

Fatica ad alta temperatura e ad alto numero di cicli di leghe di alluminio per applicazioni motoristiche

G. Nicoletto, E. Riva

La progettazione strutturale di parti del motore ottenute per fusione ha l'obiettivo di ottimizzare le forme massimizzando il rapporto resistenza/peso. Le leghe Al-Si sono di particolare importanza in quest'ambito ma i dati di progetto a fatica ed alta temperatura sono scarsi. E' stata sviluppata una macchina di prova per caratterizzare a fatica materiali sottoposti a temperature fino a 400°C utilizzata successivamente per determinare la riduzione delle prestazioni in funzione della temperatura di prova su campioni estratti da getti industriali di due leghe (i.e. AlSi7Mg e AlSi12).

Parole chiave:

alluminio e leghe, prove meccaniche, fatica, getti, metallografia, difetti

INTRODUZIONE

La legislazione pone crescenti requisiti di efficienza delle autovetture in termini di riduzione dei consumi e delle emissioni motivando una continua ricerca di soluzioni che riducano il peso complessivo dei vari sottosistemi, [1].

Relativamente ai materiali strutturali si osserva che le leghe di alluminio stanno progressivamente prendendo il posto di ghise e acciai nella realizzazione di molti componenti fondamentali di un'autovettura, come mostrato in Fig. 1, contribuendo in maniera considerevole alla riduzione di peso. Nel caso di motore e trasmissioni, la riduzione relativa di peso dovuta all'adozione di leghe d'alluminio al posto di materiali tradizionali è quasi del 60%, arrivando in termini assoluti a riduzioni di massa di ca. 70 kg per motore, [1].

Il livello di penetrazione della tecnologia dell'alluminio in ambito motoristico è ormai del 90% ed indica una maturità e l'inevitabilità del suo utilizzo. L'interesse industriale si concentra quindi nello sviluppo della capacità di progettare nel modo più efficiente i componenti critici del motore dato che le crescenti potenze specifiche (in kW/kg) sfruttano i materiali al limite delle loro prestazioni. Le tipiche leghe di alluminio per applicazioni motoristiche sono soggette a cicli di carico di fatica a temperature che durante il funzionamento del motore variano dai 100°C fino a 300 - 350°C

nelle zone affacciate alla camera di combustione.

Le principali parti dei motori moderni (testa, pistone, blocco motore, ecc.) sono ottenute con leghe Al-Si, [2,3], adatte alla tecnologia fusoria. In base al contenuto di Silicio, queste leghe si classificano rispettivamente in ipoeutettiche (Si < 12%), eutettiche (Si = 12%) e ipereutettiche (Si > 12%). L'ottimizzazione termostrutturale dei componenti motore deve considerare molti altri aspetti relativi ai materiali e ai processi tecnologici, quali gli altri elementi di lega, gli elementi modificatori della microstruttura, i trattamenti termici, l'effetto del processo sulla difettologia ecc.. in un contesto di progettazione a fatica ad alta temperatura, [2]. Vi è quindi una crescente necessità di dati di progetto a fatica delle leghe Al-Si ad alta temperatura, per altro difficilmente reperibili in letteratura. I pochi dati disponibili sono poi di limitata utilità vista la specificità dei fattori tecnologici che differenziano i materiali dei componenti reali dal materiale prodotto ad-hoc per la caratterizzazione sperimentale.

In questo lavoro si discutono inizialmente le sollecitazioni di origine termomeccanica che si sviluppano in componenti motore durante il servizio evidenziando gli obiettivi di una caratterizzazione sperimentale sui materiali. Si presenta quindi una macchina di prova specificamente sviluppata per caratterizzare il comportamento a fatica di materiali ad alto numero di cicli e a temperature fino a 400°C. Si considerano poi due leghe Al-Si, una lega ipoeutettica (A356) ed una lega eutettica (AlSi12) utilizzate, rispettivamente, nella produzione con la tecnologia fusoria di teste motore e pistoni presentando i risultati di prove di fatica condotte su provini estratti da componenti industriali.

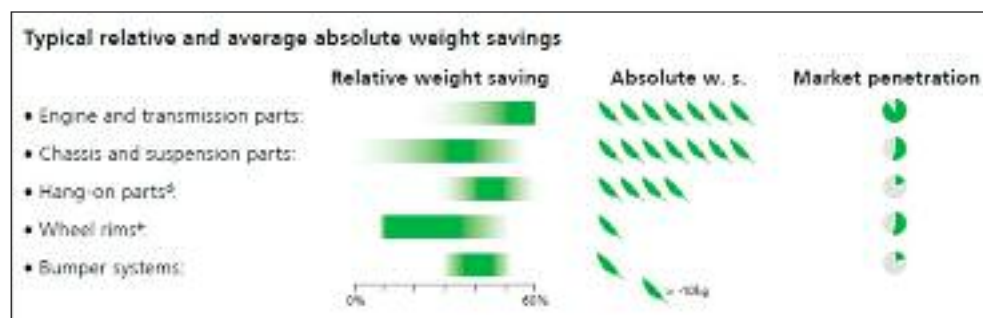
G. Nicoletto, E. Riva

Dip. di Ingegneria Industriale, Università di Parma
Viale G.P. Usberti, 181/A, 43100 Parma
e-mail: gianni.nicoletto@unipr.it, enrica.riva@unipr.it

FIG. 1

Risparmi di peso e grado di penetrazione dell'alluminio in ambito automotive, [1].

Weight savings and degree of penetration of aluminum in automotive applications, [1].



SOLLECITAZIONI TERMOMECCANICHE DI COMPONENTI MOTORE

La verifica a fatica di componenti motore richiede innanzi tutto la conoscenza delle sollecitazioni di origine termomeccanica, attualmente calcolate col metodo degli elementi finiti (FEM). I cicli di carico presi in considerazione dipendono dal tipo di componente e dal tipo di servizio cui è sottoposto. Ad esempio si possono considerare i transitori accensione-spegnimento del motore o condizioni di carico minimo-pieno carico tipico di prove di durata al banco. In generale il calcolo delle sollecitazioni considera tre fasi che normalmente si considerano disaccoppiate:

- la simulazione del flusso dei gas di scarico per ottenere i coefficienti di scambio termico e i flussi termici sulle superfici della parte;
- il calcolo del transitorio termico simulando il riscaldamento e il raffreddamento della parte;
- il calcolo meccanico con il campo di temperatura come parametro di sollecitazione cui vengono sovrapposte più eventuali carichi meccanici.

