Competiția de proiecte de cercetare a Academiei Oamenilor de Știință din România destinată tinerilor cercetători „AOȘR-TEAMS-IV” EDIȚIA 2025-2026 – „Transformarea digitală în științe”

Titlul proiectului: Palete pentru turbine din structuri celulare, obținute prin fabricare aditivă cu laser

Raport științific nr. 2

Director de proiect:
Ș. l. dr. ing. Miruna CIOLCĂ

Echipa de cercetare:
Ș. l. dr. ing. Constantin STOCHIOIU
Masterand ing. Mihai COSTEA

-Decembrie 2025-

Cuprins

1. Analize preliminare ale materialelor metalice fabricate aditiv ____ 3
   - 1.1 Analiza densității ____ 4
   - 1.2 Analiza durității ____ 4
   - 1.3 Teste de compresiune ____ 5
   - 1.4 Analiză modală a unei pale de stator ____ 6
2. Fabricarea aditivă a epruvetelor din Inconel 718 ____ 7
3. Prelucrarea epruvetelor ____ 8
4. Testele de tracțiune ____ 9
5. Rezultate ____ 9
6. Concluzii ____ 11
7. Bibliografie ____ 12

1. Analize preliminare ale materialelor metalice fabricate aditiv

Analiza materialelor utilizate în fabricația aditivă prin sinterizare laser a evidențiat similarități semnificative între proprietățile mecanice ale aliajelor INCONEL și cele ale aliajelor pe bază de Co-Cr. Din acest motiv, și având în vedere posibilitatea de a achiziționa mai rapid pulberea metalică de Co-Cr, s-a optat, în stadiul incipient, pentru utilizarea acestui material în locul Inconel-ului. Astfel, a fost realizată o primă analiză experimentală pe probe din Co-Cr, cu scopul de a demonstra capabilitățile tehnicii de imprimare, fiind selectată evaluarea la teste de compresiune.

Procedeul de fabricare aditivă folosit atât pentru epruvetele inițiale din Co-Cr, cât și pentru cele din Inconel 718, a fost același, adică tehnologia SLM (Selective Laser Melting) - fuziune selectivă cu laser, care folosește un pat de pulbere și o sursă puternică de căldură pentru obținerea pieselor metalice.

Criteriul de evaluare a capacității a fost stabilit ca materialul, netratat, să aibă o limită de curgere minima de 600 MPa, valoare care ar suferi ameliorări prin tratamente termice ulterioare.

Studiul și-a propus să determine comportamentul mecanic al probelor din aliaj Co–Cr, imprimate 3D în stare „as-built” și fabricate prin tehnologia Powder Bed Fusion (PBF), prin testări la compresiune, susținute de măsurători de densitate și duritate. Prin stabilirea corelațiilor dintre densitate, duritate și răspunsul la compresiune, se oferă informații privind performanța de bază a aliajelor Co–Cr în starea as-built.

Epruvetele au fost furnizate sub formă de cuburi fabricate aditiv, în stare „as-built”, cu dimensiuni nominale de $10 \times 10 \times 10$ mm³. Nu s-au realizat operații suplimentare de prelucrare sau finisare a suprafeței înainte de testare, pentru a păstra condiția materialului așa cum a fost fabricat.

Figura 1. Epruvete Co-Cr

Tehnologia Powder Bed Fusion (PBF) a devenit o metodă revoluționară de fabricație aditivă (AM) în industria aerospațială, permițând producerea de componente metalice complexe, cu greutate redusă și eficiență ridicată a materialului. Aplicațiile aerospațiale, precum paletele de turbină și elementele structurale, sunt adesea supuse unor sarcini de compresiune, necesitând materiale cu rezistență ridicată la compresiune și integritate structurală. [1, 2]

Densitatea și duritatea sunt indicatori esențiali ai calității procesului de fabricare: o densitate mai mare reflectă de obicei o porozitate redusă și mai puține defecte, în timp ce duritatea oferă informații privind rezistența la deformare plastică și uzură. Împreună, aceste proprietăți sunt direct legate de rezistența la compresiune și capacitatea portantă a aliajului.

