

STUDY OF THE GEOMETRY CHANGE IN THE DOUBLE- LAP ADHESIVE JOINTS

STOICA Constantin- Romică

Facultatea: Inginerie Industrială și Robotică, Specializarea: Siguranța și integritatea structurilor, Anul de studii: 5, e-mail: stoica.romica.97@gmail.com

Conducător științific: Ș.L. dr. ing. **Dragoș- Alexandru APOSTOL**

REZUMAT: The mechanics of hybrid additively manufactured PETG and twill 2x2 carbon fiber double lap joints with 3M EC2216 adhesive under tensile loading are investigated using experimental and FEM models for stress and strain analysis. The classical approach on the mechanics of adhesive bonded joints focusses mainly on the failure of the adhesive layer, in this paper adherent geometries were modified and the effect of slot was investigated to evaluate the influence on the stress concentrations in the joint. The result show promising solutions for double lap joints optimization of strength and weight, with a significant peel and shear stresses reduction.

CUVINTE CHEIE: asamblări dublu eclisate, adeziv, structuri hibride, compozite laminate, fabricare aditivă

1. Introducere

În prezent, în inginerie se deosebesc mai multe moduri de a îmbina diferite componente: mecanic (șuruburi, nituri etc.); fizic (sudură etc.) și chimic (adezivi). [1] Îmbinările cu adezivi au potențialul de a înlocui celelalte tipuri de îmbinări mai ales în cazul compozitelor stratificate datorită legăturilor chimice dintre matricea materialului compozit și adezivul care este aplicat. Un alt avantaj al acestor tipuri de îmbinări este că elimină concentratorii de tensiune sau găurile pentru asamblare din ansamblu. Asamblările dublu eclisate au o geometrie relativ simplă cu tensiuni de jupuire mici la extremitățile asamblării ceea ce le face preferate, alături de asamblările simplu eclisate, pentru determinarea stării de tensiune în adezivi și pentru asigurarea calității asamblărilor cu adezivi. [2]

Îmbinările cu adezivi sunt adesea testate pentru stabilirea calității procesului de îmbinare care poate fi afectat de diverși factori precum: gradul de contaminare al suprafeței, consistența aplicării, modul de amestec al componentelor adezivilor sau a procesului de reticulare al acestora (timp, temperatură, presiune etc.), dar și schimbări în ceea ce privește calitatea suprafeței de lipire sau rezistența mecanică a adezivilor și a aderenților. Alte aspecte importante care au importanță în proiectarea asamblărilor cu adezivi sunt influența factorilor externi: umiditate, oboseală mecanică ori datorată variației temperaturii, vibrații, impact sau condiții deosebite din aplicații speciale precum vacuum, radiații etc. [3]

Structurile hibride alcătuite dintre piese produse aditiv și compozite polimerice cu fibre continue au avantajul unei interfețe care combină legăturile mecanice și fizice și posibil chimice în funcție de materialele utilizate pentru aderenți sau adeziv. În Figura 1 a fost analizată la microscopul optic interfața dintre un adeziv poliesteric cu fibre scurte de sticlă și o piesă produsă aditiv. Se observă ca adezivul pătrunde până în profunzimea suprafeței realizând o legătură fizică cu piesa produsă aditiv prin tehnica FDM cu un strat de 100 μm, secțiunea a fost făcută pe direcția de printare.

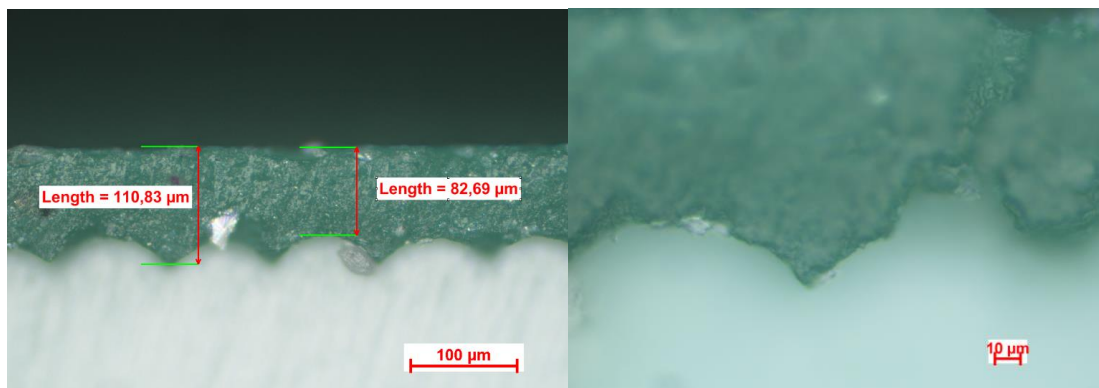


Figura 1 Interfața dintre un adeziv poliestic cu fibre de sticlă și o piesă produsă aditiv

Înălțimea stratului de printare și rugozitatea pieselor sunt direct proporționale. Efectul rugozității suprafeței pe care se aplică adeziv este de creștere a proprietăților asamblării. [4] Astfel, împreunarea compozitelor cu piese produse aditiv este promițătoare din punct de vedere ar rezistenței, dar și al avantajului de a realiza forme complexe, relativ rapid și la un cost redus.

