

Raport final de activitate

Perioada implementare: 2020-2023

Proiectul cu titlul: *Compozite termorigide epoxidice prototipate cu jet de cerneală reactivă - Reactive Inkjet Printing of Epoxy Thermoset Composites (RIPE4TEC)*

Responsabil proiect,
Prof. dr. ing. Dan Mihai Constantinescu

Obiective

Propunerea a avut două obiective științifice: 1) prototiparea cu jet de cerneală reactivă pentru rășini epoxidice-poliaminice, fiind inclusă dezvoltarea de cerneluri adecvate acestui scop și de tehnologii asociate de tipărire folosind capete de tipărire obișnuite; 2) proiectarea prin simulare numerică, tipărirea și încercarea mecanică a compozitelor epoxidice cu structură multiscalară având rezistență și tenacitate ridicate în raport cu materialele epoxidice omogene. Tehnologia de printare a fost adaptată pentru folosirea acestor cerneluri. Au fost create materiale “voxel cu voxel”, deschizând calea spre producerea componentelor cu microstructura precis controlată. Astfel, a fost proiectată microstructura și realizate simulările numerice folosind metoda elementelor finite pentru a obține proprietăți globale stabilite, ulterior fiind adăugate în timpul tipării și nanoparticule de silica pentru a îmbunătăți proprietățile mecanice ale materialelor termorigide obținute.

Dezvoltarea materialului epoxidice tipărite are în vedere îmbunătățirea tenacității fără a se reduce rigiditatea și rezistența materialului. Aceasta se va realiza prin combinarea de subdomenii moi și tari în interiorul materialului, oarecum similar cu structura materialelor tenace naturale, cum ar fi oasele și sidetul. În inginerie, perlita, un tip de oțel, este compusă de asemenea din subdomenii tari-fragile și moi-ductile. La fel că și în oase sau sidet, subdomeniile moi au rolul de a opri fisurile, iar subdomeniile tari dau rezistență și rigiditate.

Gradul de atingere a rezultatelor estimate

Partenerul din Austria, BTO-Epoxy, a fost desemnat să producă cernelurile reactive utilizate în cadrul proiectului. În prima etapă a proiectului din anul 2020 au fost propuse spre testare și tipărire trei sisteme. În urma testelor inițiale a fost determinat ciclul termic de reticulare a celor trei sisteme și viscozitatea rășinilor, variația viscozității stabilită la 30 °C cu viteza de forfecare și cu turația. Joanneum Research - MATERIALS, directorul proiectului, a studiat raportul stoichiometric normal rășină: întăritor (base: hardener – B:H) care a fost determinat inițial ca 2,75:1 (notat MR – mixing ratio) și s-au studiat efectele asupra proprietăților materialelor obținute a unui raport sub-stoichiometric și a unuia supra-stoichiometric. După această etapă s-a stabilit și varianta de sistem epoxidic potrivită pentru a fi folosită în procesul de prototipare cu jet de cerneală reactivă, care a fost numit 4,5 – o

combinație între sistemele 4 și 5 propuse inițial. Au fost studiate și posibile efecte de îmbătrânire asupra sistemului epoxi. Au fost realizate loturi de material turnate (casted) și tipărite (printed).

În a doua etapă din anul 2021, la sfârșitul lunii aprilie, Joanneum Research – MATERIALS a reușit o foarte bună tipărire la 60 °C cu rezoluții de tipărire de 600 dpi pentru B și 475 dpi pentru H, obținându-se un strat de grosime aproximativ 50 μm. Timpul de întărire al fiecărui strat (ansamblul rășină și întăritor) este de aproximativ 8 minute, după care un nou strat se poate tipări. Astfel au fost realizate eșantioane cu 6 straturi și o grosime de aproximativ 310 μm. Succesiune de tipărire a straturilor a fost notată B+H (B/H) ceea ce înseamnă primul strat B apoi urmând H sau H+B (H/B) pentru care succesiunea de aplicare a straturilor a fost schimbată. Toate eșantioanele au fost tipărite pe un substrat din PET (Melinex) de grosime 125 μm astfel încât să poată fi îndepărtate ușor pentru a fi apoi testate mecanic. Pentru eșantioane de grosime mai mare de 3 straturi, așadar >150 μm, este suficientă îndoirea substratului pentru a putea îndepărta eșantionul.

