

# I materiali per turbine a gas industriali: prestazioni, problematiche e attività di ricerca

C. Guardamagna, V. Lupinc, G. C. Gualco

*In questo lavoro sono presentate le problematiche relative ai nuovi materiali per le turbine a gas industriali, prendendo in considerazione i requisiti ad essi richiesti per la loro applicazione nelle parti calde e quindi la loro evoluzione negli anni seguendo le caratteristiche delle macchine più avanzate; inoltre vengono illustrate le attività di ricerca in corso a livello nazionale ed internazionale (in particolare europeo) nel settore dei materiali innovativi a supporto del sistema elettrico.*

**Parole chiave:** superleghe, valutazione materiali, energia

## INTRODUZIONE

Lo sviluppo di un sistema di generazione moderno, caratterizzato da un'alta integrazione con il territorio, da semplicità di gestione, elevata efficienza e sicurezza della fornitura, nonché da una ottimizzata compatibilità ambientale, appare un elemento indispensabile per un utilizzo sostenibile della energia, in particolare quella elettrica.

Il gas naturale è uno dei protagonisti dell'economia energetica ed il suo impiego nei sistemi di generazione elettrica aumenta costantemente. La macchina più efficace con cui viene utilizzato il gas naturale per generare energia elettrica è la turbina a gas, la cui efficienza può essere incrementata con l'innalzamento della temperatura dei gas di combustione in ingresso in turbina (TIT). In un ciclo combinato, passando dagli attuali 1300°C a 1500°C si ottiene un aumento di efficienza di 4-5% con riduzione del consumo di gas naturale e delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Dati recenti indicano per i cicli a gas naturale della prossima generazione efficienze fino al 60%.

L'aumento della TIT è conseguibile, oltre che grazie alle tecniche di raffreddamento delle pale, ormai ampiamente utilizzate e comunque energy-consuming, solo con la disponibilità di nuovi materiali più resistenti alle alte temperature. I nuovi materiali sono dunque da considerare la barriera tecnologica per lo sviluppo di nuove turbine a gas e rivestono un ruolo fondamentale verso cicli termici che possano essere definiti sistemi puliti di generazione di energia elettrica. Come conseguenza le attività di R&S sui materiali trovano sempre più facilmente spazio e supporto nell'ambito di programmi nazionali ed internazionali con finalità "ambientali". Inoltre, affinché l'utilizzo dei nuovi materiali possa essere assicurato nel tempo in condizioni estreme, è necessario poter verificare in esercizio le effettive condizioni di lavoro per mezzo di idonei sistemi e metodologie diagnostiche.

In questo lavoro sono presentate le problematiche relative ai nuovi materiali per le turbine a gas industriali, prendendo in considerazione i requisiti ad essi richiesti per la loro applicazione nelle parti calde e quindi la loro evoluzione negli anni seguendo le caratteristiche delle macchine più avanzate;

inoltre vengono illustrate le attività di ricerca in corso a livello nazionale ed internazionale (in particolare europeo) nel settore dei materiali innovativi a supporto del sistema elettrico.

## MATERIALI PER TURBINE A GAS INDUSTRIALI

Come si è detto, l'incremento del rendimento del ciclo termico, con l'innalzamento della TIT, e la riduzione dei costi del ciclo di vita della macchina sono fattori di rilievo per minimizzare il costo di generazione di energia elettrica e contemporaneamente limitarsi ad un impatto ambientale sostenibile. La necessità di soddisfare la crescente domanda di turbine a gas industriali caratterizzate dai citati requisiti pone i materiali di tipo innovativo in un ruolo preminente; in particolare risulta indispensabile, date le temperature in gioco, l'utilizzo di superleghe anche avanzate come materiali di riferimento. Si rende quindi necessaria la loro caratterizzazione e la modellizzazione del loro comportamento in esercizio, ma anche la ricerca e lo sviluppo di nuovi materiali e/o nuove tecnologie per le alte prestazioni a cui devono rispondere.

Poiché l'industria aeronautica è tradizionalmente la principale utilizzatrice di superleghe, specialmente di tipo avanzato, il settore delle turbine terrestri segue quello aeronautico acquisendo per quanto possibile i progressi raggiunti nello sviluppo di nuovi materiali, in termini di ottimizzazione sia della composizione chimica che delle tecnologie e dei processi di fabbricazione e di solidificazione. In realtà non è possibile un'applicazione diretta della tecnologia aeronautica alle turbine a gas industriali dati i differenti requisiti che devono avere queste ultime rispetto ai motori aeronautici.

Le principali differenze tra i due tipi di applicazioni sono riassunte in Tabella 1 e possono essere discusse come segue.

- **Peso:** questo, che è un fattore critico per i propulsori aeronautici, non è determinante nella scelta dei materiali per turbine terrestri; dunque materiali selezionati nell'aeronautica solo sulla base di considerazioni relative al peso (ad esempio bassa densità) non sono di norma di interesse per l'industria energetica.
- **Tempo di funzionamento:** mentre per i motori aeronautici esiste un funzionamento stazionario a temperatura intermedia e un tempo relativamente breve durante il quale il motore sperimenta le temperature di picco, per un totale di circa 25.000 ore di funzionamento, la turbina a gas industriale lavora costantemente e per un tempo notevolmente più lungo (>100.000 ore) a temperature più alte.

