

CRITERI DI MECCANICA DELLA FRATTURA APPLICATI ALLA FABBRICAZIONE DI RUOTE FERROVIARIE

Dott. Ing. Andrea Ghidini ^a

^a *Responsabile Metallurgia, Progetti di Sviluppo e Laboratori
Lucchini Sidermeccanica via G. Paglia 45 24065 Lovere (BG)
e-mail: a.ghidini@lucchini.it*

SOMMARIO

I casi di rottura di ruote monoblocco che hanno afflitto in passato le reti ferroviarie hanno indotto ad introdurre nelle specifiche di approvvigionamento europee dei materiali criteri di collaudo cautelativi nei confronti delle rotture fragili, scaturiti da approfonditi studi statistici, che hanno coinvolto, per anni, enti normatori, reti ferroviarie e fabbricanti di materiale rotabile. Lucchini Sidermeccanica racconta la sua esperienza nell'applicazione dei criteri di Meccanica della Frattura alla fabbricazione e collaudo di ruote ferroviarie appositamente studiate per resistere alla rottura di schianto.

ABSTRACT

Lucchini Sidermeccanica racconta le sue esperienze passate e presenti sulla valutazione della tenacità a frattura di ruote ferroviarie e sulla definizione dei criteri di accettazione del materiale in collaudo proposti per evitare rotture fragili. Attraverso l'applicazione di parametri tradizionali ed innovativi della Meccanica della Frattura, si è cercato di far luce sulla correlazione che intrinsecamente lega la tenacità a frattura ed i parametri microstrutturali di processo.

1. INTRODUZIONE

A seguito dell'aumento delle velocità di trazione dei carri merci, la ruota ferroviaria è stata sottoposta ad un incremento di sollecitazioni termo-meccaniche, dovute ad una più elevata potenza frenante applicata al rotolamento. L'aumento delle velocità di trazione dei carri merci aveva spinto le reti ferroviarie a sostituire le ruote cerchiata con le ruote monoblocco, considerate più sicure, grazie allo stato di pre-compressione iniziale, conferito dal trattamento termico, che poteva inibire la propagazione di cricche. Nel frattempo, ci si era, tuttavia, resi conto che la ruota monoblocco, pur risultando migliore della ruota cerchiata, non sempre era atta a soddisfare le gravose condizioni di servizio, visto che casi di rottura di ruote in esercizio continuavano a manifestarsi. Le rotture si verificavano, per lo più, dopo lunghi percorsi in discesa: la rottura non avveniva mai durante l'attraversamento del tratto pendente, ma alla fine di tale percorso e dopo il conseguente allentamento dei freni, quando i carichi periferici termici delle ruote surriscaldiate si trasformavano, durante il raffreddamento delle stesse, in tensioni di trazione sulle ruote. In questo modo, veniva favorito l'innescò di cricche radiali sul rotolamento delle ruote e, in casi estremi, si poteva giungere alla rottura fragile della ruota stessa, una volta raggiunta la dimensione critica del difetto. Un esempio di ruota ferroviaria rotta per effetto dei carichi termici è visibile in Figura 1. Il livello delle tensioni interne accumulate durante i cicli di frenatura di ruote monoblocco era già stato oggetto di approfondite

ricerche, effettuate in quegli anni, mediante estensimetria e birifrangenza acustica.

Per far fronte all'effetto di questi carichi termici di esercizio così elevati che comunque affliggevano le ruote monoblocco, era nata la necessità di migliorare il comportamento a frattura delle ruote stesse, attraverso l'introduzione nei capitolati tecnici di provvedimenti, atti a:

- migliorare la tenacità del materiale
- ottimizzare le tensioni residue di trattamento termico della ruota
- garantire la stabilità dimensionale della ruota, in presenza di sollecitazioni termiche, grazie ad una adeguata geometria.

Vista la complessità degli argomenti, per ragioni di spazio, la seguente memoria intende trattare ed approfondire il primo punto, relativo al miglioramento della tenacità a frattura del materiale.

Le condizioni convenzionali di fornitura per ruote monoblocco facevano allora riferimento alla specifica U.I.C. 812.3. 5ª edizione 1-1-84. Il materiale R7T era, ed è tuttora, quello maggiormente utilizzato per ruote di carri merci europee, in quanto l'esperienza ha dimostrato che le ruote in questo materiale sono le meno soggette a rotture. Tuttavia, il materiale R7T di allora che soddisfaceva la specifica U.I.C. 812.3. 5ª edizione 01-01-84 (analisi chimica, resistenza, resilienza, etc.), in pratica, poteva avere valori di tenacità a frattura estremamente variabili, in quanto la verifica della tenacità a frattura non veniva richiesta.

L'introduzione, nelle specifiche di approvvigionamento dei materiali, di criteri di collaudo cautelativi nei confronti delle rotture fragili è stato, pertanto, il primo passo, reso possibile da approfonditi studi statistici che hanno coinvolto per anni enti normatori, reti ferroviarie e fabbricanti di materiale rotabile.