Negli esempi di componente qui riportati, testa motore e pistone, i valori dei coefficienti di scambio ed i flussi termici, obiettivi del primo calcolo e utilizzati nella definizione delle condizioni al contorno dell'analisi termica, sono stati definiti direttamente in base all'esperienza industriale e successivamente ottimizzati mediante validazione sperimentale, riducendo la fase di simulazione al solo problema termomeccanico.

L'analisi FEM inizia quindi con la generazione del modello geometrico della parte e degli elementi ad essa collegati, la definizione delle condizioni al contorno ed un calcolo che fornisce il campo di temperature. Ottenuto il campo termico, è necessario impostare il modello meccanico, immettendo tutti i carichi che i vari componenti si scambiano con gli elementi collegati. La variazione di temperatura (il ciclo di accensione-spegnimento) durante il funzionamento del motore è fonte di sollecitazioni potenzialmente affaticanti a bassa frequenza. Nel funzionamento a regime e piena potenza si deve tener conto anche delle sollecitazioni di tipo meccanico dovute agli scoppi in camera combustione che danno luogo a cicli di sollecitazione ad elevata frequenza ed eventuali effetti inerziali per gli organi in movimento (i.e. pistoni).

Per ridurre il peso computazionale si individuano caratteristiche che consentono di limitare la modellazione ad un sottoin-

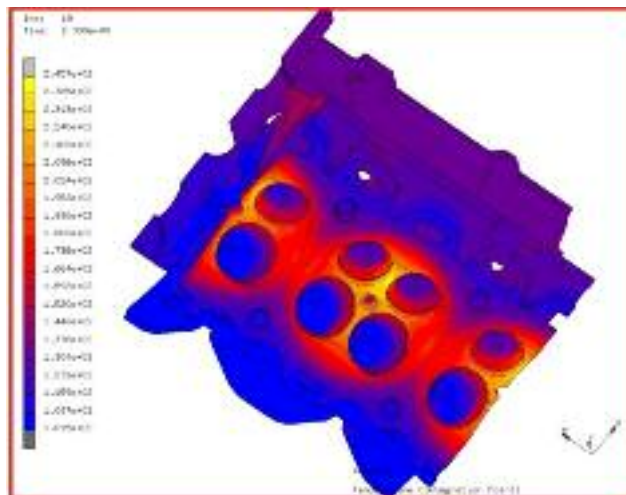


FIG. 2 *Mapa di temperatura ottenuta col modello FEM di una testa motore, [4].*

Map of temperature obtained with the FEM model of an engine head, [4].

sieme del componente reale. Ad esempio, la determinazione del campo termico cui è soggetta una testa di motore pluricilindrico durante il funzionamento spesso considera la modellazione di un modulo delimitato da due piani di simmetria geometrica e di sollecitazione, Fig. 2 [4]. Si considerano inoltre i contributi di guarnizione, sedi valvole, guide valvole, prigionieri e dadi di serraggi. In Figura 3 sono mostrate le temperature raggiunte a regime da una testa motore. La zona della testa vicina al piatto fiamma si trova a lavorare a temperature (i.e. 250 °C) elevate per la lega d'alluminio (tipicamente A356) con cui è realizzata, mentre allontanandosi dal piatto fiamma, superando ad esempio il giro acqua superiore, le temperature di lavoro scendono rapidamente.

La modellazione FEM termostrutturale di componenti motore richiede quindi un modello costitutivo del materiale, dipendente dalla temperatura, adeguato per le leghe Al-Si per getti. In [4] i parametri di un tale modello sono stati determinati in funzione della temperatura e del tempo con specifiche subroutine che presuppongono la correlazione tra tensione di snervamento e

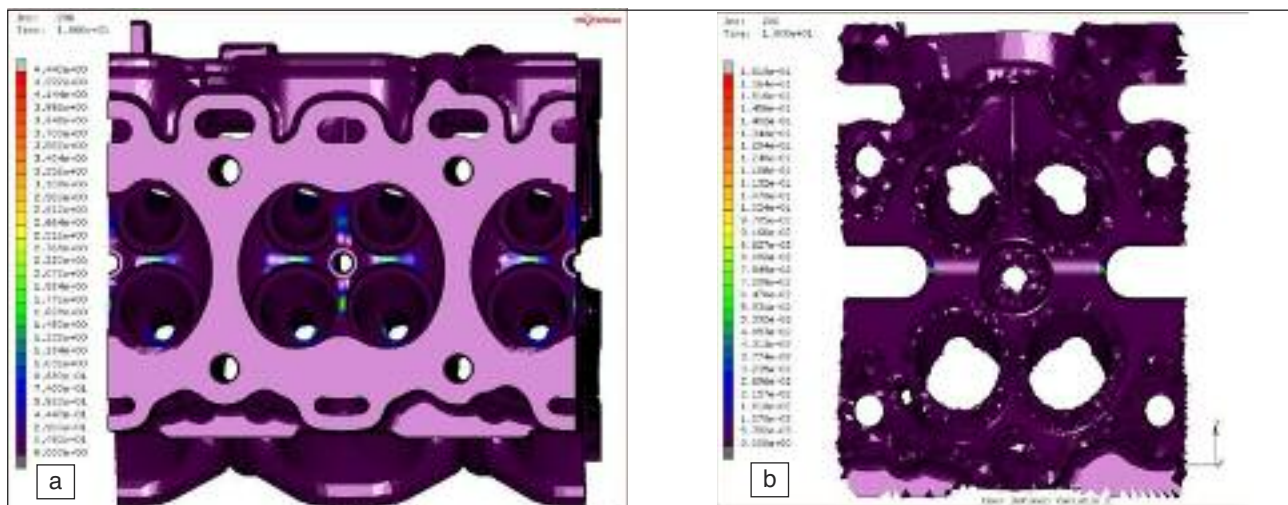


FIG. 3 *Mapa di deformazione massima accumulata ottenuta col modello FEM di una testa motore in corrispondenza di a) piatto fiamma e b) sezione interna, [4].*

Map of accumulated maximum strain obtained with the FEM model of a motor head in correspondence with a) flame deck and b) cross-section [4].

durezza Brinell. I dati sperimentali sono stati ottenuti sottoponendo il materiale a permanenza per tempi diversi ad alta temperatura (curve di degrado). Dalle curve di degrado (durezza della lega in funzione di temperatura e tempo) è stato possibile risalire non solo alla durezza residua della lega, note temperatura e tempo di esercizio, ma anche verificare le temperature locali di esercizio del componente, noti tempo di funzionamento e durezza residua del materiale della lega.

