

INTERPRETAZIONE DI PROVE DI PROPAGAZIONE ED ARRESTO DI FESSURE IN LAMIERE DI ELEVATO SPESSORE MEDIANTE MODELLI TRIDIMENSIONALI

M. Beghini, L. Bertini & E. Vitale

Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari
Via Diotallevi, 2 56126 Pisa

SOMMARIO

Nella memoria vengono illustrati i risultati di analisi tridimensionali di meccanica della frattura effettuate per interpretare i risultati di esperimenti di propagazione ed arresto di fessure in condizioni di sollecitazione di origine termica. I provini impiegati sono stati ricavati da lamiere di elevato spessore e presentavano una fessura superficiale passante.

L'analisi degli esperimenti ha richiesto la determinazione di una 'Weight Function' tridimensionale che consentisse di valutare gli effetti sul valore del Fattore di Intensificazione degli Sforzi (FIS) prodotti dalla curvatura del fronte di fessura e dalla presenza di zone sulla superficie di frattura non interessate dal cedimento del materiale ('unbroken ligaments').

Il FIS è stato valutato lungo tutti i fronti di fessura osservati sperimentalmente, sia negli istanti di innesco che di arresto.

L'esame dei risultati suggerisce alcune considerazioni sui criteri applicabili alla previsione del comportamento di fessure per le quali i suddetti effetti tridimensionali non siano trascurabili.

INTRODUZIONE

In generale, la previsione delle modalità di propagazione instabile e di arresto di fessure in strutture reali richiede l'applicazione di modelli di calcolo complessi e costosi. Negli ultimi anni sono stati fatti notevoli sforzi per sviluppare metodi numerici per determinare i parametri caratteristici di Meccanica della Frattura (MF) sia in campo lineare elastico che in regime elasto-plastico anche per geometrie complesse. Tuttavia, specialmente nelle applicazioni pratiche, il livello di accuratezza che può essere raggiunto teoricamente risulta vanificato dalla presenza di notevoli margini di incertezza connessi spesso con una non adeguata conoscenza della effettiva geometria dei difetti e delle proprietà di tenacità del materiale. Allo scopo di superare tali difficoltà è possibile ricorrere ad approcci probabilistici [1-3] che risultano peraltro applicabili quando è disponibile una completa caratterizzazione del materiale.

Queste problematiche sono presenti anche quando si analizzano semplici problemi di frattura che

possano ragionevolmente ricondursi a casi bidimensionali (2-D) e per i quali il parametro di sollecitazione del difetto è riconducibile ad un solo valore, il Fattore di Intensificazione degli Sforzi (FIS o K_I), caratteristico della fessura. Nei problemi tridimensionali (3-D) oltre a queste considerazioni si verifica anche che il FIS è rappresentabile come una funzione che assume valori diversi in diversi punti del fronte di fessura.

In fatica o in altri simili fenomeni di crescita stabile del difetto, la velocità di propagazione e quindi la forma del fronte, può essere ragionevolmente correlata con il valore locale della funzione del FIS. Diversamente, nel caso di fenomeni di propagazione instabile non è immediato effettuare una scelta razionale del parametro di carico caratteristico del difetto da confrontare con il parametro di resistenza K_{Ic} . Se infatti da un lato, l'impiego del massimo valore del FIS si dimostra spesso eccessivamente conservativo, non sono tuttavia disponibili criteri sicuri per scegliere un valor medio affidabile. Osservazioni simili valgono per le condizioni di arresto di una fessura che propaghi instabilmente, con la conseguenza che non sono disponibili criteri sicuri per prevedere la forma del fronte di arresto.

La scarsità dei risultati sperimentali è principalmente dovuta alle oggettive difficoltà che si riscontrano nella conduzione e nella interpretazione di esperimenti 3-D effettuati con un adeguato controllo di tutti i parametri. Nel seguito si cercherà di dare un contributo alla comprensione di questi fenomeni effettuando un esame 3-D di alcuni esperimenti di propagazione ed arresto di fessure recentemente condotti [4,5,6].

La presente analisi è stata suggerita da una serie di situazioni favorevoli tra le quali:

- a) la disponibilità di una completa caratterizzazione della tenacità del materiale, sia all'innesco che all'arresto;
- b) la possibilità di un accurato rilievo della forma dei difetti ottenuta attraverso la 'post-analisi' degli esperimenti;
- c) la circostanza che sia la geometria del provino che le tecniche sperimentali sono state scelte in modo che fosse ottenibile un elevato livello di confidenza nelle analisi di tensione e di frattura.

BREVE DESCRIZIONE DELLE TECNICHE SPERIMENTALI E DI ANALISI

Un completo resoconto del programma di ricerca è stato recentemente pubblicato [6] e pertanto in questo paragrafo sarà riportato solamente un succinto sommario delle attività allo scopo di illustrare il problema e di definire i principali parametri. Per motivi di spazio, anche lo sviluppo analitico delle tecniche adottate nell'analisi è stato omissso e per ulteriori dettagli si rimanda a [7].

Tecniche sperimentali

Sono stati effettuati cinque esperimenti di 'shock' termico (indicati come TSP01- TSP05) utilizzando provini piani estratti da lamiere di acciaio ferritico al manganese tipo A533 Gr.B aventi uno spessore di 140 mm. Su ogni provino, come indicato nella fig. 1, è stato prodotto un difetto superficiale passante (fessura iniziale) avente una profondità costante a , mediante una saldatura laser seguita da un caricamento elettrochimico di idrogeno. Durante la prova, il provino era semplicemente appoggiato in modo che nessun carico esterno significativo potesse sollecitare la fessura. Una sollecitazione secondo il Modo I è stata invece ottenuta scaldando preliminarmente il provino in modo uniforme fino a circa 100°C e effettuando un successivo violento raffreddamento ('shock' termico) della faccia fessurata e dell'opposta (S_1 e S_2 in fig. 1) mediante l'impiego di azoto liquido (LN_2) a -196°C.