Avantajele asamblărilor cu adezivi este acela că permit asamblarea materialelor disimilare. [5] Astfel, este posibilă îmbinarea compozitelor polimerice cu piese produse aditiv. Pentru obținerea eficienței maxime a unei asamblări cu adezivi, este de dorit ca distribuția de tensiuni din adezivi să fie una uniformă. În realitate acesta este un lucru dificil de realizat datorită concentrării de tensiuni de la extremitățile suprapunerii asamblărilor. [1]

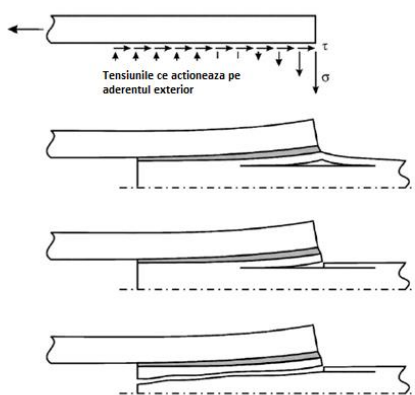


Figura 2 Moduri de cedare a aderenților din materiale compozite datorate tensiunilor de jupuire [5]

Este esențială minimizarea tensiunilor de jupuire atunci când aderenții sunt din compozit deoarece, rășinile folosite pentru compozitele stratificate din aviație sunt de o rezistență mare, dar cantitatea de rășină este una mică pentru a obține materiale cât mai ușoare.

Materialele utilizate în industria aerospațială sunt formate adesea din fibre de carbon de înaltă rezistență și matrici polimerice epoxidice. Astfel, comportamentul lor este puternic anizotrop în ceea ce privește atât rigiditatea, cât și rezistență. În direcția fibrei, compozitele pot fi foarte rezistente și rigide în timp ce proprietățile transversale și de forfecare sunt mult mai mici. Modul transversal (adică prin grosimea laminatului) este doar de două sau trei ori mai mare decât a matricei materialului. Dar principala problemă este rezistența scăzută la întindere transversală, care este de același ordin sau mai mică decât cea a matricei. Îmbinările cu adezivi sunt supuse la încărcarea de

jupuire, astfel încât compozitul va ceda probabil în tensiunea transversală înainte adezivului. La fel ca tensiunile tangențiale, cele de jupuire prezintă un maxim la extremitățile îmbinării ceea ce duce la cedarea compozitului datorita rezistenței transversale (pe grosime) a laminatului. Aderentul din mijlocul îmbinării dublu eclisate se sfâșie, astfel tensiunile de forfecare nu se mai transferă între aderenți.

2. Stadiul actual

Stadiul actual de dezvoltare al îmbinărilor cu adezivi este unul avansat existând în industria aerospațială standarde de pregătire a personalului ce face asamblările cu adezivi, cât și standarde de calitate ale îmbinărilor cu adezivi. Aceste tipuri de îmbinare încep să fie din ce în ce mai des folosite în domeniul spațial, dar utilizarea principală fiind realizarea echipamentelor optice pentru sateliți. [6] Cererea din ce în ce mai mare pentru îmbinări cu o calitate superioară și fiabilitate crescută a dus la crearea programului european de specializare a tehnicienilor ce realizează îmbinări cu adezivi. La momentul actual operatorii care efectuează îmbinări cu adezivi sunt specializați și certificați conform standardului DIN 6701. Alte agenții europene precum Agenția Spațială Europeană (ESA) împreună cu agențiile spațiale naționale și inițiativa EUROSPACE au cerut Comitetului European de Standardizare Spațială (ECSS) să elaboreze un standard dedicat îmbinărilor cu adezivi. [6] [7]

Pentru reducerea tensiunilor în îmbinările cu adezivi se disting două direcții principale: modificarea adezivului și modificarea aderenților. În [5] sunt prezentate numeroase metode de reducere a tensiunilor din asamblările cu adezivi axate pe modificarea geometriei adezivului la extremitățile îmbinării. Geometriile utilizate sunt prezentate în Figura 3, geometriile 2 și 3 nu au prezentat o schimbare a proprietăților îmbinării față de modelul de referință 1.

