

Criteri di scelta di materiali per impieghi tribologici nel reattore a fusione ITER

P. Buttol, L. Ceschini, C. Damiani, G. Palombarini

Memorie

La progettazione del reattore a fusione termonucleare ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) comporta notevoli problemi di scelta, prova e validazione dei materiali, destinati ad operare in condizioni gravose di esercizio. In questo ambito è stato avviato uno studio volto alla scelta di materiali per componenti del divertore sottoposti a strisciamento in condizioni severe di esercizio. L'attenzione è stata focalizzata su settori mobili, denominati cassette, che devono essere installati nella camera da vuoto ed estratti a intervalli di un anno per operazioni di manutenzione. E' prevista una loro movimentazione mediante muletti dotati di ruote, spinti a loro volta da un dispositivo a pignone-cremagliera, anche se è stata considerata l'eventualità che, a causa di un blocco dei muletti, le cassette debbano essere spostate per strisciamento su appositi pattini. Vengono illustrati i criteri adottati per la scelta di materiali candidati alla realizzazione della coppia pattino-rotai e i risultati preliminari di prove di attrito su alcuni materiali selezionati.

INTRODUZIONE

Nella progettazione di reattori nucleari di potenza, la scelta dei materiali è fortemente condizionata dalla 'fisica' del sistema. Per i componenti a contatto sotto carico e in moto relativo, grosse restrizioni vengono imposte ad esempio all'uso di lubrificanti, o di additivi per gli stessi. Nel caso di impianti nucleari tradizionali è usuale classificare i componenti per impieghi tribologici in due categorie:

- componenti permanenti, che devono durare per l'intera vita in esercizio del reattore, quali ad esempio giunti di dilatazione termica di caldaie e parti dell'isolamento termico, sottoposti ad usura per strisciamento;
- componenti 'tradizionali', quali ad esempio le parti di accoppiamenti necessari al funzionamento di organi di trasmissione, il cui cedimento non comporta la fermata dell'impianto.

Elementi di progettazione di entrambi i tipi di componenti sono presenti nella letteratura tecnica [1]. Viene tuttavia generalmente sottolineata la mancanza di codici di progettazione adeguati, che tengano conto delle condizioni ambientali caratteristiche dei reattori nucleari. Inoltre, le conoscenze sui processi di usura di componenti non lubrificati sono ancora insufficienti per contribuire efficacemente ad una progettazione standardizzata.

In questo lavoro sono presentati i principali risultati di uno studio sulla scelta di materiali per la realizzazione di componenti tribologici da utilizzare per il divertore di ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Vengono inoltre illustrate le modalità di prova in laboratorio di alcuni dei materiali selezionati ed i primi risultati della sperimentazione.

IL PROGETTO ITER

Il progetto internazionale ITER, avviato nel 1985 con la partecipazione di Europa, USA, Giappone e Russia, si propone di dimostrare la fattibilità di reattori commerciali di tipo tokamak [2]. ITER è un tokamak di grandi dimensioni, con una potenza nominale di fusione di circa 1000 MW, considerevolmente superiore a quella finora ottenuta con reattori dello stesso tipo [3]. La sua progettazione comporta notevoli problemi di scelta dei materiali. In particolare, la selezione presentata in questo lavoro è indirizzata ad una zona del reattore, denominata divertore (fig. 1 [3]). Questo ha lo scopo di controllare la purezza del plasma, inquinato dai prodotti di reazione e da eventuali contatti tra plasma e pareti, separando le impurezze e facendole defluire verso una zona in cui le particelle vengono raffreddate, neutralizzate ed inviate a un successivo stadio di purificazione. Il divertore risulta costituito da un insieme di 60 settori mobili in acciaio AISI 316L, denominati cassette (del peso di circa 20 t), posti toroidalmente al di sotto della zona di fusione e all'interno della camera da vuoto [4, 5]. Le operazioni di manutenzione comportano una movimentazione periodica (1 volta/anno circa), durante la quale le cassette vengono estratte e inserite nuovamente nella camera da vuoto con muletti su ruote, lungo rotaie toroidali (fig. 2). A loro volta, i muletti sono azionati da meccanismi del tipo pignone-cremagliera, anche questa di forma toroidale. Si assume inoltre che, in condizioni di emergenza, le cassette debbano essere estratte dal 'vessel' per strisciamento, lungo rotaie toroidali diverse da quelle destinate alle ruote dei muletti, e che gli stessi muletti, nel caso di blocco delle ruote all'interno del reattore, debbano essere spostati per strisciamento. Quest'ultima condizione, com'è ovvio, comporta forti aumenti dei valori dei carichi da applicare e, in misura corrispondente, delle dimensioni degli ingranaggi e dei motori.

Le coppie tribologiche di interesse nella movimentazione delle cassette del divertore sono riportate in tab.I; nel presente lavoro si è focalizzata l'attenzione sull'accoppiamento pattino/rotaia. La soluzione dovrà tener conto delle caratteristiche richieste ai materiali e dei requisiti operativi di ITER. I materiali selezionati e il tipo di lubrificazione adottata dovranno essere caratterizzati da valori sufficientemente bassi del coefficiente di attrito, da proprietà antiadesive, da buona resistenza meccanica anche alla temperatura massima di esercizio (300-350 °C), da amagnetività. Dovranno inoltre

P. Buttol,
ENEA, Centro Ricerche Clementel, Bologna

L. Ceschini, G. Palombarini,
Istituto di Metallurgia, Università di Bologna

C. Damiani,
ENEA, Centro Ricerche Brasimone, Camugnano, Bologna

Memoria presentata il 3 giugno 1999.