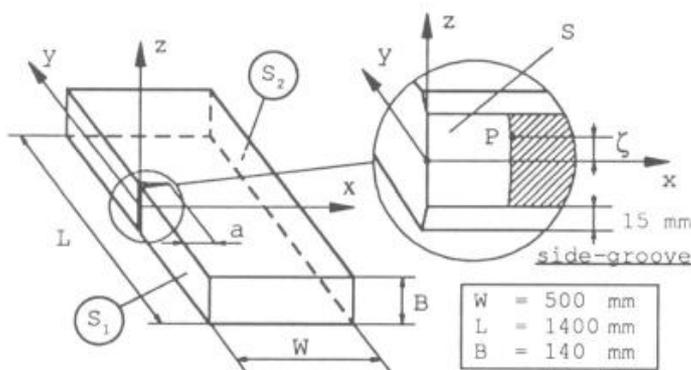


Fig. 1 - Provino TSP con un dettaglio della zona fessurata dove sono mostrati anche i side-grooves non rappresentati per chiarezza nel provino completo.

Gli effetti combinati dell'impiego del trattamento termico infragilente e del liquido criogenico come refrigerante hanno permesso di riprodurre le condizioni termomeccaniche che si manifestano in un vessel nucleare infragilito dalla radiazione neutronica. Si può verificare [6] che una fessura di dimensioni medio-piccole ($a < 80$ mm) subisce una storia termica e meccanica del tutto simile a quella di una fessura circonferenziale di pari lunghezza in un tipico vessel nucleare durante un incidente severo che comporti un rapido raffreddamento. Il comportamento di fessure più lunghe non è stato considerato in quanto, in questo genere di esperimenti, lo stato di tensione non riesce a provocare propagazioni di fessure aventi profondità maggiore di 80 mm anche ipotizzando i più intensi 'shock' termici.

Un rilievo accurato della temperatura del provino durante il raffreddamento è stato ottenuto mediante l'impiego di termocoppie di piccolo diametro disposte con leggero gioco in fori realizzati a differenti distanze dalle superfici raffreddate. Una elaborazione successiva dei segnali registrati ha permesso di valutare l'andamento del coefficiente globale di scambio termico sulla superficie in funzione del tempo.

Gli eventi di propagazione instabile del difetto sono stati registrati sia attraverso l'emissione acustica che attraverso la registrazione del segnale del COD misurato mediante estensimetri metallici saldati sulla 'bocca' del difetto in corrispondenza della superficie raffreddata.

L'esame del primo esperimento (TSP01) ha suggerito l'impiego dei 'side-grooves' allo scopo di ridurre gli effetti plastici di bordo sulla piastra e di ottenere un leggero incremento del FIS a parità di sollecitazione termica. La prova TSP02 ha dato importanti indicazioni sulla scelta dei parametri sperimentali che hanno permesso di realizzare soddisfacenti risultati nelle successive esperienze [4]. Negli ultimi tre esperimenti infatti sono stati prodotti e registrati vari eventi di innesco e arresto in differenti condizioni di temperatura e di carico applicato.

Alla fine di ogni prova, il provino è stato tagliato in modo da ricavare un blocco di dimensioni ridotte che contenesse la zona fessurata. Tale blocchi venivano quindi rotti in due parti producendo una ulteriore propagazione della fessura interna mediante azione meccanica a temperatura molto bassa (-196°C). L'aspetto della superficie di frattura è sempre risultato ben visibile ed ha sempre permesso la chiara individuazione di tutti i fronti di propagazione che erano stati prodotti nell'espe-

Le prove preliminari TSP01 e TSP02 hanno fornito indicazioni utili per la messa a punto delle procedure sperimentali e per la corretta esecuzione delle successive prove. In particolare hanno dimostrato la necessità di aumentare la Temperatura di Transizione (TT) duttile-fragile per poter raggiungere un sufficiente margine di sicurezza le condizioni di propagazione. Nelle ultime tre esperienze è stato adottato un trattamento termico di ricottura forte che ha prodotto, da un lato, un sensibile aumento della TT e, dall'altro, un utile effetto di omogeneizzazione della struttura metallica e delle proprietà meccaniche.

Il materiale è stato caratterizzato a tenacità mediante prove di K_{Ic} alle basse temperature (ASTM-E399) e attraverso prove di resilienza (Charpy V) in zona di transizione duttile-fragile.

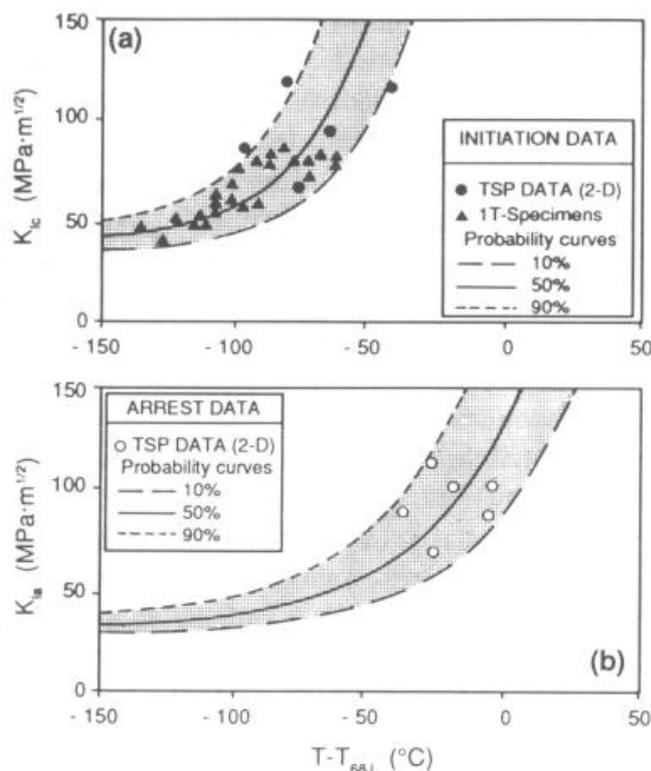


Fig. 2 - Curve di probabilità per l'innesco (a) e l'arresto (b) ottenute da prove di MF e dall'analisi 2-D. Le curve al 50% sono usate come curve di riferimento per la tenacità.

seguito del lavoro si assume come temperatura di riferimento per la transizione la T_{68J} che costituisce la temperatura alla quale si misura una energia Charpy di 68J.

L'applicazione del modello 2-D e il confronto con le caratteristiche del materiale [6] hanno permesso di giungere ad interessanti conclusioni, che hanno confermato la sostanziale adeguatezza dell'approccio basato sulla MFLE e del criterio della tenacità di arresto per questo genere di fenomeni. Peraltro la presenza di effetti 3-D ha suggerito l'esigenza di un esame più approfondito degli esperimenti.

Modelli analitici.