L'analisi termostrutturale della testa motore evidenzia condizioni di fatica termica (i.e. basso numero di cicli) tra i ponti valvola in cui il danno di fatica coinvolge diffuse deformazioni plastiche, mentre l'analisi delle altre parti evidenzia una risposta sostanzialmente elastica del materiale. La Fig. 3a mostra i punti potenzialmente critici. Per la geometria complessa di una testa motore, alcune variazioni geometriche ed intagli possono essere invece critiche dal punto di vista della fatica ad alto numero di cicli. Fig. 3b mostra un raccordo interno in cui la temperatura massima è limitata ma le sollecitazioni termomeccaniche elevate tanto da poter innescare il fenomeno della fatica. Analoghe considerazioni possono essere fatte con riferimento al calcolo delle sollecitazioni termomeccaniche di un pistone. In Fig. 4 si mostra la mappa di temperatura sovrapposta al modello di pistone (metà è sufficiente per simmetria). In questo caso la temperatura massima raggiunta è di ca. 300°C. Quanto ai carichi di origine dinamica ad alta frequenza legati al moto alterno e alle pressioni di scoppio in camera combustione sono stati calcolati analiticamente per le diverse condizioni di rotazione ed applicati al modello FEM del pistone attraverso biella e spinotto includendo anche il supporto fornito dalla canna cilindro. La Fig. 5 evidenzia la mappa di tensione principale con i valori più elevati riscontrabili nel cielo del pistone. In questo caso quindi è fondamentale considerare la fatica ad alta temperatura e ad alto numero di cicli quale condizione di lavoro del materiale.

MATERIALI E PROCEDURA SPERIMENTALE

Per la progettazione a fatica dei componenti motore, lo stato di sollecitazione termomeccanico calcolato col FEM va confrontato con le sollecitazioni ammissibili per il materiale sottoposto a con-

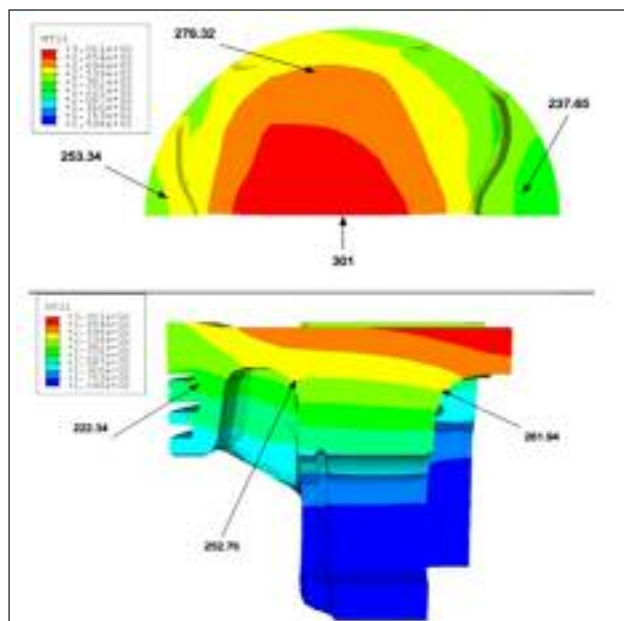


FIG. 4 *Mappa di temperatura ottenuta col analisi FEM di un pistone.*

Map of temperature obtained with the FEM analysis of a piston.

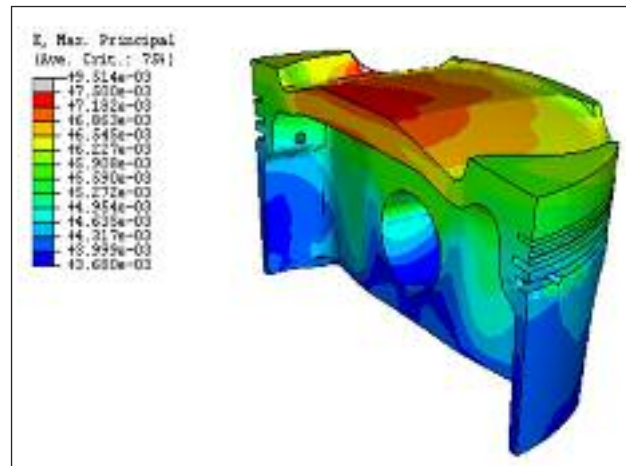


FIG. 5 *Mappa di tensione equivalente di Von Mises ottenuta col analisi FEM di un pistone.*

Map of Von Mises equivalent stress obtained with the FEM analysis of a piston.

dizioni rappresentative del funzionamento.

In questo lavoro si considerano due leghe Al-Si utilizzate ad alta temperatura quali la AlSi7Mg (o A356) e la AlSi12 e se ne determina il comportamento a fatica ad alto numero di cicli e a temperature rappresentative delle condizioni di lavoro. Le due leghe di questo studio non sono in competizione per le stesse applicazioni, anzi ognuna ha il proprio specifico ambito d'intervento che valorizza ulteriori aspetti oltre alla resistenza a fatica in temperatura.

AlSi7Mg

Le leghe AlSi7Mg ipoeutettiche da fonderia sono utilizzate tradizionalmente per la realizzazione di importanti e complesse parti motore (blocco, teste, sottoblocco ecc.). Sono trattabili termicamente mediante solubilizzazione, tempra ed invecchiamento artificiale. La microstruttura, Fig. 6a, si caratterizza per la struttura dendritica con una dispersione di particelle di silicio eutettico. I parametri microstrutturali di influenza sono principalmente: lo SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing), morfologia del Si eutettico, gli eventuali composti intermetallici. Le proprietà meccaniche sono influenzate dalle caratteristiche microstrutturali locali, dipendenti sia dalla composizione chimica della lega utilizzata sia dal tipo di processo fusorio [2].