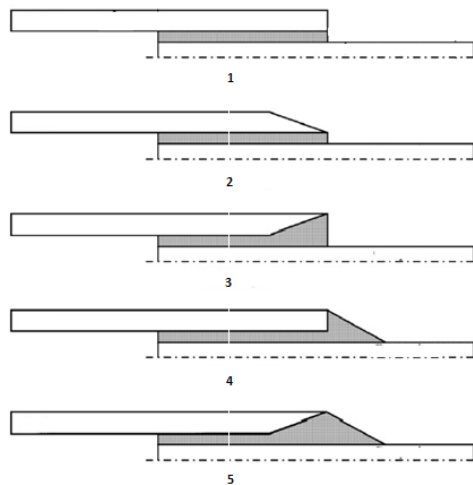


Figura 3 Modificarea geometriei adezivului pentru reducerea tensiunilor de jupuire [5]

Geometriile 4 și 5 din Figura 3 au arătat o creștere a rezistenței îmbinării de până la de două ori în cazul geometriei 4 și de trei ori în cazul geometriei 5, chiar și pentru adaosuri de adeziv la 45° . [5]

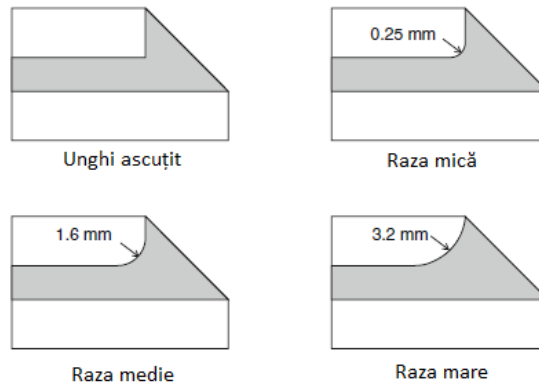


Figura 4 Modificarea geometriei aderenților prin aplicarea unei raze la extremitatea îmbinării [8]

O altă abordare pentru reducerea tensiunilor în îmbinările cu adezivi este modificarea geometriei aderenților pentru obținerea unei distribuții uniforme de tensiuni în adeziv prin reducerea locală a rigidității aderenților. Acest aspect este relevant mai ales pentru compozitele laminate din cauza rezistenței mecanice relativ scăzute pe grosime. [8]

În [9] au fost studiate diferite configurații de asamblări dublu eclisate în care aderenții exteriori erau din oțel și aderențul interior din fibră de carbon. S-a determinat prin MEF și prin experimente că prin introducerea controlată a unui adaos de adeziv și o rază în aderenț rezistența îmbinării s-a triplat.

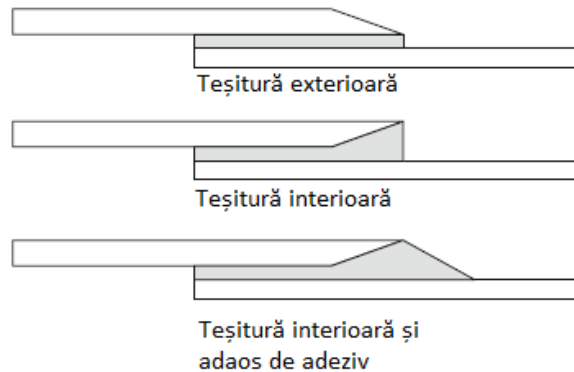


Figura 5 Modificarea geometriei aderenților prin aplicarea unei teșituri [8]

Alte geometrii complexe precum decalajul între straturile de adeziv, rugozitatea suprafeței, creșterea aderenților pot fi folosite pentru a crește rezistența îmbinării. Metoda elementelor finite este avantajoasă în determinarea formei optime a adezivului, dar trebuie avute în vedere și aspectele tehnologice de producere a unei astfel de geometrii. [8]

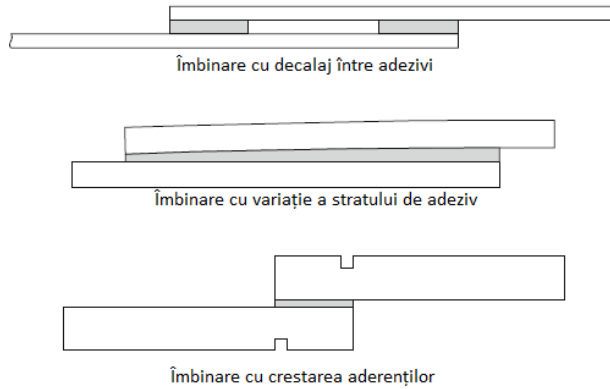


Figura 6 Geometrii complexe de reducere a tensiunilor în adezivi [8]

În [1] este prezentată o analiză parametrică a unui decupaj, s-a constatat că dimensiunile decupajului au influență asupra distribuției de tensiuni în adeziv. Astfel, măbind grosimea decupajului tensiunile tangențiale cât și cele de jupuire se reduc considerabil. Acest lucru este de real interes mai ales în cazul compozitelor stratificate care tind să cedeze înaintea adezivului din cauza rezistenței reduse pe direcție transversală (pe grosime) a materialului.