1.1 Analiza densității

Densitatea fiecărui cub a fost determinată prin măsurători directe de geometrie și masă. Dimensiunile epruvetelor au fost măsurate cu ajutorul unui șubler digital, iar masa a fost înregistrată cu o balanță de precizie, cu o capacitate maximă de 200 g. Densitatea aparentă a fost calculată ca raport dintre masa măsurată și volumul corespunzător al epruvetei.

Valorile obținute s-au situat în intervalul 8330–8360 kg·m⁻³, cu o densitate medie de aproximativ 8333 kg·m⁻³ și un coeficient de variație de 0,17%.

Tabelul 1. Măsuratori pentru determinarea densității epruvetelor

Nr. Crt.	Masă	Lungime	Lățime	Înălțime	Volum	Densitate
	[mg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm3]	[kg/m^3]
Epruvetă 1	8467.3	10.02	10	10.15	1017.03	8325.5
Epruvetă 2	8439.4	10.03	9.98	10.09	1010.00	8355.8
Epruvetă 3	8379.6	10.04	9.99	10.04	1007.01	8321.3
Epruvetă 4	8474.7	9.99	10.02	10.17	1018.01	8324.7
Epruvetă 5	8464.5	10.00	10.00	10.15	1015.00	8339.4
Medie	8445.1	10.0	10.0	10.1	1013.4	8333.4
Abatere standard	38.95	0.02	0.01	0.05	4.73	14.34
Coeficient de variație	0.46%	0.21%	0.15%	0.53%	0.47%	0.17%

1.2 Analiza durității

Testele de duritate Vickers au fost efectuate utilizând un durometru INOVATEST Verzus 700, în conformitate cu standardul SR EN ISO 6507-1. Amprentele au fost realizate pe suprafețele lustruite ale epruvetelor, iar duritatea medie a fost determinată din mai multe măsurători efectuate pentru fiecare cub. [3]

Tabelul 1. Duritatea epruvetelor

Epruvetă	HV30
Epruvetă 1	418,03
Epruvetă 2	326,14
Epruvetă 3	385,13
Epruvetă 4	364,15
Epruvetă 5	349,57
Medie	368,6
Abatere standard	35,00
Coeficient de variație	9,50%

Măsurătorile de duritate Vickers au fost efectuate sub o sarcină de 30 kgf (HV30). Valorile înregistrate au variat între 326 și 418 HV30, cu o valoare medie de 368 HV30 și un coeficient de variație de 9,5%, conform prezentării din Tabelul 2. Dispersia relativ ridicată se datorează în principal primei epruvete, care a atins 418 HV30, semnificativ mai mare față de celelalte valori obținute. Această abatere poate fi explicată prin zone de eterogenitate ale microstructurii, rugozitate diferită a suprafeței sau mici variații ale zonei de imprimare.

1.3 Teste de compresiune

Testele de compresiune quasi-statică au fost realizate pe o mașină de testare servo-hidraulică Instron 8800, echipată cu o celulă de sarcină de 100 kN (Figura 2). Câmpul de deformații a fost înregistrat în timpul încercărilor cu ajutorul unui sistem de corelare digitală a imaginilor (DIC) Dantec Dynamics Q-400, în configurație stereoscopică (Figura 3). Această abordare a permis corelarea măsurătorilor de deformație pe toată suprafața cu sarcina aplicată, facilitând determinarea curbelor caracteristice efort-deformație pentru material. [4, 5]

