

Monitoraggio di prove a fatica mediante termocamera a raggi infrarossi

E. Eusebione, F. Longo, G. Meneghetti

Recentemente è stata proposta una metodologia per la valutazione rapida del limite di fatica di provini o componenti meccanici, basata sul monitoraggio della temperatura superficiale mediante termocamera a raggi infrarossi. Questa metodologia è il risultato di osservazioni di tipo prevalentemente sperimentale, sulle quali si basano le tecniche proposte per l'analisi dei dati di temperatura, dai quali ricavare il limite di fatica. Dopo aver esaminato la letteratura italiana e i principali contributi esteri presenti sull'argomento, vengono descritte le applicazioni della tecnica termografica finora svolte presso l'Università di Padova e vengono presentati i risultati ottenuti con provini di diverse geometrie e materiale, segnalando inoltre le difficoltà incontrate.

Parole chiave: fatica, frattura, caratterizzazione materiali

INTRODUZIONE

Il fenomeno della rottura per fatica dipende dal progressivo danneggiamento del materiale causato da deformazioni plastiche, che possono avvenire a livello microscopico anche per tensioni che dal punto di vista macroscopico sono inferiori al limite di snervamento. Questi scorrimenti plastici producono calore che in parte fa aumentare la temperatura del materiale e in parte viene trasmesso all'ambiente circostante. In particolare, un rapido innalzamento della temperatura superficiale in seguito all'applicazione di carichi ciclici di ampiezza crescente rivela l'inizio di scorrimenti plastici e quindi il superamento del limite di fatica. Pertanto la misura dell'incremento di temperatura superficiale del materiale è indicativo del danneggiamento a fatica.

Un possibile metodo per la misura sperimentale della temperatura superficiale di un corpo è la termografia nel campo dell'infrarosso. I primi impieghi delle termocamere allo studio del fenomeno della fatica risalgono all'inizio degli anni '70 e si riferiscono al monitoraggio di prove di fatica su provini in materiali metallici e compositi [1, 2]. Il primo contributo italiano sull'applicazione della termografia al monitoraggio di prove a fatica è apparso nel 1984 ad opera dei ricercatori dell'Università di Catania e del Politecnico di Torino [3]. Si trattava di prove di fatica eseguite su provini lisci in acciaio AISI 304-L sollecitati a trazione con rapporto di sollecitazione $R=0$ alla frequenza di 80 Hz. Mediante una termocamera a raggi infrarossi è stata misurata la variazione di temperatura superficiale del provino durante la prova. È stato notato che all'inizio della prova la temperatura cresce rapidamente e successivamente si stabilizza una volta speso circa il 10% della totale vita a fatica del provino, come indicato in fig. 1. La temperatura stabile raggiunta e il gradiente di temperatura iniziale sono tanto più elevati quanto maggiore è l'ampiezza di sollecitazione applicata. Gli incrementi stabili di temperatura sono stati posti in relazione con il limite di fatica del materiale, suggerendo l'idea di poter definire una "temperatura limite" intesa come temperatura stabile raggiunta dal provino in corrispondenza del limite di fati-

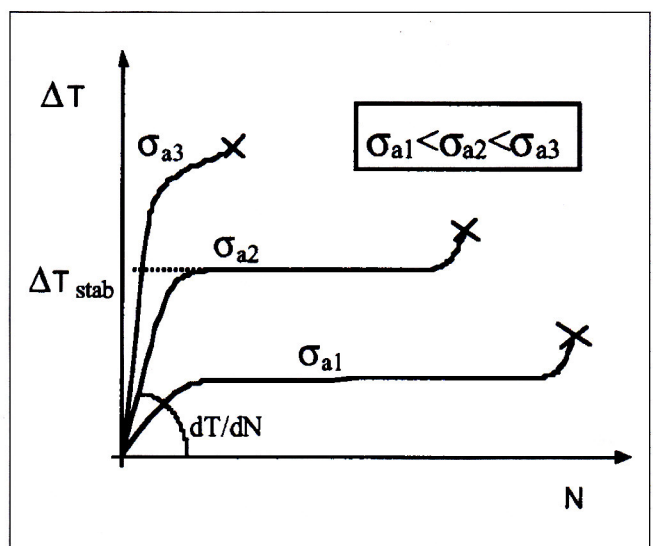


Fig.1: tipici incrementi di temperatura superficiale per un provino sollecitato a fatica (da [4]).

Fig.1: typical temperature variations recorded during a constant amplitude fatigue test (from [4]).

ca. Poiché il tempo impiegato dal provino per raggiungere la temperatura stabile è relativamente breve, gli Autori hanno previsto la possibilità di definire una metodologia per la valutazione rapida del limite di fatica. Il concetto di "temperatura limite" è stato infatti successivamente sviluppato ed ha portato nel corso di 15 anni di ricerca [4-17] a definire una metodologia (metodo Risitano) per la valutazione rapida del limite di fatica [17]. I dati essenziali sulle numerose prove eseguite sono riportati in tab.1.

Nella stessa tabella sono riportati anche i dati sulle prove termografiche effettuate presso il Centro Ricerche FIAT per la valutazione rapida del limite di fatica di provini e componenti automobilistici [18,19].

Oltre ai dati sulle prove a fatica termografiche effettuate dagli enti di ricerca italiani, in tab. 1 sono anche stati riportati i dati sulle prove effettuate da Autori stranieri, in particolare Luong [22] e Harig [23, 24]. In particolare i dati di Harig dell'inizio degli anni '80 sono stati ottenuti non utilizzando la tecnica termografica, ma misurando la variazione di temperatura di un olio che lambiva la superficie esterna del provino.

E. Eusebione, F. Longo, G. Meneghetti
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Padova

Categoria	Materiale	Tipo provino / componente	Tipo Soll.	f [Hz]	R	Storia carico	N° prove	Ref.			
ACCIAI	34CrMo4	Liscio	Flex rotante	90	-1	step	3	[24]			
	37MnSi5	Liscio	Flex rotante	200	-1	step	3	[24]			
	40CrMo4	Liscio	Assiale	20	-1	step	5	*			
					0		4	*			
	42CrMo4	Liscio	Torsione	20	-1	step	1	*			
	AISI 304L	Liscio	Assiale	80	0	costante	/	[3]			
	AISI 304L	liscio	Assiale	30/50/70	-1	step/costante	/	[11]			
	C 30 ricotto	liscio	Assiale	50	0	step	5	[10]			
	C 30	Intagliato	Assiale	90	-1	costante	/	[5.6]			
	C 70 ricotto	liscio	Assiale	75	-1	costante	/	[4]			
	C 70 ricotto	liscio	Assiale	75	0	costante	/	[8]			
	C 70 ricotto	intagliato ("V" 75°)	Assiale	75	0	costante	/	[8]			
	C70S6	liscio	Assiale	20	-2	step	3	*			
					-1		2	*			
	Fe 510 D	giunto saldato	Assiale	20	0		2	*			
					-1	step	2	*			
					0.3		1	*			
	FeE355	giunto saldato	Assiale	20	-1	step	3	*			
					0		4	*			
	FeE420	Giunto saldato	Assiale	20	-1	step	2	*			
0						5	*				
FeE420	Liscio	Flex piana	25	0	step	7	*				
FeE490	Liscio	Flex piana	20	0	step	7	*				
FeP04	Giunto saldato	Assiale	90	0.1	costante	/	*				
XC 55	Liscio	Flex rot.	100	-1	costante	5	[22]				
GHISE	tipo 60	Intagliato (Kt=1.64)	Flex piana	25	-1	step	2	*			
					Liscio	Assiale	20	-1	step	1	*
						Flex piana	25	-1		1	*
	tipo 90 T.Q.	Liscio	Torsione	20	-1	step	2	*			
	tipo B	Liscio	Assiale	20	-1.84	step	1	*			
					-1		2	*			
					0		4	*			
					0.3		1	*			
	65-48-05	Biella motore	Assiale	20	-1	step	6	[19]			
					20	-1.84	step	1	*		
					0		2	*			
	malleabile	Biella motore	Assiale	20	-1.84	step	3	[19]			
					-1		3	*			
					0		3	*			
sferoidale bonificata	Liscio	Assiale	20	0,-1	step	/	[13,15]				
sferoidale bonificata	liscio	Flex rot.	100/200	-1	costante	/	[12]				
LEGHE LEGGERE	2024	Liscio	Assiale	50	0	step	5	[10]			
COMPOSITI	SMC R25	Liscio	Assiale	15	0.1	costante	30	[21]			