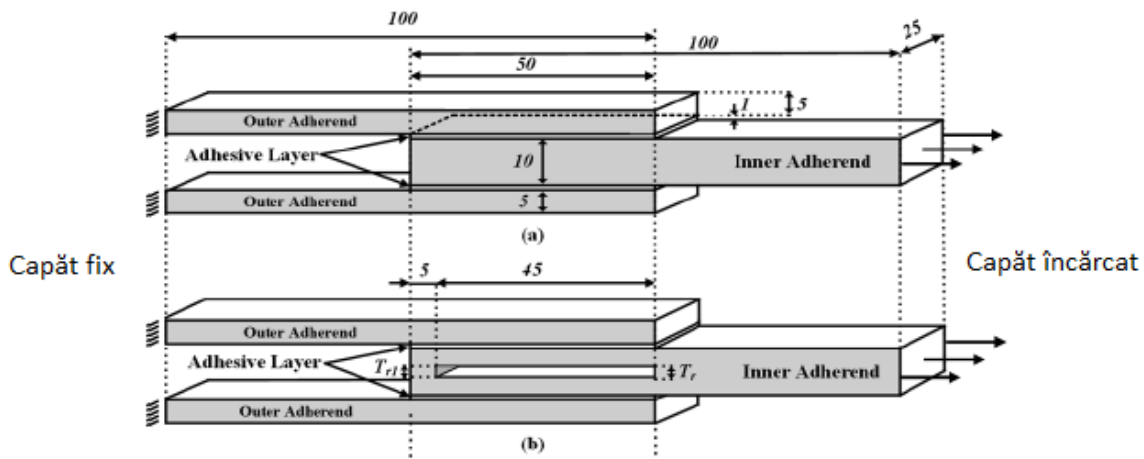


Figura 7 Asamblare dublu eclisată cu decupaj în aderențul central [1]

3. Modelare în ANSYS

Pentru modelarea în ANSYS Workbench s-au creat două geometrii: cu un decupaj cu dimensiunile de 25x1,5mm și un model de referință. Modelele realizate sunt 2D și pe jumătate de structură din cauza limitărilor numărului de noduri și elemente. Aderenții au o lungime de 75 de milimetri, lungimea pe care s-a modelat îmbinarea este de 30 de milimetri. Grosimea aderenților este de 2,5 mm pentru aderenții exteriori și 5 milimetri pentru aderențul interior.



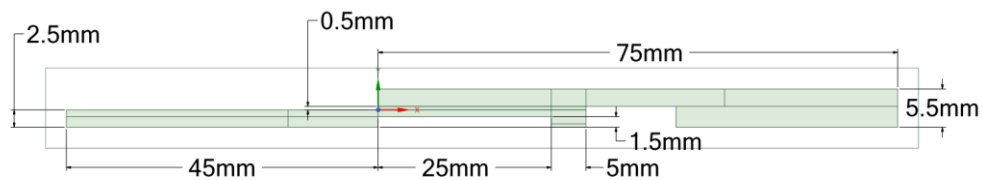


Figura 8 Geometriile asamblărilor dublu eclisate analizate

Discretizarea a fost controlată pentru a crește densitatea de elemente la extremitățile îmbinărilor deoarece în aceste zone se găsesc gradienti mari ai tensiunilor tangențiale și tensiunilor normale (de jupuire). Modelele au fost discretizate cu elemente PLANE182. Materialele utilizate în analiză sunt oțelul implicit din biblioteca de materiale Ansys pentru materialul aderenților și pentru adeziv s-a creat un material nou liniar elastic cu proprietățile din [3]. S-a ales modelarea cu aceste materiale pentru simplitatea modelării lor și eficiența obținerii rezultatelor.

