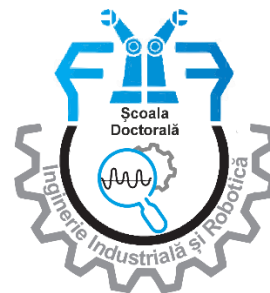


Contribuții teoretice și experimentale privind proiectarea și realizarea vasului unui microreactor nuclear prin tehnologii de fabricație aditivă/



**MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință
și Tehnologie POLITEHNICA
București
Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică**



REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

**Contribuții teoretice și experimentale privind proiectarea
și realizarea vasului unui microreactor nuclear prin
tehnologii de fabricație aditivă**

Conducător științific: Doctorand:

Prof.univ.dr.Ing. Cătălin Gheorghe AMZA Ing. Constantin Alex SUMANARIU

**BUCUREȘTI
- 2024 -**

Cuprins

| | |
|--|-----------|
| Cuprins..... | 2 |
| Cuvinte cheie: | 3 |
| Capitolul 1. Introducere | 3 |
| 1.1 Introducere..... | 3 |
| 1.1.1 Considerații privind fabricația aditivă | 4 |
| 1.2 Metodologia de cercetare și integrarea tehnologiei | 5 |
| 1.3.1 Activități de îmbunătățire identificate în literatura existentă | 8 |
| Capitolul 2. Proiectarea conceptuală a vasului unui microreactor nuclear: cerințe și specificații | 9 |
| 2.1 Metodologia de proiectare..... | 9 |
| 2.2 Optimizarea proiectului și iterațiile | 10 |
| Capitolul 3. Analiza termică a vasului | 15 |
| 3.1 Condiții și ipoteze la limită..... | 15 |
| 3.2 Analiză și interpretare..... | 18 |
| 3.3 Concluzii și contribuții ale autorilor | 18 |
| Capitolul 4. Testarea probelor de oțel inoxidabil 316L imprimate 3D..... | 20 |
| 4.1 AM și eșantionul convențional Compararea rezultatelor și discuții | 20 |
| 4.2 Concluzii și contribuții ale autorilor | 20 |
| Capitolul 5. Rezultatele și concluzia cercetării | 26 |
| 5.1 Rezultatele cercetării și compararea cu ipoteza inițială | 26 |
| 5.2 Contribuții în domeniu..... | 29 |
| 5.3 Limitările studiului | 30 |
| 5.4 Concluzii și activități de cercetare viitoare | 31 |
| Referințe | 33 |

Cuvinte cheie:

Microreactor nuclear, Fabricare aditivă (AM), Oțel inoxidabil 316L, Proiectare asistată de calculator (CAD), Analiză termohidraulică, Management termic, Testare material, reactor, Optimizare proiect, Simulare CFD (dinamică a fluidelor computațională), Transfer de căldură, Analiză SEM (microscopie electronică de baleiaj), Rezistență mecanică, Proprietăți material iradiat, Securitate nucleară, Validare experimentală, Conducte de răcire, Standardizare componente nucleare

Capitolul 1. Introducere

1.1 Introducere

Prin capitolele următoare, cercetarea abordează subiecte de fabricație aditivă, CAD (proiectare asistată de calculator), inginerie nucleară, fizica reactoarelor și proprietățile mecanice ale materialelor utilizate. A avea subiecte atât de diverse necesită colaborare și sprijin din partea mai multor discipline. Produsul final rezultat din munca prezentată în această teză poate avea nevoie de perfecționare suplimentară pentru a atinge statutul operațional. Scopul sau scopul inițial al tezei este proiectarea vasului unui microreactor care poate furniza 2MW (Megawați) termici și poate demonstra că poate fi un produs fezabil pentru funcționare. Un reactor nuclear este echipamentul care produce căldură folosind fisiune sau fuziune. Procesul de fisiune nucleară încălzește sistemul primar de transport al căldurii care poate conține apă sau alți agenți de răcire. Fluidul de lucru este selectat pe baza considerentelor de design și tehnologie. Industria nucleară s-a bazat pe tehnologii dezvoltate în anii 1950, cu toate acestea, există o oportunitate de a integra noi metodologii cu principiile demonstrate ale reactoarelor nucleare. Fabricarea aditivă (AM) reprezintă una dintre oportunitățile de îmbunătățire, deoarece oferă îmbunătățiri ale flexibilității și eficienței față de procesele tradiționale de fabricație. Următoarele capitole vor descrie procesul de dezvoltare a proiectului conceptual vasului unui microreactor, analiza termică și analiza materialelor specifice utilizate pentru fabricarea aditivă. [1][2]

În etapa de analiză a analizei literaturii de specialitate, s-a arătat de mai multe ori că procesele de proiectare și fabricație au mai multe provocări, cum ar fi constrângerile de dimensiune, selecția materialelor și managementul termic. Metodele tradiționale de fabricație au limite care pot afecta complexitatea și eficiența proiectelor de reactoare sau pot necesita îmbunătățiri. Această cercetare abordează aceste provocări luând în considerare fabricarea aditivă pentru a dezvolta un model compact și cât mai eficient posibil, capabil să gestioneze în siguranță puterea termică a unui microreactor nuclear.

Obiectivul este de a dezvolta un proiect conceptual pentru un microreactor nuclear care poate fi fabricat prin fabricație aditivă. Studiul efectuat include identificarea parametrilor optimi de proiectare și a materialelor pentru vasul unui reactor, evaluarea performanței termice a probelor de proiectare care sunt reprezentative pentru modele, în diferite condiții operaționale folosind dinamica fluidelor computaționale (CFD) și evaluarea fezabilității diferitelor tehnici de fabricație aditivă pentru producerea vasului și validarea materialului selectat pentru a fi utilizat pentru fabricarea conceptului propus.

Pentru a îndeplini obiectivele cercetării, studiul va începe cu explorarea întrebărilor privind care sunt considerentele principale de proiectare pentru fabricarea folosind tehnologii de fabricare aditivă, modul în care performanța termică a vasului proiectat se compară în diferite scenarii operaționale și ce tehnici de fabricație aditivă sunt cele mai potrivite pentru producerea vasului, luând în considerare factori precum proprietățile materialelor, precizie de fabricație și cost. Studiul merge mai departe și analizează comportamentul proprietăților materialului după procesul AM prin teste de tracțiune și stres și modul în care proprietățile materialului selectat se comportă într-un mediu iradiat.

1.1.1 Considerații privind fabricația aditivă

Fabricarea aditivă (AM) este procesul de construcție a obiectelor, strat cu strat dintr-o sursă digitală care descrie modelul obiectului. AM oferă mai multe beneficii în procesul de proiectare și fabricație, deoarece poate crea geometrii complexe care oferă mai multă libertate de proiectare decât metodele tradiționale de fabricație și poate facilita un proces de producție fără probleme, eliminând incertitudinile din lanțul de aprovizionare nuclear. Industria nucleară, caracterizată prin cerințele sale stricte de siguranță, fiabilitate și performanță, explorează din ce în ce mai mult aplicarea AM pentru fabricarea componentelor. Cea mai mare parte a literaturii publicate pentru fabricarea aditivă a metalelor discută despre oțelul inoxidabil 316L și explorează modele și structuri de rețele care îmbunătățesc parametrii de transfer de căldură. Având în vedere că piesele AM au fost utilizate anterior în instalațiile nucleare, fabricarea unui vas reprezintă următorul pas în testarea limitelor AM în domeniul nuclear. [3] [4] [4] [5]

Potrivit lui Ehsan et. al., ISO/ASTM a catalogat tehnologiile de imprimare 3D în șapte grupe, cu excepția fotopolimerizării în cuvă (VPP), restul tehnologiilor AM pot fi utilizate pentru fabricarea metalelor și, așa cum indică Ehsan, ordinea tehnologiilor indică popularitatea lor [6] [7].

Tehnologiile și materialele utilizate în sectorul energiei nucleare trebuie verificate și validate în mod corespunzător pentru a se asigura că îndeplinesc cerințele de siguranță, securitate și fiabilitate pentru a funcționa într-un astfel de mediu. Există și alte considerente, cum ar fi rezistența la coroziune, rezistența mecanică, durabilitatea și controlul adecvat al parametrilor procesului de fabricație, inclusiv post-procesarea, care trebuie abordate.

Fuziunea pe pat de pulbere cuprinde topirea selectivă cu laser (SLM) și topirea cu fascicul de electroni (EBM). Ambele tehnici folosesc un fascicul de înaltă energie pentru a fuziona pulberile metalice strat cu strat.

Una dintre cerințele la optimizarea unui model pentru AM este optimizarea topologiei, așa cum este descrisă de Carsten et. al. cu rezultate promițătoare. Un dezavantaj al SLM, așa cum a fost identificat de Kruth et. al., este tensiunea reziduală și fisurarea care pot fi atenuate prin temperaturi ridicate de preîncălzire și utilizarea vectorilor de scanare scurți. [8][9]

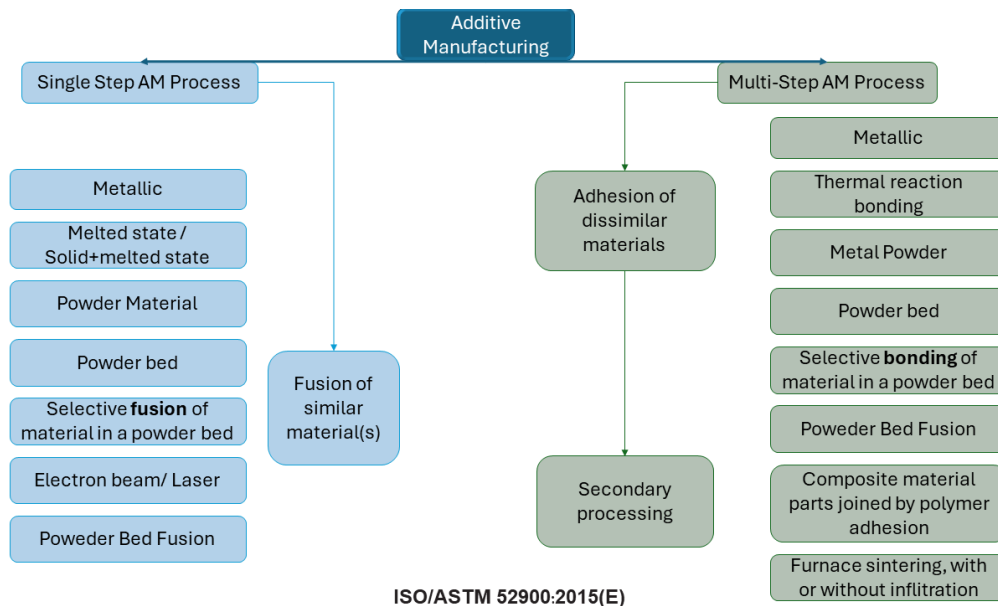


Figura 1.1 Procesul de fabricație AM pentru metale, așa cum este interpretat din ISO/ASTM 52900:2015

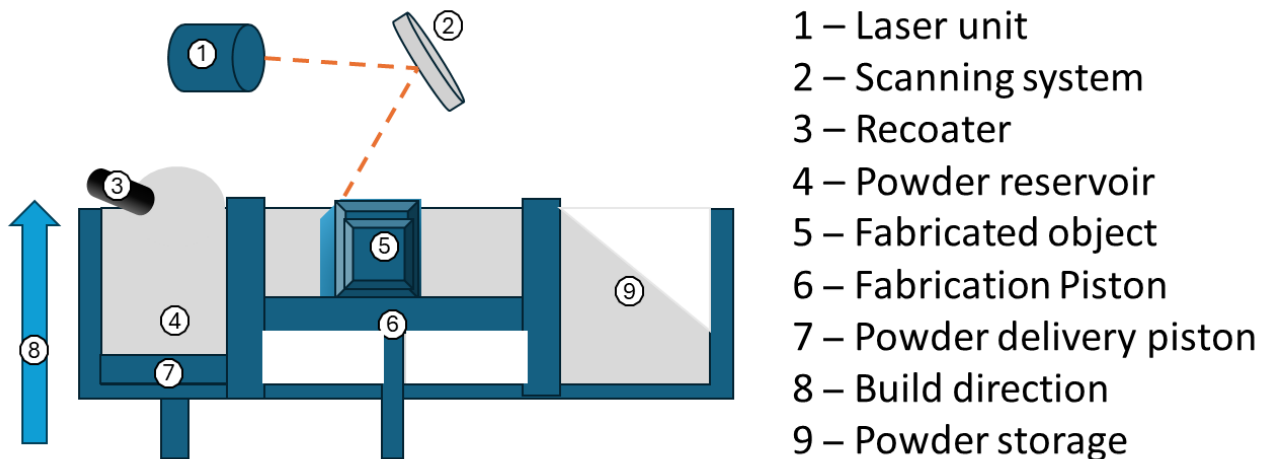


Figura 1.2 Interpretarea schemei procesului de fabricație SLM [10]

După selectarea oțelului inoxidabil 316L ca material primar pentru fabricarea vasului reactorului prin procesul SLM Figura 1.2, putem trece la următoarele etape ale ipotezei noastre inițiale. Proprietățile materialului au fost preluate de la un producător pentru a fi cât mai aproape de parametrii reali ai materialului întâlniți pe piață. Vom folosi aceste valori în etapele de proiectare și simulare a software-ului [11].

1.2 Metodologia de cercetare și integrarea tehnologiei

Metodologia tezei presupune cel puțin 5 etape de lucru de nivel înalt care trebuie efectuate așa cum sunt prezentate în Tabelul 1.1 și în Figura 1.3.

Tabelul 1.1 Metodologia de cercetare

| Etapele metodologiei | Subiecte |
|---|---|
| 1. Revizuirea literaturii de specialitate | • Articole relevante care discută despre fabricarea aditivă, analiza materialelor și utilizarea acestora în industria nucleară. |
| | • Cărți relevante pentru scopul tezei. |
| | • Publicații relevante de la organizații naționale și internaționale în domeniul producției nucleare și aditive. |
| 2. Proiectare CAD | • Alegerea software-ului: ANSYS SpaceClaim, ANSYS CFD/Fluent, ANSYS Workbench. |
| | • Proiectarea modelelor 3D – Proces iterativ. |
| | • Asamblarea componentelor 3D și identificarea modelelor compatibile. |
| 3. Analiza termică | • Prezentare generală a managementului termic |
| | • Identificarea și simularea mediului în care trebuie să opereze reactorul. |
| | • Identificarea rezultatelor din analiza și compararea literaturii de specialitate. |
| | • Concluzii și pași viitori. |
| 4. Testarea materialelor | • Testarea la tracțiune a materialelor. |
| | • Analiza SEM. |
| | • Analiza post-iradiere a materialului. |
| 5. Validare și analiză comparativă | • Compararea rezultatelor cu parametrii întâlniți în condițiile specifice ale unui reactor nuclear. |
| | • Acțiuni corective pentru îmbunătățirea modelului. |

Toate etapele identificate sunt interconectate și se alimentează reciproc la fiecare pas al metodologiei de cercetare. Această manieră iterativă se datorează naturii complexe a cercetării, care implică fabricarea aditivă, tehnologiile nucleare, analiza termică, proiectarea CAD și configurarea experimentală pentru validarea și testarea mediilor.

