



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. 1

Director de proiect:

Ș. I. dr. ing. Miruna CIOLCĂ

Echipa de cercetare:

Ș. I. dr. ing. Constantin STOCHIOIU

As. univ. drd. ing. Andrei-Alexandru ANCUȚA

Masterand ing. Mihai COSTEA

Cuprins

1. Stadiu actual al cercetării.....	2
2. Material – proprietăți mecanice, fizice și fabricare aditivă.....	3
2.1. Inconel 718 – Proprietăți mecanice.....	3
2.2. Inconel 718 – Proprietăți fizice și caracteristici ale pieselor fabricate aditiv.....	5
3. Tipuri de structuri celulare.....	7
4. Încercări experimentale.....	9
Bibliografie.....	9

1. Stadiu actual al cercetării

Obiectivul general al proiectului este dezvoltarea unei noi generații de palete pentru turbine, cu geometrii complexe, prin înlocuirea volumului plin al acestora cu structuri celulare cu porozitate graduală, în vederea optimizării funcționalității acestora.

În vederea îndeplinirii obiectivului general și obiectivelor specifice ale proiectului, echipa de cercetare a efectuat un studiu bibliografic al literaturii de specialitate privind stadiul actual al materialelor utilizate în producția paletelor de turbine din domeniul aeronautic, al tehnologiilor de fabricație clasice și inovative și al tipurilor de structuri celulare care s-ar putea integra într-o geometrie complexă ca cea a paletelor de turbină.

Ne-am propus să studiem în cadrul proiectului paleta de stator a turbinei motorului Allison model T56-A-15, care echipază aeronavele C130 Hercules. În cazul motorului Allison model T56-A-15 care echipază aeronavele C130 Hercules din dotarea Forțelor Aeriene Române, acestea suportă temperaturi care pot ajunge până la aproximativ 700°C și forțe centrifuge caracteristice unei turații nominale de 13820 RPM, în regimuri standard de funcționare. Astfel, în timpul exploatării, în cadrul inspecțiilor efectuate cu ajutorul boroscopului asupra acestor componente, se constată frecvent existența unor fisuri la nivelul paletelor, cauzate de solicitările termice și aerodinamice extreme. Detectarea unor fisuri care depășesc limitele admise prevăzute în manualul de exploatare al aeronavei conduce la scoaterea din uz a motorului și, implicit, a aeronavei, până la înlocuirea paletelor de stator neconforme.

Motorul Allison T56 este un motor turbopropulsor militar american, cu un singur arbore, cu design modular, dotat cu un compresor axial în 14 trepte, acționat de o turbină în patru trepte. A fost dezvoltat inițial de Allison Engine Company pentru avionul de transport Lockheed C-130 Hercules[1], iar din anul 1995 este produs de către Rolls-Royce.

Sistemul stator al motorului Allison T56-A-15 este o componentă cheie a compresorului său axial cu 14 trepte și este conceput pentru optimizarea fluxului de aer și creșterea presiunii în fiecare treaptă.

În fiecare treaptă a compresorului, aerul circulă prin rânduri alternante de palete ale rotorului (care se rotesc) și palete ale statorului (care sunt staționare). Paletele statoarelor redirecționează fluxul de aer de la paletele rotorului pentru a optimiza unghiul la care acesta intră în următorul set de rotoare, îmbunătățind eficiența și stabilitatea comprimării aerului. [2, 3, 4]

Proiectul are ca obiectiv realizarea unui prototip al unui segment de palete de stator dintr-un material mai rezistent decât cel folosit în prezent și cu o structură care să ofere performanțe superioare. În figura 1 se prezintă paleta (secțiunea) statorului pentru care se efectuează studiul.

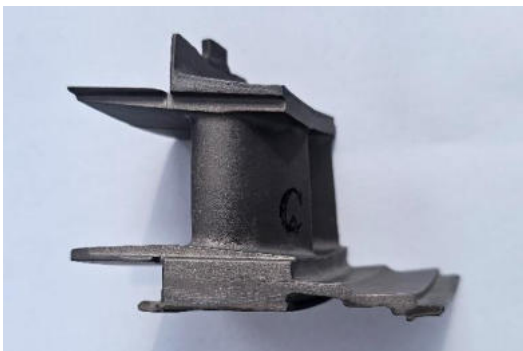


Figura 1. Paleta de stator a turbinei motorului Allison model T56-A-15, care echipază aeronavele C130 Hercules.