(*) dati forniti dal Centro Ricerche FIAT e raccolti in [26].

Tab. 1: riassunto di prove a fatica eseguite negli ultimi 15 anni con applicazione della tecnica termografica.

Tab. 1: summary of fatigue test data performed in the last 15 years and monitored by means of an infrared camera.

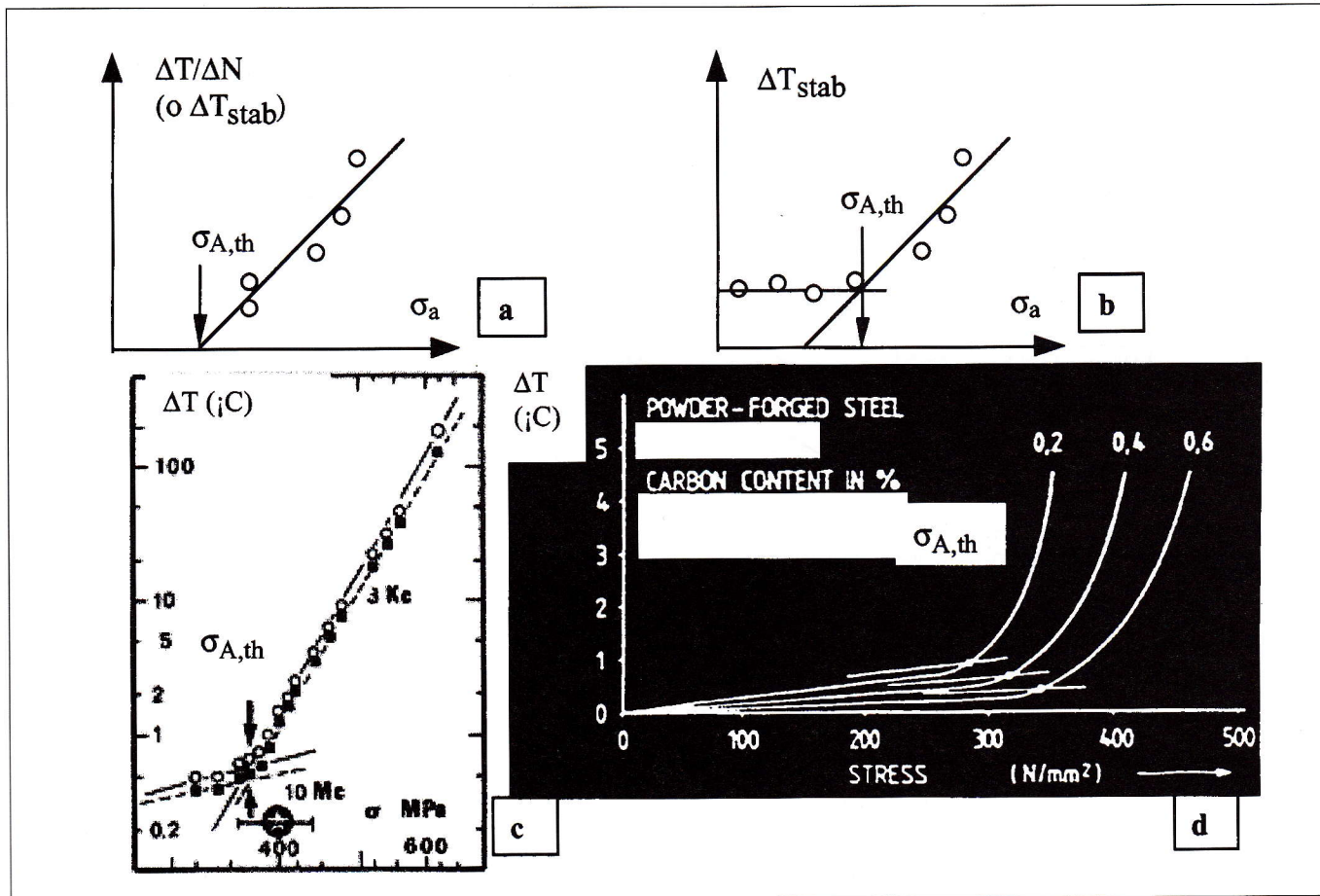


Fig. 2: determinazione del limite di fatica σ_A con metodo termografico: a) metodo Risitano [17]; b) metodologia F.A.S.T.H. [18]; c) metodo di Luong (tratto da [22]); d) metodo di Harig (tratto da [23]).

Fig. 2: determination of the thermographic fatigue limit σ_A by means of: a) Risitano method [17]; b) F.A.S.T.H. methodology [18]; c) Luong method (from [22]); d) Harig method (from [23]).

DETERMINAZIONE DEL LIMITE DI FATICA CON LA TECNICA TERMOMETRICA

La fig. 2 presenta i vari metodi proposti per la determinazione grafica del limite di fatica di provini e componenti sulla base delle misure sperimentali dell'incremento di temperatura superficiale del provino. Pur con qualche differenza fra loro tutti i metodi associano il limite di fatica al repentino incremento di temperatura superficiale all'aumentare dell'ampiezza di sollecitazione applicata. Ponendo in un diagramma gli incrementi di temperatura stabile ΔT o il gradiente iniziale di temperatura dT/dN in funzione dell'ampiezza di sollecitazione applicata σ_a (cfr fig. 1) è possibile determinare il limite di fatica come intersezione con l'asse delle ascisse della retta che approssima ai minimi quadrati i punti sperimentali ($\Delta T=0$ o $dT/dN=0$, come riportato in fig. 2a secondo il metodo Risitano) o in corrispondenza del ginocchio individuato dai punti sperimentali (come riportato in fig. 2b secondo la metodologia F.A.S.T.H. elaborata presso il Centro Ricerche FIAT, oppure nelle figure 2c e 2 d secondo Luong ed Harig rispettivamente). In alternativa è possibile utilizzare teoricamente un solo provino sollecitandolo a livelli di carico crescenti. Dopo aver ricavato la temperatura stabile o il gradiente di temperatura iniziale per ogni livello di carico, si procede nell'elaborazione dei dati sperimentali come appena indicato.

