

Messa a punto di tecniche termografiche per il rilievo di difetti di fusione in getti di titanio commercialmente puro

F. Freni, F. Giacobbe, S. Missori, R. Montanini, A. Sili

Nel presente lavoro vengono riportati i risultati di uno studio sperimentale sull'applicazione di tecniche di misura basate su termografia attiva per il rilievo di difettosità in provini di Ti commercialmente puro di grado 2, realizzati mediante il metodo della fusione a cera persa. Le tecniche di termografia attiva ad infrarossi messe a punto hanno consentito di evidenziare la presenza di difetti sub-superficiali, non individuabili attraverso i metodi convenzionali che utilizzano liquidi penetranti. In particolare sono state sperimentate sia tecniche di termografia pulsata ("pulse phase"), basate sull'acquisizione delle mappe di temperatura superficiale dopo riscaldamento impulsivo dei provini, sia tecniche di termografia modulata ("lock-in"), basate sul rilievo delle mappe di temperatura durante l'applicazione di una sollecitazione termica sinusoidale. La verifica dei risultati ottenuti con il metodo termografico è stata effettuata attraverso il confronto con osservazioni radiografiche a raggi γ e con indagini di tomografia rX computerizzata in 3D.

Parole chiave: Titanio e leghe, Prove non distruttive

INTRODUZIONE

Tra le varie applicazioni in campo biomedico, l'impiego di titanio commercialmente puro (Ti - CP) si sta ampiamente diffondendo nella realizzazione, sotto forma di getti, di elementi per protesi dentarie, grazie alle ottime caratteristiche di biocompatibilità ed alle proprietà termofisiche, quali la bassa conducibilità termica, simile a quella del dente, e la densità inferiore rispetto a quella delle leghe di uso convenzionale a base di Au e di Ni-Cr [1,2].

Tuttavia la realizzazione di getti in titanio comporta alcune difficoltà legate all'elevato punto di fusione (1668 °C) ed alla reattività chimica. In particolare, tra i problemi riscontrati nella produzione di getti in titanio, occorre considerare le possibili incompletezze del getto stesso e la formazione di cavità o di porosità al suo interno [3]. Come è noto, difetti di questo tipo possono essere causati dalla presenza di gas o dalla mancanza di penetrazione del metallo liquido nella forma, a seguito di una troppo rapida solidificazione nei canali di alimentazione. La quantità e le dimensioni di questi difetti dipende da diversi fattori, quali la differenza di temperatura tra il bagno e la forma, la geometria del getto, il numero e la disposizione dei canali di colata, il metodo di colata, la permeabilità ai gas della forma [4,5,6].

In un precedente lavoro [7] sono stati studiati gli effetti della

geometria della forma e del posizionamento ottimale dei canali di colata sulla presenza di porosità e difetti in getti di Ti - CP grado 2. Nel presente lavoro è stato effettuato uno studio sperimentale riguardante l'applicazione di tecniche di termografia attiva per il rilievo di eventuali difettosità presenti all'interno di getti in Ti - Cp grado 2. Sono stati considerati provini realizzati mediante il metodo a cera persa, tutti con forma di parallelepipedo, caratterizzata da due dimensioni predominanti (basi di lato pari a 20-35 mm e spessori di 2 e 5 mm), in modo da avere superfici più ampie possibili e, quindi, condizioni di elevato scambio termico e di rapida solidificazione per esaltare la possibile formazione di difetti di fusione.

Scopo del presente lavoro è la messa a punto di tecniche di termografia attiva ad infrarossi per la determinazione dei difetti sub-superficiali, non individuabili attraverso i metodi convenzionali che utilizzano liquidi penetranti. In particolare sono state sperimentate sia tecniche impulsive, "pulse thermography" e "pulse phase thermography", basate sull'acquisizione delle mappe di temperatura superficiale risultanti da un riscaldamento impulsivo dei provini, sia tecniche di termografia modulata, "lock-in", basate sul rilievo delle mappe di temperatura durante l'applicazione di una sollecitazione termica sinusoidale. La verifica dei risultati ottenuti nella individuazione dei difetti mediante le indagini termografiche è stata effettuata attraverso il confronto con osservazioni radiografiche a raggi γ e con indagini di tomografia rX computerizzata in 3D.

MATERIALI E METODI

Realizzazione dei provini in titanio

I provini per le indagini termografiche sono stati realizzati in titanio commercialmente puro (Ti CP grado 2), di largo impiego nel settore odontotecnico, mediante il metodo della fusione a cera persa.

La forma prescelta è stata parallelepipedica, con due dimensioni predominanti in modo da avere superfici di scambio termico più

F. Freni, R. Montanini, A. Sili
Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali -
Università di Messina

F. Giacobbe
Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro -
Dipartimento ISPESL-Messina

S. Missori
Dipartimento di Ingegneria Meccanica
Università di Roma-Tor Vergata



FIG. 1 *Provini in titanio (Ti - CP grado 2) prodotti mediante fusione a cera persa.*

Titanium (Ti - CP grade 2) samples, produced by lost wax casting.

