

PARTICOLARITÀ DI PROBLEMI DI FRATTURA NEL CAMPO DELLA FUSIONE NUCLEARE

Ing. Claudio NARDI

ENEA FUS-TEC – CR Frascati – Via E. Fermi 27 – 00044 Frascati (Roma)

ABSTRACT

Producing energy using nuclear fusion opens interesting perspectives, as it presents advantages both in the safety field and in greenhouse effect field. However the nuclear fusion technology requires using peculiar materials, in the present machines (without an energy recovery system) and in the future ones (with a system transforming the nuclear energy in mechanical energy).

In the present machines to use refractory metals leads to brittle fractures because of particular operating conditions (high thermal stresses with relatively high cycling).

In the next step machines a structure, called blanket, will be foreseen in order to produce the fuel for the nuclear reaction (Tritium) and to transfer the energy generated by the fusion reactions to a fluid (water, gas, liquid metal). The blanket will not have relevant safety functions, as the barrier between the vacuum in the plasma chamber and the environment will be a different structure (vacuum vessel), but it will be of high relevance for the plant availability. The proposed structural material for the blanket are ferritic-martensitic steels, refractory metals and ceramic matrix composites. These materials (it must not be forgot that they are subject to a flux of neutron having an energy of 14 MeV) will require in their design the use of failure criteria based on the fracture mechanics.

ENEA is present in these studies with spot activities on experimental plants of the Frascati Centre (Frascati Tokamak Upgrade) and with the many years participation to the European programme for the development of new materials to be used in the future nuclear fusion power plants.

SOMMARIO

La produzione di energia con l'utilizzo della fusione nucleare apre interessanti prospettive perché presenta vantaggi sia nel campo della sicurezza sia nel campo dell'effetto serra. Tuttavia la tecnologia della fusione nucleare richiede l'uso di materiali particolari, sia nelle macchine attuali (prive di sistema di trasformazione dell'energia), sia nelle macchine future (con un sistema di trasformazione dell'energia nucleare in energia meccanica).

Nelle macchine attuali l'uso di metalli refrattari come schermi protettivi porta a rotture fragili dovute alle particolari condizioni operative (forti sollecitazioni termiche ripetute un numero considerevole di volte).

Nelle macchine future, si prevede che sarà necessaria una struttura in grado di fornire il combustibile per la reazione (trizio) e di trasferire l'energia generata dalle reazioni di fusione ad un fluido (acqua, gas, metallo liquido). Tale struttura, indicata come blanket, non avrà preminenti funzioni di sicurezza, demandate alla barriera fra il vuoto e l'ambiente esterno (vacuum vessel), ma sarà di notevole rilevanza per l'availability dell'impianto. Nel blanket si prevede l'uso di acciai ferritici/martensitici, metalli refrattari e compositi a matrice ceramica. Tutti questi materiali (che, bisogna considerare, sono soggetti ad un flusso di neutroni con un'energia di 14 MeV), nella loro progettazione richiederanno l'applicazione di criteri di rottura basati sulla meccanica della frattura.

L'ENEA è presente in questi studi sia con interventi ad hoc sugli impianti sperimentali del Centro di Frascati (Frascati Tokamak Upgrade) sia con la partecipazione pluriennale al programma europeo per lo sviluppo di nuovi materiali per l'uso nei futuri reattori a fusione per la produzione di energia.

L'ENERGIA DA FUSIONE

L'energia nucleare da fusione è generata dalla reazione di isotopi di idrogeno (deuterio e trizio) fra loro. Queste reazioni producono particelle alfa e neutroni, che asportano l'energia dal plasma, necessario per tenere le particelle alle energie cinetiche (dell'ordine dei 100 keV) richieste per far avvenire la reazione. Le particelle alfa sono arrestate nei primi centimetri di materiale adiacente al plasma, mentre i neutroni, che, nella reazione deuterio-trizio (D-T), hanno un'energia pari a circa 14 MeV, devono essere rallentati da apposite strutture contenenti materiali a basso peso atomico. Nella reazione D-T, che, allo stato attuale delle conoscenze, è la più promettente, è richiesto il trizio, che non è disponibile in natura, avendo un periodo di dimezzamento di circa 12 a. Quindi i neutroni prodotti nella reazione di fusione dovranno essere utilizzati, oltre che per la produzione di energia, anche per trasformare altri materiali in trizio. Il materiale più adatto a questo scopo è l'isotopo di litio avente peso atomico 6, che interagendo con un neutrone decade in trizio e particelle alfa.