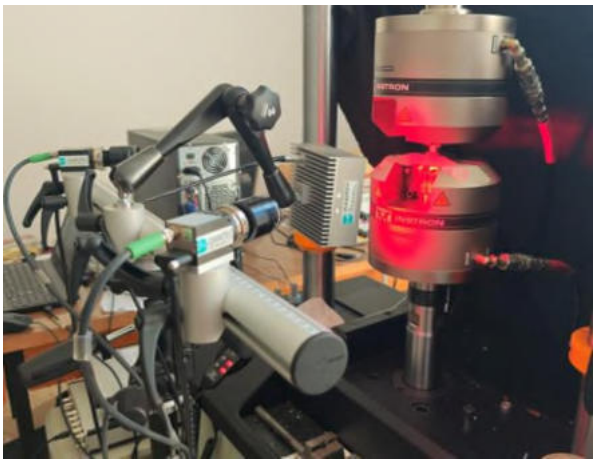

Figura 2. Echipament folosit pentru testele de compresiune

Figura 3. Epruvete acoperite pentru măsurători DIC

Comportamentul tensiune–deformație al cuburilor din Co-Cr a permis extragerea proprietăților mecanice principale. Rezistența la curgere de 0,05%, a fost considerată drept momentul de inițiere al plasticității, iar modulul de elasticitate a fost obținut din porțiunea liniară a curbei, în intervalul 0,05–0,15% al deformației. Coeficientul Poisson a fost determinat pe baza câmpurilor de deformație DIC din intervalul 0,2–0,4%, întrucât deformațiile transversale din zona elastică timpurie au fost prea mici pentru a permite o măsurare fiabilă. [6]

Testele de compresiune au fost efectuate până în apropierea limitei celulei de sarcină (100 kN), unde a fost observat un platou care sugerează apropierea de limita de rezistență a materialului. Din cauza limitărilor echipamentului, comportamentul ulterior, asociat cedării finale, nu a putut fi investigat pentru confirmare completă. Curbele efort–deformație obținute sunt prezentate în Figura 4, iar proprietățile mecanice rezultate sunt extrase în Tabelul 3.

Proprietățile mecanice medii extrase din testele de compresiune pentru epruvetele din CoCr au fost: rezistență la compresiune ultimă de 855,9 MPa, rezistență la curgere cu offset de 0,05% de 668,9 MPa, modul de elasticitate de 212,2 GPa și coeficient Poisson de 0,343. Aceste rezultate confirmă rezistența mecanică ridicată a aliajului, susținând potențialul său pentru aplicații în care geometria complexă necesită folosirea fabricării aditive și unde apar solicitări mecanice ridicate în funcționare, cum ar fi componentele de turbină din motoarele turbopropulsoare.

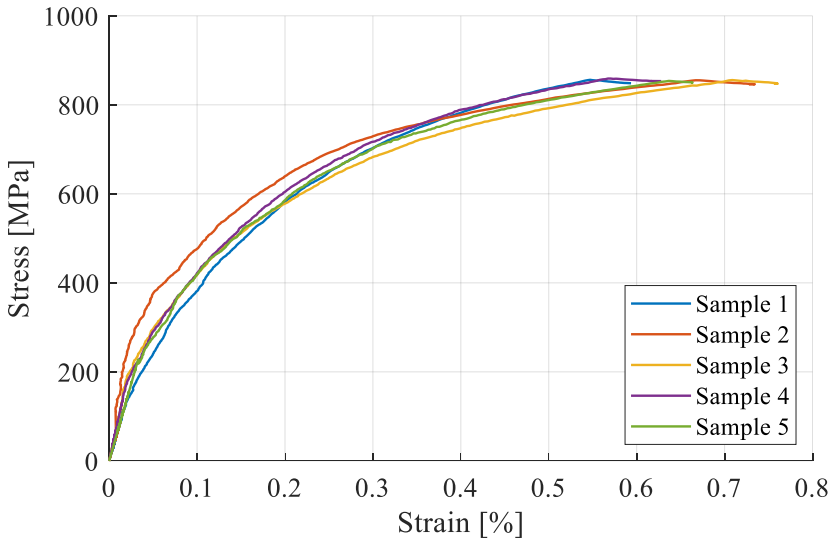

Figura 4. Curbele tensiune-deformație obținute pentru epruvetele testate

Tabelul 3. Proprietăți mecanice obținute

Epruvetă	Limită de curgere	Rezistență la compresiune	E	Niu
	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[-]
1	665,7	856,1	234,32	0,346
2	702,8	855,2	183,79	0,344
3	638,1	855,6	200,63	0,341
4	684,5	859,0	235,17	0,343
5	653,4	853,7	207,03	0,341
Medie	668,9	855,9	212,20	0,343
Abatere standard	25,45	1,97	22,27	0,002
Coeficient de variație	3,81	0,23	10,50	0,66

