

Participarea Romaniei la EUROfusion WPMAT si cercetari complementare

Dezvoltarea de materiale, compozite si tehnologii pentru componente de W care vor fi utilizate in fluxuri mari de caldura

Proiectul WPMAT in cadrul EUROfusion urmareste consolidarea bazei de date privitoare la comportarea materialelor considerate ca prima optiune pentru realizarea componentelor principale ale reactorului de fuziune DEMO (capabil sa livreze energie electrica in timpul functionarii) si sa dezvolte, produca si caracterizeze noi materiale avansate alternative pentru a asigura indeplinirea tintelor propuse in cadrul programului de fuziune.

Problema principala din punctul de vedere al materialelor destinate reactorului DEMO, spre deosebire de cazul ITER, este generata de prezenta unor fluxuri mari de neutroni, cu efecte estimate la circa 10 dpa pentru divertor si posibil peste 100 dpa pentru blanket (sistemul de conversie a neutronilor in energie termica), ceea ce reprezinta in fapt un ordin de marime peste cel al iradierii intr-un reactor clasic de fisiune. Mai mult, aceste componente vor opera la temperaturi mai mari, cu efecte detrimental majore asupra proprietatilor mecanice ale materialelor folosite, in special al celor structurale. Avand in vedere existenta mai multor variante constructive si functionale pentru DEMO, materialele necesare trebuie sa fie proiectate si testate adecvat diferitelor „ferestre” de parametri operationali.

In WPMAT-RO, grupul nostru este implicat in studiul si producerea materialelor pentru diferite concepte de raciere utilizate pentru constructia divertorului DEMO. In particular cercetarile noastre sunt focusate asupra catorva topici principale. Dezvoltarea de noi materiale structurale avansate bazate pe W, cum sunt asa numitele laminate W-metal, in fapt compozite stratificate care incearca sa fructifice proprietatile mecanice deosebite ale foliilor de W laminate la rece (~300 C !) in realizarea unor materiale masive.

Dezvoltarea de materiale de interfata destinate realizarii trecerii de la armura termica la elementele structurale, cum sunt materialele cu gradient compozitional (e.g. W-Cu) sau diferite compozite pe baza de Cu cu rol de bariera termica.

Dezvoltarea tehnologiilor de imbinare pentru componente si materiale cu proprietati diferite. Astfel de tehnologii trebuie sa permita realizarea unor jonctiuni functionale sau structurale fara a afecta proprietatile unor materiale avansate adiacente jonctiunii, cum sunt de pilda materiale intarite prin dispersii ceramice sau precipitate.

Caracterizarea microstructurala si a proprietatilor termofice ale diferitelor materiale produse in consortiu constituie o alta activitate importanta a grupului nostru.

Obiective:

Proiectul WPMAT in cadrul EUROfusion urmareste consolidarea bazei de date privitoare la comportarea materialelor considerate ca prima optiune pentru realizarea componentelor principale ale reactorului de fuziune DEMO (capabil sa livreze energie electrica in timpul functionarii) si sa dezvolte, produca si caracterizeze noi materiale avansate alternative pentru a asigura indeplinirea tintelor propuse in cadrul programului de fuziune.

In WPMAT-RO, grupul nostru este implicat in studiul si producerea materialelor pentru diferite concepte de raciere utilizate pentru constructia divertorului DEMO. Conform planului de lucru al consorțiului, suntem direct implicati in urmatoarele activitati din cadrul topicului legat de materiale capabile sa reziste la fluxuri mari de caldura (HHFM):

- A. Materiale "lamine" pe baza de W (task 3.2.2, partener: KIT, Germania)
- B. Materiale cu gradient functional W-Cu (task 3.3.1, partener: CEA, Franta)
- C. Materiale de tip bariera termica pe baza de Cu (task 3.3.2, partener: IST, Portugalia)
- D. Dezvoltarea tehnologiilor de imbinare (task 3.4.2, partener: URJC, Spania)
- E. Caracterizari microstructurale si ale proprietatilor fizice (task 3.7.1, partener: DTU, Danemarca)

Etape si activitati *)

Anul	Etape/Activitati	Termene
2014	Etapa 1	
	A1. laminate pe baza de W-Cu pentru teste mecanice	
	B1. optimizarea producerii de FGM W-Cu	12.2014
	C1. Evaluarea tehnologiei de brazare FAST	
	D1. Proprietati termice ale laminatelor W-metal	
2015	Etapa 2	06.2015

Anul	Etape/Activitati	Termene
	B2. FGM W-Cu pt. teste mecanice	
	B3. bariere term. CuC si CuSiC	
	C2. Imbinare W-FGM-Cu prin FAST	
	Etapa 3	
	A2 interdifuzie in laminate W/metal	
	A3. Laminate W multimetal	12.2015
	B4. FGM WCu pt teste HHF	
	C3. imbinare dinamica FAST	
	D2. prop, termice pt FGM W-Cu	
	Etapa 4	
2016	A4. probe mMW pt teste mecanice	06.2016
	B5. machete marime mica W-FGM-Cu	
	B6. bariere termice flexibile	

Anul	Etape/Activitati	Termene
	C4. tehnolog. lipire pentru machete	
	D3. prop. termice pentru interfete	
	D4. prop. termice pt consortiu	
Nota : Avand in vedere trecerea de la PN2 la PN3 in cadrul etapelor a avut loc o reindexare a activitatilor		
2016	Etapa1	
	A1. probe mMW pt. teste de induranta termica	
	B1. Sisteme de 3 straturi W-BT-Cu	12.2016
	C1. Fabricarea unui demonstrator de scala mic pt. lipire dinamica FAST	
	D1. Caracterizarea proprietatilor termo-fizice ale materialelor produse in cadrul HHFM	
2017	Etapa2	
	A1. Fabricarea de tevi W-mM laminat	06.2017
	B2. Evaluarea posibilitatii realizarii de materiale flexibile Cu-C	
2017	Etapa3	12.2017

	A3. Fabricarea de probe de laminate de W pentru teste in HHFM	
	B3. Testarea fabricarii de componente medii W-BT-Cu	
	D3. Caracterizarea proprietatilor termo-fizice ale materialelor produse in cadrul HHFM	
	Etapa4	
2018	A1. Optimizarea unei tehnologii scalabile industrial pentru producerea de materiale din laminate de W	06.2018
	Etapa5	
2018	B5. Fabricare de machete medii de divertor pentru diferite conceptii de racire	12.2018
	D5. Caracterizarea proprietatilor termo-fizice ale materialelor produse in cadrul HHFM	
	Etapa6	
2019	6.1. Manufacturare si caracterizare de laminate W-W (fara interfata)	12.2019
	6.2. HHF test pentru sisteme de 3 straturi W-BT-CuCrZr	

