

Participarea Romaniei la EUROfusion WPMAG si WPENS si cercetari complementare

Director de proiect : Ion Tiseanu (INFLPR, ion.tiseanu@inflpr.ro)

Institutul National pentru Fizica Laserilor, Plasmei si Radiatiei (INFLPR)

Aceasta raportare se refera la activitatile desfasurate in decursul anului 2022, in cadrul proiectului Participarea Romaniei la EUROfusion WPMAG si WPENS si cercetari complementare.

In cadrul proiectului principal, obiectivele au constat in dezvoltarea de solutii de imagistica cu raze X pentru caracterizarea prototipurilor de cabluri si jonctiuni de conductori supraconductori de interes pentru instalatia tokamak DEMO. În plus, am participat si la pachetul de lucru WPENS prin calificarea analizei tomografice 3D ca instrument de monitorizare a calității a pieselor componente și a întregii capsule de iradiere pentru modulul de flux inalt al sursei intense de neutroni *Early Neutron Source*.

In cele ce urmeaza sunt rezumate trei secțiuni corespunzătoare principalelor livrabile:

1. MAG-T.01.04-T008: EU-CN: Tomografia cu raze X a unor esantioane scurte de cabluri supraconductoare de temperatura inalta pre- sau post-testare în facilitatea SULTAN, Elvetia.

Activitatea se desfasoara in cadrul unei cooperări Europa-China (EU-CN). Examinările tomografice 3D au fost efectuate folosind configurația de microtomografie cu putere mare de penetrare din INFLPR si s-au analizat patru tipuri de probe de cabluri si terminatii electrice supraconductoare de temperatura inalta (HTS). O proba de conductor HTS CICC (Fig 1 b) a fost măsurata la temperatura camerei și la temperatura azotului lichid (LN2) prin scufundarea acesteia într-un vas dewar cu LN2. O proba HTS CICC curbata (Fig 1 a) a fost analizata folosind o configurație optimizata de scanare partiala, deoarece dimensiunile cablului au impus limitarea rotației probei la ~250 de grade. Doua probe reprezentand doua tipuri de terminații electrice au fost analizate, care prin prisma complexitatii structurilor HTS-CICC, au un rol major ce trebuie încă investigat și analizat în mod sistematic.

- S-a dovedit ca sistemul nostru tomografic este capabil să reconstruiască cu inalta fidelitate modelele 3D ale conductoarelor si terminatiilor HTS;

- Imaginile sunt încă afectate de artefacte de reconstrucție, dar există încă un potențial de îmbunătățire;

- Artefactele se datorează compoziției multimateriale, cu o diferență mare de absorbție a razelor X între miezul de aluminiu și materialul de umplere Pb40Sn60, cu atenuatori de cupru și benzi REBCO între ele;

- S-a demonstrat că este posibil să se efectueze tomografie in situ la LN2 la o rezoluție nominală de ~10 μm;

- Pentru conductoarele curbe, protocolul de scanare partiala oferă rezultate satisfăcătoare. A fost posibilă vizualizarea morfologiei microstructurale a probei HTS CICC curbate. Metrologia tomografică comparativă a putut fi aplicată la secțiuni curbate și drepte. În viitor, această analiză poate fi efectuată la temperatura azotului lichid.

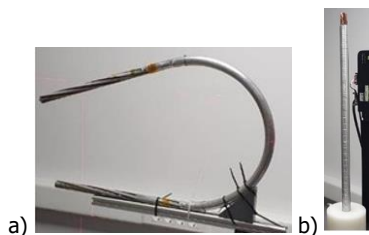


Fig. 1. a) Proba HTS CICC curbata; b) Proba HTS CICC dreapta

2. MAG-T.01.01-T003: Analiza tomografică cu raze X pe o selecție de conductori și jonctiuni supraconductoare de temperatura joasa.

Am efectuat examinări tomografice 3D la o rezoluție spațială suficientă (10 - 20 μm) care au servit la evaluarea calitativă și cantitativă a tehnologiilor de înfășurare (winding), imbracare (jacketing) și compactare pentru conductori CICC și a unor prototipuri de îmbinări (Fig 2).



Fig. 2. a) Jonctiune de tip "inter-layer" ENEA, b) Esantion de cablu CEA LTS sectiune rotunda
c) Esantion CEA LTS sectiune patrata dupa "jacketing" si compactare a esantionului de tip b).

- S-a dovedit ca sistemul nostru tomografic este capabil să reconstruiască conductoarele și îmbinările LTS CICC cele mai avansate la o calitate satisfăcătoare;
- Imaginile au fost afectate de artefacte de reconstrucție din cauza atenuării foarte mari a razelor X a probelor, dar există încă potențial de îmbunătățire;
- Radiografia digitală de înaltă rezoluție se dovedește a fi foarte utilă pentru inspecția nedistructivă a uneia dintre cele mai mari mostre de îmbinare între conductori supraconductori produsa în cadrul WPMAG;
- Imaginile probei relativ mare CEA LTS de formă pătrată sunt suficient de bune pentru a permite o rată foarte mare de detectare și poziționare a firelor și, în final, de reconstrucție a traiectoriilor acestora.

