



PROVE DI RESILIENZA AD ALTA TEMPERATURA SU SUPERLEGHE

A. Aguzzi, V. Bicego & N. Taylor

CISE Tecnologie S.p.A., PO BOX 12081, 20134 Milano

SOMMARIO

Le prove di resilienza sono lo strumento principale per valutare se il materiale di palette mobili di turbogas risulta pericolosamente infragilito a seguito dell'esercizio prolungato. Tuttavia la tecnica è in grado di apprezzare l'avvenuto infragilimento dovuto all'invecchiamento solo se le prove sono condotte ad alta temperatura, cioè intorno a 1000°C per questi materiali, e ciò richiede un'attrezzatura particolare. Per sviluppare tale capacità al CISE è stato di recente deciso, a valle di un'indagine preliminare (in particolare guardando al mondo EPRI), di operare modificando una apparecchiatura già esistente per prove standard di impatto, aggiungendovi un sistema per riscaldare il provino *in situ*. Vengono descritti i dettagli del sistema sviluppato, che garantisce una stabilità di temperatura, un rapido raggiungimento della stessa ed una facilità di esecuzione vantaggiosa rispetto ai metodi riportati nella letteratura.

1. INTRODUZIONE

Le palette rotanti dei turbogas per generazione di potenza elettrica sono spesso l'elemento più critico della macchina, essendo anche il fattore limitante per i miglioramenti tecnologici. Le palette, solitamente realizzate in superleghe di nichel, soffrono il creep, la fatica termica, l'invecchiamento/infragilimento, l'ossidazione, in misura diversa a seconda di diversi fattori: l'essere palette di prima o ultima fila, la presenza di eventuali ricoperture, il raffreddamento interno ecc. Di norma le prime file ospitano palette piccole e soffrono il danno LCF (dunque si utilizzano materiali molto resistenti al danno LCF ad alta temperatura), mentre le ultime palette della turbina sono grandi e soffrono il creep (dunque si privilegiano superleghe resistenti al creep). In tutti i casi un requisito importante del materiale è di avere buone caratteristiche di tenacità e di resistenza alla crescita delle cricche per fatica (meno importante: per creep). Diversamente dai grossi componenti realizzati in acciaio di molti

impianti (termoelettrici a olio combustibile, nucleari, petrolchimici, condotte e piattaforme offshore), le buone proprietà frattomeccaniche per le superleghe delle palette rotoriche dei turbogas non sono richieste in vista di un approccio damage tolerant all'analisi d'integrità e della vita residua del componente. Date le ridotte dimensioni e gli elevati valori delle sollecitazioni in gioco l'approccio non è mai damage tolerant, e non appena si forma una cricca di dimensioni osservabili ai normali controlli periodici la palette che la ospita deve essere sostituita. Per le superleghe utilizzate per le palette di turbine è però importante che il materiale possieda una buona resistenza all'impatto, in relazione al problema del "*Foreign Object Damage*". Questo riguarda l'ingresso nella turbina di corpi estranei e l'effetto del loro impatto sulle palette: è importante che la prima palette colpita non si rompa e che non si inneschi un processo di distruzione a valanga fra le palette colpite dai rottami di altre palette rotte. Diverse indagini hanno mostrato che molte superleghe a base nichel, nonostante una resilienza discreta in condizione vergine, subiscono effetti di infragilimento notevoli in servizio, con diminuzione di 3-4 volte dell'energia assorbita in una prova di impatto. Questo è dovuto tipicamente ad un'evoluzione della microstruttura. Ad esempio le principali evoluzioni microstrutturali in superleghe di nichel del tipo Udimet sono:

- sferoidizzazione della fase γ' ;
- diminuzione della densità di dislocazioni;
- coalescenza dei carburi al bordo grano con scomparsa dei carburi frastagliati e sottili presenti nel materiale non-invecchiato.