Un aspect important este că, deși etapa de revizuire a literaturii este prezentată la începutul acestei teze, aceasta este prezentă în fiecare etapă și rezultatele alimentează schimbările în abordări atât pentru revizuirea literaturii, cât și pentru etapele următoare de cercetare.

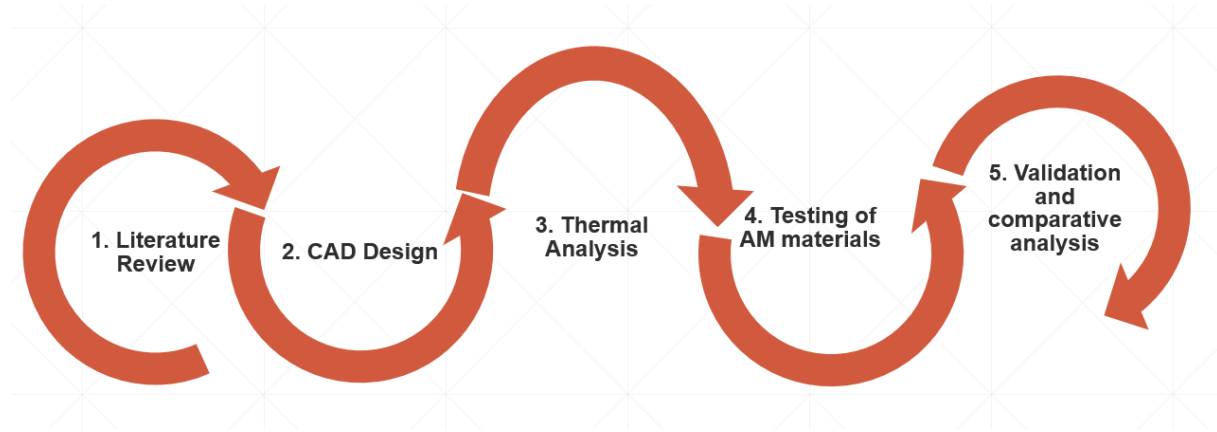


Figura 1.3 Metodologia de cercetare

Combinarea fabricației aditive cu microreactoarele nucleare este o nouă abordare care promite să schimbe proiectarea și fabricarea componentelor pentru aplicațiile tehnologice nucleare. Fiind operate în aplicații izolate, cum ar fi avanposturi militare, activități spațiale sau orașe fără acces la rețeaua electrică principală, microreactoarele nucleare sunt alternative bune pentru crearea de energie sigură și fiabilă. Tehnologia modernă de producție cunoscută sub numele de fabricație aditivă, uneori denumită imprimare 3D, permite componentelor să fie create prin adăugări succesive de materiale, permițând astfel realizarea unor geometrii complicate și personalizate care nu sunt posibile cu tehnicile de fabricație convenționale.

Aceste două discipline luate împreună oferă o serie de beneficii, în primul rând, AM permite optimizarea proiectării componentelor pentru microreactoare, îmbunătățind astfel performanța sistemului în general. Prin maximizarea transportului de căldură și optimizarea fluxului de răcire în interiorul reactorului, formele neconvenționale ajută la garantarea unei distribuții mai omogene a temperaturii și a unei funcționări mai eficiente. Prin intermediul tehnicilor AM, de exemplu, canalele de răcire cu forme ideale pot îmbunătăți gestionarea căldurii și pot reduce șansele de dezvoltare a punctelor fierbinți fără a compromite siguranța reactorului.

AM oferă, de asemenea, mai mult control asupra microstructurii materialelor, ceea ce este important în cadrul microreactoarelor nucleare care funcționează în condiții de radiații și temperatură ridicată. Prin personalizarea materialelor generate de AM pentru a avea anumite caracteristici mecanice și de rezistență, se garantează un răspuns mai bun la circumstanțele de funcționare. În plus, acest proces minimizează numărul de îmbinări și suduri necesare pentru asamblarea componentelor, reducând astfel șansele de defecte structurale și fisurare și îmbunătățind astfel fiabilitatea reactorului.

În plus, corelația AM cu microreactoarele nucleare are beneficii economice, cum ar fi adaptarea rapidă a proiectelor în funcție de nevoile specifice ale fiecărui reactor, posibilă datorită eficienței tot mai mari a procesului de fabricație, ceea ce contribuie, de asemenea, la reducerea timpului necesar pentru dezvoltarea componentelor. Progresul microreactoarelor depinde de această adaptabilitate pentru a îndeplini diverse cerințe de aplicație, iar fabricarea aditivă prezintă mijloacele de a personaliza fiecare reactor în funcție de cerințele locului de instalare, sporind astfel fiabilitatea și eficiența generală.

Combinarea de fabricație aditivă cu microreactoare nucleare oferă o soluție potențială pentru direcția energiei nucleare, contribuind astfel la depășirea constrângerilor actuale ale tehnicilor convenționale de fabricație. Acest mix oferă un răspuns viabil la cerințele energetice ale

secolului 21, deoarece permite optimizarea proiectării, îmbunătățirea performanței materialelor și potențialul de construire a unor reactoare mai eficiente și mai sigure.

1.3.1 Activități de îmbunătățire identificate în literatura existentă

Mai multe îmbunătățiri pot fi implementate în activitățile viitoare, o astfel de îmbunătățire fiind nevoia de tehnici de caracterizare mai cuprinzătoare pentru a înțelege microstructura și proprietățile mecanice ale materialelor AM utilizate în aplicații nucleare. Procesele AM pot duce la texturi anizotrope și eterogenități, care afectează proprietățile mecanice, cum ar fi rezistența la tracțiune și comportamentul la oboseală, sunt necesare cercetări suplimentare pentru a optimiza parametrii de proces și strategiile de tratament termic pentru a alinia proprietățile materialelor AM cu cele ale materialelor fabricate convențional. [12]

Lipsa unor standarde specifice pentru materialele AM în aplicațiile nucleare reprezintă un decalaj semnificativ. Deși există standarde pentru alte industrii, aplicațiile nucleare necesită standarde personalizate pentru a asigura siguranța și fiabilitatea. [13]

Procesele AM pot introduce defecte precum porozitatea și tensiunile reziduale, care pot compromite siguranța componentelor nucleare. Sunt necesare mai multe cercetări pentru a dezvolta metode de detectare și atenuare a defectelor pentru a asigura integritatea componentelor fabricate AM. [14] [13]

Comportamentul materialelor AM în condiții de iradiere reprezintă un factor critic în mediile nucleare și nu este bine înțeles. Sunt necesare studii privind comportamentele de deteriorare a iradierii și performanța pe termen lung a materialelor AM în reactoarele nucleare.

Calificarea și certificarea componentelor AM pentru aplicații nucleare sunt încă în stadii incipiente. Există o lipsă de procese și standarde bine stabilite pentru certificarea componentelor AM, ceea ce duce la costuri ridicate și timpi de livrare prelungiți. Dezvoltarea unui cadru solid de calificare și certificare, similar celor din industria aerospațială, este esențială pentru adoptarea AM în aplicațiile nucleare.

Eforturile de integrare a AM în codurile și standardele nucleare existente sunt în curs de desfășurare, dar sunt necesare mai multe eforturi pentru a stabili cadre de reglementare cuprinzătoare care să abordeze provocările unice ale AM. [15]

Eficiența energetică a proceselor AM în aplicațiile nucleare nu este bine documentată. Există o lipsă de standardizare în măsurarea și raportarea consumului de energie, ceea ce împiedică evaluarea AM.

Capitolul 2. Proiectarea conceptuală a vasului unui microreactor nuclear: cerințe și specificații

2.1 Metodologia de proiectare

În cadrul centralei nucleare, sunt îndeplinite mai multe funcții și subfuncții pentru a asigura o funcționare sigură și eficientă. Înainte de a identifica funcțiile, am identificat mai întâi sistemele și/sau echipamentele de nivel înalt responsabile de procesele descrise în Figura 2.1.

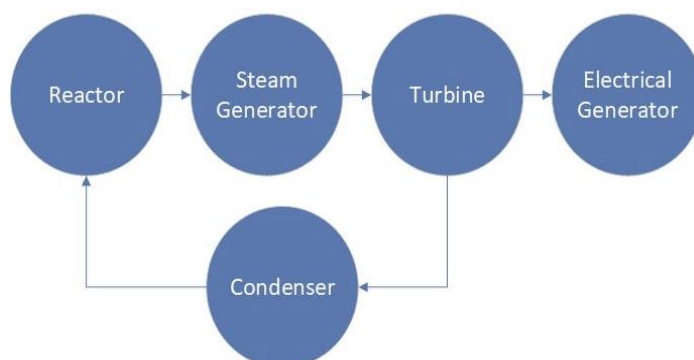


Figura 2.1 Sisteme/componente identificate

Menținerea siguranței și fiabilității aplicațiilor de energie nucleară depinde de contribuția sa la menținerea sub control a zonei active, controlul presiunii și temperaturii, ecranarea împotriva radiațiilor, suportul structural și integritatea sistemului.

Principala utilizare a unei nave de reactor este de a conține elemente radioactive produse în timpul fisiunii nucleare, servind drept barieră, prevenind eliberarea de materiale radioactive în mediul înconjurător și garantând siguranța publicului și a lucrătorilor. [16]

Vasele reactoarelor sunt făcute pentru a rezista la presiuni și temperaturi ridicate, facilitând astfel transferul eficient de căldură și generarea de energie. Menținerea condițiilor ideale pentru lichidul de răcire ajută la eliberarea regulată a energiei termice.[17]

Obiectivul analitic al navei este de a reduce expunerea la radiații a persoanelor care lucrează în zonă, oferind adăpost prin învelișul său robust, asigurându-se în același timp că produsele de fisiune sunt conținute în pereții reactorului, protejând astfel pe oricine lucrează în apropiere și mediul.[18]

Vasul reactorului oferă suport structural componentelor importante din miez, cum ar fi miezul reactorului, barele de control, canalele de răcire și sistemele interne și de aceea proiectul vasului reactorului ar trebui să fie suficient de puternic și durabil pentru a garanta fiabilitatea și stabilitatea sistemelor pe care le conține.[19]

Proiectarea navei trebuie să includă elemente de siguranță care pot suporta circumstanțe grave, cum ar fi posibile accidente sau defecțiuni. În cazul în care se convine asupra unei versiuni finale, produsul este supus unor teste amănunțite pentru a verifica capacitatea sa de a limita și regla reacțiile nucleare, prevenind astfel emisia de substanțe periculoase.[20]

2.2 Optimizarea proiectului și iterațiile

Procesul de proiectare CAD a implicat modificarea periodică a modelelor pentru a se alinia la tehnologia de fabricație aditivă și pentru a satisface nevoile prezentate în subcapitolul anterior.

Metodologia de proiectare prezintă procesul iterativ de creare a modelului dorit, stabilirea nevoilor și îmbunătățirea acestora pentru a se alinia la standardele industriei și la capacitățile dorite ale modelului.

Abordarea iterativă implică posibilitatea de a modifica modelul, specificațiile și nevoile ca urmare a feedback-ului primit pe parcursul procesului. Tehnica descrisă în Figura 2.2 este derivat din procesul Pahl și Beitz pentru proiectarea conceptuală și a fost modificat pentru mai multe faze care au fost identificate.[21]

În esență, metodologia Pahl și Beitz pune accentul pe un proces de proiectare sistematic și iterativ, care implică diferite etape, cum ar fi identificarea problemelor, generarea conceptelor, evaluarea și proiectarea realizării. Cea de-a șasea etapă din cadrul metodologiei este cea mai laborioasă și intensivă, deoarece include tipurile de analiză potrivite pentru un vas de reactor și compararea cu criteriile de acceptare identificate în literatura tehnică, cum ar fi ASME Boiler & Pressure Vessel Code.[22]

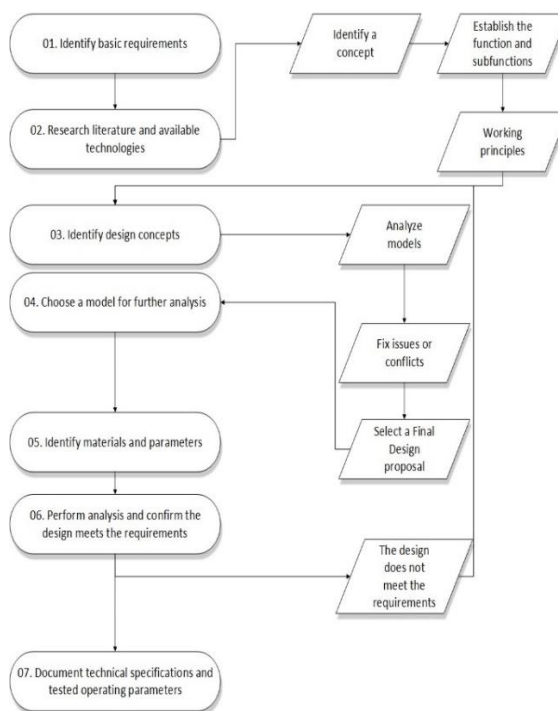


Figura 2.2 Metodologia CAD

Alegerea unei forme cilindrice pentru vasul unui reactor se bazează pe conceptele tehnice, experiența de operare a instalațiilor nucleare existente și factorii practici care îmbunătățesc integritatea structurală, fabricabilitatea și eficiența operațională. Reduce concentrațiile de stres, permițând o mai bună rezistență la presiunile interne și la solicitările termice. Forma cilindrică simplifică, de asemenea, fabricarea și utilizarea metodelor de fabricație aditivă, reducând dificultățile de sudare și minimizând șansele de eșec. Facilitează disiparea eficientă a căldurii, eficiența spațiului și integrarea cu sistemele auxiliare. Straturile cilindrice facilitează, de asemenea, instalarea scutirii împotriva radiațiilor, asigurând o protecție constantă, astfel încât

proiectul să îndeplinească cerințele de siguranță, performanță și fabricabilitate pentru microreactoarele nucleare.

În plus, vasul a fost încorporat cu conducte de căldură, această metodă de răcire a fost aleasă pentru compatibilitatea sa cu cerințele geometrice și de management termic ale reactorului, folosind forma cilindrică a vasului pentru a funcționa optim atunci când este aranjat într-o configurație radială. Această structură facilitează eliminarea uniformă a căldurii către schimbătoarele de căldură exterioare, reducând astfel diferențele de temperatură și minimizând posibilitatea unor zone localizate de temperatură ridicată care ar putea provoca deteriorarea sau defectarea materialelor. Conductele de căldură, care utilizează acțiune capilară pasivă și mecanisme de schimbare a fazei, cresc eficiența generală a evacuării căldurii în proiectul cilindric, fără a fi nevoie de piese mobile complexe sau de aport suplimentar de energie. Această integrare facilitează atât siguranța, cât și performanța, facilitând disiparea căldurii în timpul funcționării regulate, precum și în situații tranzitorii sau de urgență. rețelele de conducte de căldură, beneficiind de contact constant și cuplare termică și crescând capacitatea reactorului de a-și regla temperatura. Această decizie de proiectare este prezentată în Figura 2.3, ar trebui să contribuie atât la marjele de siguranță, cât și la caracteristicile compacte și scalabile ale sistemelor de microreactoare.