Nel caso di sollecitazioni affaticanti a temperatura ambiente un ruolo fondamentale è svolto dai difetti inevitabilmente presenti in getti ottenuti con processi industriali, [5-12]. Questi difetti, come le cavità di ritiro di forma irregolare ramificata, [13], di cui in Fig. 6 vi sono degli esempi, hanno tipicamente dimensioni variabili in un campo molto ampio (i.e. 10 - 1000 μm). Sono quindi di almeno un ordine di grandezza superiore rispetto alle dimensioni dei costituenti microstrutturali e fungono da concentratori di tensioni distribuiti all'interno del pezzo che possono favorire localmente l'innescio di una fessurazione di fatica. L'effetto negativo di queste porosità sul comportamento a fatica è dipendente dalla loro dimensione (i.e. aumenta con la dimensione) e dalla posizione all'interno del pezzo (i.e. aumenta all'aumentare della sollecitazione locale).

In recenti studi sperimentali, [11-12], si sono sviluppate estese caratterizzazioni a fatica mediante prove a flessione rotante a temperatura ambiente determinando il legame tra ampiezza di tensione nominale applicata, numero di cicli a rottura e dimensioni dei difetti che hanno innescato la rottura. L'indagine delle

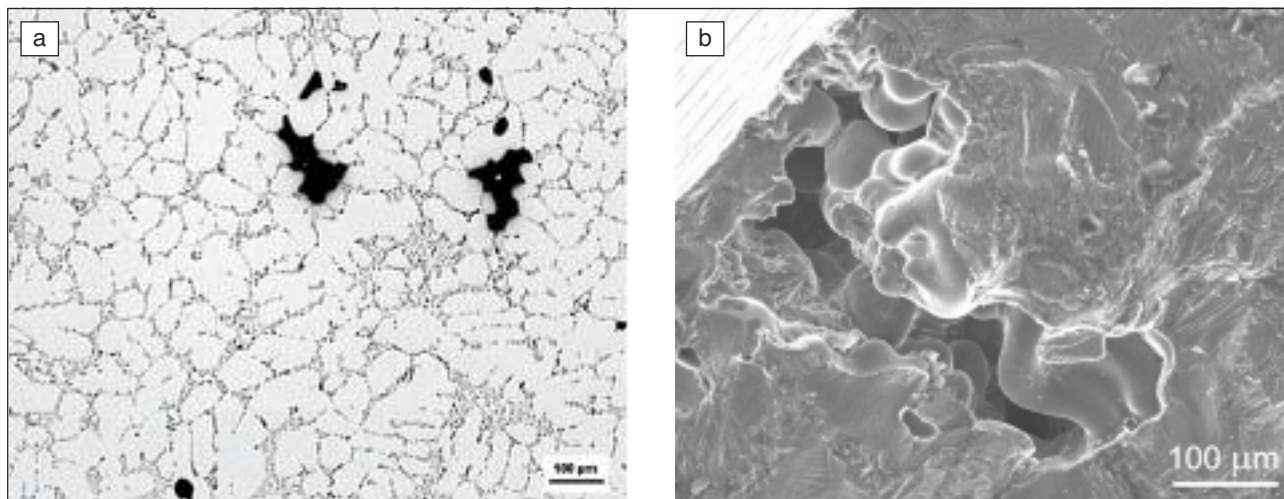


FIG. 6 a) Microstruttura della lega AlSi7Mg con pori da ritiro, b) innesco di rottura per fatica in corrispondenza di cavità di ritiro.

a) Microstructure of the alloy AlSi7Mg with shrinkage pore, b) fatigue initiation from a shrinkage pore.

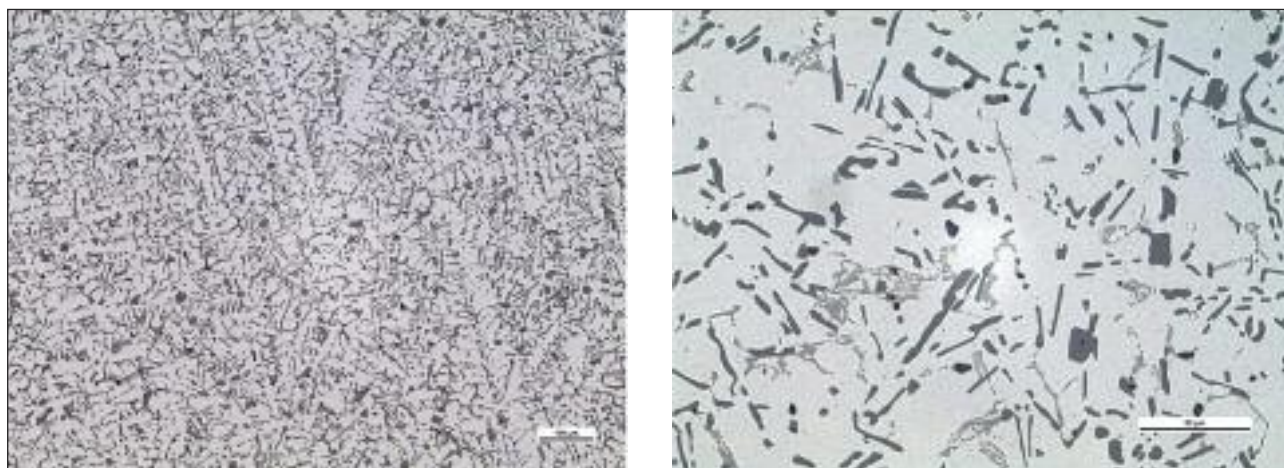


FIG. 7 Microstruttura della leghe eutettica AlSi12 a due livelli di ingrandimento (il silicio eutettico è nero, composti intermetallici grigi, alluminio bianco)

Microstructure of eutectic alloys AlSi12 with two levels of magnification (The eutectic silicon is black, intermetallic compounds gray and aluminum white).

superfici di frattura dei provini, di cui si riporta un esempio in Fig. 6b, ha confermato che l'innesco della fessura si verifica sempre in corrispondenza di pori (in particolare cavità da ritiro) localizzate in vicinanza o corrispondenza della superficie libera del provino seguita da una propagazione stabile con fronte ad arco di ellisse fino al collasso finale.