La determinazione completa dello stato di temperatura all'interno del provino è stata effettuata attraverso un modello alle differenze finite che sfruttava come dati di ingresso gli andamenti del coefficiente di scambio termico misurati sperimentalmente. I risultati dell'analisi termica sono stati confrontati con i valori misurati da alcune termocoppie riscontrando sempre un sensibile accordo (differenze inferiori a 5°C). La distribuzione di temperatura così ottenuta è stata utilizzata come 'input' per l'analisi tensionale e di frattura. Lo stato di tensione è stato determinato assumendo condizioni di carico statico ed un comportamento lineare elastico del materiale, poiché una analisi preliminare del fenomeno [4] aveva mostrato l'assenza di significativi effetti plastici e dinamici.

Per l'analisi di frattura sono stati impiegati sia il metodo degli elementi finiti (EF) che il metodo delle 'Weight Function' (WF)[6,7].

Le varie esigenze dell'attività sperimentale hanno imposto lo sviluppo di diversi modelli analitici comprendenti modelli 2-D e 3-D. In particolare, nella fase di progetto degli esperimenti e di pre-

rimento.

In un primo tempo i risultati degli esperimenti sono stati elaborati sulla base di criteri basati sulla Meccanica della Frattura Lineare Elastica (MFLE) e di un modello 2-D del provino. Questo modello ha consentito di ricavare dati effettivi di K_I all'innesco (K_{Ic}) e all'arresto (K_{Ia}) da confrontare con i valori noti dalla caratterizzazione del materiale.

Sulla base dei valori di tenacità ottenuti dalle prove TSP e da quelli ricavati dalla caratterizzazione è stato possibile tracciare delle curve di probabilità di innesco e di arresto che sono riportate nella fig. 2. Per brevità non viene riportata la descrizione del procedimento, per il quale si rimanda a [6]. Si ricorda soltanto che come curve di iso-probabilità sono state adottate delle esponenziali, in conformità con le curve di riferimento per la tenacità consigliate dalle norme ASME. Per poter raccogliere in modo coerente i dati ricavati da prove effettuate con materiali aventi diversi valori di TT è necessario riferire le temperature ad una temperatura che caratterizzi la transizione. Nella fig. 2 e nel

analisi, quando è stato necessario effettuare un notevole numero di valutazioni di K_I , è stato adottato un modello semplificato basato su un approccio 2-D con la tecnica delle WF. La necessità di una accurata interpretazione dei risultati delle prove ha richiesto invece la messa a punto di modelli 3-D allo scopo di analizzare quantitativamente gli effetti prodotti da:

- a) distribuzioni di tensione non uniformi nello spessore;
- b) presenza dei side-grooves;
- c) presenza degli 'unbroken ligaments' ovvero di zone interne alla superficie di frattura rimaste integre;
- d) curvatura di alcuni fronti di fessura.

Per evidenti ragioni di costo, l'analisi 3-D EF completa del provino con frattura è stata effettuata solo in alcuni casi particolari che sono stati assunti come riferimento per valutare l'accuratezza delle tecniche approssimate basate sul metodo delle WF. Per il provino in esame è stata ricavata una WF 3-D approssimata applicando il metodo proposto da Harris [8].

Il valore del FIS per una posizione generica lungo il fronte di fessura è stato ottenuto mediante integrali della forma:

$$K_I(\zeta) = \int_S \sigma_{yy}(x,z) h_{3D}(x,z,\zeta) dx dz \quad (1)$$

in cui: S rappresenta la superficie di frattura (cfr. fig. 1), $\sigma_{yy}(x,z)$ la componente normale alla superficie di fessura dello stato nominale di tensione (la tensione presente nella medesima struttura non fessurata), $h_{3D}(x,z,\zeta)$ la WF e, infine, ζ la coordinata z del punto P generico sul fronte di fessura. Per i casi di riferimento analizzati sono state riscontrate differenze inferiori al 5% nella valutazione del FIS tra la soluzione con le WF e quella con EF (un sostanziale accordo è stato riscontrato anche con analoghe analisi ripetute in letteratura [9,10]).

I fronti di fessura sono stati assimilati ad andamenti parabolici (curve del secondo ordine) ottenuti mediante il metodo dei minimi quadrati direttamente dai profili reali osservati sulla superficie di rottura. In tal modo è stato possibile riprodurre le principali caratteristiche geometriche dei fronti reali, ovvero: la loro concavità e l'eventuale diversa estensione della fessura in corrispondenza dei bordi.

La presenza degli 'unbroken ligaments' è stata simulata mediante un metodo approssimato. Il metodo è basato sull'ipotesi che gli 'unbroken ligaments' stessi producano un effetto principale di disturbo dello stato di tensione nominale e non modifichino invece la WF. In tale ipotesi, se la fessura si apre liberamente, è necessario ammettere che le zone non rotte all'interno della superficie di frattura siano completamente snervate e quindi che si manifestino localmente delle tensioni pari al valore dello snervamento che tendono a richiudere la fessura. Tale stato di tensione di richiusura è stato sovrapposto allo stato di tensione nominale prima di effettuare l'integrale (1). È necessario osservare che, a rigore, la presenza degli 'unbroken ligaments' modifica anche i vincoli geometrici del problema e quindi produce effetti sulla WF. Tuttavia si può ragionevolmente ritenere che il metodo adottato permetta di valutare con sufficiente approssimazione gli effetti degli 'unbroken ligaments' se la loro estensione, come nei casi esaminati, risulta piccola rispetto alla superficie totale di frattura.

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Nel seguito vengono presentati e discussi i risultati dei più significativi esperimenti di 'shock'

termico con particolare riferimento agli effetti 3-D. Per un completo e organico resoconto degli esperimenti e della loro interpretazione 2-D si può far riferimento a [6].

Prova TSP03

L'esperimento TSP03 è stato effettuato sfruttando il medesimo provino impiegato per l'esecuzione della prova precedente TSP02. Durante la TSP02 infatti non era stato riscontrato alcun evento di propagazione e la fessura iniziale aveva subito una storia di carico tale che il FIS aveva raggiunto il suo massimo valore ($105 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) prima che fossero raggiunte le condizioni critiche $K_I = K_{Ic}$. La mancata propagazione è stata quindi attribuita ad un effetto di WPS ('Warm PreStress') che preclude l'innesco quando il K_I decresce nel tempo.