I dati presentati in [17] evidenziano che l'errore nella stima del limite di fatica con il metodo termografico rispetto al metodo tradizionale stair-case è compreso fra -16 e + 10 %, per una varietà di materiali (sia metallici che compositi) e provini (lisci, intagliati, giunti saldati). La fig. 3 confronta il

limite di fatica termografico con quello determinato con il metodo tradizionale stair-case evidenziando gli scarti superiori al 10%. L'accordo tra i due valori è buono nel caso di provini lisci sia in acciaio che in ghisa. Maggiori differenze sia in eccesso che in difetto si riscontrano nel caso di componenti reali come ad esempio bielle motore o giunti saldati al laser. Differenze ancora maggiori sono state riscontrate sui dati relativi alle prove di flessione piana, non riportate nella fig. 3, perché gli incrementi di temperatura misurati risultano di pochi decimi di grado e perciò paragonabili all'incertezza del sistema di misura.

PROVE SPERIMENTALI SVOLTE PRESSO L'UNIVERSITÀ DI PADOVA

La tecnica termografica è stata applicata recentemente presso l'Università di Padova per il monitoraggio di prove di fatica su provini lisci e intagliati in acciaio da stampaggio in FeP04, in acciaio da costruzione Fe 430 e in acciaio altoresistenziale S690. Le prove sugli acciai FeP04 ed Fe 430 sono state eseguite applicando cicli di carico a trazione con rapporto nominale di ciclo R pari a 0.1 mediante una macchina servo idraulica Schenck Hydropuls PSA 100 con cella di carico da 100 kN. Le prove sull'acciaio S690 sono state eseguite a flessione rotante alla frequenza di 200 Hz.

Il sistema termografico utilizzato è il modello THV 900 LW/ST prodotto dalla AGEMA Infrared System. Lo scanner termico, con sensore raffreddato con ciclo Stirling, è in grado di rilevare e registrare la radiazione infrarossa nel campo delle lunghezze d'onda da 8 a 12 mm. Tale scanner opera

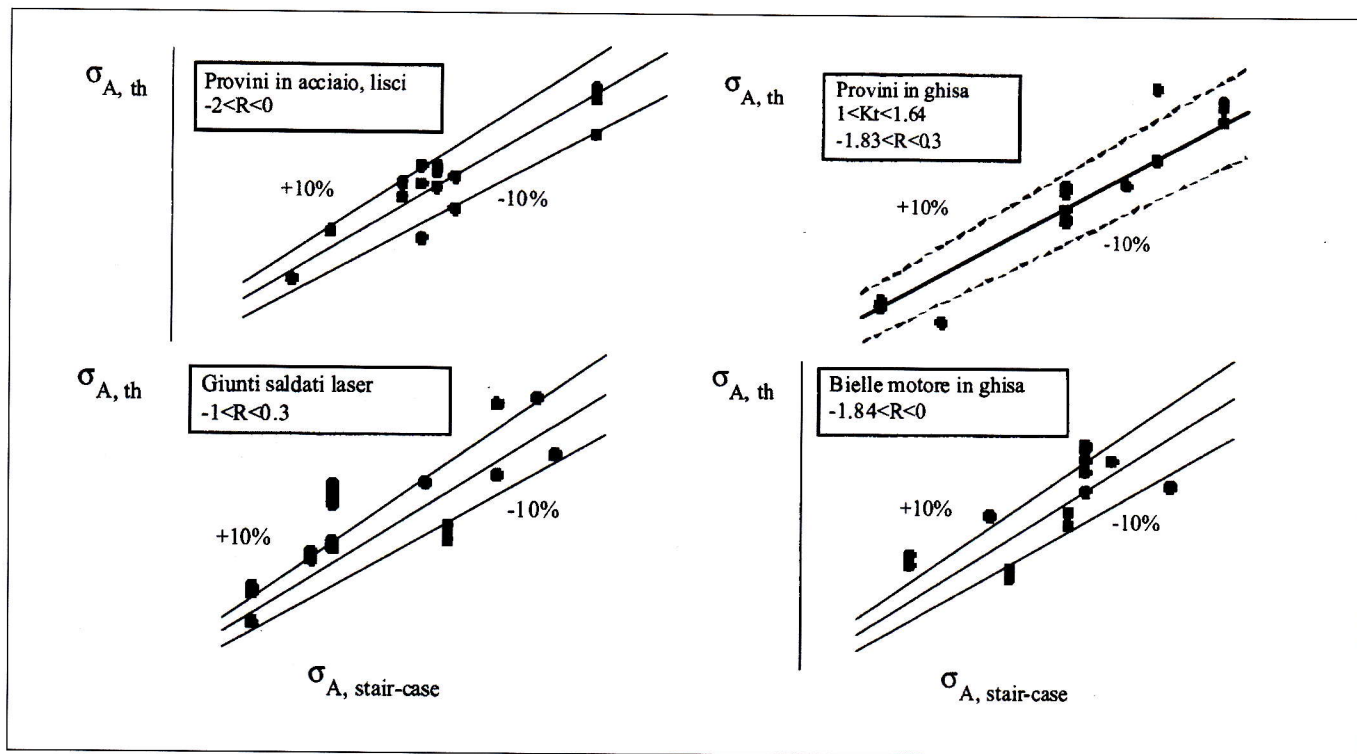


Fig. 3: confronto fra il limite di fatica termografico ($\sigma_{A,th}$) e tradizionale ($\sigma_{A,stair-case}$) per i provini e componenti riportati in tab. 1.

Fig. 3: comparison between the thermographic fatigue limit ($\sigma_{A,th}$) and that determined by the stair-case method ($\sigma_{A,stair-case}$) for the specimens and components reported in tab.1.

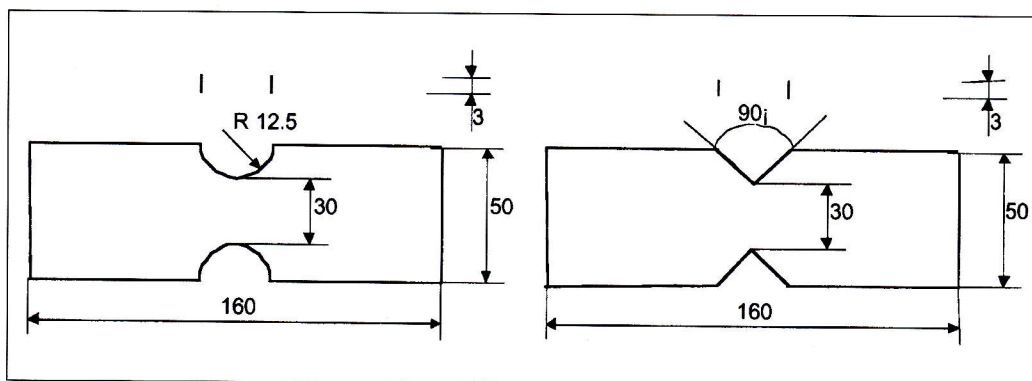


Fig. 4: geometria dei provini in acciaio FeP04 [18].

