

VALUTAZIONI DI VITA A FATICA DI COMPONENTI IN AMBIENTI CORROSIVI: PALETTE DI TURBINA GEOTERMICA E FILI DI PRECIPITATORI ELETTROSTATICI

V. Bicego^(*), L. Torri^(*), R. Crudeli^(°), C. Michelizzi⁽⁺⁾

^(*) ENEL SRI-PDM, Segrate (Milano)

^(°) ENEL PIN-STE, Pisa

⁽⁺⁾ ENEL PDG/E.I. Larderello (Pisa)

Sommario

Viene trattato il problema di rotture talora riscontrate su due tipi di componenti molto diversi ma accomunati da una comune fenomenologia: palette di turbine a vapore di centrali geotermiche e fili di precipitatori elettrostatici montati a monte di camini di centrali a combustibili fossili. Il meccanismo di rottura è dato per entrambi da fatica altociclica ad alto rapporto di carico R, che si innesca al fondo di cavità prodotte da corrosione localizzata (pit). Viene presentato un modello di frattura per fatica, basato sul raggiungimento del limite di fatica del materiale all'apice dei pit. Nel caso si disponga di panorami di pittura disponibili da rilevazioni sui componenti, dal modello sono deducibili raccomandazioni operative legate quantitativamente alla "distanza" dalla criticità.

Abstract

Failures often observed in two types of components in two very different plants, due to a similar cracking phenomenon, are here discussed: blades of steam turbines of geothermal power units, and elements of electrostatic filters at the inlet of exhausted chimneys in fossil fuelled power plants. In both components failures are due to high cycle fatigue with high R-ratio, with cracks starting from corrosion pits. A fatigue fracture model is presented, based on service stress exceeding the material fatigue endurance limit at the notch tip region of the largest pits. From periodically inspecting pit depths, recommendations may be derived for maintenance decisions, depending on the "distance" from the critical pit sizes.

1. Introduzione

Viene trattato il problema di rotture talora riscontrate su due tipi di componenti di impiego molto diverso: palette di turbine a vapore di centrali geotermiche e fili di precipitatori elettrostatici montati sul circuito fumi di centrali a combustibili fossili. In entrambi i casi si tratta di componenti che lavorano in condizioni di carico meccanico importante, e in presenza di ambienti significativamente aggressivi. In base a studi di failure analysis, non risulta presenza di tensocorrosione legata ai carichi statici, e non vi sono neppure contributi di rilevante plasticità (fatica oligociclica). Le rotture appaiono invece dovute a innesco di cricche per fatica altociclica, a partire dal fondo dei pit di corrosione. L'origine dei carichi meccanici ha natura diversa nei due componenti.

Le palette in questione sono quelle della turbina, mossa dal vapore di provenienza geotermica, più o meno purificato. I carichi di servizio sulle palette sono quelli tipici di ogni turbina: sovrapposizione di sollecitazione centrifuga e di vibrazioni della pala, essenzialmente flessionali e dunque con sollecitazione principale sulla superficie di attacco del fluido, in senso longitudinale rispetto alla pala. I valori delle sollecitazioni sono variabili lungo la pala. I picchi si formano lungo tutta la pala, ma ovviamente i più severi sono quelli dove sono presenti i carichi affaticanti più elevati. Nelle analisi semplificate che seguono si è assunto un valore medio di sollecitazione statica pari a 200 MPa (carico essenzialmente centrifugo; il carico dovuto alla pressione del fluido è sempre molto minore), e un'ampiezza dovuta alle vibrazioni pari a $\sigma_a = 20$ MPa; in tal modo risulta $R (\sigma_{\min}/\sigma_{\max}) = 0.82$.

La frequenza delle vibrazioni si stima dell'ordine di 50 Hz; anche se il valore preciso non è noto, esso non è direttamente rilevante ai fini delle analisi di seguito svolte. È sufficiente rilevare che a quei valori di frequenza bastano un paio di giorni soltanto per accumulare 10^7 cicli di carico, e dunque il componente non è progettato per lavorare lungo la curva di Wohler. Da un punto di vista ingegneristico ha solo senso chiedersi se il carico ciclico è superiore o inferiore al limite di fatica σ_{end} del materiale: la frattura nel primo caso, sia che avvenga dopo alcune ore che dopo due-tre giorni, è da intendersi come istantanea.