Nel corso della prova TSP03, l'azione di WPS subita dal difetto durante il precedente esperimento, ha prodotto un ritardo temporale nella propagazione rispetto alle previsioni fatte sulla base delle caratteristiche del materiale e, come conseguenza, è stata osservata una singola propagazione di lunghezza relativamente estesa piuttosto che la prevista serie di tre o quattro successive propagazioni più corte. L'innesco si è manifestato ad un livello di K_I ben più elevato del valore della tenacità a frattura e, conseguentemente, la TSP03 non è stata considerata una esperienza valida per la misura della tenacità di innesco ma è stato ricavato un valido dato di tenacità all'arresto K_{Ia} .

Durante la propagazione, la fessura ha subito un aumento medio di circa 30.5 mm partendo dal valore iniziale di 20 mm e la superficie finale di frattura ha assunto una forma concava mostrando un fronte di arresto debolmente incurvato (cfr. fig. 3).

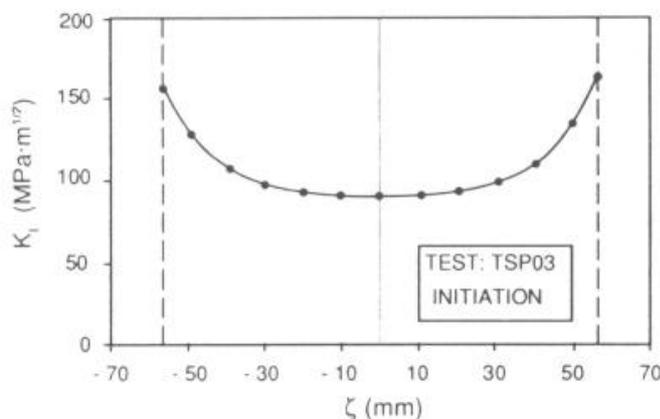


Fig. 4 - TSP03: andamento del FIS in funzione della posizione lungo il fronte all'istante di propagazione.

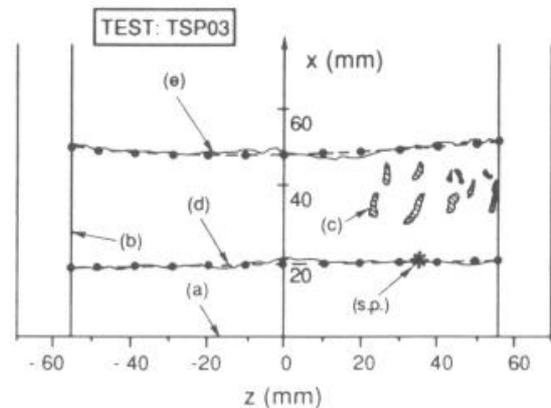


Fig. 3 - Aspetto della superficie di frattura dopo la TSP03: (a) superficie di raffreddamento, (b) base del 'side-groove', (c) 'unbroken ligaments', (d) fronte iniziale, (e) fronte finale. Le linee tratteggiate rappresentano i fronti parabolici usati nell'analisi. L'asterisco (s.p.) indica il punto di innesco della propagazione.

L'elevata propagazione, favorita dall'alto livello di energia elastica accumulata nel provino prima dell'innesco, ha contribuito alla formazione di piccoli 'unbroken ligaments' che sono risultati ben evidenti all'esame ottico della superficie di rottura e che sono riportati nella fig. 3. L'esame al microscopio elettronico a scansione ha dimostrato che il meccanismo di rottura è stato di clivaggio e l'osservazione ottica ha permesso di identificare la posizione, lungo il fronte di innesco, da cui la propagazione ha avuto origine.

Nelle fig. 4 e 5 sono riportati gli andamenti del FIS lungo i fronti di fessura valutati rispettivamente all'istante di propagazione per l'innesco e per l'arresto. Si può osservare che tutte

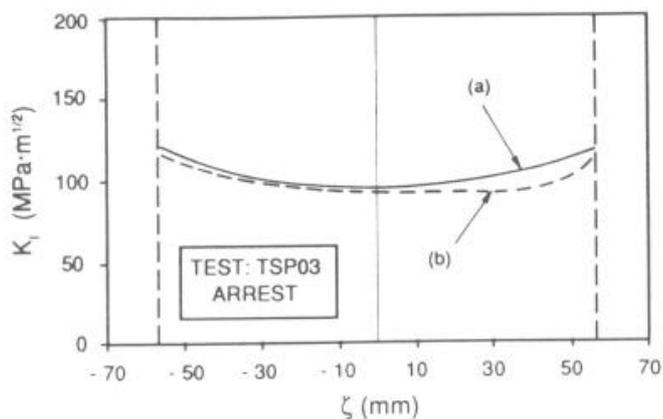


Fig. 5 - TSP03: andamento del FIS all'arresto. La curva (a) è stata ottenuta trascurando gli 'unbroken ligaments' mentre la curva tratteggiata (b), ottenuta dal modello semplificato, mostra la non sensibile riduzione di FIS prodotta dalla loro presenza.

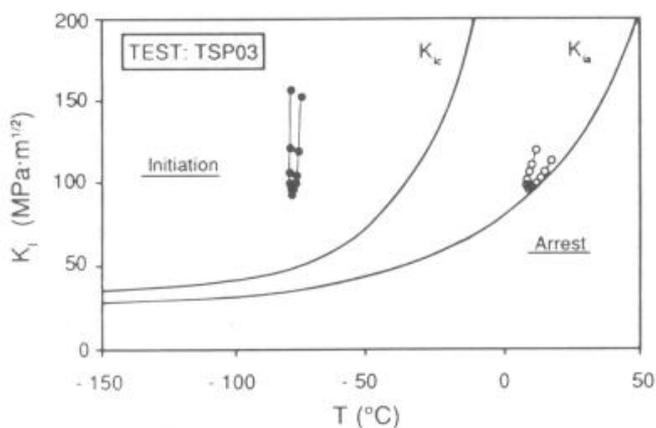


Fig. 6 - TSP03: luoghi geometrici di innesco (cerchi pieni) e di arresto (cerchi vuoti) confrontati con le curve di tenacità al 50%.

anche le curve relative al 50% di tenacità (ovvero quelle per cui si stima che la probabilità di innesco e di arresto sia 0.5) rappresentate in fig.2.

