintre forța ultimă de tracțiune și raportul dimensiunilor zonei de ancorare

Teza propune, testează și validează un nou concept de evaluare a performanțelor mecanice pe baza formării zonei de ancorare: raportul volumetric, a cărui interacțiune este prezentată în figura 5.3:

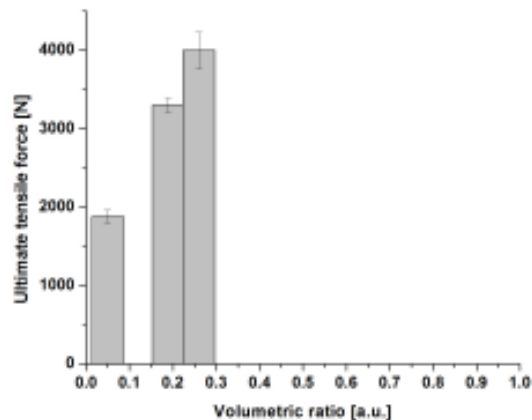


Figura 5.3 – Interacțiunea dintre forța ultimă de tracțiune și raportul volumetric al zonei de ancorare

5.4 Optimizarea procesului

Procesul de nituire prin frecare a fost optimizat pentru combinația de material PEI-GF / Ti gr. 2, pentru rezistența la forfecare. Tabelul 5.1 prezintă rezultatele experimentelor efectuate după metoda Taguchi de design experimental:

Tabelul 5.1 – Rezultatele experimentelor de forfecare

Experiment	ULSF 1 [N]	ULSF 2 [N]	ULSF 3 [N]	ULSF 4 [N]	Average ULSF [N]	ULSF Standard Deviation [N]
1	4000	3930	2300	4980	3800	1110
2	5050	3800	5500	3700	4500	900
3	4250	3140	2910	3850	3500	621
4	4990	4915	4600	5800	5000	511
5	5370	5070	3700	3500	4400	947
6	3320	3850	3100	3830	3500	375
7	4800	4050	5430	5900	5000	802
8	3950	4090	4680	4060	4200	329
9	3810	4870	4400	4400	4400	434

94,5% din speciamentele încercate au cedat prin forfecarea nitului metalic, rezultând rezistențe la forfecare de aproximativ 200 MPa. Figura 5.4 prezintă o curbă tipică forță-deplasare, din

cadrul experimentului nr. 4 (viteza de rotație 10000 rpm, timpul de frecare 700 ms, timpul de forjare 1850 ms, presiunea de frecare 6 bar, presiunea de forjare 8 bar):

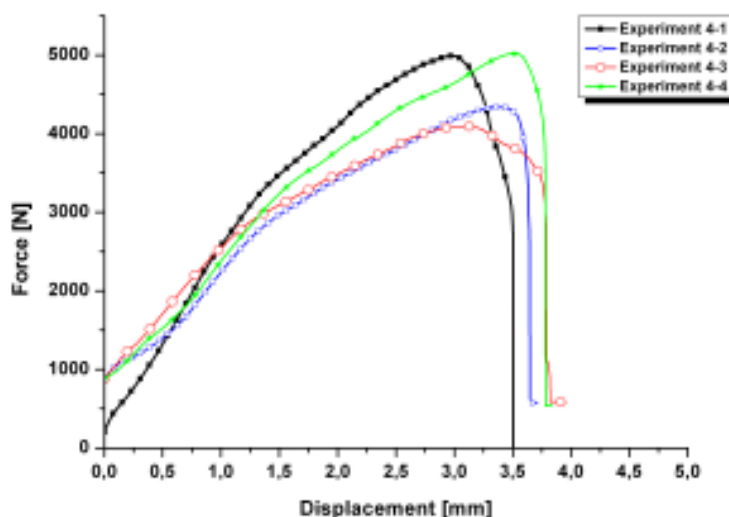


Figura 5.4 – Curbă tipică forță-deplasare pentru experimentele de forfecare efectuate

Rezultatele au fost evaluate statistic cu ajutorul programului MINITAB iar condițiile de validare a experimentelor au dat rezultate în marja de -6% + 9%, adică în limitele acceptate de $\pm 10\%$. Experimentul de comparație cu îmbinările cu șuruburi a rezultat într-o comportare similară a celor două tipuri de îmbinare, reușindu-se chiar o performanță cu 20% superioară a îmbinării nituite prin frecare în cazul parametrilor optimi determinați în design-ul experimental.