Stato della superficie	ϵ	ρ
Lucida	0,20	0,80
Ossidata	0,60	0,40
Non lavorata	0,90	0,10
Verniciata di nero opaco	0,98	0,02

TAB. 1 *Valori dei coefficienti di emissività (ϵ) e riflessività (ρ) in funzione dello stato della superficie del campione.*

Emissivity (ϵ) and reflectivity (ρ) values for different surface sample finishing.

ampie possibili e quindi elevate velocità di solidificazione. Queste caratteristiche esaltano le condizioni per ottenere presenza di difetti sotto forma di cavità sub-superficiali.

In particolare le indagini termografiche sono state svolte su tre provini:

- provino A: dimensioni 35x35mm², spessore 5 mm,
- provino B: dimensioni 20x20mm², spessore 2 mm,
- provino C: dimensioni 20x20mm², spessore 2 mm,

In figura 1 si riporta un'immagine dei provini in cui sono presenti i canali di colata.

Tecniche termografiche

Le tecniche di indagine termografica si basano sul fenomeno se-

condo il quale ogni corpo, avente temperatura superiore allo zero assoluto, genera un'emissione infrarossa funzione della sua stessa temperatura: tanto maggiore è l'energia termica immagazzinata, tanto maggiore sarà la quantità di energia emessa sotto forma di raggi infrarossi.

Qualsiasi corpo, nel caso in esame metallico, sottoposto ad una eccitazione infrarossa incidente, restituisce parte dell'energia per riflessione e parte per emissione (dovuta al riscaldamento), se si considera trascurabile la componente di energia trasmessa. La tipologia del materiale ed il suo stato di finitura superficiale determinano i valori dei coefficienti di emissione, definito emissività, e di riflessione.

Come riportato in tabella 1, le superfici grezze o ossidate presentano bassa riflessività, indice di una buona approssimazione tra energia incidente ed energia emessa; al contrario le superfici lucide sono caratterizzate da elevata riflessività. Inoltre, indipendentemente dallo stato di finitura del materiale, il trattamento della superficie con vernice nera opaca risulta in una crescita netta dell'emissività, che permette di considerare trascurabile l'aliquota di energia riflessa. Ciò trova interessanti applicazioni nel settore delle prove non distruttive [8].

Le tecniche di termografia attiva sfruttano il transitorio termico delle superfici, conseguente ad una eccitazione esterna [9,10]: le discontinuità nella struttura del materiale, come i difetti geometrici superficiali o interni, agiscono come disturbo alla conduzione termica interna nel materiale. Ciò causa variazioni locali nella distribuzione delle temperature durante la fase di riscaldamento e/o raffreddamento conseguente all'applicazione di una sollecitazione termica periodica o impulsiva [11,12].

Nel presente lavoro sono state sperimentate le seguenti tecniche termografiche attive:

- "lock-in-thermography",
- "pulse thermography",
- "pulse phase thermography".

Nella tecnica "lock-in-thermography" [13,14], il campione viene eccitato, durante un ciclo di misura, da un'onda termica sinusoidale prodotta da una sorgente ottica (lampada) (fig. 2). L'energia termica che si propaga per conduzione all'interno del materiale viene riflessa in corrispondenza delle discontinuità, dando luogo ad onde che interferiscono con quella proveniente dalla superficie del campione. I profili termici risultanti, che si stabilizzano intorno a valori medi che rimangono stazionari, vengono elaborati via software nel campo delle frequenze per mezzo di una analisi di Fourier discreta effettuata per ogni pixel, ricavando i termogrammi di ampiezza e di fase. In tal modo si hanno informazioni che consentono di rilevare la presenza di discontinuità sub-superficiali. In aggiunta, l'immagine di fase risulta relativamente insensibile alle di-

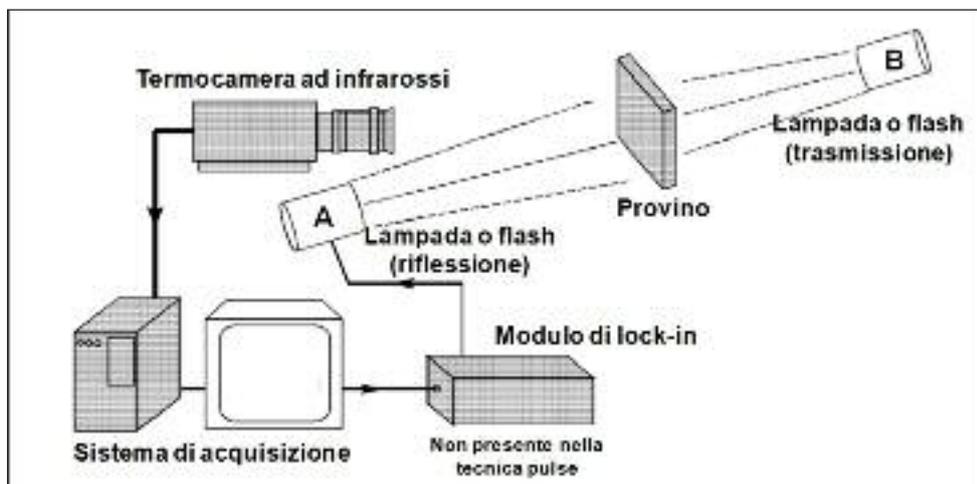


FIG. 2 *Set up di misura per termografia attiva di tipo lock-in e pulse phase, nelle due diverse configurazioni: A) riflessione; B) trasmissione*

"Lock-in" and "pulse phase" thermography experimental set-up in two different configurations: A) reflection; B) transmission.

somogeneità superficiali ed alle variazioni di emissività.