C. Guardamagna, CESI Spa, Segrate (MI)

V. Lupinc, CNR-IENI Sezione di Milano

G. C. Gualco, Ansaldo Ricerche, Genova

Memoria pervenuta il 18 dicembre 2002

- **Cicli in servizio:** in entrambi i casi le macchine devono presentare una notevole capacità ad assorbire i cicli di lavoro, anche se per le turbine aeronautiche le condizioni di picco (decollo) durano pochi minuti, mentre le turbine terrestri lavorano in condizioni di elevato carico termico e meccanico per parecchi giorni o settimane.
- **Ambiente:** mentre il carburante per i motori aeronautici è generalmente di alta qualità e non corrosivo, le turbine terrestri sono esposte ad un ambiente generalmente più corrosivo (spesso contenente zolfo e talvolta anche vanadio).
- **Taglia:** è questa forse la differenza più significativa, basti pensare che generalmente le dimensioni delle turbine terrestri sono più grandi di 2-3 volte (quindi ad esempio le palette possono pesare 20-30 volte di più). Ovviamente tale differenza nella dimensione ha un forte impatto sulla fabbricabilità e sul costo del componente.

Storicamente il settore delle turbine a gas industriali seguiva a buona distanza le turbine aerospaziali raccogliendone le innovazioni ed adattandole dopo 15-20 anni ad esigenze specifiche; oggi il ritardo turbine a gas industriali/avio è ridotto a meno di un decennio e la competizione ha portato all'utilizzo delle nuove soluzioni a temperature e sforzi elevati per tempi che superano le 100.000 ore.

**I COMPONENTI CRITICI E I REQUISITI PER LA SCELTA DEI MATERIALI**

In una turbina a gas (Fig. 1) i componenti più critici sono le palette statoriche (ugelli) e soprattutto rotoriche dei primi stadi di espansione, oltre alla camera di combustione e alle parti di transizione tra combustore e rotore, e infine i dischi. Di seguito vengono presi in esame i requisiti per la scelta dei materiali per parti calde di turbine a gas e per ciascun componente viene dato un elenco con alcuni dei materiali utilizzati.

**Combustore e parti di transizione**

Le temperature delle pareti della camera di combustione possono essere molto elevate e i materiali sono sottoposti a brusche variazioni di temperatura in corrispondenza delle accensioni e spegnimenti. I condotti di transizione, convogliando il gas in uscita dal combustore al primo stadio di ugelli, sono sottoposti a carichi e temperature notevoli in esercizio.

In generale dunque i materiali per la camera di combustione e le parti di transizione devono essere caratterizzati da:

- una buona lavorabilità e saldabilità;
- resistenza a fatica oligociclica e ad alta frequenza (HCF), quest'ultima in relazione alle vibrazioni ad alta frequenza generate dal processo di combustione;
- resistenza ad ossidazione;
- buona stabilità metallurgica;
- resistenza meccanica necessaria per evitare effetti da carico di punta.

La temperatura del componente viene peraltro mantenuta a livelli accettabili grazie a sistemi di raffreddamento e alla presenza di barriere termiche.

I materiali usati per questo tipo di componenti sono superleghe quali Hastelloy X, Nimonic 263, IN617, Haynes 188 e 230, talvolta ricoperti con barriere termiche.

**Palette statoriche (ugelli)**

La funzione delle palette statoriche è quella di ricevere il gas caldo dal combustore, o dallo stadio precedente, e convogliarlo, in genere anche accelerandolo, fino allo stadio rotante successivo ottimizzando l'angolo di contatto. Il primo stadio statorico sperimenta la più alta temperatura del gas, che arriva alla più alta velocità. Essendo comunque componenti statici gli ugelli sperimentano sollecitazioni unicamente dovute a gradienti termici.

	<b>Propulsori aeronautici</b>	<b>Turbine industriali</b>
<b>Peso</b>	Molto importante	Importante
<b>Tempo di funzionamento:</b>		
stato stazionario	25.000 h	100.000 h
T massima	< 1000 h	> 100.000 h
<b>Cicli in servizio</b>	Molti e gravosi	Molti e gravosi
<b>Ambiente</b>	Non corrosivo	Corrosivo
<b>Taglia</b>	Piccola	Grande

Tabella 1 – Principali differenze tra propulsori aeronautici e turbine a gas industriali

Table 1. Main differences between aeronautical and industrial gas turbines

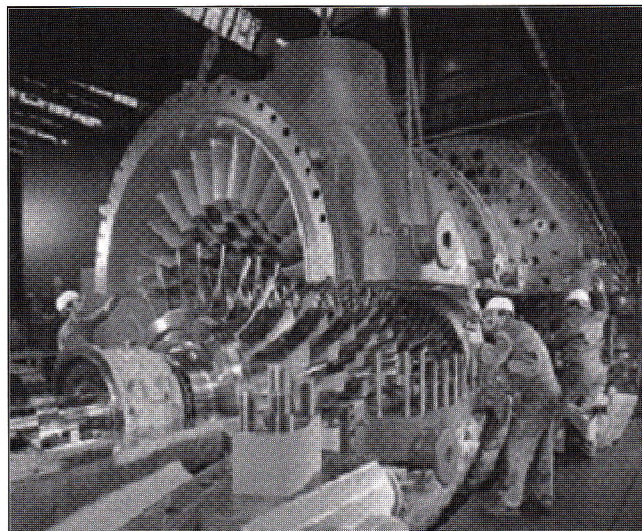


Fig. 1. Spaccato di una turbina a gas industriale (ALSTOM Power)

Fig. 1. Example of large industrial gas turbine (ALSTOM Power)

Quindi i requisiti fondamentali che devono avere i materiali per ugelli sono:

- resistenza a ossidazione/corrosione (specie per carburanti meno nobili);
- resistenza a fatica termica;
- buona saldabilità;
- stabilità metallurgica;
- possibilità di riparazione.

Oltre a questi requisiti, si può aggiungere la resistenza al creep necessaria a sopportare le sollecitazioni termiche in regime stazionario ed il peso stesso degli ugelli. La resistenza al creep di riferimento per gli ugelli di primo e secondo stadio adottata è 100 MPa a 950 °C.