Proiectele conceptuale pentru vas au fost dezvoltate folosind ANSYS SpaceClaim, un software CAD 3D, acest software a fost ales pentru integrarea sa cu alte programe CFD. Simularea termică în ANSYS Fluent va fi utilizată pentru a simula transportul de căldură în interiorul vasului pe conductele interioare care au fost construite pentru a îmbunătăți schimbul de căldură și pentru a preveni punctele fierbinți. Constrângerile geometrice privind înălțimea, lățimea și volumul intern sunt implementate încă din faza incipientă de proiectare. Iterațiile de proiectare au progresat, integrând mai multe sisteme de răcire și încorporând conducte circulare.

Conductele cu carcasă circulară sunt proiectate în iterațiile ulterioare pentru a garanta un sistem de răcire sigur și eficient, așa cum este ilustrat în Figura 2.3. La introducerea Figura 2.4 (versiunea redusă 1:2), proiectul a fost supus iterației și optimizării pentru a încorpora un prototip la scară largă pentru teste suplimentare, stabilind o bază solidă pentru analiza termică.

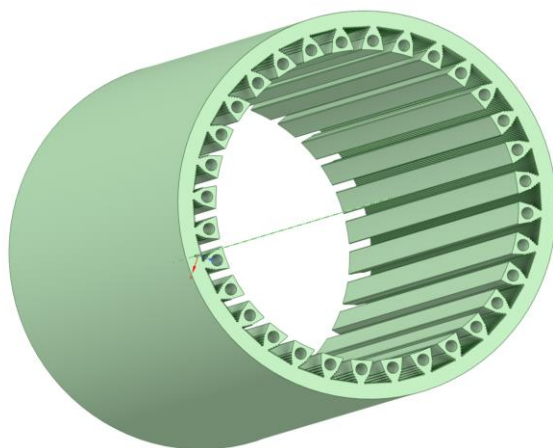


Figura 2.3 Model CAD - Proiectare inițială

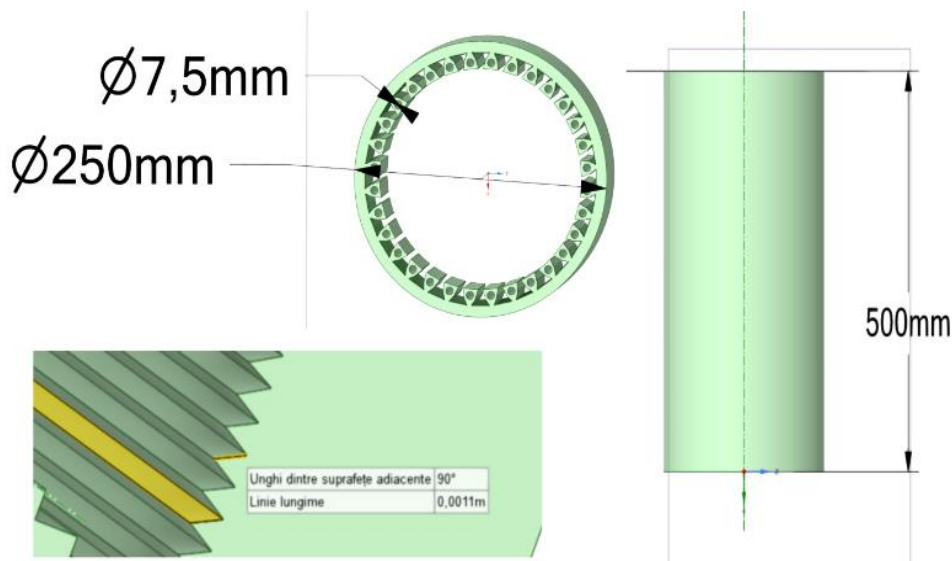


Figura 2.4 Considerații geometrice de proiectare inițială

Proiectul menține proporții consistente cu originalul, inclusiv caracteristici precum cupola de 125 mm și înălțimea cilindrică a corpului de 247,21 mm. Această versiune de dimensiuni reduse permite analize și testări la scară mai mică, asigurându-se că caracteristicile primare de proiectare sunt păstrate, minimizând în același timp utilizarea resurselor în timpul procesului de fabricație. Această iterație specială a fost făcută cu gândul de a fabrica întregul model într-o singură parte, cu limitările platformelor de imprimare de fabricație aditivă existente.

Tabelul 2.1 Modele de proiectare conceptuală – comparație de specificații

| Parametru | CD 3 | CD 2 | CD 1 | Proiect final |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--|
| Masa vasului | 48.2219 kg | 45.3332 kg | 76.9689 kg | 125.1254 kg |
| Înălțime | 0,25m | 0,25m | 0,25m | 0,25m |
| Lățime | 0,25m | 0,25m | 0,25 m (0,29 m – inclusiv conducte) | 0,25m |
| Lungime | 0,67m | 0,67m | 0,7839m | 0,65734m |
| Volumul interior al vasului | 0,0241m ³ | 0,0231m ³ | 0,0241m ³ | 0,016 m ³ |
| Volumul total al conductelor | 0,0011m ³ | 0,003m ³ | 0,0011m ³ | ø7,5mm -0,0011m ³ ø35mm -0,0063 m ³ Total -0,0074 m ³ |
| Materialul vasului | Oțel inoxidabil 316L | Oțel inoxidabil 316L | Oțel inoxidabil 316L | Oțel inoxidabil 316L |
| Densitatea materialului vasului | 8000 kg/ m ³ | 8000 kg/ m ³ | 8000 kg/ m ³ | 8000 kg/ m ³ |
| Fluid de lucru | Apă sau heliu (Nedefinit încă) | Apă sau heliu (Nedefinit încă) | Apă sau heliu (Nedefinit încă) | Apă sau heliu (Nedefinit încă) |
| Masa de apă estimată în volum | 22,92 kg | 23.1342Kg | 25,2203Kg | 25,2203Kg |
| Volumul estimat de lichid | 0,0229 m ² | 0,0231 m ² | 0,0251 m ² | 0,0251 m ² |

Contribuții teoretice și experimentale privind proiectarea și realizarea vasului unui microreactor nuclear prin tehnologii de fabricație aditivă/

| | | | | |
|--|--|---|--|---|
| Suprafața totală a fluidului | 1.1833m ² | 1.3411m ² | 2.613 m ² | 2.613 m ² |
| Masa estimată a gazului (heliu) în volum | 0,0041 kg | 0,0041 kg | 0,0041 kg | 0,0041 kg |
| Informații despre conducte | 10 conducte cu 10 intrări și 10 ieșiri dispuse într-un model circular. | 5 conducte cu 5 intrări și 5 ieșiri dispuse într-un model circular. | 16 conducte cu 16 intrări și 16 ieșiri dispuse într-un model circular. | Ø7,5mm -16 conducte cu 16 intrări și 16 ieșiri dispuse într-un model circular. ø35mm – 9 conducte care trec prin vas |
| Diametrul interior al conductei | ø15mm | ø 15mm | ø 7,5mm | ø7,5mm ø35mm |
| Grosimea maximă a vasului | 12,5 mm | 12,5 mm | 13.2856 mm | 13.2856 mm |
| Grosimea minimă a vasului | 5 mm | 2,5 mm | 2,17 mm | 2,17 mm |

Tabelul 2.1 prezintă evoluția proiectării modelelor considerate prin trei concepte inițiale (CD1, CD2, CD3) care contribuie la un proiect final. În timpul fazelor de dezvoltare, masa vasului variază, începând de la 76,97 kg în CD1, scăzând la 45,33 kg în CD2 și apoi crescând marginal la 48,22 kg în CD3. Cu toate acestea, proiectul final cântărește 125,13 kg, ceea ce se datorează caracteristicilor suplimentare și îmbunătățirilor structurale importate din toate cele trei modele. Înălțimea (0,25 m) și lățimea (0,25 m) a navei sunt consistente, în timp ce lungimea prezintă variații minore, culminând cu o măsurătoare finală de 0,657 m, indicând un grad mic de compactitate în comparație cu iterațiile anterioare. Proiectul final prezintă o reducere a volumului interior (0,016 m³), acest lucru se datorează optimizărilor menite să îmbunătățească performanța, să minimizeze surplusul de material, să crească debitul prin canale dedicate și să crească stabilitatea generală prin suportul în formă de mesh al conductelor.

Vasul este proiectat pentru a găzdui fie apă, fie heliu ca fluid de lucru, fără a se lua o decizie concludentă în acest moment. Capacitatea fluidului este identificată ca fiind de 0,0251 m³ în toate proiectele, cu diferite configurații de conducte în proiectarea finală, cu un sistem cu două conducte pentru dinamica fluidelor și schimbul termic optim, iar volumul de conducte identificat este de 0,0074 m³, ușor crescut față de iterațiile anterioare. Grosimea vaselor variază de la 13,29 mm la 2,17 mm, echilibrând rezistența și greutatea materialului. Suprafața care poate fi ocupată de fluide crește în CD1 și rămâne neschimbată în proiectul final. Mai multe modificări de proiectare în proiectul final, care au fost făcute pentru a crește stabilitatea fizică generală a modelului, pot prezenta rezultate mai bune atât pentru rezistența fizică, fluxul de fluide și schimbul termic.

Figura 1. 4 prezintă locația și dimensiunile tuturor găurilor identificate prezente în modelul final. și Figura 1. 5 Evidențiază imaginea wireframe și secțiunea modelului cu dimensiuni generale.

Capitolul 3. Analiza termică a vasului

3.1 Condiții la limită și ipoteze

Ipotezele inițiale ale analizei sunt:

- Temperatura la suprafața exterioară a conductei a fost selectată pentru trei temperaturi diferite pentru a verifica care este optimă pentru evacuarea unei cantități optime de căldură pentru debitul specific al fiecărei conducte. Temperaturile selectate sunt 500°C, 550°C și 600°C.
- Pentru a utiliza mai bine capacitatea de simulare, am selectat trei diametre de conducte care s-ar potrivi în geometria vasului și ar oferi un debit suficient pentru a evacua căldura necesară. Distribuția acestora în geometrie ar avea loc după prezentarea rezultatelor. Diametrele conductelor selectate sunt de 10 mm, 7 mm și 5 mm.
- Am luat în considerare accelerația gravitațională la 9,8 m/s².
- Configurația mesh-ului este ușor modificată pentru fiecare iterație din cauza modificărilor diametrului conductei.
- Grosimea conductei este menținută aceeași la toate modelele la 2,5 mm.

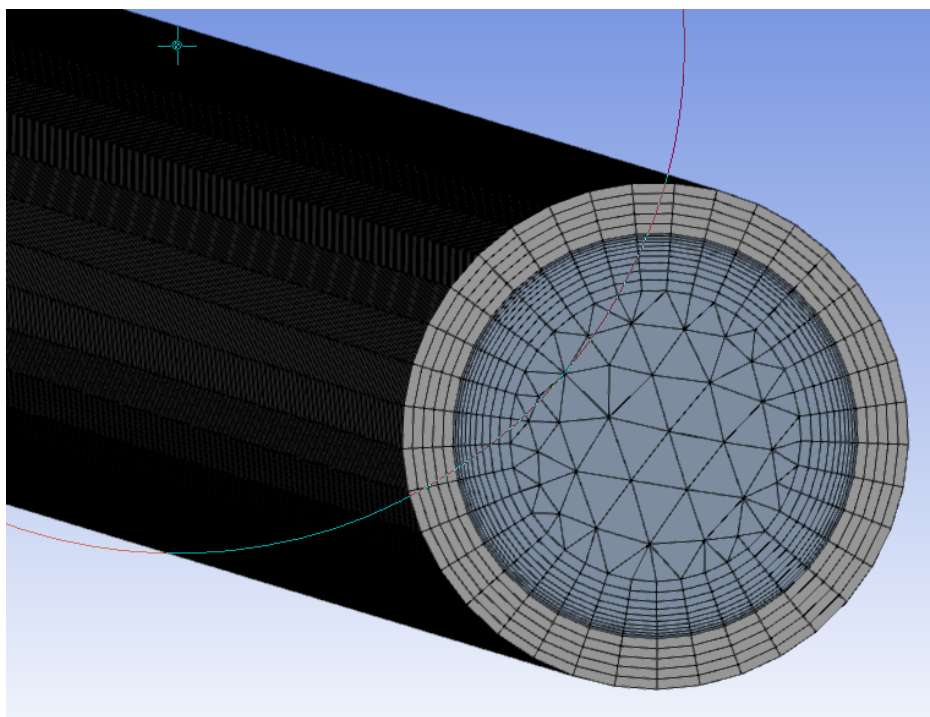


Figura 3.1 Configurația de mesh utilizat în analiză

Mesh-ul prezentat în Figura 3.1 a fost selectat pentru a oferi un echilibru între capturarea stratului limită în detaliu, cu mai multă densitate pentru mesh hexaedric, în timp ce mijlocul conductei are un mesh triunghiular mai mare, mai puțin structurat pentru a permite concentrarea puterii de calcul disponibile acolo unde procesul merită monitorizat.

Această analiză monitorizează comportamentul materialului selectat în timpul transportului fluidului fierbinte și modul în care acesta facilitează transferul de căldură în continuare.

Modelarea CFD folosește selecții numite pentru a clasifica corpuri sau suprafețe pentru a facilita configurarea analizei și post-procesarea pentru a selecta datele relevante. Selecția denumită pentru această analiză este prezentată în Figura 3.2.

