

Studio degli stress residui mediante diffrazione X di un *interlayer* W/Cu depositato con plasma spraying

A. Fava, E. Pakhomova, A. Varone

Il tungsteno viene considerato un ottimo materiale per la realizzazione di componenti posti a protezione dei materiali che si affacciano al plasma nei futuri reattori a fusione nucleare. In questo lavoro è stato studiato il sistema CuCrZr-W/Cu-W al fine di valutare l'efficacia dell'*interlayer* rappresentato da un materiale funzionalmente graduato (FGM), ottenuto mediante plasma spraying (PS). A tal fine sono stati misurati gli stress residui mediante la tecnica di diffrazione dei raggi X (XRD). Il rivestimento e l'*interlayer* mostrano un'ottima adesione senza presenza di interfacce e risultano esenti da cricche. I risultati permettono di concludere che l'impiego di un *interlayer* FGM consente di migliorare la qualità della giunzione mitigando l'accumulo degli stress residui del rivestimento e del substrato.

PAROLE CHIAVE: REATTORI A FUSIONE NUCLEARE, TUNGSTENO, PLASMA SPRAYING, STRESS RESIDUI, MATERIALI FUNZIONALMENTE GRADUATI, DIFFRAZIONE DEI RAGGI X

INTRODUZIONE

Il tungsteno grazie alle sue eccellenti caratteristiche termo-meccaniche, alla conducibilità termica relativamente alta, alla sua bassa attivazione sotto il flusso neutronico e bassa ritenzione del trizio viene considerato un ottimo materiale per la realizzazione delle armature a protezione del sistema di raffreddamento del divertore nei reattori a fusione nucleare [1]. In particolar modo per ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), è richiesto che i materiali strutturali, che si interfacciano con il plasma, siano resistenti a carichi termici sia stazionari (5-20 MW/m²), che transienti, e al flusso di particelle [2-6]. Il sistema di raffreddamento consiste in tubi di materiale con alta conducibilità termica, come la lega di rame CuCrZr (Cr, Zr < 1%) che sarà utilizzata nei futuri reattori ITER e DEMO (Demonstrational thermonuclear plant) [7-11].

Il processo di giunzione del tungsteno con i materiali del sistema di raffreddamento è complicato per l'elevata differenza dei coefficienti d'espansione termica e l'alta fragilità del tungsteno. Per evitare che gli stress, generati all'interfaccia, portino alla propagazione di cricche e al distacco del rivestimento dal substrato è di grande importanza scegliere la tecnica di giunzione adatta e uno strato intermedio (*interlayer*) idoneo tra i due materiali. La tecnica del plasma

A. Fava

Dipartimento di Energia, Divisione di Ingegneria Nucleare,
Politecnico di Milano

E. Pakhomova

Dipartimento di Ingegneria meccanica, chimica e dei materiali,
Università degli studi di Cagliari (corresponding author)

A. Varone

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli studi di Roma
"Tor Vergata"

spraying (PS) è particolarmente adatta per rivestire superfici estese e di forma complessa, lavorare in-situ e vanta costi relativamente bassi. Può essere realizzata in diverse atmosfere – sotto vuoto, in atmosfera controllata e in aria [12-13]. In studi precedenti [14-18], il PS è stato impiegato, in atmosfera controllata di Ar, nella realizzazione di diverse tipologie di materiali per il settore nucleare.

Durante il processo di PS gocce di tungsteno si depositano con alta velocità di impatto sul substrato pre-riscaldato e solidificano formando un rivestimento strato dopo strato. Gli stress residui in questo tipo di sistema possono avere una duplice origine: i) il processo di solidificazione della goccia che contraendosi genera uno stress di tensione; ii) i diversi coefficienti di espansione termica del substrato e del rivestimento che entrano in gioco durante il raffreddamento di tutto il sistema a temperatura ambiente [19, 20].

Per mitigare gli stress residui, accumulati all'interfaccia substrato/rivestimento a causa della differenza tra l'espansione termica dei due materiali, può essere usato un *interlayer* funzionalmente graduato (FGM). I FGM consentono di modificare gradualmente le proprietà termo-meccaniche tra substrato e rivestimento grazie ad una progressiva variazione della percentuale degli elementi presenti in ogni strato dell'*interlayer* [21-24]. F.L. Chong et al. [25] hanno dimostrato la possibilità di ottenere una buona giunzione tra

il rivestimento di W e il substrato di lega di rame andando a depositare mediante PS in vuoto un *interlayer* di FGM W/Cu. L'adesione tra i vari strati risulta essere stabile anche dopo l'esposizione ad elevati carichi termici e all'irraggiamento da plasma.

Per valutare l'efficienza del sistema substrato – *interlayer* – rivestimento è utile verificare la distribuzione degli stress che dovrebbero concentrarsi principalmente nell'*interlayer*, per garantirne la stabilità [17].

In questo lavoro è stato studiato il sistema CuCrZr - FGM W/Cu – W. La tecnica di diffrazione dei raggi X (XRD) è stata utilizzata per determinare gli stress residui al fine di valutare l'efficacia dell'*interlayer* ottenuto mediante PS.