Fig. 4: geometries of the specimens made of FeP04 steel [18].

nel campo di temperatura da -30 a +1500°C, con una risoluzione a 30°C di 0.1°C. Le prove sono state eseguite ponendo la termocamera ad una distanza dal provino variabile tra 0.5 (distanza focale minima possibile con l'ottica 20°x10° in dotazione) e 0.6 m, che comporta una risoluzione spaziale di 0.64 e 0.77 mm rispettivamente. Nelle prove a flessione rotante sui provini intagliati è stata adottata una lente close-up, che alla minima distanza focale possibile, pari a 80 mm, comporta una risoluzione spaziale di 0.15 mm. Per aumentare l'emissività dei provini e quindi ridurre gli effetti di disturbo sulla misura provocati dalla radiazione riflessa, se ne è verniciata la superficie con una vernice opaca. L'elaborazione delle immagini di temperatura acquisite è stata fatta scaricando su file tramite opportuno software i valori di temperatura superficiale.

Provini in acciaio FeP04

Le geometrie dei provini sono riportate in fig. 4 e comprendono l'una intagli raccordati e l'altra intagli acuti a V. Il carico di snervamento e il carico di rottura del materiale misurati sperimentalmente, sono risultati rispettivamente pari a $\sigma_s=150$ MPa e $\sigma_R= 300$ MPa. Per ciascuna serie di provini sono state eseguite prove assiali ad ampiezza di cari-

co costante alle frequenze di 8 e 15 Hz. Nella fig. 5 sono riportate le curve di Woehler in funzione dell'ampiezza di sollecitazione calcolata sulla sezione netta dei provini.

Per quanto riguarda le prove sui provini raccordati il maggior problema pratico riscontrato è stato quello della trasmissione del calore dall'attuatore idraulico al provino, che, soprattutto nel caso delle prove a basso livello di carico, risultava di entità sufficiente a mascherare quello generato all'apice degli intagli dal fenomeno della fatica. Per isolare termicamente il provino è stato adottato un afferraggio supplementare con un'alettatura raffreddata da un ventilatore.

Il limite di fatica termografico (cfr fig. 6) è risultato di 87.3 MPa con una frequenza di applicazione del carico di 8 Hz e di 85.8 MPa con una frequenza di 15 Hz. Il valore medio pari a 86 MPa è riportato in fig. 5 e risulta in buon accordo con l'andamento della curva di Woehler. La fig. 6 evidenzia che la determinazione termografica del limite di fatica è indipendente dalla frequenza, secondo quanto già evidenziato in [12], anche se a frequenze più elevate corrispondono maggiori incrementi di temperatura e quindi misure sperimentali più affidabili. La frequenza deve essere però la stessa per tutti i provini della serie utilizzata per determinare il limite di fatica.

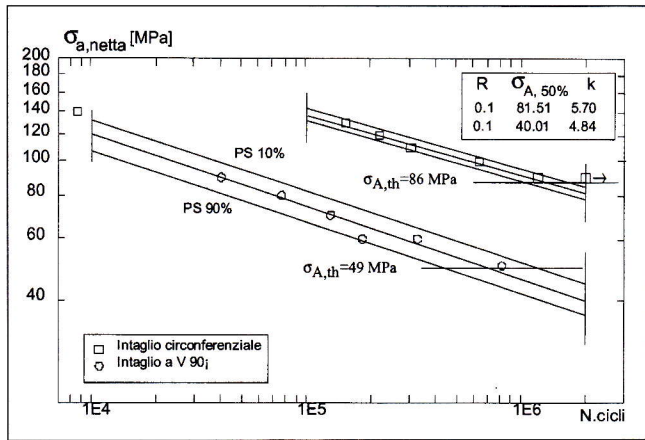


Fig. 5: curve di Woehler e bande di dispersione per i provini con intaglio raccordato e a V in FeP04 confrontati con i limiti di fatica termografici ($\sigma_{A,th}$).

Fig. 5: Woehler curves and scatter bands for blunt and V shaped notches (FeP04 steel) and comparison with the thermographic fatigue limits ($\sigma_{A,th}$).

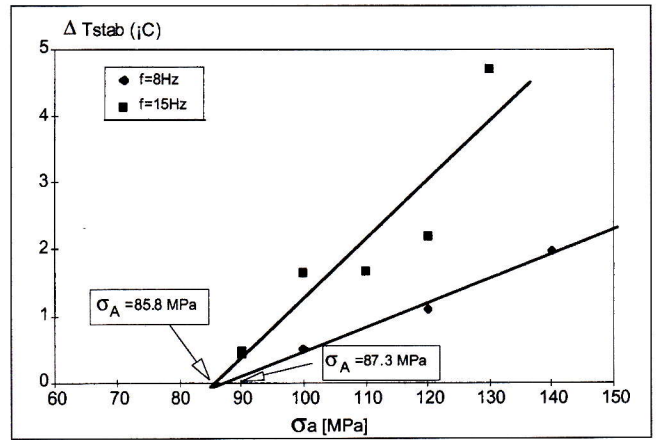


Fig. 6: determinazione del limite di fatica per i provini con intaglio circolare sulla base dei dati di temperatura ottenuti dalle prove ad ampiezza di carico costante.

Fig. 6: fatigue limit determination for notched specimens basing on the superficial temperature recorded during constant amplitude fatigue tests

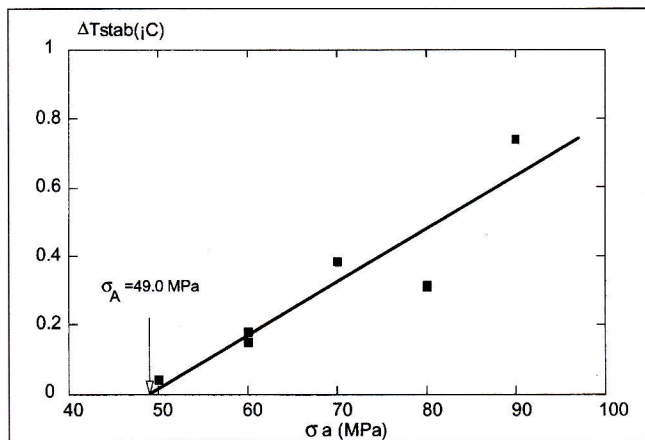


Fig. 7: determinazione del limite di fatica per i provini con intaglio a V sulla base dei dati di temperatura ottenuti dalle prove ad ampiezza di carico costante.

Fig. 7: fatigue limit determination for V-notched specimens basing on the superficial temperature recorded during constant amplitude fatigue tests.

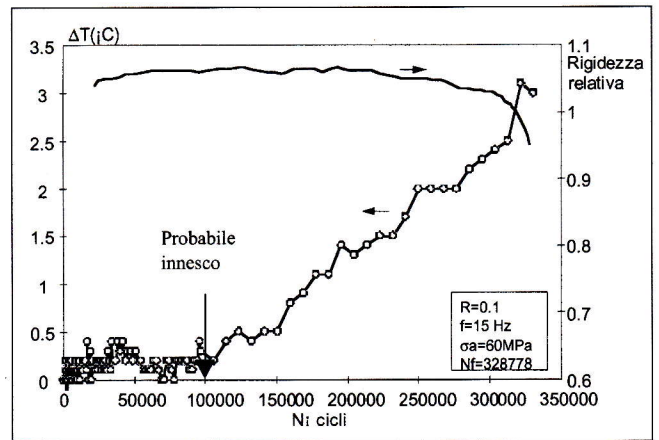


Fig. 8: relazione tra fase di propagazione della cricca, riduzione di rigidità del provino e aumento di temperatura in prossimità dell'apice dell'intaglio.