Nelle attuali macchine sperimentali, operanti con deuterio o con quantità molto limitate di trizio, e quindi in cui non sono generate grandi quantità di neutroni, non è necessario inserire una struttura di generazione di trizio e di asportazione di energia (blanket). Dovranno comunque essere previste strutture di protezione della parete che separa la camera da vuoto dall'ambiente esterno, dato che un contatto diretto del plasma sulle strutture resistenti avrebbe effetti estremamente gravosi dal punto di vista delle operazioni della macchina.

LE ATTUALI MACCHINE SPERIMENTALI

Da quanto detto sopra risulta chiaro che nelle attuali macchine sperimentali si ha una

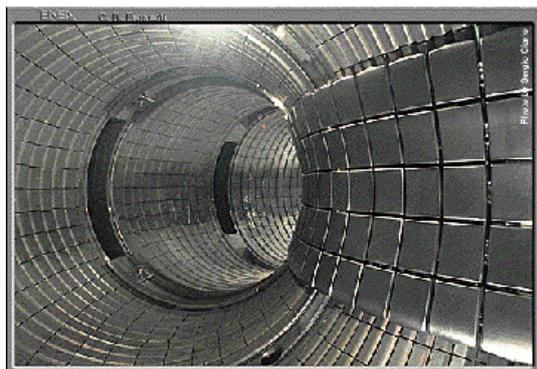


Figura 1 - Foto del limiter toroidale della macchina FTU (Frascati Tokamak Upgrade)

struttura simile a quella di Fig. 1, in cui una parete, avente funzioni strutturali di separazione fra plasma e ambiente, è protetta, almeno nei punti dove il rischio è più elevato, da una struttura (limiter) che assorbe l'energia del plasma, prima che questo giunga a contatto con la parete. Generalmente il limiter non ha un raffreddamento attivo, quindi, considerando che può avere assorbimenti locali di energia molto elevati, e pertanto raggiungere temperature superiori ai 1500°C, è costruito con metalli refrattari (leghe di molibdeno o leghe di tungsteno).

Il funzionamento del limiter dal punto di vista meccanico e termo-meccanico è notevolmente gravoso, in quanto, dopo un riscaldamento per assorbimento dell'energia del plasma, subisce un graduale raffreddamento per irraggiamento alla struttura esterna. Inoltre l'annullamento del campo magnetico in tempi misurabili in millisecondi provoca sollecitazioni dinamiche di elevata intensità soprattutto sul limiter.

Queste modalità di funzionamento, considerando che il materiale componente il limiter generalmente non ha elevate caratteristiche di duttilità, portano alla possibilità di collasso di parti della struttura per frattura fragile, soprattutto se sono già presenti possibili inneschi di difetti (per esempio filettature).

Caratteristiche dei materiali usati per i limiter [1]

Materiale	E [GPa]	k [W/m ² °C]	α *1E6 [°C ⁻¹]	R _m [MPa]	T _f [°C]
W	400	144	4.4	600	3410
TZM	300	125	5.3	1150	2620
Grafite (*)	28 (10.9)	0.5	32 (1.5)	100 (2)	(**)

(*) Materiale nettamente anisotropo, sono riportati i valori massimi per grafite pirolitica, fra parentesi i valori minimi

(**) Sublima a 4500°C

Tabella I - Principali caratteristiche dei materiali utilizzati nei limiter

I materiali più utilizzati nel limiter sono le leghe di molibdeno, particolarmente la lega TZM, e la grafite. Le leghe di tungsteno (particolarmente il tungsteno con 1% LaO) sarebbero più adatte dal punto di vista delle caratteristiche termo-meccaniche, tuttavia il loro uso è limitato dal costo elevato.