In generale, per le palette statoriche, sono utilizzate leghe da fusione: la lavorazione meccanica non è possibile a causa della forma complessa dovuta alla presenza di canali di raffreddamento. Esempi di materiali usati sono superleghe a base cobalto (FSX414, MAR M-509 e ECY-768) o a base nichel anche a solidificazione direzionale o monocristallina (es. DSCM247LC, CMSX-4 e PWA1483).

**Palette mobili**

Le palette rotanti sono sottoposte a sollecitazioni più importanti rispetto agli ugelli, in quanto sperimentano la forza centrifuga e maggiori vibrazioni; per contro sperimentano una temperatura del gas leggermente inferiore rispetto al primo stadio statorico. Oltre quindi ai requisiti considerati

per gli ugelli va aggiunta la resistenza a fatica ad alto numero di cicli (HCF). Inoltre dal punto di vista metallurgico va considerata fondamentale la stabilità microstrutturale a lungo termine.

Come per le palette statoriche anche per quelle mobili le leghe utilizzate sono da fusione: la lavorazione meccanica non è possibile a causa della forma complessa dovuta ai canali di raffreddamento. Per quanto riguarda le palette rotanti, più sollecitate, si utilizzano anche componenti solidificati direzionalmente: l'evoluzione dei materiali per palette è descritta in un successivo paragrafo.

Esempi di leghe da fusione sono dal tradizionale IN738LC ai DS CM247LC o GDT111 fino ai single crystal (Renè N5 o PWA1483), quasi sempre ricoperti con barriere termiche.

**Dischi**

Infine, le caratteristiche richieste ai materiali per dischi sono:

- resistenza a fatica ad alto numero di cicli;
- resistenza allo snervamento;
- resistenza alla propagazione dei difetti.

Esempi di materiali utilizzati per questi componenti sono gli acciai 12CrNiMo e 22CrMoV ma anche alcune superleghe come IN706 e IN718.

**EVOLUZIONE DEI MATERIALI PER TURBINE A GAS AVANZATE**

Le turbine a gas di ultima generazione presentano ormai elevate prestazioni in termini di efficienza ed affidabilità in esercizio: in Tabella 2 si vedano le caratteristiche delle macchine più avanzate.

Al fine di soddisfare tali requisiti, è stato necessario un miglioramento dei materiali per alta temperatura. Ciò è stato reso possibile sia agendo sulla composizione chimica delle superleghe, aggiungendo cioè nuovi elementi rafforzanti, sia introducendo nuovi processi di fabbricazione, quali ad esempio la solidificazione direzionale, DS (Directional Solidification), la alligazione meccanica, MA (Mechanical Alloying) tecnica che permette il rafforzamento di leghe per ossidi dispersi, ODS (Oxide Dispersion Strengthening) e recentemente la TLPB (Transient Liquid Phase Bonding) che permette di assemblare parti monocristalline per la realizzazione di un componente.

Dal punto di vista della composizione chimica, lo sviluppo delle superleghe è consistito nel trovare il miglior compromesso tra la resistenza meccanica e la resistenza alla corrosione e ossidazione, ottimizzando ad esempio il contenuto di Cr al fine di favorire la precipitazione della fase rafforzante  $\gamma'$ , senza ridurre troppo le proprietà a corrosione ed introducendo altri elementi refrattari quali W, Ta e Nb.

Senza dubbio un notevole incremento nella temperatura di ingresso del gas in turbina è stato reso possibile dalla solidificazione direzionale e monocristallina: generalmente infatti la vita a creep delle palette in leghe fuse risulta limitata dall'insorgere di cricche lungo i bordi grano perpendicolari alla direzione centrifuga; la presenza di grani solidificati in direzione longitudinale, parallela allo sforzo massimo, minimizza il fenomeno di creep intergranulare. Il passaggio al monocristallo ha permesso poi la rimozione di elementi rafforzanti dei bordi di grano (C, B, Zr, Hf), aumentando la resistenza a fatica e innalzando il punto di fusione della lega: quest'ultimo fatto permette una maggiore precipitazione di fase  $\gamma'$  conferendo al materiale una resistenza superiore. Inoltre il monocristallo presenta un valore inferiore del modulo elastico nella direzione longitudinale, cosa che riduce gli sforzi prodotti da distribuzioni non uniformi della temperatura. Questo lo rende vantaggioso anche per le pale statoriche, dove il creep è un fenomeno di ridotta importanza, ma il tipico meccanismo di danneggiamento è la formazione di

Temperatura di ingresso rotore	~ 1430 °C
Rapporto di compressione	~ 20
Temperatura di uscita	~ 590 °C
Tre stadi di ugelli e palette raffreddati	
Potenza massima del ciclo singolo	165 - 280 MW
Rendimento del ciclo singolo	~ 39%
Rendimento del ciclo combinato	~ 58%

Tabella 2 - Caratteristiche delle turbine a gas più avanzate  
Table 2. Distinctive features of advanced gas turbines

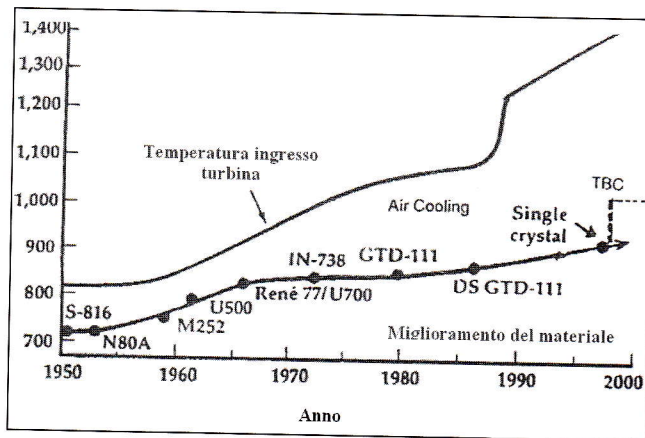


Fig. 2. Evoluzione della temperatura di fiamma e del materiale per palette: temperatura a rottura per 100.000 ore e 140 MPa (Viswanathan and Scheirer 2001)