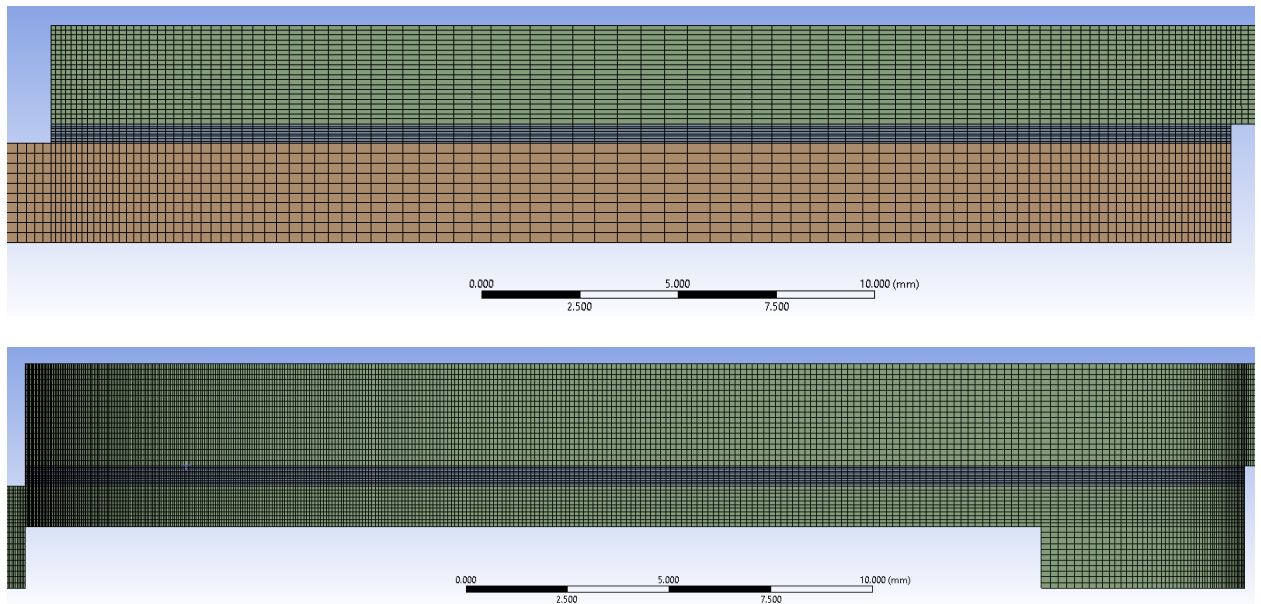


Figura 9 Discretizările celor două modele

Pentru condițiile la limită s-a impus o forță de 2000 newtoni pe aderențul interior. S-a impus simetria pe mijlocul modelului prin blocarea deplasărilor pe axa Y. Blocajul a fost aplicat pe aderenții exteriori prin impunerea unei deplasări nule pe axele X și Y. Pentru o mai bună modelare a condițiilor la limită întâlnite în practică, nu s-a permis rotirea zonei care ar fi fost prinsă în bacurile mașinii de testat.

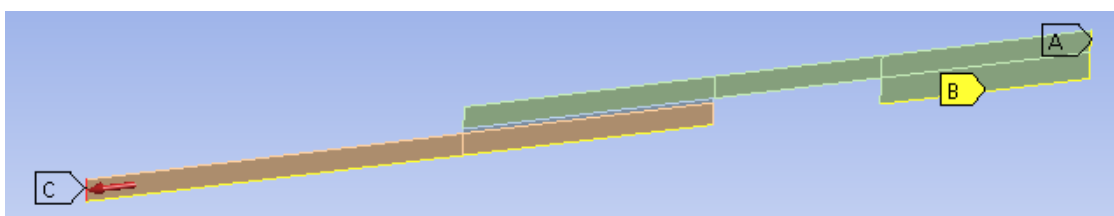


Figura 10 Condițiile la limită aplicate modelului

Tabel 1 Proprietățile adezivului EC 2216 [3]

EC 2216 3M	E [MPa]	ν	σ max [MPa]
2h/66°C	118	0.408	17,2

4. Realizare epruvete

Pentru partea practică a lucrării s-au realizat epruvete din materiale hibride realizate din aderenți printați 3D ramforșați cu preimpregnate din fibră de carbon Twill 2x2 3K cu matrice M79 produsă de Hexcel Composites. Primul pas a fost realizarea aderenților printați din PETG și pregătirea acestora (sablare, degresare etc.), după care s-au aplicat fâșii de preimpregnate direct pe aderențul printat, s-au acoperit epruvetele cu folie antiaderentă, s-a realizat un sac de vid, s-au montat prizele de presiune după care epruvetele au fost introduse la un ciclu termic de reticulare de 8 ore la 75°C și răcire în cuptor. După ce epruvetele s-au solidificat s-a pregătit amestecul de adeziv în 5:7 procente masice conform cu [10]. S-a aplicat în strat subțire și s-au asamblat epruvetele folosind un dispozitiv printat pentru alinierea și controlul grosimii stratului de adeziv. După asamblare epruvetele au fost introduse în etuvă pentru 2 ore la 66°C pentru reticularea adezivului.