S-au făcut selecții denumite pentru următoarele suprafețe/corpuri:

- Admisie (fluid - suprafață)
- Ieșire (fluid - suprafață)
- Fluid (corp fluid)
- Conductă exterioară (solidă - suprafață)
- Conductă interioară (solid - suprafață)
- Conductă de admisie (solid - suprafață)
- Conductă de ieșire (solid - suprafață)
- Fluid de perete (perete)

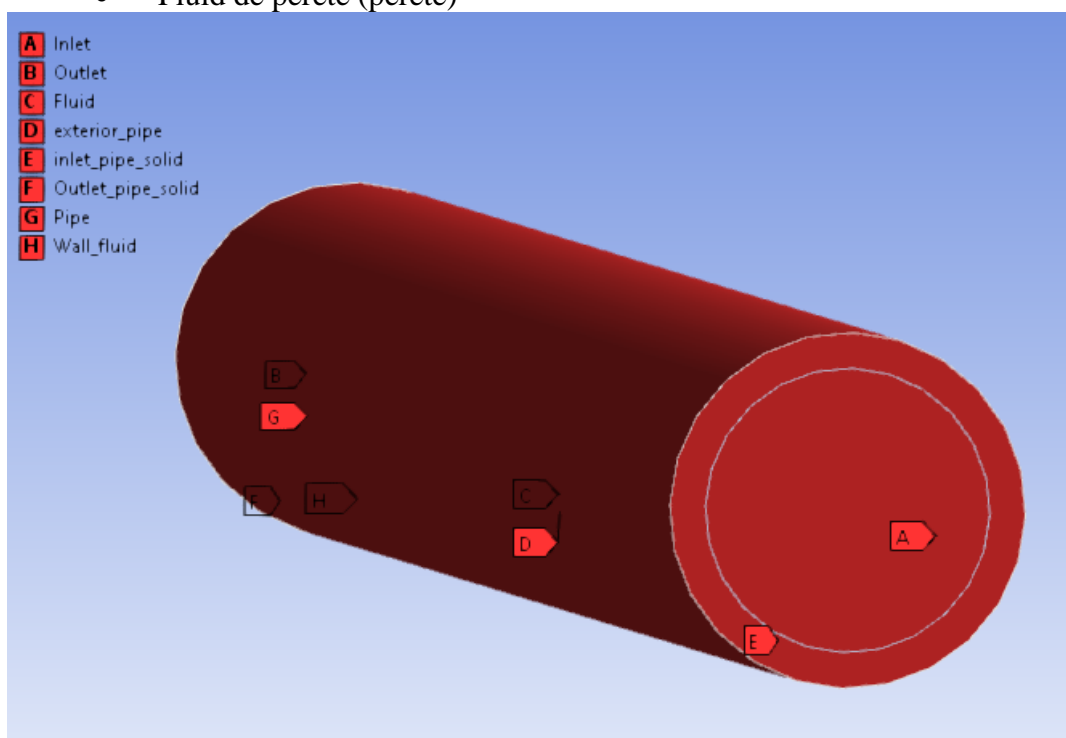


Figura 3.2 Selecție denumită pentru modele de conducte

Tabelul 3. 1 Variația densității SS316L cu temperatura [64]

| Temperatură În grade Celsius | SS316L Densitate ($\text{kg} \times \text{m}^{-3}$) |
|------------------------------------|--|
| 26,85 | 7954 |
| 126,85 | 7910 |
| 226,85 | 7864 |
| 326,85 | 7818 |
| 426,85 | 7771 |
| 526,85 | 7723 |
| 626,85 | 7674 |

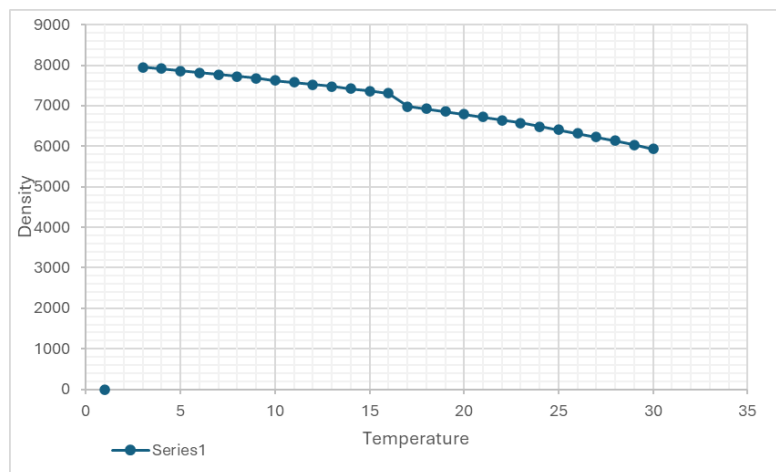


Figura 3.3 SS316L AM Variația densității în funcție de temperatură

Tabelul 3. 1 prezintă baza de date disponibilă pentru comportamentul SS316L și variația acestuia cu temperatura este reprezentată grafic în Figura 3.3. Acolo se poate observa variația densității SS316L cu temperatura, ceea ce indică o tendință de scădere a densității pe măsură ce temperatura crește. Pornind de la 7954 kg/m³ la aproximativ 27°C, densitatea scade constant, ajungând la 5930 kg/m³ la 2727°C. Această tendință reprezintă comportamentul SS316L AM pe măsură ce se extinde odată cu creșterea temperaturii, ceea ce duce la o reducere a densității. Având în vedere temperatura de funcționare pentru această analiză, nu se așteaptă modificări semnificative ale densității materialului în intervalul de temperatură între 27°C și 600°C, în timp ce alte scenarii care implică temperaturi mai ridicate pot necesita mai multă putere de procesare. În acest model, se presupune că densitatea materialului va rămâne constantă.

Selecțiile numite au rămas aceleași pentru fiecare analiză pentru continuitate, pentru a compara rezultatele și pentru a evita erorile în proces.

Pentru proprietățile materialelor simulate în analiză, a fost utilizată baza de date ANSYS din surse de date ingineresti. Selectarea materialului din baza de date software este benefică, deoarece conține măsurători documentate ale modificărilor proprietăților materialului atunci când temperatura este schimbată. Acest software are, de asemenea, valori reprezentative pentru SS316L pentru fabricație aditivă, ceea ce înseamnă că rezultatele sunt reprezentative. [23]

Au fost selectate următoarele condiții limită:

- Metoda de specificare a vitezei: Magnitudine, Normal la limită.
- Cadru de referință: Absolut.
- Magnitudinea vitezei: 1,5 m/s.
- Frația intensității turbulenței: 0,05.
- Raportul vâscozitate turbulenței: 10.
- Temperatura la intrarea fluidului: 280°C.
- Presiunea manometrică la ieșire: 50 bari.
- Metoda de specificare a direcției de reflux: normală la limită.
- Frația de intensitate turbulentă de reflux: 0,05.
- Raport de vâscozitate turbulentă de reflux: 10.
- Valorile temperaturii exterioare a conductelor de 500°C, 550°C și 600°C.
- Conductă de admisie solidă: 300 ° C.

- Mișcarea peretelui: Perete staționar.
- Condiție la limită (solid-fluid): Fără alunecare.
- Modele de rugozitate: Standard.
- Condiții termice: Cuplată.

3.2 Analiză și interpretare

Analiza a fost efectuată pe eșantioane reprezentative ale conductelor, aceste probe trebuie să ofere feedback termic și de viteză prin simularea unui fluid care se deplasează cu o viteză constantă prin conductă și este încălzit din învelișul exterior al conductei.

Pentru fiecare model de conductă se așteaptă feedback din analiză, care acoperă următoarele:

- Comportamentul termic și transferul de căldură.
- Feedback de viteză.
- Expansiunea termică și stresul sunt discutate pentru această analiză, deoarece diametrul a fost selectat conservator la 2,5 mm. Conductele trec prin vas și trebuie să aibă o grosime și un suport mai mari decât cele incluse în această simulare.

Toate conductele au o lungime de 500 mm, a fost selectat astfel datorită lungimii totale a vasului, fiind aceeași lungime oferă o imagine reprezentativă .

O incertitudine care trebuie luată în considerare pentru o analiză ulterioară este distribuția conductelor în vas și modul în care afectează transferul de căldură și feedback-ul vitezei. Debitul poate fi influențat dacă toate conductele sunt alimentate dintr-o singură sursă de agent de răcire.

3.3 Concluzii și contribuții ale autorilor

Această parte a cercetării prezintă o analiză termohidraulică pentru diferite diametre și configurații de conducte utilizate pentru a determina gestionarea eficientă a căldurii pentru vasul unui microreactor nuclear.

| Diameter (mm) | Number of Pipes | Pipe Exterior Temperature (°C) | Inlet Temperature (°C) | Temperature Difference (°C) | Heat Transfer Rate per Pipe (kW) | Total Heat Transfer (kW) |
|---------------|-----------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 15 | 10 | 600 | 280 | 192 | 91.37 | 913.7 |
| 15 | 5 | 550 | 280 | 167.3 | 79.65 | 398.25 |
| 7.5 | 16 | 600 | 280 | 104.6 | 24.37 | 389.92 |
| 7.5 | 16 | 550 | 280 | 88.1 | 20.55 | 328.8 |
| 35 | 9 | 600 | 280 | 192 | 227.26 | 2045.34 |

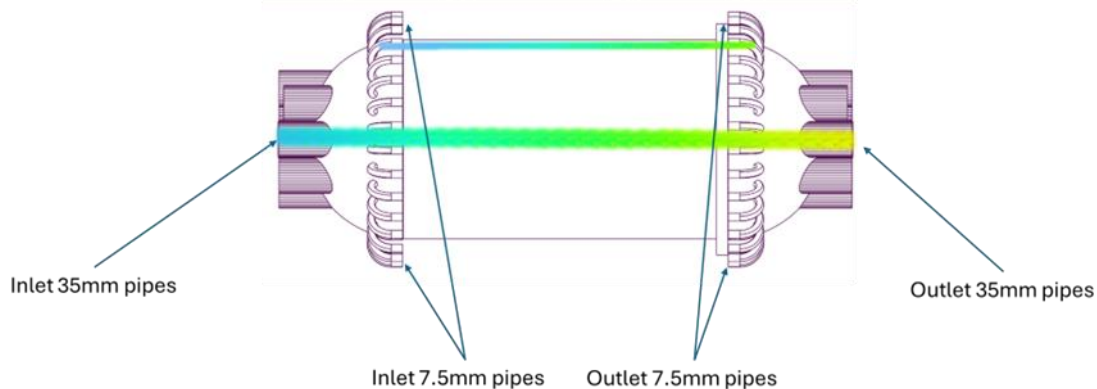


Figura 3.4 Model de schimb de căldură

Pe baza modelului de schimb de căldură prezentat în Figura 3.4, apar mai multe soluții, doar cea cu o secțiune de conductă de 35 mm depășind ținta de putere termică de 2Mw. Studiile suplimentare trebuie să rafineze modelele identificate și să continue cu validarea experimentală. Analiza trage următoarele concluzii:

- Rezultatele simulării arată că diametrele mai mari ale conductelor, simulate în această analiză ca conducte model de 35 mm, sunt mai eficiente în transferul de căldură, cu o rată de transfer de căldură de aproximativ 227,26 kW pe conductă la 600 °C. Această configurație îndeplinește obiectivul de evacuare termică eficientă, sugerând că este potrivită pentru transportul căldurii primare din miezul reactorului.
- Diametrele mai mici ale conductelor, cum ar fi 5 mm și 7 mm, au demonstrat un transfer eficient de căldură; Cu rate de transfer de căldură semnificativ mai mici, aceste conducte mai mici ar putea fi potrivite pentru aplicații de răcire suplimentare sau pot îndeplini cerințele de răcire primară cuplate cu conductele cu diametru mai mare.
- Profilul de viteză a fluidului a rămas același în toate configurațiile de conducte și temperaturile exterioare (500 ° C, 550 ° C și 600 ° C). Acest lucru arată că regimul de curgere din conducte nu este afectat de schimbările de temperatură la grosimile studiate. Această stabilitate înseamnă că lichidul de răcire va curge fiabil într-o serie de condiții de funcționare.
- Gradientele termice ridicate, în special în conductele cu diametrul de 35 mm cu temperaturi ridicate de suprafață, sunt susceptibile de a introduce un stres termic semnificativ în materialul conductei. Studiile viitoare ar trebui să examineze acest aspect în continuare pentru a asigura integritatea mecanică și pentru a preveni oboseala sau defectarea materialului în timpul funcționării prelungite în condiții similare.
- Rezultatele analizei indică necesitatea unui sistem de management termic echilibrat care combină diferite diametre de conducte, cu conducte mai mari pentru evacuarea căldurii primare și conducte mai mici pentru răcire suplimentară.
- Studiile viitoare ar trebui să se concentreze pe stresul termic și degradarea materialelor din cauza expunerii prelungite la gradientele de temperatură ridicată și radiații; Un model mai complex care implică mai multe surse de răcire ar putea oferi informații despre optimizarea configurațiilor sistemului de răcire în vas.

Autorul a contribuit la:

- Proiectarea și configurarea simulării termice în ANSYS CFD.
- A rulat simulările de dinamică a fluidelor computaționale (CFD) în diferite configurații de temperatură și diametru al conductelor pentru a studia comportamentul termic și dinamica fluidelor.
- A analizat rezultatele de simulare pentru gradientele de temperatură, profilurile de viteză a fluidului și rate de transfer de căldură pentru fiecare diametru de conductă în diferite condiții de temperatură.
- Rezultatele compilate în tabele și cifre (de exemplu, profiluri de temperatură și viteză pentru fiecare configurație) și randări de volum pregătite pentru a reprezenta vizual rezultatele simulării.
- A efectuat comparații preliminare, a notat domenii pentru cercetări suplimentare și a evaluat implicațiile pentru siguranța și eficiența reactorului.

Capitolul 4. Testarea probelor de oțel inoxidabil 316L imprimare 3D

4.1 AM și eșantionul convențional Compararea rezultatelor și discuții

În această parte a studiului, vom compara comportamentul mecanic în condiții de stres al probelor AM seria E și a probelor convenționale seria T. Mergând mai departe, cercetarea va aborda rezultatele testelor după efectuarea unui test de tracțiune uniaxială folosind o mașină Forta Instron 8800. Configurația experimentală a măsurat răspunsul mecanic al probelor sub sarcină crescătoare, această sarcină a fost măsurată într-o secvență de pași și analizată.

Au fost monitorizați următorii parametri:

- 1) Intrarea analogică relativă, care reprezintă sarcina aplicată pentru fiecare probă la fiecare etapă specifică, este captată ca intrare analogică relativă și crește pe măsură ce testul progresează.
- 2) Deformarea medie efectivă (Von Mises) este monitorizată și înregistrată pentru fiecare etapă, în general, măsoară deformarea medie efectivă pe suprafața probei. Acest parametru este util în evaluarea ductilității materialului și este măsurat în procente.
- 3) Sunt monitorizate două deformări principale medii, prima reprezintă deformarea pe suprafață care arată deformarea maximă într-o direcție, iar a doua reprezintă deformarea minimă în direcția perpendiculară.
- 4) Sigma este o valoare calculată care reprezintă valoarea tensiunii la fiecare pas, corespunzătoare forței pe unitate de suprafață pe eșantion.

Pentru fiecare probă, testul începe de la o linie de bază cu sarcină aplicată zero și, pe măsură ce sarcina crește, se așteaptă ca valorile deformării să crească și în ambele direcții, împreună cu valorile sigma reprezentând răspunsul de deformare al materialului la sarcina aplicată.

Cele două serii de eșantioane T și E sunt analizate și discutate în continuare pentru fiecare test de probă, iar parametrii observați sunt documentați rezumând datele din ambele serii de eșantioane.

4.2 Concluzii și contribuții ale autorilor

Curbele de tensiune-deformare și imaginile SEM ale probelor fracturate realizate cu AM demonstrează rezistențe la tracțiune și curgere mai bune decât probele realizate cu metode convenționale, cu o structură de granulație mai fină văzută în imaginile SEM, care indică trăsăturile obișnuite ale proceselor AM. De asemenea, sunt puțin mai puțin ductile, după cum arată alungirea lor mai mică la valorile de rupere, în ciuda rezistenței în creștere, distribuția structurii granulelor indică faptul că procesul de fabricație aditivă poate afecta ductilitatea. Examinarea SEM a probelor AM a indicat că flexibilitatea scăzută a materialului înainte de defectare poate fi atribuită golurilor și anomaliilor microstructurii. În ciuda faptului că au o rezistență mai mică la tracțiune, probele realizate folosind metodele tradiționale de producție au demonstrat o flexibilitate mai mare.

Tehnica statistică cunoscută sub numele de ANOVA, sau Analiza Varianței, determină dacă există o diferență documentată între valorile medii a trei sau mai multe valori monitorizate

în acest caz particular, evaluând factorii de impact și semnificația lor statistică pentru cercetare.[24]

După gruparea datelor colectate, s-au determinat valoarea F (raportul dintre două varianțe) și valorile probabilității. Variațiile semnificative ale caracteristicilor de tracțiune între grupuri sunt indicate de o valoare de probabilitate mai mică de 0,05, ceea ce sugerează că aceste variații au fost cauzate de circumstanțele particulare ale probelor, cum ar fi defectele materiale, factorii de mediu, mai degrabă decât de a fi aleatorii.