În Tabelul 1 se prezintă o comparație între materiale folosite pentru fabricarea pieselor care, în exploatare, necesită rezistență mecanică și temperatură crescute.

Tabelul 1. Comparație materiale folosite la fabricarea aditivă.

Material	Rm [MPa]	E [GPa]	Tmax exploatare [°C]	Aplicații	Preț pulbere (€/kg)
Ti-6Al-4V	900–1100	~110	~400	Aerospațial, medical, sport	300–500
Inconel 718	1200–1400	~200	~700	Turbine, motoare jet, criogenie	250–400
AlSi10Mg	~400	~70	~200	Automotive, piese ușoare	50–90
Maraging Steel 1.2709	până la 2000	~190	~450	Matrițe, scule, structurale	80–150
Cobalt-Crom	1000–1300	200–230	~800	Implanturi, proteze, turbine dentare	400–600
Inconel 625	~930	~200	~650	Componente de turbine, schimbătoare de căldură	250–400
Stainless Steel EN 1.4859	~600–800	~200	~1000	Echipeamente industriale expuse la temperaturi înalte	300–500
GH5188 (CoCrW)	~900	~210	~980	Componente aerospațiale, piese de motoare	400–600

În urma studiului bibliografic al literaturii de specialitate și a informațiilor pe care le-am putut obține de la Forțele Aeriene Române, paleta de stator este confecționată dintr-un aliaj de tip Ti-6Al-4V, materialul având un strat de acoperire ceramic. Materialul pe care l-am ales ca înlocuitor pentru cel utilizat în mod convențional este Inconel 718. Acest material prezintă proprietăți fizice și mecanice mai bune decât cele ale materialului utilizat în mod convențional și se poate folosi sub formă de pulbere metalică pentru fabricarea aditivă. De asemenea, raportul calitate/ preț pentru pulberea metalică de Inconel 718 este bun.

Inconel 718 este un material ce prezintă caracteristici mecanice semnificative, într-o plajă mare de temperaturi. Această calitate îl face un material ideal pentru aplicațiile în care dimensiunea pieselor dictează eficiența echipamentului, iar regimul de lucru implică astfel de temperaturi, cum este cazul componentelor din industria aerospațială, unde masa piesei afectează performanța aparatului de zbor. Se poate observa că și în cazul fabricării aditive, materialul menține calități excelente, deschizând calea geometriilor complexe cu rezistență mecanică adecvată motoarelor ce echipează vehicule de zbor.

2. Material – proprietăți mecanice, fizice și fabricare aditivă

2.1. Inconel 718 – Proprietăți mecanice

Inconel 718 (UNS N07718, W.Nr. 2.4668) este un superaliaj pe bază de nichel, întărit prin precipitare, utilizat pe scară largă în aplicații care implică temperaturi ridicate și solicitări mecanice mari, precum turbinele cu gaz, industria aerospațială și echipamentele din industria petrolului și gazelor.

Acest material este caracterizat printr-o combinație excepțională între rezistență mecanică, ductilitate și stabilitate termică, toate influențate semnificativ de starea de livrare și de tratamentele termice aplicate. Se vor prezenta informații referitoare la proprietățile mecanice ale acestui material, atât în formă obținută prin mijloace convenționale de prelucrare (denumită aici bulk) cât și prin fabricare aditivă (Additive Manufacturing – AM).

Proprietăți mecanice material bulk

Compania, Virgomet, din Polonia, oferă mai multe forme de aliaje INCONEL 718, dedicate unor game variate de aplicații, pentru care prezintă pe site-ul propriu o serie de rezultate din teste de caracterizare mecanică, cele mai importante aspecte fiind limita de curgere și limita de rupere, pentru diversele variante oferite.