L'effetto sinergico di questi aspetti determina una diminuzione di durezza, sino a circa 60 kg/mm². Tuttavia da alcune fonti è stato rivelato che un contributo all'infragilimento viene anche dall'ossidazione del materiale.

Per valutare lo stato di infragilimento del materiale di una palette ci si può basare su osservazioni di tipo microstrutturale, che talora possono anche essere di tipo non distruttivo. Ma è evidente che l'unica risposta sicura sullo stato di infragilimento possono solo darla le prove meccaniche, su campioni prelevati dalla palette esercitata. La tecnica è evidentemente di tipo distruttivo: i dati così raccolti per una palette si ritengono rappresentativi della corona di palette circostanti.

2. PROVE MECCANICHE PER VALUTARE L'INVECCHIAMENTO DEL MATERIALE DI SUPERLEGHE

In teoria sono possibili diversi tipi di misure meccaniche: ciò che interessa è infatti poter misurare una qualche proprietà che sia un buon indicatore (per biunivocità e sensibilità) della capacità del materiale di deformarsi duttilmente. Le prove più immediatamente considerabili sono le trazioni, le misure di durezza e le prove di resilienza. Ricerche sono state compiute su tutte queste tecniche, applicate a temperatura ambiente e anche ad alta temperatura. Una interessante rassegna è riportata in /1/. La tecnica più promettente sembra costituita comunque dall'impiego di prove di resilienza. In tal caso le modalità sono fondamentalmente due: rottura a temperatura ambiente e rottura in prove alla temperatura di esercizio della palette. Queste ultime prove sono ovviamente le più rappresentative del fenomeno in studio (impatto da oggetti estranei), ma sono ovviamente anche quelle che richiedono maggiore

impegno strumentale (vista l'alta temperatura) e dunque occorre prima verificare se non sono rimpiazzabili dalle altre prove, di esecuzione più agevole.

Il lavoro di rottura di prove di impatto a temperatura ambiente è una quantità molto facile da ottenere, e le prove sono a basso costo: dunque al CISE si è cercato dapprima di valutare se questa quantità costituisce una spia sensibile dell'avvenuto infragilimento del materiale nei riguardi del problema del FOD. Sfortunatamente la risposta si è rivelata ambigua: spesso il valore del lavoro di rottura misurato a TA non si accorge del peggioramento delle caratteristiche della paletta di assorbire gli urti a caldo senza rompersi. I motivi di questa insensibilità della tecnica a TA sono legati ai diversi meccanismi di rottura operativi a TA rispetto ad alta temperatura. Per esempio nel caso degli Udimet:

- a 20 °C il distacco è comunque fragile e intergranulare, sia per materiale nuovo che per materiale intensamente esercito.
- a 900 °C invece il meccanismo di frattura è diverso nelle due condizioni di vergine e di invecchiato, nel senso che il materiale non invecchiato presenta una quota significativa di frattura duttile transgranulare e la formazione di cavità attorno ai precipitati grossolani e alle inclusioni, mentre nel caso dell'invecchiato invece le regioni transgranulari duttili sono quasi assenti. Ciò è dovuto probabilmente alla maggiore incoerenza del fitto strato di carburi a bordo grano che favorisce la frattura fragile intergranulare, in modo sostanzialmente simile a quanto osservato a 20 °C.

Ciò spiega dunque l'abbassamento dei valori di resilienza misurabili (ma solo in prove ad alta temperatura) sul materiale invecchiato a caldo rispetto al vergine. Dunque l'unica tecnica utilmente impiegabile per valutare il degrado in esercizio delle palette è data da prove di resilienza effettuate ad alta temperatura. Negli Stati Uniti si è anche arrivati a formulare un criterio di accettabilità per il materiale delle palette, vergine (qualifica del materiale per quell'impiego) o esercito (criterio di scelta fra il proseguimento dell'esercizio con le vecchie palette o la sostituzione). Il criterio di accettabilità è basato su un valore del lavoro di rottura a caldo pari ad almeno 8 Joule.