	6.3. Caracterizarea proprietatilor termo-fizice ale materialelor produse in cadrul HHFM	
	Etapa7	
	7.1. Manufacturare de componente monobloc pentru machete de divertor de tip ITER din laminate de W dopat cu K avand interfete incluse de OFHC-Cu	
2020	7.2. Manufacturare de componente monobloc pentru machete de divertor de tip ITER din W compact avand interfete de tip BT incluse	12.2020
	7.3. Caracterizarea proprietatilor termo-fizice ale materialelor produse in cadrul HHFM	

*) tabelul este conform planului initial, activitatile sunt decise pentru fiecare an la nivel de proiect in PBM in concordanta cu evolutia intregului proiect EUROfusion

Rezultatele obtinute:

2014

Livrabilele asociate topicilor abordate (HHFM-3.2.2.D2, -3.3.1.D1, -3.4.2.D2 si -3.7.1.D2) au fost prezentate si acceptate in cadrul PMM din 1-2 decembrie 2014 de la Garching:

- A fost demonstrata fezabilitatea utilizarii FAST pentru realizarea de laminate din folii de W si Cu, V, Ti, Pd sau W cu diferite grosimi si forme finale planare, rezultand compozite care au fost deja caracterizate microstructural si termic si probe care au fost trimise la KIT pentru teste mecanice.
- Au fost realizate materiale de tip FGM din W si Cu utilizand tehnici de metalurgia pulberilor, care au fost caracterizate prin SEM/EBS si din punctul de vedere al proprietatilor termice. In cazul materialelor FGM de grosimi mici (sub 2 mm) rezultatele arata ca desi din punct de vedere termic comportarea este cea prezisa, din punct de vedere microstructural tendinta de aglomerare a particulelor de W produce

inomogenitati la o scala de 100-300 de microni ceea ce impune utilizarea unei proceduri de productie in mai multi pasi.

- A fost demonstrat ca utilizarea FAST constituie o metoda eficienta pentru realizarea de componente, iar utilizarea foliilor comerciale din materiale pure (Cu sau V) este suficienta in cazul conceptelor actuale de racire, in timp ce utilizarea unor aliaje mai complexe nu aduce beneficii suplimentare justificabile si eficiente din punctul de vedere al costurilor. De asemenea testele de induranta termica efectuate au relevat ca utilizarea Ti nu este adecvata datorita interdifuziei cu W iar cea a Pd nu este adecvata din punctul de vedere al costurilor si al retentiei de He/H.
- Pe langa investigatiile microstructurale si termice efectuate pentru probele proprii au fost realizate o serie de investigatii si pentru partenerii din consortiu (IST, JSI, KIT).

2015

Livrabile asociate topicilor abordate (HHFM-3.2.2.D4, -3.3.2.D2, -3.4.2.D4 si -3.7.1.D4) au fost prezentate si acceptate in cadrul PMM din 9-10 noiembrie 2015 de la Garching.

- Au fost realizate diferite tipuri de profile pentru laminate W-Cu si W-V. De asemenea au fost realizate in premiera utilizand tehnologia FAST tevi cu pereti din astfel de laminate. Foliile de W pe care au fost depunuse straturi de circa 100 nm de Cu si Cr au fost utilizate pentru imbunatatirea durabilitatii termice a laminatelor de tip W-Ti.
- Materiale pentru bariere termice au fost realizate sub forma de compozite pe baza de Cu si diferiti oxizi, SiC si grafena cu diferite concentratii si microstructuri. Analiza proprietatilor termice si microstructurale a aratat ca materiale nanostructurate stabile termic se pot obtine pentru dispersii de nanoparticule cu dimensiuni similare cu cele ale nanoparticulelor matricii de Cu. In acelasi timp, valorile conductibilitatii termice sunt determinate preponderent de concentratia de materiale dispersate. Analize ale coeficientilor de expansiune termica au aratat ca din acest punct de vedere cele mai adecvate materiale sunt cele realizate cu matrice de Cu din pulberi micrometrice si pulberi de grafit (micrometrice) sau SiC (nanometrice). A fost realizat un tabel complex pentru conductibilitati termice in functie de material si concentratii care permite proiectarea unor componente schimbator de caldura utilizand simulari prin FEM. Din punctul de vedere al dezvoltarii tehnologiilor de imbinare a fost demonstrata fezabilitatea realizarii unui proces dinamic de alipire prin FAST, care a fost demonstrat ("proof of principle") in laborator prin realizarea de laminate W-Cu prin aceasta metoda. Au fost stabilite conceptul si parametrii necesari pentru realizarea unui prototip automatizat care va fi realizat in etapa urmatoare.
- Pe langa investigatiile microstructurale si termice efectuate pentru probele proprii au fost realizate o serie de investigatii si pentru partenerii din consortiu incluzand aliaje de

W cu autopasivare produse de KIT si CIEMAT, compozite W-SiC cu continut ridicat de W produse de JSI si compozite W-Cu pentru sisteme de racire produse de IPP.

2016

Livrabile asociate topicilor abordate (MAT-HHFM-3.2.2-T003-D002, -3.3.2-T003-D001 si -3.7.1-T003-D002) au fost prezentate si acceptate in cadrul PMM din 8-9 noiembrie 2016 de la Garching.