Fig. 2. Trends in turbine firing temperature and blade-alloy capability for 100,000 h rupture at 140 MPa (Viswanathan and Scheirer 2001)

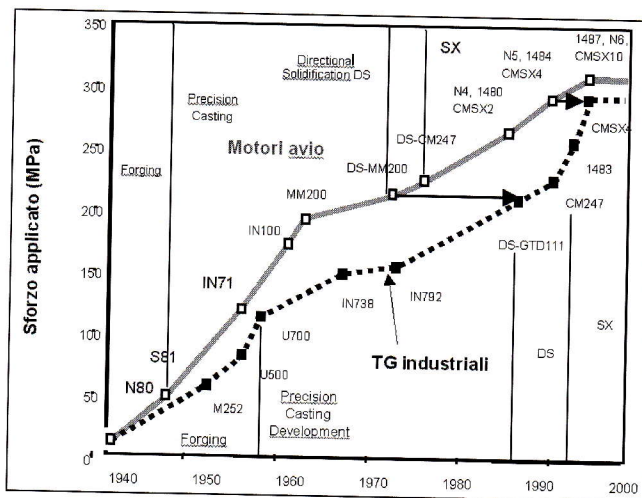


Fig. 3. Evoluzione della resistenza a rottura per 10.000 ore a 870 °C (da Konter 2002)

Fig. 3. Progress of 10,000 h stress rupture at 870 °C (from Konter 2002)

cricche per fatica termomeccanica.

L'evoluzione della temperatura di fiamma e del materiale per palette (in termini di temperatura a rottura per 100.000 ore a 140 MPa) negli ultimi 50 anni è presentato in fig. 2: il brusco rialzo nella TIT si ha in corrispondenza dell'introduzione di sistemi avanzati di raffreddamento delle palette.

L'evoluzione della resistenza a creep (intesa come sforzo applicato per 10.000 ore a 870 °C) per le superleghe è mostrata in fig. 3, da cui si vede come l'introduzione del cristallo singolo sta riducendo notevolmente la distanza tra leghe aeronautiche ed industriali.

Per far fronte a fenomeni di ossidazione accelerata e ad attacchi di corrosione, i componenti più critici sono protetti con l'utilizzo di appositi rivestimenti superficiali. Si tratta di strati metallici particolarmente resistenti con spessori di 0,2-0,3 mm le cui tecnologie di applicazione si stanno continuamente evolvendo soprattutto nella ricerca di un giusto compromesso tra costo e prestazioni. Allo stato si utilizzano tecnologie di spruzzatura a caldo di polveri o sottovuoto, VPS (Vacuum Plasma Spray) o con sistemi ad alta velocità, HVOF (High Velocity Oxy Fuel).

Spinte al massimo le tecnologie di raffreddamento, un ulteriore incremento della temperatura di turbina, ferma restando la temperatura superficiale della superlega, si ottiene grazie all'applicazione di barriere termiche, TBC (Thermal Barrier Coating): si tratta di rivestimenti ceramici superficiali che isolano termicamente il materiale base. Allo stato attuale si utilizzano barriere in zirconia stabilizzata con yttria, YPSZ (Yttria Partially Stabilised Zirconia), spesse circa 0,5 mm, ed applicate mediante spruzzatura a caldo in aria APS (Air Plasma Spray), con l'aiuto di uno strato intermedio metallico (bond-coat). L'innovazione va verso TBC applicate con nuove tecnologie che permettono una migliore uniformità di applicazione ed una maggiore durata, specialmente in presenza di veloci cicli termici, quali EB-PVD (Electron-Beam Physical Vapour Deposition) e CVD (Chemical Vapour Deposition) (figura 4).

Tenuto conto dei costi elevati dei componenti critici delle turbine a gas (si pensi ad esempio che una paletta può costare fino a 10 kEuro ed in una ruota primo stadio possono esserci anche 100 palette) non si può prescindere da un approccio sistemico, per cui alle ispezioni periodiche sulla macchina fanno seguito interventi volti al "life extension" con il ripristino delle proprietà dei materiali, anche grazie ad interventi di riparazione: si stanno infatti sviluppando nuove tecnologie che permettano di ricostruire anche componenti realizzati nelle superleghe DS e SC.

#### PROGRAMMI DI RICERCA E SVILUPPO INTERNAZIONALI

Nel settore dei materiali per turbine a gas, tra i programmi di ricerca più importanti e che costituiscono dei punti di riferimento si deve sicuramente citare l'Advanced Turbine System (ATS del Department of Energy (DoE) statunitense, nel quale trovano collocazione gli studi sulle nuove superleghe di derivazione aeronautica e sulle barriere termiche ceramiche. Al progetto partecipano i principali costruttori di turbine a gas internazionali con l'aiuto di quasi tutto il mondo universitario americano. Gli obiettivi del progetto sono lo sviluppo di turbine a gas operanti ad alta temperatura (fino a 1500 °C) che in ciclo combinato permettono rendimenti oltre il 60% e il contenimento di emissioni di ossidi di azoto al di sotto di 9 ppm ed una riduzione del 10% nel costo dell'energia elettrica. Sempre negli USA, anche EPRI (Electric Power Research Institute) che opera nelle ricerche per il settore elettrico, attraverso progetti dedicati sostenuti dagli esercenti dei sistemi di generazione, ha attivato ricerche in questo campo, tra cui si segnalano: Gas Turbine Superalloys Materials Properties, Advanced Gas Turbine, Hot Gas Path Condition and Remaining Life Assessment, Multi-layer Nanoscale Thermal Barrier Coatings.