2/2000

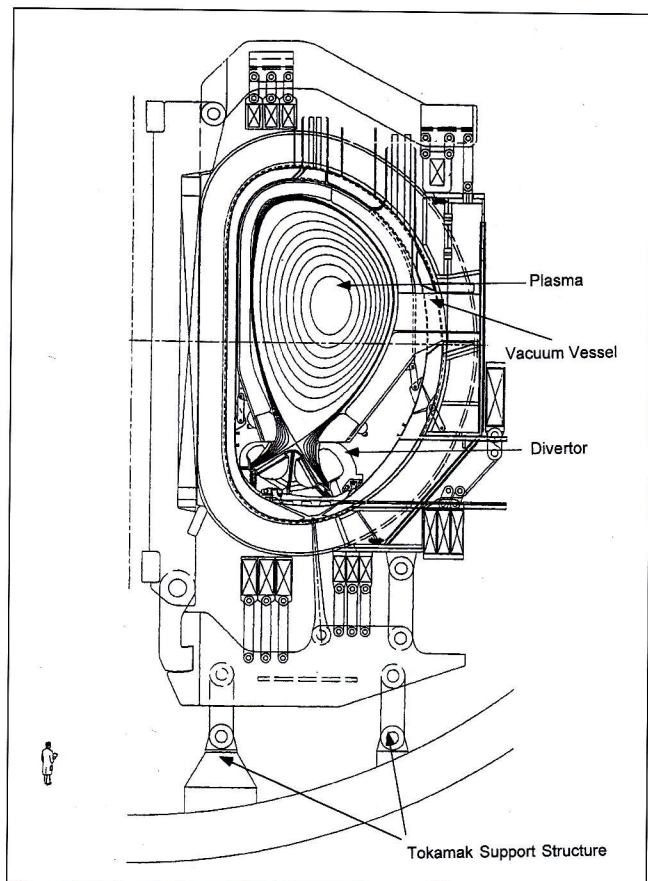


Fig. 1 - Sezione verticale di ITER.

Fig. 1 - Vertical cross-section of ITER.

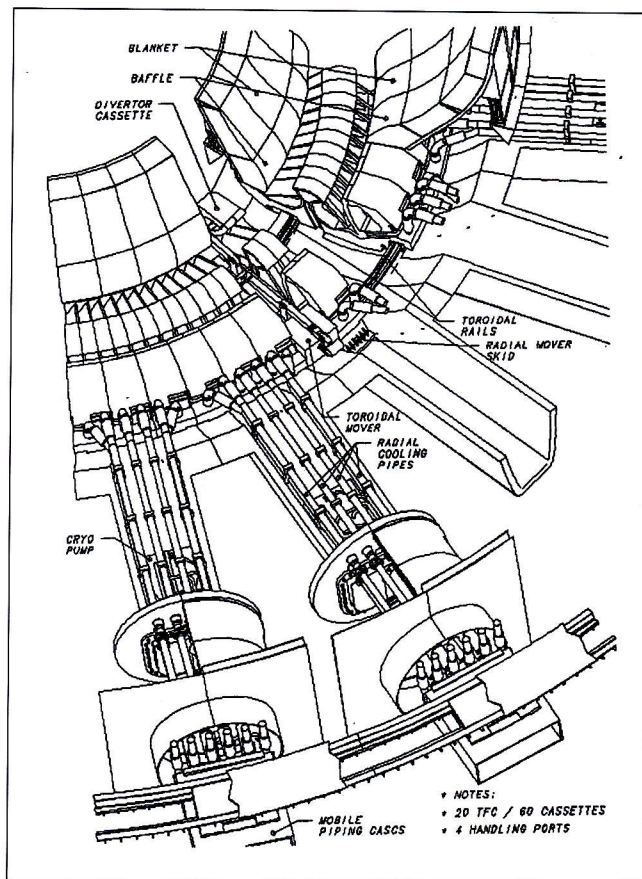


Fig. 2 - Schema della regione del Divertore.

Fig. 2 - Divertor region lay-out.

Coppia N.	Componente N. 1	Componente N. 2	Moto relativo	Geometria
1	ruota muletto	rotaia	rotolamento	cilindro-su-piano
2	ruota muletto	rotaia	strisciamento	cilindro-su-piano
3	pattino cassetta	rotaia	strisciamento	piano-su-piano
4	pignone	cremagliera	rotostrisciamento	dente-sudente

Tab I - Coppie di interesse tribologico nella progettazione del divertore di ITER.

Table I - Tribological couples involved in the ITER divertor design.

Pressione di contatto (tra pattino della cassetta e rotaia)	.2 MPa
Transitori di pressione (tra pattino e rotaia)	.30 MPa
Temperatura di lavoro	.150-200 °C
Temperatura di bake-out (operazione di degasaggio della camera da vuoto)	.300-350 °C
Pressione (deuterio / trizio / elio)	.UHV (10^{-8} mbar)
Irraggiamento ($n + \gamma$)	. $4 \cdot 10^4$ MRad / anno
Flusso termico (verso pattini e rotaie)	.fino a $5 \cdot 10^2$ kW / m ³
Transitori di densità di corrente elettrica	.1 MA / m ²
Tempo di permanenza (tra 2 operazioni di manutenzione)	.1 anno

Tab II - Condizioni di lavoro delle cassette a regime.

Table II - Operating conditions of the cassettes.