Una delle attività più significative di quel periodo e degna di nota è stata quella svolta dal comitato ERRI B169.4, che ha determinato criteri e metodologie, introdotte poi nelle nuove edizioni della normativa UIC812.3 Mod. 01-07-95 e nella nuova specifica EN13262.

A seguito della necessità di garantire un livello minimo di tenacità a frattura sulle ruote monoblocco, Lucchini Sidermeccanica, come fabbricante di materiale ferroviario, ha voluto portare avanti una approfondita attività di ricerca, in due direzioni distinte:

- ❖ studio dei parametri classici ed innovativi di Meccanica della Frattura atti a stabilire il livello di accettabilità minimo garantibile per la ruota ferroviaria
- ❖ individuazione dei legami tra caratteristiche micro-fisiche dell'acciaio, valori di tenacità a frattura e processo di fabbricazione delle ruote.

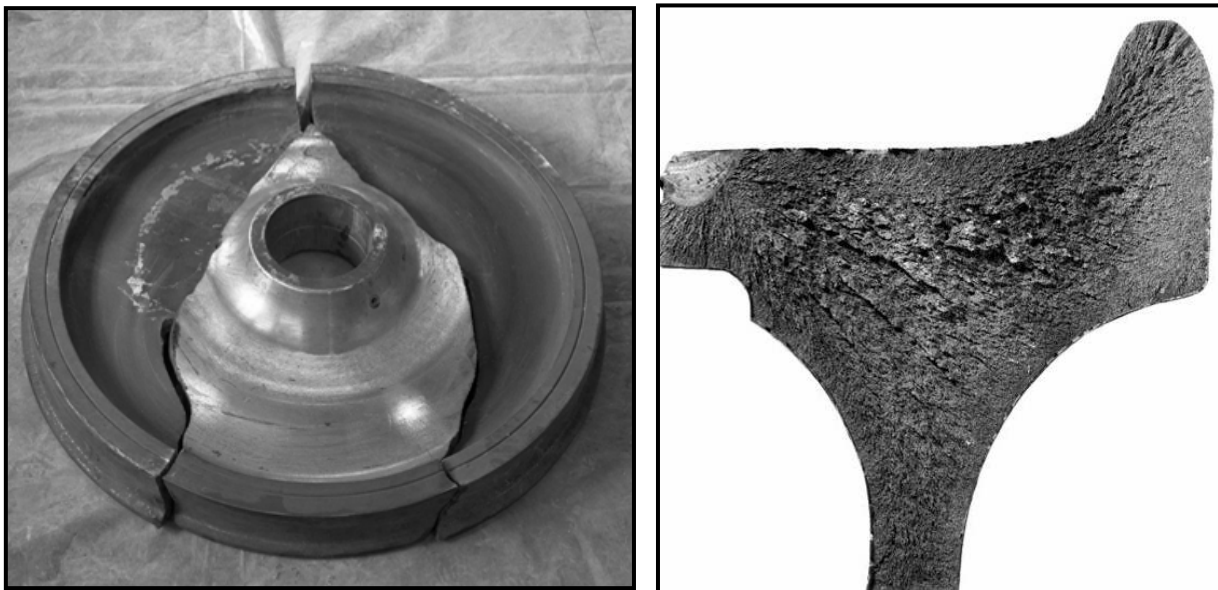


Figura 1 : esempio di ruota ferroviaria rotta per effetto di carichi termici

2. CARATTERIZZAZIONE DI RUOTE FERROVIARIE MEDIANTE APPLICAZIONE DI CRITERI CLASSICI DI MECCANICA DELLA FRATTURA

Lucchini Sidermeccanica ha proceduto alla caratterizzazione di ruote monoblocco nei materiali più disparati, secondo i criteri classici della Meccanica della Frattura. Il prelievo di campioni C.T. 30 nella corona delle ruote è stato effettuato secondo lo schema riportato nella Figura 2.

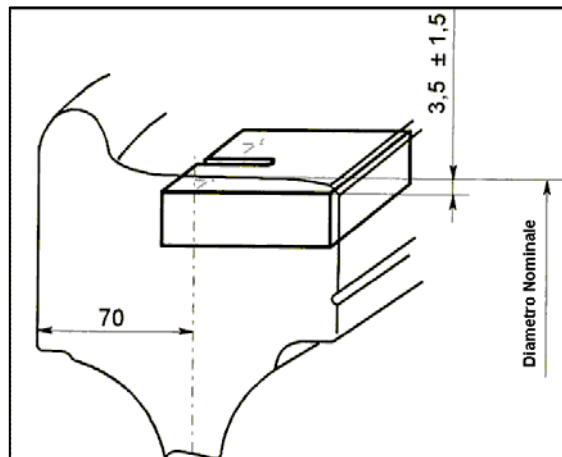


Figura 2: posizione di prelievo del campione C.T. 30 dal rotolamento di una ruota monoblocco

