

# Risposta al trattamento termomeccanico dell'acciaio EUROFER97: microstruttura e proprietà meccaniche

G. Stornelli, A. di Schino, D. Croccolo, G. Olmi, R. Montanari, A. Varone, C. Testani

L'acciaio EUROFER97 è l'acciaio di riferimento Europeo per la realizzazione di parti strutturali nei futuri reattori a fusione nucleare. In questo lavoro è stata condotta un'estesa campagna sperimentale con lo scopo di migliorare la resistenza senza ridurre la duttilità. L'idea alla base del presente studio è quella di raggiungere l'obiettivo attraverso l'affinamento del grano, mediante laminazione a freddo e successivo trattamento di ricottura. La sperimentazione ha previsto la combinazione di cinque rapporti di riduzione a freddo (CR) (20%, 40%, 50%, 60% e 80%) e otto temperature di trattamento termico da 400 °C a 750 °C, per 1 ora. I risultati hanno mostrato che con CR: 80% e temperatura di 650 °C, si ottiene una struttura completamente ricristallizzata con grani sub-micrometrici (dimensione media dei grani  $600 \pm 60$  nm). Tale microstruttura garantisce un incremento del limite di snervamento e del carico massimo, rispettivamente del 18% e del 5 %, e un allungamento uniforme doppio rispetto a quello dell'acciaio EUROFER97 standard. Per quanto riguarda il comportamento a fatica i test di fatica ad alto numero di cicli indicano caratteristiche simili.

**PAROLE CHIAVE:** ACCIAIO EUROFER97, TRATTAMENTI TERMO-MECCANICI, RICRISTALLIZZAZIONE, MICROSTRUTTURA, PROVE MECCANICHE;

## INTRODUZIONE

EUROFER97 è l'acciaio di riferimento per la realizzazione di parti strutturali nel futuro reattore a fusione nucleare DEMO e nei reattori a fissione di IV generazione [1,2]. La composizione chimica di questo acciaio è stata sviluppata per garantire una ridotta attivazione da irraggiamento neutronico. In particolare, alcuni elementi chimici, tipici degli acciai commerciali ferritici-martensitici contenenti Cr e Mo, sono stati sostituiti con elementi chimici metallurgicamente equivalenti e caratterizzati da ridotti tempi di decadimento radioattivo [3]. L'acciaio EUROFER97 viene prodotto mediante una fusione a induzione a vuoto (VIM) seguita da una rifusione in vuoto (VIR). Viene quindi colato un lingotto, omogeneizzato mediante forgiatura e, in seguito, laminato a caldo a partire da 1250 °C. Infine, il laminato segue 3 passaggi di trattamento termico: austenitizzazione a 980 °C per 30 minuti, tempra in aria e rinvenimento a 760 °C per 90 minuti [4]. Alla fine di tale processo la microstruttura è quella tipica di una martensite rinvenuta. L'acciaio mostra una buona saldabilità ed eccellenti proprietà meccaniche alle alte temperature [5]. Tuttavia, in seguito ad irraggiamento neutronico l'acciaio

**Giulia Stornelli, Andrea di Schino**

Department of Engineering, University of Perugia, Perugia, Italy

**Dario Croccolo, Giorgio Olmi**

Department of Industrial Engineering (DIN), University of Bologna, Bologna, Italy

**Roberto Montanari, Alessandra Varone**

Department of Industrial Engineering, University of Rome "Tor Vergata", Rome, Italy

**Claudio Testani**

CALEF-ENEA CR-Casaccia, S. Maria di Galeria, Rome, Italy

EUROFER97 ha buone prestazioni meccaniche solo in un intervallo limitato di temperatura (350 – 550 °C) [6] e, numerosi sono gli studi scientifici condotti per ampliare tale finestra operativa. Per incrementare il limite superiore di temperatura operativo fino a circa 650 °C, una possibile soluzione è quella di utilizzare una versione dell'acciaio EUROFER97 di tipo ODS, rafforzato mediante alligazione meccanica di ossidi di Y (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) di dimensioni nanometriche, con la funzione di inibire la crescita del grano e lo scorrimento a bordo grano alle alte temperature [5]. Riguardo al limite operativo inferiore a 350 °C, questo è principalmente connesso alla perdita di duttilità indotta dai difetti reticolari prodotti dall'irraggiamento neutronico. Si assiste ad una perdita di tenacità e allo spostamento della temperatura di transizione duttile fragile verso temperature maggiori di quella ambiente [7]. Per quanto riguarda il comportamento a fatica a basso numero di cicli (LCF) questo è stato ampiamente studiato fino alla temperatura di 550 °C [8, 9], valutando anche l'effetto di diversi cicli di carico. Petersen et al. [10] hanno studiato anche l'effetto dell'irraggiamento sulla resistenza meccanica statica e a fatica a basso numero di cicli. La sperimentazione è stata condotta con flusso di neutroni veloci di  $1.8 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s, temperatura < 340 °C, 15 e 30 dpa, evidenziando che, con l'aumento del danno da irraggiamento (dpa), si assiste ad una drastica riduzione dell'allungamento uniforme sotto carichi statici. Analogamente, si ha una riduzione dell'allungamento totale a fatica. L'allungamento totale a fatica raggiunge valori inferiori all'1% con un aumento del numero di cicli fino alla rottura, proprio a causa della perdita di duttilità causata dall'irraggiamento.