Temperaturile maxime măsurate în timpul procesului au fost între 450°C-600°C, adică între 30%-40% din punctul de topire al aliajului de titan și în limitele de deformare la cald a acestuia și păstrare a proprietăților mecanice, după cum se arată în figura 5.5:

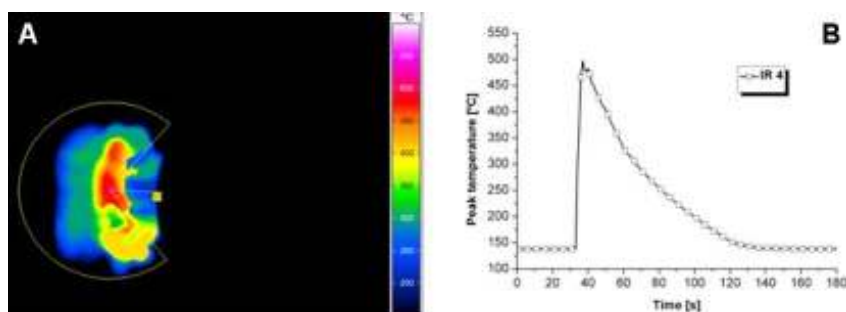


Figura 5.5 – Termogramă (A) și evoluție a temperaturilor (B) în timpul procesului de nituire prin frecare

5.5 Studiu de caz

5.5.1. Pod ușor din GFRP pentru situații de urgență

Un pod grindă cu zăbrele a fost calculat cu ajutorul programului SAP2000 v14. Calculul a fost menit obținerii valorilor forțelor axiale, respectiv ale celor din nodurile unui pod pentru situații de urgență realizat integral din GFRP. Structura (Figura 5.6) are o deschidere de 25m, este alcătuită din profile U240/72/12 (talpa superioară și talpa inferioară), profile tubulare V240/240/12 (diagonale și antretoaze) și profilul placă FBD600 ASSET (calea de rulare). Solicitarea este cea a unui camion din convoiul A30.

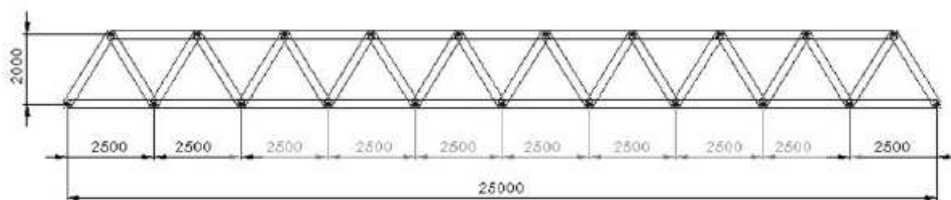


Figura 5.6 – Elevația podului ușor GFRP

5.5.2. Îmbinări nituite prin frecare pentru elementele GFRP ale grinzii cu zăbrele

Pentru transmiterea eforturilor calculate (rezistența la forfecare stabilită, 199MPa, în designul experimental din capitolul 5.4) a fost propusă următoarea metodologie (Figura 5.7): elementele structurale din GFRP vor fi în prealabil nituite prin frecare cu

nituri din titan. Ulterior elementele alăturate prenituite vor fi unite cu ajutorul unei eclise din aluminiu iar îmbinarea va fi înșurubată cu piulițe și șaibe din oțel inoxidabil, asemenea configurației din designul experimental din capitolul 5.3.