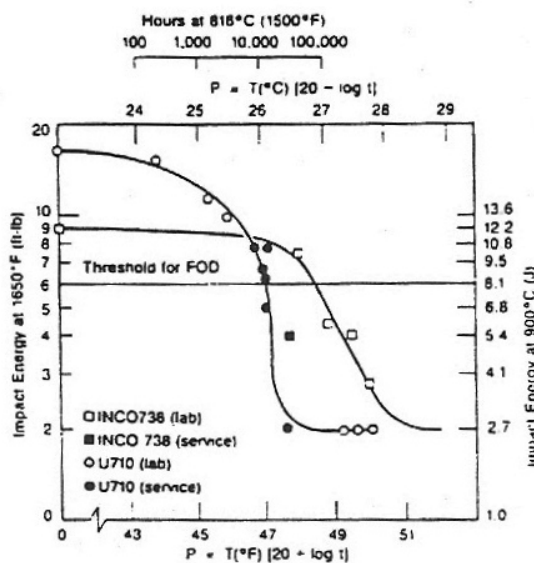


Figura 1: L'effetto dell'invecchiamento sulla resilienza di alcuni superleghe [1].

Per valutare l'effetto dell'invecchiamento correlando i dati ottenuti su provini invecchiati in laboratorio alle condizioni delle palette in servizio, viene impiegato lo stesso parametro tempo-temperatura in uso per trattare i problemi di creep, il parametro di Larson-Miller P_{LM} . Nella Figura 1 è mostrato un diagramma di questo tipo, tratto dalla letteratura [1], in cui sono analizzati in questo modo dati di resilienza a 900°C per Udimet 710 e IN-738. Si vede chiaramente che esiste una caduta di resilienza all'aumento della durata del trattamento di

invecchiamento. Tale informazione può essere utilizzata per stabilire il limite della vita di una palette, dopo che la stessa diventa a rischio di danno FOD (*foreign object damage*). Si noti che la conoscenza di questo andamento per una superlega consente non solo di prevedere in fase di progetto la durata delle palette relativamente al problema dell'infragilimento, ma dalle misure di resilienza a un certo istante della vita si può anche individuare la "posizione" del materiale lungo la curva "energia d'impatto - parametro di Larson-Miller". E' anche pensabile che dal valore di P_{LM} si possa poi ricavare (noto il tempo di servizio della macchina, la temperatura equivalente, il carico imposto dalla rotazione della palette) entrando sulle curve di creep del materiale vergine una stima della Vita Residua (VR).

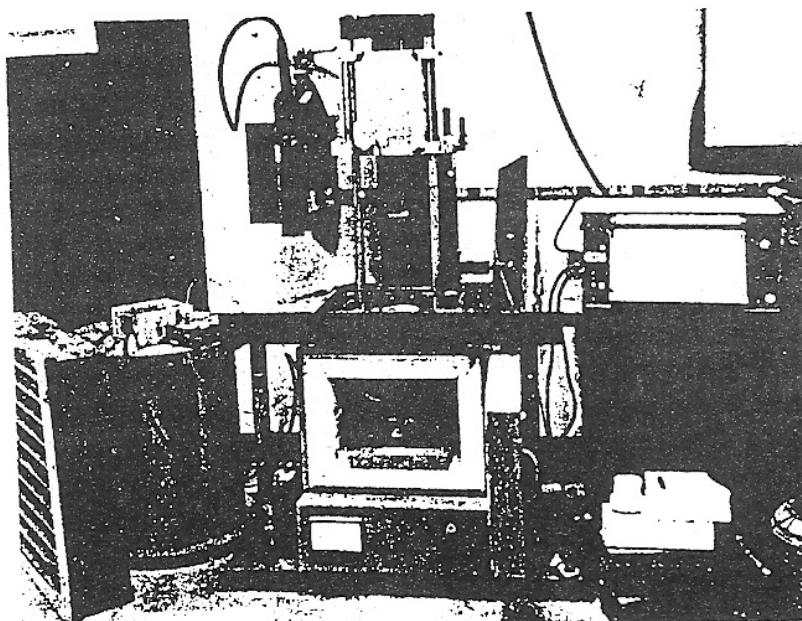
Quindi in definitiva la conoscenza dell'andamento della resilienza in prove ad alta temperatura è importante:

- per valutare l'adeguatezza delle palette esercite nei riguardi del FOD, e infine
- per progettare la vita delle palette nuove nei riguardi dell'infragilimento in esercizio, e
- come metodo indiretto potenzialmente adatto alla valutazione della VR spesa per creep.