Per ottimizzare la resistenza dell'acciaio EUROFER97 a T < 350 °C, una possibile strategia è quella di tendere all'ottenimento di un grano ultra-fine. In genere, un affinamento del grano incrementa la resistenza meccanica e migliora la resistenza all'irraggiamento ma induce una riduzione della duttilità a causa dell'aumento della densità di dislocazioni. In letteratura, sono stati condotti numerosi studi che sperimentano diversi metodi di affinamento della

microstruttura dell'acciaio EUROFER97 [11-14] che mostrano effetti benefici sulla resistenza all'irraggiamento. A tal proposito, lo scopo di questo lavoro è stato quello di sviluppare un trattamento termo-meccanico, aggiuntivo a quello tradizionale, per affinare la microstruttura e rafforzare il materiale, senza perdere in duttilità.

## MATERIALI E METODI

La composizione chimica nominale dell'acciaio EUROFER97-3, oggetto di questo lavoro, è 9Cr-1W-0,07Ta-0,2V-0,11C-0,4Mn (wt.%) [4]. Una lamiera di acciaio EUROFER97 tradizionale (spessore 14 mm) è stato laminato a freddo e trattato termicamente combinando cinque rapporti di riduzione a freddo (CR) (20%, 40%, 50%, 60%, 80%) e otto trattamenti termici a diverse temperature (in campo ferritico [15]) nell'intervallo 400-750 °C (incrementi di 50 °C) per 1 ora. Sui campioni così trattati sono state condotte analisi microstrutturali mediante microscopia elettronica a scansione ad alta risoluzione (FE-SEM-Zeiss, Gemini Supra 25, Jena, Germania) dotata di un rilevatore EBSD (C Nano Oxford Instruments), con passo di scansione di 0,02 μm e diffrazione dei raggi X (XRD-PW 1729, Philips, Eindhoven, Paesi Bassi). Le osservazioni al SEM sono state effettuate dopo lucidatura meccanica e attacco chimico mediante reagente Vilella. Un'analisi d'immagine per la determinazione della dimensione media del grano è stata eseguita sulle mappe EBSD utilizzando il software dedicato AlexaSoft X-Plus.

Gli spettri XRD sono stati ottenuti utilizzando la radiazione Mo-Kα (λ= 0.070926 nm) nell'intervallo angolare 2θ 10° - 60° (profilo di precisione con passo di scansione 0.005° e tempo di conteggio per passo di 5 s). Per tutti i picchi è stata ricavata la larghezza a metà altezza (β<sub>T</sub>) che può essere descritta come la somma di due contributi, β<sub>D</sub> dovuto alla dimensione dei domini coerenti di diffrazione (D) e β<sub>ε</sub> dovuto alle micro-deformazioni (ε) dipendenti principalmente dalle dislocazioni:

$$\beta_T = \beta_D + \beta_\varepsilon = \frac{0.89 \cdot \lambda}{D \cdot \cos \theta} + 2 \cdot \varepsilon \cdot \tan \theta \quad (1)$$

dove  $\theta$  è l'angolo di Bragg. I due contributi,  $\beta_D$  and  $\beta_\epsilon$ , sono stati valutati mediante la procedura di Cauchy [16].

$$\rho = \frac{\Xi \cdot \epsilon^2}{F \cdot b^2} \quad (2)$$

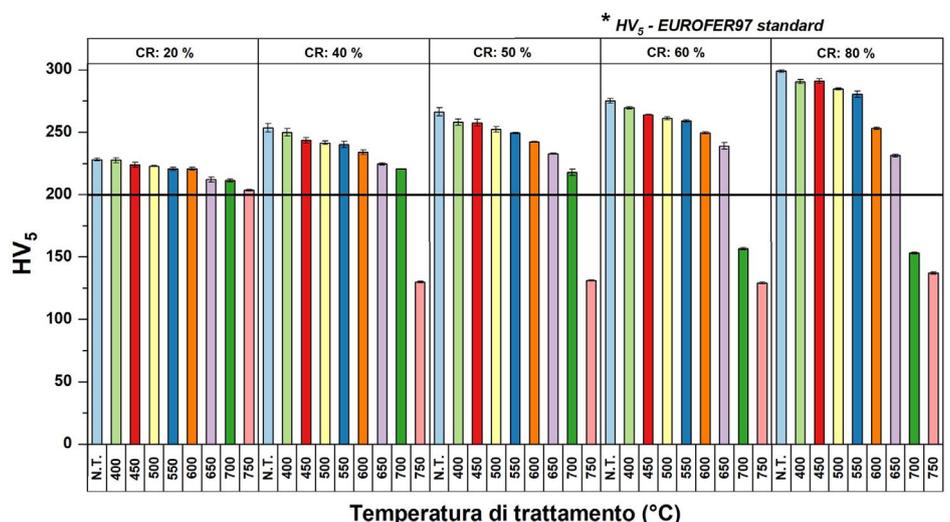
dove  $\Xi = 16.1$ ,  $F \approx 1$  e  $b = 0.248$  nm il modulo del vettore di Burgers.