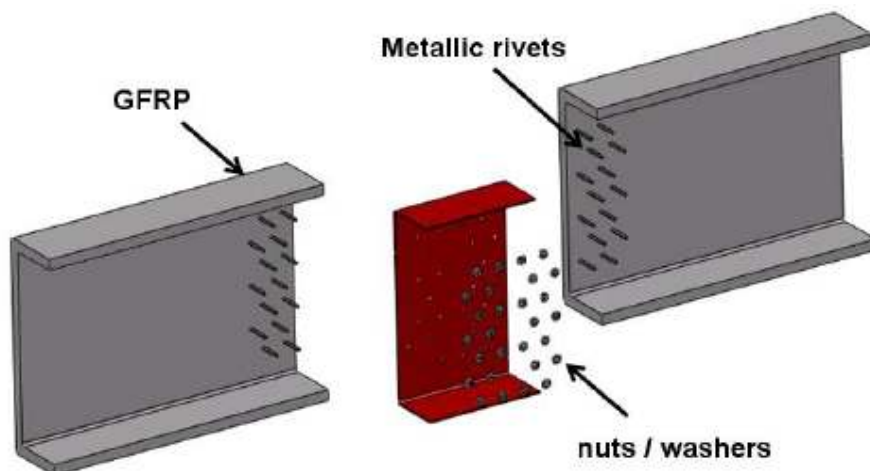


Figura 5.7 – Îmbinarea elementelor din GFRP propusă pentru grinda cu zăbrele

Pentru configurația descrisă, folosind nituri de diametrul 5mm sunt necesare 162 de nituri din titan. Crescând diametrul la 14mm, momentan limitat la această dimensiune de posibilitățile capului de sudare ale RSM400, un necesar de 22 de nituri a fost calculat.

6. Concluzii

6.1. Concluziile tezei

- Aluminiul AA2024-T351 și PEI-GF pot fi îmbinate prin nituire cu frecare, folosind geometrii adecvate ale vârfului niturilor
- Micșorând căldura generată de proces, nituirea prin frecare devine fezabilă pentru îmbinările PEI-GF/AA2024. Găuri în vârful nitului metalic au micșorat suprafața de frecare dintre cele două materiale ducând astfel la generarea unor temperaturi mai

scăzute ale procesului. Fezabilitatea a fost testată în peste 80 de îmbinări.

- Fezabilitatea FricRiveting pentru îmbinări PEI-GF/Titan grade 2 a fost testată și dovedită cu succes. Parametri procesului au fost optimizați pentru a obține un nivel scăzut de degradări termo-mecanice ale materialului compozit. Un design experimental a fost efectuat pentru optimizarea parametrilor în vederea obținerii unor performanțe mecanice ridicate, anume rezistența la forfecare a îmbinărilor suprapuse. Astfel, îmbinările au cedat prin forfecarea materialului nitului, doar 4,5% cedând prin presiune pe gaură. Rezistența îmbinării a atins pragul de 60% din rezistența la întindere a nitului din titan (344MPa)
- Modelarea numerică a unui pod din GFRP pentru situații de urgență a avut ca rezultat pentru metoda propusă de îmbinare a profilelor din GFRP un număr de 22 până la 161 de nituri din titan, în funcție de diametrul folosit
- Pentru evaluarea performanțelor mecanice ale nituirii prin frecare fost propus o nouă metodă, raportul volumetric, care ține cont atât de cele două dimensiuni principale ale îmbinării – adâncimea și diametrul deformat al nitului – cât și de forma nitului deformat

6.2. Contribuțiile autorului

- Prima îmbinare reușită a unui polimer armat cu fibră de sticlă cu un nit metalic, prin FricRiveting
- Demonstrarea fezabilității nituirii prin frecare pentru mai multe combinații de materiale: PEI-GF/AA2024, PEI-GF/Ti gr.2, P-GF/Ti gr.3, P-GF/Ti gr.5
- Introducerea și validarea unui nou concept pentru evaluarea performanțelor mecanice ale îmbinărilor nituite prin frecare – raportul volumetric
- Optimizarea procesului FricRiveting pentru îmbinări suprapuse PEI-GF/Ti gr.2

- Propunerea unui design inovativ pentru îmbinarea profilelor din PEI-GF/AA2198/Ti gr.2, bazat pe nituirea prin frecare

7. Recomandări pentru cercetări viitoare

- Studiul fezabilității nituirii prin frecare pentru alte combinații de materiale, mai eficiente din punct de vedere economic
- Încercări la oboseală
- Dezvoltarea și îmbunătățirea performanțelor mecanice prin geometrii adecvate ale elementelor de îmbinat și tratări ale suprafețelor (abraziune, tratament chimic etc.)
- Pentru design-ul propus de îmbinare prin nituire prin frecare a suprapunerilor PEI-GF/AA2198/Ti gr.2 pentru profile utilizate în construcția de poduri, este necesară stabilirea unui coeficient de siguranță, calculat conform conceptului de siguranță al Eurocode 0