Un aspetto essenziale per la computazione delle immagini di ampiezza e di fase è la corretta sincronizzazione temporale tra il segnale di eccitazione (lock-in) e quello di acquisizione mediante la termocamera.

Facendo ricorso a semplici modelli unidimensionali per la descrizione dei fenomeni di propagazione termica all'interno del componente, si può dimostrare che la profondità di penetrazione del fronte termico di eccitazione è inversamente proporzionale alla frequenza di eccitazione:

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f}} \quad (1)$$

essendo μ la lunghezza di diffusione termica, α la diffusività termica, f la frequenza di eccitazione, nel seguito indicata come frequenza di lock-in ($f_{\text{lock-in}}$).

Ciò significa che basse frequenze di eccitazione risultano in maggiori profondità di detezione di un eventuale difetto, tuttavia, al diminuire della frequenza, si riduce la risoluzione [15].

La tecnica di misura "pulse thermography" [16,17] consiste nel riscaldare velocemente il campione da ispezionare con un impulso termico ad alta energia, monitorandone l'evoluzione termica superficiale durante la fase transitoria di raffreddamento. Le anomalie registrate in tali immagini rivelano l'esistenza di discontinuità sub-superficiali che appaiono come un'area di diversa temperatura rispetto alla zona circostante. Tuttavia risulta problematico rilevare difetti di piccole dimensioni posti a profondità relativamente elevate.

La tecnica "pulse phase thermography" [14,18,19] è una evoluzione di quella appena descritta, e si basa sulla teoria secondo cui un impulso termico di eccitazione induce simultaneamente nel materiale treni di onde termiche a diversa frequenza. Acquisendo l'evoluzione delle mappe di temperatura superficiale, in regime transitorio, ed elaborandole nel dominio delle frequenze, per mezzo di una trasformata di Fourier discreta (dft) effettuata per ogni pixel, è possibile ricavare la parte reale ed immaginaria della sequenza e, infine, le immagini di ampiezza e di fase. Il fatto che tale tecnica analizzi contemporaneamente varie frequenze (nel seguito indicate come f_{diff}) consente di ridurre in maniera drastica il tempo di esecuzione rispetto alla tecnica lock-in. Infatti una singola prova, debitamente elaborata mediante dft, permette di ottenere immagini di ampiezza e fase per ogni frequenza f_{diff} (in relazione all'intervallo di campionamento). Tuttavia, essendo il segnale di eccitazione composto da brevi impulsi, la quantità di energia immessa risulta molto bassa e ciò pregiudica la possibilità di identificare difetti posti ad elevata profondità.

Per l'applicazione della tecnica "pulse thermography" i provini sono stati riscaldati all'interno di piastre termiche coibentate e successivamente raffreddati in aria ferma con la termocamera posta frontalmente ad una distanza di circa 80 cm (dal lato opposto a quello in cui sono situati i fori relativi ai perni di colata), in modo da avere superfici piane e regolari per le misure (fig. 2). Nel corso del transitorio termico di raffreddamento, i singoli termogrammi sono stati memorizzati e successivamente analizzati utilizzando un software commerciale che permette diverse soluzioni cromatiche (palette colore) per mostrare la distribuzione delle temperature rilevate. Al fine di differenziare la scala cromatica ed evidenziare la presenza di difetti, risulta significativo il settaggio della temperatura minima e massima.

Le tecniche "lock-in" e "pulse phase" sono state applicate sia in riflessione (con la termocamera posta di fronte alla superficie del campione, dalla stessa parte della sorgente termica) che in trasmissione (con il campione interposto tra la sorgente termica

e la termocamera). In tutti i casi la superficie del campione rivolta verso la termocamera era quella non interessata dai canali di colata.

Come sorgente termica per la tecnica lock-in è stata utilizzata una lampada di potenza di 1 kW, con ciclo di accensione sinusoidale modulabile in frequenza; per la tecnica pulse phase è stato utilizzato un flash con accensione impulsiva. L'acquisizione della radiazione emessa è stata effettuata mediante una termocamera ad alta risoluzione spaziale (640×512 pixel), dotata di focal plane array all'antimoniuro di indio. Il detettore opera nel campo spettrale MWIR (3 ÷ 5 μm) e presenta una risoluzione termica di circa 20 mK a temperatura ambiente. Il sistema di acquisizione dati è controllato da un personal computer che consente di variare il tempo di integrazione in un campo compreso tra 10 μs e 5 ms, con frequenza di quadro fino a 100 Hz a piena risoluzione.

Controlli radiografici e tomografici

I campioni sono stati sottoposti a controlli radiografici e tomografici. Il controllo radiografico [20] è stato effettuato impiegando apparecchiature di classe "F" (radioisotopi di Iridio192 con un'energia da 0,3 a 0,6 MeV).

Le osservazioni tomografiche sono state condotte mediante una stazione costituita da una camera di misura schermata, con sistema di lavoro a fuoco variabile (diametro dello *spot* focale variabile da 250 a 800 μm), e da una postazione di lavoro computerizzata per effettuare le misure, il controllo e l'elaborazione software delle immagini in 2D e in 3D [21].