Le proprietà meccaniche sono state studiate mediante prove di durezza Vickers (carico di 5 kg) e, in casi selezionati, mediante prove di trazione e di fatica ad alto numero di cicli. Le prove di trazione e fatica sono state eseguite su provini piatti, estratti lungo la direzione trasversale alla laminazione. Le prove di trazione sono state condotte in accordo con la norma ASTM E8 utilizzando una macchina di trazione servomeccanica (MD 100, MAYES). Le prove di fatica sono state eseguite mediante una macchina risonante (capacità di 20 kN, Rumul, Svizzera) in controllo di carico, sottoponendo il provino ad un ciclo in trazione, con un rapporto di sollecitazione  $R = 0.2$  e frequenza  $f = 113$  Hz. Il numero massimo di cicli di fatica (Run-out) è stato fissato a 107 cicli. Ulteriori dettagli sulla sperimentazione svolta sono riportati in [18].

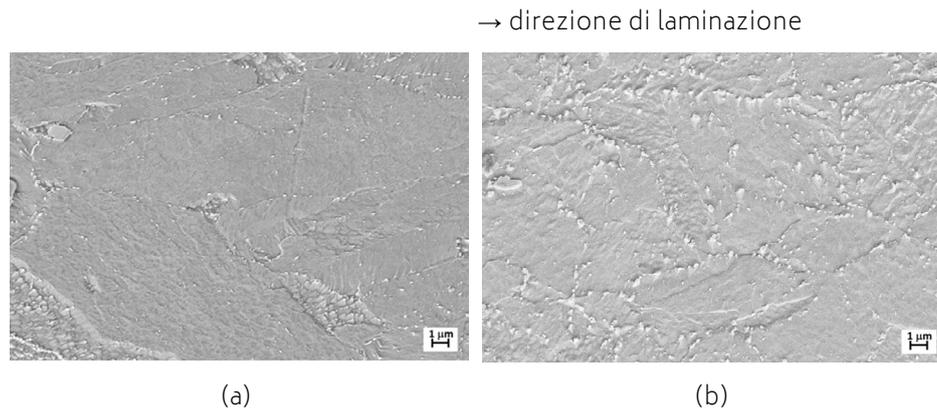
## RISULTATI E DISCUSSIONE

I valori di durezza dell'acciaio EUROFER97 dopo i trattamenti termo-meccanici sperimentati in questo lavoro sono riportati in Figura 1 e sono confrontati con il valore di durezza dell'acciaio EUROFER97 tradizionale ( $201.6 \pm 1.9$  HV [19]). Come mostrato nel grafico, la durezza è fun-

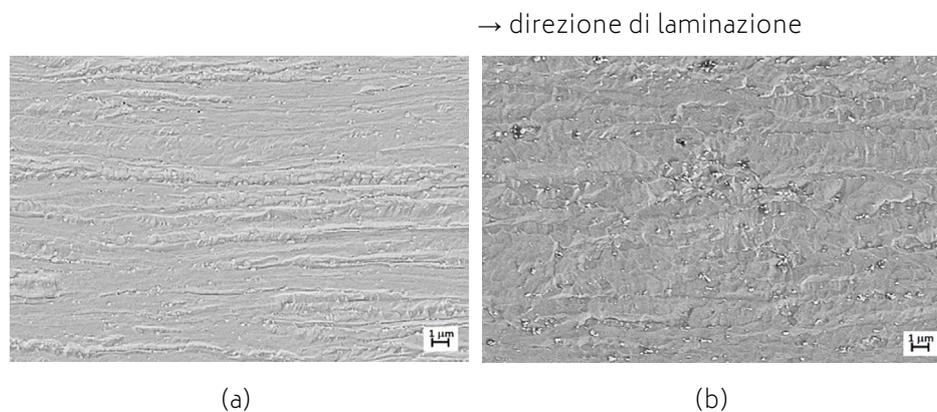
zione sia del tasso di laminazione CR sia della temperatura di trattamento termico. Dall'osservazione SEM della microstruttura dei campioni così trattati si riscontra che il trattamento termico porta a completa ricristallizzazione per tutti i tassi di laminazione. Le strutture allungate, tipiche del materiale incrudito, tendono progressivamente a riorganizzarsi in strutture con grani equiassici di dimensioni sub-micrometriche. A titolo di esempio, nelle Figure 2 e 3 sono messi a confronto, rispettivamente per i casi estremi CR: 20% e CR: 80%, le strutture del materiale incrudito e ricristallizzato. Per il tasso di laminazione del 20% la ricristallizzazione è completa alla più alta temperatura sperimentata (750 °C). Al contrario, per CR: 80%, si ha completa ricristallizzazione a circa 650 °C. La frazione dei grani ricristallizzati dipende dal trattamento termico ma è fortemente legata al tasso di incrudimento. Dall'analisi XRD la densità di dislocazioni  $\rho$  aumenta all'aumentare del tasso di riduzione a freddo e, per l'80% di deformazione è circa due ordini di grandezza maggiore rispetto a materiale standard passando da  $7.2 \times 10^{10}$  cm<sup>-2</sup> a circa  $1.2 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>. Questo, a seguito del trattamento termico, comporta una diversa evoluzione microstrutturale e di conseguenza diverse proprietà meccaniche.



