

Influenza della matrice sulla propagazione di cricche di fatica nelle ghise sferoidali

F. Iacoviello, W. Polini

È stata analizzata l'influenza della microstruttura sulla resistenza alla propagazione della cricca di fatica considerando due ghise sferoidali, caratterizzate rispettivamente da una matrice ferrito-perlitica (%ferrite = 80%) e da una matrice prevalentemente perlitica (%perlite > 95%). Tale analisi è stata effettuata considerando in particolare l'influenza del rapporto di carico (R = 0.1, 0.5, 0.75). Le prove sono state effettuate in aria, alla frequenza di 20 Hz. Le superfici di frattura sono state analizzate per mezzo di un microscopio elettronico a scansione (SEM), per evidenziare i micromeccanismi di frattura, e per mezzo di un rugosimetro. Quest'analisi è stata effettuata con l'obiettivo di evidenziare e valutare l'influenza della rugosità della superficie di frattura sull'effetto di chiusura.

1. INTRODUZIONE

L'attenzione verso le ghise sferoidali come materiale di impiego strutturale è ultimamente cresciuta grazie alle loro migliorate caratteristiche di duttilità e resistenza, che hanno raggiunto valori comparabili con quelli tipici di numerosi acciai. Queste ghise sono caratterizzate dalla presenza di grafite sotto forma sferoidale, con un conseguente minore danneggiamento della matrice metallica rispetto alle ghise lamellari. Ciò è dovuto sia all'effetto di intaglio, che risulta meno severo nel caso della grafite sferoidale rispetto alla grafite lamellare, sia all'incremento della sezione efficace resistente, che risulta superiore nelle ghise sferoidali rispetto alle ghise lamellari, a parità di carbonio grafítico. Tali ghise sono ottenute mediante aggiunta di magnesio nella ghisa da trattare a circa 1450°C. La matrice metallica può essere ferritica, perlitica, con oppure senza cementite libera, ferrito-perlitica, martensitica, bainitica, austenitica. La propagazione della cricca di fatica nelle ghise sferoidali è decisamente influenzata dalla frazione di volume di carbonio grafítico, dalla dimensione, forma e distribuzione degli sferoidi, dalla composizione chimica, dalla microstruttura [1-3]. In questo lavoro è stata analizzata l'influenza della microstruttura della matrice metallica sulla resistenza alla propagazione di una cricca di fatica, considerando due differenti ghise sferoidali caratterizzate da una analoga densità e distribuzione degli sferoidi di grafite.

2. MATERIALE E PROCEDURE SPERIMENTALI

Sono state considerate due differenti ghise sferoidali. La prima, corrispondente al tipo GS 370-17, con la composizione chimica mostrata in tabella 1, è stata fornita dopo ferritizzazione, ed è caratterizzata da una matrice essenzialmente ferritica (con una frazione ferritica pari all'80%), con una densità di noduli pari a 100 noduli/mm². Essa è caratterizzata da una durezza di 150 HB.

La seconda, la cui composizione chimica è mostrata in tabella 2, corrisponde al tipo GS 700-2, ed è caratterizzata da

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mg	Sn
3.72	2.14	0.31	0.017	0.032	0.049	0.051	0.054	0.026

Tab. 1 - Composizione chimica della ghisa GS 370-17 (% in peso, il resto è Fe).

Table 1 - Chemical composition of the GS 370-17 cast iron.

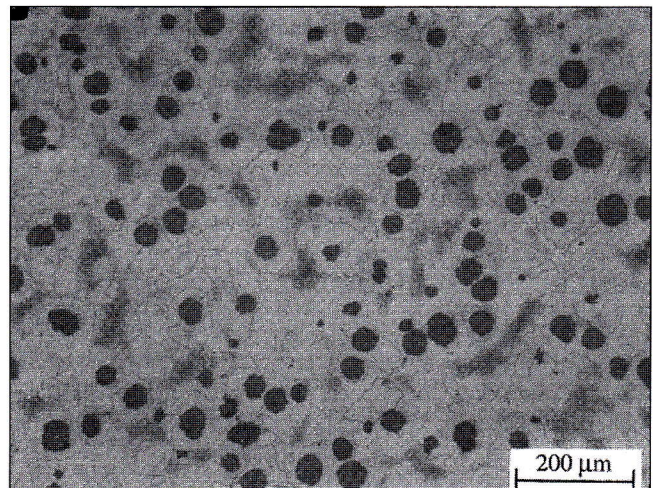


Fig. 1 - GS 370-17. Distribuzione degli sferoidi di grafite (microscopio ottico).