RISULTATI E DISCUSSIONE

Tecnica "pulse thermography"

La durata del processo di raffreddamento dei provini è stata valutata in oltre 6 minuti. Le maggiori disomogeneità di temperatura sulla superficie del provino si hanno nella fase iniziale del transitorio di raffreddamento quando la temperatura media è più elevata.

Come mostrato per il provino A (fig. 3), le disomogeneità di temperatura sulla superficie sono tali da permettere l'osservazione dei difetti interni solo nelle immagini termografiche riprese durante il primo minuto. In particolare nella prima termografia, effettuata dopo circa 20 s di raffreddamento, le disomogeneità di emissione dalla superficie del provino risultano molto evidenti (in corrispondenza di cavità interne, la temperatura superficiale è inferiore in quanto la velocità di raffreddamento è superiore). In figura 4 si riportano, a confronto, le immagini ottenute mediante radiografia e termografia infrarossa con metodo "pulse", effettuata in riflessione sulla superficie opposta a quella dei canali di colata.

Le superfici dei provini in corrispondenza dei difetti interni (cavità conseguenti a mancato riempimento) presentano una temperatura più bassa rispetto alle zone prive di difetti, consentendo di identificare il contorno e l'estensione delle cavità. Tuttavia, il metodo "pulse", in relazione alla termocamera impiegata, permette l'individuazione di difetti dell'ordine di qualche millimetro.

Dalle immagini di figura 4, si può constatare come la tecnica "pulse" effettuata sul provino A fornisca risultati poco leggibili, in quanto il difetto interessa gran parte del volume del campione dando luogo ad uno scarso contrasto termografico.

Tale provino, dopo aver effettuato il controllo dei difetti mediante scansione tomografica, è stato quindi osservato con le tecniche "lock in" e "pulse phase", sia con la configurazione in riflessione che in trasmissione. La figura 5 mostra le immagini tomografiche, che consentono una corretta rilevazione dimensionale e spaziale delle cavità interne al campione [21].

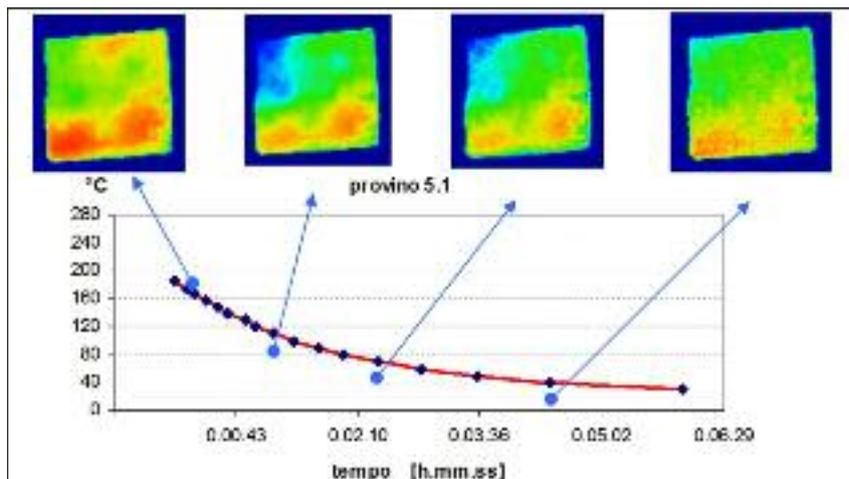


FIG. 3
Andamento della temperatura media del provino ed immagini termografiche durante la fase di raffreddamento (tecnica “pulse” in riflessione sulla superficie opposta a quella dei canali di colata).

Mean temperature progress and thermograms during the cooling phase (“pulse” technique in reflection mode).