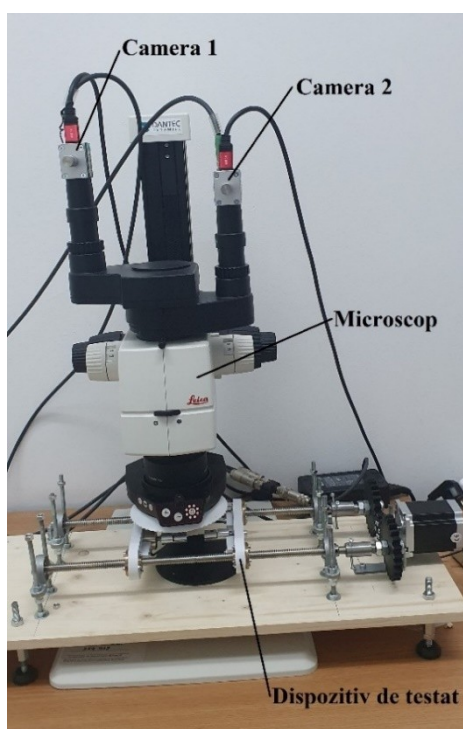
Joanneum Research – MATERIALS a tipărit inițial mai multe loturi de eșantioane cu 3, 6 și 10 straturi. Grosimea unui strat fiind de aproximativ 50 μm. Ulterior, au fost printate eșantioane cu 10 straturi în ordinea rășină (Base - B) apoi întăritor (Hardener – H) numită B/H sau ordinea a fost inversată, adică întăritor (Hardener – H) apoi Rășină (Base - B) numită H/B. Au mai fost produse și livrate și eșantioane turnate de grosime aproximativ 0,5 mm. Au fost încercate la tracțiune numai eșantioanele cu 10 straturi, de grosime totală aproximativă 0,5 mm, pentru grosimi mai mici fiind foarte dificilă prelucrarea epruvetelor, dar mai ales testarea mecanică. În Tabelul 1.1, în care sunt prezentate toate loturile realizate experimental, primele teste au fost realizate pe loturile tipărite în luna iulie 2021 în 10 straturi în ordinea B/H sau H/B, respectiv B/H + H/B + B/H... pentru a alătura două straturi de întăritor (H) și două straturi de rășină (B). După aceste prime încercări s-a constatat că difuzia între straturi nu este suficient de bine realizată și s-a decis ca distribuția întăritorului să fie realizată prin picurarea de întăritor (H) – un pixel - într-un dreptunghi de dimensiuni specificate de rășină (B), până la sfârșitul anului 2021 fiind realizate variante cu dimensiuni de 3x3 și 5x5 pixeli, în ideea că întăritorul va difuza mai uniform în volumul de rășină care îl înconjoară și se va îmbunătăți comportarea mecanică a materialului realizat. Această variantă de tipărire nu a dat însă rezultate bune, difuzia întăritorului nefiind uniformă și s-a decis ca din următoarea etapă să se realizeze materiale tipărite gradate funcțional, respectiv stratul de întăritor (H) să fie interpus între 3, 5, 7 sau 9 straturi de rășină (B) succesive.

După mai multe etape cu iterații și ajustări, tipărirea s-a făcut folosind o platformă de tipărire Pixdro LP50 cu un ansamblu de două capete de tipărire – unul pentru rășină și celălalt pentru întăritor, fabricate de Suess Microtec de tip Spectra S-series fiecare având 128 de doze de tipărire. Capul de tipărire cu rășină de tip SL a avut o picătură cu volum de 80 pL, iar cel pentru întăritor de tip SM a avut volumul unei picături de 50 pL. Tipărirea se realizează unidirecțional și bidirecțional la o rezoluție de 550 dpi, iar după optimizarea parametrilor de printare s-a obținut un raport de amestecare MR ca B:H = 2:1 (w/w) la aceeași rezoluție, raport stoichiometric care s-a considerat a fi bun, fiind apropiat de cel determinat inițial ca

fiind teoretic optim. Acest raport de amestec a fost considerat ca referință. Alte rapoarte de amestecare sub- sau supra-stoichiometrice au fost obținute pe parcursul cercetărilor din cadrul proiectului.

Partenerul Universitatea POLITEHNICA din București (UPB) a folosit pentru încercările mecanice experimentale un sistem de măsurare a deplasărilor ce utilizează metoda corelării digitale a imaginii produs de firma Dantec Dynamic, numit Q-400 MicroDIC (μ DIC), cu microscop Leica, având lentile cu distanța focală 50 mm și camere de 5 megapixeli, având dedicată platforma software ISTRA4D, așa cum se poate vedea în Fig. 1a.