Si può osservare come il luogo caratteristico delle condizioni di innesco si collochi ben al di sopra della curva di tenacità del materiale a causa dell'azione di WPS subita precedentemente. Al contrario il luogo caratteristico dell'arresto si avvicina molto alla curva di K_{Ia} sia come posizione che come andamento. Tale osservazione suggerisce che, per quanto la fessura avesse subito un innesco ad un valore di FIS più elevato, le condizioni di arresto non ne hanno risentito sensibilmente.

Si può notare come la concordanza tra il luogo di arresto e la relativa curva di tenacità si manifesta

le funzioni rappresentate mostrano i valori massimi nelle parti laterali in corrispondenza delle gole dei side-grooves e che tale tendenza appare più marcata per la condizione di innesco (fig.4). E' peraltro interessante notare che il punto di innesco, che è risultato ben visibile in questo esperimento (fig.3), è localizzato in una posizione ($\zeta=35$ mm) in cui la funzione K_I assume un valore prossimo al valore medio (che è più vicino al valore minimo centrale che al massimo laterale). Questa circostanza, peraltro confermata anche in alcuni degli esperimenti successivi, sembra indicare che le condizioni per la propagazione instabile sono raggiunte allorchè il K_I assume un valore limite su una significativa porzione del fronte di fessura. Per questa particolare geometria, l'assunzione del valore massimo del FIS lungo il fronte di fessura come parametro significativo per la stabilità del difetto comporterebbe un eccessivo livello di conservatività.

Dalla fig. 5 si può osservare che gli effetti degli 'unbroken ligaments' sono di modesta entità e consistono in una leggera riduzione globale della funzione lungo tutto il fronte con un effetto più marcato nella zona dove sono effettivamente presenti.

Una rappresentazione utile e concisa dei risultati dell'analisi 3-D può essere ottenuta utilizzando un piano cartesiano che ha come assi la temperatura e il valore del FIS. Per ogni posizione ζ lungo il fronte di fessura si può ricavare una coppia di valori $T-K_I$ (temperatura e FIS locali) che individuano un punto sul grafico. Riportando tutti i punti relativi ad un fronte si ottiene, in genere, un luogo geometrico che caratterizza le condizioni del fronte come mostrato nella fig. 6.

Nella stessa fig. 6, sono state riportate

per tutti i punti del fronte. Ciò è testimoniato dal fatto che il luogo di arresto riproduce ragionevolmente l'andamento della curva K_{Ia} (che è una funzione crescente con la temperatura). Questa circostanza suggerisce che la forma concava del fronte di arresto può essere ragionevolmente spiegata se si assume che la condizione di arresto $K_I(\zeta) = K_{Ia}(T(\zeta))$ sia stata raggiunta simultaneamente in ogni punto.

Prova TSP04

Questo esperimento è stato progettato allo scopo di produrre una chiara dimostrazione del fenomeno di propagazione instabile multipla che si prevede teoricamente nelle sollecitazioni dovute a 'shock' termico. La dimensione iniziale del difetto ($a=12\text{mm}$) e gli altri parametri dell'esperimento sono stati pertanto determinati in modo da indurre la prima propagazione nel minor tempo possibile.

L'emissione acustica e il segnale del COD hanno rivelato con chiarezza che si sono verificati tre successivi eventi di propagazione instabile (rispettivamente a 90, 144 e 240 secondi dopo l'inizio del raffreddamento) e l'esame successivo della superficie di frattura ha mostrato in modo evidente la localizzazione dei fronti di arresto (cfr. fig.7).

In questo esperimento non sono stati osservati 'unbroken ligaments' ed è stato individuato con chiarezza solo il punto in cui si è innescata la seconda propagazione. E' stata confermata la tendenza delle fessure arrestate ad assumere una forma debolmente concava con l'eccezione del primo arresto il cui fronte è risultato praticamente rettilineo.

Le fig. 8 e 9 riportano i luoghi di innesco e di arresto per i fronti di fessura. Per questo esperimento le temperature dell'apice sono state tali che gli eventi di innesco sono da considerarsi validi per la

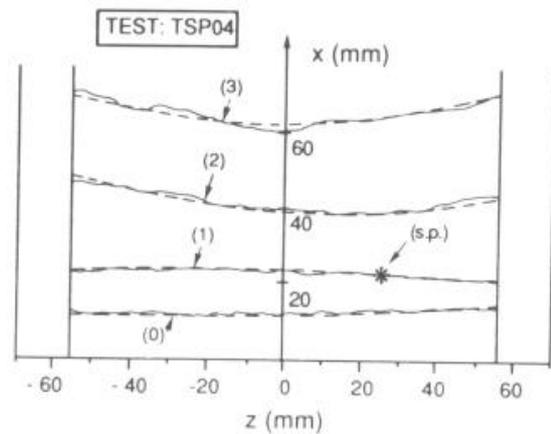


Fig. 7 - Superficie di rottura dopo la TSP04: (0) fessura iniziale; (1,2,3) successivi fronti di arresto. L'asterisco (s.p.) indica il punto da cui è iniziata la seconda propagazione.

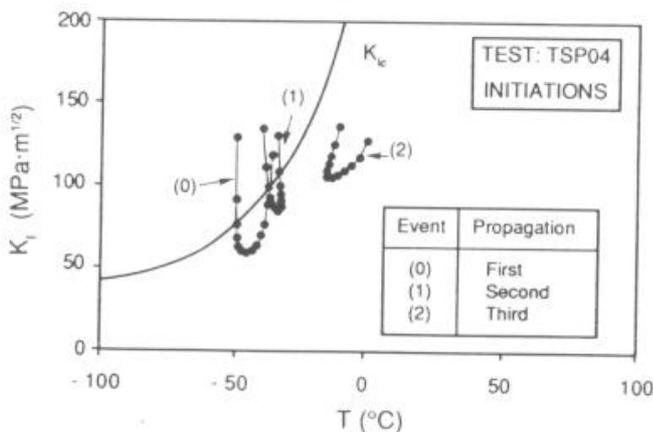


Fig. 8 - TSP04: dati di innesco valutati lungo i fronti effettivi. I numeri si riferiscono ai fronti indicati nella fig. 7.