Geometria	piano-su-piano
Pressione di contatto (tra pattino della cassetta e rotaia)	.2 MPa
Velocità di strisciamento	.2-10 mm / s
Ambiente	azoto secco a P atmosferica
Temperatura	ambiente
Irraggiamento (γ)	. $3 \cdot 10^6$ Rad / h
Flusso termico (verso pattini e rotaie)	trascurabile
Densità di corrente elettrica	trascurabile

Tab III - Condizioni di lavoro delle cassette durante le operazioni di manutenzione.

Table III - Maintenance conditions of the cassettes.

essere compatibili con le condizioni all'interno del reattore (tab.II e tab.III) sia nelle fasi di esercizio (radiazioni, elevato grado di vuoto, campi magnetici, temperature elevate) sia in quelle di manutenzione (atmosfera di azoto secco).

SCELTA DEI MATERIALI

Materiali per i pattini

Requisito fondamentale è la resistenza di attrito allo strisciamento, che deve essere la più bassa possibile al fine di minimizzare gli sforzi necessari a muovere le cassette. Particolare importanza assumono i valori del coefficiente di attrito al distacco; infatti, i lunghi tempi di permanenza nel 'vessel' tra le fasi di manutenzione e le condizioni di lavoro a regime (tab.III), favoriscono eventuali processi di adesione tra i materiali a contatto. Occorre quindi considerare anzitutto contatti lubrificati. D'altra parte, le specifiche di progetto portano ad escludere l'impiego di lubrificanti comuni (oli, grassi), come pure di prodotti caratterizzati da una notevole tensione di vapore (polimeri), anche se applicati in piccole quantità (film sottili). Pertanto, le possibilità di lubrificazione sono legate esclusivamente all'impiego di solidi.

In un precedente studio sui materiali per i pattini [6], questo problema è stato affrontato selezionando materiali compositi contenenti particelle di lubrificante solido (MoS₂, WS₂, NbSe₂). Il composito costituisce una riserva di lubrificante solido che si spalma sulle superfici a contatto nel corso dello strisciamento, producendo tuttavia un film di spessore disuniforme e scarsamente aderente.

Una tecnica alternativa è costituita dalla deposizione di film sottili su uno o entrambi i componenti, come risulta dalle esperienze di impiego di lubrificanti solidi nella tecnologia spaziale. Con tale tecnica è possibile ottenere mono- o multistrati di spessore uniforme e bene aderenti al sostrato [7]. Una limitazione all'uso può tuttavia derivare dalla durata in esercizio del film sottile.

Pertanto una combinazione delle due tecniche, ossia la realizzazione dei pattini in materiali compositi contenenti particelle di lubrificante, e l'uso di una fonte ulteriore di lubrificante sotto forma di uno strato sottile, appare come una possibile soluzione al problema in esame [8].

Esempi di solidi che hanno dimostrato buone capacità lubrificanti in vuoto sono riportati in tab. IV [8].

Categoria	Lubrificante
Solidi lamellari	Dicalcogenuri
	NbSe ₂
	NbSe ₂ WS ₂
Metalli teneri	grafite
	oro
	argento
	piombo indio
Polimeri	teflon (PTFE)
	resine fenoliche o epossidiche poli-immidi

Tab IV - Esempi di lubrificanti solidi per applicazioni spaziali [8].

Table IV - Examples of solid lubricants for space applications [8].

Fra questi materiali, non è possibile prendere in considerazione né i polimeri, per le ragioni sopra citate, né i metalli teneri con punto di fusione basso rispetto alla temperatura di degassaggio della camera da vuoto, quali piombo e indio, né la grafite che si rivela efficace solo in presenza di vapore ac-

queo o di altri vapori condensabili.

La scelta di un lubrificante solido si restringe pertanto ai dicalcogenuri e ai metalli teneri con punto di fusione sufficientemente alto. E' noto come, nelle applicazioni spaziali, il MoS₂ sia il solido più ampiamente utilizzato, prevalentemente in condizioni di rotolamento, per ottenere un'efficace lubrificazione di componenti che debbano operare in vuoto. Il coefficiente di attrito μ fra componenti lubrificati con solidi può essere espresso dalla relazione:

$$\mu = \frac{\tau \cdot A_r}{F_N}$$

dove τ è la resistenza a taglio del film lubrificante, A_r l'area reale di contatto e F_N il carico normale.

Quindi, al fine di minimizzare i valori del coefficiente d'attrito per il valore di progetto di F_N , occorre che i valori di τ e di A_r siano sufficientemente bassi.

L'applicazione di film sottili di MoS₂ (dell'ordine di 1 μ m per le applicazioni spaziali, nelle quali peraltro agiscono carichi di valore limitato) a componenti realizzati con materiali ad elevato modulo elastico può soddisfare entrambe le esigenze sopra menzionate. Con film sottili di lubrificante solido, infatti, il carico applicato è sostenuto soprattutto dai componenti, la cui rigidità determina il valore dell'area reale di contatto.

Proprietà del MoS₂, utili ai fini del presente studio, sono riportate in [9]. In particolare:

- componenti in acciaio rivestiti con MoS₂ possono dare valori del coefficiente di attrito pari a 0.1 in aria e 0.01-0.04 in vuoto;
- le proprietà lubrificanti restano soddisfacenti a temperature fino a 400 °C in aria e 800 °C in vuoto;
- l'umidità influisce negativamente sulle prestazioni del lubrificante.