MATERIALI E METODI

I campioni di CuCrZr - FGM W/Cu – W (di altezza pari a 10.6 mm e diametro di 30 mm) sono stati prodotti depositando sul substrato (CuCrZr), l'*interlayer* ed il rivestimento (FGM W/Cu – W) tramite PS in atmosfera controllata. I parametri (corrente e voltaggio) e la miscela di gas di Ar-H₂ utilizzati durante il processo sono riportati in Tab. 1. L'*interlayer* è stato ottenuto a partire da una miscela di polveri di W e Cu puri, cioè non prealligati, la cui composizione è stata variata gradualmente (Tab. 1).

Tab.1 - Parametri di deposizione (atmosfera, corrente e voltaggio) del plasma spraying e relativa % in volume dell'*interlayer* FGM W/Cu / Deposition parameters (atmosphere, current and voltage) of plasma spraying and corresponding %Vol. of FGM W/Cu *interlayer*.

I parametri del plasma		Composizione, Vol. %	
Ar,%-H ₂ ,%	Corrente, A-Voltaggio, V	Cu %	W%
50-9,5	520-62	90	10
50-9,5	520-62	85	15
55-14	600-69	79	21
55-14	600-69	71	29
55-14	600-69	59	41
55-14	600-69	42	58
60-14	620-70	18	82
60-14	620-70	10	90
60-16	620-70	0	100

In Fig. 1 è mostrata la sezione ortogonale di un campione da cui è possibile osservare il substrato di CuCrZr con uno spessore di 8 mm e l'*interlayer* W/Cu-rivestimento W di

spessore 2.6 mm. Substrato - *interlayer* - rivestimento mostrano una buona adesione e risultano esenti da cricche.

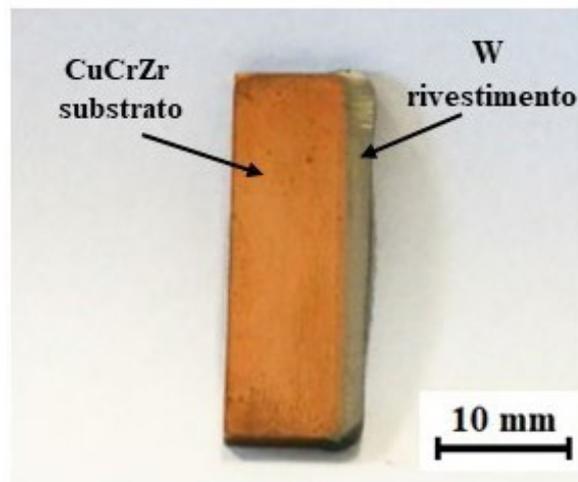


Fig.1 - Sezione ortogonale del campione CuCrZr - FGM W/Cu - W / Orthogonal section of CuCrZr - FGM W/Cu - W sample

In Fig. 2 sono riportate le micrografie effettuate al microscopio ottico (MO) (Fig. 2a) e al microscopio elettronico in scansione (SEM) (Fig. 2b). Dalle immagini è possibile osservare le diverse zone: il substrato CuCrZr (a sinistra), il rivestimento di W (a destra) e l'*interlayer* (di spessore di circa

1.2 mm) costituito da rame e isole di tungsteno. La stratificazione mostra una morfologia alquanto complessa risultata del processo di deposizione. Le mappe chimiche di Fig.2 (c,d) mostrano la distribuzione degli elementi (W e Cu) nel sistema substrato-*interlayer*-rivestimento.

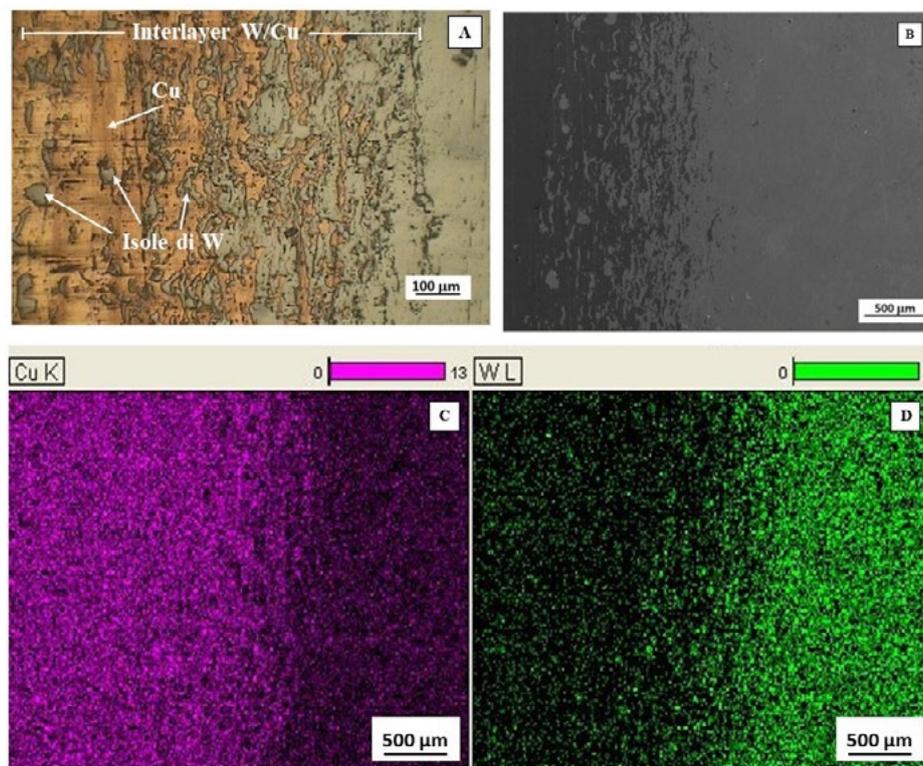


Fig.2 - Sistema CuCrZr - FGM W/Cu - W: micrografia di microscopia ottica (a), SEM (b) e microanalisi EDS dell' area mostrata in b) (c e d) / CuCr - FGM W/Cu - W system: Optical microscope micrograph (a), SEM (b), EDS micro-analysis of the area showed in b) (c e d).