E' stato, dapprima, applicato il metodo per la determinazione del fattore di intensificazione degli sforzi K_{IC} secondo la normativa ASTM E399/05, che permette di ottenere una misura della tenacità a frattura in campo lineare elastico: in condizioni di deformazione piana, in presenza di un intaglio ed in condizioni elastiche, il campo di sforzi all'apice della cricca può essere descritto dal fattore di intensificazione delle tensioni K_I ; poiché K_I è legato a G , energia per unità di superficie disponibile per l'avanzamento della cricca, la frattura in campo elastico avviene per un valore ben preciso di K_I , che viene preso come indice della tenacità del materiale e chiamato K_{IC} . La determinazione di K_{IC} avviene attraverso il calcolo del valore di K_I applicato all'atto della rottura del provino e la verifica successiva, atta ad assicurarsi che lo spessore del campione di prova, all'atto della frattura, garantisca effettivamente condizioni di deformazione piana. Nel caso della ruota ferroviaria, è stato verificato che gran parte dei valori ottenuti a 20°C sono dei K_Q , e non dei K_{IC} , non essendo rispettate dal provino C.T. 30 le limitazioni che garantiscono il regime lineare elastico di deformazione piana della normativa ASTM E399/05. Il parametro di tenacità K_Q non è, pertanto, una costante del materiale, dipendendo dalla geometria e dalle dimensioni del campione. Tuttavia, a parità di provino e di posizione di prelievo, può essere utilizzato come misura della tenacità a frattura di un manufatto di quel particolare spessore. Per la caratterizzazione delle ruote monoblocco, che non hanno sufficiente spessore in corona per dar luogo ad un comportamento in "plain strain", il parametro di tenacità K_Q può comunque fornire una valutazione comparativa della tenacità a frattura della ruota. La caratterizzazione delle ruote monoblocco semplicemente da un punto di vista del parametro di tenacità K_Q non è comunque da ritenere completa, da sola, al fine di garantire la salvaguardia dalle rotture di schianto. Nasce, pertanto, l'esigenza di ricorrere ad altri parametri, di natura prevalentemente energetica che, insieme al K_Q , completino l'informazione. Infatti, la forma del diagramma carico-apertura (in particolare l'area) rappresenta uno dei parametri di massimo interesse: essa è l'energia effettivamente assorbita prima della rottura di schianto dal provino, in condizioni locali di post-snervamento, prima che la cricca divenga instabile. Pertanto, se nel diagramma carico-apertura si verifica, come spesso accade, uno scostamento della linearità, ciò non significa che si abbia propagazione instabile, ma solo un progressivo aumento della zona plastica a fondo intaglio, con un arrotondamento dell'apice della cricca, ove si hanno le massime deformazioni; si sono, cioè, create quantità significative di plasticità e di strappo duttile stabile, che non devono essere trascurate nel calcolo della tenacità a frattura, finché non si raggiunga il carico massimo: è il caso tipico di "unstable fracture on rising load", riscontrabile, di solito, sulle ruote monoblocco esaminate. Tale valutazione concorda con quanto sperimentato anche da altri ricercatori, che avevano ipotizzato di ricorrere, in certi casi, alla determinazione di J integrale (J_{IC}), parametro della Meccanica della Frattura post-snervamento di costosa e complessa determinazione, e al conseguente ricalcolo di K_{IC} da J_{IC} (K_{JC}).

3. CARATTERIZZAZIONE DI RUOTE FERROVIARIE MEDIANTE APPLICAZIONE DI CRITERI INNOVATIVI DI MECCANICA DELLA FRATTURA

La strada scelta da Lucchini Sidermeccanica è stata quella di utilizzare, a fianco del parametro K_Q , il parametro di energia equivalente K_{E-E} , determinato inizialmente secondo la normativa ASTM E992/84; tale normativa è stata, però, ritirata senza sostituzione nel 1997, probabilmente perchè il parametro di energia equivalente K_{E-E} era di uso rarissimo e fortemente dipendente dallo spessore del provino, come, del resto, ammetteva la norma stessa. Per tale ragione, Lucchini Sidermeccanica ha proceduto a redigere una pratica operativa interna, appositamente dedicata alla determinazione del parametro K_{E-E} su ruote monoblocco ferroviarie e riferita esclusivamente a provini C.T.30. Le misure del parametro K_{EE} forniscono un metodo semplice per determinare la tenacità a frattura dei campioni che sono relativamente piccoli, presi da un componente di spessore limitato. Per tale ragione, il parametro K_{EE} , combinato col parametro K_Q , può fornire ulteriori informazioni sulla tenacità a frattura delle ruote monoblocco e può facilmente essere usato per definire un criterio più completo di caratterizzazione metallurgica di un componente ferroviario. Sia il parametro K_Q che il parametro K_{EE} possono essere determinati dallo stesso campione C.T. 30, prelevato dalla corona della ruota monoblocco, come indicato in Figura 2. Lucchini Sidermeccanica ricava, in genere, 3 provini C.T. 30 per ogni colata (6 provini per le qualifiche) di ruote monoblocco, equamente distribuiti intorno alla corona della ruota prelevata per prove meccaniche. Le modalità di esecuzione della prova per la determinazione della tenacità a frattura K_{EE} di ruote ferroviarie, utilizzando i provini compatti C.T.30, pre-criccati a fatica, consistono praticamente nell'applicare procedure di pre-cricatura a fatica e di rottura in accordo a quanto stabilito dalla normativa ASTM E 399/05. La temperatura di prova è quella ambiente.