Fig. 1 - GS 370-17. Graphite spheroids distribution (optic microscope).

una matrice prevalentemente perlitica (con una frazione perlitica superiore al 95%), da una densità di noduli comparabile con la precedente ed è caratterizzata da una durezza maggiore (250 HB).

Le prove di fatica sono state effettuate utilizzando dei provini CT (Compact Type) ricavati da saggi colati a parte conformemente alle prescrizioni della normativa UNI ISO 1083 (tipo II).

Le prove di fatica sono state eseguite secondo la normativa ASTM E647 [4], utilizzando una macchina per prove meccaniche oleodinamica INSTRON 8501 da 10 t, controllata mediante computer. La misurazione della lunghezza della cricca è stata effettuata durante lo svolgimento della prova

F. Iacoviello, Università di Cassino, Cassino (FR)
Dipartimento di Meccanica, Strutture, Ambiente e Territorio

W. Polini, Università di Cassino, Cassino (FR)
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Testo pervenuto il 14 ottobre 1999

C	Si	Mn	S	P	Cu	Mo	Ni	Cr	Mg	Sn
3.59	2.65	0.19	0.012	0.028	0.04	0.004	0.029	0.061	0.060	0.098

Tab. 2 - Composizione chimica della ghisa GS 700-2 (% in peso, il resto è Fe).

Table 2 -

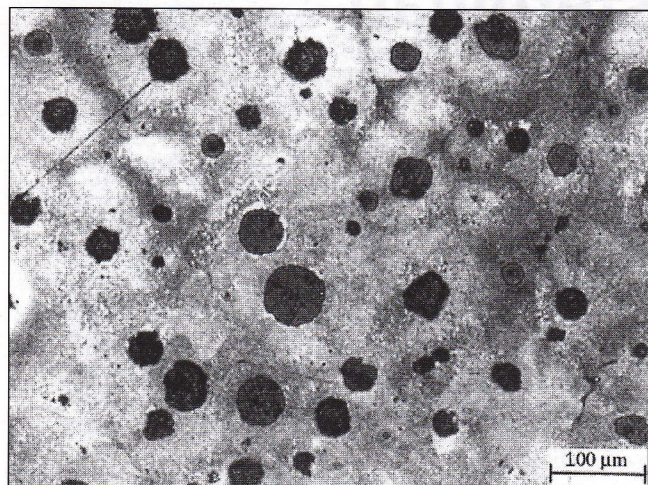


Fig. 2 - GS 700-2. Distribuzione degli sferoidi di grafite (microscopio ottico).

Fig. 2 - GS 700-2. Graphite spheroids distribution (optic microscope).

mediante rilevamento estensimetrico. Le prove sono state svolte in aria, nelle condizioni di umidità e temperatura del laboratorio. La cricca di fatica è stata fatta propagare in condizioni di ampiezza di carico costante. Tale carico è stato applicato secondo una forma d'onda sinusoidale, alla frequenza di 20 Hz, considerando tre diversi rapporti di carico R (P_{min}/P_{max}): 0.1, 0.5, 0.75.

Le superfici di frattura sono state estensivamente analizzate per mezzo del microscopio elettronico a scansione (SEM) Philips XL30 ESEM-FEG dotato di EDX.

Le superfici di frattura sono state inoltre analizzate mediante l'impiego di un rugosimetro Form Talysurf Plus, equipaggiato con un tastatore senza pattino il cui campo di misura è ± 0.5 mm e la cui risoluzione è di 16 nm. E' stato valutato il parametro di rugosità R_a [μm] seguendo la ISO 4287. Sono state acquisite sei misure di rugosità lungo la direzione trasversale alla direzione di propagazione della cricca per differenti distanze dall'apice della cricca, in corrispondenza di differenti valori del ΔK applicato, secondo la normativa ISO 4288.