Dispozitivul cu ajutorul căruia se face testarea mecanică la tracțiune este amplasat în așa fel încât prin microscop să se poată măsura deformațiile epruvetei fixate în dispozitiv. Epruveta testată se vopsește cu un fond de vopsea de culoare albă peste care se vopsesc picături fine de vopsea neagră care sunt identificați de soft ca pixeli unic identificabili în raport cu cei alăturați. Principiul metodei corelării digitale a imaginii (digital image correlation – DIC) nu este descris aici dar, în esență, softul poate măsura deplasările din plan ale epruvetei, putând fi analizată orice zonă din câmpul vizual, astfel fiind posibilă determinarea constantelor elastice ale materialului și a curbei caracteristice. Observarea sub microscop (Fig. 1b) permite stabilirea în detaliu a efectelor locale produse în timpul încercării la tracțiune.



a)



b)

Fig. 1. Sistem de testare mecanică la tracțiune folosit de UPB: a) sistemul Dantec Q-400 MicroDIC care folosește metoda corelării digitale a imaginii; b) observarea sub microscop în timpul efectuării încercării la tracțiune.

Sistemul de testare mecanică la tracțiune (Fig. 2), realizat în departamentul Rezistența Materialelor, folosește pentru măsurarea forței un traductor de forță HBM cu 1000 N forță maximă. Echipamentele care permit comanda dispozitivului sunt arătate în Fig. 2. Viteza de încărcare poate fi reglată cu ajutorul controlorului

motorului. Semnalul primit de la traductorul de forță este amplificat și achiziționat de o placă de achiziție în timp real a sistemului Q-400, făcându-se o calibrare a forței. Forța măsurată este înregistrată împreună cu deplasarea măsurată cu sistemul μ DIC. Placa de comandă permite realizarea de încercări la tracțiune sau la compresiune. În aceste seturi de teste s-au făcut numai încercări la tracțiune. Pe baza deplasărilor măsurate prin DIC sunt apoi stabilite deformațiile specifice pe direcție longitudinală și transversală.

Sistemul de testare mecanică la tracțiune (Fig. 2) a fost îmbunătățit pe două planuri. Unul constructiv, astfel încât cadrul sistemului a fost realizat din profile de aluminiu, acestea fiind mult mai rigide decât cele ale sistemului folosit în etapa inițială a proiectului. Totodată s-au introdus două lagăre noi la jumătatea cadrului pentru da o mai bună stabilitate în plan vertical a sistemului de acționare. În Fig. 2a este prezentat noul cadru de aluminiu al sistemului de testare.

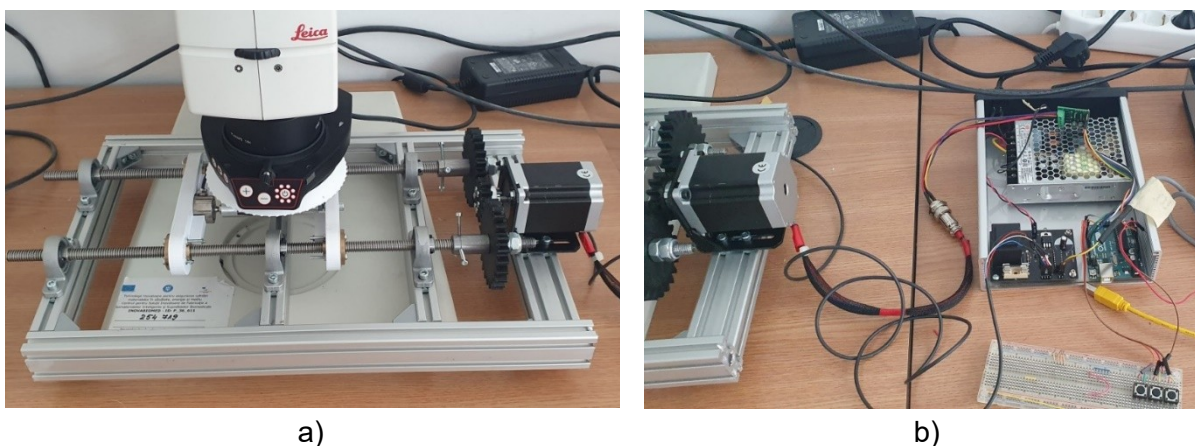


Fig. 2. a) Noul cadru de aluminiu al sistemului de testare; b) Cutia cu componentele de comandă ale echipamentului.

În al doilea rând, elementele electronice din componența sistemului de încărcare au fost amplasate într-o carcasă de aluminiu. În Fig. 2b este prezentată cutia de comandă a sistemului cu capacul demontat pentru a se vizualiza componentele interne.

În a treia etapă din anul 2022 s-a rafinat tehnologia de tipărire cu jet de cerneală fiind realizate epruvete cu gradare funcțională în plan și pe grosime.