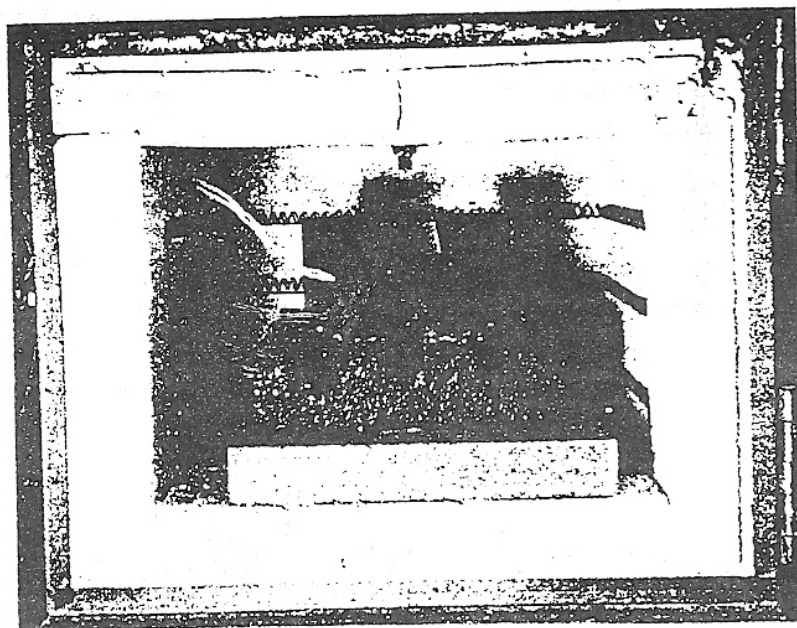
Scopo di un'attività di recente avviata al CISE è stato l'approfondimento di tali problematiche, con riferimento a superleghe in uso nelle attuali turbine a gas. La tecnica delle prove di impatto e le relative metodiche di analisi costituiscono attività molto ben consolidate al CISE, che ha accumulato una lunga esperienza particolarmente per quanto riguarda gli aspetti della transizione duttile-fragile degli acciai (specie basso-legati). Tuttavia mancava la capacità di eseguire tali prove ad alta temperatura (per le superleghe a base nichel si parla di 900°C e più). Prima di acquisire la tecnica, si è svolta una breve indagine per valutare le soluzioni fornite dalla letteratura, in particolare analizzando quanto fatto da Rockwell International nell'ambito di una commessa EPRI. Nel seguito vengono brevemente illustrati il sistema di prova EPRI e il sistema di prova che si è invece scelto di sviluppare al CISE per questo tipo di misure.