Il secondo problema esaminato riguarda i fili dei precipitatori elettrostatici: si tratta di elementi che servono a raccogliere (elettrostaticamente) il particolato nei fumi all'ingresso dei camini di centrali termoelettriche, prima dello scarico nell'ambiente. I fili sono inizialmente montati con un carico di pretensionamento. Periodicamente essi vengono disincrostatati meccanicamente, applicando ogni 6-7 minuti un colpo di martello al telaio porta-fili. Ogni colpo produce una sequenza di vibrazioni sul filo impattato, con frequenza di 5000 Hz. In base a un'analisi agli elementi finiti [1], la situazione è così schematizzabile:

- il carico di pre-tensionamento medio risulta pari a circa 115 MPa, con punte fino a 125 MPa (e quest'ultimo valore è stato considerato nelle analisi successive);
- si ha un colpo di martello ogni 6-7 minuti;
- le martellature comportano un carico ciclico con ampiezza media di 25 MPa; più in dettaglio, di 8 fili esaminati, per 2 fili si sono individuati uno o due cicli molto severi, con ampiezza $\sigma_a = 50$ MPa, mentre per gli altri 6 fili si sono riscontrati uno-due cicli con ampiezze fino a $\sigma_a = 40$ MPa.

2. Materiali e procedure sperimentali

Per quanto riguarda le palette geotermiche, lo studio ha riguardato palette di diverse forniture (Ansaldo e Tosi), realizzate in acciaio 13 Cr (AISI 403), e caratterizzato da un valore di carico a rottura pari a 760 MPa. Il materiale dei fili degli elettrofiltri è un acciaio CORTEN, di fornitura Mannesman, per il quale viene dichiarato un valore minimo del carico a rottura pari a 510 MPa. I dettagli (composizione chimica e principali caratteristiche meccaniche) sono contenuti in [1,2].

Su materiale delle palette e dei fili sono state eseguiti vari tipi di prove ed esami.

Palette:

- prove di crescita di cricche per fatica (Fatigue Crack Growth, FCG), inclusa la determinazione della soglia, su provini C(T), a frequenza 10 Hz e 25 C, $R=0$, secondo ASTM E647;
- prove di fatica altociclica (High Cycle Fatigue, HCF), su campioni cilindrici "lisci" e

prepittati a varie profondità, ciclanti a flessione rotante ($R=-1$), in ambiente acquoso simulante il servizio, 50 Hz e 25 C;

- misure di profondità dei pit a valle delle prove;
- analisi di caratterizzazione, non direttamente rilevanti nelle discussioni che seguono in questo studio (durezze, analisi chimiche).

Elettrofiltri:

- failure analysis, per misurare i pit critici in servizio;
- prove di fatica altociclica (High Cycle Fatigue, HCF), direttamente su due tipi di fili: nuovi ed eserciti provenienti dal servizio (in tutti i casi, senza alcuna particolare lavorazione superficiale), in aria, carico uniforme (trazione), $R=0.67$, a 70 Hz, e 130 C;
- prove di tensocorrosione, sui fili come sopra, a 25 C, in ambiente chimico simulante condizioni di condensa acida (H_2SO_4 al 75%);
- misure di profondità di tipici pit di fili eserciti in impianto.

Si rileva che nelle prove di fatica sopra citate i valori delle frequenze e dei rapporti R non hanno sempre riprodotto i veri valori dell'esercizio. In particolare frequenze di 5000 Hz (elettrofiltri) non erano realizzabili con le attrezzature esistenti nel laboratorio ENEL-SRI; il rapporto $R=-1$ (palette) è legato alla scelta di modalità di fatica a flessione rotante anziché trazione uniforme, scelta dovuta a necessità di ridurre i costi di tale sperimentazione. Ad ogni modo, i risultati di tali prove con R non rappresentativo sono stati poi opportunamente convertiti per l'"effetto R ", utilizzando note correlazioni di letteratura.