Il comportamento ad alta temperatura delle leghe ipoeutettiche AlSi7Mg è invece meno noto sebbene sia attesa una riduzione della resistenza a fatica all'aumentare della temperatura di prova. Nel passare da 20 a 150°C, in [14] si è determinato un modesto decremento nella vita a fatica della lega E319-T7 mentre l'effetto della temperatura era più pronunciato per le altre leghe di alluminio, come il W319-T7, A356-T6 e AS7GU-T64. Anche test a frequenza ultrasonica, [15], hanno evidenziato un calo modesto del limite di fatica a 10⁹ cicli e del fattore di intensità degli sforzi di soglia a passare da temperatura ambiente a 150°C nella lega AlSi9. In [16] è stata studiata la propagazione di piccole fessure nella lega W319 a 20, 150 e 250 °C rilevando che l'effetto della temperatura sulla velocità di propagazione è trascurabile da 20 a 150°C ma aumenta di un ordine di grandezza a 250°C.

AlSi12

Le leghe Al-Si eutettiche sono molto utilizzate come materiali per pistoni di motori a C.I., sia a ciclo Diesel che Otto, [2,3]. Questa classe di leghe si caratterizza per la microstruttura multifase con particelle compatte di silicio primario e silicio eutettico in forma aciculare, dendriti di alluminio e molti tipi di particelle intermetalliche. Poiché i pistoni sono sottoposti a sollecitazioni termo meccaniche su un ampio campo di temperature, si tende ad ottimizzare la risposta a fatica ad alta temperatura aggiungendo elementi leganti (ad esempio Cu, Ni, V) evitando però di compromettere la resistenza a temperatura ambiente. Fig. 7a mostra la microstruttura di una lega AlSi12 fusa in gravità dopo attacco con 0.5% HF in cui si nota la struttura dendritica fine. In Fig. 7b si evidenziano in nero particelle di silicio primario e silicio eutettico, in grigio chiaro la matrice d'alluminio ed in grigio più scuro le particelle di composti intermetallici.

A temperatura ambiente il comportamento a fatica di queste leghe ha evidenziato il ruolo critico delle porosità [6-8]. Tuttavia con il miglioramento delle tecniche di fusione il loro effetto negativo si è ridotto notevolmente per cui l'influenza principale sul comportamento a fatica sembra ora svolta dal Si e dalle

particelle di intermetallico [17]. In [18] si è determinato il comportamento a fatica a 200°C e 350°C di due leghe eutettiche, potenziali concorrenti della lega AlSi12 nella produzione di pistoni sono le leghe Al/Cu. La resistenza a fatica residua della lega AA2618-T6511 dopo esposizione in forno a 270 °C per 10 ore è stata ad esempio studiata con test di fatica rotante su campioni esposti alla temperatura di 200°C, [19]. Per aumentare la resistenza a caldo di queste leghe si è recentemente studiato l'effetto dell'aggiunta di Ni alla classica lega AlSi12, [20,21]. L'evidenza sperimentale ottenuta per metallografia e tomografia mostra una struttura costituita da un reticolo di lamelle di Si interconnesse e precipitati 3D di composti a base Al-Ni. Con un trattamento di soluzione il reticolo di Si eutettico viene distrutto, permane invece nel caso di presenza di Ni. La resistenza a caldo sembra quindi governata dalla stabilità della struttura interconnessa di Si eutettico e dalla distribuzione di precipitati.

Macchina di prova a fatica e metodologia

La macchina di prova a fatica sviluppata per questo studio e mostrata in Fig. 8 consente di sollecitare un provino del materiale con cicli di tensione e di temperatura di ampiezza variabile. Lo schema di carico del provino è la flessione rotante ad una frequenza regolabile fino a 80 Hz. Il provino lungo circa 100 mm ha sezione circolare di diametro minimo di 5mm e ampio raccordo per limitare l'effetto di concentrazione delle tensioni. Un sistema pneumatico di caricamento consente di applicare pacchetti di carico di ampiezza variabile. L'ampiezza del carico è modulata attraverso l'azione del regolatore di pressione proporzionale, il quale comanda il valore della pressione di alimentazione del cilindro; il carico applicato è così controllato in retroazione e con elevata precisione come dimostrato dalla fase di taratura. La connessione tra il regolatore proporzionale ed il PC consente, oltre all'acquisizione istantanea del valore di pressione (e quindi della tensione imposta), la gestione diretta del carico applicato, o del ciclo di carico, tramite un programma realizzato su LabVIEW. Per l'applicazione ed il controllo della temperatura del campione si adotta il riscaldamento ad induzione. Il controllo avviene con anello di retroazione basato sulla misurazione della temperatura con termocoppia posta direttamente all'interno del provino. Test iniziali hanno dimostrato il raggiungimento della temperatura impostata con un transitorio di poche decine di secondi e il suo mantenimento (fino a 400°C) per l'intera durata della prova con un errore inferiore ad 1°C.

I provini per la sperimentazione presentata in questo lavoro sono stati estratti da getti industriali ed utilizzati senza precondizionamento. Per determinare la resistenza a fatica ad un prefissato numero di cicli (i.e. 107 cicli) si è utilizzata una procedura stair-case ridotta ed una frequenza di prova di 50Hz. La temperatura è stata mantenuta costante durante l'intera prova. Al termine delle prove di fatica i campioni sono stati analizzati al microscopio a scansione elettronica.

RISULTATI E DISCUSSIONE

AlSi7Mg

In questo studio i provini sono stati estratti da parti di getti industriali di AlSi7Mg - T6 (equivalente al A356) e si sono considerate tre temperature di prova: 20°C, 250°C e 300°C.