In Europa, oltre ai progetti supportati dal IV e V Programma Quadro (Brite/Euram, Thermie, Joule ecc.), un contributo significativo allo sviluppo di nuovi materiali per il settore energetico è stato dato dal lavoro svolto nell'ambito dell'azione COST501 (Materials for Power Engineering Components) e l'attuale azione COST522 (Ultra-efficient, Low Emission Power Plant for the 21<sup>st</sup> Century), che è stata avviata in aprile 1998 ed ha una durata di 5 anni. Ad essa partecipano oltre 100 operatori tra società industriali (produtto-

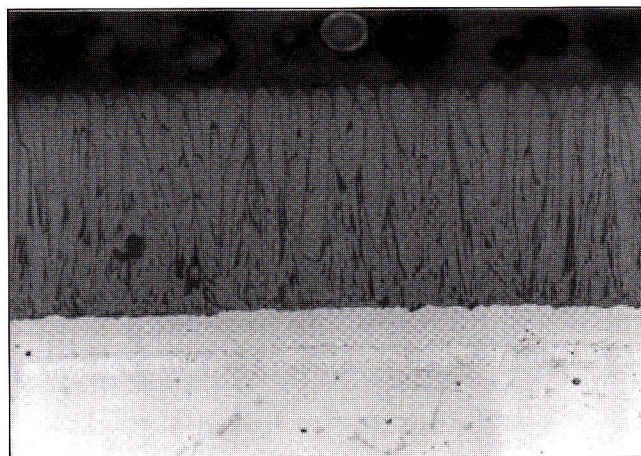


Fig. 4. Esempio di barriera termica con strato metallico intermedio (da COST522 WP2)

Fig. 4. Example of thermal barrier with intermediate bond coat (from COST522 WP2)

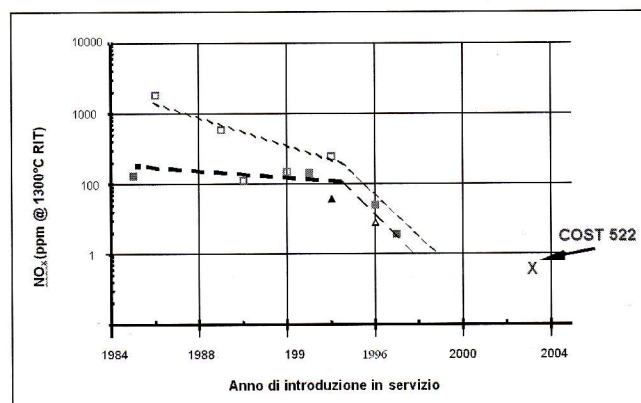


Fig. 5. Obiettivo emissioni di NO<sub>x</sub> (<10 ppm) previsto dal programma COST522 (ALSTOM Power)

Fig. 5. NO<sub>x</sub> emission objective (<10 ppm) within COST522 Concerted European Action (ALSTOM Power)

ri di materiali, costruttori ed esercenti), centri di ricerca ed università di circa 20 paesi europei. Per l'Italia, nel settore delle turbine a gas, partecipano Ansaldo Energia e Ansaldo Ricerche, ITC - Trento, CNR-IENI (Sezione di Milano), Nuovo Pignone e CESI. Il VI Programma Quadro del prossimo quinquennio sembra voler privilegiare fortemente le ricerche finalizzate ai problemi ambientali, come per esempio l'abbattimento di CO<sub>2</sub>, ma non fa specifico riferimento a temi su materiali per l'energia.

#### Programma COST522: attività sulle turbine a gas

In particolare per quanto riguarda le turbine a gas, gli obiettivi generali da raggiungere in questo progetto sono:

- temperatura di ingresso in turbina maggiore di 1450 °C;
- rendimento in ciclo combinato pari al 60%;
- aumento relativo di rendimento delle piccole turbine a gas industriali pari al 10%;
- riduzione delle emissioni di NO<sub>x</sub> al di sotto di 10ppm.

Nel seguito sono descritte le attività di ricerca svolte nell'ambito dei tre gruppi di lavoro di cui si compone la sezione dedicata appunto alle turbine a gas.

#### Palette in monocristallo

L'obiettivo è essenzialmente quello di caratterizzare la deformazione e il comportamento a rottura di superleghe monocristalline in condizioni rappresentative delle condizioni presenti nelle turbine a gas, al fine di ottenere significativi miglioramenti nella progettazione di palette in mono-

cristallo e di sviluppare modelli di previsione di vita basati sull'evoluzione microstrutturale. Le attività svolte consistono quindi nella caratterizzazione meccanica del materiale, nell'analisi microstrutturale, nella modellizzazione e previsione di vita residua e nei controlli non distruttivi e stima di vita.

La sperimentazione si è focalizzata su un unico materiale, la lega CM186LC prodotta a cristallo singolo, anche ricoperta con barriera termica (alluminuro di platino come bond coat e EBPVD  $ZrO_2 + Y_2O_3$  come top coat), pensata in alternativa al più costoso CMSX-4.

Alle attività del gruppo partecipano per l'Italia il CNR-IENI e il CESI.

#### *Palette di composto intermetallico a base di TiAl*

Per quanto riguarda i composti intermetallici, uno degli obiettivi è la realizzazione di palette di ultimo stadio per turbine "heavy duty" ad elevato flusso di massa (di dimensione di 1 m) per le quali soltanto l'alto valore di rigidità (determinato dall'alto rapporto fra modulo elastico e densità) e la bassa densità del composto intermetallico possono rispondere ai requisiti richiesti: il composto a base di TiAl a 600-700 °C deve avere una resistenza a creep (corretta per densità) superiore all'IN738LC, mentre il target è una vita >25.000 h a 800 °C in presenza di ricoprimento. Alternativamente l'impiego del TiAl può essere nelle palette di bassa pressione (turbina a gas industriale di piccola taglia) e quindi deve rispondere al requisito di vita a creep a 700 °C maggiore di 40.000 h con ricoprimento anticorrosione per "combustibili sporchi".