1.4 Analiză modală a unei pale de stator

Proprietățile mecanice obținute din testele experimentale au fost utilizate într-o analiză modală realizată în software-ul Ansys, pentru a determina frecvențele naturale și formele modale ale unei palete de stator de turbină. Această analiză a fost realizată ca punct de plecare pentru viitoarele lucrări care se vor concentra pe paleta de turbină obținută prin fabricație aditivă. În Figura 5 este prezentat un segment din paleta statorului utilizat în analiză, iar Figura 6 arată un posibil mod de deformație al paletei statorului la o frecvență proprie.

Rezultatele au fost prezentate în cadrul unei conferințe internaționale, ICSAAM 2025 - 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ANALYSIS OF ADVANCED MATERIALS, 15-18 septembrie, 2025, Brașov, România, iar lucrarea obținută urmează a fi publicată în jurnalul Macromolecular Symposia, Wiley, indexat WOS, în numărul special dedicat conferinței.

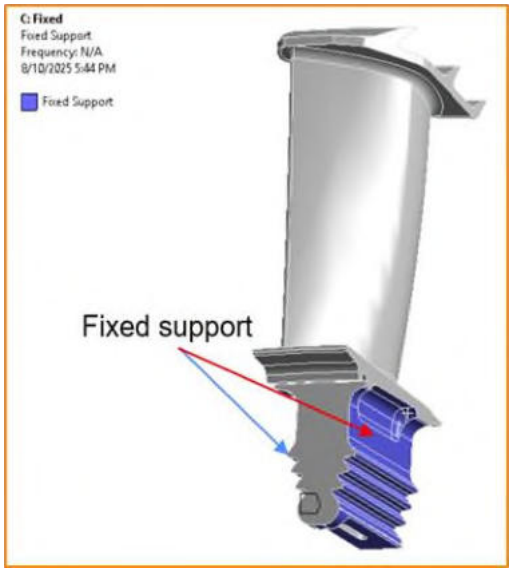

Figura 5. Segment al paletei de stator

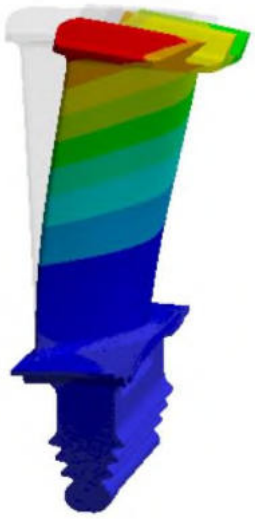

Figura 6. Mod de deformare la frecvența de 1410.2 Hz

2. Fabricarea aditivă a epruvetelor din Inconel 718

Epruvetele fabricate aditiv din Inconel 718 au fost obținute folosind un sistem DMG MORI LASERTEC 30 SLM pentru imprimare cu pulbere metalică. Epruvetele constau în bare cilindrice (11 × 10 × 20 mm³), fabricate atât în orientare verticală, cât și orizontală (Figura 7).

Figura 7. Epruvete cilindrice în stare „as-built”, fabricate atât în orientare verticală, cât și orizontală

Probele au fost construite pe o placă suport din oțel inoxidabil, preîncălzită la 150 °C pentru a reduce gradientul termic și tensiunile reziduale din primele straturi. Toate eșantioanele au fost produse într-o singură sesiune de imprimare utilizând parametrii standard ai producătorului: putere laser 279 W, viteză de scanare 1170 mm/s, grosime strat 50 µm, distanță între trasee 0,11 mm și diametru fascicul laser 70 µm. [7, 8]

Fabricarea a fost realizată într-o atmosferă controlată de argon, menținând concentrația de oxigen sub 0,2%, cu configurații de suport identice pentru toate construcțiile. Sistemul LASERTEC 30 SLM funcționează într-un mediu controlat (24 ± 2 °C; umiditate relativă < 60%) și utilizează un laser cu fibră de ytterbiu, bazat pe principiul standard al topirii selective