Tale analisi è stata effettuata allo scopo di quantificare l'influenza della rugosità della superficie della frattura sull'effetto di chiusura dell'apice della cricca. Tale effetto è legato fondamentalmente a tre meccanismi [5, 6]: la plasticizzazione all'apice della cricca (la cui influenza cresce, in prima approssimazione, con il K^2), la rugosità della superficie di frattura e la formazione di ossidi. Nel caso delle due ghise investigate, considerando la bassa aggressività dell'ambiente di prova ed il tenore degli elementi di lega, sostanzialmente simile, si può ipotizzare che la formazione degli ossidi non ha una elevata influenza nel processo di chiusura dell'apice della cricca e che, comunque, tale influenza è indipendente dalla ghisa considerata.

3. RISULTATI SPERIMENTALI E DISCUSSIONE

I risultati delle prove di propagazione della cricca di fatica effettuate sulla GS 370-17 e sulla GS 700-2 sono rappresentati nelle figure 3 e 4.

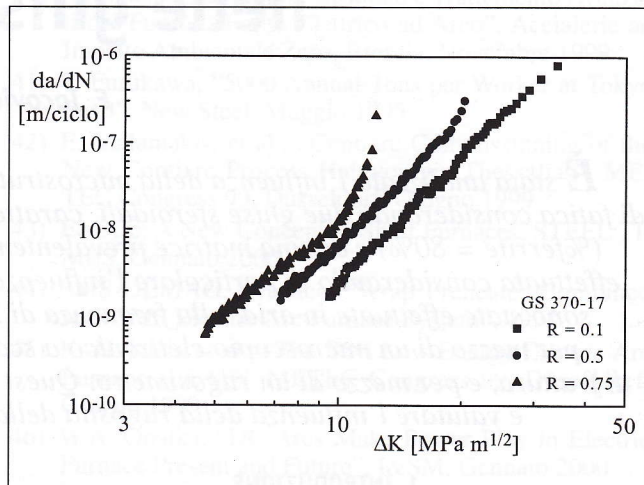


Fig. 3 - Curve di propagazione della cricca di fatica per la GS 370-17.

Fig. 3 - GS 370-17 fatigue crack propagation curves

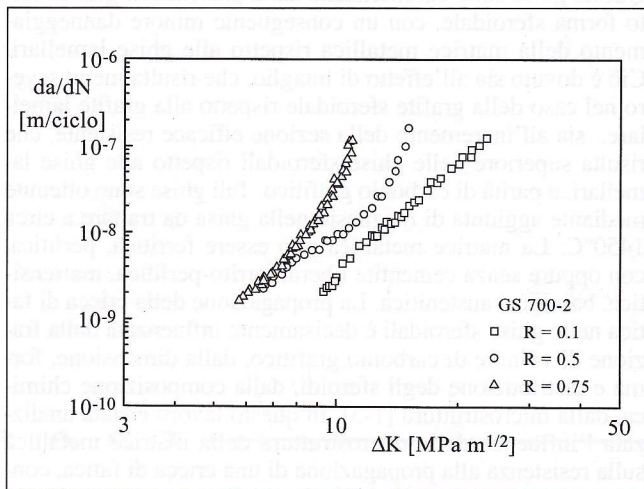


Fig. 4 - Curve di propagazione della cricca di fatica per la GS 700-2.

Fig. 4 - GS 700-2 fatigue crack propagation curves.

La resistenza alla propagazione della cricca di fatica è influenzata dalla matrice (figura 5). Tale influenza cresce con il ΔK applicato, fino a divenire decisamente evidente al termine dello stadio II (zona di Paris). La ghisa a matrice prevalentemente ferritica presenta un tratto lineare più esteso della ghisa a matrice prevalentemente perlitica, con una rotura di schianto che si verifica per valori superiori del ΔK_{max} . Le curve di propagazione della figura 5 sono state interpolate, nello stadio II di propagazione (stadio lineare), mediante l'utilizzazione della relazione di Paris-Erdogan [7].

$$da / dN = C \Delta K^m$$

I risultati ottenuti sono esposti nella tabella 3 e 4, rispettivamente per la GS 370-17 e la GS 700-2.