3. ENS-4.3.2.2-T008-01: Analiză tomografică completa 3D a pieselor componente și a întregii capsule de iradiere pentru modulul de flux inalt al sursei intense de neutroni ENS-DONES

În perioada de raportare, au fost dezvoltate și utilizate tehnici optimizate de tomografie industrială cu raze X pentru inspecții nedistructive (NDT) de precizie ale unor componente de mare complexitate, de interes pentru dezvoltarea sursei *Early Neutron Source* pentru iradierea materialelor de interes pentru tehnologia de fuziune nucleară.

Principalele obiective stabilite de proprietarul tehnologiilor de fabricare a componentelor (Fig 3) au fost atinse:

Proba 1 - capsulă de iradiere brazată: au fost detectate goluri/fisuri în regiunile brazate, de asemenea, în comparație cu modelele mai vechi de capsule au fost necesare mai multe analize metrologice;

Proba 2 - recipient cu minicanale: investigație metrologică volumetrică preliminară, și anume evaluarea variației lățimii canalului / secțiunii transversale (lățime nominală 1 mm) de-a lungul adâncimii canalelor; Ar putea fi raportate și alte comparații între modelul proiectat și cel fabricat;

Proba 3 - capsulă de iradiere testată la presiune: măsurătorile CT cu contrast optimizat au evidențiat afectarea regiunilor brazate și sudate.; Calitatea imaginilor a permis analize metrologice avansate;
 Proba 4 - capacul capsulei HFTM: s-au obținut informații consistente după inspectarea trecerii cablurilor și a regiunii de sudură cu laser (porozitate și variații de densitate a materialului de adaus);
 Proba 5 - material pentru elemente structurale din oțel cu 9 % - Cr: s-a determinat ca stratul poros este superficial și s-a confirmat compoziția elementală.

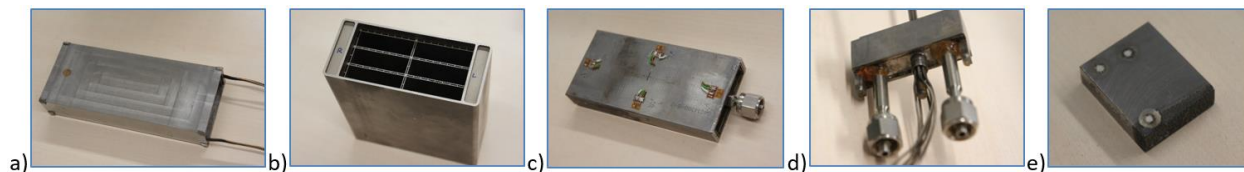


Fig. 3. a) Proba 1, b) Proba 2, c) Proba 3, d) Proba 4, e) Proba 5

În cadrul proiectului complementar s-a realizat un studiu comparativ al unor metode de imagistică de raze X care pot fi folosite independent sau în combinație pentru asistarea dezvoltării joncțiunilor (îmbinărilor) de benzi supraconductoare de temperatură înaltă (HTS) de tip ReBCO. Realizarea joncțiunilor de benzi supraconductoare ReBCO reprezintă o verigă foarte importantă a tehnologiei de producere a cablurilor, terminărilor și joncțiunilor de cabluri utilizate la construcția sistemului magneti din instalațiile avansate de fuziune nucleară. În grupul de microtomografie de raze X din INFLPR s-au dezvoltat și validat tehnici de imagistică de raze X pentru monitorizarea controlului calității tuturor etapelor tehnologice de la realizarea îmbinărilor între benzile HTS sau între benzi și componentele de aluminiu sau cupru ale conductorilor de tip Cable in Conduit (CICC).

Probele de îmbinare test, realizate în Center for Superconductivity, Spintronic and Surface Science din UTCN, folosesc îmbinări în geometrie esalonată a două și trei perechi de benzi ReBCO.

S-a ales acest tip de joncțiuni pentru a studia cei doi factori critici în procesul de fabricare a joncțiunilor/terminației: materialele de lipire și procedura de asamblare.

În studiul de față am introdus metode noi de tip laminografic pentru probe cu factor de aspect planar și am extins tehnica microtomografică 3D prin utilizarea sistemelor de detecție în regim de numărare și discriminare energetică a fotonilor de raze X.

Principalele concluzii ale studiului:

- microtomografia 3D în configurația de scanare fascicul conic este metoda de referință ca rezoluție spațială pentru probe de volum precum conductorii sau terminațiile CICC;
- laminografia implementată în configurația tomografică convențională este o metodă puternică care asigură o foarte bună rezoluție spațială laterală în regiunea de interes a interfetelor îmbinării și o economie importantă de spațiu de stocare;
- microtomografia 3D cu sisteme de detecție avansate cu conversie directă și regim de numărare și discriminare energetică a fotonilor de raze X este pentru prima dată utilizată în analiza structurilor supraconductoare și se dovedește o metodă foarte promițătoare prin accelerarea procesului de scanare cu peste un ordin de mărime și prin creșterea contrastului secțiunilor prin materiale de lipire dense.