Un'alternativa valida al MoS₂ è rappresentata dal WS₂ [8]. Generalmente la deposizione di un film di lubrificante solido viene effettuata sul componente più critico della coppia tribologica in esame, costituito dalla rotaia nell'accoppiamento oggetto di questo studio. Tuttavia, occorre considerare che un contatto strisciante tra pattino e rotaia sarebbe un evento eccezionale nel corso della movimentazione delle cassette, relativo a una situazione di emergenza causata dal blocco del muletto, e che i percorsi di strisciamento sarebbero molto limitati. Se si considera inoltre che le rotaie sono progettate come elementi fissi all'interno della camera da vuoto, mentre le cassette vengono estratte periodicamente, ne consegue che le operazioni di controllo e di manutenzione tribologica sono molto più facili se il film di lubrificante solido viene depositato sui pattini. Questo permetterebbe una notevole semplificazione costruttiva (sottoponendo al trattamento di deposizione i componenti meno ingombranti per dimensioni e peso) e una minore criticità delle operazioni di montaggio delle rotaie.

In conclusione, rivestendo le superfici di contatto dei pattini con film sottili di MoS₂ o di WS₂, depositati preferibilmente per 'sputtering' in modo da ottenere la massima adesione tra film e sostrato, e rodati mediante strisciamento unidirezionale in modo da "orientare" preventivamente le lamelle di bisolfuro, si garantirebbero bassi valori del coefficiente di attrito, sia statico che dinamico, e si limiterebbero eventuali fenomeni di adesione tra pattino e rotaia durante i lunghi periodi di contatto tra una fase di manutenzione e la successiva. Se poi i pattini fossero realizzati con materiali compositi, contenenti particelle dello stesso bisolfuro, si conseguirebbe l'ulteriore vantaggio di disporre di una riserva di lubrificante, utile in caso di danneggiamento del film sottile.

In tab. V [10] sono riportate alcune proprietà di materiali candidati per la realizzazione dei pattini, incluso un bronzaluminio già utilizzato nella macchina a fusione JET (Joint European Torus) per supporti sottoposti a carichi elevati.

Proprietà	Compositi		
	HCuSn + 25% WS ₂	HNiFeCu + 25% WS ₂	Bronzo-Al Alcaro CuAl10Ni5Fe4
Coefficiente di dilatazione termica, °C ⁻¹	18E-06 (20-200 °C)	16E-06 (20-600 °C)	17E-06 (20-250 °C)
Resistenza a trazione, MPa	-	-	640-740
Resistenza a compressione, MPa	240	350	-
Temperatura max di esercizio, °C	240	700 in N ₂	-
Coefficiente di attrito	< 0.15 a secco	0.15 ²	-
Durezza Brinell	45	70	180-195
Conducibilità termica, W · m ⁻¹ · K ⁻¹	75-95	35-40	50
Resistenza all'irraggiamento	accettabile	accettabile	accettabile
Lavorabilità	buona	buona	buona

Tab. V - Caratteristiche dei materiali selezionati per la realizzazione dei pattini.

Table V - Properties of materials selected for sliding pads.

Materiali per le rotaie

Oltre ai requisiti già indicati al paragrafo 2, ai materiali per le rotaie si richiedono: un coefficiente di espansione termica prossimo a quello dell'AISI 316L, materiale di riferimento per gli elementi strutturali di ITER, e una durezza superiore a quella dei materiali dei pattini, al fine di evitare danneggiamenti alla rotaia, componente fisso della camera da vuoto. Nel presente studio, sono stati presi in considerazione acciai austenitici e superleghe. Gli acciai martensitici, che pure presentano caratteristiche meccaniche adeguate, sono stati ritenuti non idonei a causa dell'elevato valore della permeabilità magnetica.

Tra gli acciai austenitici sono stati considerati: l'acciaio AISI 316L, alcuni acciai indurenti per precipitazione (17-10 P, HNM e AISI 660) e un acciaio al manganese (Hadfield). Gli acciai indurenti per precipitazione presentano valori adeguati di durezza se sottoposti ad opportuni trattamenti termici, che tuttavia rendono più complesse le operazioni di fabbricazione. L'acciaio Hadfield (13% di Mn) risulta idoneo alla realizzazione di componenti resistenti ad usura (macchine movimento-terra, attrezzature minerarie, ruote e rotaie, pignoni e cremagliere), per la sua tendenza ad incrudire per deformazione a seguito della formazione in superficie di strati di martensite in quantità limitata, così che non risultano pregiudicate le caratteristiche amagnetiche del materiale. D'altra parte occorre considerarne la difficile lavorabilità, come pure l'instabilità strutturale a temperature superiori a 250 °C.

Sono state infine prese in considerazione alcune superleghe già utilizzate in campo nucleare: Inconel 718, Inconel X-750, Nimonic 80A e Inconel 625. Le prime tre, indurenti per precipitazione, possono raggiungere valori elevati di durezza (fino a 40-45 HRC, ad esempio con la IN 718); Inconel 625 viene generalmente fornita allo stato ricotto o solubilizzato (caratterizzati da valori di durezza di circa 180 HB).

PARTE SPERIMENTALE

Una prima serie di prove sperimentali è stata effettuata sui seguenti materiali:

- per i pattini: due compositi DEVA™ (Glacier GmbH) con il 25% in peso di WS₂, rispettivamente a matrice NiFeCu (H NiFeCu2369/25WS₂) e a matrice CuSnPb (H CuSnPb8413/25WS₂); un bronzalluminio ALCARO (CuAl10Ni5Fe4);
- per le rotaie: la superlega IN 718, gli acciai AISI 660 e AISI 316L.

Alcune prove sono state effettuate ricoprendo il materiale dei pattini con uno strato di MoS₂, applicato per laccatura al

fine di realizzare un film di bassa resistenza a taglio. Questa scelta costituisce la fase preliminare ad una futura campagna sperimentale da effettuare su campioni rivestiti con film sottili di MoS₂ depositati mediante 'sputtering'.