În starea standard (bulk), conform specificațiilor AMS, Inconel 718 prezintă o rezistență la curgere de peste 760 MPa și o rezistență la tracțiune de peste 860 MPa, cu o alungire la rupere de minimum 5%. Duritatea Brinell tipică este de aproximativ 352 HB. În cazul foilor laminate la rece și îmbătrânite conform AMS 5597A, rezistența la curgere poate atinge valori de peste 1300 MPa, în timp ce rezistența la tracțiune se situează între 1100–1200 MPa, cu o alungire între 17% și 22%, în funcție de grosime. [5]

Pentru piese obținute prin injecție de pulbere, conform AMS 5596, proprietățile mecanice la temperatura camerei includ o rezistență la curgere de peste 1034 MPa și o rezistență la tracțiune de peste 1241 MPa, cu o alungire de 12%. La 650°C, aceste valori scad la >827 MPa pentru curgere și >999 MPa pentru tracțiune, cu o alungire de aproximativ 5%. [5]

Proprietăți mecanice fabricare aditivă

Rezistența la tracțiune a aliajului Inconel 718 fabricat aditiv variază în funcție de tehnologia utilizată. În starea „as-built”, probele obținute prin Selective Laser Melting (SLM) pot atinge o rezistență la tracțiune de până la 1380 MPa, în timp ce probele realizate prin Electron Beam Melting (EBM) prezintă valori similare sau ușor superioare față de materialele obținute prin metode convenționale. Totuși, în această stare, materialul prezintă o ductilitate redusă, atribuită prezenței porozității și microstructurii columnare, orientată predominant pe direcția de creștere a piesei. [6]

Kohnen și Haase studiază proprietățile mecanice a două tipuri de structuri celulare fabricate aditiv prin tehnologia de topire selectivă cu laser. [7] Aceștia au obținut rezultate diferite pentru modul de deformare în funcție de geometria structurilor celulare. De asemenea, au observat că pentru a obține rezultate bune la încărcări ciclice (oboseală) trebuie stabilită o geometrie optimă conform cerințelor de exploatare.

Materialul fabricat aditiv prezintă o anizotropie semnificativă în proprietățile mecanice, în special în ceea ce privește rezistența la tracțiune, din cauza orientării direcționale a microstructurii columnare. Această anizotropie poate fi parțial redusă prin ajustarea parametrilor de proces și prin tratamente termice corespunzătoare, însă chiar și după aceste optimizări, o anumită diferență între proprietățile măsurate pe axele principală și transversală ale piesei rămâne prezentă. [8]

Tratamente termice

Toate încercările au demonstrat că materialul Inconel 718 beneficiază de ameliorarea caracteristicilor mecanice, ca urmare a tratamentelor termice, fenomen observat atât pentru piesele bulk, cât și pentru cele obținute prin AM. Comportamentul este ameliorat ca urmare a modificării fazelor în urma aplicării unui regim termic corespunzător, eliminându-se astfel faze nedorite și înmulțindu-le pe cele utile. [6]

Pentru materialul bulk, de exemplu, după laminare la cald, o bară de 25 mm diametru prezintă o rezistență la curgere de 896 MPa și o tracțiune de 448 MPa, cu o alungire de 54%. După tratament termic complet conform AMS 5662 (recoacere + îmbătrânire), aceleași bare pot atinge o rezistență la curgere de 1389 MPa, tracțiune de 1207 MPa și o alungire de 20%, cu o duritate Rockwell C de aproximativ 46. [5]

Comportamentul la temperaturi ridicate

În cazul comportamentului la temperaturi ridicate, pentru o bară cu diametrul de 13 mm, valorile rezistenței la tracțiune rămân peste 1200 MPa până la 650°C și se reduc la aproximativ 904 MPa la 700°C. Rezistența la curgere urmează o tendință similară, cu valori peste 1000 MPa până la 650°C, coborând la 897 MPa la 700°C. [5]

2.2. Inconel 718 – Proprietăți fizice și caracteristici ale pieselor fabricate aditiv

În vederea printării aditive se va utiliza tehnologia de fuziune selectivă cu laser – SLM (Selective Laser Melting), care reprezintă o metodă de imprimare a metalelor, utilizând un laser de mare putere pentru a topi și a uni particulele de pulbere metalică, strat cu strat. De fapt, oferă posibilitatea construirii unei piese printr-un model stratificat.

Topirea selectivă cu laser topește complet pulberea metalică folosită, obținându-se un produs finit omogen, comparativ cu alte tehnologii de fabricare aditivă. Avantajul semnificativ al folosirii tehnologiei SLM este posibilitatea creării unor geometrii complexe, dificil de obținut prin metode convenționale de fabricație. [9]

Printarea epruvetelor se va face pe o imprimantă Lasertec 30 SLM, deținută de COMOTI – Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare Turbomotoare.