3. Risultati

La presentazione completa dei risultati ottenuti (curve di Wohler, diagrammi da/dN vs. ΔK) nelle diverse prove eseguite è al di fuori degli scopi di questo lavoro, che intende invece descrivere un metodo di life assessment dei due componenti considerati. Il metodo è basato su un'analisi di criticità dei pit nei riguardi delle sollecitazioni affaticanti presenti in servizio. A tale scopo, giova qui riportare in forma schematica i risultati essenziali emersi nelle prove sui materiali dei due componenti.

Palette.

13Cr, limite di

fatica ($R=-1$): $\sigma_{end} = 250$ MPa per d (profondità del pit max) = 0 mm,

$\sigma_{end} = 75$ MPa per $d = 0.25$ mm,

$\sigma_{end} = 40$ MPa per $d = 0.40$ mm,

Soglia ($R=0$): $\Delta K_{th} = 6.0$ MPa \sqrt{m}

Limite di fatica per $R=0.82$ (trasformato da $R=-1$, secondo Goodmann [3]):

$\sigma_{end} = 58.3$ MPa per $d = 0$ mm,

$\sigma_{end} = 37.7$ MPa per $d = 0.25$ mm,

$\sigma_{\text{end}} = 26.2 \text{ MPa}$ per $d = 0.40 \text{ mm}$,

Soglia per $R=0.82$ (trasformata da $R=0$, come media fra correlazioni di Elber [4] e Mc Evily

[5]): $\Delta K_{\text{th}} = 2.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Elettrofiltri.

Failure analysis: il meccanismo di frattura è dato da crescita di cricche per fatica altociclica, innescate da pit di corrosione. Non è presente fatica oligociclica, e non vi sono segni di innesco frattura per deformazioni rilevanti (sovraccarichi). I difetti critici per l'instaurarsi di fatica altociclica sono stati misurati essere quelli con profondità compresa fra 0.12 e 0.15 mm

Limite di fatica: $\sigma_{\text{end}} = 47 \text{ MPa}$ per i fili eserciti, $\sigma_{\text{end}} = 62.5 \text{ MPa}$ per i fili nuovi (si ritiene che tali valori possano essere affetti da una incertezza di $\pm 1 \text{ MPa}$).

Tensocorrosione: Il valore di carico all'instaurarsi di crescita di cricca per tensocorrosione non ha potuto essere determinato, causa rottura degli afferraggi. Tale inconveniente peraltro si è manifestato dopo che si era raggiunto un carico di 210 MPa. Sul campione dopo la prova non si sono rilevati visivamente inneschi di cricche. Peraltro si può ritenere che, analogamente ai fili oggetto delle osservazioni al microscopio, con grande probabilità vi dovrebbero essere dei difetti, con profondità dell'ordine di 0.1 mm. In tale ipotesi, sarebbe da concludersi che anche se il valore preciso di K_{ISCC} non è noto, sulla base della non rottura riferita a 210 MPa, K_{ISCC} risulta certamente non inferiore a $3.42 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

4. Metodo di life assessment

Concettualmente la sequenza di danno è schematizzabile come segue.

i. Inizialmente (tipicamente nelle fasi di fuori servizio) si ha crescita progressiva di pit durante alcune migliaia di ore. Tale crescita non è influenzata apprezzabilmente dai periodi di carico in servizio. Si giunge dopo un certo tempo a una dimensione critica dei pit, che comporta concentrazione di sforzo sufficiente a eccedere il limite di fatica del materiale.

ii. Quando questo avviene, si innescano cricche di fatica suscettibili di propagarsi ai carichi affaticanti del servizio. Nel caso delle palette le rotture complete avvengono dopo 2-3 giorni di lavoro soltanto. Nel caso degli elettrofiltri invece la crescita è meno rapida, in quanto i cicli di carico sono meno numerosi (avvengono solo in corrispondenza alle martellature); adottando per semplicità un'ipotesi di fatica ad ampiezza costante (con $\sigma_a = 25 \text{ MPa}$, $R=0.67$, per un tempo di 0.03 secondi dopo ogni colpo, con frequenza 5000 Hz; 150 cicli a botta, 1200 cicli ogni ora di funzionamento), data una cricca iniziale di profondità 0.1mm, si stima (da

dati di crescita di cricche desunti da letteratura [6], per un acciaio tuttavia non proprio simile al CORTEN, per il quale non si sono trovati i dati richiesti) che la vita spesa in fase di propagazione è dell'ordine di 9000 ore di funzionamento (corrispondenti a 10,000,000 cicli).