- Au fost realizate progrese remarcabile atat in ceea ce priveste procesarea laminatelor W-multi-metal., obtinandu-se o imbunatatire semnificativa a interfetelor prin ajustarea fina a parametrilor de proces FAST, in special presiunea aplicata, cat si a comportamentul materialelor produse in cazul expunerii prelungite a acestora la temperaturi mari (1000 ore la 1000 C). De asemenea, depunerea unui strat tampon de ordinul a 100 nm de Cr sau Cu pe foliile de W utilizate pentru producerea de laminate W-Ti si W-V s-a dovedit a fi o solutie fericita, producand o imbunatatire drastica a comportarii acestora in cazul expunerii indelungate la temperaturi ridicate. In special in cazul laminatelor W-Ti, acest procedeu impiedica inter-difuzia W-Ti si permite reconsiderarea acestui tip de laminate ca potentiala solutie structurala in divertor. Trebuie mentionat ca utilizarea combinatiei W-Cr-Ti este de natura a extinde domeniul de operare al acestor compozite cu circa 200 C.
- A fost proiectat un sistem pentru brazarea FAST in regim dinamic, asemator procesului de laminare, prototipul fiind in faza finala de realizare si urmand a fi utilizat pentru a testa posibilitatile de scalare a procesului de realizare a componentelor stratificate prin aceasta metoda la nivel industrial.
- Au fost finalizate investigatiile asupra materialelor de tip bariera termica de tip compozit Cu-alumina, Cu-ytria, Cu-SiC si Cu-C si au fost definite criteriile de selectie in functie de proprietatile cerute in diferite variante de design al divertorului. De asemenea au realizate noi materiale bariera termica, compozite Cu-ZrO₂ care prezinta conductibilitati termice foarte joase, de circa 3-6 W/m/K in intregul interval de temperatura de operare pentru astfel de materiale, adica intre 300 si 1000 C. Aceste valori reduse permit reducerea grosimii barierei termice si utilizarea lor inclusiv in cadrul conceptului de divertor cu monobloc din W.
- Au fost de asemenea caracterizate din punctul de vedere al proprietatilor termofizice numeroase specimene, produse atat in laboratorul nostru cat si de catre partenerii din consortiu, iar datele au fost trimise pentru a fi incluse in baza de date EDDI. In acest an a fost utilizat un nou echipament din infrastructura INCDFM, care permite masurarea simultana a conductibilitatii electrice si a efectului Seebeck pana la 800 C. Aceste investigatii permit o caracterizare fizica mult mai riguroasa atat a conductibilitatii termice (cunoasterea conductibilitatii electrice permite decelarea componentelor fononice si

electronice ale conductibilitatii termice) cat si verificarea posibelelor riscuri generate de alipirea de metale diferite in cadrul deverselor componente (coeficientul Seebeck).

2017

Livrabile asociate topicilor abordate (MAT-HHFM-3.2.2-T004-D002, -3.3.2-T004-D001 si -3.7.1-T004-D002) au fost prezentate si acceptate in cadrul PMM 2017 de la Garching.

- Au fost produse numeroase specimene din laminate de W si Cu, V sau Ti realizate cu geometrii specifice pentru diferite teste mecanice care vor fi realizate de partenerii din WPMAT (elongatie, impact Charpy) sau ale proprietatilor termofizice (transport termic si electric, rezistente termice de contact (realizate in INCDFM). Avand in vedere rezultatele foarte bune obtinute la induranta termica de catre materialele W-V produse in INCDFM prin FAST spre deosebire de cele produse la KIT prin difuzie termica, a fost demarat in colaborare INCDFM-KIT un studiu comparativ privind materialele, metodele de producere si testare. Rezultatele preliminare (expunere de 100 ore la 1000 C) indica faptul ca metoda dezvoltata in INCDFM este cea responsabila de blocarea efectului Kirkendal si nu calitatea materialelor. Mai mult, au fost realizate in premiera prin FAST tevi din materiale laminate de W.
- Au fost realizate si investigate noi materiale de tip BT, compozite Cu-ZrO₂ in care s-au putut obtine materiale cu pana la 90% volumice de zirconia. Acestea ating valori ale conductibilitatii termice sun 1 W/m/K, inferioare chiar materialului ceramic. Au fost de asemenea investigate metodele posibile de imbinare cu W si posibilitatile de a realiza inele de tip bariera termica cu concentratii diferite. Pe de alta parte din punctul de vedere al BT flexibile, experimentele realizate au confirmat posibilitatea realizarii unor astfel de materiale Cu-C cu concentratii de maxim 30% volumice C. Valorile conductibilitatilor termice sunt in acest caz de peste 120 W/m/K si se apropie de cele ale W, avand o aplicabilitate limitata pe post de BT in design-ul actual al divertorului.
- Au fost de asemenea caracterizate din punctul de vedere al proprietatilor termofizice numeroase specimene, produse atat in laboratorul nostru cat si de catre partenerii din consortiu, iar datele au fost trimise pentru a fi incluse in baza de date EDDI. In acest an au fost realizate si numeroase masurari ale coeficientului de dilatare termica, foarte important pentru a proiecta componente din materiale diferite.

2018

Livrabile asociate topicilor abordate (MAT-HHFM-3.2.2-T005-D002, -3.3.2-T005-D001 si -3.7.1-T005-D002) au fost prezentate si acceptate in cadrul PMM 2018 de la Julich.

- Au fost finalizate investigatiile asupra laminatelor de W cu Cu si V. Pentru laminatele W-Cu testele mecanice de elongatie si impact Charpy au aratat ca materialele produse prin tehnologia FAST in INCDFM sunt similare si chiar superioare in termeni de elengatie celor produse prin difuzie termica la KIT. Pe de alta parte o imbunatatare doar usoara a ductibilitatii comparativ cu materialul W standard a fost observata la temperaturi joase. In paralel au fost optimizati parametrii de proces pentru realizarea laminatelor W-W fara interfata, utilizand folii de W pur sau W dopat cu K. Pe baza acestora au fost realizate oribe ppentru incercari mecanice (impact Charpy). Rezultatele masuratorilor efectuate la KIT pe probe standard KLST au condus la obtinerea unor valori record pentru materiale din W, cu 11 J absorbiti la 400 C pentru laminatele din folii de W pur si peste 11 J la 500 C pentru cele cu folii de W dopat cu K. In acelasi timp a fost dezvoltata o tehnologie de a produce tevi din folii de W prin FAST, grupul nostru fiind realizand in premiera astfel de materiale.
- Pe baza materialelor de tip BT realizate din Cu cu dispersii nanometrice ceramice in anii anteriori a fost propusa o tehnologie de realizare si implementare in monoblocuri a unor bariere termice cu gradient functional de conductibilitate termica. Selectarea materialelor adecvate si oprimizarea BT-FGM pentru operarea acestora in conditii standard de incalzire (flux de 10 MW/m²) si fluctuant (pana la 20 MW/m²) au fost realizate pe baza simularilor FEM
- Au fost de asemenea caracterizate din punctul de vedere al proprietatilor termofizice numeroase specimene, produse atat in laboratorul nostru cat si de catre partenerii din consortiu, iar datele au fost trimise pentru a fi incluse in baza de date EDDI. In acest an au fost realizate si numeroase masurari ale coeficientului de dilatare termica, foarte important pentru a proiecta componente din materiale diferite.

2019

Livrabile asociate topicilor abordate (MAT-HHFM-3.2.2-T006-D002, -3.3.2-T006-D001 si -3.7.1-T006-D002) au fost prezentate si acceptate in cadrul PMM 2019 de la Garching.