**Fig.1** - Effetto del trattamento termo-meccanico sulla durezza dell'acciaio EUROFER97 / Effect of thermo-mechanical treatment on the hardness of EUROFER97 steel.



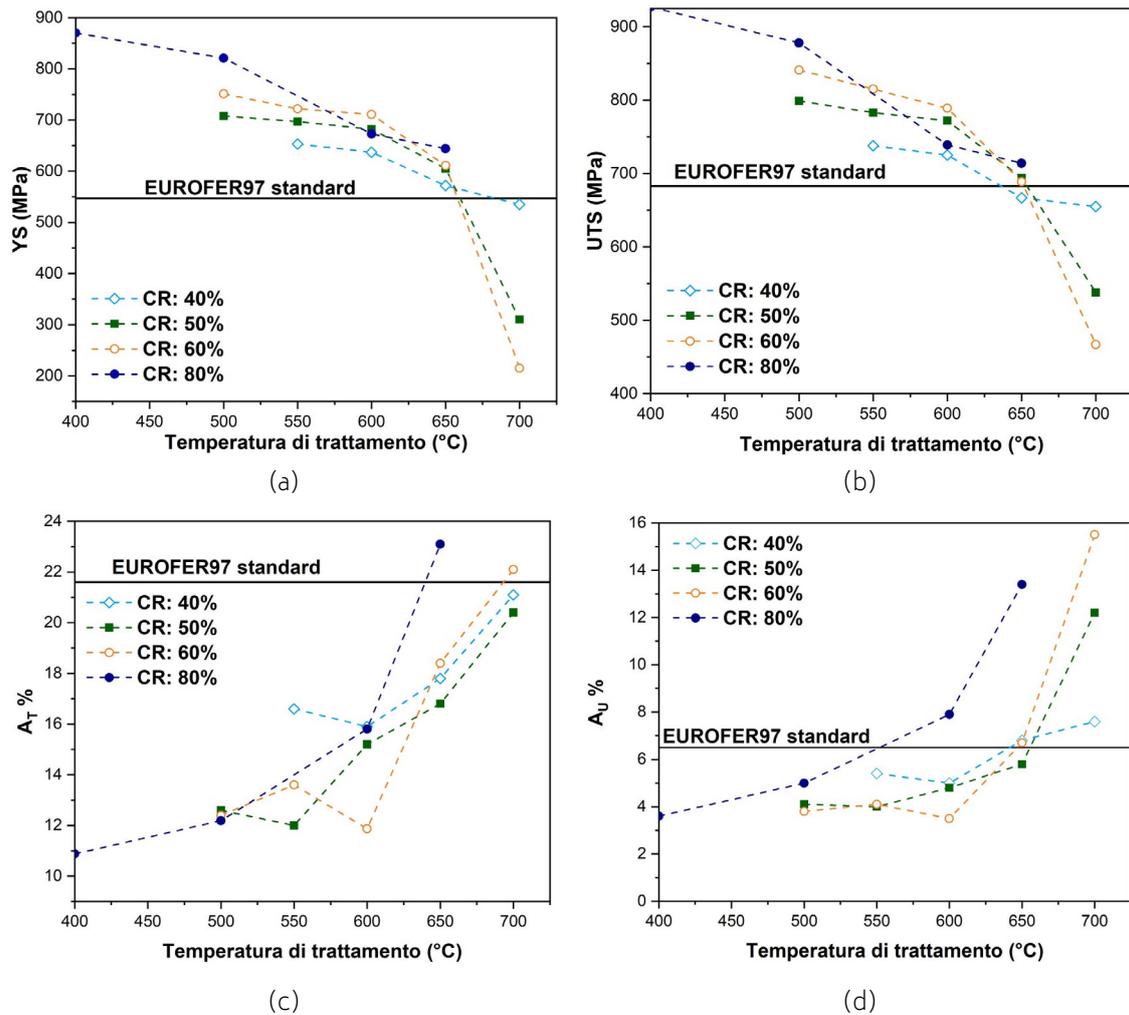
**Fig.2** - Micrografie SEM dell'acciaio EUROFER97 laminato a freddo con CR: 20% allo stato incrudito (a) e trattato termicamente a 750 °C per 1 ora / SEM micrographs of cold-rolled EUROFER97 steel with CR: 20% in the work-hardened state (a) and heat treated at 750 °C for 1 hour