Determinazione degli stress residui

La diffrazione dei raggi X è stata utilizzata per determinare gli stress residui presenti nel sistema CuCrZr - FGM W/Cu - W. Il metodo si basa sulla misura delle deformazioni del reticolo studiando le variazioni delle distanze reticolari (d) di un materiale policristallino indotte dagli stress di compressione o trazione. Infatti, gli stress residui, in particolare quelli del 1° ordine, modificano le distanze reticolari, de-

terminando uno spostamento del picco verso angoli più alti quando sono presenti stati di compressione mentre nel caso di stress di trazione verso angoli minori. La deformazione può essere calcolata dalla variazione della distanza reticolare di una famiglia di piani cristallini (d) del materiale esaminato rispetto a quella dello stesso materiale privo di stress (d_0) utilizzando la seguente equazione:

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} \quad 1)$$

Il valore così ottenuto rappresenta la deformazione elastica lungo la direzione normale alla superficie irraggiata del campione [26]. Dalla deformazione si determina lo stress residuo mediante la legge di Hooke, una volta noto il modulo di Young del materiale.

Al fine di determinare la deformazione del sistema CuCrZr - FGM W/Cu - W in varie posizioni e quindi studiare gli stress residui in substrato, *interlayer* e rivestimento, le prove di

diffrazione X sono state condotte traslando il campione sotto il fascio di raggi X con un passo di 250 μm . In fig. 3, i numeri da 1 a 6 mostrano la posizione centrale del fascio che possiede una larghezza di circa 2 mm. Gli spettri di diffrazione sono stati ottenuti utilizzando la radiazione Cu- $K\alpha$ ($\lambda = 1.5408 \text{ \AA}$) con step angolari $2\theta = 0.05^\circ$ e tempo di conteggio per step di 2 s.

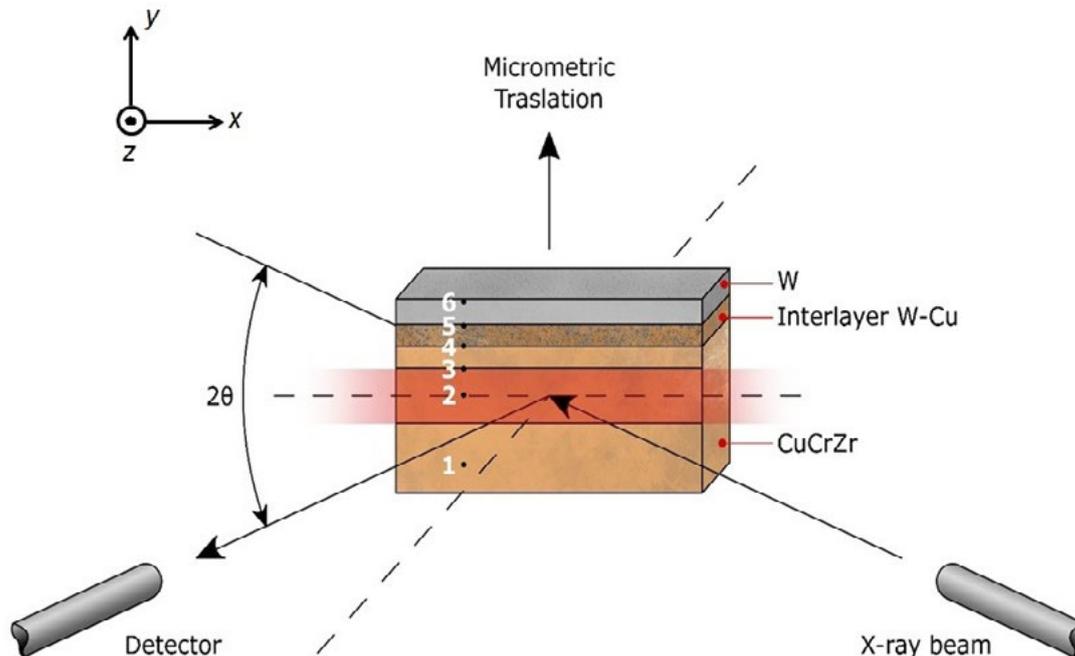


Fig.3 - Rappresentazione schematica delle differenti zone del campione dove sono state effettuate le misure XRD / Scheme of different areas of the sample where are collected XRD measurements.