- In aceasta etapa au fost obtinute rezultate deosebite in procesarea laminatelor de W prin FAST. Asa cum au aratat testele de impact din anul precedent, materialele realizate din folii de W dopat cu K au proprietati mecanice la temperaturi inalte superioare celor existente iar in acest an experimentele efectuate pe teville realizate prin tehnologia FAST au rezultat in valori record privind energia de impact absorbita in teste Charpy (20 J la 500 C). In realitate aceasta valoare ar putea fi chir depsita, intrucat in teste a fost atinsa de fapt limita echipamentului folosit.

- In privinta producerii materialelor de interfata si dezvoltarii tehnicilor de imbinare pentru componentele destinate preluarii fluxului de caldura din divertor, au fost realizate si livrate conform specificatiilor sisteme de 3 straturi (W sau W dopat cu K, diferite bariere termice si CuCrZr) pentru teste in fluxuri mari de caldura la JUDITH.
- Au fost de asemenea caracterizate din punctul de vedere al proprietatilor termofizice numeroase specimene, produse atat in laboratorul nostru cat si de catre partenerii din consortiu, iar datele au fost trimise pentru a fi incluse in baza de date EDDI. In particular in acest an masuratorile de difuzivitate termica au fost utilizate si pentru caracterizarea imbinarilor intre materiale, dovedindu-se o tehnica eficienta in depistarea unor defecte.

2020

Livrabile asociate topicilor abordate (MAT-HHFM-3.2.2-T007-D002, -3.3.2-T007-D001 si -3.7.1-T007-D002) au fost prezentate si acceptate in cadrul PMM 2020 de la Garching (on line).

- In cadrul acestei etape au fost obtinute rezultate foarte bune in procesarea laminatelor din folii de W dopat utilizand tehnologia FAST dezvoltata de noi. In particular, in acest an, au fost produse materiale cu dimensiuni adecvate pentru realizarea de monoblocuri de tip ITER. A fost dezvoltata si o noua tehnologie, bazata pe presare la cald, pentru includerea unor interfete de Cu OFHC in aceste monoblocuri. Componentele realizate au fost trimise la ENEA pentru teste si asamblare finala in machete de divertor. Atat testele efectuate la noi cat si cele de la ENEA au evidentiat o calitate excelenta a imbinarilor.
- Similar, si materialele de tip bariera termica Cu-ZrO₂ dezvoltate si caracterizate in etapele precedente au fost implementate in monoblocuri de tip ITER din W utilizand o procedura mixta care combina procesul de presare la cald cu o tehnologie de brazare cu un aliaj Cu-Ti realizat in situ. Aceasta procedura ofera o temperatura de operare mai ridicata la nivelul barierei termice, de circa 870 °C, superioara celei obtinute daca se utilizeaza un aliaj de brazare standard, cum este de pilda AgCu₂₈Ge₂Co_{0.3} (<800 °C). Brazarea este necesara pentru ca procedura simpla de presare la cald utilizata cu succes pentru implementarea interfetelor de Cu OFHC nu este capabila sa produca o imbinare corespunzatoare pentru aceste materialele bariera termica. Dupa includerea materialului au fost realizate gauri prin frezare mecanica iar monoblocurile astfel produse sunt trimise la ENEA pentru teste si producerea de machete de divertor.
- Au fost de asemenea caracterizate din punctul de vedere al proprietatilor termofizice numeroase specimene, produse atat in laboratorul nostru cat si de catre partenerii din consortiu, iar datele au fost trimise pentru a fi incluse in baza de date EDDI. In particular

in acest an pot fi mentionate masuratori asupra unor aliaje de tip HEA, care prezinta o rezistenta sporita in urma iradierii.

Publicatii:

Articole:

- [1] F. Guerreiro, M. Dias, A. Galatanu, J.B. Correia, E. Alves, P.A. Carvalho, "W-Ta Composites Consolidated by Spark Plasma Sintering", *Microscopy and Microanalysis* **21** (2015) 27.
- [2] M. Dias, F. Guerreiro, J.B. Correia, A. Galatanu, M. Rosinski, M.A. Monge, A. Munoz, E. Alves, P.A. Carvalho, "Consolidation of W-Ta composites: Hot isostatic pressing and spark and pulse plasma sintering", *Fusion Engineering and Design* 98-99 (2015) 1950.
- [3] A. Ivekovic, A. Galatanu, S. Novak, "Low-activation W-Si-C composites for fusion application", *Fusion Engineering and Design* 100 (2015) 638.
- [4] M. Galatanu, M. Enculescu, G. Ruiu, B. Popescu, A. Galatanu, "Cu-based composites as thermal barrier materials in DEMO divertor components" *Fusion Eng. Des.* **124** (2017) 1131.
- [5] G. Carro, A. Munoz, M.A. Monge, B. Savoini, A. Galatanu, M. Galatanu, R. Pareja, "Thermal conductivity and diffusivity of Cu-Y alloys produced by different powder metallurgy routes", *Fusion Eng. Des.* **124** (2017) 1156
- [6] A.v. Müller, D. Ewert, A. Galatanu, M. Milwich, R. Neu, J.Y. Pastor, U. Siefken, E. Tejado, J.H. You, "Melt infiltrated tungsten–copper composites as advanced heat sink materials for plasma facing components of future nuclear fusion devices", *Fusion Eng. Des.* **124** (2017) 455.
- [7] M. Galatanu, M. Enculescu, A. Galatanu, "High temperature thermo-physical properties of SPS-ed W–Cu functional gradient materials", *Mater. Res. Express* **5** (2018) 026502.
- [8] M. Galatanu, M. Enculescu, A. Galatanu, "Thermophysical properties of Cu-ZrO₂ composites as potential thermal barrier materials for a DEMO W-monoblock divertor", *Fus. Eng. Des.* **127** (2018) 179.
- [9] M. Galatanu, M. Cioca, A. Ighigeanu, G. Ruiu, M. Enculescu, B. Popescu, A. Galatanu, "Development of W-monoblock divertor components with embedded thermal barrier interfaces", *Fus. Eng. Des.* **146** (2019) 1351.
- [10] A. Galatanu, M. Galatanu, M. Enculescu, J. Reiser, S. Sickinger, "Thermophysical and mechanical properties of W-Cu laminates produced by FAST joining", *Fus. Eng. Des.* **146** (2019) 2371.
- [11] M. Dias, F. Antão, N. Catarino, A. Galatanu, M. Galatanu, P. Ferreira, J.B. Correia, R.C da Silva, A.P. Gonçalves, E. Alves, "Sintering and irradiation of copper-based high entropy alloys for nuclear fusion", *Fus. Eng. Des.* **146** (2019) 1824.