**Fig.3** - Micrografie SEM dell'acciaio EUROFER97 laminato a freddo con CR: 80% allo stato incrudito (a) e trattato termicamente a 650 °C per 1 ora / SEM micrographs of cold-rolled EUROFER97 steel with CR: 80% in the work-hardened state (a) and heat treated at 650 °C for 1 hour

Sulla base dei risultati delle prove di durezza, i campioni con le migliori prestazioni meccaniche sono stati sottoposti a prove di trazione, e i risultati, in termini di resistenza allo snervamento (YS), carico massimo (UTS), allungamento uniforme ( $A_U$  – in corrispondenza del carico massimo UTS) e allungamento totale ( $A_T$  – in corrispondenza del carico di rottura), sono riportati in Figura 4, e confrontati con l'acciaio EUROFER97 standard [20, 21]. Dopo trattamento termico a 600 °C, i valori di YS e UTS sono tutti molto alti rispetto a quelli dell'EUROFER97 standard, tuttavia, a tale rafforzamento corrisponde una consistente perdita di duttilità. Un reale miglioramento della duttilità, unito al rafforzamento del materiale, è visibile solo per il campione sottoposto ad un tasso di laminazione dell'80% e temperatura di trattamento a 650 °C per 1 ora. A tale condizione di trattamento termo-mec-

canico corrisponde un incremento dei YS e UTS rispettivamente del 18% e 5%.  $A_T$  è paragonabile (23%) rispetto all'EUROFER97 standard mentre l'aspetto più rilevante è che  $A_U$  è più che doppio (13.4% vs. 6.5%).



**Fig. 4** - YS (a), UTS (b), A<sub>T</sub>% (c) e A<sub>U</sub>% (d) di alcuni campioni di acciaio EUROFER97 sottoposti a trattamento termo-meccanico / YS (a), UTS (b), A<sub>T</sub>% (c) and A<sub>U</sub>% (d) of some EUROFER97 steel samples subjected to thermo-mechanical treatment.

L'analisi microstrutturale del campione ottimizzato (CR: 80%, 650 °C) rivela che la combinazione migliore tra rafforzamento e duttilità corrisponde ad un materiale completamente ricristallizzato con grani equassici di dimensioni sub-micrometriche (dimensione media del grano  $600 \pm 60$  nm) (Figura 5a). Tale temperatura rappresenta una soglia di trattamento, infatti, per temperature più alte (700 e 750 °C) la microstruttura risulta essere fortemente disomogenea con dimensione dei grani su diverse scale, micrometrica e sub-micrometrica. Il campione a 750 °C presenta una dimensione media del grano maggiore di 1 micron, con alcuni grani che superano i 15 micron (Figura 5b). Tale risultato è in accordo con quanto osservato in [14]. La combinazione tra l'intrinseca mobilità dei bordi grano e la presenza di instabilità microstrutturali locali (dislocazioni e coalescenza dei precipitati  $M_{23}C_6$ ) favorisce

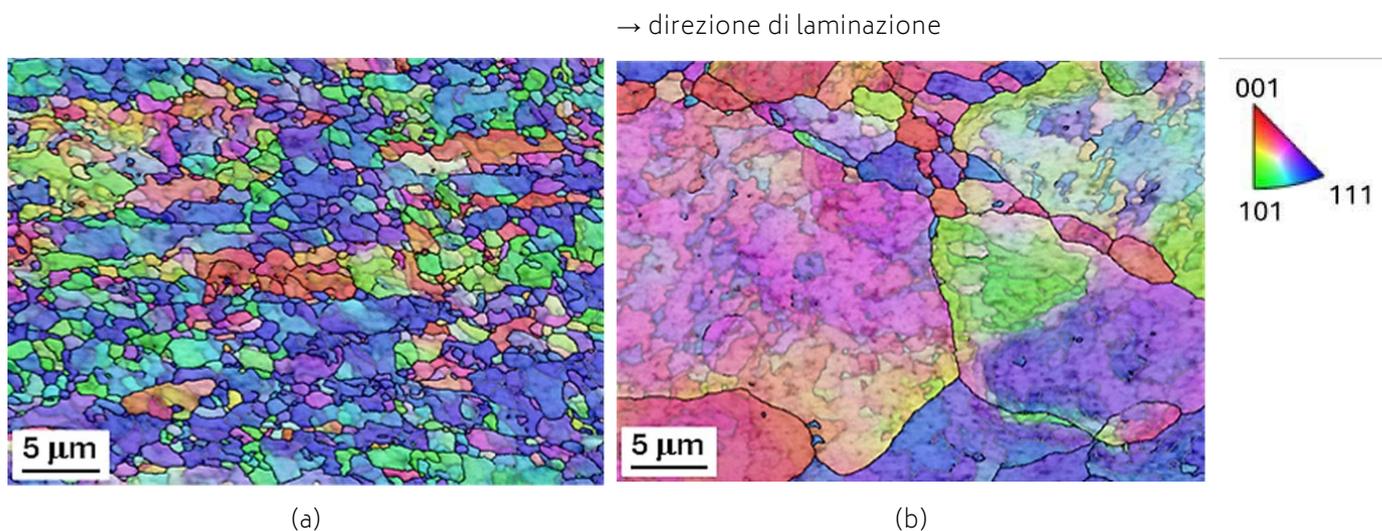
entrambi i fenomeni di crescita normale e abnorme del grano.