În ultimii ani, tot mai multe studii au investigat fabricarea aditivă a super-aliajului Inconel 718 prin fuziune selectivă cu laser (SLM – Selective Laser Melting), evidențiind factori cheie precum calitatea pulberii, parametrii de proces și caracteristicile pieselor obținute. În cele ce urmează sunt prezentate, în baza literaturii recente, principalele aspecte legate de materialul sub formă de pulbere, procesul de imprimare și proprietățile fizice ale pieselor rezultate.

Starea pulberii Inconel 718 în procesul SLM

Pulberea de Inconel 718 folosită la imprimarea 3D este în general obținută prin atomizare cu gaz, rezultând particule aproape sferice, cu dimensiuni tipice cuprinse între ~10 și 45 μm. [10] Chiar dacă particulele au formă regulată, pot exista variații și neconformități semnificative de la un lot la altul: diferențe de compoziție chimică (ex. conținut diferit de Al, C, N), distribuții de mărime a particulelor variate, particule aglomerate, fuziuni între particule (sateliți) sau suprafețe pulverulente/ oxidate ale pulberii. Astfel de particularități ale pulberii pot influența procesul de topire și microstructura pieselor. De exemplu, un conținut ridicat de impurități precum N și C în pulbere poate duce la formarea de incluziuni (nitruri TiN, carburi bogate în Nb/Ti) care se regăsesc ulterior la granițele de grăunte în piesa imprimată. Per ansamblu însă, pulberile comerciale de IN718 sunt concepute pentru a asigura fluiditate bună și omogenitate la depunere, majoritatea particulelor fiind sferice (~23 μm diametru mediu într-un exemplu de studiu), ceea ce contribuie la obținerea unor piese dense, fără defecte macrostructurale, ci doar cu micropori izolați. [11]

Parametrii de procesare prin fuziune laser

Calitatea pieselor din IN718 depinde de parametrii procesului SLM. Principalii parametri includ puterea laserului, viteza de scanare, grosimea stratului de pulbere depus și distanța între trasee. Aceștia trebuie optimizați pentru a asigura topirea completă a pulberii și obținerea unui material dens, evitând în același timp apariția defectelor. În literatură se raportează, de exemplu, puterea laser de ~200–400 W. [12, 13]

Optimizarea parametrilor permite atingerea unor grade înalte de densificare – studii raportând piese cu densitate relativă ~99,5% în cel mai bun caz. În general, la valori insuficiente ale energiei laser (putere prea mică sau viteză prea mare) apar defecte de lipsă de fuziune între straturi/trasee, conducând la porozitate ridicată și suprafețe neuniforme (efect de *balling* – solidificarea necontrolată în bile) și

rugozitate crescută. La polul opus, energie excesivă (putere prea mare sau viteză prea mică) poate genera porozitate de tip „keyhole” (goluri rezultate din vaporizarea și prinderea gazului în băi de topitură foarte adânci) și tensiuni reziduale sporite în piesă. Niciun set unic de parametri nu poate optimiza simultan densitatea, rugozitatea și tensiunile interne – se recomandă de obicei prioritizarea densificării și a calității suprafeței, dat fiind că aceste aspecte (porozitatea și rugozitatea) pot acționa ca inițiatori de fisuri în exploatare.

De exemplu, s-a demonstrat experimental că folosind ~320 W, 600 mm/s și o distanță între trasee de 0,12 mm se pot obține piese IN718 cu ~99,2% densitate și rugozitate redusă (~3,5 μm), însă cu tensiuni reziduale încă prezente. [14]

Caracteristicile pieselor imprimate (fără post-procesare)

În starea „as-built” (nefiind încă tratate termic sau prelucrate), piesele din Inconel 718 obținute prin SLM prezintă următoarele caracteristici fizice:

Suprafața și rugozitatea – Suprafețele pieselor SLM IN718 sunt în general rugoase imediat după imprimare. Datorită solidificării stratificate și aderării parțiale a particulelor nedistinct topite la suprafață, rugozitatea medie R_a a suprafețelor verticale poate fi destul de mare (ordine de zeci de microni). De exemplu, pentru mostre Inconel 718 neprelucrate s-au raportat valori medii R_a cuprinse între ~19 și 24 μm. [12] Suprafețele orizontale (planul superior al piesei) tind să fie mai netede, iar prin optimizarea parametrilor s-au obținut chiar rugozități de ~2–5 μm pe suprafețe plane. [14] Rugozitatea ridicată și prezența asperităților sunt aspecte de importanță ridicată, deoarece generează concentratori de tensiune. S-a observat că în condiția as-built, rezistența la oboseală scade semnificativ tocmai din cauza rugozității suprafeței, fisurile de oboseală inițiindu-se adesea la aceste asperități de suprafață rezultate din procesul SLM; [10]

Densitatea și defectele interne – Piesele SLM din IN718 pot atinge porozități minime, Figura 2, sub 1% (micropori dispersați) dacă parametrii sunt bine aleși. Lipsa defectelor macro (crăpături, pori mari) este realizabilă atunci când energia specifică de topire este în fereastra optimă. Totuși, dacă procesul nu este reglat corect, pot apărea defecte precum pori de nefuziune (datorită topirii incomplete între straturi) sau pori de vapori (keyhole) în cazul topirii excesive. De regulă, piesele neprelucrate termic conțin micro-porozități de ordinul zecilor de microni și uneori particule de pulbere parțial netopite, captive la suprafață sau în cavități superficiale. [12] Distribuția defectelor poate varia ușor cu înălțimea piesei (straturile de la bază tind să fie mai dense datorită răcirii mai rapide și retopirea de la straturile superioare). Per total, calitatea imprimării în SLM Inconel 718 este considerată ridicată când porozitatea este sub ~0,5%, fără defecte majore de tip crăpături; [12]

Microstructura (as-built) pieselor IN718 fabricate cu laser diferă de cea a materialului obținut convențional din cauza solidificării ultra-rapide. Structura rezultată este dendritică și în general columnară: se formează dendrite alungite în direcția de creștere (verticală), cu brațe dendritice fine ce delimitează celule de solidificare sub-micronice în matricea austenitică γ , Figura 3. În urma solidificării rapide are loc segregarea unor elemente de aliere (Nb, Ti, Mo) către zonele inter-dendritice. De asemenea, microstructura as-built se caracterizează prin densitate mare de dislocații și tensiuni interne ridicate induse de contracția rapidă; în unele cazuri, pentru parametri extremi, s-au observat micro-fisuri termice în rețeaua dendritică. [12] Un alt aspect este anizotropia micro-structurală și de proprietăți: orientarea columnară a grăunților poate conduce la diferențe ale proprietăților mecanice pe direcția de imprimare față de direcția perpendiculară (rezistență ușor diferită longitudinal vs. transversal, comportament la oboseală diferit etc.). Totuși, s-a raportat că anumite combinații de parametri (ex. viteze de scanare mai mari) pot favoriza obținerea unei microstructuri mixte, reducând anizotropia; [14]

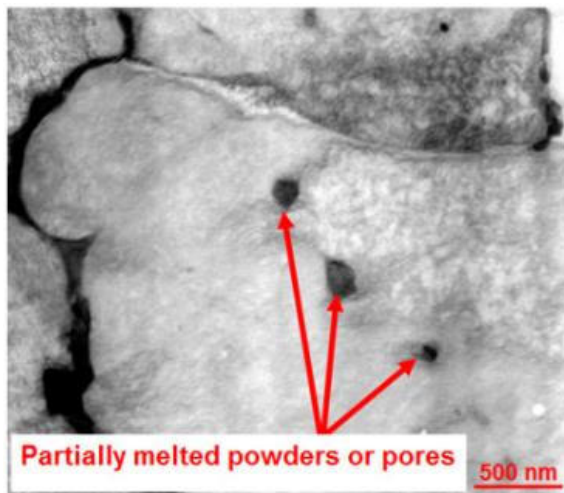


Figura 2. Micro-porozități [12]