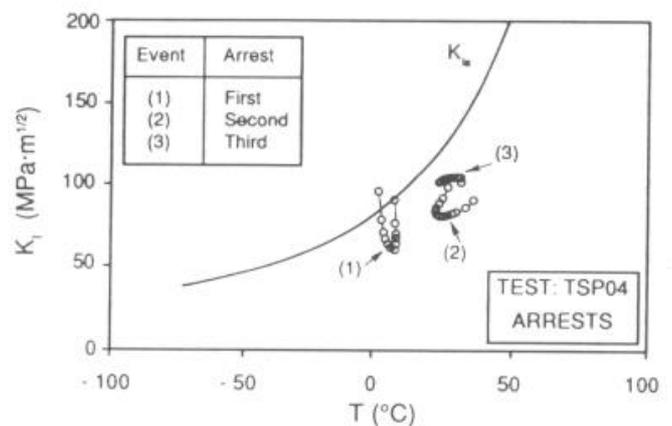


Fig. 9 - TSP04: dati di arresto valutati lungo i fronti effettivi. I numeri si riferiscono ai fronti indicati nella fig. 7.

determinazione del K_{Ic} . La posizione dei luoghi di innesco (fig. 8) è risultata in soddisfacente accordo con la curva di tenacità con probabilità del 50%.

La fig. 8 e la posizione del punto di innesco per la seconda propagazione sembrano avvalorare l'applicabilità del criterio del valor medio del K_I lungo il fronte per caratterizzare le condizioni di instabilità all'innesco piuttosto che l'assunzione del valore massimo del K_I .

Le considerazioni fatte per l'esperimento precedente riguardo l'arresto risultano confermate in questo esperimento ad eccezione del primo arresto.

Prova TSP05

Durante tutte le prove precedenti, la fessura finale aveva raggiunto le condizioni critiche $K_I = K_{Ic}$ dopo che il FIS aveva superato il massimo, dimostrando che tale tipo di WPS svolge una effettiva azione di vincolo alla propagazione. Con questo esperimento è stato fatto il tentativo di quantificare quale carico aggiuntivo, rispetto al valore della tenacità K_{Ic} , sia necessario applicare per indurre la propagazione di una fessura che precedentemente era stata soggetta ad una azione di WPS. Questo obiettivo è stato raggiunto effettuando la prova in due fasi:

- nella fase A, il provino è stato sottoposto ad un transitorio termico di durata limitata allo scopo di raggiungere il massimo FIS prima di arrivare alla condizione di propagazione;
- nella fase B, dopo aver riportato il provino nelle condizioni di equilibrio termico, è stato attuato un transitorio del tutto simile a quello impiegato per la TSP04 al fine di realizzare una elevata probabilità di ripropagazione ($K_I \gg K_{Ic}$).

Durante la fase B, sono stati registrati tre eventi di propagazione a 200, 240 e 375 secondi dopo l'inizio del raffreddamento. Tuttavia l'esame della superficie di frattura ha rivelato che il primo evento non può essere considerato una vera e propria propagazione poichè la fessura aveva subito un avanzamento di pochi millimetri e solo nella parte centrale dello spessore (come mostrato in fig. 10).

Questa propagazione parziale del fronte ('pop-in'), anomala in questo genere di esperimenti, può essere stata prodotta da una non uniforme estensione della zona plastica lungo il fronte della fessura prodotta durante la fase

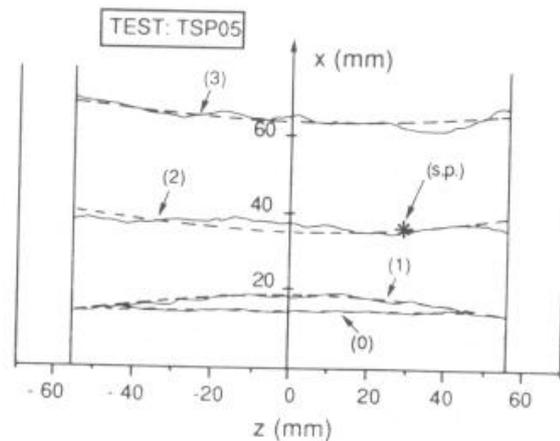


Fig. 10 - Superficie di frattura dopo la TSP05: (0) fessura iniziale; (1) fronte di arresto del 'pop-in', (2,3) successivi fronti di arresto. L'asterisco (s.p.) indica il punto da cui è iniziata la terza propagazione.

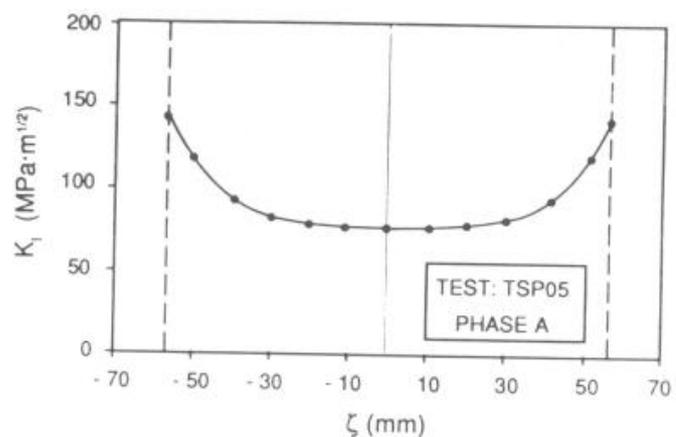


Fig. 11 - TSP05: andamento del FIS in funzione della posizione lungo il fronte all'istante di massimo carico durante la fase A.

A dell'esperimento. Una giustificazione qualitativa può essere tentata osservando la fig.11 che mostra l'andamento del FIS lungo il fronte per la fessura iniziale in corrispondenza dell'istante in cui è stato raggiunto il massimo livello di sollecitazione durante la fase A. Si può osservare che il valore in corrispondenza delle parti esterne è notevolmente più elevato che al centro. Se si applica il modello di Irwing, il raggio plastico (che risulta proporzionale a K_I^2) stimato nei pressi delle zone laterali è stato circa quattro volte maggiore che nel centro. Questo stato di deformazione plastica non uniforme può aver prodotto uno stato di autotensione di compressione per l'apice della fessura con i maggiori effetti in corrispondenza delle parti laterali del fronte.

Nelle fig. 12 e 13 sono riportati i luoghi di innesco e di arresto. Risulta chiaramente visibile la forma anomala del fronte dopo il 'pop-in' per entrambi i tipi di dati (la superficie di frattura è convessa invece che concava). Si può pensare che la differenza tra i dati misurati al 'pop-in' e le curve di tenacità, che sono conseguenza del WPS, potrebbero essere spiegati utilizzando un adatto modello che, oltre agli effetti tridimensionali, potesse tener conto anche degli effetti indotti dalla plasticità sullo stato di tensione. Tale modello esula peraltro dai limiti della presente analisi basata su ipotesi lineari elastiche.