Il diagramma di Wohler di Fig. 9 (normalizzato per riservatezza dei dati) mostra la dipendenza della resistenza a fatica ad alto numero di cicli dalla temperatura di prova della lega AlSi7Mg. Le frecce indicano più prove interrotte a 10 milioni di cicli senza rottura. Si nota che a 300°C la resistenza si dimezza rispetto al valore di riferimento a temperatura ambiente. L'esame delle superfici di frattura ha confermato il ruolo chiave delle cavità di ri-

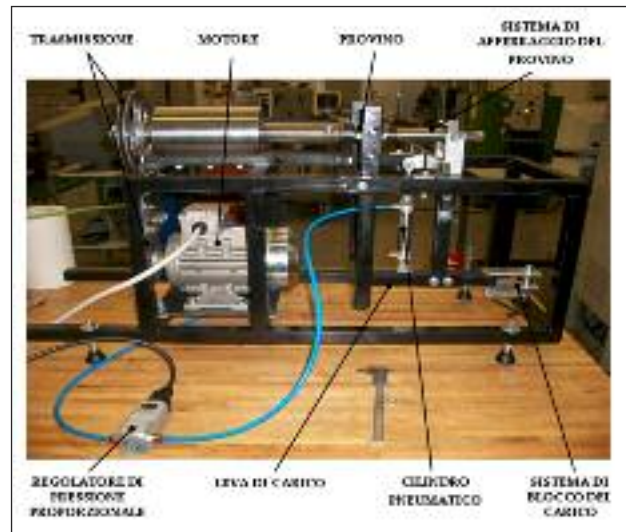


FIG. 8 **Macchina di prova a fatica ad alta temperatura.**
High temperature fatigue testing machine.

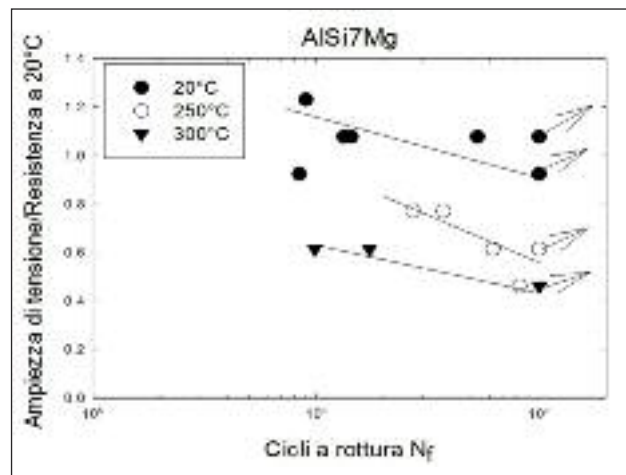


FIG. 9 **Influenza della temperatura sulla fatica ad alto numero di cicli di una lega AlSi7Mg.**

Influence of temperature on high cycle fatigue behavior of cast AlSi7Mg.

tiro a temperatura ambiente mentre il loro effetto si riduce all'aumentare della temperatura perché diventano predominanti meccanismi di deformazione plastica.

AlSi12

Per questo studio i provini sono stati estratti da pistoni di AlSi12 colati in gravità e sollecitati a fatica a tre temperature: 250°C, 300°C e 350°C. E' in corso la sperimentazione a temperatura ambiente per avere un dato di riferimento. A differenza di altri studi, [20], i provini non sono stati condizionati con esposizione preliminare ad alta temperatura.

Il diagramma di Fig. 10 mostra la dipendenza della resistenza a fatica ad alto numero di cicli dalla temperatura di prova della lega AlSi12. Le frecce indicano più prove interrotte a 10 milioni di cicli senza rottura. Prendendo come riferimento la resistenza a fatica a 250°C si nota un decremento considerevole passando alla temperatura di 300°C ed un sostanziale crollo della resistenza a 350°C. Questi dati sono in linea con le limitate evidenze sperimentali, [3], reperibili in data sheets delle poche aziende specializzate nella produzione di pistoni.

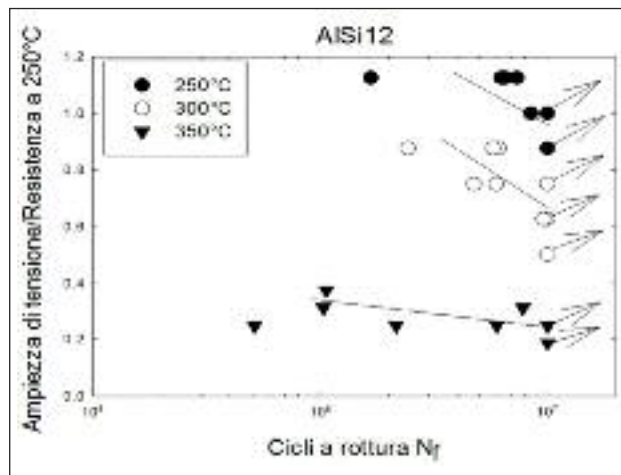


FIG. 10 *Influenza della temperatura sulla fatica ad alto numero di cicli di lega AlSi12.*

Influence of temperature on the high cycle fatigue behavior of cast AlSi12.

CONCLUSIONI

Il comportamento a fatica ad alto numero di cicli e ad alta temperatura delle leghe alluminio/silicio per getti è un tema di grande interesse industriale visto che le sollecitazioni di origine termomeccanica condizionano la durata in servizio di molti componenti motore. In questo lavoro si è sviluppata ed utilizzata una macchina di prova a fatica ad alto numero di cicli a temperature fino a 400°C su due leghe di impiego motoristico. Le principali conclusioni sono le seguenti:

- La macchina di prova si è dimostrata adeguata allo scopo ed efficiente con un sistema di controllo della temperatura molto accurato.
- La riduzione di resistenza a fatica in funzione della temperatura di prova è stata determinata sia per la lega AlSi7Mg sia per la lega AlSi12, evidenziando nel primo caso un degrado significativo delle proprietà già al di sopra dei 200°C, nel secondo caso sopra i 250°C.
- Nel caso della lega AlSi7Mg estratta da getti industriali un ruolo cruciale sulla resistenza a temperatura ambiente è svolto dalle porosità di solidificazione che danno luogo ad elevata dispersione dei dati.
- Nel caso della lega AlSi12 estratta da pistoni il ruolo delle porosità di solidificazione è limitato, mentre assumono un ruolo fondamentale le caratteristiche morfologiche degli elementi microstrutturali.