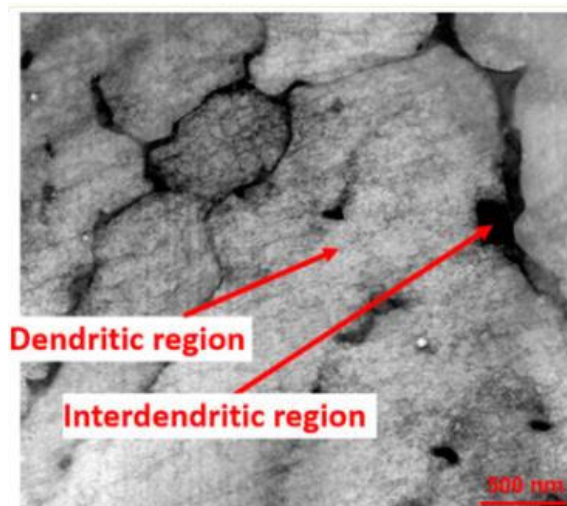


Figura 3. Structura dendritică [12]

Post-procesare și finisare – În practică, piesele din Inconel 718 produse aditiv sunt aproape întotdeauna supuse unor operații de post-procesare pentru a atinge proprietățile finale dorite. Un tratament termic standard (solubilizare la ~ 1080 °C urmată de dublă îmbătrânire în jur de 720 °C, conform AMS 5664 [15]) este aplicat de obicei după imprimare. Acest tratament are rolul de a îmbunătăți microstructura, de a precipita fazele de întărire γ' și γ'' , bogate în Niobiu și Aluminiu și de a relaxa tensiunile interne, rezultând o microstructură omogenă și întărită optim pentru condițiile de exploatare impuse. În plus, pentru componente critice, se poate folosi tratamentul de presare izostatică la cald (HIP), care, prin combinarea temperaturii și presiunii înalte, reduce semnificativ porozitatea internă remanentă (închizând porii microscopici). Din punct de vedere al finisării suprafeței, având în vedere rugozitatea ridicată a suprafețelor SLM, se recurge frecvent la prelucrări mecanice (șlefuire, frezare) sau tratamente de suprafață (sablare, sablare cu alică etc.) pentru a netezi suprafețele critice. Acest lucru este esențial mai ales la componente supuse oboselii, eliminarea asperităților de suprafață ducând la creșterea semnificativă a duratei de viață la oboseală. Piesele rezultate în stare as-built conțin tensiuni interne reziduale ridicate, generate de răcirea rapidă. În absența unui tratament de detensionare (de tip recoacere), aceste tensiuni pot provoca deformări sau inițierea fisurii. Prin urmare, încălzirea platformei de construcție sau aplicarea unui tratament termic intermediar pot reduce semnificativ riscul apariției fisurilor în timpul procesului de imprimare.

3. Tipuri de structuri celulare

Conform obiectivului general al proiectului se dorește dezvoltarea unei noi generații de palete pentru turbine, cu geometrii complexe, prin înlocuirea volumului plin al acestora cu structuri celulare, în vederea optimizării funcționalității acestora.

În acest scop, echipa proiectului a efectuat un studiu bibliografic al literaturii de specialitate privind tipurile de structurile celulare care se pot obține prin printarea aditivă.

Structurile celulare pot fi clasificate în spume, faguri și rețele. Dintre acestea, rețelele se remarcă printr-o serie de avantaje importante față de celelalte două tipuri, cum ar fi masa redusă, rezistența mecanică ridicată, capacitatea de a absorbi energie și de a atenua vibrațiile. Datorită performanțelor lor deosebite, structurile celulare sunt utilizate pe scară largă în diverse domenii industriale, precum industria aeronautică, ingineria biomedicală și automatizarea. [16]

Structurile celulare (rețelele celulare) sunt rețele tridimensionale formate din celule unitare repetitive, interconectate într-un mod geometric regulat sau neregulat. Ele sunt, practic, o subcategorie de structuri celulare poroase, caracterizate printr-un raport foarte bun între rezistență mecanică și greutate. [16]

Structurile celulare pot fi clasificate în trei categorii și anume:

1. Spume (cu celule deschise și cu celule închise);
2. Faguri;
3. Structuri de tip rețea.

Structuri de tip spumă

În cazul structurilor din categoria spumelor, forma celulelor unitare este generată aleatoriu, fără un model geometric regulat. Această caracteristică duce la o distribuție neregulată a pereților celulelor, care au orientări variate în spațiu. Din acest motiv, proprietățile mecanice și fizice ale spumelor pot varia semnificativ de la un punct la altul în interiorul materialului. Deși această lipsă de uniformitate poate limita controlul precis asupra comportamentului structural, spumele rămân utile în aplicații unde absorbția de energie, izolarea termică sau acustică sunt prioritare.