I picchi di diffrazione (Fig. 4) sono stati indicizzati confrontando le posizioni sperimentali con quelle del database JCPDS-ICDD del Cu (File 4-836) e del W (File 4-806) [27]. Dal confronto degli spettri ottenuti nelle diverse aree è possibi-

le identificare la zona 4 come quella di confine tra substrato e *interlayer*, in quanto è la prima ad essere caratterizzata dalla simultanea presenza delle riflessioni del Cu e del W.

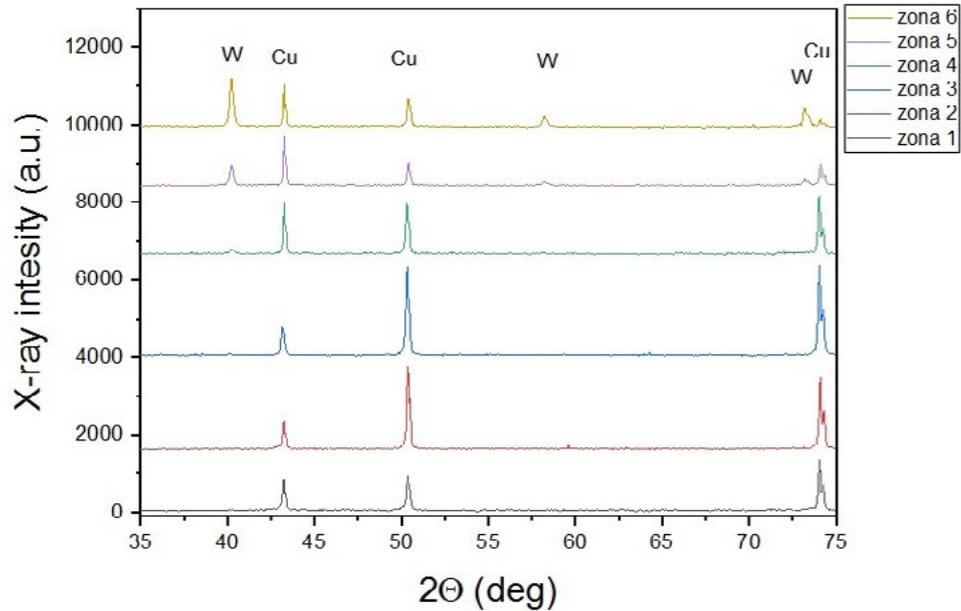


Fig. 4 - Spettri di diffrazione X ottenuti nelle diverse zone (1-6) indicate in Fig. 3 / XRD spectra of the different areas (1-6) showed in Fig. 3.

Al fine di determinare gli stress residui sono stati raccolti spettri di precisione con step angolari $2\theta = 0.005^\circ$ e tempo di conteggio per step di 2 s. I picchi sono stati corretti eliminando il contributo della $K\alpha_2$ attraverso un fitting con curve di Lorentz. A titolo di esempio si riporta in Fig. 5 la procedura

adottata.

La componente $K\alpha_1$ della riga $\{110\}$ del Cu è stata utilizzata per determinare la posizione (θ) del picco e calcolare gli stress residui presenti a seguito del processo di deposizione.

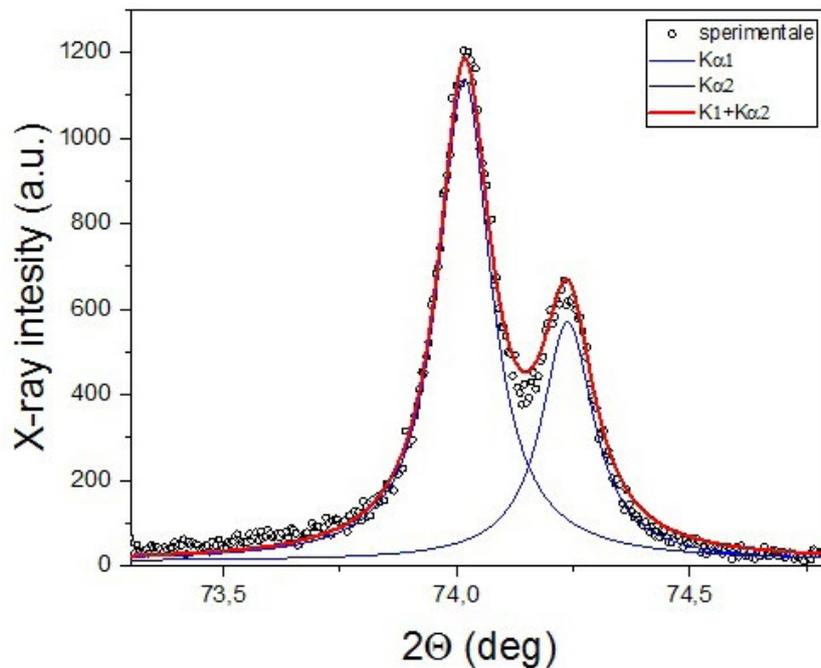


Fig. 5 - Procedura adottata per eliminare il contributo della $K\alpha_2$ attraverso un fitting con curve di Lorentz / Employed method to eliminate $K\alpha_2$ contribution by fitting with Lorentzian curves.