Au fost luate în considerare patru tipuri de loturi de materiale tipărite (etichetate P), iar comportamentul lor este comparat cu mostrele turnate (etichetate C, respectiv casted) cu MR (raport de amestecare (mixing ratio, MR) nominal similar. Într-un articol trimis spre publicare în anul 2023 raportul MR s-a notat R:H, așa cum este descris în continuare. S-au realizat loturi de material printate cu gradare în plan și în afara planului, după cum urmează:

- Tip P1: Probe tipărite nominal ca fiind omogene cu diverse MR. Straturile individuale de R (R – resin) și H (H – hardener) sunt depuse în secvența RH/RH... cu dpi-ul stratului H selectat astfel încât să atingă MR specificat în fiecare strat combinat RH. Cazul implicit este cel în care toate straturile sunt depuse în direcția Y, adică direcția verticală; direcția X este orizontală. Aceste eșantioane sunt notate cu P1-‘MR’, unde MR este raportul nominal de amestecare. Sunt de asemenea tipărite eșantioane de material cu direcția de

imprimare alternativă, X și Y, în straturi succesive. Aceste loturi de material sunt notate cu P1-'MR'-XY.

- Tip P2: Probe tipărite cu gradare (variație) în plan la rapoarte de amestecare variabile. Stratul R este de peste 550 dpi. Folosind aceeași dpi, două straturi discontinue de H sunt depuse în direcțiile X și, respectiv, Y. Stratul de H este de peste la fiecare al n-lea rând de picături fără întăritor de peste între ele, așa cum se arată schematic în Fig. 3a. Raportul mediu de amestecare depinde de n și ia valorile de 5:1, 4:1 și 3:1 pentru n = 5, 4 și, respectiv, 3. Aceste eșantioane sunt notate ca P2-'MR'-XY-'n'p, de exemplu P2-3:1-XY-3p indică faptul că n = 3 care rezultă în MR = 3:1.
- Tip P3: Probe tipărite cu mod de tipărire similar în plan la un raport de amestec fix. Stratul R este de peste 550 dpi. Folosind aceeași dpi, m straturi de H sunt depuse suprapuse în direcția Y la fiecare al n-lea rând de picături fără întăritor de peste între ele, așa cum se arată schematic în 3b, astfel încât raportul mediu de amestecare să rezulte ca fiind 2:1. Aceste eșantioane sunt notate ca P3-'MR'-'n'p, de exemplu P3-2:1-3p indică o probă de raport de amestecare MR = 2:1 imprimată prin depunerea deasupra fiecărui strat de rășină R a 3 straturi de întăritor H la fiecare 3 rânduri de stropi.
- Tip P4: Printare în afara planului – pentru a urmări efectul gradării funcționale a materialului tipărit - de straturi alternative de MR = 2:1 și MR = 4,5:1. Fiecare strat individual R și H este continuu și fiecare succesiune a raportului stoichiometric (2:1 sau 4,5:1) este considerată nominal omogenă, așa cum se prezintă în Fig. 3c. Materialul are structură simetrică în direcția grosimii, straturile exterioare având MR = 2:1. Acest mod de tipărire necesită imprimarea a 11 straturi. Eșantioanele sunt notate cu P4-2:1/4.5:1-out. A fost produsă și o variantă de acestui tip de material cu secvența gradată în afara planului formată din două straturi groase, cu 2 straturi de MR = 2:1 urmate de două straturi de MR = 4,5:1 etc. Aceste eșantioane sunt notate cu P4-2:1/4,5:1-2out (out în codificare înseamnă în afara planului).

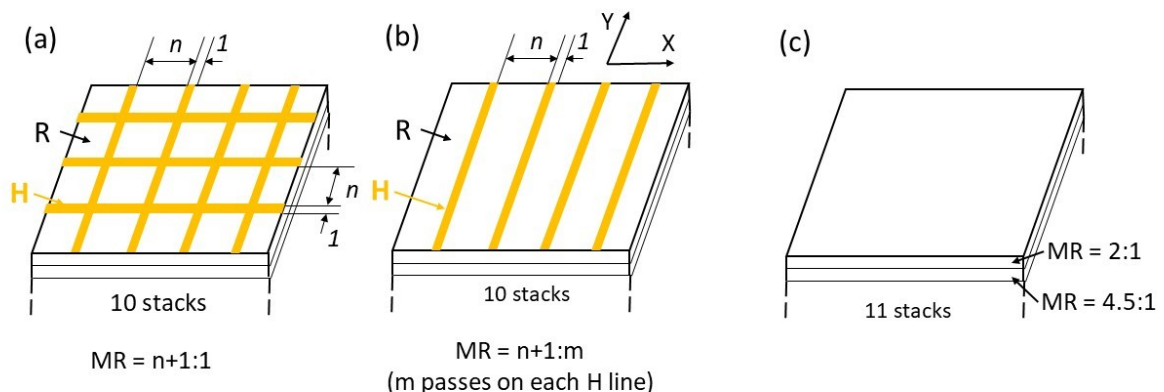


Fig. 3. Reprezentarea schematică a modurilor de tipărire (printed – P) a materialelor epoxidice eterogene de tipul: (a) P2, (b) P3 și (c) P4. Dungile galbene reprezintă întăritorul (H – hardener) și modul de poziționare în strat. Stratul alb poziționat dedesubt este format numai din rășină, notat R (resin).