Allo scopo di simulare le condizioni di lavoro delle cassette del divertore, sia a regime che nelle fasi di manutenzione, è stato predisposto un opportuno dispositivo di prova costituito da una macchina a moto alterno con geometria piano su piano, in grado di operare sia in vuoto che in atmosfera di azoto secco. Per ogni prova, come risulta dallo schema del portacampioni riportato in fig. 3, sono stati utilizzati due campioni fissi di dimensioni 42x42x12 mm, realizzati con i materiali dei pattini, premuti con 3200 N di carico contro campioni mobili di 38x78x8 mm, realizzati con i materiali delle rotaie. Le prove tribologiche sono state precedute da una fase in cui i campioni fissi erano posti in contatto con i campioni mobili in modo da simulare le condizioni di regi-

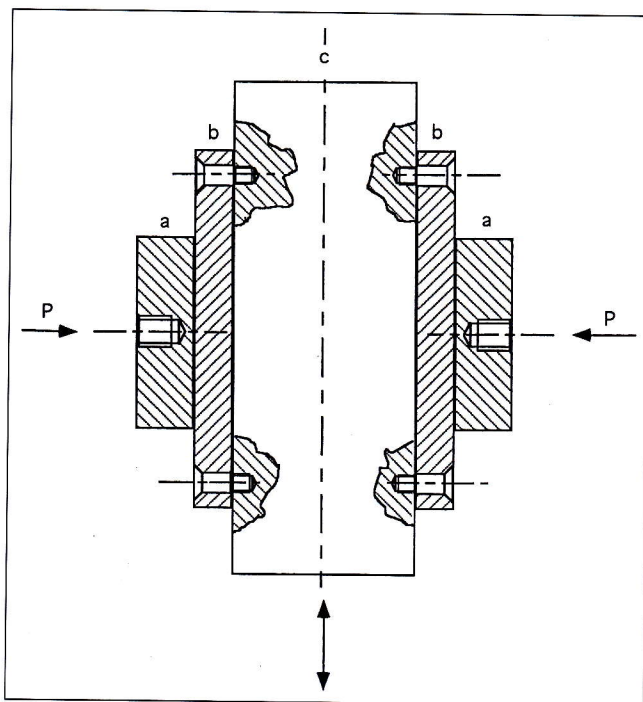


Fig. 3 - Schema del dispositivo portacampioni utilizzato per le prove di strisciamento a moto alterno: (a) campioni fissi, (b) campioni mobili, (c) elemento mobile. Carico applicato per serraggio meccanico.

Fig. 3 - Details of the specimens holder used for the alternate sliding tests: (a) fixed specimens, (b) moving specimens, (c) moving component. Load applied by mechanical gripping.

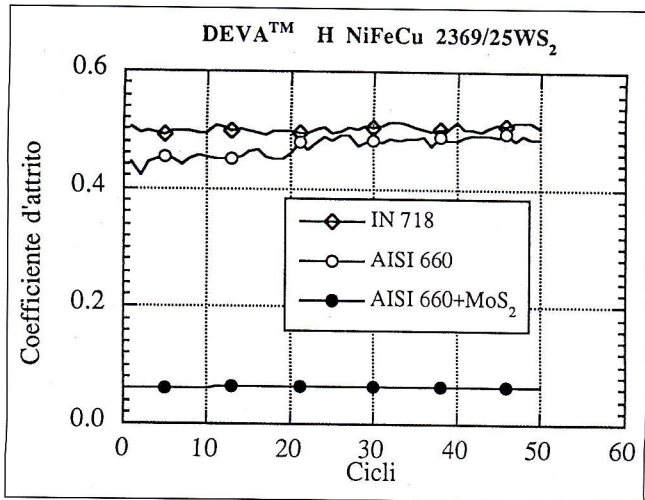


Fig. 4 - Andamenti del coefficiente di attrito dinamico relativi al composito DEVA™ a matrice NiFeCu con il 25% in peso di WS₂.

Fig. 4 - Dynamic coefficient of friction vs. number of cycles for the NiFeCu + 25wt% WS₂ DEVA™ composite.

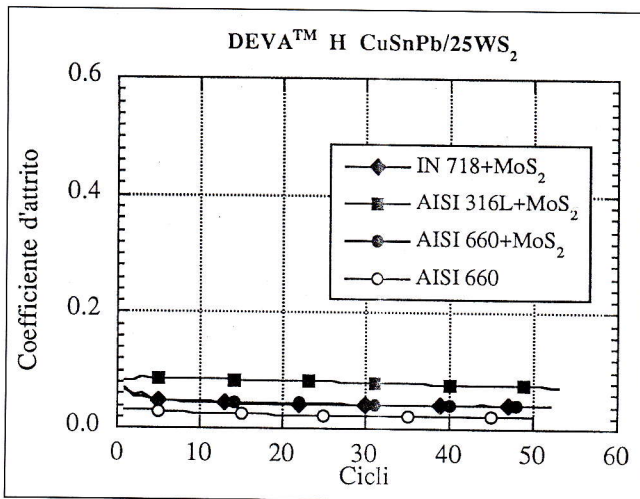


Fig. 5 - Andamenti del coefficiente di attrito relativi al composito DEVA™ a matrice CuSnPb con il 25% in peso di WS₂.

Fig. 5 - Dynamic coefficient of friction vs. number of cycles for the CuSnPb + 25wt% WS₂ DEVA™ composite.