RISULTATI E DISCUSSIONE

La Fig. 6 e la Fig. 7 mostrano lo spostamento della componente $K\alpha_1$ del picco {110} del Cu e del W delle diverse zone dell'*interlayer*, le cui intensità sono state normalizzate. Per il Cu si osserva un progressivo spostamento del picco (θ)

verso angoli più bassi muovendoci dal substrato (zona 3) al rivestimento attraverso l'*interlayer* (zona 4, 5, 6). Tale variazione è indice della presenza di stress di trazione nella direzione normale (z) alla superficie del campione, ovvero di compressione in quella di deposizione (y):

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], \quad 2)$$

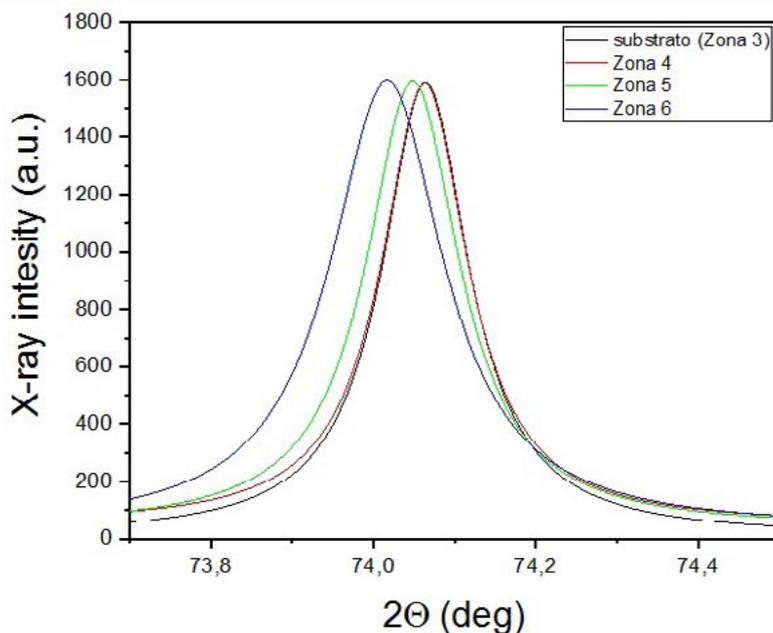


Fig. 6 - Spostamento progressivo del picco {110} del Cu dal substrato (zona 3) all'*interlayer* (zona 6) / Progressive shift of the Cu {110} peak from the substrate (area 3) to the *interlayer* (area 6).

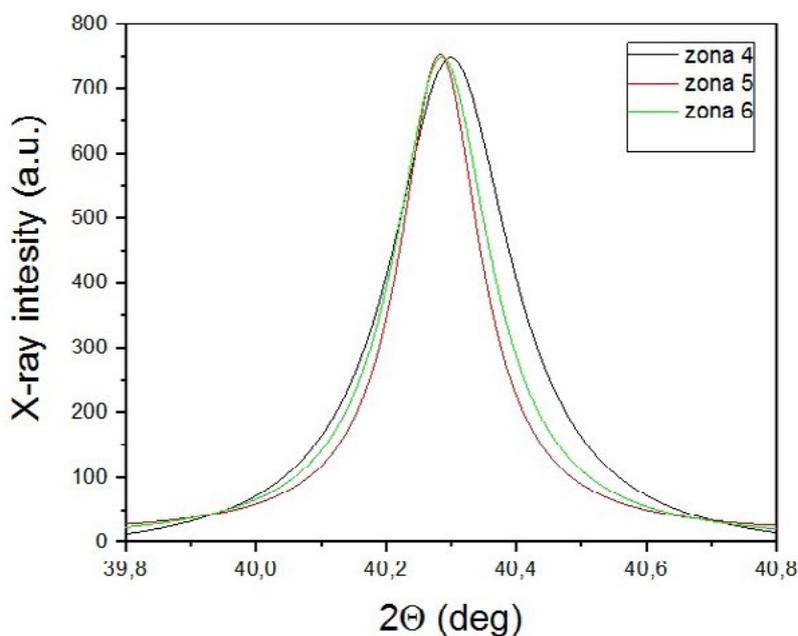


Fig. 7 - Spostamento del picco {110} del W / Shift of the W {110} peak.

Dallo spostamento dei picchi mostrati in Fig. 6 e Fig. 7 e utilizzando l'Eq. 1 sono stati determinati gli stress residui (Tab. 2) del Cu presente nel substrato (zona 1, 2 e 3) e nell'*interlayer* (zona 4, 5 e 6) oltre che quelli del W nell'*interlayer*. Per calcolarli si è considerato come dato di riferimento (materiale libero da stress) quello riportato per il Cu e il W nel database JCPDS_ICDD, scheda 4-836 e 4-806 rispettivamente. La posizione del picco di riferimento del Cu per i piani {110} è $2\theta = 74.130^\circ$ e il modulo di Young pari a 110 GPa, mentre

per il W $2\theta = 40.264^\circ$ e il modulo di Young pari a 400 GPa. Il segno meno riportato in Tab. 2 indica per convenzione stress di compressione.

Un risultato significativo è che gli stress residui osservati nell'*interlayer* si distribuiscono diversamente nel W e nel Cu, risultando maggiormente concentrati nel metallo duttile (Cu). In altre parole, il processo di deposizione adottato ha raggiunto il suo scopo cioè di concentrare gli stress residui nel Cu e limitarne la presenza in quello più fragile (W).