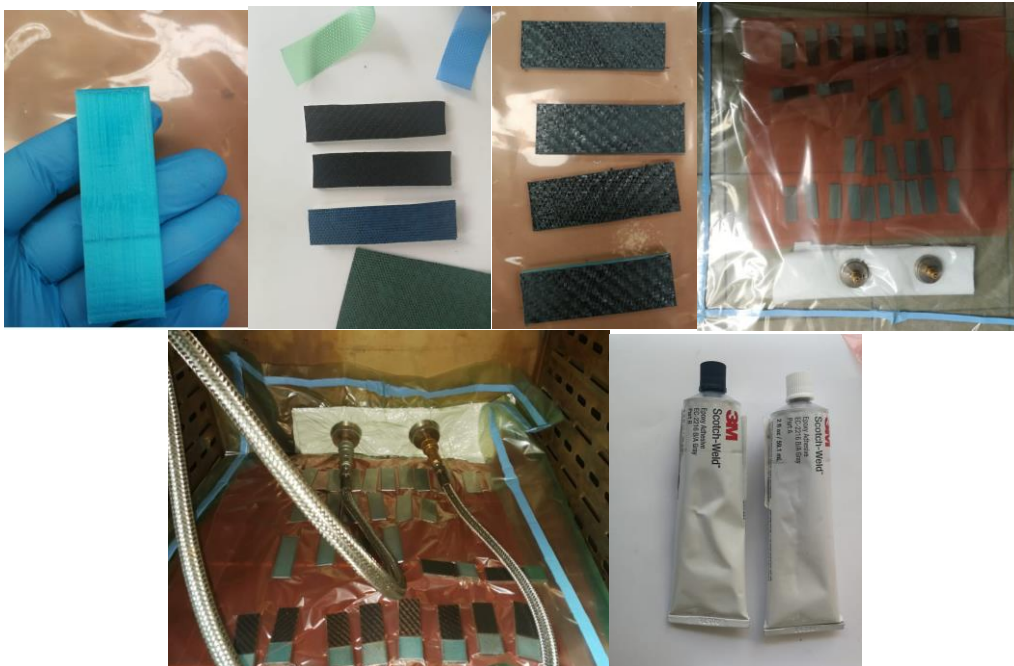


Figura 11 Etapele de pregătire a epruvetelor

5. Rezultate și discuții

În continuare se vor prezenta comparativ rezultatele modelului cu elemente finite și rezultatele experimentale pentru epruvetele de referință și pentru epruvetele cu decupaj.

Distribuția de tensiuni normale (de jupuire) este puternic influențată de prezența decupajului și aceasta are ca efect reducerea tensiunilor cu peste 30% la extremitățile asamblării.

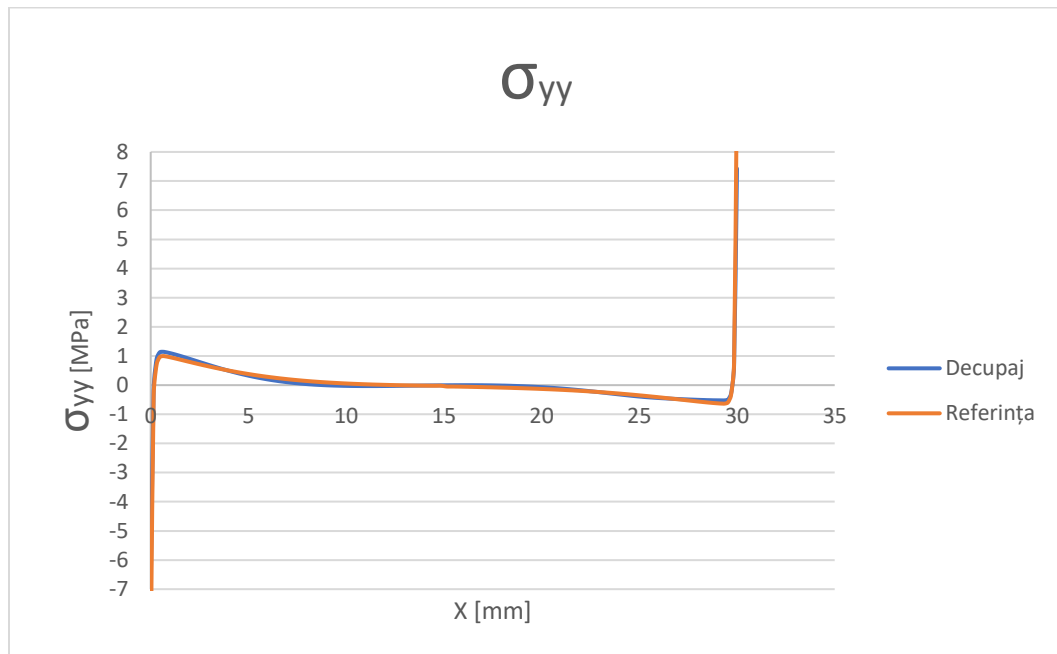


Figura 12 Comparație între distribuția de tensiuni normale între extremitățile îmbinării pentru cele două configurații

Tensiunile tangențiale sunt reduse cu 9% până la 15% la extremitățile îmbinării. Se poate constata că distribuția de tensiuni nu mai este simetrică pentru epruvetele cu decupaj. Distribuția de tensiuni tangențiale în modelul de referință este aplatizată ca urmare a rigidității scăzute a adezivului. Un alt efect al decupajului este uniformizarea și reducerea tensiunilor tangențiale pe toată lungimea îmbinării.