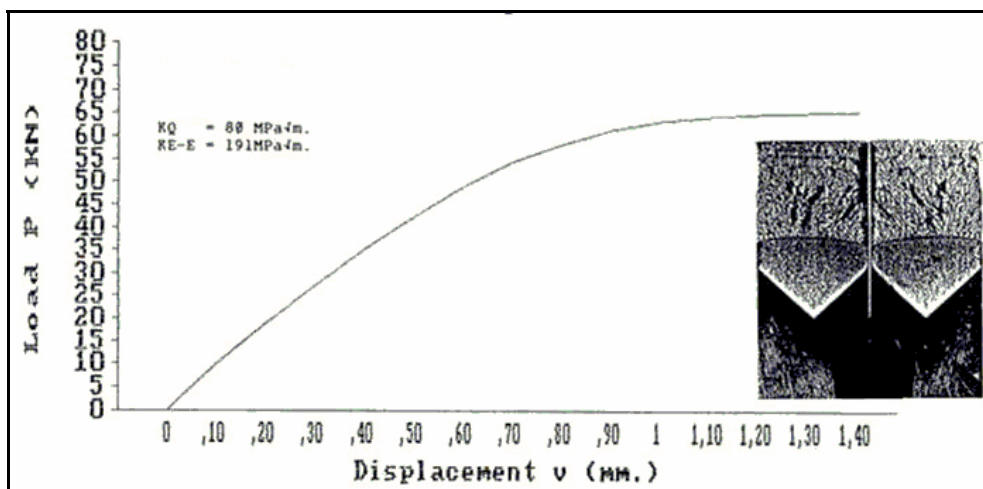


Figura 3: diagramma di un materiale con elevata tenacità a frattura, sia in termini di K_Q che di K_{E-E}

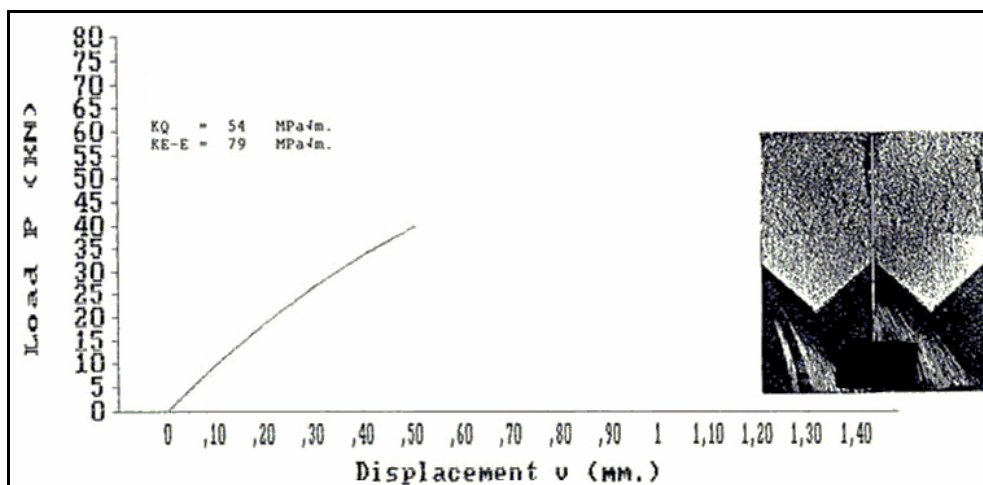


Figura 4: diagramma di una ruota monoblocco fragile, con valori di K_Q e K_{E-E} assai bassi

Il parametro K_{EE} è calcolato utilizzando il diagramma carico-spostamento usato per il parametro K_Q , servendosi dell'area che si riferisce al carico massimo, mantenuto senza instabilità, che si manifesta anche in condizioni di non linearità. In pratica, viene costruito un triangolo di un'area equivalente a quella sottesa fino a carico massimo, allungando la parte lineare della curva. Il vertice di questo triangolo rappresenta il valore del carico equivalente P_E che viene utilizzato per calcolare il parametro K_{EE} , in accordo alla stessa equazione di calcolo della specifica ASTM E399.05. La prova deve continuare, fino a ben oltre il carico massimo, per garantire che il carico massimo stesso possa essere rilevato. Le equazioni di calcolo per il parametro di energia equivalente K_{EE} sono le stesse di quelle utilizzate nella normativa ASTM E 399/05, con un'eccezione, ossia la definizione del carico utilizzato nelle equazioni K_Q della normativa ASTM E 399/05. Le caratterizzazioni condotte hanno portato alla convinzione che tale parametro, abbinato al K_Q , sia in grado di dare una informazione più completa della tenacità a frattura delle ruote monoblocco e potrebbe facilmente essere utilizzato per la definizione di un criterio di accettazione del materiale in collaudo più rigoroso e completo. Infatti, con un solo provino C.T. 30, si possono valutare entrambi i parametri K_Q e K_{EE} , cosa estremamente vantaggiosa in termini di tempi e di costi: con una sola prova si è in grado di conoscere contemporaneamente la tenacità a frattura in campo lineare elastico della ruota e quella in condizioni post - snervamento.