3. IL SISTEMA EPRI PER PROVE DI IMPATTO AD ALTA TEMPERATURA

Si tratta di un sistema sviluppato dal Rockwell International per uno studio sponsorizzato dall'EPRI sugli effetti dell' invecchiamento sulla resilienza delle superleghe Udimet-710 e IN-738. In base alla descrizione sommaria fornita in /2/, il principio di prova impiegato è quello di caduta di una traversa pesante, con una mazza che penetra in una feritoia dentro un forno a resistenza (Fig. 2). Per evitare tempi di riscaldamento troppo lunghi, i provini vengono tenuti alla temperatura di prova in un forno separato, e poi uno per uno trasferiti alla apparecchiatura di prova stessa. Occorre poi lasciare stabilizzare per 10-15 minuti la temperatura, prima di eseguire la prova. Il sistema fa riferimento alla normativa ASTM E-23, e ha una massima energia disponibile di 35 J. La energia di impatto è determinata usando uno strumento attaccato alla traversa, probabilmente calibrato da prove a temperatura ambiente su un materiale di caratteristiche ben stabilito; manca una descrizione più precisa. Si è contattato direttamente l'EPRI, e il risultato è stato che esiste un documento dettagliato, ma di costo esorbitante (evidentemente contiene il progetto vero e proprio). Dunque si è sospesa l'indagine con un nulla di fatto, e si è cominciato a pensare a una soluzione originale.



a



b

Figura 2: Il sistema riportato dall'EPRI /2/, mostrando (a) la macchina di prova e (b) gli appoggi del provino dentro il forno

4. IL SISTEMA SVILUPPATO AL CISE

La tecnica delle prove di impatto e le relative problematiche di processamento dei dati (in particolare per arrivare a valutare in certi casi anche valori per la tenacità dinamica) è un'attività ben consolidata al CISE, a partire da una grande mole di lavori riguardanti la determinazione della transizione duttile-fragile degli acciai basso-legati. La dotazione strumentale disponibile per quelle prove consiste in particolare in un pendolo Wolpert (a norma DIN) con energia massima pari a 300 J, un pendolo Tinius Olsen (a norma ASTM) con percussore strumentato e portata 358 J e infine una attrezzatura *drop weight* CEAST (con norma in fase di preparazione, a livello internazionale; inizialmente attrezzata per prove su materiali plastici, poi adattata per mini-provini metallici e di recente strumentata anche per misure di tenacità dinamica) con portata 62 J. Per svolgere le prove di resilienza ad alta temperatura (per le superleghe a base nichel si parla di oltre 900°C) i problemi che occorre affrontare sono i seguenti.