Rezultatele încercărilor de tracțiune ale eșantioanelor, care sunt prezentate în Tabelul 4.1 și sunt înfățișate în Figura 4.1, au fost supuse unei analize a varianței. În seria de eșantioane prezentate anterior, au fost comparate tensiunea de tracțiune la punctul de rezistență maximă și tensiunea de tracțiune la punctul de curgere. Seria AM numerotată și seria convențională T au avut cea mai mare statistică F și am găsit diferențe în rezistența la curgere în toate comparațiile de eșantion. În punctul de rezistență la tracțiune, tensiunea de tracțiune fluctuează, iar valorile p sunt frecvent mai mari decât valorile p ale tensiunii de curgere.

Tabelul 4.1 Analiza probelor folosind ANOVA

| Grupuri de comparație | Proprietate mecanică | Valoarea F | Valoarea probabilității |
|--------------------------|---------------------------------------|------------|-------------------------|
| S1-S5, 1-5, E1-E5, T1-T5 | Tensiune de tracțiune a randamentului | 57.61 | $8.53 \cdot 10^{-9}$ |
| S1-S5, 1-5, E1-E5, T1-T5 | Rezistența la tracțiune | 13.60 | $1.15 \cdot 10^{-4}$ |
| S1-S5 și T1-T5 | Tensiune de tracțiune a randamentului | 76.50 | $2.28 \cdot 10^{-5}$ |
| S1-S5 și T1-T5 | Rezistența la tracțiune | 9.27 | 0.016 |
| 1-5 și T1-T5 | Tensiune de tracțiune a randamentului | 559.58 | $1.08 \cdot 10^{-8}$ |
| 1-5 și T1-T5 | Rezistența la tracțiune | 92.58 | $1.13 \cdot 10^{-5}$ |
| E1-E5 și T1-T5 | Tensiune de tracțiune a randamentului | 87.40 | $1.40 \cdot 10^{-5}$ |
| E1-E5 și T1-T5 | Rezistența la tracțiune | - | - |

Compromisurile legate de procesele de producție au fost stabilite printr-o comparație a probelor SS316L realizate prin metode aditive și convenționale. Fabricarea aditivă crește rezistența la tracțiune și la curgere a materialelor prin producerea unei microstructuri mai rafinate, dar cu o ductilitate ușor scăzută de aproximativ 10% în comparație cu probele convenționale. Personalizarea proceselor de fabricație la nevoile specifice ale aplicației este necesară atunci când alegeți metoda de producție potrivită. Pentru anumite aplicații, rezistența crescută a AM este avantajoasă, în timp ce tehnicile convenționale de producție ar putea funcționa mai bine pentru aplicații care necesită un echilibru între rezistență și flexibilitate.

Procesele relativ rapide de răcire și solidificare AM produc o structură de granule mai mică și o densitate de dislocare mai mare, care influențează rezistența la tracțiune.

Ratele relativ rapide de răcire și solidificare în AM oferă o structură mai fină a granulelor și o densitate de dislocare mai mare, afectând astfel rezistența la tracțiune.

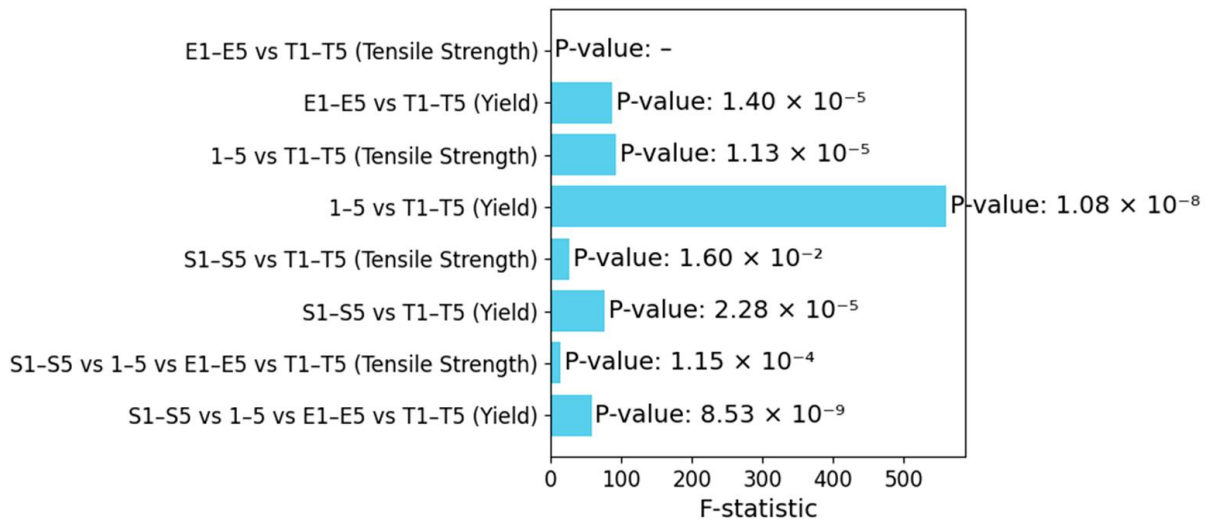


Figura 4.1 Compararea statisticilor F între diferite grupuri de eșantion

Oțelul inoxidabil 316L fabricat în mod convențional are o microstructură cu granule mai mari, care sunt distribuite mai uniform. Microstructura AM SS 316L, pe de altă parte, are granule mai fine și dezvoltarea granulelor coloane orientate în direcția de construcție datorită răcirii rapide a procesului AM. Probele AM au mai multă porozitate și anizotropie decât componentele fabricate convențional, ceea ce afectează parametrii mecanici precum rezistența la tracțiune și ductilitatea. Rafinarea cerealelor în probele AM crește rezistența, dar scade ductilitatea. [25][26]

În comparație cu abordările convenționale, procesul SLM AM îmbunătățește microstructura prin definirea arhitecturii granulare mai fine prin vitezele sale rapide de răcire și solidificare. În plus, caracteristicile materialului sunt îmbunătățite de construcția strat cu strat care produce gradient de temperatură accentuate și încurajează formarea granulelor coloane în direcția de construcție.[26]

Materialul devine mai fragil atunci când sunt prezente defecte microstructurale precum porozitatea, anizotropia și tensiunile reziduale, deoarece acestea diminuează capacitatea materialului de deformare plastică. Solidificarea rapidă produce structuri cu granulație fină care sporesc rezistența, dar reduc și ductilitatea prin limitarea capacității materialului de a se alungi înainte de a se defecta.

Dimensiunile mai mari ale granulelor din oțelul inoxidabil 316L produs convențional permit o mișcare mai mare de dislocare și deformare plastică, ceea ce îmbunătățește ductilitatea. Boabele mai mari slăbesc limitele granulelor, ceea ce poate ajuta la explicarea ductilității crescute observate. Ca urmare, materialul se poate întinde și absorbi mai multă tensiune înainte de a se rupe. Trebuie reținute restricții speciale la evaluarea constatărilor și concluziilor.

Cercetarea a folosit doar metoda de tratate de tip shot peening pentru a post-procesa probele pe care le-a prezentat; nu s-a concentrat în mod special pe alte tehnici de post-procesare.

Pe măsură ce tehnologia de fabricație aditivă avansează, există o probabilitate semnificativă ca sectorul nuclear să utilizeze din ce în ce mai mult piese și/sau materiale AM pentru componente mai critice. Acest lucru ar eficientiza procesul de fabricare a componentelor specifice la fața locului și de calificare a acestora pentru mediul prevăzut.

Comportamentul similar al calităților materialului AM SS316L a fost observat de D'Andrea, care a arătat în munca lor că duritatea materialului poate fi afectată semnificativ de procesele de post-procesare. În plus, caracteristicile de oboseală ale probelor sunt influențate de direcția de construcție și de stabilitatea austenitului [17].

Când au comparat două eșantioane, Kedizora et al. au observat în plus că materialul SS316L produs folosind modelele de mașini EOS care utilizează modelele de proces SLM a avut rezistența maximă la oboseală. În plus, au descoperit că tratamentul termic nu crește întotdeauna flexibilitatea unui material. În timpul dezvoltării bazinului de topire, Jeyaprakash s-a concentrat pe factorii de proces și efectele lor asupra orientării microstructurale a SS316L. Pentru a găsi cea mai bună procedură de post-procesare pentru creșterea ductilității, reducând în același timp compromiterea altor calități, sunt necesare mai multe cercetări asupra acestor rezultate.[27][28]

Cercetările viitoare ar trebui să se concentreze pe determinarea echilibrului ideal între densitatea de energie, puterea laserului, viteza, grosimea stratului și ratele de răcire. Analiza de fază și caracterizarea microstructurală ar trebui utilizate pentru a confirma cea mai bună selecție a parametrilor de proces. [27][28]

Dash A. și colab. afirmă că fabricarea cadrelor bimetalice radiale oferă perspective unice pentru proiectarea și producția de componente cu properties.to mecanic îmbunătățit; [29]

După cum se găsește în literatura relevantă, procedura de post-procesare a presării izostatice la cald (HIP) diminuează porozitatea internă, îmbunătățește densitatea materialului și implică, de asemenea, un tratament termic specific, care reduce tensiunile reziduale. Proceduri similare, cum ar fi shot peening, topirea cu laser de suprafață și modificarea suprafeței nanocristaline cu ultrasunete pot aborda modificarea suprafeței, concentrațiile de stres și pot îmbunătăți proprietățile mecanice ale probelor.[30] [31]

Au fost discutate criterii speciale de aplicare care pot influența alegerea între fabricația aditivă și metodele convenționale de fabricație pentru SS316L, iar alegerea între fabricarea aditivă (AM) și producția tradițională pentru SS 316L depinde de factorii pe care proiectantul este pregătit să îi abordeze pentru aplicații specializate, cum ar fi implanturi medicale, tehnologii aerospațiale sau nucleare.

Pentru a rezuma, fabricarea aditivă este o tehnică de producție adecvată în sectorul nuclear, industrie, iar SS316L este un material adecvat. Discrepanțele în rezultatele eșantionului reflectă diversitatea dimensiunilor și formelor probelor și demonstrează o îmbunătățire în raport cu probele tradiționale. Sunt necesare studii suplimentare pentru a stabili o strategie uniformă de testare pentru aceste materiale și tehnologii în domeniul nuclear.

Concluziile datelor din capitolul 4 sunt:

- Utilizarea topirii selective cu laser (SLM) pentru SS316L creează materiale cu proprietăți mecanice adecvate care, în comparație cu același aliaj fabricat prin metode convenționale și este un material bun pentru scopul acestei teze, care este de a demonstra că un microreactor care utilizează AM SS316L poate funcționa în siguranță. O analiză

mai detaliată trebuie să investigheze limitele de siguranță ale funcționării și modurile potențiale de defecțiune ale materialului.

- Deși s-a observat că probele AM prezintă o rezistență sporită, ele prezintă și ductilitate redusă. Structura rafinată a cerealelor și tensiunile reziduale de răcire rapidă în procesul AM contribuie la această flexibilitate redusă, așa cum indică alungirea mai mică la valorile de rupere.
- Analiza SEM arată granule mai fine, coloane, în probele AM aliniată cu direcția de construcție, promovând o rezistență mai mare, dar o ductilitate mai mică. Probele convenționale au prezentat granule mai mari, mai uniform distribuite, care facilitează o mai bună deformare plastică.
- Probele AM au prezentat o tensiune de tracțiune mai mare la curgere și rezistență maximă la tracțiune în comparație cu probele fabricate convențional. Cu toate acestea, probele AM au prezentat ductilitate scăzută, datorită porozității și anizotropiei.
- Porozitatea și stresul rezidual din probele AM contribuie la formarea de goluri, ceea ce reduce flexibilitatea. Acest lucru indică necesitatea optimizării parametrilor de proces și a potențialelor tratamente post-procesare pentru a îmbunătăți proprietățile probei AM.
- Golurile, spațiile goale și neregulile microstructurale observate în probele AM fracturate indică zone de îmbunătățire a procesului. Reducerea porozității prin tehnici precum presarea izostatică la cald ar putea îmbunătăți proprietățile materialului
- Analiza statistică a confirmat diferențe semnificative în proprietățile de tracțiune între probele AM și cele convenționale, întărind faptul că metoda de fabricație influențează semnificativ comportamentul mecanic
- Probele AM și-au menținut integritatea structurală după iradiere, arătând promițătoare pentru aplicațiile nucleare. Testele inițiale sugerează că probele AM pot rezista mai bine la iradiere decât probele fabricate în mod convențional, dar sunt necesare teste suplimentare după ce dozele de radiații scad și permit manipularea adecvată.
- Studiile ulterioare ar trebui să se concentreze pe optimizarea parametrilor AM, cum ar fi densitatea energiei, ratele de răcire și tratamentul termic post-fabricație pentru a îmbunătăți echilibrul dintre rezistență și ductilitate în AM SS316L. Cercetări suplimentare privind metodele de post-procesare, cum ar fi tratamentul termic și ameliorarea stresului, vor fi necesare pentru aplicații industriale mai largi.

Contribuțiile autorului la acest capitol sunt:

- A conceput și proiectat studiul, inclusiv selectarea SS316L ca material și SLM ca tehnică principală de fabricație aditivă.
- Interpretarea datelor SEM, ajutând la identificarea anomaliilor microstructurale și a potențialelor îmbunătățiri ale procesului pentru AM SS316L
- A analizat datele de tensiune-deformare și a efectuat analize statistice ANOVA pentru a evalua diferențele de proprietăți mecanice între probele AM și cele convenționale.
- A efectuat analize post-iradiere, evaluând integritatea mecanică și stabilitatea probelor expuse fluxului de neutroni.
- A compilat datele, a redactat articolele și a oferit informații despre implicațiile AM pentru aplicațiile nucleare.

Din lucrările efectuate în acest capitol au fost publicate următoarele articole:

1. Sumanariu Constantin, Amza Catalin Gheorghe, Florin Baci, Vasile Mihai, Nicoară Adrian. (2024). Analiza comparativă a proprietăților mecanice: fabricație convențională vs. aditivă pentru oțel inoxidabil 316L. *Materiale*. 17. 4808. 10.3390/ma17194808.
2. Sumanariu, C. A., Amza, C. G., Giolu, C., Stanciu, S. și Savu, M. (2024). Analiza SEM a probelor din oțel inoxidabil 316L și convenționale fabricate aditiv. *Revista Tehnologiilor Neconvenționale, Asociația Română a Tehnologiilor Neconvenționale*, octombrie 2024.

Capitolul 5. Rezultatele și concluzia cercetării

5.1 Rezultatele cercetării și compararea cu ipoteza inițială

Sectorul nuclear se confruntă atât cu oportunități, cât și cu provocări odată cu implementarea tehnologiei AM. Deși AM poate oferi eficiență și precizie materialelor în microreactoarele nucleare, proprietățile și comportamentul său în medii specifice nucleare necesită un cadru de reglementare puternic.

Teza pornește de la ipoteza că este fezabil să se proiecteze vasul unui microreactor nuclear capabil să producă 2 MW termic folosind tehnici de fabricație aditivă, depășind limitările metodelor tradiționale de fabricație, în ceea ce privește complexitatea, constrângerile de dimensiune și cerințele de eficiență ale proiectelor de microreactoare. Ipoteza este că AM poate permite producerea unui vas compact și eficient, capabil să reziste la solicitări operaționale și termice.