Le tabelle suddette, sebbene non mostrino un andamento

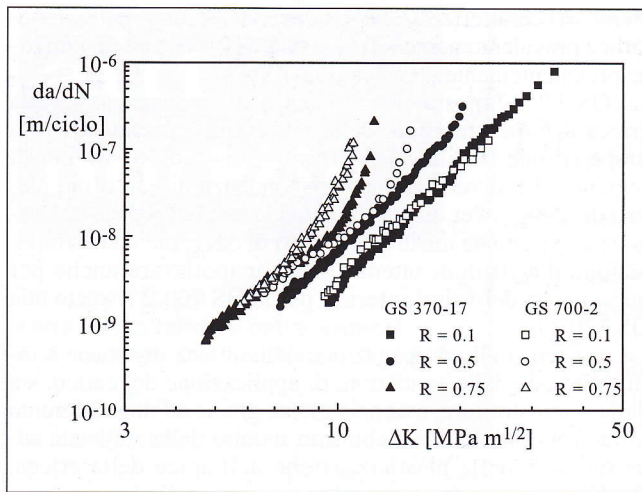


Fig. 5 - Confronto della resistenza a fatica fra GS 370-17 e GS 700-2.

Fig. 5 - Comparison between crack propagation resistance in GS 370-17 and in GS 700-2.

R	m	C
0.1	4.72	$4.89 \cdot 10^{-14}$
0.5	4.56	$1.88 \cdot 10^{-13}$
0.75	3.74	$2.25 \cdot 10^{-12}$

Tab. 3 - Coefficienti "C" ed "m" della relazione di Paris-Erdogan (GS 370-17).

Tab. 3 - Coefficients "C" and "m" of the Paris-Erdogan ratio (GS 370-17).

R	m	C
0.1	4.08	$3.25 \cdot 10^{-13}$
0.5	3.28	$4.9 \cdot 10^{-12}$
0.75	5	$2.23 \cdot 10^{-13}$

Tab. 4 - Coefficienti "C" ed "m" della relazione di Paris-Erdogan (GS 700-2).

Tab. 4 - Coefficients "C" and "m" of the Paris-Erdogan ratio (GS 700-2).

univoco dei risultati, indicano una generale diminuzione della pendenza delle rette di Paris con il rapporto di carico. L'analisi al SEM delle superfici di frattura mostra una decisa influenza della microstruttura sui micromeccanismi di avanzamento della cricca di fatica. Per entrambe le ghise si può evidenziare una sostanziale indipendenza della superficie di frattura dal rapporto di carico. La cricca di fatica tende a propagarsi all'interno della matrice metallica, senza evidenziare alcun percorso preferenziale. Gli sferoidi di grafite non sono mai tagliati dalla cricca di fatica, dato che l'interfaccia sferoide-matrice è decisamente meno resistente dello sferoide stesso. La loro distribuzione decisamente omogenea all'interno della matrice metallica corrisponde ad una distribuzione dei risultati nel piano $da/dN-\Delta K$ che non presenta oscillazioni macroscopiche. Nel caso della ghisa a matrice prevalente ferritica (figura 4), la superficie di frattura è piuttosto duttile con alcune zone di rottura per clivaggio. Le fessure secondarie sono decisamente rare e si formano solitamente all'interfaccia matrice-sferoidi. Nel caso della ghisa sferoidale a matrice prevalentemente perlitica (figura 5), le cricche secondarie si formano all'interno della matrice me-

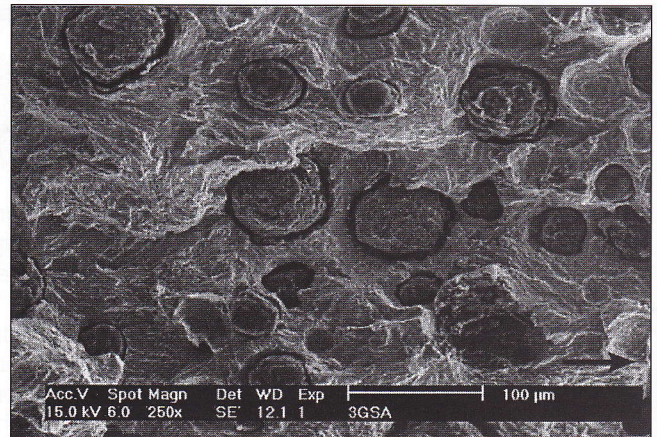


Fig. 6 - Superficie di frattura GS 370-17 ($\Delta K = 12 MPa\sqrt{m}$; $R = 0.5$). La freccia indica la direzione di propagazione della cricca.