Eșantioanele din material turnat (printed) au fiecare o grosime a fiecărui strat (layer) turnat de aproximativ 500 μ m, fiind turnate succesiv 10 straturi pentru multe

dintre loturile realizate, respectiv grosimea eșantionului din care sunt prelevate epruvetele ajungând să fie de 0,5 mm.

În Fig. 4a sunt prezentate epruvete vopsite înainte de testarea la tracțiune cu secțiunea de rupere după testare, iar în Fig. 4b, pentru exemplificare, pentru una dintre epruvetele testate, se observă câmpul deformațiilor specifice principale maxime localizate în secțiunea de rupere în ultimul cadru disponibil.

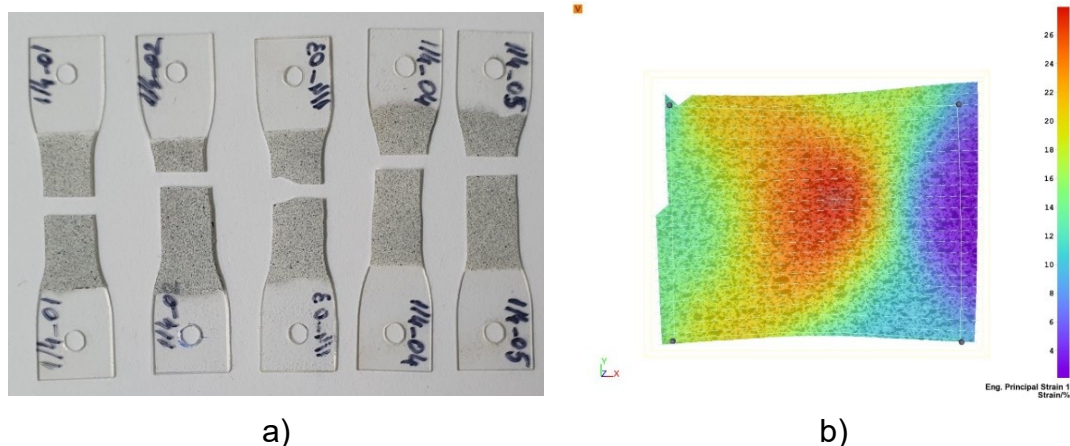


Fig. 4. a) Epruvete testate cu metoda DIC; b) Deformațiile specifice principale maxime determinate experimental înainte de rupere.

Ultimul lot de materiale tipărite trimise în anul 2022 a avut 60 de straturi, respectiv cu o grosime totală a succesiunii straturilor de aproape 3 mm. În anul 2023 au fost turnate și tipărite pentru prima oară materiale cu nanoparticule de silica. Acestea au fost turnate sau tipărite cu 21, 22 sau 26 de straturi. Deocamdată UPB a primit numai eșantioane turnate. După încheierea proiectului cercetările vor continua și pe celelalte loturi de materiale.

Dezvoltarea numerică a algoritmilor de optimizare în funcție de proprietățile dorite ale eșantioanelor tipărite ca structuri periodice a fost realizată numai în UPB. S-au imaginat zece variante de distribuție predefinită (patern) a materialului tare și moale în diverse RVE (representative volume element) pentru care condițiile de simetrie reflexivă, care reduc modelul de calcul, nu mai sunt necesare așa cum se impunea la începutul modelărilor. Cele zece variante de RVE analizate pentru a obține structuri periodice care să satisfacă diverse cerințe au fost implementate și rulate în Ansys APDL în domeniul liniar elastic pentru extragerea completă a matricelor de rigiditate în formă omogenizată pentru spații de proiectare cu 16 pixeli de diferite forme (pătrat, romb, hexagonal, cerc). Pentru a elimina dependența rezultatelor de finețea discretizării (în special pentru modele în care fiecare pixel dreptunghiular era discretizat într-un singur element finit) s-au efectuat analize de convergență și s-au ales discretizări mai fine adaptate fiecărui caz în parte. S-a constatat că pixelii de formă circulară sunt mai puțin sensibili la finețea discretizării și din acest motiv șapte din variantele de alegere a RVE au fost dublate de folosirea pixelilor circulari, deși în acest fel fracția volumică a materialului tare se reduce ușor deoarece s-a considerat că între pixelii circulari din material tare se dispune material moale. S-au analizat toate posibilitățile de alegere a fracțiilor volumice pentru toate

RVE analizate, rezultând astfel un număr foarte mare de realizări care poate fi folosit într-un algoritm de tip *machine learning*.