[12] S. Novak, M. Kocen, A. Sestan Zavasnik, A. Galatanu, M. Galatanu, S. Tarancon, E. Tejado, J. Y. Pastor, P. Jenus, "Beneficial effects of a WC addition in FAST-densified tungsten", *Materials Science & Engineering A* **772** (2020) 138666.

[13] J. de Prado, M. Sánchez, G. Stan, A. Galatanu, A. Ureña, "Effect of Cr and V coatings on W base material in W-Eurofer brazed joints for fusion applications", *Fus.Eng. Des.* **159** (2020) 111748.

Persoane de contact: A. Galatanu (gala@infim.ro)

Tehnici experimentale pentru imbunatatirea proprietatilor de suprafata si investigatii nedistructive in cazul materialelor destinate fluxurilor intense de caldura

Proiectul WPMAT in cadrul EUROfusion urmareste consolidarea bazei de date privitoare la comportarea materialelor considerate ca prima optiune pentru realizarea componentelor principale ale reactorului de fuziune DEMO (capabil sa livreze energie electrica in timpul functionarii) si sa dezvolte, produca si caracterizeze noi materiale avansate alternative pentru a asigura indeplinirea tintelor propuse in cadrul programului de fuziune. Pentru a sprijini activitatile consortului prin cresterea calitatii cercetarii realizate si dezvoltarea cunostiintelor stiintifice si tehnologice ale grupurilor implicate, proiectul complementar dedicat participarii noastre in domeniul materialelor isi propune dezvoltarea tehnicilor experimentale pentru studiul modificarilor de suprafata si al investigatiilor ccu grad ridicat de omplexitate. Principalele obiective vizeaza:

- Modificarea proprietatilor suprafetelor utilizand fascicule de electroni, plasma sau laser, in parteneriat cu INFLPR, laboratorul acceleratoare (Dr. C. Ticos)
- Dezvoltarea tehnicilor de microtomografie computerizata cu raze X pentru analiza materialelor dense cu W, in parteneriat cu INFLPR, laboratorul de fuziune nucleara si fizica plasmei (Dr. I. Tiseanu)
- Dezvoltarea tehnicii de evaluare nedistructiva a imbinarilor utilizand investigatii ale proprietatilor de transport termic si electric.

Primul obiectiv este legat de proprietatile de suprafata ale materialelor si compozitelor produse pentru diferite machete si componente in cadrul DEMO. Pe de o parte se vor utiliza echipamentele existente cum sunt acceleratoarele de electroni, tunuri de plasma sau laseri pentru a investiga efectele iradierii asupra suprafetelor si pe de alta parte se urmareste dezvoltarea tehnicilor de modificare controlata a supraafetelor (curatare, curatare selectiva, crearea de diferite texturi si morfologii) fara afectarea materialelor de volum. Aplicatiile imediate se regasesc in ingineria interfetelor la imbinarea materialelor si tehnologii de protejare a suprafetelor (la corodare, oxidere).

Cel de-al doilea obiectiv este dedicat dezvoltării tehnicilor de analiză și reconstrucție grafică 3D pentru materiale cu conținut mare de W. Problema care trebuie rezolvată este legată de “opacitatea” W la raze X, care face posibilă penetrarea acestora doar la nivelul suprafeței. Astfel numai probe extrem de mici pot fi analizate prin această tehnică, deși interesul tehnologic solicită analiza unor probe de volum mare. Scopul studiului este de a găsi soluții pentru investigarea unor probe cu volumul de cel puțin câțiva mm cubici. Aplicațiile sunt legate de studiul materialelor de interfață, cum sunt cele cu gradient funcțional W-Cu și a componentelor îmbinate prin diferite tehnici speciale.

Cel de-al treilea obiectiv este direct legat de aplicațiile în tehnologiile de îmbinare dezvoltate și urmărește obținerea de date experimentale, compararea lor cu rezultatele simulărilor numerice și realizarea unei evaluări cantitative a îmbinărilor. Evident, tehnicile experimentale de analiză dezvoltate în cadrul acestor studii trebuie să poată fi aplicate unor componente sau machete fără a le distruge. Un caz particular de interes deosebit îl constituie dezvoltarea unor modele și tehnici de analiză pentru materialele de tip compozite stratificate, cum sunt așa numitele W laminate.

Obiective:

Proiectul WPMAT în cadrul EUROfusion urmărește consolidarea bazei de date privitoare la comportarea materialelor considerate ca prima opțiune pentru realizarea componentelor principale ale reactorului de fuziune DEMO (capabil să livreze energie electrică în timpul funcționării) și să dezvolte, producă și caracterizeze noi materiale avansate alternative pentru a asigura îndeplinirea tintelor propuse în cadrul programului de fuziune.

În WPMAT-RO, partea complementară are drept obiectiv suportul activităților din partea principală prin creșterea calitatii materialelor și componentelor produse și dezvoltarea cunoștințelor științifice și tehnologice ale grupurilor implicate. Proiectul își propune dezvoltarea tehnicilor experimentale pentru modificări de suprafață și a celor de investigație. Principalele obiective vizează:

- Modificarea proprietăților suprafețelor utilizând fascicule de electroni, plasmă sau laser, în parteneriat cu INFLPR, laboratorul acceleratoare (Dr. C. Ticos)
- Dezvoltarea tehnicilor de microtomografie computerizată cu raze X pentru analiză materialelor dense cu W, în parteneriat cu INFLPR, laboratorul de fuziune nucleară și fizica plasmei (Dr. I. Tiseanu)
- Dezvoltarea tehnicii de evaluare nedistructivă a îmbinărilor utilizând investigații ale proprietăților de transport termic și electric.

Etape și activități:

Anul	Etape/Activități	Termene
2014	Etapa I	12.2014

Anul	Etape/Activitati	Termene
	A1.1. Inbunatatirea prop.suprafetelor	
	NIMP: probe pentru teste	
	P1-Ticos: evaluarea efectelor iradierii asupra probelor W	
	A2. Investigatii XCT	
	NIMP: probe pentru teste	
	P2-Tiseanu: XCT pe probe cu continut ridicat de W	
	A3.1 evaluarea imbinarilor prin prop termice	
	NIMP: analiza probelor simple si cu defecte	
2015	Etapa II	
	A1.2. Imbunatatirea prop. suprafetei	
	NIMP: probe pentru teste	06.2015
	P1-Ticos: evaluarea efectelor iradierii asupra probelor de W cu compozitii mixte ale sup.	