La forma dei successivi fronti di arresto, come è ragionevole aspettarsi, non appare invece affetta dalla presenza delle tensioni residue indotte dal WPS. I fronti di arresto appaiono simili a quelli osservati nelle prove precedenti e la loro forma è congruente con la legge di crescita del K_{Ia} con la temperatura.

DISCUSSIONE

Nelle figure 14 e 15 i luoghi relativi a tutti gli eventi validi di innesco e di arresto sono raccolti insieme alle curve di probabilità della fig.2 ottenute mediante una interpretazione 2-D delle prove stesse.

Si può osservare che, avendo escluso gli eventi in qualche misura influenzati da fenomeni di WPS, sia i dati di innesco che di arresto dedotti con l'analisi 3-D cadono all'interno della banda di dispersione 10%-90% ottenuta con un approccio 2-D. Questo indica che, per questo genere di esperimenti si

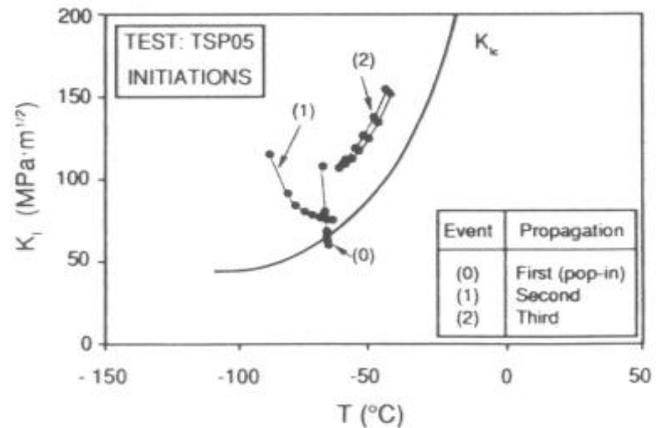


Fig. 12- TSP05: dati di innesco valutati lungo i fronti effettivi. I numeri si riferiscono ai fronti indicati nella fig. 10.

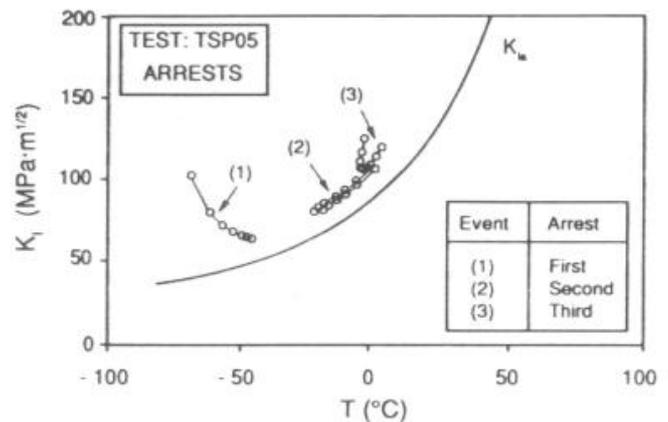


Fig. 13 - TSP05: dati di arresto valutati lungo i fronti effettivi. I numeri si riferiscono ai fronti indicati nella fig. 10.

riscontra un sostanziale accordo tra l'interpretazione 2-D e 3-D.

Per i fenomeni di arresto tale accordo sembra essere giustificato dalla tendenza mostrata dai fronti di arresto ad assumere una forma tale che la condizione $K_I = K_{Ia}$ viene raggiunta in maniera uniforme su tutti i punti. Altre differenze, dovute per esempio alla presenza di 'unbroken ligaments', non si sono dimostrate significative a causa della limitata estensione di tali fenomeni.

Per quanto riguarda i dati di innesco, la forma del fronte di fessura risulta sempre imposta da eventi precedenti e indipendenti (si tratta o di una fessura iniziale prodotta artificialmente oppure di una fessura arrestatasi in una precedente propagazione). Questo giustifica la forma più 'irregolare'

mostrata dai luoghi di innesco nei confronti di quelli di arresto. D'altro canto, i punti di effettivo innesco, quando visibili, sono sempre risultati localizzati in zone centrali del fronte suggerendo che l'evento di propagazione sembra essere dominato più dal valor medio del K_I lungo il fronte piuttosto che dal suo valore massimo.

Per il materiale in esame e per questa geometria si può pensare che la fessura tenda a propagare instabilmente solo quando risulta disponibile una energia di propagazione sufficiente su gran parte del fronte del difetto. Questo conferma la concordanza dell'interpretazione 2-D e 3-D per le condizioni di innesco, infatti per questa geometria di fessura un semplice modello 2-D, che determina valori medi della temperatura dell'apice e del K_I , può fornire ragionevoli stime ed essere pertanto applicato in problemi pratici. E' comunque doveroso notare che tale conclusione non è estendibile a situazioni diverse nelle quali siano presenti fessure con fronti molto estesi o di forma complessa.

L'interpretazione 3-D conferma le principali conclusioni che erano state ricavate dagli esperimenti sulla base di modelli 2-D [6]. In particolare le prove TSP04 e TSP05 mostrano che i dati sia d'innesco che di arresto ottenuti in un singolo esperimento risultano raccolti in una banda di dispersione più ristretta di quelli ottenuti da tutti gli esperimenti. Inoltre si osserva che, se i dati di innesco per una prova si trovano al di sopra della curva di tenacità media (curva al 50%), lo stesso avviene anche per i dati di arresto. Queste due circostanze sembrano indicare che le proprietà del materiale all'interno di zone ristrette (come quelle coinvolte nei fenomeni di propagazione) risul-

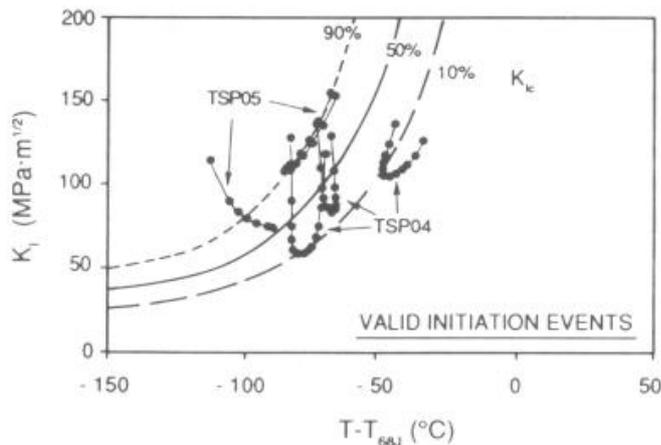


Fig. 14 - Raccolta dei dati di innesco validi per tutte le prove TSP a confronto con le curve di K_{Ic} riportate nella fig. 2(a).