Tab.2 - Valori delle deformazioni (ϵ) e degli stress residui (σ) del Cu dalla zona 1 alla zona 6 e del W dalla zona 4 alla zona 6 / Strain (ϵ) and residual stress (σ) values of Cu from 1 to 6 area and of W from 4 to 6 area.

Zona	Cu			W		
	2θ	ϵ	σ (MPa)	2θ	ϵ	σ (MPa)
1	74,062	$7,9 \times 10^{-4}$	86	--	--	--
2	74,083	$5,5 \times 10^{-4}$	60	--	--	--
3	74,064	$7,7 \times 10^{-4}$	84	--	--	--
4	74,063	$7,8 \times 10^{-4}$	86	40,298	$-6,8 \times 10^{-4}$	-273
5	74,049	$9,4 \times 10^{-4}$	103	40,28	$-3,0 \times 10^{-4}$	-121
6	74,017	$1,3 \times 10^{-3}$	144	40,286	$-3,7 \times 10^{-4}$	-149

Gli stress residui osservati nelle zone 1, 2 e 3 sono associati alle lavorazioni a cui il campione è stato sottoposto, quali ad esempio le operazioni di taglio, pertanto non essendo legati al processo di deposizione mediante PS non verranno ulteriormente discussi.

Gli stress di trazione del rame osservati nelle zone 4, 5 e 6 aumentano progressivamente all'aumentare della percentuale di W presente nell'*interlayer*. Questi valori se confrontati con quelli ottenuti in un precedente lavoro [17], per un sistema W/CuCrZr privo di *interlayer*, evidenziano il vantaggio di non avere un'interfaccia diretta tra substrato e rivestimento (Tab. 3). La presenza dell'*interlayer* consente infatti di ridurre gli stress residui che si accumulerebbero altrimenti all'interfaccia tra W e Cu favorendo un possibile distacco del rivesti-

mento.

Il campione W-Al/Ni/Si-CuCrZr è stato ottenuto depositando 5 mm del rivestimento di W sul substrato di lega CuCrZr con un *interlayer* di spessore di $\sim 800 \mu\text{m}$ di Al, Ni e Si le cui proporzioni sono riportate in [28]. Il campione è stato esaminato mediante XRD per determinare gli stress residui [29] e i risultati sono riportati nella Tab. 3.

Pertanto, in un materiale senza *interlayer*, le deformazioni sono sostanzialmente dovute alla presenza di un'interfaccia diretta tra substrato e coating che possiedono proprietà termo-meccaniche molto differenti. L'utilizzo di un materiale FGM (Al/Si/Ni), con proprietà intermedie tra substrato e rivestimento, determina stress residui inferiori rispetto alla giunzione netta W/CuCrZr.

Tab.3 - Confronto dei valori delle deformazioni dei tre sistemi: W- FGM W/Cu -CuCrZr, W-Al/Ni/Si-CuCrZr, W-Cu senza *interlayer* / Comparison of strain values of three systems: W- FGM W/Cu -CuCrZr, W-Al/Ni/Si-CuCrZr, W-Cu without *interlayer*.

Sistema	W- FGM W/Cu -CuCrZr			W-Al/Ni/Si-CuCrZr	W-Cu senza <i>interlayer</i>
Rivestimento	-			$\epsilon_w = 4,5 \times 10^{-4}$	$\epsilon_w = 9,83 \times 10^{-3}$
<i>interlayer</i>	Zona 6	$\epsilon_{Cu} = 1,3 \times 10^{-3}$	$\epsilon_w = -3,7 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{Ni} = 1,5 \times 10^{-3}$ $\epsilon_{Al} = 1,3 \times 10^{-2}$	-
	Zona 5	$\epsilon_{Cu} = 9,4 \times 10^{-4}$	$\epsilon_w = -3,0 \times 10^{-3}$		
	Zona 4	$\epsilon_{Cu} = 7,8 \times 10^{-4}$	$\epsilon_w = -6,8 \times 10^{-4}$		
Substrato	Zona 3	$\epsilon_{CuCrZr} = 7,7 \times 10^{-4}$		$\epsilon_{CuCrZr} = 9,6 \times 10^{-4}$	$\epsilon_{CuCrZr} = 2,87 \times 10^{-3}$
	Zona 2	$\epsilon_{CuCrZr} = 5,5 \times 10^{-4}$			
	Zona 1	$\epsilon_{CuCrZr} = 7,9 \times 10^{-4}$			

Risulta inoltre fondamentale la scelta del materiale da interporre tra substrato e rivestimento. Un materiale FGM, come quello in esame, presenta un ulteriore vantaggio rispetto ad altri sistemi di *interlayer* (Tab.3).

Realizzare un *interlayer* con gli stessi elementi (W e Cu) che costituiscono il substrato (CuCrZr) e il rivestimento (W), variando gradualmente la loro percentuale, consente di ottenere un sistema in cui le proprietà termo-meccaniche si modificano senza discontinuità. In questo modo si riducono ulteriormente gli stress che possono generarsi nei singoli strati. L'approccio adottato qui ha anche un altro importante vantaggio rispetto al sistema W-Al/Ni/Si-CuCrZr, che ha mostrato un ottimo comportamento meccanico e ha superato tutti i test di carico termico [30], cioè non contiene elementi come il Nichel che si attivano sotto irraggiamento neutronico e quindi rappresenterebbero un problema serio nei reattori a fusione nucleare che hanno una componente neutronica da 14.1 MeV.