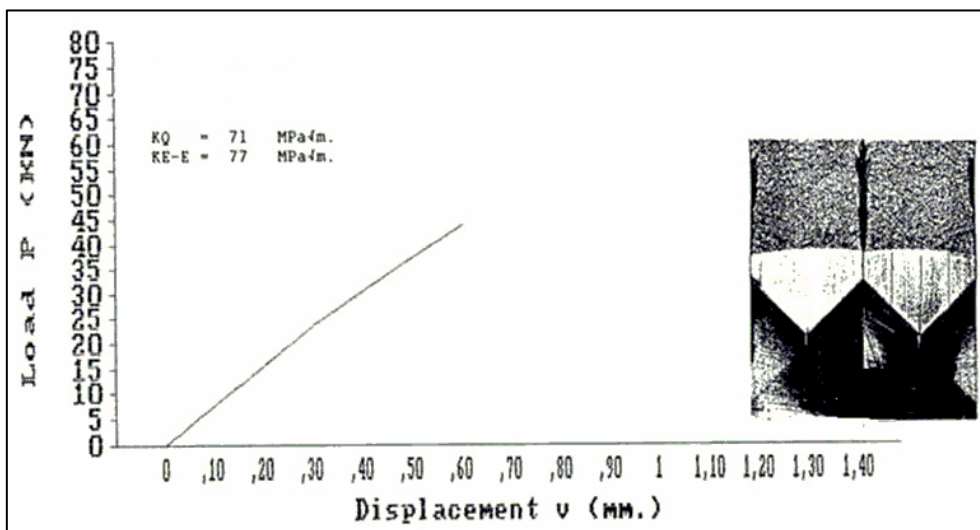


Figura 5: diagramma di un materiale con il medesimo valore di tenacità a frattura K_Q del materiale di Figura 6, ma con valore assai più basso del parametro di energia equivalente K_{E-E}

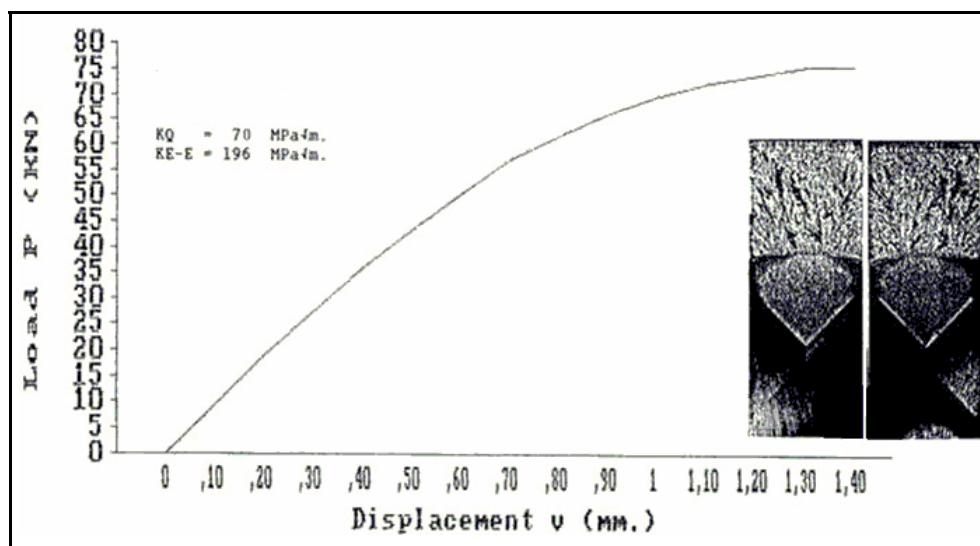


Figura 6: diagramma di un materiale con il medesimo valore di tenacità a frattura K_Q del materiale di Figura 5, ma con valore assai più alto del parametro di energia equivalente K_{E-E}

Si può facilmente comprendere che, se K_Q sarà maggiore di un certo valore di soglia, la conoscenza di K_{E-E} darà comunque un'informazione in più sul comportamento in campo elasto-plastico, anche se non indispensabile. Ma qualora K_Q risultasse minore del valore di soglia, allora diverrà fondamentale l'esame del K_{E-E} , per decidere l'idoneità del materiale.

Questa ipotesi è dimostrata nei diagrammi carico-apertura delle prove eseguite da Lucchini Sidermeccanica, di cui riportiamo alcuni esempi significativi. Nelle Figure 3, 4, 5, 6 sono visibili alcuni diagrammi carico-spostamento più tipici ed esplicativi, riscontrati durante la caratterizzazione delle ruote monoblocco. In essi vengono anche riportati i valori rispettivi dei due parametri di Meccanica della Frattura K_Q , K_{E-E} e la fotografia della superficie di frattura. In particolare, nella Figura 3, è riportato il diagramma di una ruota monoblocco con elevata tenacità a frattura, sia in termini di K_Q che di K_{E-E} . Infatti, l'area del diagramma è assai estesa; inoltre, l'aspetto della frattura è di tipo tenace.