Fig. 6 - GS 370-17 fracture surface ($\Delta K = 12 MPa\sqrt{m}$; $R = 0.5$). The arrow shows the crack propagation direction.

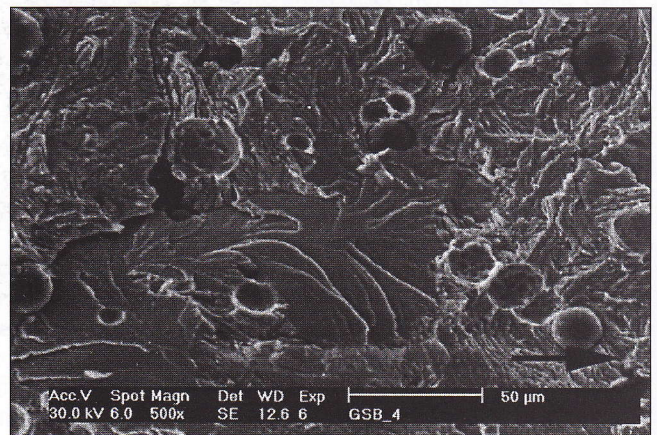


Fig. 6 - Superficie di frattura GS 700-2 ($\Delta K = 12 MPa\sqrt{m}$; $R = 0.5$). La freccia indica la direzione di propagazione della cricca.

Fig. 6 - GS 700-2 fracture surface ($\Delta K = 12 MPa\sqrt{m}$; $R = 0.5$). The arrow shows the crack propagation direction.

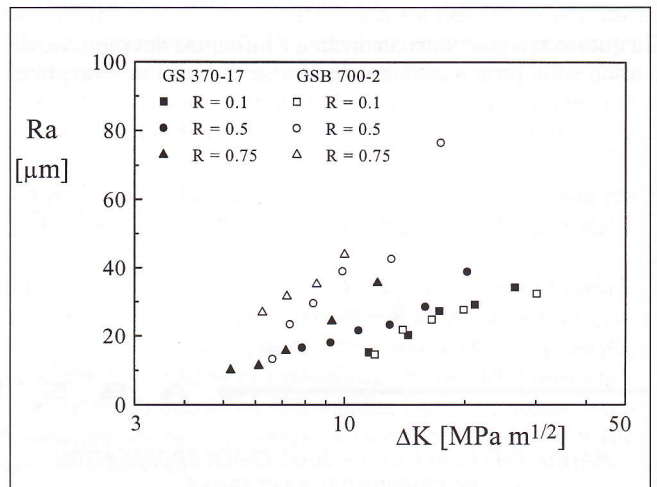


Fig. 8 - Evoluzione del parametro di rugosità Ra con il ΔK per le due ghise sferoidali analizzate e per i tre rapporti di carico considerati.

Fig. 8 - Roughness parameter Ra behaviour for the considered cast irons and the considered stress ratios.

tallica, con una morfologia di frattura decisamente più fragile della precedente.

La figura 6 mostra l'evoluzione della rugosità superficiale con il ΔK applicato per le due ghise sferoidali analizzate al variare del rapporto di carico. Si può osservare che, per entrambe le ghise, per un determinato valore del rapporto di carico, la rugosità aumenta con il ΔK applicato. Tale andamento risulta essere, con buona approssimazione, lineare. Per ciascuna delle ghise considerate, in corrispondenza dello stesso valore del ΔK applicato, il parametro di rugosità R_a cresce con il rapporto di carico R . Inoltre per le stesse condizioni di applicazione del carico, la ghisa sferoidale a matrice prevalentemente ferritica è caratterizzata da una rugosità superficiale inferiore rispetto alla ghisa sferoidale a matrice prevalentemente perlitica. Tali differenze sono più evidenti per i valori del rapporto di carico più elevati e risultano maggiori al crescere del ΔK applicato.