Valorile rezultate din cercetare sunt:

1. Metrici structurale

- **Masa vasului:** (Variată între modele cu proiectul final de 125,13 kg).
- **Dimensiuni:**
 - **Înălțime:** 0,25 m (în mod constant pentru toate modelele).
 - **Lățime:** 0,25 m.
 - **Lungime:** Proiect final ușor compactat la 0,657 m.
- **Grosime:**
 - Max: 13,29 mm.
 - Min: 2,17 mm.

2. Valorile materialelor

- **Material:** oțel inoxidabil 316L.
- **Densitate:** 8000 kg/m³.
- **Proprietăți termice:**
 - **Conductivitate termică (20°C):** 16,2 W/m·K.
 - **Capacitate termică specifică (20°C):** 500 J/kg·K.

3. Metrici fluide

- **Opțiuni de fluid de lucru:** Apa a fost selectată pentru analiza termică, dar heliul oferă o alternativă viabilă.
- **Capacitate fluid:** 0,0251 m².
- **Masa estimată a apei:** aprox. 25,22 kg.
- **Suprafața totală a fluidului:** 2.613 m².
- **Masa gazului (heliu):** 0,0041 kg (aprox.).

4. Valori de configurare a conductelor

- **Sistem de conducte:**
 - **CD1:** 10 conducte cu 10 intrări și ieșiri (model circular).
 - **CD2:** 5 conducte (diametre mai mari, conducte cu carcasă circulară).
 - **CD3 (Proiect final):** Combinație de 16 conducte cu diametrul de 7,5 mm pentru debit și 9 conducte mai mari cu diametrul de 35 mm.
- **Diametrul interior al conductei:**
 - 7,5 mm pentru conducte standard.
 - 35 mm pentru canale de curgere mai mari în proiectul final.

5. Valori și cerințe termice

- **Rezistență la temperatură:**

- **Temperatura maximă de funcționare:** 600 ° C până la 800 ° C, concepută pentru a se potrivi condițiilor reactorului nuclear.
- **Valori nominale de presiune:**
 - **Apă:** Până la 150 bar (1.450 psi).
 - **Heliu:** Până la 150 bar (2.175 psi).
- **Etanșeitate:** Rata de scurgere țintă < $1,0 \times 10^{-12}$ mbar·l/s.
- **Suprafață de schimb de căldură:** Țintă > 2 m² pentru o disipare termică eficientă.

6. Rate de transfer de căldură pe conductă

- **Conducte cu diametrul de 10 mm:**
 - La 600°C: 91,37 kW
 - La 550°C: 79,65 kW
 - La 500°C: 64,78 kW
- **Conducte cu diametrul de 7 mm:**
 - La 600°C: 24,37 kW
 - La 550°C: 20,55 kW
 - La 500°C: 16,76 kW
- **Conducte cu diametrul de 5 mm:**
 - La 600°C: 21,58 kW
 - La 550°C: 18,36 kW
 - La 500°C: 15,03 kW
- **Conducte cu diametrul de 35 mm:**
 - La 600°C: 227,26 kW

7. Estimări ale transferului total de căldură

- **Conducte de 10 mm (10 unități):** ~913,7 kW la 600°C
- **Conducte de 7,5 mm (16 unități):** ~389,92 kW la 600°C
- **Conducte de 35 mm (9 unități):** ~2045,34 kW la 600°C
- Configurația combinată îndeplinește cerințele țintă de evacuare termică pentru o disipare eficientă a căldurii.

8. Profiluri de temperatură și observații ale vitezei fluidelor

- **Viteza fluidului:**
 - Profilurile de viteză consistente au fost menținute pe toate diametrele și temperaturile conductelor.
 - Viteza medie în centrul conductei: ~1,5 până la 1,98 m/s.
- **Gradiențe termice:**
 - Diferențe mai mari de temperatură au fost observate în conductele mai mari, indicând un transfer eficient de căldură, dar un stres termic potențial crescut.
- **Scăderea temperaturii pe conducte:**
 - Conducte de 10 mm: ~192°C la 600°C
 - Conducte de 7 mm: ~104,6°C la 600°C
 - Conducte de 5 mm: ~181,7°C la 600°C

9. Stabilitate și regim de curgere

- Fluxul laminar stabil a fost menținut în toate condițiile de temperatură, fără turbulențe semnificative.
- Stabilitatea vitezei fluidului indică un flux fiabil de lichid de răcire prin conducte, indiferent de diametrul conductei și variația temperaturii.

10. Implicații de proiectare

- **Configurație optimă:** Se recomandă un amestec de conducte mai mari (35 mm) și cu diametru mai mic, cu conducte mai mari care se concentrează pe evacuarea căldurii primare și altele mai mici pentru răcire suplimentară.
- **Stres termic:** Conductele mai mari sunt mai eficiente în transferul de căldură, dar necesită investigații suplimentare asupra impactului stresului termic pentru integritatea structurală pe termen lung.

11. Integritate mecanică în condiții de reactor

- **Rezistență maximă la tracțiune (UTS):**
 - AM SS316L a atins un UTS de 650-852 MPa, demonstrând capacitatea sa de a rezista la sarcini mecanice semnificative fără defecțiuni catastrofale.
 - Această rezistență ridicată îi permite să susțină integritatea structurală împotriva potențialelor presiuni interne în vasul microreactorului.
- **Rezistența la curgere:**
 - Cu o rezistență medie la curgere de 565 MPa, AM SS316L a prezentat robustețe sub solicitări mecanice prelungite, benefică în special pentru reținerea miezului care suferă cicluri de stres.
- **Ductilitate vs. rezistență**
 - AM SS316L a prezentat o ductilitate redusă, cu o alungire la rupere de aproximativ 40%, necesitând o analiză atentă a flexibilității sale în situațiile în care expansiunea termică și relaxarea tensiunii pot fi critice.

12. Toleranța la radiații și stabilitatea structurală

- **Modificări microstructurale induse de radiații:**
 - Analiza SEM post-iradiere a confirmat o restructurare minoră a suprafeței indusă de radiații în probele AM, dar nu a existat o degradare mecanică substanțială.
 - Formarea de vid în probele AM nu s-a înrăutățit după iradiere, indicând o microstructură stabilă sub expunerea fluxului de neutroni.
- **Fluența neutronică și fluxul de iradiere:**
 - Expunerea la un flux de neutroni de $\sim 1,66 \times 10^{14}$ n/cm²/s pe parcursul a 25 de zile sugerează rezistență în AM SS316L în condiții de reactor.
 - Probele și-au menținut integritatea structurală cu deplasarea estimată pe atom (DPA) în jur de 0,3 (metoda arc-DPA), indicând o susceptibilitate limitată la dislocarea indusă de radiații.

13. Răspuns stres-deformare și deformare plastică

- **Consistența modulului elastic:**
 - AM SS316L a prezentat un modul elastic de aproximativ 185.000 MPa, care este puțin mai mic decât SS316L convențional, dar în intervalul acceptabil pentru aplicații structurale în proiectarea microreactoarelor.
 - Acest modul permite un răspuns previzibil la stres-deformare sub sarcini operaționale, susținând rolul materialului în mediile reactorului.
- **Limitele de localizare și deformare a deformării:**
 - Zonele de localizare cu deformare mare au apărut doar la sarcini apropiate de limita de curgere, ceea ce face ca materialul să fie potrivit pentru sarcini mecanice susținute sub aceste limite.
 - Analiza progresivă a deformării a arătat că materialul ar putea trece de la deformarea elastică la cea plastică în mod previzibil, ajutând la evaluările integrității mecanice pentru proiectarea unei instalații nucleare.

14. Caracteristici microstructurale și de fractură

- **Dimensiuni porozitate și gol:**
 - Golurile din probele AM au variat de la 300 la 600 nm în secțiunile fracturate, dar stabilitatea structurală a persistat în condiții operaționale și de iradiere.
 - Prezența structurilor cu granulație fină cu porozitate controlată ajută la rezistența la rupere, AM SS316L demonstrând caracteristici de fractură ductilă care pot absorbi energia de deformare înainte de fractură.
- **Duritate specifică microreactorului:**
 - Analizele suprafeței de fractură sugerează că AM SS316L poate absorbi stresul datorită golurilor sale microstructurale inerente, oferind un mecanism controlat pentru disiparea energiei sub tensiune.
 - Acest profil de tenacitate se aliniază bine cu cerințele pentru microreactoare, unde rezistența la stres indus de tracțiune și iradiere este crucială.

15. Direcții de cercetare viitoare pentru aplicații îmbunătățite de microreactoare

- **Optimizarea parametrilor de proces:**
 - Rafinarea în continuare a puterii laserului, a densității de energie și a ratelor de răcire în procesul AM poate ajuta la îmbunătățirea ductilității și la reducerea anizotropiei microstructurale.
- **Tratamente post-fabricație:**
 - Tehnicile de post-procesare, cum ar fi presarea izostatică la cald sau tratamentul termic, ar putea îmbunătăți robustețea mecanică a SS316L și ar putea minimiza porozitatea.
 - Întărirea suprafeței și nitrurarea pot, de asemenea, să îmbunătățească rezistența la coroziune a materialului și să reducă oxidarea, susținând stabilitatea pe termen lung în mediile reactorului.
- **Studii cuprinzătoare de iradiere:**
 - Testarea extinsă a iradierii în condiții diferite de flux de neutroni ar putea oferi informații despre comportamentul SS316L în diferite etape operaționale ale reactorului.
 - Studii suplimentare privind analiza fazei și stabilitatea defectelor post-iradiere vor ajuta la validarea durabilității și rezistenței la rupere a AM SS316L în măsurile reale ale reactorului.

5.2 Contribuții în domeniu

Autorul a adus următoarele contribuții în domeniul cercetării:

Conceptualizarea și proiectarea vasului unui microreactor capabil să genereze 2 MW de energie termică, optimizând proiectul pentru fabricarea aditivă a SS316L.

Am identificat informații din literatura identificată despre aplicațiile de fabricație aditivă în ingineria nucleară, subliniind în special beneficiile și provocările unice ale AM în proiectarea reactoarelor.

Am identificat și sugerat soluții, inclusiv dimensiunile compacte ale reactorului, gestionarea îmbunătățită a căldurii și selecția materialelor pentru sistemele de microreactoare.

Am proiectat și analizat modelele CAD cu funcții integrate de management termic, folosind conducte de căldură și alte elemente pentru a îmbunătăți eficiența răcirii în condiții de radiații ridicate și temperaturi ridicate.

Am identificat și justificat alegerea oțelului inoxidabil 316L pentru vasului unui microreactor nuclear, subliniind compatibilitatea acestuia cu tehnicile AM și efectuând teste pentru performanța termică și mecanică.

Am abordat cerințele de reglementare pentru micro reactoare, inclusiv standardele românești și europene, și am propus măsuri pentru a asigura siguranța, fiabilitatea și conformitatea pentru componentele nucleare produse de AM.

Am investigat fezabilitatea tehnică a proiectului, analizând factori precum libertatea de proiectare, eficiența producției și potențialele beneficii din punct de vedere al costurilor față de metodele tradiționale.

Metodologii propuse și cadre de testare care pot informa viitoarele aplicații AM în sectorul nuclear, punând bazele cercetării și dezvoltării continue în tehnologia micro reactoarelor.

Am subliniat necesitatea unor studii suplimentare privind iradierea și stabilitatea mecanică post-iradiere în componentele fabricate AM.

Colaborări propuse între industrie și organismele de reglementare pentru a crea linii directe și standarde pentru AM în micro reactoarele nucleare, sprijinind aplicațiile sigure și inovatoare.

5.3 Limitările studiului

Limitările cercetării identificate în teză includ:

Rezultatele și concluziile sunt specifice procesului de fabricație selectat (Selective Laser Melting - SLM) și materialului (SS316L), limitând constatările la materialele și procesele de fabricație aditivă utilizate în acest studiu.

Nivelurile de porozitate variază în funcție de tipul și modelul mașinii de fabricație, precum și de materialele utilizate, ceea ce poate influența proprietățile mecanice și performanța generală a componentelor produse, ceea ce duce la potențiale inconsecvențe între probe.

În acest studiu a fost utilizat doar procesul de prelucrare ”shot peening” pentru post-procesare, în timp ce alte tehnici, cum ar fi presarea izostatică la cald, nu au fost explorate. Acest lucru limitează înțelegerea modului în care diferite metode de post-procesare ar putea îmbunătăți ductilitatea și proprietățile structurale ale materialului.

Studiul a întâmpinat provocări cu tensiunile reziduale și defectele microstructurale, inclusiv porozitatea și anizotropia, inerente procesului SLM. Aceste defecte contribuie la reducerea ductilității și pot limita utilizarea adecvată a materialului pentru aplicații care necesită deformări plastice semnificative.

În timp ce analiza vizuală inițială indică rezistența materialului la iradiere, sunt necesare studii mai cuprinzătoare, pe termen lung, pentru a înțelege pe deplin comportamentul SS316L produs de AM în condiții susținute de reactor.

O limitare semnificativă este absența unor standarde specifice pentru certificarea materialelor AM pentru uz nuclear. Acest decalaj prezintă provocări de reglementare și siguranță, deoarece standardele actuale nu acoperă în mod adecvat defectele unice (de exemplu, porozitate, stres rezidual etc.) introduse de AM.

Simulările termice ale studiului au utilizat geometrii simplificate ale conductelor și condiții limită pentru a reduce sarcina de calcul. Este posibil ca aceste simplificări să nu surprindă pe deplin geometria complexă și dinamica transferului de căldură prezente într-un microreactor real, cum ar fi suprafețe variabile și gradienti termici mai complicate. Analiza a fost efectuată pe un anumit interval de temperaturi externe (500°C, 550°C și 600°C) și cu scenarii operaționale limitate. Condițiile reale ale microreactorului ar putea implica intervale mai largi de temperatură, flux termic mai extrem și condiții de putere variabile care ar putea modifica comportamentul termic observat.

În timp ce analiza termică a inclus proprietățile SS316L din baza de date ANSYS, este posibil ca aceste proprietăți să nu reprezinte pe deplin SS316L fabricat aditiv (AM), în special la temperaturi ridicate.

Debitul de lichid de răcire în analiza termică a fost menținut constant, cu explorarea limitată a condițiilor de curgere tranzitorie sau turbulentă. În mediile reale ale microreactoarelor, fluxul de lichid de răcire ar putea varia, introducând un transfer de căldură în stare de instanță și o dinamică complexă a fluxului care ar putea afecta disiparea generală a căldurii.

Deși au fost identificate gradientele de temperatură, studiul nu a evaluat pe larg tensiunile termice care rezultă din aceste gradientele.

Limitările puterii de calcul au dus la concentrarea pe diametre specifice și scenarii de bază, restricționând capacitatea de a simula geometriile reactoarelor la scară completă sau de a explora o gamă mai largă de configurații ale schimbătoarelor de căldură.

5.4 Concluzii și activități de cercetare viitoare

Această cercetare a prezentat un proces detaliat care implică proiectarea, selectarea materialelor, caracterizarea termică și mecanică a vasului unui microreactor, utilizând oțel inoxidabil 316L fabricat aditiv ca unic material de construcție. Prin testare și analiză, au fost obținute informații cu privire la performanța, limitările și îmbunătățirile potențiale pentru AM SS316L într-un mediu de microreactor nuclear. Următoarele concluzii evidențiază constatările în dimensiunile structurale, termice, mecanice și de iradiere.