Anul	Etape/Activitati	Termene
	A2.2. Dezvoltarea tehnicilor XCT	
	NIMP: probe pentru teste	
	P2-Tiseanu: XCT pe probe FGM	
	A3.2 evaluarea imbinarilor prin prop termice	
	NIMP: efectele iradierii W asupra imbinarilor	
	P1-Ticos: Iradierea probelor simple de W	
	Etapa III	
	A1.3. Imbunatatirea prop. suprafetei	
	NIMP: probe pentru teste	
	P1-Ticos: evaluarea efectelor iradierii asupra probelor de W cu straturi subtiri depuse	12.2015
	A2.3. XCT develop..	
	NIMP: probe pentru teste	

Anul	Etape/Activitati	Termene
	P2-Tiseanu: XCT pe probe pentru bariere termice	
	A3.3 evaluarea imbinarilor prin prop termice	
	NIMP: Analiza imbinarilor probelor de W+iradierea straturilor mixte de suprafata	
	P1-Ticos: Irad.probelor de W + straturilor mixte de suprafata	
	Etapa IV	
	A1.4. Imbunatatirea prop. suprafetei	
	NIMP: probe pentru teste	
	P1-Ticos: evaluarea posibilitatilor de scalare a irad. sup.	
2016		06/2016
	A2.4. Dezvoltarea tehnicilor XCT pentru probele de interes	
	NIMP: probe pentru teste	
	P2-Tiseanu: XCT pe probe de W imbinat	
	A3.4 evaluarea imbinarilor prin prop termice	

Anul	Etape/Activitati	Termene
	NIMP: efectele iradierii W asupra imbinarilor	
	P1-Ticos: Irad. probelor W +straturi depuse	

Nota : Avand in vedere trecerea de la PN2 la PN3 in cadrul etapelor a avut loc o reindexare a activitatilor

Anul	Etape/Activitati	Termene
	Etapa I	
	Co-1. Fabricarea de probe si suport pentru dezvoltarea experimentelor de iradiere	
2016	P1-1 dezvoltarea experimentelor de iradiere pe materiale simple	12.2016
	P2-1. analize XRCT asupra barierelor termice pe baza de Cu TBP (cu dispersii de particule)	
	Etapa II	
2017	Co-2. Fabricarea de probe cu 2 componente si analize pre-iradiere	06.2017
	P1-2. Dezvoltarea sistemului de iradiere (cresterea valorilor parametrilor de iradiere)	

Anul	Etape/Activitati	Termene
2018	P2-2. analize XRCT asupra probelor cu 2 componente inainte de iradiere si dezvoltarea metodei	
	Etapa III	
	Co-3. Fabricarea de probe cu mai multe componente si analize pre-iradiere	
		12.2017
	P1-3. Iradierea probelor cu 2 componente	
	P2-3. analize XRCT asupra barierelor termice pe baza de Cu TBf (cu dispersii de fibre)	
	Etapa IV	
	Co-4. Fabricarea de probe cu forme complexe(machete)	
		06.2018
	P1-4. Iradierea probelor cu mai multe componente	
P2-4. Analize XRCT asupra probelor cu 2 componente dupa iradiere		
Etapa V		
	12.2018	
Co-5. Analize ale probelor dupa iradiere		

Anul	Etape/Activitati	Termene
	P1-5. Iradierea machetelor si analiza datelor	
	P2-5. Analize XRCT asupra probelor cu mai multe componente dupa iradiere	
Nota: In 2019 nu au fost fonduri alocate partii complementare WPMAT		
	Etapa VI	
	Co-6. producerea si caracterizarea materialelor ante si post expunere la plasma si radiatii (W-laminate si W-TB-CuCrZr)	
2020	P1-6. Expunerea materialelor si machetelor produse de Co la jeturi de plasma si fascicule de electroni	12.2020
	P2-6. Analize XRCT asupra probelor inainte si dupa expunere la fascicule de electroni, jeturi de plasma si temperaturi inalte.	

Rezultate obtinute:

2014

- In cadrul acestei etape, privitor la primul obiectiv, in INCDFM au fost preparate probe din W cu diferite morfologii care au fost expuse in cadrul parteneriatului cu INFLPR (Dr. C. Ticos) unor fluxuri puternice de plasma pentru a analiza calitativ si cantitativ tipurile de defecte cauzate de interactiunea cu plasma, pe de o parte si pe de alta parte pentru a evalua posibilitatea utilizarii unor tratamente cu plasma pentru curatarea de impuritati, migratia de defecte sau autoregenerarea suprafetelor expuse.
- In cadrul studiilor destinate celui de-al doilea obiectiv, in INCDFM au fost preparate diferite compozite cu W (particule, fibre) si Cu, Al, sau SiC pentru analize tomografice cu raze X. Acestea au fost realizate in cadrul INFLPR (Dr. I. Tiseanu) urmarindu-se optimizarea configuratiei si a parametrilor de scanare tomografica a probelor in vederea

determinării formelor și dimensiunilor caracteristice ale diferitelor structuri: interfețe, voids, agregări micro particule de wolfram. Pentru fibrele de wolfram s-a utilizat un program de metrologie tomografică care permite fitarea unor cilindri pe volumele 3D reconstruite și evaluarea razei cilindrului și a abaterilor de formă.

- În cercetările destinate celui de-al treilea obiectiv, au fost realizate și investigate în INCDFM probe de tip multistrat W/material brazare cu sau fără defecte și au fost evaluate proprietățile de transport termic. A fost stabilit un algoritm de rezolvare a rezistenței termice de contact în cadrul probelor multistrat și de evaluare a suprafeței/defectului de suprafață de contact. Rezultatele au fost verificate prin studii microstructurale efectuate pe probele investigate.