Prin intermediul studiului de față s-au determinat condițiile optime de lipire pentru pregătirea joncțiunii CC-CC folosind un aliaj eutectic Pb-Sn ca fiind $P_b \sim 50 \text{ kPa}$ și $210^\circ \text{C} > T > 230^\circ \text{C}$.

Este necesară o investigație amănunțită prin tomografie cu raze X pentru a înțelege rolul parametrilor procesului de lipire asupra proprietăților electrice ale joncțiunii.

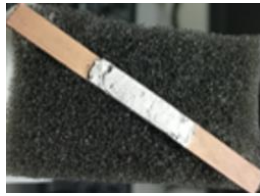


Fig. 4. Joncțiune de benzi supraconductoare de temperatura înalta (HTS) de tip ReBCO

Activitățile de cercetare din 2022 au condus la publicarea a 4 articole ISI și participarea la 3 conferințe internaționale.

Articole publicate

1. Sima, A., Lungu, M., Ionescu, A. M., Badica, P., Zani, L., & Tiseanu, I. (2022). X-ray tomography assessment of the heat treatment effect on Nb₃Sn wires with different architectures. *Materials Characterization*, 193, 112316., 10.1016/j.matchar.2022.112316
2. Zignani, CF; Muzzi, L; Frittitta, C; De Marzi, G; Corato, V; della Corte, A; Righetti, R; Formichetti, A; Bruzzone, P; Sedlak, K; Kumar, M; Tiseanu, I, (2022). DC Characterization of a Low-Field Nb₃Sn Prototype Conductor for a DEMO TF Coil, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Volume 32, Issue 6. No 4802205, DOI 10.1109/TASC.2022.3159296
3. Corato, V ; Vorpahl, C; Sedlak, K; Anvar, VA ; Bennet, J; Biancolini, ME ; Bonne, F ; Bonifetto, R; Boso, DP; Brighenti, A; Bruzzone, P; Celentano, G; Della Corte, A; De Marzi, G; D'Auria, V; Dematte, F; Dembkowska, A; Dicuonzo, O] ; Zignani, CF; Fietz, WH; Frittitta, C; Giannini, L; Giorgetti, F ; Guarino, R ; Heller, R; Hoa, C; Huguet, M; Jiolat, G; Kumar, M; Lacroix, B; Lewandowska, M; Misiara, N ; Morici, L; Muzzi, L; Nickel, DS; Nicollet, S; Nijhuis, A; Nunio, F; Portafaix, C; Sarasola, X; Savoldi, L; Tiseanu, I; Tomassetti, G ; Torre, A; Turtu, S; Uglietti, D; Vallcorba, R; Weiss, KP; Wesche, R; Wolf, MJ ; Yagotintsev, K; Zani, L; Zanino, R; Zappatore, A., (2022), The DEMO magnet system - Status and future challenges, *FUSION ENGINEERING AND DESIGN*, Volume 174, no 112971, DOI 10.1016/j.fusengdes.2021.112971
4. Zani, L ; Tiseanu, I; Chilette, M; Dumitru, D; Lungu, M; Topin, Extensive Analyses of Superconducting Cables 3D Geometry With Advanced Tomographic Examinations, (2021), *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Volume 31, Issue 5, no 4800705, DOI 10.1109/TASC.2021.3059600

Conferințe

1. Adrian SIMA, Mihail LUNGU, Daniel DUMITRU, Alina M. IONESCU, Petre BADICA, Louis ZANI, and Ion. TISEANU, Non-destructive examination of cable-in-conduit conductors (CICC) using a multi-scale methodology for correlating the manufacturing stages with mechanical, electrical and magnetic properties, The International Conference on Lasers, Plasma, and Radiation – Science and Technology (ICPLR-ST) June 7-10, 2022.

2. R. Babouche, L. Zani, A. Louzguiti, B. Turck, J.L. Duchateau, F. Topin, I. Tiseanu, M. Lungu, D. Dumitru, Inputs generation for COLISEUM coupling losses model using tomography: analytic and experimental approaches, Symposium on Fusion Technology (SOFT 22) , Dubrovnik, Croatia, 18-23 september 2022
3. Sima A., Lungu M. et al, Non-destructive examination of cable-in-conduit conductors (CICC) using a multi-scale methodology for correlating the manufacturing stages with mechanical, electrical and magnetic properties, The International Conference on Laser, Plasma and Radiation - Science and Technology (ICLPR-ST), Bucharest, June 7-10, 2022

Meetings

WPMAG interim meeting 2022, Garching, Germany, 11-13 october, 2022

WPENS-TS #13 Tech. Meeting 8, iunie, 2022, online

WPENS-TS #14 Tech. Meeting, 14 decembrie 2022, online