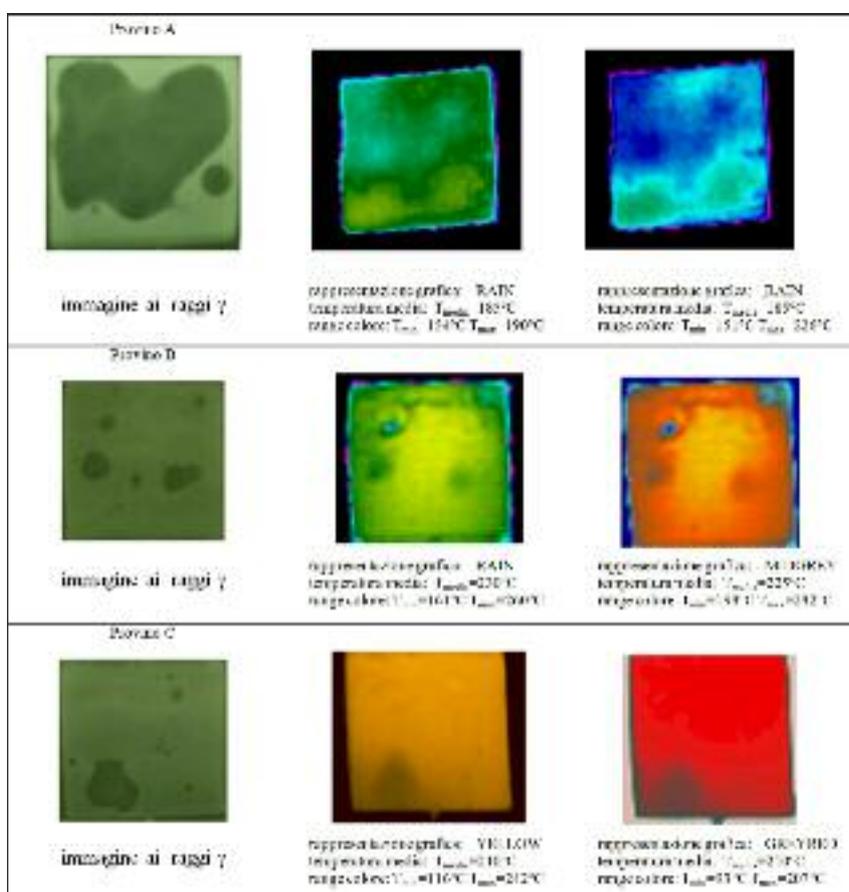


FIG. 4
Confronto tra immagini ottenute mediante radiografia e termografia infrarosso “pulse”.

Comparison between radiography and “pulse” thermography images.

Nelle successive figure 6 e 7 si riportano i risultati (termogrammi di fase), ottenuti con le tecniche termografiche “lock in” e “pulse phase”, utilizzando la frequenza di 0.05 Hz (rispettivamente frequenza di eccitazione $f_{lock-in}$ per la tecnica “lock in” e frequenza di elaborazione dei profili termici f_{diff} per la tecnica “pulse phase”).

Nella figura 6 sono mostrate, a confronto, l’immagine tomografica di una sezione mediana del campione e quelle ottenute mediante termografia infrarosso con metodo “lock in”, sia in riflessione che in trasmissione. L’immagine in riflessione consente l’individuazione del difetto più grande, anche se con contorni poco netti. L’immagine in trasmissione non permette l’individuazione del difetto probabilmente a causa dell’elevato spessore del provino.

Nella figura 7 sono riportate, insieme all’immagine tomografica,

quelle ottenute mediante termografia infrarosso con metodo “pulse phase”, sia in riflessione che in trasmissione.

Anche in questo caso, la configurazione in riflessione fornisce risultati migliori rispetto a quella in trasmissione: il difetto più grande viene individuato in maniera molto netta, consentendo un accurato dimensionamento della discontinuità.

L’effetto della frequenza viene mostrato nelle successive figure 8 e 9.

Per le due tecniche “lock in” e “pulse phase” i risultati migliori si ottengono con una frequenza, rispettivamente $f_{lock-in}$ e f_{diff} , pari a 0.05 Hz.

Frequenze maggiori o minori danno contorni molto incerti del difetto nel caso della tecnica “pulse phase” ed assoluto non rilevamento del difetto, a causa della completa uniformità dell’immagine, nel caso della tecnica “lock in”.

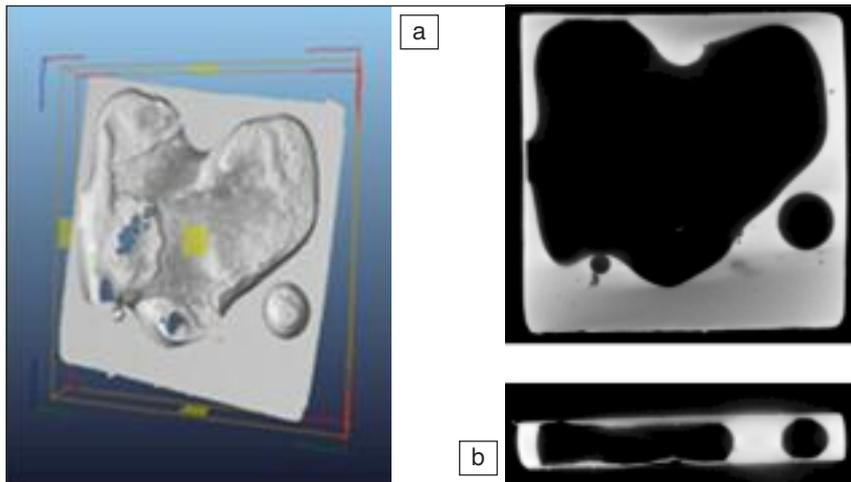


FIG. 5
Risultati della scansione tomografica: a) ricostruzione tridimensionale del campione; b) sezioni.

Tomographic scanning results: a) 3D sample reconstruction b) sample sections.

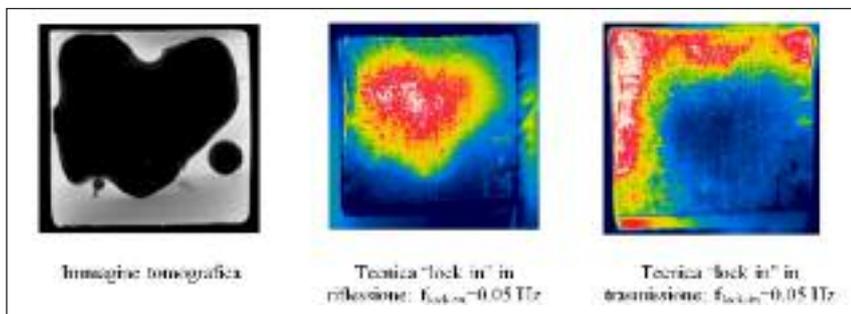


FIG. 6
Confronto tra immagini ottenute mediante tomografia rX e termografia infrarosso con metodo "lock in" in riflessione e in trasmissione.