In Tab. I sono riportate alcune caratteristiche rilevanti per l'utilizzo come struttura di schermaggio termico dei materiali indicati sopra. Nella tabella non sono riportate le caratteristiche di tenacità di questi materiali, dato che non sempre sono note con sufficiente precisione. In particolare le caratteristiche del tungsteno non sono facilmente reperibili, l'unico dato fornito da [1] indica un valore di DBTT (Ductile Brittle Transition Temperature) compreso fra 100 e 400°C. Da questo è facile comprendere come non sia possibile una valutazione quantitativa del comportamento a frattura di questo materiale, a meno che non vengano effettuate prove finalizzate a rilevarne le caratteristiche per il lotto di produzione a cui si è interessati.

IL FUTURO IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA

Lo scopo finale degli studi sulla fusione nucleare è quello di realizzare una macchina in grado di produrre energia, utilizzabile nella rete elettrica, a costi confrontabili con quella prodotta da altre fonti. In ambito europeo sono in corso diversi studi finalizzati alla definizione delle

Blanket studiati in campo europeo

Blanket	Materiale Triziogeno	Refrigerante	Materiale strutturale
WCLL	Eutettico Pb-17Li	Acqua (150 bar)	Acciaio ferritico-martensitico
HCPB	Composto ceramico di Litio (*)	He (140 bar)	Acciaio ferritico-martensitico
Dual Coolant	Eutettico Pb-17Li	Eutettico Pb-17Li ed He	TZM
TAURUS	Eutettico Pb-17Li/Lega Sn-Li	Eutettico Pb-17Li /LegaSn-Li	Composito SiC/SiC

(*) Sotto forma di letto di palline bidimensionale (.1/1 mm di diametro)

Tabella II - Principali caratteristiche dei blanket studiati in campo europeo

caratteristiche teoriche di tale macchina. In particolare, per quanto riguarda il blanket, che sarà un

componente fondamentale di tali macchine, sono previste 4 diverse soluzioni, presentate in Tabella II, in ordine di difficoltà tecnologica crescente.

In queste macchine il blanket non avrà funzioni come componente rilevante per la sicurezza, infatti la struttura che mantiene il vuoto nella camera in cui avviene la reazione (vacuum vessel) svolge anche le funzioni di barriera di contenimento. Considerando le energie coinvolte in un eventuale incidente, non è ipotizzabile la fuoruscita dal vacuum vessel di materiali presenti nel blanket. Tuttavia una contaminazione del plasma in cui deve avvenire la reazione da parte dei materiali (molti dei quali ad elevato numero atomico) presenti nel blanket, richiederebbe comunque un arresto dell'impianto per un periodo valutabile in molte settimane. Quindi il blanket, pur non essendo direttamente collegato alla sicurezza, richiede l'utilizzo di tecniche di progettazione avanzate, per garantire l'affidabilità (e quindi la disponibilità) di tutto l'impianto.

Come si vede dalla Tabella II i materiali strutturali previsti per i blanket presentano gradi più o meno elevati di difficoltà per la progettazione, comunque, ciò che appare immediatamente evidente è il fatto che, sotto irraggiamento neutronico, tutti questi materiali avranno una duttilità estremamente ridotta, se non nulla. Questo comporta che, fin dalla fase di progettazione, dovrà essere effettuata un'analisi a meccanica della frattura delle strutture.

Considerando che i danneggiamenti previsti per le strutture adiacenti al plasma in questo tipo di macchina sono dell'ordine dei 100 dpa (displacement per atom), quindi molto superiori a quelli che possono essere presenti in elementi strutturali di reattori a fissione (meno di 25 dpa a fine vita per il recipiente a pressione di un reattore termico), si può vedere che la mancanza di duttilità può rappresentare uno dei problemi chiave per lo sviluppo di questi componenti.

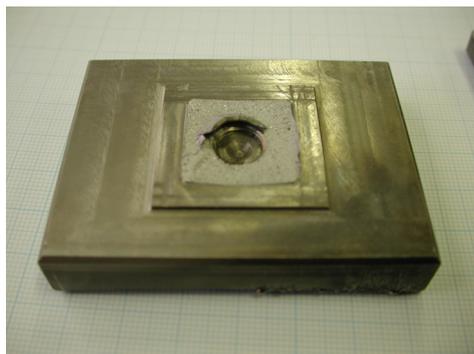


Figura 2 - Tegola del limiter di FTU dopo rottura

un ciclaggio termico abbastanza severo, da temperatura ambiente a circa 1000°C per una decina di cicli al giorno. Nell'anno 2000, in concomitanza con un aumento delle prestazioni richieste alla macchina, si è constatata la rottura di 8 tegole in TZM sulle 254 presenti. Tutte le rotture si sono manifestate all'attacco della tegola con il codolo utilizzato per il fissaggio alla struttura di supporto. In Fig. 2 e 3 sono riportate le foto di una tegola e del codolo con le relative superfici di rottura.