CONCLUSIONI

La tecnica di PS ha permesso di realizzare una giunzione tra W e CuCrZr interponendo un FGM, che mostra un'ottima adesione tra gli strati ed è esente da cricche. Mediante diffrazione a raggi X sono stati valutati gli stress residui presenti

nel substrato di CuCrZr – *interlayer* di FGM W/Cu – rivestimento di W.

I principali risultati possono essere riassunti come segue:

- I. Il Cu mostra stress di compressione, nella direzione di deposizione, che aumentano progressivamente all'aumentare della percentuale di W dell'*interlayer*;
- II. Il W mostra stress di trazione con valori inferiori rispetto a quelli del Cu dell'*interlayer*;
- III. I valori delle deformazioni ottenute risultano più bassi di quelle determinate in altri sistemi (W-Cu senza *interlayer* oppure W-Al/Ni/Si-CuCrZr).

Il sistema esaminato mostra stress residui minori in quanto utilizzando W e Cu come elementi di *interlayer* si ha una variazione più graduale delle proprietà meccaniche e termiche.

Questo ci permette di concludere che l'impiego di un *interlayer* FGM, realizzato con gli stessi elementi (W e Cu) che costituiscono il substrato (CuCrZr) e il rivestimento (W), in combinazione con la tecnica di PS consente di migliorare la qualità del sistema limitando gli stress residui nel materiale più fragile (W) e concentrandoli in quello più duttile (Cu). Questo è garanzia di un buon comportamento meccanico e di eccellente adesione del rivestimento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hirai T, Panayotis S, Barabash V, Amzallag C, Escourbiac F, Durocher A, Merola M, Linke J, Loewenhoff Th, Pintsuk G, Wirtz M, Uytendhouwen I. Use of tungsten material for the ITER divertor. *Nuclear Materials Energy* 2016; 9: 616–622.
- [2] Linke JM, Hirai T, Rödiger M, Singheiser LA. Performance of Plasma-Facing Materials Under Intense Thermal Loads in Tokamaks and Stellarators. *Fusion Science and Technology* 2017; 46:1: 142-151.
- [3] Linsmeier Ch, Unterberg B, Coenen JW, Doerner RP, Greuner H, Kreter A, Linke J, Maier H. Material testing facilities and programs for plasmafacing component testing. *Nuclear Fusion* 2017; 57: 092012.
- [4] Ueda Y, Schmid K, Balden M, Coenen JW, Loewenhoff Th, Ito A, Hasegawa A, Hardie C, Porton M, Gilbert M. Baseline high heat flux and plasma facing materials for fusion. *Nuclear Fusion* 2017; 57: 092006.
- [5] Merola M, Escourbiac F, Raffray R, Chappuis P, Hirai T, Martin A. Overview and status of ITER internal components. *Fusion Engineering Design* 2014; 890: 890-895.
- [6] Linke J, Du J, Loewenhoff Th, Pintsuk G, Spilker B, Steudel I, Wirtz M. Challenges for plasma-facing components in nuclear fusion. *Matter and Radiation at Extremes* 2019; 4: 056201, <https://doi.org/10.1063/1.5090100>
- [7] Richou M, Gallay F, Chu I, Li M, Magaud P, Missirlian M, Rocella S, Visca E, You JH. Status on the W monoblock type high heat flux target with graded *interlayer* for application to DEMO divertor. *Fusion Engineering and Design* 2017; 124: 338–343.
- [8] Visca E, Böswirth B, Cacciotti E, Cerri V, Crescenzi F, Gallay F, Greuner H, Reale A, Richou M, Roccella S, You JH, Maviglia F. Manufacturing and testing of ITER-like divertor plasma facing mock-ups for DEMO. *Fusion Engineering and Design* 2018; 136: 1593–1596.
- [9] Richou M, Gallay F, Böswirth B, Chu I, Dose G, Greuner H, Kermouche G, Lenci M, Loewenhoff Th, Wirtz M, Roccella S, Visca E, You JH. Performance assessment of high heat flux W monoblock type target using thin graded and copper interlayers for application to DEMO divertor. *Fusion Engineering and Design* 2019; 146: 858–861.
- [10] Richou M, Gallay F, Böswirth B, Chu I, Dose G, Greuner H, Kermouche G, Lenci M, Loewenhoff Th, Maestracci R, Meillot E, Missirlian M, Pastor JY, Quet A, Roccella S, Tejado E, Wirtz M, Visca E, Pintsuk G, You JH. Performance assessment of thick W/Cu graded interlayer for DEMO divertor target. *Fusion Engineering and Design* 2020; 157: 111610.
- [11] You H, Visca E, Bachmann Ch, Barrett T, Crescenzi F, Fursdon M, Greuner H, Guilhem D, Languill P, Lia M, McIntosh S, Müller AV, Reiser J, Richou M, Rieth M. European DEMO divertor target: Operational requirements and material-design interface. *Nuclear Materials and Energy* 2016; 9: 171–176.
- [12] Wang F, Luo G-N, Huang J, Liu Y. Properties improvement of atmospheric plasma sprayed tungsten coating by annealing. *Surface & Coatings Technology* 2019, 358: 276–281.
- [13] Vaßen R, Rauwald K-H, Guillona O, Aktaa J, Weber T, Back HC, Qu D, Gibmeier J. Vacuum plasma spraying of functionally graded tungsten/EUROFER97 coatings for fusion applications. *Fusion Engineering and Design* 2018; 133: 148–156.
- [14] Riccardi B, Montanari R, Casadei M, Costanza G, Filacchioni G, Moriani A. Optimisation and characterisation of tungsten thick coatings on copper based alloy substrates. *Journal of Nuclear Materials* 2006; 352: 29–35.
- [15] Montanari R, Riccardi B, Volterri R, Bertamini L. Characterisation of plasma sprayed W-coatings on a CuCrZr alloy for nuclear fusion reactor applications. *Materials Letters* 2002; 52: 100–105.
- [16] Ciambella L, Donnini R, Montanari R. Effects of Heat Treatments on Tungsten for Armour in NFR. *Materials Science Forum* 2014; 783-786: 2353-2358.
- [17] Ciambella L, Maddaluno G, Montanari R, Pakhomova E. Stress residui in W depositato mediante plasma spray: effetto del substrato e delle modalità di processo. *La Metallurgia Italiana* 2015; 5: 31-39.
- [18] Balijepalli SK, Kaciulis S, Maddaluno G, Montanari R. Micro-chemical investigation of thick W coating on AISI 420 martensitic steel. *Surface and Interface Analysis* 2014; Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com); DOI 10.1002/sia.5388.
- [19] Kesler O, Matejicek J, Sampath S, Suresh S, Gnaeupel-Herold T, Brand PC, Prask HJ. Measurement of residual stress in plasma-sprayed metallic, ceramic and composite coatings. *Materials Science and Engineering* 1998; A257: 215–224.
- [20] Matějčeka J, Mušáleka R, Veverka J. Materials and processing factors influencing stress evolution and mechanical properties of pla-