Per contro, in Figura 4, è riportato il diagramma di una ruota monoblocco fragile: infatti, entrambi i parametri di tenacità a frattura K_Q e K_{E-E} sono assai bassi (area limitata); l'aspetto della frattura, inoltre, conferma la fragilità riscontrata.

Nelle Figure 5 e 6 sono, invece, rappresentati i diagrammi relativi a due ruote monoblocco che hanno il medesimo valore di tenacità a frattura K_Q , ma valori assai diversi del parametro di energia equivalente K_{E-E} : l'area dei diagrammi carico-spostamento è assai diversa; inoltre, la superficie di frattura del campione con area meno estesa e K_{E-E} minore conferma la maggiore fragilità.

4. CORRELAZIONE TRA TENACITÀ A FRATTURA E PARAMETRI MICROSTRUTTURALI LEGATI AL PROCESSO DI FABBRICAZIONE DI RUOTE FERROVIARIE

Al fine di comprendere il legame che intrinsecamente lega la tenacità a frattura e i parametri microstrutturali e di processo, Lucchini Sidermeccanica ha svolto una lunga ed approfondita attività di ricerca. Le intuizioni relative al legame tra la tenacità a frattura e i parametri del processo di fabbricazione hanno portato sempre più alla convinzione che la qualità del prodotto nascesse con la fabbricazione dell'acciaio e, pertanto, in tale fase la azienda ha riposto la massima attenzione. La messa a punto nel tempo di un processo di fabbricazione mirato alla qualità metallurgica del prodotto, e via via supportato da caratterizzazioni metallurgiche approfondite e da studi di Meccanica della Frattura, ha condotto all'ottenimento di risultati attuali soddisfacenti, in termini di sicurezza ed affidabilità del prodotto. La determinazione sperimentale delle proprietà di tenacità a frattura costituisce senza dubbio uno degli aspetti più importanti nella caratterizzazione di una ruota monoblocco, ai fini di cautelarsi dalle rotture fragili. Va comunque ribadito che la Meccanica della Frattura affronta il fenomeno soprattutto da un punto di vista macroscopico, cioè cerca di stabilire adatti criteri ingegneristici per prevedere le condizioni di inizio di propagazione instabile di una cricca, senza interessarsi direttamente alle modalità di propagazione della stessa e ai particolari aspetti della superficie di frattura. La maggior parte dei criteri della Meccanica della Frattura si basa, infatti, sulla teoria dell'elasticità e della elasto-plasticità; perciò non può tener conto di ciò che accade all'atto della rottura a livello microscopico. Risulta, invece, della massima importanza riuscire a correlare i parametri microstrutturali alla tenacità a frattura, ai fini di un miglioramento qualitativo in fabbricazione. A tal fine, la letteratura tecnica dice che devono essere svolte considerazioni differenti allorché ci si trovi di fronte a rotture completamente fragili o parzialmente duttili. Nel caso di fratture fragili, vi è un consenso quasi generale tra gli studiosi che si sono occupati dell'argomento nell'individuare un unico modello matematico in grado di correlare i parametri microstrutturali con la tenacità a frattura. Nel caso di fratture duttili, invece, i ricercatori impegnati in tale campo hanno proposto una grande varietà di formulazioni matematiche, ma nessuna di queste sembra essere atta ad interpretare efficacemente la complessa interdipendenza tra tenacità a frattura e parametri microstrutturali. Nel caso specifico di ruote monoblocco in acciaio ER7T con diversi valori di tenacità a frattura, indagini metallurgiche approfondite sono state condotte dalla Lucchini Sidermeccanica, al fine di correlare in modo qualitativo la tenacità a frattura ai parametri microstrutturali di processo. In sintesi, si è constatato che elevati livelli di tenacità a frattura, analoghi a quelli della ruota in Figura 3, sono associati normalmente ad uno stato microinclusionale e ad una microstruttura del tipo di Figura 7, mentre a bassi valori di tenacità a frattura, come quelli rappresentati in Figura 4, corrispondono microinclusioni e microstruttura come nella Figura 8. È facile notare come ben diverso risulti il grado di micropurezza nei due casi: l'acciaio della ruota di Figura 3 è stato fabbricato secondo una pratica operativa appropriata, che prevede, in particolare, affinazione in Ladle Fournace LF, degassaggio sotto vuoto in Tank Degassing (processo VD), una desolfurazione spinta ed un colaggio in sorgente con protezione del getto in argon, mentre la ruota di Figura 4, pur nel rispetto della specifica U.I.C. ed EN, proviene

da processi di fabbricazione al forno elettrico EAF, con degasaggio, affinazione e desolfurazione blandi. Ben diversi risultano anche la dimensione del grano secondario, il grado di micro-omogeneità strutturale e la struttura nei due casi, come visibile nelle Figure 7 e 8. Particolare cura va, pertanto, riposta anche nella pratica operativa di trattamento termico, al fine dell'ottenimento di strutture appropriate ed omogenee e di un livello di tensioni interne opportuno e costante. Il confronto delle ruote con uguali valori di tenacità apparente K_Q ma valori di energia equivalente K_{E-E} così diversi (vds. Figure 5 e 6), porta alle medesime conclusioni qualitative.