în pat de pulbere. [9] Acesta este echipat cu un modul de gestionare în buclă închisă a pulberii, care integrează cernerea, alimentarea și recircularea pentru a asigura o calitate consistentă a pulberii pe tot parcursul procesului. Fiecare strat de pulbere este distribuit uniform pe zona de construcție de 300 × 300 × 300 mm³ de către un ștergător din cauciuc, în timp ce un flux transversal de argon minimizează oxidarea și elimină condensatele generate în timpul topirii cu laser. Sistemul închis de manipulare a pulberii și circulație a gazului previne contaminarea și menține condiții stabile de proces (Figura 8).

Înainte de prelucrare, barele au fost tratate termic în aer folosind un cuptor electric (Nabertherm LH 30/14 GmbH, Lilienthal/Bremen, Germania). Programul termic a constat în:

- tratament de detensionare: încălzire cu 10 °C/min până la 980 °C, menținere timp de 1 oră, urmată de răcire în aer;

- tratament de recoacere: menținere la 720 °C timp de 8 ore, urmată de o rată controlată de răcire de 50 °C/h până la 620 °C pentru încă 8 ore, apoi răcire în aer după scoaterea din cuptor.

Figura 8. Sistem imprimare pulbere metalică DMG MORI LASERTEC 30 SLM

3. Prelucrarea epruvetelor

Pentru obținerea unor rezultate comparative privind proprietățile mecanice ale materialului Inconel 718, am decis fabricarea epruvetelor (Figura 9) atât din material bulk (bară), cât și din material obținut prin fabricare aditivă.

Pentru caracterizarea mecanică și elastică a materialului s-au efectuat teste de tracțiune prin intermediul căruia se va determina comportamentul acestuia, conform standardului SR-EN ISO 6892-1/ 2020.

În vederea necesității de prindere a epruvetei în bacurile mașinii de încercat la tracțiune, atât în condiții de temperatură ambientală, cât și ridicată, epruvetele au avut nevoie de realizarea filetelor la capetele de prindere. Datorită proprietăților mecanice ridicate ale aliajului, prelucrarea materialului în vederea obținerii epruvetelor a necesitat consumul mai multor resurse (timp ridicat pentru efectuarea prelucrărilor și scule speciale adaptate materialului). [10]

De asemenea, procurarea materialului bulk (bară) a implicat un timp de așteptare mare pentru livrare. Bara din Inconel 718 a fost procurată din China, produsul fiind performant din punct de vedere mecanic, cât și economic).

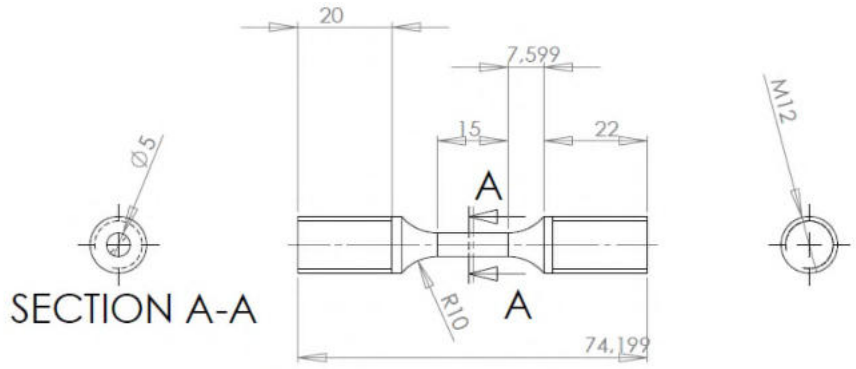

Figura 9. Epruvetă pentru testul de tracțiune conform SR-EN ISO 6892-1/ 2020

În vederea obținerii rezultatelor comparative, epruvetele printate au fost tratate termic urmând aceeași schemă ca și bara din care s-au debitat epruvetele.