- sma sprayed coatings. *Surface & Coatings Technology* 2019; 371: 3–13.
- [21] You J-H, Brendel A, Nawka S, Schubert T, Kieback B. Thermal and mechanical properties of infiltrated W/CuCrZr composite materials for functionally graded heat sink application. *Journal of Nuclear Materials* 2013; 438: 1–6.
- [22] Prasad S, Pankaj P, Jena CH. An Overview: Different Manufacturing Techniques used for Fabricating Functionally Graded Material. *Materials Today: Proceedings* 2019; 18: 2942-2951.
- [23] Heuer S, Matějčík J, Vilémová M, Koller M, Illkova K, Veverka J, Weber Th, Pintsuk G, Coenen JW, Linsmeier Ch. Atmospheric plasma spraying of functionally graded steel/tungsten layers for the first wall of future fusion reactors. *Surface and Coatings Technology* 2019; 366: 170-178.
- [24] El Galy IM, Saleh BI, Ahmed MH. Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences* 2019; 1:1378; <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1413-4>.
- [25] Chong FL, Chen JL, Li JG. Evaluation of tungsten coatings on CuCrZr and W/Cu FGM under high heat flux and HT-7 limiter plasma irradiation. *Journal of Nuclear Materials* 2007; 363–365: 1201–1205.
- [26] Montanari R, Fava A, Barbieri G. *Experimental Techniques to Investigate Residual Stress in Joints* 2018: 16-18, IntechOpen.
- [27] JCPDS-International Centre for Diffraction Data, Newtown Square, PA 19073, USA.
- [28] Kaciulis S, Mezzi A, Montanari R, Ucciardello N, Volterri R. HT-XRD Analysis of W Thick Coatings for Nuclear Fusion Technology. *Surf. Interface Anal.* 2010; 42/6-7: 1197-1200.
- [29] Costanza G, Donnini R, Kaciulis S, Maddaluno G, Montanari R. HT-XRD analysis of W thick coatings for nuclear fusion technology. *Key Engineering Materials* 2014; 605: 31-34.
- [30] Riccardi B, Montanari R, Casadei M, Costanza G, Filacchioni G, Moriani A. Optimisation and characterisation of tungsten thick coatings on copper based alloy substrates. *J. of Nuclear Materials* 2006; 352: 29.

Study of residual stresses through X-ray diffraction of a W/Cu *interlayer* deposited by plasma spraying

Tungsten is considered an excellent material for the realisation of components protecting the plasma facing materials in nuclear fusion reactors. In this work, the CuCrZr - W / Cu - W system is studied in order to evaluate the efficiency of the *interlayer* consisting in a functional graded material (FGM), obtained by plasma spraying (PS). Residual stresses are measured using X-ray diffraction technique (XRD). The coating and *interlayer* exhibit excellent adhesion without the presence of interfaces and cracks. The results show that the use of an FGM *interlayer* allows to improve the quality of the joint decreasing the accumulation of residual stresses of the coating and substrate.

KEYWORDS: NUCLEAR FUSION REACTORS, TUNGSTEN, PLASMA SPRAYING, RESIDUAL STRESSES, FGM, X-RAY DIFFRACTION