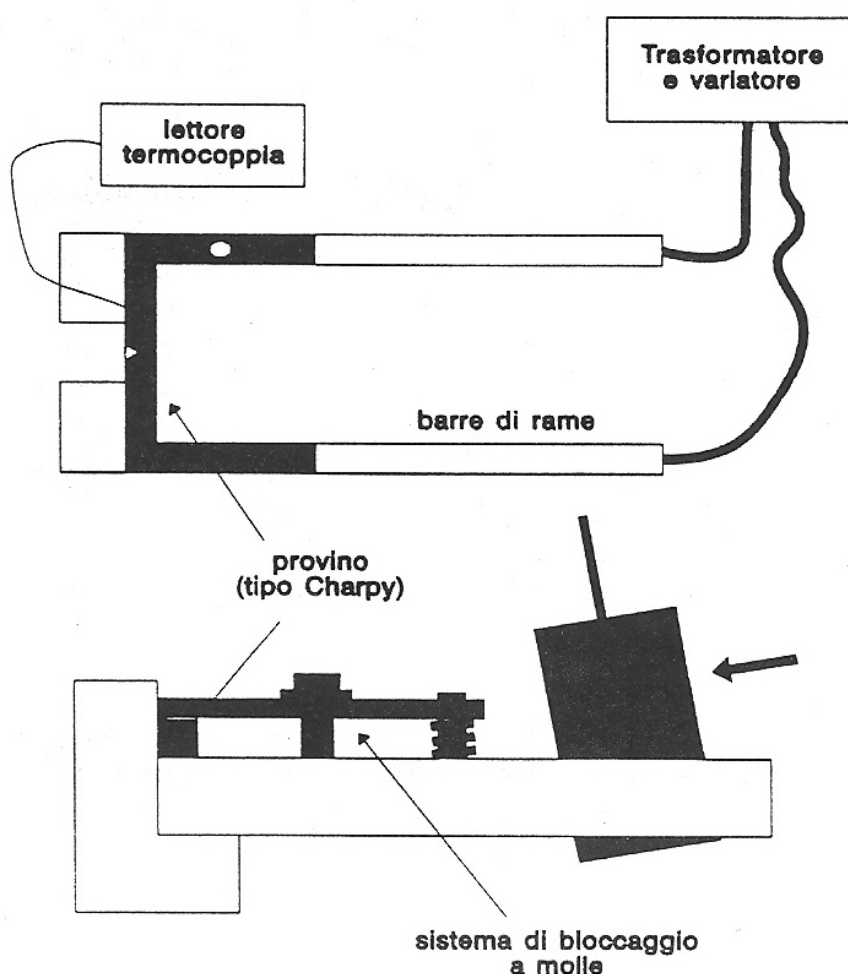


Figura 3: Il sistema di prova di impatto ad alta temperatura progettato dal CISE.

- Il sistema tradizionale di condurre prove di resilienza a temperature diverse da quella ambiente consiste nella pre-immersione del campione in miscele liquide (prove a freddo) o nel pre-inserimento in forni (prove a caldo), e successiva estrazione veloce, montaggio e rottura su un pendolo. Oltre 300-400°C questo sistema non consente un controllo sufficientemente stretto sulla temperatura del campione al momento dell'impatto.
- Il modo più semplice ed economico per riscaldare le barrette Charpy è tramite passaggio di corrente nelle barrette stesse (effetto Joule). Questo sistema viene da qualche tempo usato al CISE nel caso delle prove sui mini-campioni con l'attrezzatura di *drop weight*. Ma per campioni di dimensione standard e alle temperature di lavoro delle superleghe la dispersione termica nell'ambiente (si tratta soprattutto di irraggiamento, in misura inferiore di conduzione e convezione) è rilevante e obbliga a usare grosse quantità di corrente: nasce il problema del sistema di alimentazione.
- E' conveniente usare forte amperaggio e bassa tensione: occorrono cavi di grande sezione e soprattutto occorre una grande area di contatto fra cavi e provino. Per una buona continuità elettrica occorrerebbe una saldatura, ma in tal modo poiché i cavi sono molto grossi si introducono rigidità notevoli nell'accoppiamento fra cavi e campione, per cui il lavoro del percussore risulta in grande parte sprecato per vincere le forze di vincolo. Occorre perciò pensare a dei cavi "appoggiati" sul campione, ma al contempo ben premuti contro di esso per assicurare un buon contatto elettrico.

Si è deciso in questa prima fase di sviluppare un sistema di prova adatto a eseguire prove di resilienza ad alta temperatura su campioni di dimensione normale, con riferimento alla norma ASTM ovunque possibile: dunque ci si è indirizzati verso una modifica della macchina di impatto Tinius-Olsen, per adattarvi un sistema per riscaldare il provino *in situ*. Il sistema è presentato nella Figura 3. Il provino, di tipo Charpy V e dimensioni standard 10x10x50mm, viene riscaldato per effetto Joule sfruttando un sistema a bassa tensione, pilotato da un variatore di tensione che agisce sul primario del trasformatore. Gli appoggi sono stati modificati per permettere il passaggio della corrente. La barretta viene appoggiata su due barre di rame, che portano la corrente dal trasformatore (indicativamente per portare il provino a 900°C occorrono 150 A con una tensione di 1.5 V). Per garantire il contatto è stato creato un sistema con molle a carico costante, come indicato nella Fig. 4. Prove preliminari con e senza sistema di bloccaggio del provino hanno dimostrato che non esiste alcuna influenza sul valore di resilienza misurato. La temperatura del provino viene controllata utilizzando una termocoppia tipo K saldata elettricamente all'apice dell'intaglio. Si noti che il percussore è strumentato e quindi esiste la possibilità di sfruttare tali prove per ottenere anche la tenacità dinamica (che rappresenta una caratteristica del materiale). Il metodo usato garantisce una stabilità di temperatura e un rapido raggiungimento della stessa (ad esempio, 2 minuti per arrivare ad 900°C) e la sua facilità di esecuzione per prove ad alta temperatura presenta dei vantaggi rispetto ai metodi che utilizzano i forni.