I risultati delle prove di fatica ad alto numero di cicli sono riportati in Tabella 1.

Come descritto in un precedente lavoro [18], il modello lineare è il più adeguato a riprodurre la distribuzione di dati così ottenuti. In genere, i dati di letteratura disponibili per l'acciaio EUROFER97 tradizionale fanno riferimento alla resistenza a fatica sotto carico simmetrico alternato [8, 9]. Inoltre, per confrontare il comportamento dinamico-meccanico dell'acciaio tradizionale con quello proposto in questo lavoro, è necessaria una conversione utilizzando lo strumento del diagramma di Haigh e l'applicazione della relazione della retta di Goodman [18]. Dal confronto delle curve così modificate è emerso che i valori di resistenza a fatica sono molto vicini, con una dif-

ferenza massima dell'ordine del 5% (350 MPa a  $10^5$  cicli per EUROFER97 tradizionale e 335 MPa alla stessa durata dopo CR:80 % e 650 °C). Pertanto, si può concludere che il trattamento termo-meccanico proposto in questo lavo-

ro porta a miglioramenti significativi dal punto di vista del comportamento meccanico statico di EUROFER97, con elevata duttilità e carico di snervamento, e non peggiora la risposta a fatica.



**Fig.5** - Mappe EBSD di EUROFER97 deformato con CR dell'80% e trattato termicamente per 1 ora a 650 °C (a) e 750 °C (b) / EBSD maps of EUROFER97 after 80% deformation heat treatment for 1 hour at 650 °C (a) and 750 °C (b)

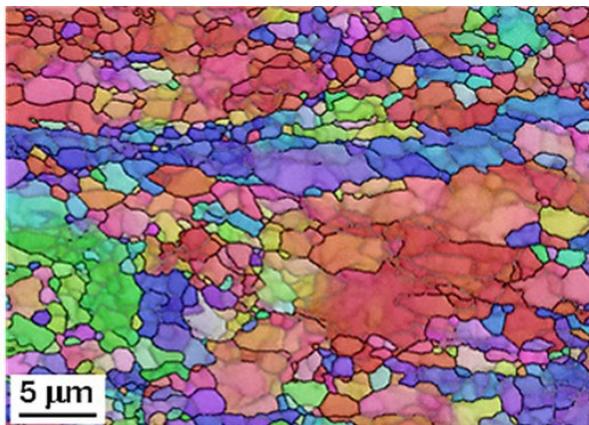
**Tab.2** - Trattamenti eseguiti sui campioni e relativi codici.

ID	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	Numero di cicli	Vita osservata
1	422	84	338	472.000	Rottura
2	366	73	293	$10^7$	Run-out
3	449	90	359	224.000	Rottura
4	440	88	352	176.200	Rottura
5	400	80	320	2.082.200	Rottura
6	380	76	304	$10^7$	Run-out
7	480	96	384	70.400	Rottura
8	460	92	364	558.500	Rottura
9	480	96	384	165.300	Rottura
10	480	96	384	237.900	Rottura
11	460	92	368	89.900	Rottura
12	400	80	320	$10^7$	Run-out
13	500	100	400	48.800	Rottura
14	422	84	338	$10^7$	Run-out

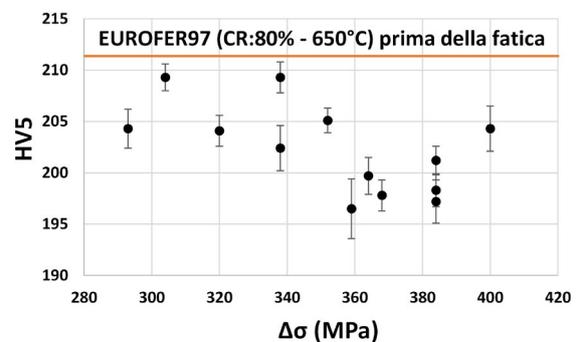
Per ottenere maggiori informazioni sull'evoluzione del grano in seguito alle prove di fatica dei campioni laminati con CR:80% e trattati a 650 °C, sono state condotte delle analisi EBSD esaminando le zone prossime alla frattura. Ad esempio, la Figura 6a mostra la mappa EBSD del campione #13. Dopo la prova di fatica, la dimensione media del grano è maggiore ( $873 \pm 53$  nm) rispetto al campione prima della prova ( $600 \pm 60$  nm) e si verificano alcuni cambiamenti di struttura. Inoltre, dalle analisi delle mappe EBSD la frazione relativa di bordi grano a basso angolo (LAGB) diminuisce da  $0.45 \pm 0.01$  (materiale originale) a  $0.36 \pm 0.05$ . Dunque, l'EBSD mostra principalmente che i LAGB diventano instabili per effetto del carico ciclico nelle prove di fatica. A tale evoluzione microstrutturale corrisponde una variazione della durezza (Figura 6 b). In Figura 6b i valori di durezza misurati nei campioni dopo la prova di fatica sono riportati in funzione di  $\Delta\sigma$ : anche se si osserva una certa dispersione dei dati, la durezza tende a diminuire all'aumentare di  $\Delta\sigma$ . Inoltre, dal confronto con i valori di durezza del campione non sottoposto a sol-