Fig. 8: relation among crack propagation phase, stiffness decrease and temperature increment near to the notch tip.

Per quanto riguarda invece i provini a V, durante le prove non è stato possibile notare, almeno con l'ottica a disposizione sulla termocamera, la zona soggetta a maggiore riscaldamento all'apice degli intagli. Le variazioni di temperatura misurate, soprattutto per i carichi più bassi, risultano infatti confrontabili con la sensibilità dello scanner termico e pertanto tali dati vanno presi in considerazione tenendo presente la loro scarsa attendibilità. I dati sperimentali sono stati comunque elaborati come già fatto per i provini raccordati e i risultati sono riportati in fig. 7. Il limite di fatica termografico risulta pari a 49.0 MPa, che risulta in buon accordo con l'andamento della curva di Woehler riportata in fig. 5.

Le immagini termografiche acquisite hanno permesso anche di distinguere una fase di propagazione della cricca, che per questa geometria di provini ricopre una parte significativa della totale vita a fatica. Considerando infatti l'andamento della temperatura massima all'interno di un'area che circonda gli apici dell'intaglio si è ottenuto un andamento simile a quello riportato in fig. 8, che si riferisce ad una prova eseguita ad ampiezza di carico costante pari a 60 MPa. Nel grafico è stato riportato anche l'andamento della rigidità relativa misurata nel corso della prova. Si può notare come in corrispondenza di un numero di cicli pari a 100000 la

temperatura inizi ad aumentare sensibilmente, mentre la curva di rigidità non rivela ancora alcun significativo cambio di pendenza corrispondente ad una sensibile riduzione della sezione del provino. Si può ipotizzare che l'aumento di temperatura registrato sia correlato all'avvenuto innesco della cricca di fatica, secondo quanto già proposto in [25]. Questa ipotesi è verosimile considerando che il provino è severamente intagliato e che l'aumento di temperatura è stato registrato a circa un terzo della totale vita a fatica.

Provini in acciaio Fe430

La geometria dei provini utilizzati è riportata in fig. 9. Le prove di fatica sono state eseguite alla frequenza di 12 Hz. A causa della difficoltà di individuare una ben definita fase di stabilizzazione della temperatura superficiale, la determinazione del limite di fatica è stata fatta estrapolando a zero non solo i valori dell'incremento stabile di temperatura, come mostrato in fig. 10, ma anche del gradiente iniziale misurato in base alla temperatura raggiunta dopo 5000 cicli dall'inizio della prova, come riportato in fig. 11. Il termine della fase di rapido incremento iniziale della temperatura è risultato compreso fra circa 40000 cicli nelle prove a più elevato carico e circa 15000 cicli nelle prove a basso carico,

- denza del cambio di pendenza della curva dell'incremento di temperatura rispetto al numero di cicli, secondo quanto proposto da Luong.
- 4) Nelle prove di fatica dei provini in acciaio FeP04 con intagli acuti è stato possibile notare un netto aumento di pendenza nella curva della massima temperatura superficiale del provino rispetto al numero di cicli dopo circa un terzo della totale vita a fatica del provino. Poiché per provini con intaglio acuto la fase di propagazione della cricca occupa gran parte della vita a fatica, è verosimile che tale cambio di pendenza sia correlato all'avvenuto innescamento della cricca.
 - 5) Nel caso dei provini con intaglio a V acuto, non è stato misurato alcun incremento significativo di temperatura durante le fasi iniziali della prova.
 - 6) L'acciaio altoresistenziale S690, che ha un rapporto tra carico di snervamento e di rottura pari a 0.9, non ha rivelato alcun aumento di temperatura misurabile con la termocamera in prove di flessione rotante, ad eccezione delle prove su provini lisci e per carichi molto prossimi al carico di snervamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Reifsnider K.L., Williams R.S., Determination of fatigue related heat emission in Composite materials, *Experimental Mechanics*, 12, 1974, pp. 479-485.
- [2] Charles J.A., Appl F.J., Francis J.E., Using the scanning infrared camera in experimental fatigue studies, *Experimental Mechanics*, 4, 1975, pp. 133
- [3] Catalbiano T., Geraci A., Orlando M., Analisi tramite infrarosso termico di provini sollecitati a fatica, estratto da *Il Progettista Industriale*, n° 2, 1984.
- [4] Curti G., La Rosa G., Orlando M., Risitano A., Analisi tramite infrarosso termico della "temperatura limite" in prove di fatica, estratto dagli atti del XIV Convegno Nazionale AIAS, Catania, settembre 1986.
- [5] Geraci A., Guglielmino E., La Rosa G., Experimental analysis of the notch sensitivity in specimens with a blind hole under static test using thermal infrared imagery, 43° meeting MFPG, San Diego, California, ottobre 1988.
- [6] Geraci A., Guglielmino E., La Rosa G., Roccati G., Analisi sperimentale mediante infrarosso termico degli effetti di intaglio in provini con foro cieco sollecitati a fatica, XVII Convegno Nazionale AIAS, Ancona, settembre 1989.
- [7] Geraci A. L., Guglielmino E., La Rosa G., Roccati G., Notch sensitivity in specimens with blind hole under fatigue test, 3rd International Conference SPT, Vienna, Austria, luglio 1989
- [8] Geraci A., La Rosa G., Orlando A., Subcritical propagation of the fracture in cyclically loaded specimens using thermal infrared techniques, *Proceedings of ICED 88*, Budapest, 1988.
- [9] Curti G., Geraci A. L., Risitano A., Un nuovo metodo per la determinazione rapida del limite di fatica, *ATA - Ingegneria Automotoristica*, n. 10, 1989, pp. 634-636.
- [10] Geraci A. L., La Rosa G., Risitano A., On the new methodology for the determination of the fatigue limit of materials using thermal infrared techniques, *Proceedings of VDI IMEKO/GESA Symposium*, 1992, pp. 183-190.
- [11] Geraci A., La Rosa G., Risitano A., Influence of frequency and cumulative damage on the determination of the fatigue limit of materials using the thermal infrared methodology, 15th Symposium on experimental me-

chanics of solids, Warsaw, Poland, 1992, pp.63-66.