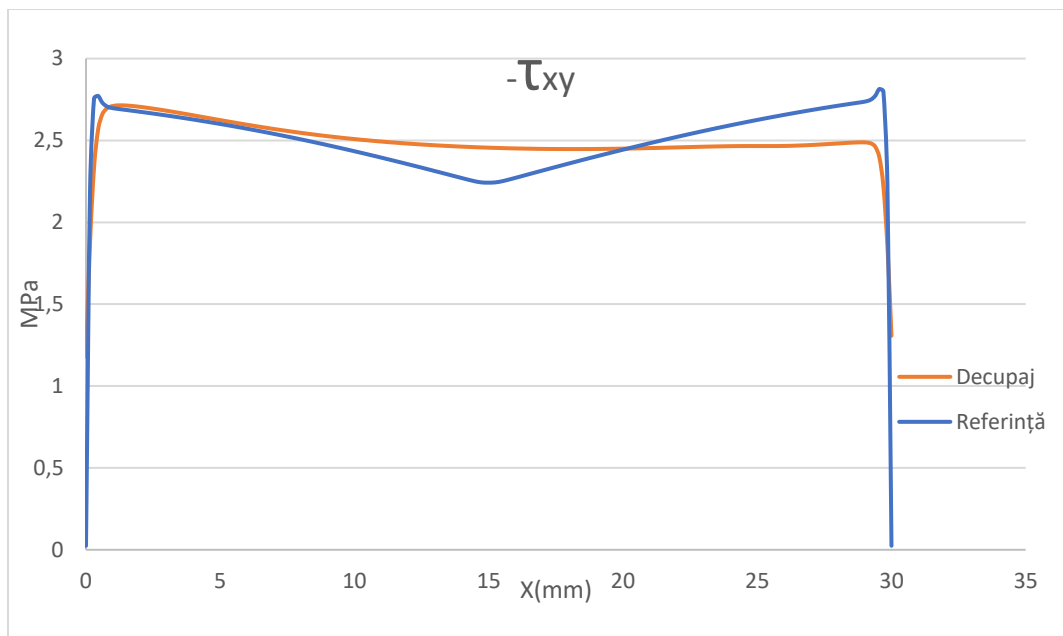


Figura 13 Comparație între distribuțiile de tensiuni tangențiale între extremitățile îmbinării pentru cele două configurații

În timpul testării toate epruvetele au cedat prin delaminarea stratului de compozit de pe aderențul interior, după cum a observat și Adams în [9]. Aspectul suprafeței de rupere este unul mat și rugos.

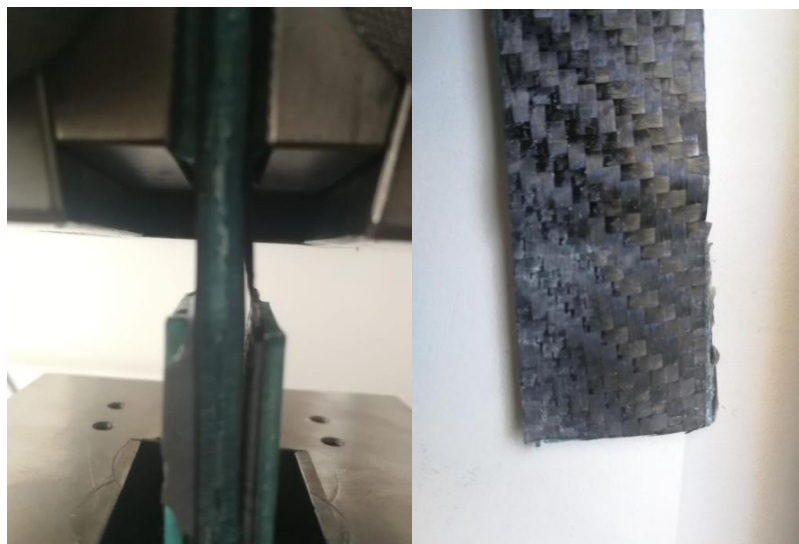


Figura 14 Mod de cedare epruvete și aspectul suprafeței de rupere

Epruvetele cu decupaj au cedat la o forță de peste 5kN, mai mare ca cea a epruvetelor de referință. Se observă că efectul decupajului de scădere locală a rigidității aderențului se manifestă și în alungirea crescută a epruvetelor cu decupaj. Alungirea epruvetelor cu decupaj este cu 2-3 milimetrii mai mare decât cea a epruvetelor de referință. La începutul testelor a existat o zonă de ligament care poate fi justificată prin alunecarea epruvetelor în bacurile mașinii de testat.