2015

- În această etapă în INCDFM obiectivele principale au fost legate de investigarea compozitelor multi-strat de tip laminate cu W și Ti realizate prin FAST, foliile de W fiind protejate în prealabil prin depunerea unor straturi de Cu sau Cr de circa 100 nm. De asemenea, au fost realizate o serie de probe de tip W cu dispersii din Cr, Ir, SiC cu concentrații între 5 și 30 % pentru a fi iradiate cu fascicule de electroni și tunuri de plasmă. Au fost preparate și noi seturi de probe pentru viitoare investigații prin microtomografie, în particular compozite SiC-V.
- Probe cu suprafețe de circa 1 cm² realizate din pulberi sinterizate de W cu dimensiuni de graunți variind între ~60 nm și ~ 80 nm (produse în 2014) au fost expuse unor fluxuri relativiste de electroni cu energii de circa 6.2 MeV într-un LINAC de către grupul Ticos în INFLPR. Căldura depozitată de fluxul de electroni a fost evaluată experimental și semi-analitic și valorile au fost extrapolate pentru situațiile existente într-un reactor de tip tokamak. Probe din W obținute prin sinterizarea de pulberi de nano și micro particule au fost expuse și la jeturi de plasmă dense produse într-un tun coaxial. Analiza suprafeței acestor probe a fost efectuată cu un SEM. Probele cu nanopulberi s-au evidențiat prin apariția fisurilor și chiar a nanoparticule de topitură pe suprafața lor după o expunere de 10 descărcări în timp ce proba din micropulbere a prezentat doar o eroziune puternică pe suprafața sa. Și compozitele din pulberi de W cu Ir, Cr, și SiC cu diferite procente au fost expuse la un fascicul de electroni cu 6 MeV. Cele mai rezistente probe au fost cele de W + SiC care nu arată nici un semn de degradare semnificativă pe suprafața, urmată de probele de W + Cr care sunt rezistente când concentrația Cr este ridicată. Proba de W + Ir a fost puternic erodată pe suprafața sa. Iradierea de pulberi de W, C și Fe imersate într-o descărcare de plasmă RF a fost efectuată cu un fascicul de electroni de 15 keV. Nici un efect semnificativ a fost observat, cu excepția

pulberii de Fe pentru care dinamica particulelor de pulbere a arătat o perturbare în stabilitate în timpul levitației în plasmă.

- Probele de tip FGM W-Cu realizate anul trecut au fost investigate prin uXCT de către grupul Tiseanu în INFLPR. În acest sens a fost necesară optimizarea aranjamentului experimental pentru analiza prin microtomografie de raze X a probelor în vederea obținerii unei rezoluții spațiale cât mai înalte (de ordinul micronului) în prezența unor puternice artefacte de reconstrucție. Au fost investigate astfel materiale de volum pe baza de wolfram-cupru realizate prin SPS cu 4 combinații de amestecuri din nano și micoparticule de wolfram și cupru în proporții volumice egale pentru a evalua uniformitatea distribuției volumetrice de wolfram și cupru. Rezultatul principal este demonstrarea faptului că în limita rezoluției spațiale de cca 1-2 microni nu se evidențiază variații de densitate sau segregări de wolfram/cupru, care certifică astfel la nivel tridimensional rezultatele obținute anterior prin tehnici de microscopie de baleiaj.

2016-2018 Proiect nou

Proiectul prezent urmărește sprijinirea activităților desfășurate de unitatea de cercetare din România în cadrul concernului EUROfusion în modulul destinat dezvoltării de materiale, WPMAT, prin dezvoltarea tehnicilor experimentale dedicate atât tehnologiilor de fabricație cât și investigării comportamentului materialelor produse în condiții ambientale cât mai apropiate de cele existente într-un reactor de fuziune nucleară. Urmand tendința de focusare inițiată în cadrul concernului, și proiectul complementar urmează să fie corelat cu activitățile din consorțiu. Aceasta implică pe de o parte producerea de compozite stratificate incluzând materiale tipice rezistente la fluxuri mari de căldură, cum sunt armuri pe baza de W, interfețe și schimbătoare de căldură din aliaje de Cu (dezvoltate în INCDFM), iar pe de altă parte dezvoltarea experimentelor de iradiere și de analiză non-distructivă dedicate acestor materiale și componente (INFLPR). Testarea materialelor dezvoltate pentru tehnologia de fuziune este esențială pentru validarea tehnologiilor de fabricație relevante. În acest sens este necesară îmbunătățirea condițiilor de iradiere cu electroni și jeturi de plasmă pentru a putea iradia componente continând W (asigurare condiții de vid) și înțelegerea cauzelor și în măsura posibilului reducerea sau chiar eliminarea artefactelor generate de prezența W în cadrul investigațiilor tomografice cu raze X.

Rezultate obținute:

2016

- Utilizând acceleratorul de electroni ALID 7, au fost iradiate probe cu un fascicul de electroni de înaltă energie (6 MeV). O îmbunătățire a condițiilor de testare a fost realizată prin modernizarea montajului experimental și plasarea ulterioară a probelor în vid (4×10^{-2} torr) în timpul iradierii. Într-o primă etapă au fost realizate testări ale probelor realizate din aliaje, precum Ni-Cr, Mo-Re, din oțel inoxidabil și dintr-un metal pur cum

ar fi Mo. Suprafetele probelor au fost apoi studiate la SEM pentru a analiza modificarile morfologice la nivel microscopic.

- Materialele de interfata utilizate in realizarea compozitelor stratificate sunt noi materiale dense pe baza de Cu, dezvoltate de noi pentru a actiona pe post de bariere termice care controleaza fluxul termic prin componentele divertorului. Pentru a putea caracteriza 3D morfologia lor, tehnicile de investigare prin micro-tomografie computerizata cu raze X au fost adaptate pentru a face fata atat naturii compozite a materialelor la nivel micronic cat si prezentei in vecinatate a unui strat de W opac la radiatiile X.
- Pentru a putea investiga efectele iradierii cu electroni asupra interfetelor din componentele W-BT-aliaj Cu a fost necesara realizarea unor probe dedicate cu grosimi reduse ale stratului de W, care sa permita interactia fluxului de electroni in adancimea componentelor. Astfel au fost realizate noi sisteme multistrat utilizand folii de W de 0.1, 0.5 si 2 mm, diferite materiale de interfata si suport din CuCrZr. Acestea urmeaza sa fie investigate inainte si post iradiere atat prin tehnici tomografice cat si prin metode clasice (SEM, proprietati termofizice).

2017

- Utilizand acceleratorul de electroni ALID 7, au fost iradiate probe cu un fascicul de electroni de înaltă energie (6 MeV). O îmbunătățire a condițiilor de testare a fost realizata prin modernizarea montajului experimental și plasarea ulterioara a probelor în vid (4×10^{-2} torr) în timpul iradierii. Au fost iradiate materilae de tip sandwich W-BT-CuCrZr (BT = bariera termica, adica compozite Cu ZrO₂, cu concentratii volumice de ceramica peste 50%). Stratul de W a fost variat pentru a avea situatii diferite, cand intreaga energie a electronilor este absorbita de W si cand o parte din energie este direct absorbita si in mBT). Pentru comparatie au fost iradiate de asemenea si aliaje CuCrZr.
- Au fost finalizate investigatiile suplimentare solicitate asupra probelor din W cu diferite morfologii supuse interactiunii cu fluxuri dense de plasma. Aceste analize au fost necesare pentru definirea conditiilor optime de realizare a materialelor pentru armura divertorului.
- Materialele de interfata utilizate in realizarea compozitelor stratificate sunt noi materiale dense pe baza de Cu, dezvoltate de noi pentru a actiona pe post de bariere termice care controleaza fluxul termic prin componentele divertorului. Pentru a putea completa analizele morfologice prin tomografie de raze X au fost realizate si investigatii de fluorescenta de raze X. Drept rezultat a putut fi ajustat modul de lucru la micro-tomografie computerizata cu raze X in sensul cresterii contrastului si realizarii de analize cantitative mai precise.