Comparison between tomography and "lock-in" thermography (reflection and transmission modes) images.

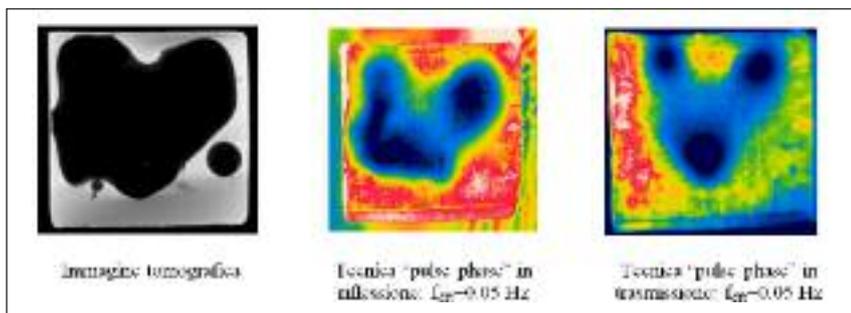


FIG. 7
Confronto tra immagini ottenute mediante tomografia rX e termografia infrarosso con metodo "pulse phase" in riflessione e in trasmissione.

Comparison between tomography and "pulse phase" thermography (reflection and transmission modes) images.

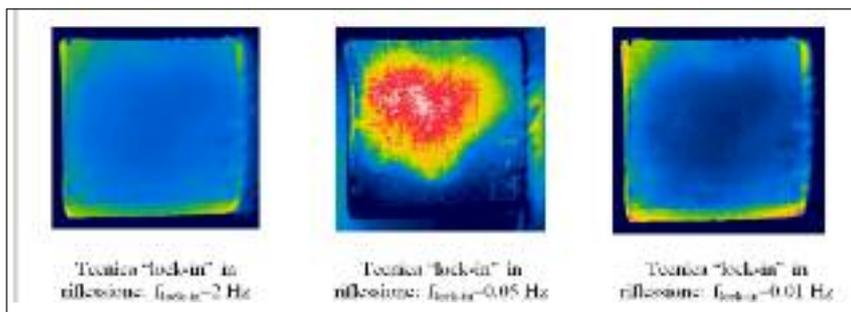


FIG. 8
Confronto tra immagini ottenute mediante termografia infrarosso con metodo "lock in" in riflessione a tre diverse frequenze di eccitazione.

Comparison between three "lock-in" thermography (reflection mode) images at different excitation frequencies (dft analysis).

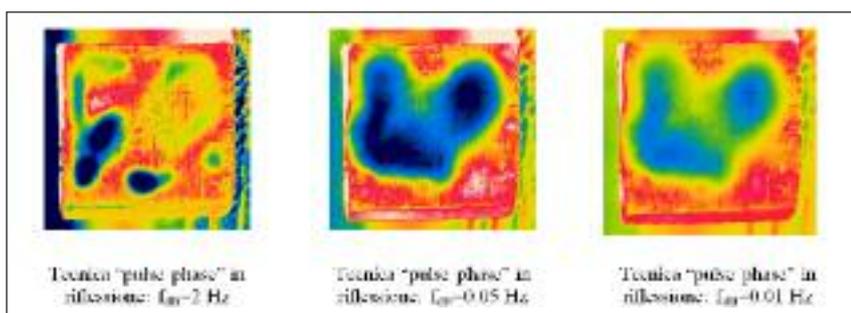


FIG. 9
Confronto tra immagini ottenute mediante termografia infrarosso con metodo "pulse phase" in riflessione a tre diverse frequenze di elaborazione dft.

Comparison between three "pulse phase" thermography (reflection mode) images at different dft frequencies.

CONCLUSIONI

Il lavoro sperimentale svolto ha dimostrato la validità delle tecniche termografiche attive nel campo dell'infrarosso nell'identificazione di macro difetti sub-superficiali in getti di titanio commercialmente puro.

Le dimensioni e la profondità dei difetti che possono essere rilevati dipende da molteplici fattori connessi sia con le caratteristiche dei provini che con la metodologia di misura.

In particolare la tecnica pulsata, che si avvale di attrezzature di basso investimento, fornisce risultati significativi (soltanto nelle prime fasi del transitorio termico), consentendo di individuare difetti dell'ordine di qualche millimetro. Tuttavia la tecnica pulsata presenta immagini termografiche poco leggibili quando il difetto interessa gran parte del volume del campione, data la difficoltà di ottenere termogrammi sufficientemente contrastati dopo i primi istanti della fase di raffreddamento.

Buoni risultati sono stati ottenuti mediante la tecnica "lock-in thermography" in riflessione, la quale, con un'opportuna scelta della frequenza sperimentale di eccitazione, permette l'individuazione anche di difetti di maggiori dimensioni.

La tecnica "pulse phase thermography" ha dato buoni risultati sia in riflessione che in trasmissione nell'individuazione dei difetti di maggiori dimensioni. Tale tecnica presenta inoltre il vantaggio di restituire, con una sola misura sperimentale, immagini di fase della superficie del campione elaborate a diverse frequenze.