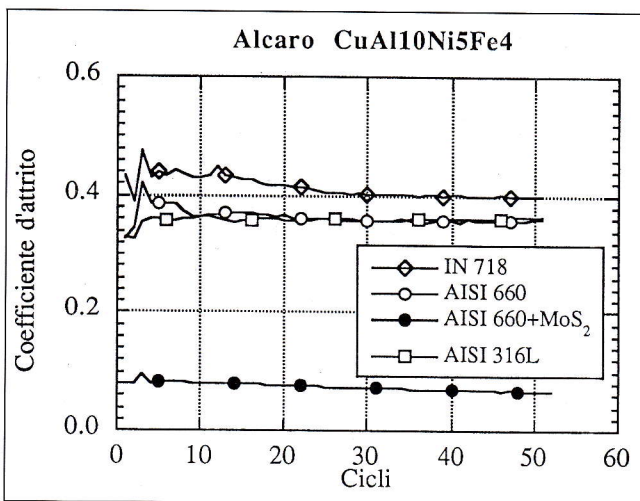


Fig. 6 - Andamenti del coefficiente di attrito relativo al Bronzoalluminio Alcaro CuAl10Ni5Fe4.

Fig. 6 - Dynamic coefficient of friction vs. number of cycles for the Alcaro CuAl10Ni5Fe4.

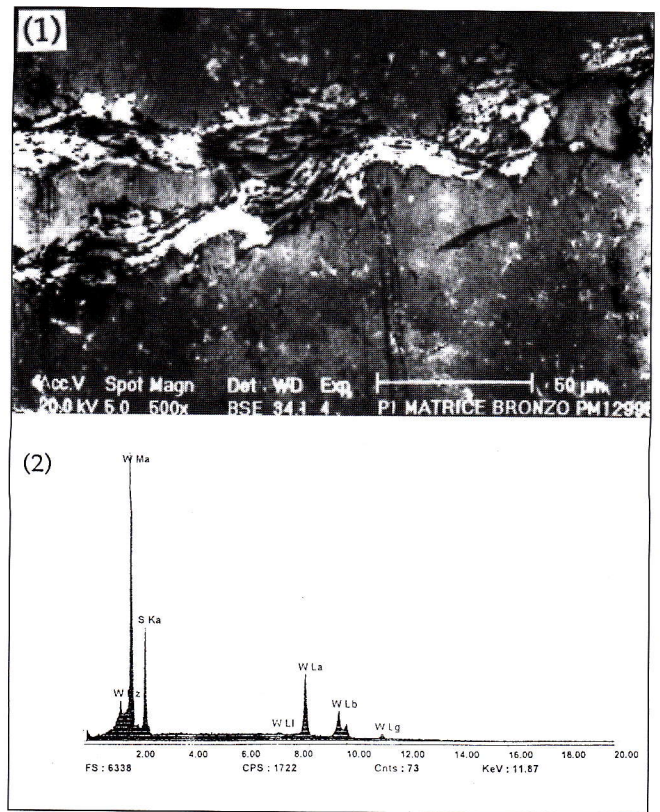


Fig. 7 - Micrografia SEM del composito CuSnPb + 25% WS₂ (1) e spettro EDS relativo alla fase lubrificante di WS₂ (2).

Fig. 7 - SEM micrograph of the CuSnPb + 25% WS₂ composite (1) and EDS spectrum of the WS₂ lubricant phase (2).

me (tab. II): a 300 °C per 6 ore, in vuoto di circa 4·10⁻⁶ mbar, ad una pressione di contatto di 2 MPa. Le prove di strisciamento sono state condotte in condizioni operative tipiche delle fasi di manutenzione (tab. III): pressione di contatto 2 MPa, atmosfera di azoto secco a pressione atmosferica, temperatura ambiente, moto alterno di ampiezza 12 mm con velocità comprese tra 5 e 8 mm/s. Le prove sono state effettuate nei laboratori della Divisione Fusione dell'ENEA di Frascati.

I risultati più significativi della sperimentazione sono illustrati nelle figg. 4-6, che riportano gli andamenti del coefficiente di attrito in funzione del numero di cicli [11].

L'interposizione di uno strato di MoS₂ conduce per tutti i materiali considerati nella sperimentazione a valori del coefficiente d'attrito dinamico $\mu \leq 0.1$. In assenza di MoS₂ il bronzalluminio ha presentato valori piuttosto elevati di μ (circa 0.4) contro tutti i materiali antagonisti.

Dei materiali DEVA™ contenenti WS₂, il composito a matrice CuSnPb ha evidenziato il migliore comportamento tribologico ($\mu \approx 0.05$), mentre quello a matrice NiFeCu ha presentato valori di $\mu \approx 0.5$, sensibilmente superiori a quelli attesi sulla base delle indicazioni fornite dall'azienda produttrice.

Allo scopo di interpretare questo risultato sono state effettuate analisi metallografiche mediante microscopia elettronica in scansione (SEM) con microsonda a dispersione di energia (EDS). In fig. 7 sono riportati, rispettivamente, una micrografia SEM del composito a matrice CuSnPb e lo spettro EDS relativo alla fase lubrificante di WS₂. In fig. 8 sono riportati una micrografia SEM e alcuni spettri EDS rappresentativi delle fasi presenti nel composito a matrice NiFeCu. Le analisi metallografiche e compositive hanno mostrato una distribuzione omogenea del dicalcogenuro WS₂ nel composito a matrice CuSnPb, mentre solo una minima parte