- [12] Geraci A. L., La Rosa G., Risitano A., Determination of the fatigue limit of an austempered ductile iron using thermal infrared imagery, *Digital Photogrammetry and Remote Sensing '95*, SPIE Series P, Vol. 2646, St. Petersburg, Russia, giugno 1995, pp. 306-317.
- [13] La Rosa G., Risitano A., Application of a new methodology to determine the fatigue limit using thermal infrared techniques, 17th Symposium on Experimental Mechanics of Solids, Varsavia, Polonia, ottobre 1996, pp.-498-503
- [14] Fichera A., La Rosa G., Patania F., Ricerca sperimentale della correlazione fra generazione interna del calore, gradienti termici e collasso dei corpi sollecitati a fatica, estratto dagli atti del 44° Congresso Nazionale ATI - Associazione Termotecnica Italiana, Arcavacata di Rende (CS), settembre 1989.
- [15] Fargione G., Geraci A., La Rosa G., Risitano A., Determinazione del limite di fatica in materiali sottoposti a differenti trattamenti termici mediante considerazioni energetiche, XXVI Convegno Nazionale AIAS, Catania, settembre 1997, pp. 1-12.
- [16] Fargione G., Geraci A., La Rosa G., Risitano A., Determinazione rapida della curva di fatica mediante metodo termografico, XXVII Convegno Nazionale AIAS, Perugia, settembre 1998, pp. 597-607.
- [17] La Rosa G., Risitano A., Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components, *International Journal of Fatigue*, 22, 2000, pp. 65-73.
- [18] Blarasin A., Fracchia R., Pozzati M., Determinazione rapida del limite di fatica di materiali e componenti con l'impiego della termografia IR, *ATA - Ingegneria Automotoristica*, Vol. 51, n. 5, 1998, pp. 255-265.
- [19] Fracchia R., Pozzati M., Gorla C.A., Valutazione rapida del limite di fatica di bielle motore in ghisa, *Congresso FAST, Materiali alle soglie del 2000*, Milano, 1997
- [20] Guglielmino E., La Rosa G., Oliveri S.M., Pasta A., Analisi mediante tecniche termografiche del comportamento a fatica di giunti di testa con saldaturer laser, XXI Convegno Nazionale AIAS, Forlì, settembre 1993.
- [21] La Rosa G., Perrone S., Quaresimin M., Determinazione della resistenza a fatica di materiali compositi con tecniche termografiche, XXVII Convegno Nazionale AIAS, Perugia, settembre 1998.
- [22] Luong M.P., Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique, *Mechanics of Materials* 28 (1998), pp. 155-163.
- [23] Middelford K., Harig H., Thermometric investigation of the fatigue behaviour of power-forged specimen, *Congresso PM*, Dusseldorf, 1986.
- [24] Dengel D., Harig H., Estimation of the fatigue limit by progressively-increasing load tests, *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, vol. 3, 1980, pp. 113-128.
- [25] Giordano A., Pasta A., Riscaldamento all'apice dell'intaglio nelle prove di fatica, XXI Convegno Nazionale AIAS, Genova, settembre 1992, pp. 73-83.
- [26] Eusebione E., Criteri energetici per la determinazione della resistenza a fatica, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Anno Accademico 1997/98.
- [27] Longo F., Analisi sperimentale del processo di danneggiamento per fatica mediante l'utilizzo della termografia all'infrarosso, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Anno Accademico 1998/99.

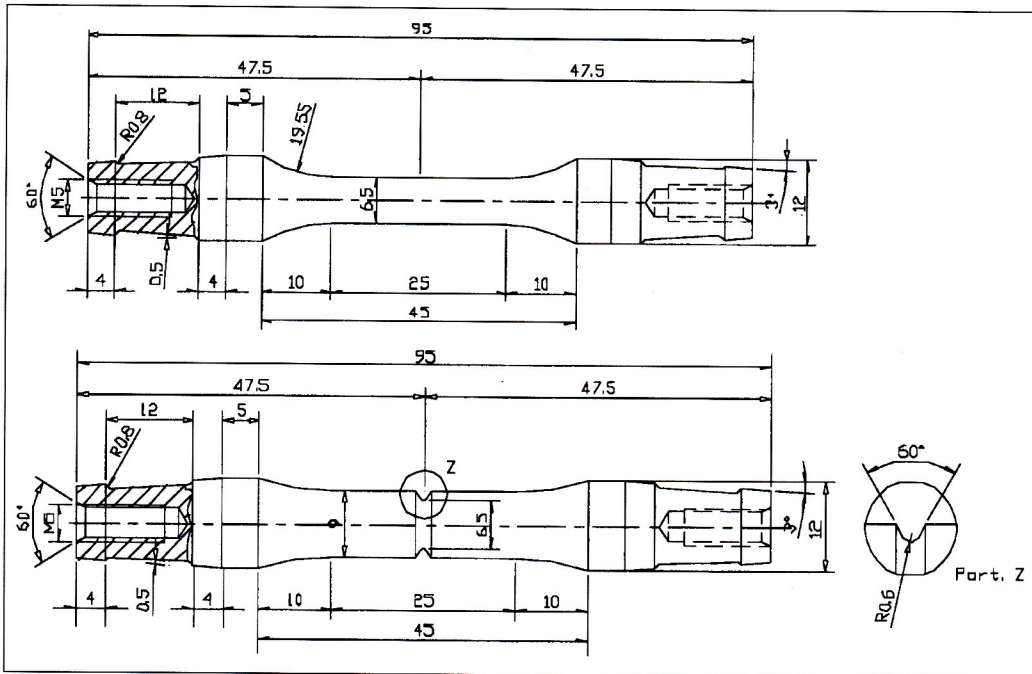


Fig. 13: geometria dei provini per le prove a flessione rotante.

Fig. 13: specimen geometries for rotating bending fatigue tests.

CONCLUSIONI

Le prove di fatica eseguite su provini lisci e intagliati in acciaio, sia assiali che a flessione rotante, monitorate con una termocamera a raggi infrarossi hanno permesso di trarre le seguenti conclusioni.

- 1) La misura della temperatura superficiale e l'individuazione di una temperatura stabilizzata nel corso della prove a fatica possono risultare difficoltose per i seguenti motivi:
 - l'incremento di temperatura, in particolare per carichi prossimi al limite di fatica, è troppo modesto se confrontato con la risoluzione del sistema di misura;
 - la temperatura del materiale non si stabilizza nel corso della prova, in particolare nelle prove a basso numero di cicli, ma, dopo una fase di rapido aumento iniziale, continua ad aumentare anche se con un gradiente molto minore;
 - la generazione di calore interno del materiale è mascherata dalla maggiore quantità di calore trasmessa dagli afferraggi della macchina di prova verso il provino. Questo fenomeno è stato riscontrato in particolare nelle prove a flessione rotante.

I primi due tipi di problemi sono già stati segnalati in passato in letteratura.

- 2) È stato determinato con il metodo proposto da Risitano il limite di fatica di provini con intagli dolci e acuti in acciaio FeP04 ed Fe430. Nel caso dei provini con intaglio dolce, anche se non è stato determinato il limite di fatica con un metodo tradizionale, la previsione termografica è in buon accordo con l'andamento della curva di Woehler sperimentale. Le temperature misurate in corrispondenza dell'apice dell'intaglio sono risultate dell'ordine dei gradi centigradi. Nel caso di provini con intaglio acuto la temperatura misurata all'apice dell'intaglio è risultata dell'ordine di decimi di grado centigrado, cioè dello stesso ordine di grandezza della risoluzione del sistema di misura. La previsione termografica del limite di fatica è risultata però compatibile con la curva di Woehler sperimentale.