4. Testele de tracțiune

Testele de tracțiune s-au efectuat conform standardului SR-EN ISO 6892-1/ 2020, utilizând o mașină de încercat universală marca Instron. Programul previzionat pentru încercarea la tracțiune a fost stabilit în vederea obținerii unor rezultate comparative între materialul bulk și cel printat, la mai multe temperaturi.

Astfel s-au obținut câte 15 epruvete din materialul bulk (bară), 15 epruvete din materialul printat pe direcția y și 15 epruvete din materialul printat pe direcția z. Pentru încercarea la tracțiune se folosesc 5 temperaturi: 23 de grade (temperatura mediului ambiant), 450 de grade Celsius, 550 de grade Celsius, 650 de grade Celsius si 750 de grade Celsius.

Pentru obținerea temperaturii nominale dorite pentru efectuarea testelor de tracțiune la temperatură ridicată este nevoie de un timp de așteptare, între 30 și 60 de minute și de un timp suplimentar de răcire a epruvetei pentru a putea fi scoasă din bacurile de prindere ale mașinii de încercat.

Efectuarea testelor de tracțiune urmărește obținerea curbei caracteristice a materialului, rezistența la curgere, rezistența la rupere și modulul de elasticitate longitudinal. De asemenea, se urmăresc și alte informații ce pot apărea ca răspuns al materialului în timpul încercărilor.

5. Rezultate

Curbele caracteristice obținute pentru epruvetele testate la temperatura mediului ambiant sunt prezentate în Figura 10, iar proprietățile mecanice rezultate sunt extrase în Tabelul 4.

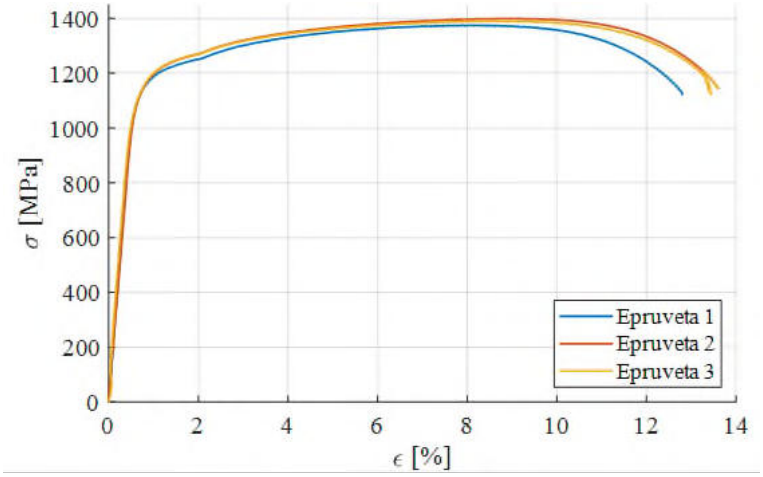

Figura 10. Curbele tensiune-deformație obținute pentru epruvetele testate

Tabelul 4. Proprietăți mecanice obținute ale epruvetelor încercate la temperatura ambiantă

Epruveta	σ_c [MPa]	E [MPa]
Epruveta 1	1,137	206,939
Epruveta 2	1,153	193,129
Epruveta 3	1,126	213,685
Medie	1,139	204,584
Abatere standard	13,51	10,478
Coeficient de variație [%]	1,19	5,12

În figura 11 se prezintă curbele efort–deformație obținute pentru epruvetele testate la temperatura de 450 de grade Celsius, iar proprietățile mecanice sunt extrase în Tabelul 5.