Nel seguito ci si pone l'obiettivo di definire le condizioni critiche per i pit. Si tratta di specificare, sulla base del livello del carico affaticante, la dimensione del pit sufficiente a fare sì che la sollecitazione di servizio diventi sopra soglia nei riguardi della fatica. La valutazione può avvalersi di due vie, tra loro indipendenti ma che come si vedrà daranno luogo a previsioni coerenti).

a) Diagramma di Kitagawa-Takahashi [7]. Si tratta di una curva, definita dal valore di σ_{end} (riferito a campioni senza difetti, $d=0\text{mm}$) e dal valore di soglia ΔK_{th} per grandi cricche in regime di Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM). La curva di K.-T. separa (su un diagramma doppio-logaritmico di sforzo ciclico verso dimensione del difetto) la regione delle rotture da quella delle non-rotture. In corrispondenza di un certo valore fissato di σ_a nel servizio, si individua così la dimensione del difetto in grado di innescare la rottura per fatica del componente.

b) Relazione fra σ_{end} e pit critico. Immaginando il pit come un concentratore geometrico di sforzo, si può definire per via analitica (teorica) o sperimentale (quest'ultima è la via migliore) l'effetto di riduzione del carico limite conseguente alla presenza di pit di varia profondità. Il termini equivalenti, da prove di fatica nell'intorno del limite di vita infinita si può determinare sperimentalmente il valore del fattore di concentrazione di sforzo, individuato come $K_t = S_{end,d=0}/S_{end,d\neq 0}$ (dove d'ora in avanti si indicheranno con S le sollecitazioni nominali, carico/area, per evidenziare che si tratta di valori che prescindono dai veri valori presenti all'apice dei concentratori geometrici di sforzo). L'analisi qui svolta riprende fedelmente una metodologia utilizzata da ABB in ambito COST 501 [8] (in quel caso con riferimento a fatica-corrosione su acciai superclean, per rotori LP).

In concreto l'analisi completa è stata qui possibile solo per il caso delle palette, per le quali si è effettivamente potuta svolgere una sperimentazione sufficiente a determinare l'andamento del limite di fatica al variare della profondità dei pit di corrosione, la legge di crescita nel tempo di tale profondità, e infine anche il valore di ΔK_{th} . Nel caso dei fili degli elettrofitri, invece, i dati disponibili erano troppo limitati: si è potuto applicare solo il secondo dei due approcci, quello basato sul fattore K_t , e comunque utilizzando una relazione K_t vs. d predefinita anziché dedotta da prove: si è assunta applicabile la stessa relazione determinata per l'acciaio 13Cr delle palette (materiale avente un carico di rottura molto simile a quello dei fili di CORTEN; per contro gli acciai COST hanno valori del carico a rottura molto superiori, oltre 900 MPa).

Palette.

In Figura 1 viene mostrato l'andamento della curva di K.-T. per il materiale delle palette (sono anche evidenziate le incertezze conseguenti ai due diversi modelli di Elber e di Mc Evility per l'effetto R sulla soglia). Entrando sull'asse delle ordinate in corrispondenza di $\sigma_a = 20$ MPa, si determina per il pit critico il valore centrale in tale banda di incertezza pari a $d_c = 0.75$ mm.

Applicando invece il metodo basato sul concetto di concentratore di sforzo, risulta in base alle misure dei pit al microscopio, e ai valori di S_{end} ottenuti nelle prove coi diversi pit:

$$K_t = 0.8/0.3 d + 1 = S_{end,d=0}/S_{end,d\neq 0} \quad (1)$$

Ponendo in tale relazione $S_{end,d=0} = \sigma_{end}$ (per definizione) = 58.3 MPa, e $S_{end,d\neq 0}$ = valore del carico affaticante di servizio = 20 MPa, si ottiene: $d_c = 0.72$ mm.

Come si vede, i due modelli forniscono valori molto simili per la stima di d_c .