BIBLIOGRAFIA

- 1) M. YAMAUCHI, M. SAKAI and J. KAWANO, "Clinical application of pure titanium for cast plate dentures", *Dent. Mater.*, 7 (1988), pp. 39-47
- 2) M. KONONEN, J. RINTANEN, A. WALTIMO, and P. KEMPAINEN, "Titanium framework removable partial denture used for patients allergic to other metals: a clinical report and literature review", *J. Prosthet Dent*, 73 (1995), pp. 284-293
- 3) T. OKABE and H. HERO, "The use of titanium in dentistry", *Cells Mater.*, 5 (1995), pp. 211-230
- 4) I. WATANABE, M. WOLDU, K. KATANABE and T. OKABE, "Effect of casting method on castability of titanium and dental alloys", *J. of Mat. Science Med.*, 11 (2000), pp. 547-553
- 5) W. MENGHUAI, I. WAGNER, P.R. SAHM and M. AUGTHUN, "Numerical simulation of the casting process of titanium removable partial denture frameworks", *J. of Mat. Science Med.*, 13 (2002), pp. 301-306
- 6) K. WATANABE, O. MIYAKAWA, Y. TAKADA, O. OKANO and T. OKABE, "Casting behaviour of titanium alloys in centrifugal casting machine", *Biomaterials*, 24 (2003), pp. 1737-1743
- 7) F. GIACOBBE, S. MISSORI and A. SILLI, "Realizzazione di getti in titanio e loro caratterizzazione mediante controlli non distruttivi", 31° Convegno nazionale AIM, Milano, 22-24 Novembre 2006
- 8) C. PANDEY and AJAY KUMAR, "Modern-Infra-Red Spectroscopy: A Tool For Noncontact And Nondestructive Evaluation With Special Reference To Process Monitoring", WCNDT, 1996
- 9) N. KATSUNOBU, T. MAKOTO and S. KAZUYOSHI, "Method of detecting defects in materials using infrared thermography", Agency of Industrial Science & Technology, Ministry of International Application, No. 747925, 1996
- 10) C. MEOLA, "A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography", *Materials Letters*, Vol. 61, Issue 3 (2007) pp 747-750
- 11) T. INAGAKI, T. ISHII and T. IWAMOTO, "On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography", *NDT & E International*, Volume 32, Issue 5 (1999) pp 247-257
- 12) M. CHOIA, K. KANGA, J. PARKA, W. KIMB and K. KIMC, "Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography", *NDT & E International*, Vol. 41, Issue 2 (2008) pp 119-124
- 13) D. WU and G. BUSSE, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials", *Rev. Gén. Therm.*, Vol. 37, (1998) pp. 693-703
- 14) R. MONTANINI and S. ALIQUO', "Nondestructive evaluation of Plexiglas materials using lock-in and pulse phase infrared thermography", XIX IMEKO World Congress - Fundamental and Applied Metrology, Lisbona, 6-11 settembre 2009
- 15) R.MONTANINI and F. FRENI, "Nondestructive inspection of luxury yacht glass reinforced composite panels by means of transient thermography", 10th Quantitative Infrared Thermography Conference (QIRT) 2010, Québec, 27-30 luglio 2010
- 16) C. MEOLA and G.M. CARLOMAGNO, "Recent advances in the use of infrared thermography", *Meas. Sci. Technol.*, 15 (2004), pp. R27-R58
- 17) F. GIACOBBE, S. MISSORI, R. MONTANINI and A. SILLI, "Rilievo dei difetti di fusione mediante controllo termografico", *Atti del 13° Convegno AnPnD*, Roma, 15-17 ottobre 2009
- 18) X. MALDAGUE and S. MARINETTI, "Pulse phase infrared thermography", *J. Appl. Phys.*, 79 (1996) pp. 2694-8.
- 19) X. MALDAGUE, F. GALMICHE and A. ZIADI, "Advances in pulsed phase thermography", *Infrared Physics & Technology*, 43 (2002) pp.175-181
- 20) EN 12681 - "Fonderia - Controllo mediante radiografia", 2003
- 21) C. BORSELLINO, V. CRUPI, G. EPASTO, F. GARESCI, F. GIACOBBE, E. GUGLIELMINO, F. MANTINEO, R. MONTANINI and A. SILLI, "Impiego della tomografia industriale a fuoco variabile in vari settori dell'ingegneria meccanica", *atti del 1° Congresso Nazionale del Coordinamento della Meccanica Italiana*, Palermo 20-22 Giugno 2010

Abstract

Infrared thermography as a non destructive technique for the detection of titanium casting defects

Keywords: titanium and alloy, non-destructive tests

This paper analyzes the potential application of an experimental quality assessment of pure titanium specimens, produced by investment casting, by means of active infrared thermography (AIT). This technique uses thermal waves to excite the specimen in order to induce temperature differences witnessing the presence of anomalies. Thus, AIT permits the analysis of both surface and subsurface integrity, contrary to other non-destructive testing (NDT) method used in industrial applications, such as penetrant liquid testing.

In last decades, the use of pure titanium in biomedical field has been increased noticeably, thanks to its biocompatibility and optimal thermo-physical characteristics. Low thermal conductivity and density in respect to conventional Au and Ni-Cr [1,2] alloys are only two examples. However, Ti casting shows some difficulties due to Ti high melting point (1668 °C) and high chemical reactivity. In particular, problems might result in the presence of internal pits, porosity and discontinuities [3], with defects dimension and number depending on shape, gas permeability [4,5,6], casting geometry and methods [7].