S-au considerat distribuții de material "tare"/"moale" în volume reprezentative (RVE) ale structurilor periodice 2D de formă dreptunghiulară sau pătrată cu două plane de simetrie, dar și câteva distribuții în geometrie triunghiulară și hexagonală care se reduc la zone dreptunghiulare și pentru care condițiile la limită ale structurilor periodice se pot aplica mai simplu. Acestea, în zece variante de distribuție predefinită ("patern") au fost rulate iar rezultatele obținute au fost prelucrate și interpretate în detaliu.

Reamintim că toate cele zece modele au fost definite și proiectate într-un spațiu cu 16 dimensiuni, adică pixelii de diferite forme, pătrat, romb, hexagonali și circulari, deși formează distribuții complexe sunt controlați doar de 16 locații predefinite de așezare. Dependența rezultatelor de finețea discretizării a fost înlăturată prin analize de convergență și discretizări adaptate fiecărui caz în parte. Totodată, deoarece rulările au fost efectuate pentru toate posibilitățile de așezare a materialului, dar și pentru toate fracțiile volumice posibile ale variantelor alese, se poate afirma că distribuțiile prezentate în continuare sunt cele mai eficiente pentru a obține una dintre proprietățile de interes practic. Astfel s-au creat funcții specializate în Matlab cu ajutorul cărora s-au extras proprietăți extreme ale distribuțiilor de material proiectate.

Ca un exemplu, se consideră o structură periodică 2D infinită, pentru care RVE conține 4 pixeli pe orizontală și 4 pixeli pe verticală. Pentru fracția volumică a materialului tare $f_v = 0,325$ (8 pixeli din material tare) pixeli circulari în Fig. 5 se prezintă distribuțiile de materiale care conduc la primele 6 valori maxime pentru E_x .

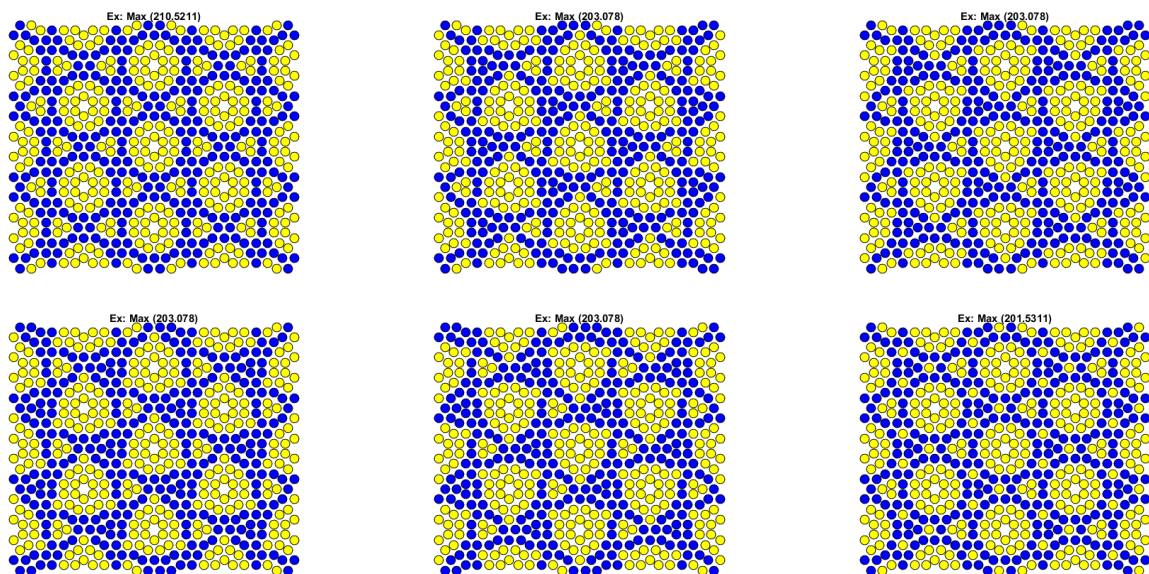


Fig. 5. Primele 6 distribuții de material care asigură o valoare E_x maximă, pentru pixeli circulari și 8 pixeli din material tare ($f_v = 0.325$). Culoarea albastră corespunde materialului tare. Culoarea galbenă și golurile albe corespund materialului moale.

Pentru același caz al raportului stoichiometric cu pixeli circulari în Fig. 6 se prezintă distribuțiile de materiale care conduc la primele 6 valori minime pentru E_x .