Structuri de tip fagure

Structurile de tip fagure au o formă regulată, iar celulele unitare au aceeași formă și dimensiune. Există o varietate de forme de celule întâlnite în faguri, precum tetraedre, prisme triunghiulare, prisme pătrate, prisme hexagonale. În prezent, structurile auxetice de tip fagure cu geometrii re-entrante, precum și structurile fagure chirale, sunt deosebit de atractive, deoarece îmbunătățesc performanțele mecanice și extind domeniile de aplicare ale fagurilor.

Structuri de tip rețea

Structurile celulare de tip lattice sunt formate dintr-o rețea tridimensională de celule unitare cu dimensiuni controlate (Figura 4). Aceste celule pot avea dimensiuni și forme fie uniforme, fie variabile. În anumite studii științifice, termenul de „structuri celulare” este adesea folosit ca sinonim pentru structurile lattice, deoarece diferențele dintre lattice, spume și faguri sunt uneori ignorate. În realitate, comparativ cu spumele și fagurii, structurile lattice oferă performanțe mecanice superioare. Printr-un design adecvat care previne flambajul, structurile lattice pot crește rezistența la compresiune și forfecare în comparație cu spumele și fagurii. În plus, datorită posibilității de a personaliza fiecare celulă unitară sau chiar fiecare element al structurii lattice, acestea prezintă avantaje pe care spumele și fagurii nu le pot oferi. Aceasta înseamnă că proprietățile mecanice ale structurilor lattice pot fi ajustate și optimizate cu mult mai mare precizie pentru a răspunde unor cerințe funcționale specifice. [16]

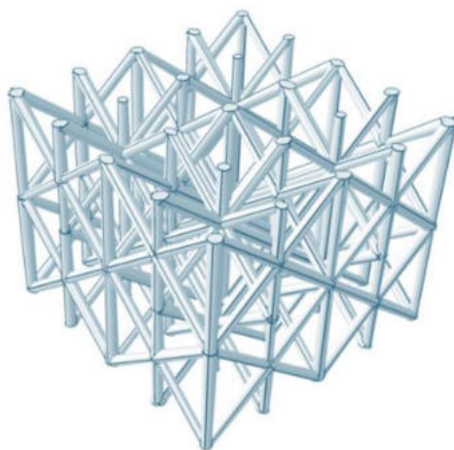


Figura 4. Exemplu de structură celulară – lattice [16]

Conform literaturii de specialitate [17], structurile lattice se împart în trei mari categorii:

Structuri aleatoare (disordered/random) – celule distribuite aleatoriu, topologii și dimensiuni variabile;

Structuri periodice – celule identice, repetate regulat în rețea;

Structuri conforme – rețele cu parametri variați spațial pentru a respecta conturul piesei sau câmpurile de tensiune.

Ultima categorie de structuri celulare include structurile conforme cu variație dimensională a celulelor, cunoscute și sub denumirea de structuri reticulare conforme sau pseudo-periodice. Acestea se caracterizează prin menținerea aceleiași topologii a celulei unitare, în timp ce dimensiunile și formele acesteia variază gradual în funcție de geometria piesei sau de cerințele funcționale locale. Această adaptabilitate permite ca structura să urmeze contururi complexe și să răspundă eficient la distribuții neuniforme ale solicitărilor mecanice.

Spre deosebire de structurile periodice, în care celulele sunt identice și dispuse uniform, structurile conforme permit o variație controlată a dimensiunilor celulelor, ceea ce le conferă o capacitate superioară de adaptare la formele libere ale componentelor și la condițiile de încărcare variabile. [16] Această flexibilitate este esențială în aplicații precum implanturile medicale personalizate, componentele aeronautice cu geometrii complexe sau structurile arhitecturale inovatoare. [18]

4. Încercări experimentale

În vederea efectuării încercărilor experimentale privind caracterizarea mecanică a materialului ales (Inconel 718) se vor confecționa epruvete din material bulk (bară) și din material obținut prin fabricare aditivă, folosindu-se tehnologia de fuziune selectivă cu laser. Fabricarea epruvetelor se va face respectând standardele în vigoare pentru încercările mecanice stabilite.