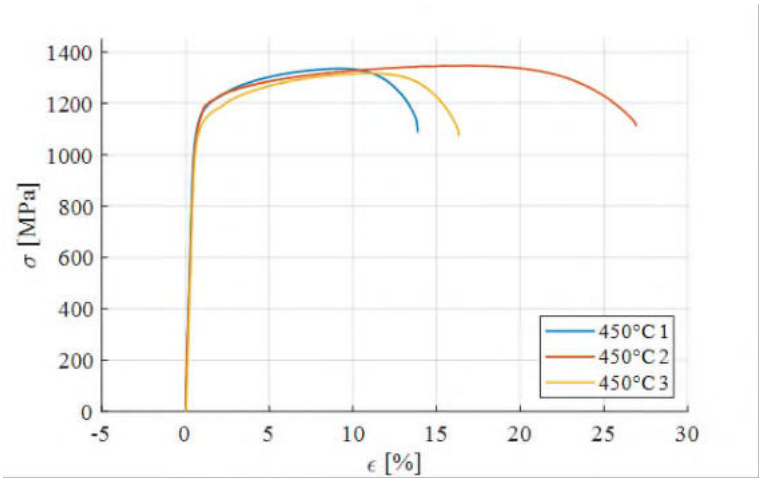

Figura 11. Curbele tensiune-deformație obținute pentru epruvetele testate (450 °C)

Tabelul 5. Proprietăți mecanice ale epruvetelor încercate la temperatura de 450°C

Epruveta	σ_C [MPa]	E [MPa]
Epruveta 1	1.100,99	223,333
Epruveta 2	1.119,48	168,766
Epruveta 3	1.073,61	202,728
Medie	1.098,03	198,276
Abatere standard	23,08	27,555
Coeficient de variație [%]	2,10	13,90

6. Concluzii

Referitor la prima parte de încercări experimentale efectuate pe un aliaj de timp Co-Cr, rezultatele demonstrează că acest tip de aliaj în stare as-built poate fi folosit în mod adecvat pentru aplicații care necesită geometrie complexă și solicitări mecanice ridicate, precum componentele de turbine aerospațiale, și oferă o bună bază de referință pentru studierea în continuare a acestor aliaje, precum si materialului Inconel 718.

De asemenea, analiza modală a paletei de stator indică o rigiditate structurală ridicată, fapt confirmat de valorile frecvențelor proprii.

În ceea ce privește programul de testări experimentale pentru caracterizarea mecanică a materialului Inconel 718, urmărind rezultatele prezentate în graficul din Figura 12 se pot formula niște concluzii principale referitoare la testele de tracțiune efectuate la temperatura mediului ambiant și la prima temperatură din planul de testare, cea de 450°C.

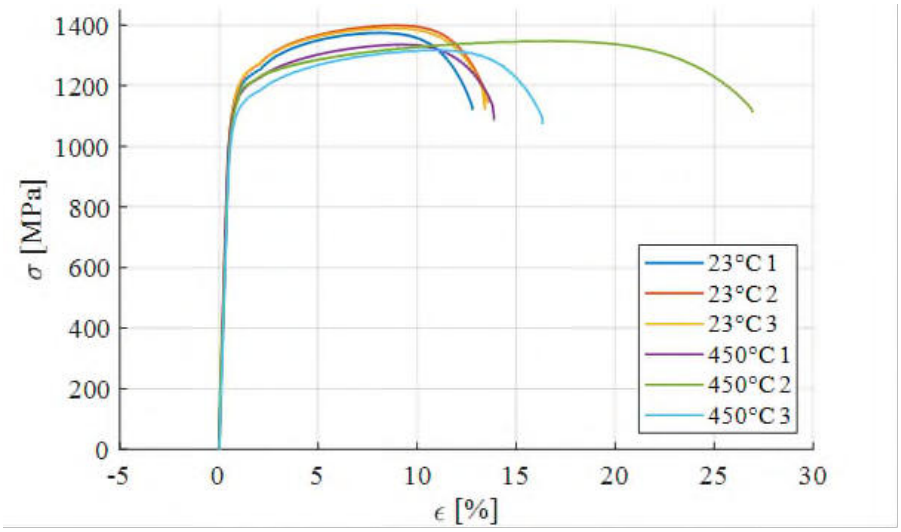

Figura 12. Curbele tensiune-deformație obținute pentru epruvetele testate

Curbele tensiune-deformație obținute la temperatura ambientală ating valori maxime în jur de 1350–1400 MPa, în timp ce la temperatura de 450°C valorile maxime sunt puțin mai mici, aproximativ 1250–1350 MPa. Materialul testat pierde o parte din rezistența mecanică la temperatură ridicată, fenomen normal super aliajelor pe bază de Ni.