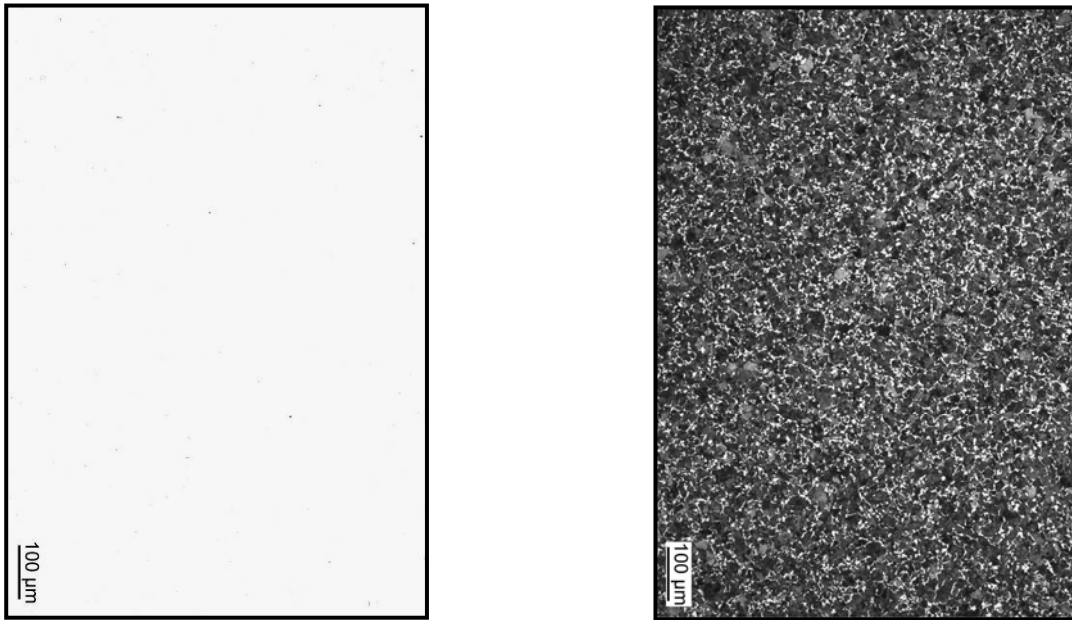


Figura 7: elevati livelli di tenacità a frattura, analoghi a quelli della ruota in Figura 3, sono associati normalmente ad uno stato micro-inclusionale e ad una microstruttura di questo tipo

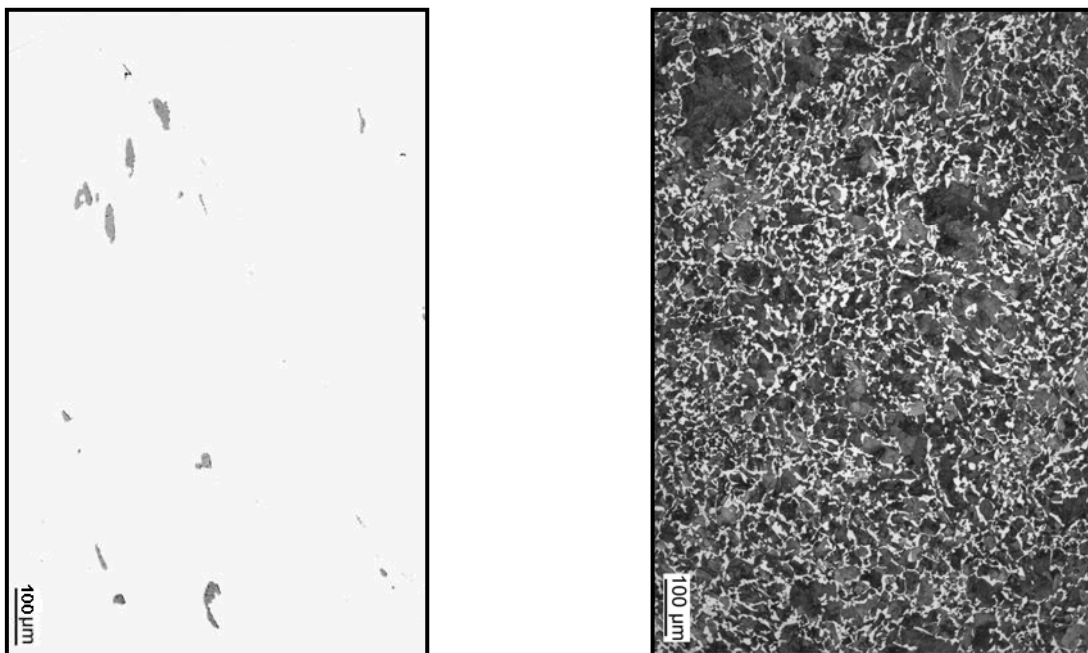


Figura 8: a bassi valori di tenacità a frattura, del tipo di Figura 4, corrispondono microinclusioni e microstruttura di questo tipo

5. CONCLUSIONI

Gli studi effettuati da Lucchini Sidermeccanica hanno permesso di caratterizzare in modo comparativo e sistematico i materiali destinati alla fabbricazione di ruote ferroviarie, in termini di Meccanica della Frattura.