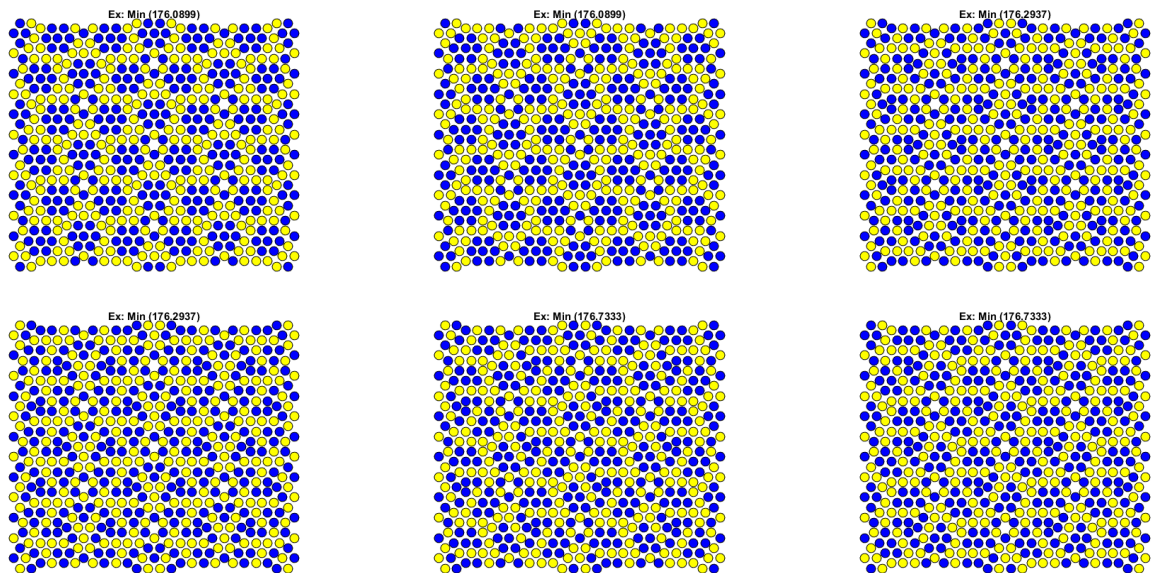


Fig. 6. Primele 6 distribuții de material care asigură E_x minimă, pentru pixeli circulari și 8 pixeli din material tare ($f_v = 0.325$).

Modelele descrise au fost implementate și în algoritmi de optimizare bazați pe metoda greedy și pe metoda simulated annealing, pentru diferite funcții de optimizare stabilite până în prezent pentru a îmbunătăți proprietățile mecanice ale materialelor tipărite cu jet de cerneală atunci când spațiul de proiectare este mai mare decât 4x4 pixeli și metoda “brute force” nu mai este aplicabilă.

Activitatea de simulare numerică a condus către prezentarea unor prototipuri de materiale realizate cu microstructură controlată prin utilizarea unor metode noi de proiectare. Controlul microstructurii se poate realiza prin impunerea unor simetrii periodice prin care volumul reprezentativ al elementului se repetă prin condiții de periodicitate impuse. Astfel, se propun a fi realizate mai multe prototipuri de materiale care să aibă microstructura controlată.

Atribuirea și exploatarea rezultatelor obținute în cadrul proiectului

Activitățile de cercetare s-au desfășurat în comun, împreună cu cei trei parteneri austrieci. Periodic s-au organizat workshop-uri online, ultimul urmând a se desfășura la sfârșitul lunii mai. Nu au existat până în prezent cereri de brevet comune.

O componentă importantă a fost dată de implicarea tinerilor doctoranzi și post-doctoranzi în activitățile de cercetare realizate în cadrul proiectului.

Pe baza încercărilor experimentale realizate de UPB a fost prezentată oral o lucrare la conferința internațională *4th International Conference on Materials Design and Applications 2022 (MDA 2022)* organizată de universitatea din Porto în perioada 7-8 iulie 2022.

Au mai fost prezentate oral două lucrări cu determinările experimentale și numerice obținute în cadrul proiectului la *11th European Solid Mechanics Conference (ESMC 2022)*, Galway, Ireland, în perioada 4-8 iulie, 2022. Conferința a fost organizată de National University of Ireland, Galway. La conferință au fost prezenți 1100 participanți.