Infine è utile riportare che come sottoprodotto delle prove di fatica sui campioni pittati (in molti casi, pittati anteriormente alla fatica), si è anche potuta determinare una curva temporale di crescita dei pit. Si tratta di una curva definita da pochi punti, in particolare relativi a tempi di esposizione fino a poche centinaia di ore soltanto, che dunque non può essere estrapolata con buona confidenza. Sarebbe invece utile poter disporre di una curva più estesa nel tempo, e ben rappresentativa del vero ambiente d'esercizio (anzichè dell'ambiente simulato di laboratorio). Ma è comunque significativo riportare a titolo di esempio le conclusioni deducibili dalla curva di pitting sui campioni. La relazione determinata sperimentalmente è la seguente:

$$d \text{ (mm)} = 3.24 \cdot 10^{-3} \times t \text{ (ore)}^{1/3} \quad (2)$$

In base a tale cinetica di crescita, si ottiene il quadro seguente:

- occorrono 695 ore perchè un pit, inizialmente assente, raggiunga una profondità pari al 40% di d_c ;
- altre 3559 ore sono necessarie perchè il pit cresca dal 40% al 70% di d_c ;
- infine in altre 12404 ore il pit raggiunge la dimensione critica (dopodichè si avrà rottura in un paio di giorni ulteriori di lavoro).

E' evidente la possibilità, avendo a disposizione certi panorami di pittura riscontrati da indagini periodiche delle pale, di definire raccomandazioni operative, del tipo: ricontrollo metrologico alla successiva fermata programmata, ricontrollo a tempo ravvicinato, sostituzione immediata della pala.

Elettrofiltri.

Come detto i dati disponibili non hanno consentito di svolgere anche per gli elettrofiltri un'analisi così definita. In base alla sperimentazione svolta è stato tuttavia possibile applicare i concetti sopra esposti, pervenendo alle seguenti conclusioni.

a) Conferma del meccanismo di rottura.

Il limite di fatica di 47 MPa dedotto dalle prove sui fili eserciti appare in linea con quanto emerso dalla stress analysis: ad ogni martellatura corrispondono circa 150 cicli di carico (a 5000 Hz) con ampiezza di sollecitazione dell'ordine di 25 MPa; tuttavia in ogni martellatura vi sono dei cicli con sollecitazione anche molto superiore: in due fili si sono riscontrati uno o due casi di picchi con $\sigma_a = 50$ MPa circa, e negli altri sei fili esaminati si sono visti dei cicli con $\sigma_a = 40$ MPa. Si noti che durante 10000 ore di funzionamento avvengono 75000 colpi di martello, e dunque sono presenti almeno 75000 di tali cicli massimi. Dunque si conclude che il valore del limite di fatica del materiale esercito, pari a 47 MPa, è congruente con tali cicli massimi, con $\sigma_a = 40-50$ MPa. Tali gravosi carichi di servizio sono dell'ordine del limite di fatica del materiale pittato, e giustificano in pieno il meccanismo di rottura (fatica altociclica) già rivelato anche dall'osservazione frattografica di failure analysis.

b) Conferma del valore critico dei pit per l'innescò della frattura.

Assumendo che il meccanismo di rottura sia la fatica conseguente alle martellature, con cricche originate in corrispondenza di una dimensione critica dei pit che si formano per corrosione nelle fasi fuori servizio, dai valori di σ_{end} sopra riportati, per i provini eserciti e non, si ricava il valore del fattore critico di concentrazione di sforzo all'apice del pit critico:

$$K_t = S_{\text{end,vergine}}/S_{\text{end,esercizio}} = 1.33 \quad (3)$$

Tale fattore descrive l'effetto (geometrico) di concentrazione dello sforzo al fondo del pit. Ove si disponesse di misure di pit a varie profondità (d), correlabili a corrispondenti misure del limite di fatica su campioni contenenti pit con quelle profondità, si potrebbe ricavare la relazione esplicita fra K_t e d. In mancanza di ciò, appare però almeno possibile utilizzare tentativamente quanto emerso nel precedente lavoro sulle palette; dunque, assumendo applicabile la eq. (1), si ottiene, per $K_t = 1.33$, un valore per il pit critico pari a $d_c = 0.12$ mm. Tale valore è in ottimo accordo con le osservazioni dei pit dalla failure analysis su fili rotti in servizio: un pit con 0.15mm, un pit con 0.12mm, più altri pit più piccoli apparentemente sottocritici [9].