-I parametri di tenacità a frattura utilizzati si sono dimostrati, dapprima, in grado di misurare in modo attendibile la capacità di ruote monoblocco di resistere a rottura di schianto, malgrado i ridotti spessori a disposizione, divenendo, in seguito, indicatori di qualità e sicurezza del prodotto ruota ferroviaria, indipendentemente dalle modalità di frenatura.

-E' stata messa in luce una correlazione qualitativa abbastanza chiara tra parametri microfisici dell'acciaio e tenacità a frattura, che ha indotto a richiedere particolare attenzione ad alcune fasi fondamentali del processo di fabbricazione dell'acciaio e di trattamento termico.

Lucchini Sidermeccanica dispone oggi di una eccezionale banca dati dei propri materiali, anche in termini di K_Q e K_{EE} : sono state collezionate circa 90.000 prove di K_Q e K_{EE} , effettuate negli ultimi 15 anni. E' stata curata in modo particolare anche la tecnologia di ricavo provini, di pre-cricatura, di rottura e calcolo dei parametri di Meccanica della Frattura: grazie a centri di lavoro CNC robotizzati, oggi è possibile ottenere provini C.T.30 finiti di lavorazione meccanica, con fori, intaglio "chevron notch" e sede estensimetro in circa 30'. Il provino C.T.30 finito viene indirizzato su di una batteria di macchine idrauliche, dedicate alla fase di pre-cricatura, che richiede un tempo medio di 40'. Segue poi la rottura del provino, che viene effettuata con specifiche macchine dinamiche, dotate di software dedicati per il calcolo. Caratterizzando l'intera produzione di ruote ferroviarie in termini di Meccanica della Frattura, Lucchini Sidermeccanica ha potuto correlare la tenacità a frattura alle fasi principali del processo di fabbricazione; ciò ha permesso a Lucchini Sidermeccanica di perfezionare il processo produttivo, mettendo a punto materiali migliorati. Tali materiali vengono oggi proposti al mercato ferroviario in accordo ad un proprio esclusivo capitolato che, nel rispetto dei requisiti tradizionali delle principali specifiche internazionali, offre maggiore sicurezza ed affidabilità in esercizio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Question B 169 ORE: Thermal limits of the wheels and shoes Report N°. 3 - october 1991
- [2] DT 251 (B 169) : Tenacità a la rupture des roues ferroviaires ; methodes de determination – october 1991
- [3] UIC 812-3 : Specification technique pour la fourniture de roues monoblocs en acier non allié laminé pour material roulant moteur et remorqué
- [4] EN 13262-2004 : Railway applications- Wheelsets and bogie-Wheels-Product requirement
- [5] ASTM E399-05 : Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness KIC of metallic materials
- [6] A.Ghidini, M.Lombardi, M.Vignola, P.Kuokkanen, The Finnish experience: a research to develop new steel grades for solid wheels with high in service performances, proceedings of Rolling Contact Fatigue Congress, 2002, Brescia (Italy)
- [7] DOWLING, N.E., Mechanical behaviour of materials, Prentice Hall, 1993
- [8] R. Rinaldi, G. Stevanin, A. Ghidini, F. Caroti, A. lafelice, "Quality in realizing wheelsets for High Speed in service"; 9th International Wheelset Congress – September 1988 – Montreal Canada
- [9] R. Rinaldi, G. Gugliesi, G. Amici, A. Ghidini, C. Casini, "Engineering, design, testing and service of a high speed light weight monobloc wheel"; "; 10th International Wheelset Congress – September 1992 – Sydney Australia
- [10] M. Diener, R. Muller, A. Ghidini, M. Scepti, "Study of fracture toughness of R7T UIC812.3 steel solid wheels applying traditional and innovative Fracture Mechanics parameters"; 10th International Wheelset Congress – September 1992 – Sydney Australia
- [11] G. Galliera, G. Amici, A. Ghidini, R. Bertelli, "Fatigue beaviour of railway wheels affected by sub-surface defects in the tread. Control methods and manufacturing process"; 11th International Wheelset Congress – Giugno 1995 – Parigi Francia
- [12] R. Roberti, A. Ghidini, G:M: La Vecchia, "Misura della Tenacità a Frattura in campo di transizione dell'acciaio R7T", XI Convegno Nazionale Gruppo Italiano Frattura – Brescia 4-6 Luglio 1995