RINGRAZIAMENTI

Sentiti ringraziamenti vanno all'Ing. Gianluca Pivetti di Ferrari per il ruolo di referente industriale delle attività qui descritte.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Anon., Aluminium in cars, European Aluminium Association, 2007
- [2] Bryant J.D., White D.R., Aluminium and magnesium for automotive applications. The Minerals Metals and Materials Society; 1996.
- [3] Messner C., "Werkstoffen für Motoren und Antriebssysteme. Al-Legierungen", Lecture notes, TUM, 2007.
- [4] Ceschini L., Nicoletto G., Riva E., Strozzi A., Tomesani L., "Progettazione integrata di componenti motore in lega di alluminio ottenuti per fusione e sollecitati a fatica ad alta temperatura", Atti I Cong. Naz. Coordinamento Meccanica Italiana, Palermo, 2010.
- [5] Sonsino CM, Ziese J. Fatigue strength and applications of cast aluminium alloys with different degree of porosity. Int J Fatigue 15, 75-84, 1993.
- [6] Couper MJ, Neeson AE, Griffiths JR. Casting defects and the fatigue behaviour of an aluminium casting alloy. Fatigue Fract Eng Mater Struct 13(3):213-27, 1990
- [7] Beretta S., A. Blarasin, M. Endo, T. Giunti, Y. Murakami, Defect tolerant design of automotive components, International Journal of Fatigue, 19, 319-333, 1997.
- [8] Wang QG, Apelian D, Lados DA. Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects. J Light Met 1:73-84, 2001
- [9] Yi JZ, Gao YX, Lee PD, Flower HM, Lindley TC. Scatter in fatigue life due to effects of porosity in cast A356-T6 aluminium-silicon alloys. Metallurgical and Materials Transaction 34A, 1879-1890, 2003
- [10] Atzori B., G. Meneghetti, L. Susmel, Fatigue behaviour of AA356-T6 cast aluminium alloy weakened by cracks and notches, Eng. Fract. Mech., 71, 759-768, 2004
- [11] Nicoletto G, Kone ná R, Baicchi P, Majerova V. Casting Porosity and Long-life Fatigue Strength of a Cast Al-alloy, Procs. Int. Conf. MSMF 5, Brno, Czech Republic, 2007
- [12] Baicchi P, Nicoletto G, Riva E, Kone ná R, Morfologia della porosità e resistenza a fatica di una lega Al-Si per getti, Atti XXXVI Convegno Nazionale AIAS, Ischia, 2007
- [13] Flemings M.C., Solidification process, McGraw-Hill Book Company, New York, 1999.
- [14] Zhu X, et al., Effects of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum alloy in very long life cycles. Int J Fatigue 28:1566-71, 2006
- [15] Mayer H. et al., Endurance limit and threshold stress intensity of die cast magnesium and aluminium alloys at elevated temperatures, Int J Fatigue 27 1076-1088, 2005
- [16] Shyam A., Allison J.E., Jones J.W., A small fatigue crack growth relationship and its application to cast aluminum, Acta Materialia 53 1499-1509, 2005
- [17] Moffat A.J. et al., Microstructural analysis of fatigue initiation in Al-Si casting alloys, Materials Science Forum Vols. 519-521, 1083-1088, 2006
- [18] Joyce M.R., Styles C.M., Reed P.A.S., Elevated temperature short crack fatigue behaviour in near eutectic Al-Si alloys, Int J Fatigue 25 863-869, 2003
- [19] Molari P.G. et al., Thermal Ageing Effects on the Residual Fatigue Strength of AA2618-T6511 Aluminium Alloy, Key Engineering Materials Vols. 324-325, 1095-1098, 2006
- [20] Asghar Z. et al, Three-dimensional study of Ni aluminides in an AlSi12 alloy by means of light optical and synchrotron microtomography, Acta Materialia 57, 4125-4132, 2009
- [21] S.C. Weakley-Bollin et al., Modeling the Age-Hardening Behavior of Al-Si-Cu Alloys, Metall Mater Trans A 35A, 2407-11, 2004

Abstract

Elevated temperature fatigue behavior of cast aluminum alloys used for I.C. engine part production

Keywords: Aluminum alloys, Mechanical Testing, Fatigue, Castings, Metallography, Defects

The legislation places increasing efficiency requirements for passenger cars in terms of reducing fuel consumption and emissions thus motivating a continuous search for solutions that reduce the overall weight of the different subsystems [1]. Aluminum alloys are gradually taking the place of cast iron and steel in the construction of many key components of a car, as shown in Figure 1, thus contributing significantly to the weight reduction.

The industrial interest is therefore focused on the optimal design of critical engine components with full exploitation of the material performance. Aluminum alloys during engine operation are typically subjected to fatigue loading cycles at temperatures from 100°C up to 300 ° C - 350 ° C in areas facing the combustion chamber. Since cast Al-Si alloys [2,3] are used for the production of engine heads, piston, engine blocks etc., there is a growing need for design data and clarification of aspects such as alloying elements, modifier elements, heat treatment, effect of the process on casting defects, etc. .. in the context of high temperature fatigue.

This paper first discusses the origin of thermo-mechanical stresses that develop in the engine components during service highlighting the importance of an experimental material characterization. It then presents a test machine developed specifically to determine the fatigue behavior of materials at high number of cycles and temperatures up to 400 ° C. Fatigue tests results obtained using specimens extracted from components made of two Al-Si alloys, an hypoeutectic alloy (A356) used for engine head production and an eutectic alloy (AlSi12) used for piston production are presented and discussed,

THERMOMECHANICAL STRESSES IN ENGINE COMPONENTS

The fatigue assessment of engine components first requires knowledge of the thermomechanical stresses. They are currently calculated with the finite element method (FEM). Load cycles taken into account depend on the component and the type of service, such as the engine power on-off cycle or the durability test at the engine test bench. The FEM analysis begins with the generation of the geometric model of the part and the elements connected to it, the definition of the boundary conditions and a calculation that provides the temperature field. Here, heat transfer coefficients and heat flows were defined on the basis of industrial experience and then optimized by experimental validation reducing the stress simulation only to the thermomechanical problem. In addition to the temperature field, all the loads that the part exchange with the neighboring components are entered in the mechanical FE model. The temperature variation (switch on-off cycle) during engine operation is a source of potentially fatiguing loads at low frequency. When operating at full power, the mechanical stresses due to explosions in the combustion chamber result in high frequency stress cycles. Inertial effects are included for the moving parts (ie pistons).

In the case of a complex multi-cylinder engine head, an equivalent head module with specific boundary conditions may be adopted, Fig 2 [4]. Effects of seal, valve seats, valve guides, studs and nuts are included in the model. Figure 3 shows the steady temperature reached by an engine head. The area on the flame deck reaches high temperatures (ie 250 ° C) for the alloy (typically A356) while away from the flame deck the cooling water passages reduce rapidly the material temperature.