lecitazione di fatica, si osserva una variazione di durezza fino all'8%. I valori di durezza riportati in Figura 6b sono stati rilevati in prossimità della zona di frattura. I bordi di grano, in particolare i LAGB, possono migrare a causa del movimento collettivo delle dislocazioni indotto dalla sollecitazione applicata durante le prove di fatica. In letteratura è stato riportato solo un caso di crescita del grano in seguito a sollecitazione di fatica a temperatura ambiente nella lega di Al 7075 [22]. Pertanto, il fenomeno osservato nel presente lavoro rappresenta una novità di grande interesse; indagare e valutare quantitativamente la stabilità microstrutturale di questo acciaio è di notevole importanza per le applicazioni nucleari. Nel lavoro si osserva che la struttura ultrafine dell'acciaio EUROFER97 tende ad evolvere a seguito di sollecitazione ciclica mentre il problema più generale della stabilità microstrutturale dell'acciaio riguarda soprattutto la possibile evoluzione in temperatura (ad esempio durante l'impiego) e in una condizione di grano verosimilmente non ultrafine.

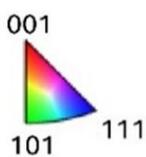
→ direzione di laminazione



(a)



(b)



**Fig.6** - Campione #13: mappa EBSD (a), durezza dei campioni sottoposti a prove di fatica rispetto a  $\Delta\sigma$  / Sample #13: EBSD map (a), hardness of samples submitted to fatigue tests vs.  $\Delta\sigma$  (b).

**CONCLUSIONI**

Questo lavoro ha indagato l'evoluzione microstrutturale e delle proprietà meccaniche dell'acciaio EUROFER97 dopo trattamento termo-meccanico innovativo, con l'obiettivo di migliorare la resistenza meccanica mediante un affinamento della microstruttura, senza introdurre effetti dannosi alla duttilità. A partire dall'acciaio EUROFER97 standard, sono stati ottenuti un gruppo di 40 campioni, combinando diverse condizioni di laminazione a freddo (tassi di laminazione CR: 20, 40, 50, 60 e 80 %) e otto diverse temperature di trattamento di ricottura (da 400 a 750 °C per 1 ora). I principali risultati possono essere riassunti come segue:

- La ricristallizzazione avviene in tutti i campioni laminati a freddo e trattati termicamente, con cinetiche dipendenti sia dalla temperatura di trattamento sia dal tasso di incrudimento.
- Il trattamento termo-meccanico corrispondente a CR dell'80 % e trattamento termico a 650 °C dà origine ad

una microstruttura completamente ricristallizzata con una popolazione di grani equiassici di dimensioni sub-micrometriche ( $600 \pm 60$  nm). Tale condizione porta ad un incremento di YS e UTS (rispettivamente del 18 % e 5 %) rispetto all'acciaio EUROFER97 standard e ad un AT pressoché invariato (23%). Tuttavia, di rilevante interesse è l'incremento dell'allungamento uniforme di oltre il doppio (13.4 % vs. 6.5 %).

- La resistenza a fatica dell'acciaio sottoposto al nuovo trattamento termomeccanico è paragonabile a quello dell'acciaio EUROFER97 standard.