- Au fost dezvoltate metodele de simulare prin FEM a comportarii termice a componentelor de complexe de divertor (Armura monobloc+bariere termice+racitor din CuCrZr, in conditii de operare si de testare in HHF, pentru a putea optimiza realizarea machetelor.

2018

- In cadrul acestei etape, in Co-INCDFM au fost produse probe cu geometrii definite de tipul laminate W-metal pentru expunere la fluxuri de plasma si electroni precum bariere termice pe baza de Cu pentru analize prin XRCT. De asemenea, au fost realizate simulari asupra curgerii fluxului de caldura prin componentele de divertor DEMO de tip monobloc de W in vederea optimizarii barierelor termice inelare cu gradient functional in machetele pentru teste in fluxuri mari de caldura. Un rezultat remarcabil este proiectarea unor astfel de materiale pentru a mentine intregul monobloc in timpul functionarii la temperaturi cuprinse intre temperatura de tranzitie de la casant la ductil si temperatura de recristalizare a W.
- Probe de laminate de W cu diferite metale, precum si folii din W si W dopat cu K au fost expuse intrun fascicul pulsant de electroni de energie 6 MeV in 3 sesiuni de iradiere de catre partenerul P1-Ticos . Au fost observate modificari morfologice cum sunt aparitia mai multor nanostructuri pe suprafata si exfolierea suprafetei, depinzand de tipul probei si de fluenta fasciculului de electroni. Iradierea a fost efectuată în vid la o presiune de $2-4 \times 10^{-2}$ torr. Nanostructurile observate pe suprafața probelor sunt probabil produse datorită încălzirii intense în fasciculul cu electroni si vaporizarii suprafetei urmate de condensarea vaporilor in zona adiacenta suprafetei.
- Partenerul P2-Tiseanu a realizat studii de microtomografie cu raze X (XRCT) utilizand echipamentul dezvoltat in INFLPR cu o sursa de raze X nanofocalizata de 225 keV si un detector de inalta rezolutie cu suprafata mare. Procesarea volumetrica avansata permite caracterizarea precisa a distributiilor de materiale si a porilor din probele investigate.

2020

- In cadrul acestei etape, INCDFM a produs specimene cu geometii specifice, realizate din 3 straturi, un strat de armura din W, o interfata de tip material bariera termica si o parte de schimbator de caldura din aliaj CuCrZr. Materialele bariera temica au fost fie similare cu cele produse anul trecut pentru teste in fluxuri mari de caldura dar si unele materiale noi realizate pentru optiunea de racire la temperaturi ridicate, materiale BT bazate pe V si Cr dezvoltate pentru monoblocurile hibride de W.
- Probele astfel realizate au fost investigate din punctul de vedere al morfologiei volumice prin microtomografie de raze X de catre partenerul P2-Tiseanu din INFLPR si apoi

iradiate cu fluxuri de electroni de 6 MeV de catre partenerul P1-Ticos. Rezultatele au evidentiat o comportare foarte buna a specimenului cu BT clasica Cu-ZrO₂ (care a fost deja implementat ca interfata in monoblocuri de W de tip ITER pentru fabricarea de machete la ENEA (Italia) si unele deficiente pentru celelalte materiale de interfata. Analizele realizate dupa iradiere asupra acestor specimene au oferit informatii privind posibilitatea imbunatatirii acestor in vederea testelor in fluxuri mari de caldura.

Publicatii:

Articole

- [1] M. Oane, D. Toader, N. Iacob, C. M. Ticos, "Thermal phenomena induced in a small tungsten sample during irradiation with a few MeV electron beam: Experiment versus simulations", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 337 (2014) 17–20.
- [2] D. Toader, M. Oane, C.M. Ticos, "Collimated electron beam accelerated at 12 kV from a Penning discharge", Review of Scientific instruments 86 (2015), 013301-1/6
- [3] M. Oane, A. Peled, D. Toader, P. Mursa, C.M. Ticoș, "Semi-analytical solution of the thermal field distribution in a semiconductor under simultaneous Irradiation by three laser beams", Lasers in Engineering 32 (3-4) (2015), 161-171
- [4] C.M. Ticos, M. Galatanu, A. Galatanu, C. Luculescu, A. Scurtu, N. Udrea, D. Ticos, M. Dumitru, "Cracks and nanodroplets produced on tungsten surface samples by dense plasma jets", App. Surf. Sci. **434** (2018) 1122.
- [5] C.M. Ticos, A. Scurtu, D. Ticos, A compact pulsed coaxial plasma gun for plasma-surface interaction studies, to be submitted to Results in Physics
- [6] D. Ticos, M. Dumitru, M.L. Mitu, M. Galatanu, A. Galatanu, A. Scurtu, C.M. Ticos, Irradiation of multi-layered samples containing W with a pulsed 6 MeV electron beam, in preparation for Materials

Persoane de contact:

A. Galatanu (gala@infim.ro), I. Tiseanu (tiseanu@infim.ro), C. Ticos (catalin.ticos@inflpr.ro)

Meniu

- [Informatii generale](#)
- [Obiective](#)
- [Pachet de informatii](#) **NOU**
- [Proiecte in derulare](#)
- [Manifestari, Conferinte](#)

- [Rapoarte Anuale](#)
 - [Documente europene](#)
 - [Apeluri EUROfusion](#)
 - [Posturi Vacante EUROfusion](#)
 - [Noutati](#)
 - [Arhiva](#)
 - [Legaturi utile](#)
 - [Old Website](#)
 - [Contact](#)
-

Adresa

- **Institutul de Fizica Atomica**
- Str. Atomistilor nr. 407, Magurele
- 077125, Ilfov, Romania
- Tel: +40 (21) 457.44.93,
+40 (31) 710.15.54
- Fax: +40 (21) 457.44.56
- E-mail: euratom_fuziune@ifa-mg.ro