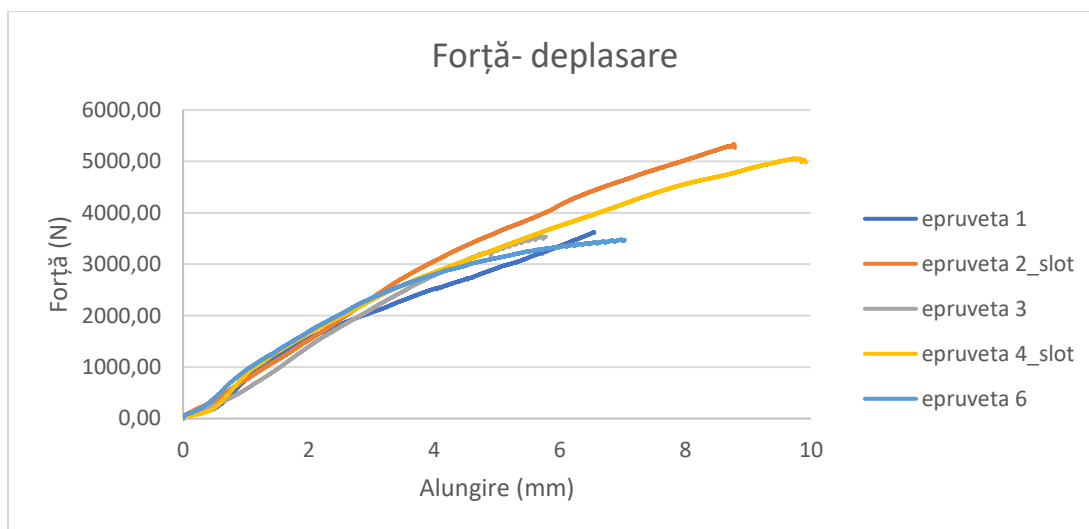


Figura 15 Curbele forță- deplasare pentru epruvetele testate

6. Concluzii

S-a realizat o analiză cu elemente finite și o testare experimentală pe o configurație de decupaj cu scopul evaluării performanțelor de reducere a tensiunilor în stratul de adeziv. Epruvetele cu decupaj au cedat la o forță cu peste 30% mai mare ca cea a epruvetelor de referință. Se observă că efectul decupajului de scădere locală a rigidității aderențului se manifestă și în alungirea crescută a epruvetelor cu decupaj. Alungirea epruvetelor cu decupaj este cu 15% mai mare decât cea a epruvetelor de referință. Tensiunile tangențiale sunt reduse în modelul cu decupaj până la 15% față de modelul de referință, iar tensiunile normale (de jupuire) sunt reduse cu până la 34%. Ca direcții viitoare de cercetare se pot testa alte configurații geometrice de decupaje, realizarea unor modele parametrice pentru studiul influenței mărimilor geometrice ce definesc decupajul și validarea acestora prin teste de laborator. Metoda de reducere a tensiunilor prin decuparea aderenților are avantajul ca reduce totodată și masa asamblării .

7. Bibliografie

- [1] X. Hou, A. Y. Kanani și J. Ye, „Double lap adhesive joint with reduced stress concentration: effect of slot,” *Composite Structures*, pp. 1-8, 2018.
- [2] M. Tsai și J. Morton, „An investigation into the stresses in double-lap adhesive joints with laminated composite adherents,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 47, p. 3317–3325, 2010.
- [3] J. Premysl și O. Maxime , „Critical steps in adhesive bonding process for space applications,” în *14th ISMSE/12th ICPMSE*, Biarritz, France, 2018.
- [4] V. Kovan și E. S. Topal, „Surface Roughness Effect on the 3d Printed Butt Joints Strength,” în *Proceedings of the International Conference BALTRIB*, Akademija, Kaunas, Lithuania, 2015.
- [5] L. da Silva și R. Adams, „Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, nr. 27, pp. 227-235, 2007.
- [6] ECSS-E-HB-32-21A, *Adhesive bonding handbook*, ESA ESTEC, 20 March 2011.
- [7] Luísa Quintino , Italo Fernandes și Eurico Assunção, „European harmonised system for training and qualification of adhesive bonding personnel.,” *Applied Adhesion Science*, 2013.
- [8] L. da Silva, . A. Ochsner și R. D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2011.

- [9] R. Adams, R. Atkins, J. Harris și A. Kinloch, „Stress analysis and failure properties of carbonfibre-reinforced-plastics/steel double lap joints,” *Journal of Adhesives*, pp. 20-29, 1986.
- [10] ASTM D 907-15, *Standard Terminology of Adhesives*.
- [11] ASTM D 3528-96, *Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading*, 2016.