- I campioni sottoposti a fatica subiscono un aumento della dimensione media dei grani, da attribuire all'intrinseca instabilità dei LAGB durante la sollecitazione di fatica. Il collasso di alcuni confini porta alla riorganizzazione delle dislocazioni e alla coalescenza dei grani. A tale evoluzione microstrutturale corrisponde una variazione della durezza fino all'8%.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Chen X, Bhattacharya A, Sokolov MA, Clowers LN, Yamamoto Y, Graening T, Linton KD, Katoh Y, Rieth M. Mechanical properties and microstructure characterization of Eurofer97 steel variants in EUROfusion program. *Fusion Eng Des* 2019;146:2227-32
- [2] Stornelli G, Montanari R, Testani C, Pilloni L, Napoli G, Di Pietro O, Di Schino A. Microstructure refinement Effect on EUROFER 97 steel for nuclear fusion application. *Mater Sci Forum* 2021;1016:1392-7
- [3] Tavassoli AAF, Alamo A, Bedel L, Forest L, Gentzittel JM, Rensman JW, Diegele E, Lindau R, Schirra M, Schmitt R, et al. Materials design data for reduced activation martensitic steel type EUROFER. *J Nucl Mater* 2004;329-333:257-262
- [4] Rieth M, Schirra M, Falkenstein A, Graf P, Heger S, Kempe H, Lindau R, Zimmermann H. EUROFER 97 Tensile, Charpy, Creep and Structural Tests. Report FZKA6911, Eurofusion programme. 2003
- [5] Lindau R, Moslang A, Rieth M, Klimiankou M, Materna-Morris E, Alamo A, Tavassoli AAF, Cayron C, Lancha AM, Fernandez P, Baluc N, Schaublin R, Diegele E, Filacchioni G, Rensman JW, Shaaf BVD, Lucon E, Dietz W. Present development status of EUROFER and ODS-EUROFER for application in blanket concepts. *Fusion Eng Des* 2005;8:75-9
- [6] Coppola R, Klimenkov M. Dose dependence of micro-voids distributions in low-temperature neutron irradiated Eurofer97 steel. *Metals* 2019;9:1-12
- [7] Zinkle SJ, Möslang A. Evaluation of irradiation facility options for fusion materials research and development. *Fus Eng Des* 2013:472-482
- [8] Marmy P, Kruml T. Low cycle fatigue of Eurofer 97. *J Nucl Mater* 2008;377(1):52-8
- [9] Roldan M, Leon-Gutierrez E, Fernandez P, Gomez-Herrero A. Deformation behaviour and microstructural evolution of EUROFER97-2 under low cycle fatigue conditions. *Mater Charact* 2019;158:109943
- [10] Petersen C, Povstyanko A, Prokhorov V, Fedoseev A, Makarov O, Walter M. Tensile and low cycle fatigue properties of different ferritic/martensitic steels after the fast reactor irradiation. *J Nucl Mater* 2009;386-388:299-302
- [11] Cristalli C, Pilloni L, Tassa O, Bozzetto L. Mechanical properties of several newly produced RAFM steels with Tungsten content in the range of 2 wt%. *Nucl Mater Ener* 2020;25:100793
- [12] Pilloni L, Cristalli C, Tassa O, Salvatori I, Storai S. Grain size reduction strategies on Eurofer. *Nucl Mater Ener* 2018;17:129-136
- [13] Cristalli C, Tassa O, Bozzetto L, Pilloni L. Achievement of Ultrafine Grain structure by means of recrystallization treatments. *J Nucl Mater* 2022;568:153852
- [14] Oliveira VB, Sandim HRZ, Raabe D. Abnormal grain growth in Eurofer-97 steel in the ferrite phase field. *J Nucl Mater* 2017;485:23-38
- [15] Stornelli G, Di Schino A, Mancini S, Montanari R, Testani C, Varone A. Grain refinement and improved mechanical properties of eurofer97 by thermo-mechanical treatments. *Appl Scien* 2021;11:10598

- 16] Cullity BD. Elements of X-ray Diffraction, Second Edition. Addison-Wesley Publishing Company, INC. 1977
- 17] Williamson GK, Smallman RE. III. Dislocation densities in some annealed and cold-worked metals from measurements on the X-ray Debye-Scherrer spectrum. Philos Mag 1956;1:34-46
- 18] Crocchio D, Di Schino A, Montanari R, Olmi G, Stornelli G, Testani C, Varone A. High cycle fatigue response of grain refined EUROFER97. Int J Fatig 2024;108442
- 19] Schuring EW, Hofmans HE. Metallographic characterization of EUROFER97 plate and bar materials. Report ECN Library 2000
- 20] Qiu GX, Zhan DP, Cao L, Jiang ZH. Review on development of reduced activated ferritic/martensitic steel for fusion reactor. J Iron Steel Res Int 2022;29:1343 – 56
- 21] Lindau R, Moslang A, Rieth M, Klimiankou M, Materna-Morris E, Alamo A, et al. Present development status of EUROFER and ODS-EUROFER for application in blanket concepts. Fusion Eng Des 2005;75 – 79:989 – 96
- 22] Goswami R, Feng CR, Qadri SB, Pande CS. Fatigue-assisted grain growth in Al alloys. Nat Sci Rep 2017;7:10179

## Response to the thermomechanical treatment of EUROFER97 steel: microstructure and mechanical properties

EUROFER97 steel is the European reference steel to manufacture structural parts in future nuclear fusion reactors. In this work, an extensive experimental campaign was carried out aiming to improve strength without reducing ductility. The main idea behind the present study is to achieve such result through grain refinement obtained by cold rolling and heat treatment. The combination of five cold reduction (CR) ratios (20%, 40%, 50%, 60% and 80%) and eight heat treatment temperatures from 400°C to 750°C, for 1 hour, have been examined. The treatment consisting of CR = 80% and heating at 650 °C induces a fully recrystallized structure with sub-micrometric grains (average grain size  $600 \pm 60$  nm). This microstructure guarantees an increase of the yield stress and ultimate tensile strength of 18% and 5%, respectively, and a uniform elongation nearly double than that of standard EUROFER97 steel. Furthermore, the results obtained from high cycle fatigue tests evidenced a similar behavior.

**KEYWORDS:** EUROFER97 STEEL, THERMO-MECHANICAL TREATMENTS, RECRYSTALLIZATION, MICROSTRUCTURE, MECHANICAL TESTS;

[TORNA ALL'INDICE >](#)