FEM modeling of thermo-engine components requires a constitutive model of the material, depending on the temperature, suitable for Al-Si casting alloys, [4].

The FE analysis shows thermal fatigue conditions (i.e. low number of cycles) between the valve bridges where the damage involves widespread fatigue plastic strain, see Figure 3a. Since the engine head response is substantially elastic, internal geometric variations and notches can be critical from the point of view of high cycle fatigue, i.e. Figure 3b shows an internal notch where the maximum temperature is limited but high enough to trigger fatigue.

Similar considerations can be made with reference to the calculation of thermo-mechanical stress of a piston. Figure 4 shows the temperature map superimposed on the model. In this case the maximum temperature is approx. 300 ° C. The dynamic loads associated with high-frequency reciprocating and burst pressures in combustion chamber were calculated analytically for different conditions of rotation and applied to the FE model through the piston rod and pin including the support provided by the cylinder liner. Figure 5 shows a map of the principal stress with the peak values found in the piston crown. The fatigue behavior at high temperature and high number of cycles of the material is critical.

MATERIALS AND EXPERIMENTAL PROCEDURE

In the fatigue design of engine components, the thermo-mechanical stress state calculated with FEM is compared with the admissible stress for the material under relevant operating conditions. Two cast Al-Si alloys used at high temperatures are considered here, namely AlSi7Mg and AlSi12, and their high cycle fatigue behavior at temperatures representative of the operating conditions determined. The two alloys do not compete for the same applications.

AlSi7Mg

Cast AlSi7Mg is and hypoeutectic alloy traditionally used for the production of important and complex engine parts (block, heads, etc...) They are heat-treated by annealing, quenching and artificial aging. The microstructure, Fig 6a, is characterized by a dendritic structure with a dispersion of eutectic silicon particles. The main microstructural parameters are the SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing), morphology of the Si eutectic and of the intermetallic compounds. The mechanical properties are influenced by local microstructural features and the type of casting process [2].

In the case of fatigue at room temperature, a fundamental role is played by defects, which are inevitably present in castings produced by industrial processes [5-12]. These defects, such as shrinkage cavities [13], (examples in Figure 6a), typically vary in size from a very large (ie 10 micron to 1000 micron and are therefore at least an order of magnitude larger than the size of the microstructural constituents and act as internal stress concentrators that can facilitate the initiation of fatigue cracking. In recent experimental studies [11-12], the fatigue properties obtained by rotating bending tests at room temperature were interpreted by determining the relationship between the magnitude of the applied stress, the number of cycles to failure and size of defects that have triggered the break. The present investigation of fracture surfaces, i.e. Figure 6b, has confirmed that the crack initiation always occurs at a pore located near or at the surface followed by a stable propagation until the final collapse. The high temperature behavior of AlSi7Mg is less known although it is expected to decrease the fatigue strength with increasing test temperature.

AlSi12

The eutectic Al-Si alloys are widely used as materials for engine piston, [2,3]. This class of alloys is characterized by multi-phase microstructure with compact primary silicon particles and acicular eutectic silicon, aluminum dendrites and many types of intermetallic particles. As the pistons are subjected to thermal mechanical stress over a wide temperature range, alloying elements (eg Cu, Ni, V) are added to optimize the response to fatigue at high temperature without compromising the strength at room temperature. Figure 7a shows the microstructure of an gravity cast AlSi12 alloy after etching with 0.5% HF. Primary silicon particles and eutectic silicon in the matrix and intermetallic compounds are visible in Figure 7b.

Fatigue machine and test methodology

The fatigue test machine developed for this study and shown in Figure 8 subjects a specimen of the material to cycles of temperature and stress of variable amplitude. The type of loading is rotating bending at a frequency adjustable up to 80 Hz. Smooth and notched specimens can be used. Variable amplitude loading can be applied by the pneumatic loading system. The specimen is induction heated with closed-loop temperature control using a thermocouple inserted into the specimen. The set temperature is reached with a transient of a few tens of seconds (up to 400 ° C) and is kept for the entire duration of the test with an error less than 1 ° C. The test specimens for this work were taken from industrial cast parts and used without thermal preconditioning. A stair-case procedure and a test frequency of 50Hz was used to determine the fatigue strength at a set number of cycles (i.e. 107 cycles). The stress amplitude and temperature were kept constant throughout the test. At the end of the fatigue tests the samples were analyzed in a scanning electron microscope.

RESULTS AND DISCUSSION

AlSi7Mg

Samples were taken from industrial AlSi7Mg - T6 castings and three test temperatures: 20 ° C, 250 ° C and 300 ° C were considered. The plot in Fig. 9 shows the dependence of high cycle fatigue strength with the test temperature for AlSi7Mg alloy. The arrows indicate tests interrupted after more than 10 million cycles without failure. It is noted that the fatigue resistance at 300 ° C is halved compared to the reference value at room temperature. Examination of fracture surfaces confirmed the key role of shrinkage cavities at room temperature while their effect is reduced as the temperature increases because they become the predominant mechanisms of plastic deformation.

AlSi12

Samples were extracted from gravity cast AlSi12 pistons and fatigue tested at three temperatures: 250 ° C, 300 ° C and 350 ° C. The plot in Figure 10 shows the dependence of high cycle fatigue strength with the test temperature for this material. Taking the fatigue strength at 250°C as reference, a considerable (30%) decrease is observed at a temperature of 300°C and a substantial fall (80%) in resistance at 350°C.

CONCLUSIONS

The high cycle fatigue behavior at high temperature of cast AlSi alloys is an issue of great industrial interest since thermomechanical stresses affect the service life of many engine components. For this purpose a high temperature fatigue test machine was developed and used on two alloys typical of engine part production. The main conclusions of this study are as follows:

- The test machine is adequate to the purpose with an accurate temperature control.
- The reduction of fatigue strength as a function of test temperature was determined for two alloys showing a significant deterioration of properties of AlSi7Mg already above 200 ° C and for AlSi12 above 250 ° C.
- In the case of AlSi7Mg specimens extracted from industrial parts, a crucial role on fatigue strength is played at room temperature by solidification porosity giving rise to high scatter in the data.
- In the case of AlSi12 alloy extracted from pistons the role of solidification porosity is limited, while a key role is played by the morphological characteristics of the microstructural elements