Vasul fost proiectat pentru a fi compact și robust, cu o masă finală de 125,13 kg, dimensiuni de 0,25 m înălțime și lățime și o lungime redusă la 0,657 m. Aceste specificații echilibrează stabilitatea structurală cu spațiul operațional necesar pentru performanța eficientă a reactorului.

Grosimea peretelui a variat între 2,17 mm și 13,29 mm, asigurând valori fiabile ale transferului de căldură în diferite condiții de temperatură ale reactorului.

Sistemul de fluide proiectat a gestionat eficient transferul de căldură, folosind apa ca lichid de răcire primar, oferind suficientă capacitate termică.

AM SS316L a prezentat o rezistență maximă ridicată la tracțiune (UTS) între 650-852 MPa și o rezistență medie la curgere de 565 MPa, indicând că poate rezista la sarcini mecanice considerabile fără defecțiuni

Ductilitatea materialului, cu o alungire la rupere de aproximativ 40%, sugerează că este potrivit pentru structurile în care este necesară o flexibilitate semnificativă, dar controlată. Cu toate acestea, ductilitatea inerentă redusă a AM SS316L, în comparație cu SS316L fabricat convențional, justifică o analiză atentă pentru zonele predispuse la expansiune termică.

Expunerea probelor AM SS316L la un flux de neutroni de aproximativ $1,66 \times 10^{14}$ n/cm²/s pe o perioadă de 25 de zile a demonstrat rezistență vizibilă la modificările microstructurale induse de radiații, dar din cauza câmpurilor de radiații crescute emise de activarea materialelor domeniul de aplicare al analizei post-iradiere este limitat la inspecția vizuală. Analize viitoare a probelor iradiate vor oferi date valoroase pentru comportamentul materialelor AM în câmpuri de iradiere ridicată.

Probele și-au menținut integritatea structurală cu o deplasare estimată pe atom (DPA) de aproximativ 0,3 (folosind metoda arc-DPA), indicând stabilitatea potențială a materialului în condiții asemănătoare reactorului.

În timp ce acest studiu oferă o bază decentă, mai multe domenii necesită investigații suplimentare pentru a îmbunătăți aplicabilitatea AM SS316L și pentru a optimiza proiectarea vaselor pentru microreactoare:

Studiile viitoare ar trebui să se concentreze pe rafinarea parametrilor procesului AM, cum ar fi puterea laserului, densitatea energiei și grosimea stratului pentru a îmbunătăți ductilitatea și a reduce anizotropia în AM SS316L.

Ratele de răcire și efectele solidificării rapide necesită o investigație aprofundată pentru a regla fin structurile granulelor, urmărind un echilibru ideal între rezistență și flexibilitate.

Tratamentele post-fabricație, inclusiv presarea izostatică la cald (HIP) și tratamentul termic, ar putea fi explorate pentru a minimiza porozitatea reziduală, a îmbunătăți ductilitatea și a reduce tensiunile interne din materialul AM SS316L.

Tehnicile de întărire a suprafeței, cum ar fi nitrurarea, trebuie investigate pentru a îmbunătăți rezistența la coroziune a materialului, asigurând durabilitate pe termen lung atât în condiții de temperatură ridicată, cât și în condițiile unui mediu de radiații.

Iradieria materialului pentru o perioadă mai lungă ar aduce mai multe date reale pentru analiză, dar ar necesita și mai mult timp pentru a permite analiza probelor.

Analiza avansată a schimbărilor de fază, a evoluției defectelor și a stabilității microstructurale post-iradiere va ajuta la validarea rezistenței SS316L, în special în cazul iradierii prelungite cu neutroni.

Corelația dintre stresul termic, fluxul de neutroni, temperatura și presiunea ar trebui analizată pentru a înțelege mai bine impactul temperaturii ridicate și al presiunii asupra stabilității structurale a navei în timp.

Testarea de oboseală a AM SS316L, concentrându-se pe încărcarea termică ciclică și tensiunile, ar oferi o descriere mai precisă a performanței pe termen lung a materialului, crucială pentru funcționarea sigură și durabilă a reactorului.

Explorarea potențialelor elemente de promovare a turbulențelor în proiectul conductei ar putea îmbunătăți și mai mult eficiența transferului de căldură, minimizând în același timp rezistența la curgere.

Utilizarea heliului ca lichid de răcire secundar sau alternativ ar trebui analizată mai detaliat, examinând proprietățile sale termice și de curgere pentru a determina fluidul optim pentru condițiile specifice ale reactorului.

Dezvoltarea unei baze de date standardizate care să surprindă proprietățile mecanice, termice și legate de iradiere ale AM SS316L va sprijini adoptarea pe scară mai largă a acestui material în proiectele de microreactoare.

O bază de date de parametri AM, efecte post-tratare și date de performanță va oferi resurse valoroase pentru proiectele viitoare, accelerând dezvoltarea materialelor utilizate în domeniul nuclear.

Această cercetare a stabilit cadrul pentru utilizarea AM SS316L pentru fabricarea vasului unui microreactor nuclear, elaborarea unui nou proiect care pune accentul pe compactitate, durabilitate și distribuție termică. Metodele de producție îmbunătățite și studiile extinse în diferite setări operaționale pot permite AM SS316L să fie un material predominant în dezvoltarea tehnologiilor de reactoare nucleare compacte. Cercetări viitoare vor extinde aplicarea tehnologiei aditive în construcția reactoarelor nucleare eficiente, sporind astfel siguranța, eficiența și durabilitatea sistemelor energetice nucleare.

Referințe

- [1] B. I. a. M. W. ". r. Spinrad, „Encyclopedia Britannica,” 10 Jun 2024. [Interactiv]. Available: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor..> [Accesat 8 July 2024].
- [2] M. D. C. Daniel T. Ingersoll, Handbook of Small Modular Nuclear Reactors Second Edition, United Kingdom: Woodhead Publishing Series in Energy, 2021.
- [3] MIT, „MIT Management,” [Interactiv]. Available: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained>. [Accesat 30 07 2024].
- [4] McDonough J, „A perspective on the current and future roles of additive manufacturing in process engineering, with an emphasis on heat transfer,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 19, 2020.
- [5] „Voxelmatters,” 29 12 2023. [Interactiv]. Available: <https://www.voxelmatters.com/additive-manufacturing-is-going-nuclear/>. [Accesat 29 07 2024].
- [6] D. S. O. O. I. F. L. P. R. K. T. Ehsan Toyserkani, METAL ADDITIVE MANUFACTURING, Waterloo, Ontario: John Wiley & Sons Ltd, 2022.
- [7] ISO/ASTM, „ISO/ASTM 52900:2021(en),” [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>.
- [8] E. d. V. Carsten Othmer, „Implementation of a continuous adjoint for topology optimization of ducted flows,” în *18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Miami, FL / AIAA-2007-3947*, Miami, 2007.
- [9] J. Kruth, J. Deckers, E. Yasa și R. Wauthlé, „Assessing and Comparing Influencing Factors of Residual Stresses in Selective Laser Melting Using a Novel Analysis Method,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf*, vol. 226, p. 980–991, 2012.
- [10] L. Z. Y. C. S. K. M. J. S. G. B. a. H. Z. Jiao, „Femtosecond Laser Produced Hydrophobic Hierarchical Structures on Additive Manufacturing Parts,” Vol. %1 din %2Nanomaterials 8, no. 8, nr. 601, 2018.
- [11] Sculpteo, „www.sculpteo.com,” [Interactiv]. Available: <https://www.sculpteo.com/en/materials/dmls-material/dmls-stainless-steel-material/>. [Accesat 30 07 2024].
- [12] L. M. W. a. S. W. Mally, „Feasibility Study on Additive Manufacturing of Ferritic Steels to Meet Mechanical Properties of Safety Relevant Forged Parts,” *Materials*, 2022.
- [13] H. X. F. L. Z. Y. Z. L. J. a. Z. P. Li, „A Review of the Latest Developments in the Field of Additive Manufacturing Techniques for Nuclear Reactors,” *Crystals*, 2022.
- [14] S. H. J. S. S. Y. L. S. J. Y. W. J. a. I. S. J. Kang, „Additive Manufacture of 3 Inch Nuclear Safety Class 1 Valve by Laser Directed Energy Deposition.,” *Journal of Nuclear Materials*, 2021.
- [15] Z. C. H. M. G. S. Y. K. a. K. Z. Chen, „A Review on Qualification and Certification for Metal Additive Manufacturing,” *Virtual and Physical Prototyping*, 2021.
- [16] U.S. Nuclear Regulatory Commission, „U.S. Nuclear Regulatory Commission, Fact Sheet on Nuclear Reactor Vessels,” 2020. [Interactiv]. Available: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/nuc-plant-level/rectors-vessels-fs.pdf>. [Accesat 2024 09 05].
- [17] World Nuclear Association, „World Nuclear Association Reactor Vessel and Internals,” 2021. [Interactiv]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/reactor-vessel-and-internals.aspx>. [Accesat 5 09 2024].
- [18] British Energy, (2004), Reactor Pressure Vessel, [Interactiv]. Available: https://www.nda.gov.uk/sites/default/files/asset_doc/doc/r/research_report_-_reactor_pressure_vessel.pdf.
- [19] IAEA, „International Atomic Energy Agency, (2012). Nuclear Power Reactors in the World,” [Interactiv]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS2-31_web.pdf. [Accesat 05 09 2024].
- [20] GRS, „Draft DS 481,” 2017. [Interactiv]. Available: https://regelwerk.grs.de/sites/default/files/cc/dokumente/dokumente/DS481_Step11.pdf#page=7.09. [Accesat 05 09 2024].

- [21] G. & B. W. Pahl, „Engineering Design: A Systematic Approach,” *Springer*, nr. ISBN: 978-1-85233-531-5, 1996.
- [22] ASME, „BPV Code, Section III: Advanced Design and Construction of Nuclear Facility,” [Interactiv]. Available: <https://www.asme.org/getmedia/4f8ec925-8244-4812-bfc9-6de0ebd0e419/32742.pdf>.
- [23] ANSYS, „Ansys Materials,” [Interactiv]. Available: <https://www.ansys.com/products/materials>. [Accesat 12 09 2024].
- [24] L. a. S. W. Stöhrle, „Analysis of Variance (ANOVA),” *Chemometrics and Intelligent Laboratory System*, vol. no. 4, nr. 6, pp. 259-272, 1989.
- [25] A. Hassan, M. Almomani, T. Qasim și A. Ghaithan, „Statistical Analysis of Some Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminium Matrix Composite,” *Int. J. Exp. Des. Process Optim*, p. 91–109, 2012, 3.
- [26] D. D’Andrea, „Additive Manufacturing of AISI 316L Stainless Steel: A Review,” *Metals*, vol. 1370, nr. no. 8, p. 13, 2023.
- [27] S. T. D. E. M. J. M. S. H. A. H. a. M. W. Kedziora, „Strength Properties of 316L and 17-4 PH Stainless Steel Produced with Additive Manufacturing.”, *Materials*, vol. no. 18, nr. 6278, p. 15, 2021.
- [28] M. H. S. V. W. P. S. K. G. I. S. a. J. K. Gor, „Gor, Meet, Harsh Soni, Vishal Wankhede, Pankaj Sahlot, Krzysztof Grzelak, Ireneusz Szachgluchowicz, and Janusz Kluczyński. "A Critical Review on Effect of Process Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of Powder-Bed Fusion Additive Manufa,” *Materials*, vol. 6527, p. 14 (21), 2021.
- [29] A. Dash și A. Bandyopadhyay, „17-4 PH and SS316L bimetallic structures via additive manufacturing,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. e2292695, p. 19, 2023.
- [30] S. G. S. K. L. a. D. S. Cho, „Post-building Successive Treatments Using Surface Laser Remelting and Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification for Rough Surface Built via Directed Energy Deposition,” *ournal of Manufacturing Processes*, pp. 1076-1093, 2022.
- [31] J. P. S. & N. H. .. J. o. . 7. (. Ge, „Post-Process Treatments for Additive-Manufactured Metallic Structures: A Comprehensive Review,” *Materi Eng and Perform* 32, p. 7073–7122, 2023.
- [32] W. N. Association, „world-nuclear.org,” [Interactiv]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors>.
- [33] U. D. o. Energy, „Energy.gov,” [Interactiv]. Available: <https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work>.
- [34] International Atomic Energy Agency, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, Vienna: IAEA, 2022.
- [35] IAEA, „<https://aris.iaea.org/>,” Advanced Reactor Information System (ARIS), 2024. [Interactiv]. Available: <https://aris.iaea.org/PDF/KLT-40S.pdf>. [Accesat 01 07 2024].
- [36] „www.energyencyclopedia.com,” 18 06 2024. [Interactiv]. Available: <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-energy/the-nuclear-reactors/high-temperature-reactor-htgr>.
- [37] „wikipedia,” [Interactiv]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium-cooled_fast_reactor. [Accesat 28 07 2024].
- [38] U. D. o. Defense, „https://www.cto.mil/pele_eis/,” [Interactiv]. Available: <https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2022/05/Final-EIS-Vol-1-Distro-A.pdf>. [Accesat 30 07 2024].
- [39] M. Z. A. *. a. M. S. C. Md. Wazihur Rahman, „Efficiency analysis of nuclear power plants: A comprehensive review,” *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 19(02), pp. 527-540, 2023.
- [40] <https://www.aalo.com/>, „<https://www.aalo.com/>,” Aalo, [Interactiv]. Available: <https://www.aalo.com/post/aalo-atomics-enters-pre-licensing-phase-a-major-milestone>. [Accesat 30 07 2024].
- [41] R. T. S. B. H. a. R. K. ". . (. 1. 3. 2. h. Sam, „Licensing Small Modular Reactors: A State-of-the-art Review of the Challenges and Barriers,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 164, 2023.
- [42] ISO. [Interactiv]. Available: <https://www.iso.org/standard/64908.html>. [Accesat 30 07 2024].
- [43] I.-. I. R. E. Agency, „ENERGY AS A SERVICE: INNOVATION LANDSCAPE BRIEF,” IRENA-International Renewable Energy Agency.