- 3) Gli incrementi di temperatura misurati per ampiezze di sollecitazione inferiori al prevedibile limite di fatica non sono risultati trascurabili, in particolare per l'acciaio Fe 430. Per questo materiale quindi sarebbe più opportuno determinare il limite di fatica termografico in corrispon-

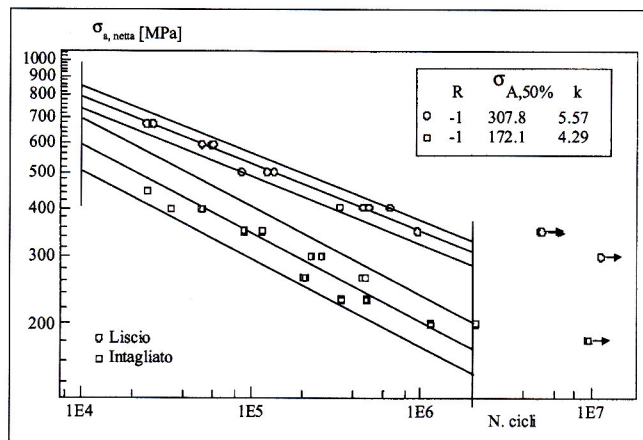


Fig. 14: curve di Woehler e bande di dispersione al 10% e 90% di probabilità di sopravvivenza dei provini lisci e intagliati in acciaio S690.

Fig. 14: Woehler curves and 10%-90% probability of survival scatter bands for smooth and notched specimens made of S690 structural steel.

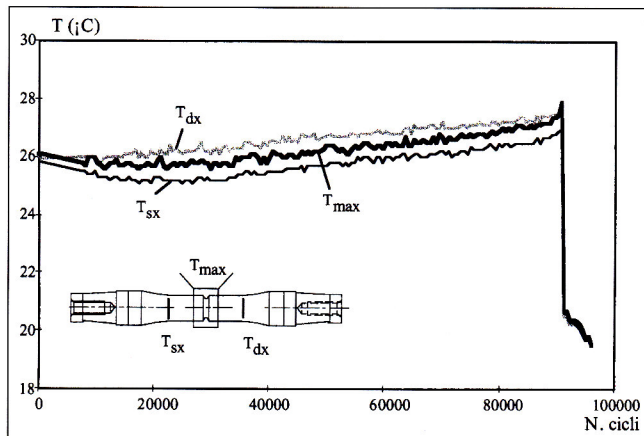


Fig. 15: andamento della temperatura in una prova di flessione rotante (provino intagliato, $\sigma_a=350$ MPa, $N=90500$ cicli, $f=200$ Hz).

Fig. 15: typical trend of the superficial temperature recorded during a rotating bending fatigue test (notched specimen, $\sigma_a=350$ MPa, $N=90500$ cycles to failure, test frequency=200 Hz).

Fig. 9: geometria dei provini in acciaio Fe 430 [27].

Fig. 9: geometry of the specimens made of Fe430 mild steel [27].

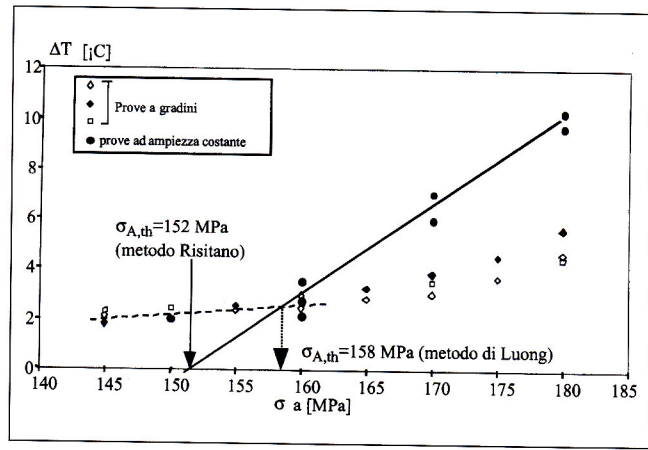
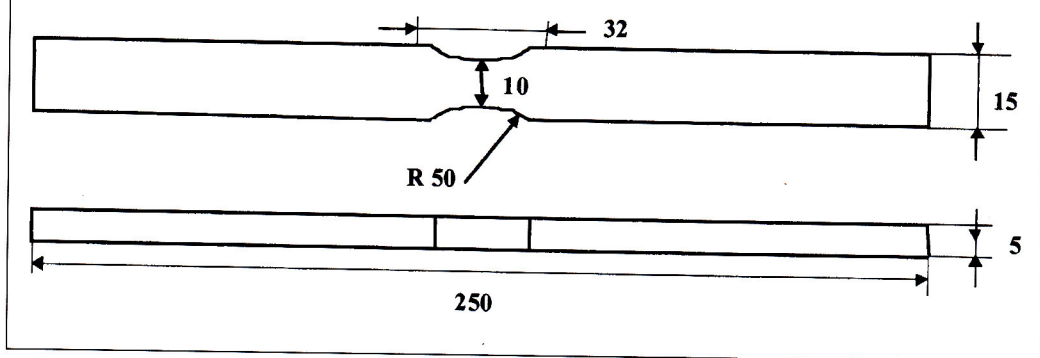


Fig. 10: determinazione grafica del limite di fatica per l'acciaio Fe 430 mediante prove ad ampiezza di sollecitazione costante e ad ampiezza di sollecitazione crescente.

Fig. 10: thermographic fatigue limit determination for the Fe430 steel by means of constant amplitude and variable amplitude fatigue tests.

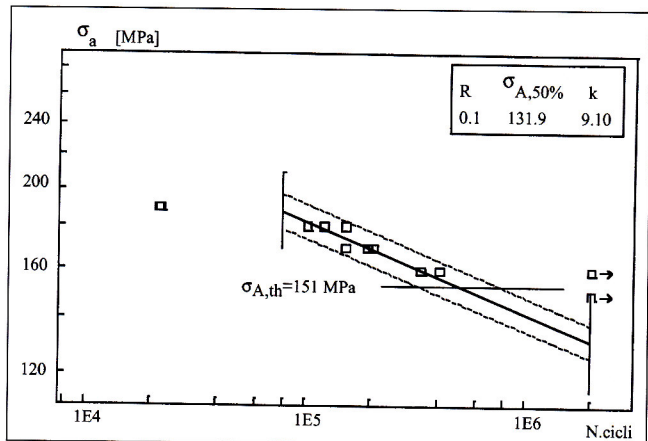


Fig. 12: curva di Woehler per l'acciaio Fe 430 e confronto con il limite di fatica determinato con il metodo termografico ($\sigma_{A,th}$).

Fig. 12: Woehler curve for the Fe 430 steel and comparison with the thermographic fatigue limit ($\sigma_{A,th}$).

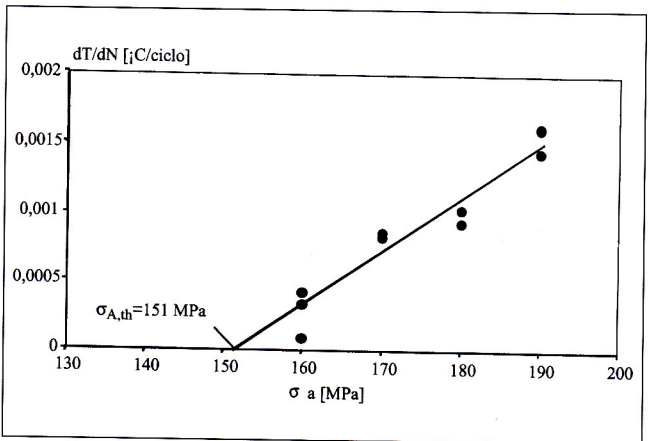


Fig. 11: determinazione del limite di fatica in termini di gradiente iniziale della temperatura.