L'attrezzatura è già da qualche mese entrata nella fase di impiego corrente per misure di tenacità in temperatura delle superleghe. Purtroppo si tratta di attività svolte su commessa caratterizzata ovviamente da vincoli di riservatezza, e dati i tempi recentissimi nei quali

questi dati sono stati ottenuti non si è fatto in tempo a percorrere la trafila di autorizzazione alla loro divulgazione, prima della pubblicazione in questo lavoro. Ad ogni modo si può qui solo anticipare il buon lavoro di tutta la strumentazione sviluppata; in particolare:

- le misure sono risultate affette da dispersione modesta (1 J; oltre tutto la dispersione potrebbe essere intrinseca dei campioni, non dovuta alla macchina di prova);
- l'infragilimento in prove su Udimet 720 è risultato ben avvertibile in prove a 900°C, e assente a TA, in linea con quanto ci si attendeva e quantitativamente anche in corrispondenza col comportamento di altre superleghe simili.

Visto il buon successo della tecnica, attualmente si sta pensando a rendere possibili queste prove anche su campioni miniaturizzati (dimensioni 2.5x2.5x10mm, adatti per il prelievo dalle zone più sollecitate delle palette) probabilmente adattando opportunamente la macchina *drop weight* del laboratorio dato che il pendolo fin qui impiegato risulterebbe troppo superdimensionato per i miniprovini, con conseguente scarsa precisione sulla misura del lavoro di rottura.