Sono state effettuate una serie di analisi per valutare le condizioni in cui si erano sviluppate le rotture. Tali analisi sono state sperimentali (effettuate presso i laboratori ENEA di Faenza), per individuare le modalità e le condizioni di rottura e analisi dello stato di sollecitazione in prossimità dell'area di rottura. Le analisi di rottura (in Fig. 4 è riportata una frattografia ottenuta al microscopio elettronico - SEM) hanno indicato che la frattura era partita dall'interno del codolo e da un singolo difetto. La presenza

ATTIVITA' ENEA SULLA MACCHINA SPERIMENTALE A FRASCATI (FTU)

L'ENEA di Frascati, avendo una macchina sperimentale (FTU - Frascati Tokamak Upgrade) sul sito dei laboratori, lavora in supporto dell'unità che effettua esperimenti sulla macchina stessa, in particolare sulla progettazione meccanica e la manutenzione dei componenti. La macchina FTU ha la struttura in acciaio inossidabile, protetta da tegole in TZM, non refrigerate (vedi Fig. 1). Ovviamente queste tegole sono soggette ad



Figura 3 - Codolo della tegola di Fig. 2

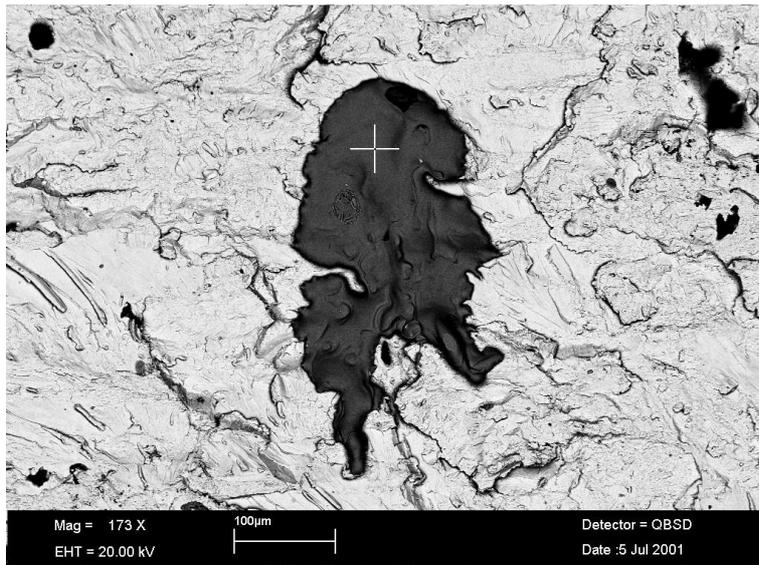


Figura 4 - Frattografia al SEM della superficie di rottura di una tegola di FTU (effettuata presso i laboratori ENEA di Faenza)

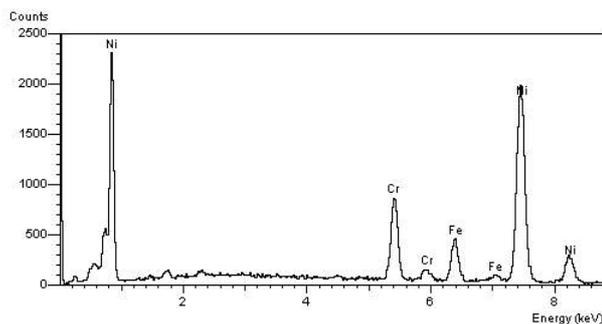


Figura 5 - Analisi al SEM di un'inclusione fra quelle presenti in Fig. 4

seguito all'esposizione al flusso neutronico. L'ENEA è attiva in questo campo in particolare sugli acciai ferritico-martensitici a bassa attivazione e sui compositi in carburo di silicio (SiC/SiC). Entrambe queste classi di materiali presentano una duttilità non esaltante già in condizioni non irraggiate, in condizioni di elevato irraggiamento neutronico tale duttilità è ulteriormente compromessa (Fig. 6 – [2]). Considerando il rapporto fra il danneggiamento in reattori a fissione e quello in un eventuale reattore a fusione, si può constatare che gli esperimenti di irraggiamento richiedono tempi molto lunghi, quindi sono in costruzione in Europa diverse sorgenti di neutroni con energie confrontabili con quelle dei neutroni da fusione (14 MeV). Naturalmente lo svantaggio di una sorgente di questo tipo è dato dal volume di irraggiamento estremamente ridotto (generalmente inferiore a 1000 cm³). Una di tali sorgenti è in esercizio presso i laboratori ENEA di Frascati.