- [44] D. S. K. A. & A. v. H. G. Black, „Prospects for Nuclear Microreactors: A Review of the Technology, Economics, and Regulatory Considerations,” *Nuclear Technology*, vol. 209: sup1, pp. S1-S20, 2022.
- [45] G. Forum, „Technology Roadmap,” [Interactiv]. Available: <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/genivroadmap2002.pdf>. [Accesat 30 07 2024].
- [46] „Gen IV International Forum,” 2002. [Interactiv]. Available: <https://www.gen-4.org/gif/>. [Accesat 30 07 2024].
- [47] H. Snyder, „Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines,” *Journal of Business Research*, vol. 104, pp. 333-339, 2019.
- [48] G. & B. W. Pahl, *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer, 1996.
- [49] A. C. G. Sumanariu C. A., NUCLEAR MICROREACTOR CONTAINMENT VESSEL CONCEPT USING COMPUTER-AIDED DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING, TECHNICAL UNIVERSITY OF CLUJ-NAPOCA, Acta Technica Napocensis, Series> Applied Mathematics, Mechanics, Mechanics and Engineering.
- [50] K. O. J. C. M. B. S. U. T. G. I. B. R. Stevens, „Digital Twin Framework for the Resilient Remote Monitoring and Operation of Nuclear Microreactors,” *Tareq Ahram and Waldemar Karwowski (eds) Emerging Technologies and Future of Work. AHFE*, vol. vol 117, 2023.
- [51] P. H. J. M. T. J. Y. J. Q. S. S. M. G. D. U. T. H. J. J. J. G. J. T. H. M. D. R. R. & P. C. Sabharwall, „Nonnuclear Experimental Capabilities to Support Design, Development, and Demonstration of Microreactors,” *Nuclear Technology*, vol. 209(sup1), pp. S41-S59, 2022.
- [52] K. M. & B. I. C. Kim, „Design and operation of the transparent integral effect test facility, URI-LO for nuclear innovation platform. Nuclear Engineering and Technology,” vol. 53(3), pp. 776-792, 2021.
- [53] A. J. B. John R. Lamarsh, *Introduction to Nuclear Engineering*, 2001.
- [54] L. J. H. James J. Duderstadt, *Nuclear Reactor Analysis*, 1976.
- [55] Wikipedia, „Wikipedia,” [Interactiv]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_cross_section.
- [56] A. S. Samuel Glasstone, *Nuclear Reactor Engineering*, 1994.
- [57] IAEA, INFCIRC/140, IAEA.
- [58] IAEA, „IAEA.org,” [Interactiv]. Available: https://www.iaea.org/sites/default/files/safeguards_web_june_2015_1.pdf. [Accesat 03 08 2024].
- [59] S. Y. V. G. Pomysukhina AYe, „Evaluation of the neutronic performance of a fast traveling wave reactor in the Th-U fuel cycle,” *Nuclear Energy and Technology*, vol. 6(2), pp. 77-82, 2020.
- [60] F. P. C. V. M. A. S. C. A. C. R. & C. A. Cardoso, „A Neutronic Evaluation of Reprocess Fuel and Depletion Study of VHTR Using MCNPX and WIMSD5 Code,” *Fusion Science and Technology*, vol. 61(1T), pp. 338-342, 2012.
- [61] I. & B. J. Mshelmbula, „Nuclear reaction cross-section evaluation of neutron-induced reactions in some common reactor fuel isotopes at energy range of 13.6-15.2 MeV,” *Journal of Nuclear and Radiation Sciences*, pp. 1-11, 2023.
- [62] M. N. B. a. M. C. Altaf, „Computational analysis of neutronic parameters for TRIGA Mark-II research reactor using evaluated nuclear data libraries ENDF/B-VII.0 and JENDL-3.3,” *Annals of Nuclear Energy*, nr. 80, pp. 21-27, 2015.
- [63] I. & C. R. Uytendhouwen, „NOMAD: Non-Destructive Evaluation (NDE) System for the Inspection of Operation-Induced Material Degradation in Nuclear Power Plants — Overview of the Neutron Irradiation Campaigns,” *Proceedings of the . Volume 7: Non-Destructive Examination. Virtual, Online*, 2020.
- [64] G. S. D. A. K. & H. A. Black, „Prospects for Nuclear Microreactors: A Review of the Technology, Economics, and Regulatory Considerations,” *Nuclear Technology*, nr. 209, pp. S1 - S20, 2022.
- [65] D. a. P. M. Guillen, „n Evaluation of Power Conversion Systems for Land-based Nuclear Microreactors: Can Aeroderivative Engines Facilitate Near-term Deployment?,” *Nuclear Engineering and Technology*, nr. 54, no. 4, pp. 1482-1494, 2021.
- [66] M. C. G. Y. a. T.-L. S. Messner, „A Structural Design Approach Tailored for the Rapid Preliminary Design of Microreactor Components,” *Nuclear Technology*, nr. 209 (sup1), p. S60–72, 2022.
- [67] E. R. T. & L. L. Wang, „Review of reactor conceptual design and thermal hydraulic characteristics for heat pipe in nuclear systems,” *Frontiers in Energy Research*, p. 11 / 1264168, 2023.

- [68] R. Winterton, Thermal Design of Nuclear Reactors, Toronto: British Library Cataloguing in Publication Data, 1981.
- [69] L. & B. G. & S. K. & S. S. & M. A. & P. P. & F. J. Brown, „HIGH EFFICIENCY GENERATION OF HYDROGEN FUELS USING THERMOCHEMICAL CYCLES AND NUCLEAR POWER.,” [Interactiv]. Available: https://www.researchgate.net/publication/266499493_GA-A24326_HIGH_EFFICIENCY_GENERATION_OF_HYDROGEN_FUELS_USING_THERMOCHEMICAL_CYCLES_AND_NUCLEAR_POWER. [Accesat 03 08 2024].
- [70] B. R. Betzler, „Additive Manufacturing in the Nuclear Reactor Industry,” *Encyclopedia of Nuclear Energy*, pp. 851-863, 2020.
- [71] A. T. Nelson, „Prospects for additive manufacturing of nuclear fuel forms.,” *Progress in Nuclear Energy*, nr. Prospects for additive manufacturing of nuclear fuel forms., 2022.
- [72] Y. Z. C. Y. C. L. Jie Ding, „Application and Prospect of Additive Manufacturing Technology in Nuclear Fuel Assembly Fabrication,” *PROCEEDINGS PAPER: International Conference on Nuclear Engineering*, vol. V010T10A016, p. 7, 2022.
- [73] M. Š. A. P. M. B. J. H. a. P. P. Š. Jedlan, „Utilization of Additive Manufacturing in Nuclear Power Industry,” *International Youth Conference on Energy (IYCE -IEEE)*, pp. pp. 1-6, 2022.
- [74] X. F. Z. Z. J. a. P. Hui Li, „A Review of the Latest Developments in the Field of Additive Manufacturing Techniques for Nuclear Reactors,” *Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China*, nr. 328, pp. 12(7), 918, 2022.
- [75] C. W. H. P. G. Z. J. W. S. W. G. G. J. L. Z. L. R. & M. X. (. Shang, „The Characteristic Microstructures and Properties of Steel-Based Alloy via Additive Manufacturing,” *Materials*, pp. 16(7), 2696., 2022.
- [76] X. Lou, M. Song, P. Emigh, M. Othon și P. Andresen, „On the stress corrosion crack growth behaviour in high temperature water of 316L stainless steel made by laser powder bed fusion additive manufacturing,” *Corros. Sci.*, pp. 128, 140–153., 2017.
- [77] N. B. S. a. E. A. Cannon, „Additive manufacturing: a challenge to nuclear nonproliferation,” 2022.
- [78] J. I. J. V. R. a. C. J. P. ". Rosales, „Characterizing Surrogates to Develop an Additive Manufacturing Process for U3Si2 Nuclear Fuel,” *Journal of Nuclear Materials*, nr. 518, pp. 117-128, 2019.
- [79] B. J. S. S. E. a. H. D. A. Gladden, „Survey of Additive Manufacturing Signatures for the Prevention of Nuclear Proliferation,” 2022.
- [80] S. S. P. M. K. D. K. J. P. a. J. Y. ". , n. 5. (. 8. A. A. 4. 2. Kim, „Weldability of Additive Manufactured Stainless Steel in Resistance Spot Welding.,” *Metals* , vol. 13.
- [81] A. I. (. A. E.-1. S. T. M. f. T. T. o. M. M. A. International., „ASTM E8,” [Interactiv]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/95238/d82b210881024dd698d22c2b96400756/ASTM-E8-E8M-16a.pdf>.
- [82] F. S. D. C. V. I. F. R. G. D. D. Santonocito D și doi:10.1111/ffe.13872, „Comparison on mechanical behavior and microstructural features between traditional and AM AISI 316L.,” *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* , vol. 46(2), pp. 379-395, 2023.
- [83] „ISCIR,” 03 09 2024. [Interactiv]. Available: <https://iscir.ro/>. [Accesat 03 09 2024].
- [84] „CNCAN,” 03 09 2024. [Interactiv]. Available: www.cncan.ro. [Accesat 03 09 2024].
- [85] J. H. G. D. O. e. a. Trelewicz, „Microstructure and Corrosion Resistance of Laser Additively Manufactured 316L Stainless Steel,” *JOM* , vol. 68, p. 850–859, 2016.
- [86] L. K. ,. S. G. S. D. E. P. K. a. E. K. K. Leonidas Gargalis, „Novel Powder Feedstock towards Microstructure Engineering in Laser Powder Bed Fusion: A Case Study on Duplex/Super Duplex and Austenitic Stainless-Steel Alloys,” *Metals-MDPI*, vol. 13(9), nr. 1546, 2023.
- [87] M. H. S. V. W. P. S. K. G. I. S. a. J. K. Gor, „A Critical Review on Effect of Process Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing of SS316L,” *Materials, MDPI*, 2021.
- [88] N. S. K. M. Y. C. C. Y. R. N. & S. S. Jeyaprakash, „Effect of microstructural evolution during melt pool formation on nano-mechanical properties in LPBF based SS316L parts.,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 972: 172745, 2024.
- [89] N. A. H. a. Y. S. Asif Mahmud, „Additive Manufacturing of SS316L/IN718 Bimetallic Structure via Laser Powder Bed Fusion,” *Materials MDPI*, 2023.

- [90] L. j. o. f.-l. m. d. f. h. r. 3. p. structures, „Zenou, M., & Kotler, Z.,” *Scientific Reports*, pp. 5(1), 1-10., 2015.
- [91] B. J. F. & W. S. (. Barthel, „Powder condition and spreading parameter impact on green and sintered density in metal binder jetting,” *Powder Metallurgy*, 2021.
- [92] S. & S. A. Glasstone, *Nuclear reactor engineering : reactor systems engineering (Fourth edition)*, Springer US., 1994.
- [93] ANSYS, 2024. [Interactiv]. Available: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. [Accesat 12 09 2024].
- [94] S. Kim, „Maximum Allowable Fluid Velocity and Concern on Piping Stability of ITER Tokamak Cooling Water System,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 162, p. 112049, 2020.
- [95] T. DebRoy, H. Wei, J. Zuback, T. Mukherjee, J. Elmer, J. Milewski, A. Beese, A. Wilson-Heid, A. De și W. Zhang, „Additive Manufacturing of Metallic Components—Process, Structure and Properties. ,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 92, p. 112–224, 2018.
- [96] W. Frazier, „Metal Additive Manufacturing: A Review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, p. 1917–1928, 2014.
- [97] H. Rafi, D. Pal, N. Patil, T. Starr și B. Stucker, „Microstructure and Mechanical Behavior of 17-4 Precipitation Hardenable Steel Processed by Selective Laser Melting,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, p. 4421–4428, 2014.
- [98] E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini și A. Fortunato, „Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel,” *J. Mater. Process. Technol.* , vol. 249, p. 255–263, 2017.
- [99] A.-H. Puichaud, C. Flament, A. Chniouel, F. Lomello, E. Rouesne, P.-F. Giroux, H. Maskrot, F. Schuster și J.-L. Béchade, „Microstructure and Mechanical Properties Relationship of Additively Manufactured 316L Stainless Steel by Selective Laser Melting,” *EPJ Nuclear Sci. Technol.*, vol. 5, p. 23, 2019.
- [100] A. AlHaza și N. M. Haneklaus, „Diffusion Bonding and Transient Liquid Phase (TLP) Bonding of Type 304 and 316 Austenitic Stainless Steel—A Review of Similar and Dissimilar Material Joints,” *Metals* , vol. 613, p. 10, 2020.
- [101] Sculpteo, „Sculpteo,” Sculpteo, [Interactiv]. Available: www.sculpteo.com. [Accesat 28 August 2024].
- [102] M. Bakhtiarian, H. Omidvar, A. Mashhuriazar, Z. Sajuri și C. Gur, „The Effects of SLM Process Parameters on the Relative,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 29, p. 1616–1629, 2024.
- [103] S. Bahl, S. Mishra, K. Yazar, I. Kola, K. Chatterjee și S. Suwas, „Non-equilibrium Microstructure, Crystallographic Texture and Morphological Texture Synergistically Result in Unusual Mechanical Properties of 3D Printed 316L Stainless Steel,” *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 65-77, 2019.
- [104] D. Wang, C. Song, Y. Yang și Y. Bai, „Investigation of Crystal Growth Mechanism during Selective Laser Melting and Mechanical Property Characterization of 316L Stainless Steel Parts.,” *Mater. Des.*, vol. 100, pp. 291-299, 2016.
- [105] Yale, „Yale Linear Regression,” 1 11 2024. [Interactiv]. Available: <http://www.stat.yale.edu/Courses/1997-98/101/linreg.htm>. [Accesat 31 10 2024].
- [106] Scribbr, „Scribbr,” 1 11 2024. [Interactiv]. Available: <https://www.scribbr.com/statistics/coefficient-of-determination/>. [Accesat 31 10 2024].
- [107] C. G. A. F. B. M. I. V. a. A. I. N. C. A. Sumanariu, „Comparative Analysis of Mechanical Properties: Conventional Vs. Additive Manufacturing for Stainless Steel 316L,” *Materials*, vol. 17, p. 19, 2023.
- [108] N. R. I. –. P. ., a. „ICN Pitești,” 30 October 2024. [Interactiv]. Available: www.nuclear.ro. [Accesat 30 October 2024].
- [109] M. C. S. R. R. C. S. R. H. N. J. a. R. O. McMurtrey, „Investigation of the Irradiation Effects in Additively Manufactured 316L Steel Resulting in Decreased Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking Susceptibility,” *Journal of Nuclear Materials* , nr. 152739, p. 545, 2021.
- [110] M. A. A. H. F. C. B. I. J. Mahmoud Mahrous, „Irradiation-Induced Microstrain and Dislocation Density in Additively Manufactured 316h Stainless Steel,” *papers.ssrn.com/*, 2024.
- [111] S. a. N. H. Inoue, „Microstructure Development during Annealing in Electron-irradiated 316L Model Alloy,” *Nuclear Materials and Energ*, vol. 16 , pp. 46-51, 2018.

- [112] I. c. · F. B. G. · A. B. d. S. F. · T. L. C. · M. A. S. Cecilie V. Funcha, „Thermal stability of hierarchical microstructural features in additively manufactured stainless steel,” 2023.
- [113] C. V. K. S. T. L. C. a. M. A. S. Funch, „Thermochemical Post-processing of Additively Manufactured Austenitic Stainless Steel,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 441, p. 128495, 2022.
- [114] W. M. K. a. M. V. Van Renterghem, „Evolution of the Radiation-induced Defect Structure in 316 Type Stainless Steel after Post-irradiation Annealing,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 452, nr. no. 1-3, pp. 158-165., 2014.
- [115] M. M. P. I. D. N. Negut Gheorghe, „Fuel behavior comparison for a research reactor,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 352, pp. 157-164., 2006.
- [116] IAEA, „Research Reactor Database.” International Atomic Energy Agency, [Interactiv]. Available: <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/homeAEA>.
- [117] Y. S. M. a. S. H. Iwamoto, „Estimation of Reliable Displacements-per-atom Based on Athermal-recombination-corrected Model in Radiation Environments at Nuclear Fission, Fusion, and Accelerator Facilities,” *Journal of Nuclear Materials*, nr. 152261, 2020.