Le attività svolte consistono nella caratterizzazione meccanica e nell'analisi microstrutturale del materiale ABB-2 (Ti-47Al-2W-0,5Si % at.) e di una variante al boro (che serve ad affinare la microstruttura di questo materiale) prodotti per fusione sia in barrette che in palette di grosse dimensioni (600 mm).

Alle attività del gruppo partecipano per l'Italia il CNR-IENI e l'ITC di Trento.

#### *Rivestimenti*

Gli obiettivi relativi ai rivestimenti sono stati definiti principalmente dai partner industriali presenti nel progetto e sono i seguenti: aumento di 100°C della temperatura di lavoro dei componenti, aumento della vita utile a > 30.000 ore (in alcuni casi > 50.000 ore) e aumento della durata degli intervalli tra un'ispezione e l'altra a > 10.000 ore.

Ci si propone di raggiungere tali obiettivi attraverso il miglioramento della resistenza alla corrosione utilizzando un'ampia varietà di combustibili e contaminanti, attraverso il miglioramento della resistenza al distacco delle barriere termiche nelle diverse condizioni operative (cicli termici, ossidazione dell'ancorante, corrosione) e con il miglioramento della resistenza all'erosione dei rivestimenti in generale.

Le attività includono lo sviluppo di barriere termiche innovative per spessore e porosità (spessore di 1,5 mm e porosità pari a 25 %, prodotte per spruzzatura contemporanea al plasma in aria APS di due polveri, l'usuale zirconia e un opportuno polimero) o per composizione ( $La_2Zr_2O_7$  invece di zirconia parzialmente stabilizzata con yttria, per avere stabilità di fase a temperature più elevate).

Per quanto riguarda lo sviluppo di rivestimenti metallici, si lavora alla messa a punto della tecnica di spruzzatura HVOF per la produzione di ancoranti (bond coats) per barriere termiche di prestazioni equivalenti a quelle di rivestimenti prodotti in vuoto (VPS) e con costo inferiore. Rivestimenti metallici irrobustiti con particelle di carburi e ossidi o con migliorata resistenza alla ossidazione grazie all'arricchimento superficiale con alluminio sono altresì oggetto di studio sperimentale.

Le attività di caratterizzazione, sia di rivestimenti commerciali che dei nuovi rivestimenti sviluppati nell'ambito di questo progetto, includono una grande varietà di tecniche e coprono tutte o quasi le proprietà dei rivestimenti: ossidazione in aria, corrosione in burner rig in atmosfere simulanti la combustione di gas e olio, temperatura di transizione da duttile a fragile DBTT (Ductile-Brittle Transition Temperature) con tecnica "small punch", fatica termomeccanica, erosione ad alta temperatura, misura di porosità e di diffusività termica, misura di stress residui, resistenza ai cicli termici e all'ossidazione in condizioni di ciclaggio termico.

#### **Il network Came-GT ed i programmi correlati**

Numerosi progetti di ricerca comunitari su nuovi materiali per turbine a gas (o, più spesso, sul miglioramento di quelli esistenti) sono stati presenti nel IV e V Programma quadro europeo. Questi progetti rientrano nelle categorie Brite-Euram (la più nota, per anni, relativamente ai materiali), Energy, Growth.

Dall'esigenza di coordinamento dei progetti del IV e V PQ, nonché di progetti nazionali, non solo sui materiali, ma su tutti i temi riguardanti le turbine a gas, è nato il Thematic Network "Cleaner & More Efficient Gas Turbines", CAME-GT ([www.came-gt.com](http://www.came-gt.com)). Per l'Italia, oltre ad Ansaldo Ricerche che ha già chiesto di entrare tra i partner, anche CESI e CNR si stanno affacciando al programma.

I progetti entro il Network CAME-GT sono raccolti in 4 diversi gruppi (clusters):

- Turbomachinery (progettazione di macchine e parti di esse),
- Materials (superleghe, rivestimenti, CMC),
- Combustion (sensori, previsione e controllo delle instabilità, nuovi bruciatori e camere di combustione per ridurre le emissioni inquinanti),
- Systems (integrazione delle turbine a gas in cicli più complessi).

CAME-GT si propone anche di favorire la divulgazione e lo sfruttamento dei risultati della ricerca eseguita nei singoli progetti, di favorire la formazione in generale (sia in ambito universitario sia in quello delle imprese) sui temi relativi alle turbine a gas e di contribuire ad elaborare le strategie di ricerca e sviluppo, inclusa la costituzione di consorzi per nuove proposte di progetti.

Gli obiettivi generali sono ovviamente quelli stabiliti dal V PQ e la possibilità di raggiungerli è molto legata anche allo sviluppo dei materiali e dei relativi processi.

Alcuni esempi di progetti europei e nazionali rientranti nel CAME-GT o comunque presentati in quella sede sono riportati qui di seguito:

- a) ALLBATROS (Advanced Long Life Blade Turbine Coating Systems) è un progetto del V PQ, con una durata di 4 anni, coordinato da ONERA. Il programma di lavoro include un'ampia e approfondita campagna di caratterizzazione, sia su materiali di riferimento (diversi rivestimenti su alcune superleghe) che su rivestimenti innovativi prodotti per deposizione elettrolitica di una matrice contenente particelle di  $MCrAlY$  in sospensione. Saranno quindi individuati i meccanismi di degrado e saranno sviluppati i modelli di comportamento all'ossidazione e corrosione. Sono previste anche prove in turbina.
- b) CINDERS (CMC Integration and Demonstration for Gas Turbine Engines) è un progetto che nasce dall'idea di superare l'attuale limite di temperatura massima di lavoro dei materiali compositi ceramici con l'impiego di rivestimenti, prodotti con processi thermal spray e sol-gel. Il coordinatore del progetto è Alstom Power e, tra gli italiani, partecipano Nuovo Pignone, Ansaldo Ricerche e Flame Spray. Gli obiettivi sono: sviluppare e realizzare prototipi di sistemi per la protezione termica e contro l'ossidazione e la corrosione di camere di combustione in materiale CMC; sviluppare i processi di deposizione

per sistemi di protezione termica su CMC (TPS Thermal Protection System); sviluppare metodologie NDE per materiali CMC con e senza rivestimenti TPS; sviluppare strumenti per progettazione, stress analysis e previsione di vita di CMC con e senza rivestimenti TPS.