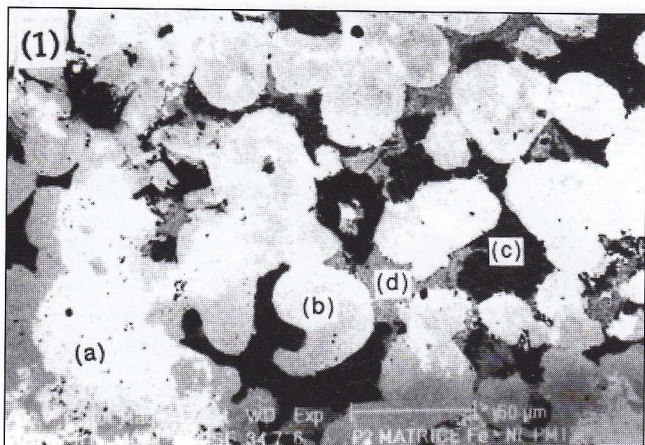
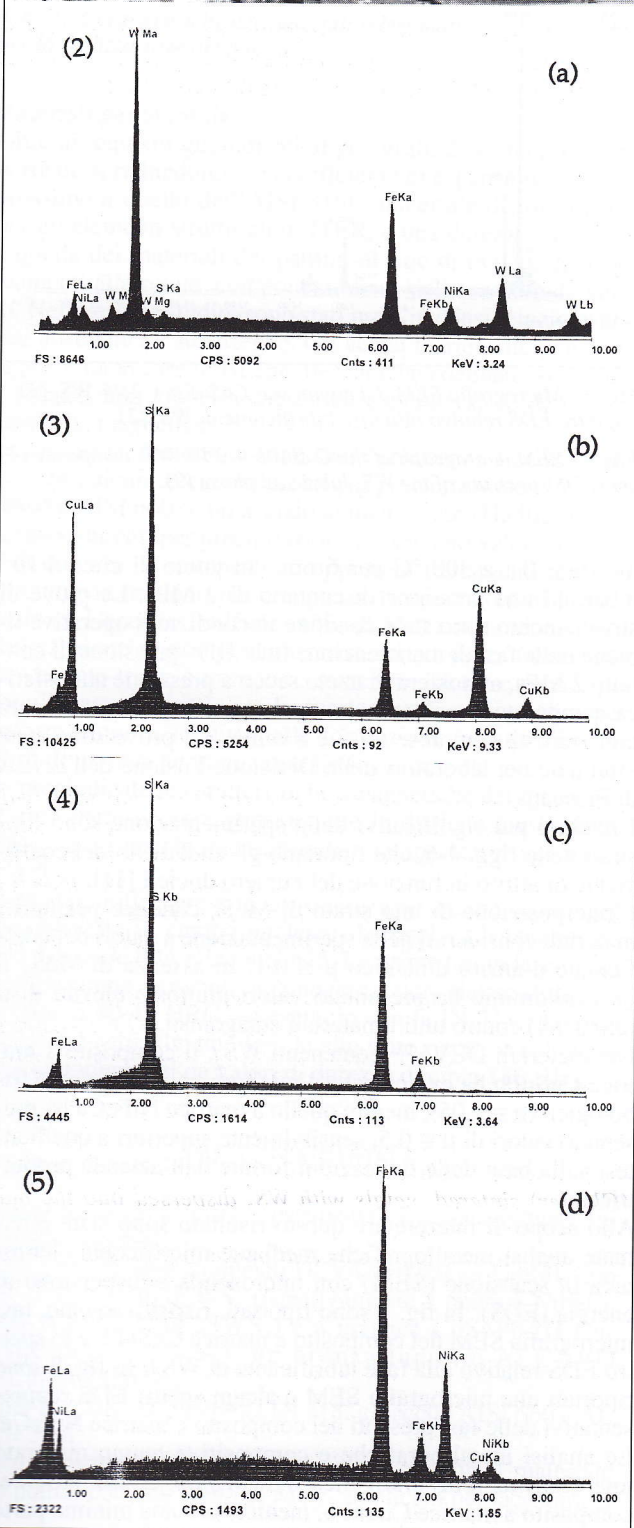


Fig. 8 - Micrografia SEM del composito NiFeCu + 25% WS₂ (1) e spettri EDS rappresentativi delle diverse fasi presenti nel composito (2-5).

Fig. 8 - SEM micrograph of the NiFeCu + 25% WS₂ composite (1) and EDS spectra of the different phases in the composite (2-5).



CONCLUSIONI

Il presente studio sui criteri di scelta dei materiali più idonei a realizzare la coppia pattino-rotoria per le cassette del divertore di ITER ha portato alle seguenti conclusioni:

- l'uso di MoS₂ o WS₂, depositati come film continuo o dispersi in materiali compositi, consente di ottenere, in condizioni di strisciamento, valori bassi del coefficiente di attrito (<0.2), particolarmente al distacco;
- la presenza di un film di lubrificante solido permette di limitare fenomeni di adesione tra i componenti nei periodi tra due manutenzioni successive, in cui si ha un contatto statico sotto vuoto e in condizioni gravose di carico e temperatura;
- i pattini sono stati individuati come i componenti più idonei al rivestimento con MoS₂, con notevoli vantaggi per le operazioni sia di manutenzione che di realizzazione del rivestimento stesso;
- il materiale del pattino deve avere una resistenza a compressione sufficiente a supportare le condizioni di carico in esercizio e in manutenzione, ed una durezza inferiore a quella del materiale di rotoria, parte fissa della camera da vuoto, in modo da evitarne il danneggiamento;
- per la realizzazione delle rotorie sono stati individuati alcuni acciai austenitici e superleghe, già utilizzati in campo nucleare e rispondenti ai requisiti di progetto;
- allo scopo di simulare le condizioni di lavoro delle cassette del divertore sono state effettuate prove di strisciamento a moto alterno su alcuni materiali selezionati per la coppia pattino-rotoria. L'interposizione di uno strato di MoS₂ ha condotto, per tutte le coppie tribologiche considerate, a valori del coefficiente d'attrito $\mu \leq 0.1$. Per quanto attiene ai compositi DEVATM, contenenti WS₂, il composito a matrice CuSnPb ha evidenziato un buon comportamento tribologico ($\mu \approx 0.05$). Le scarse prestazioni del composito a matrice NiFeCu sono state attribuite, sulla base di analisi microstrutturali e compositive, ad un non corretto processo di produzione dello stesso.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano vivamente A. Orsini e S. Libera della Divisione Fusione dell'ENEA di Frascati, per l'esecuzione delle prove di strisciamento e M. Agostini dell'ENEA di Camugnano (Bologna) per le analisi metallografiche.