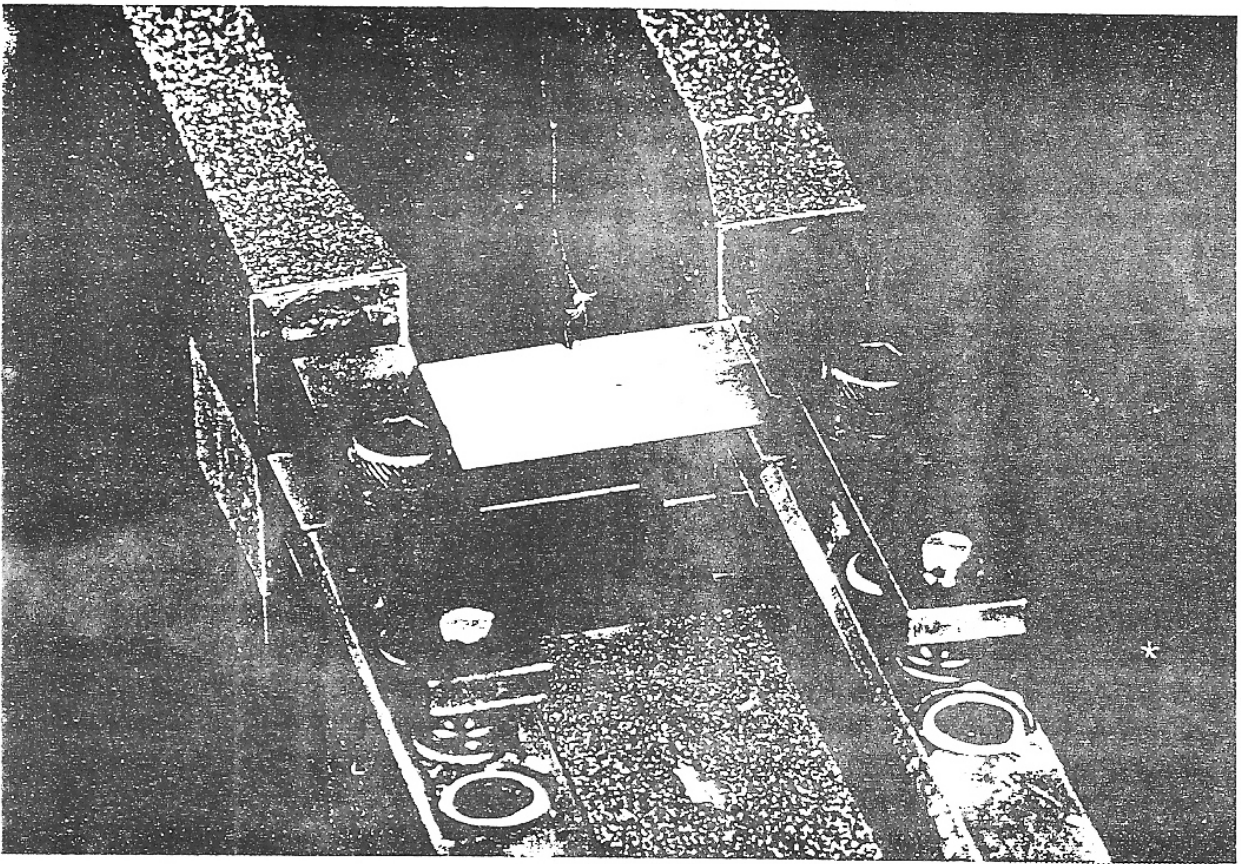


Figura 4: Il sistema di molle a carico costante utilizzato per garantire il contatto elettrico al provino.

5. CONCLUSIONI

La letteratura generalmente è concorde nell'indicare che per le superleghe l'invecchiamento non influisce sul valore di resilienza a TA; invece ad alta temperatura si osserva una caduta della resilienza a seguito dell'esercizio prolungato. Il fatto che il peggioramento della resilienza ad alta temperatura spesso non è riscontrabile nelle prove a TA sottolinea l'importanza di poter eseguire tali prove ad alta temperatura.

Indagini microstrutturali condotte sul materiale nella condizione tal quale e invecchiato indicano che la caduta del valore di resilienza è dovuto a modifiche della microstruttura; ma talora si è proposto esistere anche un effetto dell'ossidazione.

Le misure di resilienza a caldo sono utili per progettare la vita delle palette (sostituzioni programmate) nei riguardi del problema dell'infragilimento, per valutare la necessità di sostituzioni con palette nuove e anche, come possibilità da esplorare, per valutare la vita residua a creep.

Il CISE ha da poco sviluppato un sistema dimostratosi adatto all'esecuzione di prove di resilienza fino a 1200°C. L'attrezzatura è stata messa a punto apportando talune semplici modifiche ad una macchina preesistente nel laboratorio (pendolo Charpy), per consentire il riscaldamento *in situ* dei provini. Si tratta di un sistema decisamente a basso costo, molto più semplice di una attrezzatura per prove analoghe sviluppata dall'EPRI.

Le prime misure ottenute con questo sistema hanno rivelato valori di caduta di resilienza su una superlega Udimet 720 dopo invecchiamento soddisfacenti e in linea col comportamento di superleghe simili.

Il sistema è già adatto a misure routinarie, ma per attività di vita residua dei componenti è importante poter fare queste prove su campioni interamente costituiti da materiale proveniente dalle zone (poco estese) dove è massimo il danno. Ci si sta dunque muovendo in direzione di uno sviluppo della tecnica verso i provini miniaturizzati.

Bibliografia

1. Stringer, J. e Viswanathan, R., *Life Assessment Techniques and Coating Evaluations for Combustion Turbine Blades*, Proc. Conf. Life Assessment and Repair Technology for Combustion Turbine Hot Section Components, eds. Viswanathan & Allen, 1990, EPRI GS-7031.
2. EPRI GS-6441, *Service Embrittlement of Gas Turbine Alloys Udimet 710 and IN-738*, Vols. 1 & 2, 1989.
3. EPRI GS-7302, *Development and Evaluation of Life Assessment and Reconditioning Methods for Gas Turbine Blading*, ABB, Baden, Switzerland, 1991.
4. Rapporto Finale CISE 7132, *Caratterizzazione di materiali adottati nelle parte calde di turbine a gas*, 1993.