Nulla si può però dire qui relativamente al tempo necessario per arrivare alla formazione di un pit con profondità pari a d_c .

5. Conclusioni

Si è dimostrata la possibilità di razionalizzare la frattura per fatica di due componenti soggetti a pitting (in fuori servizio) e a carichi affaticanti (in servizio) tramite un approccio basato sull'innescò di danno per fatica alla radice di pit di dimensione opportunamente grande. Tale dimensione critica risulta definita in base al limite di fatica del materiale pittato a varie profondità, e al livello della sollecitazione ciclica in servizio. Alternativamente, è applicabile l'approccio di Kitagawa-Takahashi, nel qual caso occorre conoscere il valore dell'intensità di soglia per grandi cricche.

Per le pale la fase di crescita del pit fino alla criticità nei riguardi della fatica rappresenta la vita ingegneristicamente spendibile: infatti una volta innescata, la fatica conduce a rottura l'elemento dopo qualche decina di ore soltanto. Il modello si presta a fornire una classificazione dei pit riscontrabili in servizio durante le manutenzioni periodiche, secondo classi di severità legate alla distanza dalla dimensione critica; tale distanza è pilotata dalla cinetica di crescita dei pit per corrosione. A tali classi risulta poi immediato riferire raccomandazioni operative, del tipo: ripetizione del controllo alla normale scadenza, ricontrollo a tempo ravvicinato, sostituzione immediata.

Per i fili degli elettrofiltri invece una volta raggiunta la dimensione critica dei pit in grado di innescare la fatica, la frattura sopravviene poi dopo alcune migliaia di ore di ulteriore esercizio. L'osservazione periodica dei pit è difficilmente praticabile sui fili, e il metodo serve essenzialmente a inquadrare le discussioni per possibili miglioramenti: a livello di ambiente di lavoro, geometria dell'elemento e carichi di martellatura, ma soprattutto scelta del materiale. In particolare l'adozione di un materiale con migliori caratteristiche corrosionistiche permetterebbe, a parità di resistenza meccanica, di sfruttare l'ampio margine che ancora esiste fra i carichi effettivi del servizio (mediamente $\sigma_a = 20$ MPa, con solo pochi cicli fino a 50 MPa) e il limite di fatica del materiale non corrosivo ($\sigma_{\text{end}} = 62.5$ MPa).

Bibliografia

1. V. Bicego e P.P. Colombo, Analisi della gravosità dei cicli di battitura del portaelettrodi da punto di vista della fatica meccanica, CISE-SIS-97-5, 1997 (riservato).
2. V. Bicego e N. Ricci, bollettino CISE SME-96-055, 1996 (riservato).
3. J.R. Zuiker and T. Nicholas, Observations and limitations on the use of the Goodmann diagram for combined HCF/LCF loading, Proc. of Int. Conf. Fatue 96, Eds. Lutjering and Nowak, Pergamon, 1996, vol. I, 467-472.

4. W. Elber, The significance of fatigue crack closure, ASTM STP 486, 1971, 230-242.
5. A.J. Mc Evily, Current aspects of fatigue, *Metals Science*, 1977, vol.11, p.274.
6. D. Taylor and Li Jianchun, *Sourcebook on Fatigue Crack Propagation: Thresholds and Crack Closure*, EMAS 1993, ISBN 0 947817 58 1, pag. 115.
7. H. Kitagawa and T. Takahashi, Proc. of 2nd Int. Conf. on Mech. Beh. of Materials, Boston Mass., 1976, 627-631.
8. J. Denk, COST 505 WP8 (III) final report, Environmental induced cracking in LP rotor steels, 1996.
9. N. Ricci, S. Ripari, Analisi metallografica e frattografica di elementi di elettrofiltri, CISE-SMI-97-20, Rapporto di Prova, 14.7.1997 (riservato).

Atti del convegno

[[Precedente](#)]

Versione HTML realizzata da