Epruvetele testate la temperatura mediului ambiant (23°C) cedează la aproximativ 10-13% deformație, în timp ce epruvetele testate la temperatura ridicată (450°C) cedează la deformație mai mare. Acest lucru s-ar transpune prin faptul că ductilitatea este mai ridicată la temperatură înaltă.

7. Bibliografie

[1] Cui, G., Li, F., Bian, C., Gao, G., & Kou, Z. (2022). *High-Temperature Wear Behavior of CoCr Matrix Coatings Reinforced by Niobium Element From Room Temperature to 1000 °C. Journal of Tribology, 144*(10), Article 101705. https://doi.org/10.1115/1.4054591

[2] Xing, Z., Wang, N., Fan, L., Shang, L., & Yu, L. (2025). Investigation of the corrosion performance of HVOF-sprayed WC-10Co-4Cr coatings applied on offshore hydraulic equipment. *Reviews on Advanced Materials Science*; 2024-0066. https://doi.org/10.1515/rams-2024-0066

[3] Meysam Nabizadeh Dizaj, M., Azarbarmas, M., & Abdi, A. (2024). The influence of heat treatment on the microstructure, hardness, and wear properties of CoCrMo alloy produced by powder bed fusion of metals using a laser beam (PBF-LB/M) process. *Progress in Additive Manufacturing, 10*(8), 5173-5186. https://doi.org/10.1007/s40964-024-00895-4

[4] Leordean, D. V., Seabra, J. H., & Olvera, L. R. (2025). *Evaluating the Reliability of Powder Bed Fusion for Biomedical Co-Cr, CoCrWMo, Ti-6Al-4V and other PBF Alloys Based on Mechanical Properties*. *Applied Sciences, 15*(8), 4542. https://doi.org/10.3390/app15084542

[5] Chen, Y.-L., de Melo Silva, F., Kus, S., Piekarski, C., & Rüegsegger, R. (2022). *A Quantitative Study of Micro- and Macro-Mechanical Properties of as-built and heat-treated PBF Alloys under Compression*. *Metals, 12*, Article 321. https://doi.org/10.3390/met12110321

[5] Chmelko, V., Dohnalová, K., & Macháček, R. (2024). *Poisson's Ratio of Selected Metallic Materials in the Elastic Regime, Measured via Digital Image Correlation*. *Metals, 14*(4), Article 433. https://doi.org/10.3390/met14040433

[6] Meysam Nabizadeh Dizaj, M., Azarbarmas, M., & Abdi, A. (2024). The influence of heat treatment on the microstructure, hardness, and wear properties of CoCrMo alloy produced by powder bed fusion of metals using a laser beam (PBF-LB/M) process. *Progress in Additive Manufacturing, 10*(8), 5173-5186. https://doi.org/10.1007/s40964-024-00895-4

[7] Xing Li, J.J. Shi, C.H. Wang, G.H. Cao, A.M. Russell, Z.J. Zhou, C.P. Li, G.F. Chen (2018). Effect of heat treatment on microstructure evolution of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting, Journal of Alloys and Compounds, Volume 764, 639-649, https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.112.

[8] Serrano-Muñoz, I., Montero-Sistiaga, M., & Van Humbeeck, J. (2021). Effect of post-processing heat treatments on the microstructure and mechanical properties of SLM Inconel 718. *Materials & Design, 200*, 109437. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107598

[9] Marchese, G., Atzeni, E., Salmi, A. *et al.* Microstructure and Residual Stress Evolution of Laser Powder Bed Fused Inconel 718 under Heat Treatments. *J. of Materi Eng and Perform* 30, 565–574 (2021). https://doi.org/10.1007/s11665-020-05338-z

[10] Wang, Z., Trofimov, I., & Yadroitsava, I. (2023). Tensile behavior and anisotropy of LPBF-manufactured Inconel 718 at elevated temperatures. *Journal of Alloys and Compounds, 934*, 167852. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111503