- c) Internal Coatings for Gas Turbine Blades, programma nazionale olandese, ha l'obiettivo di migliorare la conoscenza dei rivestimenti per i canali di raffreddamento interni delle palette; tali rivestimenti sono usati già da alcuni anni, ma le tecniche di deposizione non sono ancora ottimali e non sempre i benefici attesi vengono effettivamente ottenuti; questo progetto si propone di migliorare i processi e di sviluppare metodi di ispezione non distruttivi.

**I PROGRAMMI DI R&S NAZIONALI  
A SUPPORTO DEL SISTEMA ELETTRICO**

In Italia non sono attualmente attivi specifici programmi di ricerca sull'energia nei quali trovino significativo riscontro le attività sui materiali per turbine a gas. Sono in corso molti programmi sui materiali sia nell'ambito del Progetto Finalizzato del CNR su "Materiali Speciali per Tecnologie Avanzate II" sia in azioni del "Piano Nazionale Materiali Innovativi Avanzati" del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, ma essi appaiono dispersi e non riconducibili facilmente alle problematiche della generazione di energia elettrica.

In tale contesto si inserisce il ruolo del CESI che, attraverso la Ricerca di Sistema, avvalendosi anche della collaborazione di società e università (Enel Produzione, Università di Trento, Politecnico di Milano, ecc.) ha definito ed avviato specifiche azioni di R&S finalizzate al miglioramento delle prestazioni degli attuali sistemi di generazione nonché alla valutazione delle tecnologie innovative, nelle quali gli studi sui materiali e sulle tecnologie correlate hanno un peso rilevante in ragione della loro criticità. Lo scopo è quello di fornire al sistema elettrico nazionale un insieme di informazioni e strumenti utili sia per poter gestire in modo ottimale il parco di generazione esistente sia affinché il rinnovo del parco termoelettrico avvenga in modo sostenibile, con la più elevata efficienza tecnologicamente possibile, con costi sempre inferiori, in sicurezza e nella salvaguardia dell'ambiente.

Partendo da materiali, sistemi e tecnologie disponibili nel mercato (nell'industria o in centri di ricerca specializzati), le ricerche sono orientate alla verifica delle prestazioni di materiali e sistemi ed alla loro qualifica per l'utilizzo finale, nonché allo sviluppo di tecnologie innovative di supporto.

Di seguito sono citate le linee e i risultati principali. Per quanto riguarda la caratterizzazione delle superleghe, le attività CESI e CNR, con mirati programmi sperimentali (prove di creep, di fatica ed analisi microstrutturali), integrati con quelli relativi alla partecipazione a progetti europei, hanno l'obiettivo di verificare le prestazioni di alcuni materiali innovativi (monocristalli) in vista di un loro impiego nelle grosse turbine a gas per la generazione di energia elettrica; inoltre sono in corso azioni sullo studio dei modelli di degrado delle superleghe per definire metodologie di determinazione della vita residua.

Nell'ambito della caratterizzazione di rivestimenti innovativi (alluminuri di nichel applicati con la tecnica CVD per pareti interne delle palette e rivestimenti multigraded con barriere antidiffusione), particolare attenzione è posta dal CESI a proprietà peculiari quali la porosità, l'adesione, la conducibilità termica e la diffusività, per la determinazione delle quali sono state messe a punto specifiche metodologie (per es. shock termico mediante laser, fatica termica).

Tra le tecnologie di deposizione, particolare attenzione è po-

sta al processo HVOF, per rivestimenti metallici che, a parità di prestazioni tecniche, potrebbe soppiantare nel prossimo futuro il processo VPS molto più costoso.

Tra le tecnologie di controllo non distruttivo, CESI sta implementando un sistema altamente innovativo basato sulla tecnologia FSECT (Frequency Scanning Eddy Current Technique), in grado di effettuare misure di spessore e di seguire l'evoluzione composizionale del rivestimento (per es. depauperamento della fase beta).

Per quanto riguarda le TBC, le attività di ricerca sono prevalentemente indirizzate ai nuovi processi di deposizione (EB-PVD e CVD) ed alle metodologie di caratterizzazione e controllo: in particolare si studia la messa a punto di metodologie per la determinazione della conducibilità termica di TBC in funzione di contenuto, morfologia e orientazione della porosità e sono state effettuate valutazioni ingegneristiche sull'effetto dell'applicazione di barriere termiche per componenti di turbine a gas, al fine di determinare la diminuzione della temperatura di esercizio del materiale strutturale in presenza di rivestimento. Infine per il controllo difettologico e dello stato di adesione delle TBC, è stata verificata l'applicabilità della tecnica della termografia impulsata, con particolare riferimento a distacchi/scarsa adesione del substrato metallico.

Nel campo delle tecnologie delle riparazioni basate in particolare su processi laser sono state avviate ricerche finalizzate da un lato all'innovazione dei processi (contenimento dei costi, estensione a componenti complessi o a zone critiche di uno stesso componente, applicabilità in campo) e dall'altro all'applicazione dei processi a materiali innovativi (in particolare i materiali solidificati direzionalmente e monocristallini).

**RINGRAZIAMENTI**

Per CESI, il lavoro è stato sviluppato nell'ambito della "Ricerca di Sistema" D.L. MICA del 26/01/2000.