In this work AIT measurements have been performed on commercially pure titanium (Ti CP grade 2) specimens, parallelepiped shaped, with high base areas, in order to obtain a better thermal exchange, resulting in a faster solidification. This is one of pri-

mary causes of the presence of internal defects.

In particular, AIT measurements have been performed on three different samples (fig. 1):

- Sample A: dimensions 35x35 mm², thickness 5 mm
- Sample B: dimensions 20x20 mm², thickness 2 mm
- Sample C: dimensions 20x20 mm², thickness 2 mm

Plank's law asserts that each body, having a temperature above the absolute zero, emits an infrared wave depending on its temperature and surface conditions (emissivity $\epsilon = 0 \div 1$).

Infrared thermography is based on the detection of this emission, in order to measure temperature, and to generate a false colors thermal map of the analyzed surface (thermogram). Moreover, any thermally excited surface shows back an infrared wave that may be considered as the sum of two components: a reflection component (of excitation source) and an emission one (due to the heating).

The quality assessment of a sample is based on the emitted wave, that permits to obtain information about subsurface conditions. Thus, the reflection component induces a noise that may affect results.

In order to study only the emission, emissivity becomes a fundamental parameter, because the higher the emissivity, the lower the value of reflected energy. As given in table 1, dark, oxidized, raw surfaces are characterized by high value of ϵ (0.6 - 0.98), on the contrary shiny or smooth surfaces show low values of ϵ (0.2 - 0.4) [8].

Active infrared thermography uses an external periodic or impulsive optical excitation on a test sample surface, in order to produce a thermal transient state in the specimen [9,10]. The presence of an internal discontinuity changes the thermal flow conduction in the sample, thus causing a local alteration of surface temperature distribution, during the heating or cooling transitional stage [11,12].

This paper analyzes three different active techniques:

- "lock-in-thermography",
- "pulse thermography",
- "pulse phase thermography".

In the "lock-in-thermography" technique [13,14], sample is excited using a sine thermal wave, produced by an optical source (lamp). The thermal flow propagating in the specimen is reflected by internal defects, establishing a wave opposed to the excitation one. The transient thermal state is, afterwards, evaluated by a discrete Fourier analysis (dft) in respect to the excitation frequency, in order to obtain amplitude and phase thermograms.

The use of dft makes necessary an exact time synchronization between excitation and acquisition signals.

Detection depth is a fundamental parameter depending, in inverse proportion, on the excitation frequency. Using a mono-dimensional thermal transmission model it's possible to assert that the lower the excitation frequency, the higher the detection depth, the lower the thermal surface resolution [15].

"Pulse thermography" technique uses an impulsive high energy excitation, in order to evaluate the thermal transient in cooling conditions [16,17]. An internal defect appears as a surface zone showing a temperature difference in respect to surrounding areas.

"Pulse phase thermography" technique is an evolution of the previous one, and it's based on the theory that an impulsive wave is ideally composed by a wide number of different frequency waves [14,18,19]. Thus, in this case, it's possible to carry out a dft analysis at various frequencies, reducing the test time in respect to lock-in technique. Results are amplitude and phase thermograms.

Pulse thermography has been led using an oven to heat the specimen, and monitoring the cooling phase. Thermograms elaboration has been carried out by a commercial software. Lock-in and pulse-phase techniques have been performed both in reflection and in transmission mode, using 1 lamp (1 kW power) and 1 flash (1 kW) respectively as excitation sources.

Each specimen has been examined also by radiographic and tomographic analysis, in order to compare with thermographic results. Radiographic tests have been conducted by "F" class (Iridium192 isotope, with 0,3- 0,6 MeV energy) equipment [20]; tomographic tests have been carried out by a variable focus station [21].

Pulse thermography results are showed in figure 3. Cooling phase has been monitored for 6 minutes. As can be observed analyzing the thermograms, surface thermal gradients, located in correspondence to internal defects, show a lower temperature respect to bulk areas. Those thermal discontinuities are more visible at the beginning of the cooling process, with higher mean temperature. In particular, the first thermogram (20 s) shows a pronounced gradient, that gradually disappears.

A comparison between pulse thermography and radiography is illustrated in figure 4.

Resultant thermograms suggest that "pulse" technique doesn't permit the location of internal discontinuities smaller than few millimeters. Moreover, this minimal detectable defect dimension depends on the deepness of the discontinuities, as well as on the specimen thickness. A tomographic image of the A sample is given in figure 5.

According to this, results obtained on the A sample, thicker than others, are not clear. For this reason, this specimen has been tested also with "lock-in" and "pulse phase" techniques, both in reflection and in transmission mode. Results are reported in figures 6-7.

In figures 8-9 phase thermograms, obtained at different lock-in or dft frequencies, are showed, respectively for lock-in and pulse phase thermography.

Conclusions can be summarized as follows:

- thermographic test method permits the identification of internal macro-discontinuities;
- pulse thermography technique lead to good results only at the beginning of transient state;
- positive results have been obtained with reflection lock-in thermography;
- good results have been obtained with pulse phase technique, both in reflection and transmission set-up.