Pentru caracterizarea mecanică și elastică a materialului se va efectua test de tracțiune prin intermediul căruia se va determina comportamentul acestuia. În urma testului se vor obține următoarele proprietăți:

- modul de elasticitate longitudinal;
- coeficient de contracție transversală (Poisson);
- limita de curgere;
- limita de rupere.

Încercările de tracțiune se vor realiza pe o mașină universală de încercat INSTRON 8801, din dotarea Departamentului de Rezistența Materialelor.

Bibliografie

- [1] <https://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/t56.htm> (Accesat 5 Mai 2025)
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Allison_T56 (Accesat 23 Aprilie 2025)
- [3] <https://aircraft-data.com/engines/allison/models/t56-a-15-ser> (Accesat 23 Aprilie 2025)
- [4] <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA201072.pdf> (Accesat 4 Mai 2025)
- [5] Virgamet Alloy 718, 2.4668, UNS N07718, Inconel® 718 - Nickel Alloy Available online: <https://virgamet.com/offer/alloy-inconel-718-2-4668-n07718-bs2901-na51-ncf718-chn55mbju> (Accesat 25 Aprilie 2025).
- [6] Hosseini, E.; Popovich, V.A. A Review of Mechanical Properties of Additively Manufactured Inconel 718. Addit. Manuf. 2019, 30, 100877, doi:10.1016/j.addma.2019.100877.

- [7] Patrick Köhnen, Christian Haase, Jan Bültmann, Stephan Ziegler, Johannes Henrich Schleifenbaum, Wolfgang Bleck, Mechanical properties and deformation behavior of additively manufactured lattice structures of stainless steel, *Materials & Design*, Volume 145, 2018, Pages 205-217, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.062>.
- [8] Popovich, V.A.; Borisov, E. V.; Popovich, A.A.; Sufiiarov, V.S.; Masaylo, D. V.; Alzina, L. Functionally Graded Inconel 718 Processed by Additive Manufacturing: Crystallographic Texture, Anisotropy of Microstructure and Mechanical Properties. *Mater. Des.* 2017, 114, 441–449, doi:10.1016/j.matdes.2016.10.075.
- [9] SLM 3D Printing Everything you need to know about (accesat 12 Mai 2025)
- [10] C. K. Sudbrack, B. A. Lerch, T. M. Smith, I. E. Locci, D. L. Ellis, A. C. Thompson, et al., Impact of powder variability on the microstructure and mechanical behavior of selective laser melted alloy 718, in *Minerals, Metals and Materials Series*, 2018, vol. 2018-June, pp. 89–113.
- [11] K. Moussaoui, W. Rubio, M. Mousseigne, T. Sultan, and F. Rezai, Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 735, no. February 2019, pp. 182–190.
- [12] S. M. Zaharia, C. Lancea, A. Kruk, G. Cempura, A. Gruszczyński, L. A. Chicos, et al., Mechanical Properties and Microstructure of Inconel 718 Lattice Structures Produced by Selective Laser Melting Process, *Materials*, 2024, vol. 17, no. 3.
- [13] E. Hosseini and V. A. Popovich, A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718, *Additive Manufacturing*, vol. 30.2019.
- [14] M. Balbaa, S. Mekhiel, M. Elbestawi, and J. McIsaac, On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses, *Materials and Design*, 2020, vol. 193.
- [15] AMS5664, Nickel Alloy, Corrosion and Heat Resistant, Bars, Forgings, and Rings, 52.5Ni - 19Cr - 3.0Mo - 5.1Cb - 0.90Ti - 0.50Al - 18Fe, Consumable Electrode or Vacuum Induction Melted, 1950 °F (1066 °C) Solution Heat Treated, Precipitation Hardenable, Sep. 1965.
- [16] Pan C, Han Y, Lu J. Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. *Applied Sciences*. 2020; 10(18):6374. <https://doi.org/10.3390/app10186374>
- [17] Dong, G.; Tang, Y.; Zhao, Y.F. A Survey of Modeling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing. *J. Mech. Des. Trans. ASME* 2017, 139, 100906.
- [18] Wang, H.; Rosen, D.W. Parametric Modeling Method for Truss Structures. In *Proceedings of the DETC'02 ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering Conference*, Montreal, QC, Canada, 29 September–2 October 2002; pp. 759–767