Fig. 11: fatigue limit determination in terms of the thermal gradient at the beginning of the fatigue test.

stessa fig. 10 sono indicati i valori del limite di fatica ottenibili dai dati misurati sia con il metodo Risitano che con il metodo di Luong.

Nella figura 12 infine si riporta la curva di Woehler e il valore del limite di fatica determinato con il metodo termografico. Il semplice confronto visivo evidenzia il buon accordo della previsione con i risultati sperimentali.

Provini in acciaio S690

Queste prove come già ricordato sono state eseguite a flessione rotante, alla frequenza di 200 Hz, su provini lisci e intagliati aventi la geometria riportata in fig. 13. I risultati delle prove sono riportati nella fig. 14.

Le caratteristiche del materiale misurate sperimentalmente sono risultate pari a $\sigma_s=765$ MPa e $\sigma_R=815$ MPa, rispettivamente per il carico di snervamento e per il carico di rottura. In queste prove non è stato possibile misurare alcun incremento significativo di temperatura dovuto alla generazione di calore propria del materiale sollecitato.

Gli incrementi di temperatura misurati infatti erano dovuti principalmente alla trasmissione del calore dai supporti della macchina di prova verso il provino, come dimostra la fig. 15. Solamente per livelli molto prossimi al carico di snervamento l'incremento di temperatura del materiale è risultato misurabile, anche se non ha manifestato una evidente fase di stabilizzazione.

pertanto in termini relativi è risultata compresa fra il 50% e il 3% della totale vita a fatica del provino.

Di più difficile interpretazione sono i risultati, riportati a titolo di confronto nella fig. 10, relativi agli incrementi stabili di temperatura misurati con tre provini sottoponendo ciascuno ad ampiezze di sollecitazione crescenti, secondo il metodo proposto in [10].

In questo caso infatti risulta meno evidente il cambio di pendenza della curva in prossimità del limite di fatica. Nella

ABSTRACT

FATIGUE TEST MONITORING BY MEANS OF AN INFRARED CAMERA

Fatigue damage accumulation depends on plastic deformations that can occur at a microscopic level even if the macroscopic stresses vary below the material yield stress. Plastic deformations are responsible for some energy dissipation that produces an increment of the material temperature. In particular if we consider a specimen in metallic material subjected to a fatigue test where the stress amplitude is progressively increased, then a sudden increment of the superficial temperature reveals that the material fatigue limit has been exceeded. Thus the experimental measurement of the superficial temperature increments during a fatigue test is an index of the fatigue damage accumulation.

The temperature measurements can be performed by means of an infrared camera. The first applications of this technique were made in the early 70's [1,2] on metallic and composite materials. The first Italian contribution to this research field was due to the research group of the University of Catania and Polytechnic of Turin [3]. Typical temperature curves recorded during constant amplitude fatigue tests are reported in fig. 1. The figure shows that there is an initial rapid increment in the superficial temperature and then it stabilizes to a constant value, which depends on the applied stress amplitude. At the fatigue limit the stabilised temperature increment was defined as a "limit temperature".

The concept of "limit temperature" in fatigue was later investigated and led the Authors to define an experimental procedure and to propose a methodology (Risitano method) for a rapid evaluation of the material fatigue limit [4-17]. The experimental data collected during 15 years of research in this field are summarised in table 1. Additional data produced by FIAT Research Centre dealing with the thermographic fatigue limit determination on specimens and automotive components are reported in the same table [18,19]. Finally table 1 reports also the experimental results obtained by Luong [22] and Harig [23,24].

Figure 2 compares the methods proposed by different Authors to derive the fatigue limit from the experimental measurements of the superficial thermal increments. Even if some differences among the proposed methods arise, the common feature is that the fatigue limit is associated with the sudden change in the slope of the stabilised thermal increments plotted with respect to the applied stress amplitude.

Figure 3 compares the thermographic fatigue limit and the experimental values obtained by means of the standard stair case methodology. Differences above 10% are highlighted. It is evident that the thermographic predictions are in good agreement with the experimental values in the case of smooth specimens, both made of steel and of cast irons. Higher differences on both sides are encountered in the case of components like automotive connecting rods and laser-welded joints.

Recently the thermographic technique has been applied also in laboratory fatigue tests at the University of Padova. Both smooth and notched specimens made of different materials (FeP04 drawing steel, Fe430 mild steel and S690 construction steel) were fatigue tested. The experimental tests on

FeP04 and Fe 430 steels were conducted by means of an axial test machine Schenck Hydropuls PSA 100 (load capacity 100 kN) and by applying tensile loads with a nominal ratio R (ratio between the minimum and the maximum load) equal to 0.1. The experimental tests on S690 steel were conducted on a rotating bending machine at a frequency equal to 200 Hz.

The specimen geometries are reported in fig. 4 and consist of lateral blunt and sharp V-notches respectively. The material yield strength and ultimate strength, both experimentally measured, are equal to $\sigma_s=150$ MPa e $\sigma_R=300$ MPa respectively. Each series was subjected to constant amplitude fatigue tests at a frequency of 8 and 15 Hz. Fig. 5 reports the Woehler curves in terms of net nominal stress.

The thermographic fatigue limit (see fig. 6) resulted equal to 87.3 MPa with a test frequency of 8 Hz and equal to 85.8 MPa with a test frequency of 15 Hz. The mean value of 86 MPa is reported in fig. 5 and resulted compatible with the Woehler curve.

Dealing with V notched specimens, no significant temperature increments could be detected at the notch tip, since the recorded temperature increments are of the same order of the uncertainties of the recorded temperatures. In spite of that the thermographic fatigue limit was derived and the results are reported in fig. 7.

The thermographic images allowed to characterise the crack propagation phase, that for this specimen geometry covers a long part of the total fatigue life. Figure 8 reports the temperature profile at the V notch tip recorded during a constant amplitude fatigue test with a net stress amplitude equal to 60 MPa. In the same figure the stiffness curve is also reported. The figure shows that a sudden temperature increment occurs at about 100000 cycles (i.e. after one third of the total fatigue life), while the stiffness curve does not reveal any significant variation. Then it is supposed that the change in the temperature curve slope is due to the onset of crack initiation, as already proposed in [25].

Concerning the fatigue tests on specimens made of Fe 430 mild steel, the adopted geometry is reported in fig. 9. The fatigue tests were conducted at a frequency of 12 Hz. For this material it was not experimentally found an actual phase where the superficial temperature stabilises. Then the thermographic fatigue limit was derived both by considering the thermal increments, as depicted in fig. 10, but also by considering the initial thermal gradient, which was calculated on the basis of the temperature value after 5000 fatigue cycles, as shown in fig. 11. Figure 12 reports the experimental Woehler curve and the thermographic fatigue limit, where the agreement between prediction and the fatigue test results can be appreciated.

Finally concerning the rotating bending fatigue tests conducted on the S690 structural steel, the geometries of smooth and notched specimens are reported in fig. 13. The yield strength of the material was $\sigma_s=765$ MPa, while the ultimate strength was $\sigma_R=815$ MPa, both experimentally measured. During these fatigue tests, it could not be measured any significant temperature increment. In fact the thermal increments that have been recorded were mainly due to the heat transmission from the rotating bending machine bearings