Lo studio dei compositi SiC/SiC richiede, oltre alla tecnologia di produzione del materiale, anche uno studio particolare dei criteri di progettazione, dato che le classiche interpretazioni dell'analisi delle sollecitazioni (ASME) non sono direttamente applicabili per materiali compositi. Inoltre la presenza di irraggiamento neutronico, che, provocando il distacco delle fibre dalla

di elementi quali nickel, cromo, ferro e boro sulla superficie di frattura (vedi Fig. 5 dove è riportata un'analisi SEM) indica un certo tempo di latenza della frattura stessa. D'altra parte le analisi delle sollecitazioni indicano una concentrazione di sollecitazioni alla radice del filetto. Da queste analisi si è presa la decisione di ordinare una nuova serie di tegole e di viti di attacco aventi un raccordo alla base del filetto con un raggio più ampio.

ATTIVITA' ENEA NEL PROGRAMMA EUROPEO

Nell'ambito del programma europeo per la fusione vengono studiati i materiali che saranno usati nei futuri blanket. Tali materiali, oltre alle caratteristiche richieste per l'utilizzo in campo convenzionale, devono contenere solo elementi che non siano attivati dal flusso neutronico. Infatti, mentre nella fissione i prodotti radioattivi sono generati direttamente dalla reazione nucleare, nella fusione i prodotti generati dalla reazione sono solamente elio e neutroni, quindi tutti i materiali radioattivi che formano l'inventario nel reattore sono dovuti alle trasformazioni dei materiali presenti nel reattore (ed in particolare i materiali strutturali) in

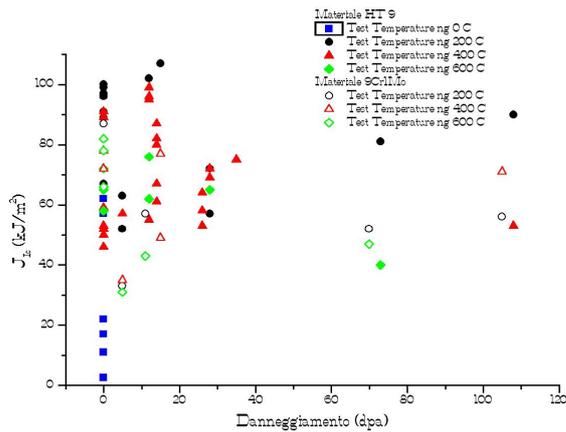


Figura 6 - Valori di tenacità per acciai ferritico-martensitici irraggiati

sia per le macchine sperimentali attuali, sia per quanto riguarda i futuri reattori di potenza, gioca un ruolo determinante per garantire alle macchine l'affidabilità richiesta per i loro impieghi.

matrice, riduce la tenacità del materiale, presenta ulteriori problemi, che, allo stato attuale, non si possono ancora considerare risolti.

CONCLUSIONI

Ottenere energia dalla fusione nucleare è uno sforzo che impegna molte branche della scienza e della tecnologia, a partire dalla fisica del plasma fino ai metodi di progettazione meccanica più sofisticati. L'utilizzo di materiali con caratteristiche studiate appositamente per questi impieghi richiede un approccio alla progettazione molto specialistico, ed in questo ambito la meccanica della frattura,

BIBLIOGRAFIA

1. E. Zolti – *Material data for predesign analysis of in-vessel components* – NET Internal Note N/I/3300/5/A (14/9/1990)
2. Fan-hsiung, M.L. Hamilton – *The fracture toughness database of ferritic alloys irradiated to very high neutron exposure* – Journal Nuclear Materials 187 (1992)

Claudio NARDI
Frascati 15 maggio 2002