Cel mai important articol, care se bazează pe rezultatele obținute în urma

cercetărilor experimentale realizate în cadrul proiectului, având 15 autori membri ai echipelor de cercetare partenere din Austria și din România (UPB), este în fază finală de recenzie. Articolul va apărea în revista ACS Applied Polymer Materials având un factor de impact în anul 2022 de 4,855. Referința este Krawczyk K., Wheeldon A., Kamble M., Popovic K., Patter P., Postl M., Beleggratis M., Sieberer M., Bandl C., Kern W., Constantinescu D.M., Baciuc F., Stochioiu C., Apostol D.A., Picu C.R., *Additive Printing of Thermally Cured Two Component Epoxy: A Route to Mesoscale Structuring for Improved Ductility*, ACS Applied Polymer Materials, 2023

Impactul rezultatelor obținute

În cadrul proiectului, în etapa 2 din anul 2021, s-a realizat participarea la conferința *Virtual 4th International Conference on Structural Integrity ICSI2021*, organizată de Universitatea din Porto, care a avut loc online în perioada 30 august - 2 septembrie, 2021. Au fost înscrise două lucrări, prezentările fiind făcute de primii doi autori – doctoranzi și membri ai echipei de cercetare. Lucrările in extenso au fost publicate ulterior în *Procedia Structural Integrity*, indexată ca proceedings WOS, cu acknowledgement la proiect:

- 1) Coropețchi I.C., Vasile A., Sorohan Șt., Picu C.R., Constantinescu D.M., *Stiffness Optimization Through a Modified Greedy Algorithm*, *Procedia Structural Integrity*, 37, 755-762, 2022
- 2) Vasile A., Coropețchi I.C., Sorohan Șt., Picu C.R., Constantinescu D.M., *A Simulated Annealing Algorithm for Stiffness Optimization*, *Procedia Structural Integrity*, 37, 857-864, 2022

În cadrul proiectului, în etapa 3 (din anul 2022) a fost prezentată ca rezumat de două pagini și poster o lucrare cu rezultatele numerice obținute în cadrul etapei, la *38th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics (DAS 38)*, Poros, Grecia, 20–23 septembrie, 2022. Această lucrare, în formă extinsă, a fost acceptată, urmând a fi publicată, având referința

Vasile A., Coropețchi I.C., Constantinescu, D.M., Sorohan Șt., Picu C.R., *Simulated annealing algorithms used for microstructural design of composites*, *Materials Today Proceedings*, indexată WOS, 2023

O altă lucrare a fost prezentată tot ca poster în anul 2022 la *6th International Conference on Design and Technologies for Polymeric and Composite Products (POLCOM 2022)*, organizată în UPB, în perioada 23-26 noiembrie 2022. Lucrarea a fost acceptată și va apărea ca articol în revista *Macromolecular Symposia*, editată de Wiley cu factor de impact 0,9 în 2022.

Vasile A., Coropețchi I.C., Constantinescu, D.M., Sorohan Șt., Picu C.R., *Efficiency of simulated annealing algorithms used for improving the in-plane stiffness of inkjet printed composites*, *Macromolecular Symposia*, Wiley, 2023

Considerăm că cei doi doctoranzi au avut posibilitatea să se perfecționeze în utilizarea metodelor de simulare stocastică și a algoritmilor de optimizare.

Pe baza rezultatelor numerice obținute în cadrul proiectului pentru materiale gradate funcțional au fost publicate două articole în revista *Romanian Journal of Technical Sciences. Applied Mechanics*, indexată în bazele de date internaționale

Index Copernicus și *MathSciNet*, revistă editată de Academia Română, având referințele

- 1) Sorohan Șt., Constantinescu, D.M., *Stress uniformization using functionally graded materials*, *Ro. J. Techn. Sci. – Appl. Mechanics*, **66**, 2, 167–181, 2021
- 2) Sorohan Șt., Constantinescu, D.M., *Tailoring of functionally graded spheres using a uniform stress condition*, *Ro. J. Techn. Sci. – Appl. Mechanics*, **68**, 1, 81-96, 2023

Rezultatele experimentale și numerice obținute confirmă posibilitatea atingerii scopului de a tipări materiale cvasi-omogene cu proprietăți comparabile cu ale materialelor turnate. Rolul simulărilor numerice și a optimizărilor efectuate este de a îmbunătăți modalitățile de tipărire a materialelor prin controlul microstructurii în timpul procesului de tipărire. Distribuția nanoparticulelor de silica se va face în continuare controlat, pe baza rezultatelor obținute prin simulări numerice și apoi prin determinarea comportării mecanice a acestor materiale, prin încercări experimentale, în vederea îmbunătățirii proprietăților mecanice a materialelor tipărite cu jet de cerneală reactivă.

Un aspect foarte important îl constituie crearea unui colectiv de cercetare internațional, competențele fiecărei echipe de cercetare fiind valorificate constructiv. În plus, a fost posibilă definirea unor noi direcții de cercetare care fac obiectul unei propuneri de proiect în acest an, în cadrul competiției M.ERA-NET.