**BIBLIOGRAFIA**

R. Viswanthan and T.S. Scheirer, "Materials Technology for Advanced Land Based Turbines", Proc. CREEP7, JSME (2001), pp. 7-21.

B. B. Seth, "Superalloys - The Utility Gas Turbine perspective", Proc. Superalloys 2000, TMS (2000) pp. 5-15.

M. Thomas, "High Temperature Materials in Energy Systems", La Metall. Italiana 6 (2002) pp.19-25.

M. Konter, "Single Crystal Technologies in Power Generation Equipment", La Metall. Italiana 6 (2002) pp.13-17.

J.K. Oakey, D.H. Allen and M. Staubli, "Power Generation in the 21st Century - The New European COST Action", Proc. EUROMAT 1999 (1999).

E. Campo and V. Lupinc, "High Temperature Structural Materials for Gas Turbines", Metallurgical Sci. Techn. 11 (1993) pp. 31-47.

T. Schulenberg, New development in land-based gas turbine technology, Materials for advanced power engineering 1998, Proceedings of the 6th Liege Conference

P. Vuoristo, S. Ahmaniemi, S. Tuurna, T. Mäntylä, E. Cordano, F. Figino, G.C. Gualco, Development of HVOF sprayed NiCoCrAlYRe coatings for use as bond coats of plasma sprayed thermal barrier coatings, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002, 4-6 March 2002, Essen, Germany.

G.C. Gualco, E. Cordano, F. Figino, C. Gambaro, S. Ahmaniemi, S. Tuurna, T. Mäntylä, P. Vuoristo, An improved deposition process for very thick porous thermal barrier coatings, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002, 4-6 March 2002, Essen, Germany.

R. Vaßen, G. Pracht, D. Stöver, New thermal barrier coating systems with a graded ceramic coating, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002, 4-6 March 2002, Essen, Germany.

F. Bregani, C. De Michelis, P. Motta, "I materiali innovativi nella generazione di energia elettrica ad elevata efficienza", Accettato per la pubblicazione sulla rivista "L'energia elettrica", 2002.

F. Bregani et al., "Materiali per l'energia: ricerca e prospettive tecnologiche", Atti del convegno FAST Materiali. ricerca e prospettive tecnologiche alle soglie del 2000, Milano 10-14 Novembre 1997, Vol, 2, p. 1321.

Leghe	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B	Zr	Hf	altro
IN706	41,5	16					0,2	1,8	40	0,2	0,2	0,03				2,9 Nb
IN718	52,5	19		3			0,5	0,9	18,5	0,2	0,2	0,04				5,1 Nb
Hastelloy X	47	22	1,5	9,0	0,6				18,5	0,50	0,50	0,10				
Nimonic 263	51	20	20	5,9			0,45	2,15		0,40	0,25	0,06	0,001	0,02		
IN 617	54	22	12,5	9,0			1,0					0,07				
Haynes 188	22	22	39		14				3 max	1,2 max	0,40	0,10				
Haynes 230	57	22		2	14		0,3			0,5	0,4	0,1				0,02 La
FSX 414	10	29	52		7,5				1,0			0,25	0,010			
DS CM 247 LC	bal.	8,1	9,2	0,5	9,5	3,2	5,6	0,7				0,07	0,015	0,015	1,4	
CM68-4	bal.	6,5	9	0,6	6	6,5	5,6	1,0				0,002	0,002	0,001	0,1	3 Re
PWA 1483	bal.	12,8	9	1,9	3,8	4	3,6	4,0								
IN 738 LC	61	16	8,5	1,7	2,6	1,7	3,4	3,4				0,11	0,010	0,10		0,9 Nb
8TD 111	bal.	14	9,5	1,5	3,8	2,8	3	4,9				0,1	0,01			
René 85	bal.	7	8	2	5	7	6,2									
CM 186 LC	60	6,1	9,3	0,51	8,4	3,4						0,062	0,016	0,004	1,4	3 Re

Tabella 3. Composizione di alcune leghe citate nel testo (% in peso)

Table 3. Compositions of some alloys cited in the text (weight %)

A B S T R A C T

MATERIALS FOR INDUSTRIAL GAS TURBINES: PERFORMANCE, PROBLEMS AND RESEARCH

KEYWORDS: superalloys, materials evaluation, energy

Gas turbines are nowadays the most effective machines for energy production from natural gas: their efficiency can be improved through the increase of the turbine inlet temperature (TIT), also through use of advanced materials. New materials are considered to be the technological barrier for the development of advanced gas turbines and are essential for the development of "clean" thermal cycles for electricity generation.

In this paper are discussed: problems regarding applications of new materials in industrial gas turbines, requirements of new materials requested for specific components and the evolution of high temperature materials in the last half century.

The main differences between aeronautical and industrial gas turbines are shown in Table 1.

The requirements for the critical high temperature components are then listed, i.e. for: combustion chambers and transition parts, vanes, blades and discs. Examples of alloys

adopted for the different components are also reported.

Table 2 shows the characteristics of the most advanced industrial gas turbines, such as TIT = 1430°C, compression ratio ~20, single cycle (SC) maximum power of 280 MW, SC efficiency ~39% and combined cycle (CC) efficiency ~58%.

The TIT and the thermal capability of the materials for critical high temperature components of industrial gas turbines have increased continuously in the last 50 years as shown in Fig. 2. Figure 3 instead shows the stress rupture increase of aeronautical and industrial gas turbines through production process innovation, i.e. forging, precision casting, directional solidification and finally single crystal large blade technology. Cooled components and thermal barrier coating technology (Fig. 4) contributed definitely to increase TIT and turbine efficiency.

International projects on materials for industrial gas turbines are mentioned such as the concerted actions COST 501 and 522, and the network CAME-GT in Europe, and the Advanced Turbine System project of DoE and specific EPRI research initiatives in USA.

The Italian contribution to research in this field is finally mentioned.

MEMORIE

6/2003