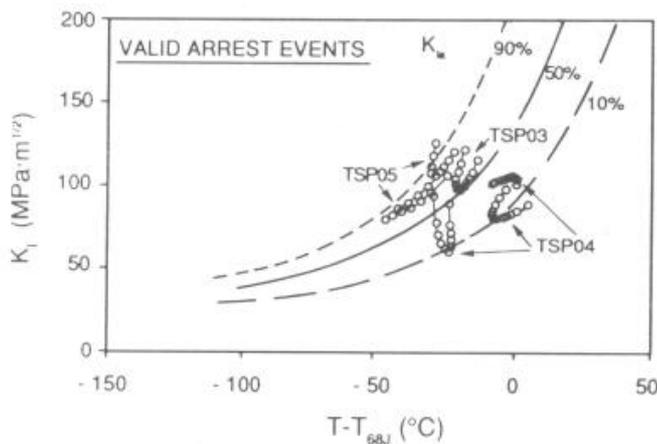


Fig. 15 - Raccolta dei dati di arresto validi per tutte le prove TSP a confronto con le curve di K_{Ia} riportate nella fig. 2(b).

tano più omogenee di quelle ricavabili da pezzi più grandi in differenti posizioni.

L'analisi quantitativa degli eventi non validi per la misura della tenacità (ovvero l'innesco della TSP03 e il 'pop-in' sia all'innesco che all'arresto per la TSP05) richiederebbero l'impiego di un modello 3-D elasto-plastico che è al di là dei limiti della presente trattazione. Tuttavia l'analisi 3-D elastica ha suggerito una ragionevole spiegazione qualitativa dei comportamenti osservati per questi fenomeni più complessi.

CONCLUSIONI

Sono stati riassunti i principali risultati ottenuti da una serie di prove di propagazione di fessure dovute a tensioni termiche su lamiere di elevato spessore.

E' stata presentata una analisi che ha consentito la valutazione di effetti 3-D sul Fattore di Intensificazione degli Sforzi (FIS) dovuti sia alla geometria che al tipo di carico applicato. L'analisi di Meccanica della Frattura è stata condotta mediante il metodo delle 'Weight Function' che ha permesso di ottenere in modo efficiente il FIS in condizioni di carico complesse e considerando l'effettiva geometria dei difetti osservati.

Nel complesso i risultati dell'analisi 3-D si sono mostrati in ragionevole accordo con quelli dell'analisi 2-D presentati in un precedente lavoro. Tale accordo ha permesso di confermare le conclusioni che erano state tratte dall'esame 2-D degli esperimenti. In particolare è stata confermata la validità dell'approccio basato sulla Meccanica della Frattura Lineare Elastica e del concetto del K_{Ia} per questo genere di problemi.

L'analisi 3-D e l'osservazione delle superfici di frattura hanno indicato inoltre che, per questo tipo di geometria, le condizioni di innesco non sono controllate dal valore massimo del K_I lungo il fronte e che un valore caratteristico dell'intero fronte (ad esempio il valor medio) è più adatto a caratterizzarne il comportamento all'innesco.

L'accordo tra l'analisi 2-D e quella 3-D per le condizioni di arresto si spiega con la modesta estensione degli 'unbroken ligaments', quando presenti. Inoltre, è stato osservato che la forma dei fronti di arresto dipende della dipendenza del K_{Ia} con la temperatura e che le condizioni di arresto sembrano essere state raggiunte in modo uniforme su tutta l'estensione del fronte.

L'analisi 3-D ha confermato che alcuni eventi non possono essere considerati validi per la misura della tenacità (l'innesco della TSP03 e la prima propagazione per la TSP05). In particolare, per la TSP05, i significativi picchi di K_I osservati durante la fase di WPS possono giustificare l'anomala propagazione osservata nella fase successiva.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Vitale 'Trends in the evaluation of the structural integrity of RPVs', *Nucl. Engng. & Des.*, Vol. 116, 1989, pp.73-100.
- [2] E. Vitale 'Probabilistic codes for structural reliability evaluation', ASTIC-DCMN Seminar on 'Numerical Methods for Structural Integrity Evaluation', Varna (BG), Oct. 31 - Nov. 2, 1989.
- [3] Sandararajan C. 'Probabilistic assessment of pressure vessel and piping reliability' *J. Pres. Ves. Tech.*, Vol. 108, 1986, pp.1-13.
- [4] M. Beghini, P.P. Milella, E. Vitale 'Thermal Shock Experiments on Large Size Plates with Surface Flaws' IAEA Specialists' Meeting on 'Fracture Mechanics Verification by Large Scale Testing', Stoccarda, 1988. EGF/ESIS Publication 8, Ed. K. Kussmaul, MEP, Londra 1991,

pp.339-356.

- [5] M.Beghini, E.Vitale 'Crack Initiation and Arrest During Thermal Shock Tests on Large Size Plates with Surface Cracks', Proc. 10th SMiRT Conference, Anaheim (California), 1989, Vol. F, ed. A.H.Hadjian, AASMiRT, Los Angeles, 1989, pp. 31-36.
- [6] E.Vitale, M. Beghini 'Thermal Shock Experiments on Large Size Plates of A533-B Steel', *Int. J. Press. Vess. & Piping*, Vol. 46, 1991, pp.289-338.
- [7] M.Beghini, E.Vitale 'Analisi di lastre fessurate sottoposte ad intensi transitori termici', atti del IX Congresso Nazionale AIMETA, Bari 1988 Vol. 1, pp. 181-183.
- [8] D.O.Harris 'Slicing procedure for approximate three dimensional Green's function for cracks in plates of finite thickness', *Int. J. Fract.*, Vol.9, 1973, pp. 21-32.
- [9] G.Yagawa, T.Nishioka 'Three-dimensional F.E. analysis for through-wall cracks in thick plate', *Int. J. Num. Meth. Engng.*, Vol. 12, 1978, pp.1295-310.
- [10] Y.Yamamoto, Y.Sumii ' Stress intensity factors for three dimensional cracks', *Int. J. Fract.*, Vol.14, 1978, pp.14-38.