RIFERIMENTI

[1] T. C. Chivers, "Tribological design and assessment. The nuclear industry", in: Tribological Design of Ma-

- chine Elements, D. Dowson et al., Eds., Elsevier, 1989, pp. 383-388.
- [2] B. G. Logan, L. J. Perkins, R. W. Moir, D. D. Rytuv, "The need for research and development in fusion: Economical energy for a sustainable future with low environmental impact", *Fusion Technol.* 28 (1995), pp. 236-239.
- [3] C. Damiani, "Divertor Test Platform functional description", ENEA Doc., P-GE-N-001, December 15, 1995.
- [4] C. Damiani, "ITER Divertor Test Platform Feasibility Study. Task 3.1. Working Programme", ENEA ERG/FUS/ISP/ING, April 6, 1995.
- [5] E. Martin, D. Maisonnier, "Support Cooling Line and Maintenance Systems for the Divertor Components. Specifications for Pre-Design Studies and Basic Technologies Tests", January 23, 1995.
- [6] R. D. W. Bestwick, G. H. S. Smith, "ITER Divertor Region Test Platform. Feasibility Study. Bearing Pad Material Selection for ITER Divertor", EFET/TR/NO26 Issue V02, NNC Ltd, Knutsford Cheshire (UK), March 1995.
- [7] E.W. Roberts, "The Tribology of Sputtered Molybdenum Disulphide Films", *Proc. Int. Conf. on Tribology - Friction, Lubrication and Wear. Fifty Years On, Vol. 1, Mech. Eng. Publ., Bury St Edmunds, UK, 1987*, pp.503-510.
- [8] E. W. Roberts, "Thin solid lubricant films in space", *Tribology Int.* 4 Vol. 23 N. 2, (1990), pp. 95-104.
- [9] K. Holmberg, A. Matthews, "Coatings Tribology", Elsevier, Amsterdam, 1994.
- [10] P. Buttol, "Bearing pads material selection for ITER divertor", ENEA Rept. CT-FBA-00003, July 14, 1995.
- [11] L. Ceschini and G. Palombarini, "ITER Divertor Project: Materials for the Pad-Rail Couple", Report No. 1, ENEA Contr. No. 95/58/0056/61, 1995.

— A B S T R A C T —

Design of ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) involves critical problems concerning selection, testing and validation criteria of materials for components operating under severe environmental conditions. This paper presents the main results of a study aimed at selecting materials for tribological components of the ITER divertor. The main functions of the divertor are to control the purity of plasma and to exhaust helium and solid particles. The divertor is constituted by 60 cassettes (about 20 t each) realised in AISI 316L stainless steel. A remote replacement of cassettes is designed at 1 year intervals to allow maintenance operations. The operating and maintenance conditions are reported in Tables II and III. The cassettes are displaced by movers running on rails by wheels. The movers, in turn, are driven by a rack-and-pinion mechanism. In emergency conditions, the movement must be performed under sliding conditions; therefore, the cassettes must be equipped with sliding pads. Due to the operating conditions of ITER, the materials for the pad-rail couple must display low magnetic permeability, low-friction and adhesion, high wear resistance, as well as good thermal, mechanical and irradiation resistance. The operating and maintenance conditions, in particular temperature and pressure (UHV), suggest the use of dicalcogenides solid lubricants, such as MoS₂ or WS₂, applied as thin films on sliding surfaces or incorporated into composite materials. The sputtering technique allows to obtain lubri-

cant films wear resistant and adherent to the substrate which, especially in vacuum, also display a very low friction coefficient. The use of a self-lubricating composite material coated with a solid lubricant could be a solution allowing lubrication also in the case of thin film damage. Relevant properties of some candidate materials for pads are reported in Tab. V.

The following amagnetic alloys were considered for the rails: AISI 316L (as reference material for ITER structural components), PH austenitic steels (17-10 P, HNM, AISI 660), Mn steels (Hadfield) and Ni-based superalloys (Inconel 625, 718 and X-750, Nimonic 80A). The AISI 316L and 660, and Inconel 718 were selected for testing, coupled with the following candidate materials for the pads: two DEVATM (Glacier) sintered metals with WS₂ dispersed into the matrix, and an Al-bronze.

The experimental apparatus and preliminary results are reported in Figures from 3 to 6. The results of tests carried out using samples coated with sprayed MoS₂ are also presented.

The best results were obtained in any case using MoS₂ films, with friction coefficients <0.1. Among the pad materials sliding against uncoated rail materials, the CuSnPb+WS₂ DEVATM composite displayed very low coefficients (~0.05), while the NiFeCu+WS₂ DEVATM composite and the Al-bronze gave unsatisfactory results (0.4-0.5).