I risultati delle prove di propagazione delle cricche di fatica e delle misure della rugosità delle superfici di frattura (figure 3 ed 6) mostrano una differente influenza della rugosità della superficie di frattura e della plasticizzazione dell'apice della cricca sull'effetto di chiusura. Tale influenza dipende sia dalle condizioni di applicazione del carico (R , ΔK) che dalla matrice metallica (ferrito-perlitica oppure perlitica). Considerando che il raggio di plasticizzazione cresce proporzionalmente al rapporto $(K_{max}/\sigma_y)^2$, quanto più è elevato il valore del K_{max} (valori più elevati di ΔK e di R) tanto maggiore è l'influenza della plasticizzazione dell'apice della cricca, mentre, per valori inferiori del K_{max} (e quindi di ΔK e di R), si ha una maggiore influenza della rugosità superficiale, che resta comunque modesta. Infatti, la rugosità superficiale della ghisa a matrice perlitica è superiore di quella a matrice prevalentemente ferritica, mentre le curve di propagazione della GS 700-2 sono caratterizzate da valori più elevati della velocità di propagazione rispetto a quelle della GS 370-17. Considerando la forte differenza nei valori di σ_y , l'apice della cricca di fatica nella ghisa GS 370-17 è caratterizzato da un raggio di plasticizzazione decisamente maggiore rispetto alla GS 700-2, specialmente per elevati valori del K_{max} . Ciò implica un maggiore effetto complessivo sulla chiusura dell'apice della cricca ed una minore importanza della rugosità della superficie di frattura su tale meccanismo.

4. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata analizzata l'influenza del rapporto di carico sulla propagazione della cricca di fatica in due ghise

sferoidali caratterizzate rispettivamente da una matrice metallica prevalentemente ferritica (GS 370-17) e da una matrice prevalentemente perlitica (GS 700-2).

LA GS 370-17 mostra una resistenza alla propagazione della cricca di fatica migliore della GS 700-2, con una zona di propagazione stabile (zona II) più estesa ed una rottura di schianto che si verifica in corrispondenza di valori più elevati del ΔK_{max} . Per quanto riguarda la zona di soglia, non sono state effettuate misure dei valori di ΔK_{th} , ma una estrapolazione dei risultati ottenuti può far ipotizzare anche per questa zona dei valori inferiori per la GS 700-2 rispetto alla GS 370-17.

La resistenza alla propagazione della cricca di fatica è influenzata sia dalle condizioni di applicazione del carico, sia dalla microstruttura, essenzialmente grazie ad una differente influenza dell'effetto di chiusura indotto dalla rugosità superficiale e dalla plasticizzazione dell'apice della cricca. Quest'ultimo risulta essere il meccanismo di chiusura predominante.

I micromeccanismi di frattura sono indipendenti dalle modalità di applicazione del carico, ma risultano essere dipendenti dalla matrice metallica. Nel caso della matrice prevalentemente ferritica si ha una frattura duttile, con alcune rotture per clivaggio. Gli sferoidi si distaccano in parte dalla matrice metallica. La ghisa a matrice perlitica presenta invece una morfologia di frattura decisamente più fragile.

5. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la FONDERGHISA s.p.a. per la fattiva collaborazione.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Kato, M. Hirose, S. Suzuki, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 51, 1161 (1985).
- [2] F. D. Griswold, R.I. Stephens, Int. J. Of Fatigue, 1, 3 (1987).
- [3] K. Tokaji, T. Ogawa, K. Shamoto, Fatigue, vol.16, 344 (1994).
- [4] Annual book of ASTM Standars, E647-91, American Society for Testing and Materials, 674 (1991).
- [5] W. Elber ASTM STP 486, 280 (1971).
- [6] R. O. Ritchie, S. Suresh, Metall. Trans. A, vol.13A, 937 (1981).
- [7] P. C. Paris, F. Erdogan, Trans ASME, J. Basic eng., 85n, 528 (1963).

ABSTRACT

MATRIX INFLUENCE ON FATIGUE CRACK PROPAGATION IN SPHEROIDAL CAST IRONS

Microstructure influence on fatigue crack propagation considering two spheroidal cast irons, characterised by a ferritic-perlitic microstructure (% ferrite = 80%) and a perlitic microstructure (% perlite > 95%) respectively, was investigated. This analysis was performed considering the influen-

ce of stress ratio ($R = 0.1, 0.5, 0.75$). Tests were performed in laboratory conditions, with a loading frequency of 20 Hz. Fracture surfaces were analysed both by means of a scanning electron microscope (SEM) and performing a fracture surface roughness analysis in order to investigate the crack advancing micromechanisms and to quantify the influence of crack surface roughness on crack closure effect, respectively.