

## COMPORTAMENTO QUASI-STATICO DI PROVINI INTAGLIATI IN LEGA TI-6AL-4V IN METANOLO

S. Baragetti<sup>a,b</sup>, R. Gerosa<sup>c</sup>, F. Villa<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Università degli Studi di Bergamo - Dipartimento di Ingegneria, Viale Marconi 5, 24044 Dalmine (BG), e-mail: sergio.baragetti@unibg.it, francesco.villa@unibg.it

<sup>b</sup> GITT – Centro per la Gestione dell'Innovazione e del Trasferimento Tecnologico, Via Salvecchio 19, 24129, Bergamo, e-mail: sergio.baragetti@unibg.it

<sup>c</sup> Politecnico di Milano, Polo Territoriale di Lecco, Via Marco d'Oggiono 18/A, 23900, Lecco, e-mail: riccardo.gerosa@polimi.it

### Sommario

L'utilizzo di leghe di titanio nell'industria automobilistica, aerospaziale e navale è sempre più diffuso, grazie all'elevato rapporto resistenza/massa e alle brillanti caratteristiche a fatica. Tuttavia, recenti esperimenti su provini intagliati di lega Ti-6Al-4V in soluzione di metanolo hanno mostrato una sensibile diminuzione delle prestazioni a fatica, con una riduzione dello sforzo massimo applicato a  $R=0.1$  fino al 50%. Il presente lavoro ha come obiettivo lo studio del contributo dovuto alle azioni chimiche e meccaniche, relative al meccanismo di tensocorrosione della lega Ti-6Al-4V in metanolo. Prove sperimentali quasi-statiche sono state condotte su provini piani intagliati, con area di gola immersa in una soluzione a differenti concentrazioni di metanolo. I risultati in ambiente aggressivo sono stati confrontati con prove quasi-statiche in ambiente inerte e con prove a fatica in metanolo, per identificare e disaccoppiare gli effetti chimici da quelli meccanici. Modelli numerici dei provini sono stati utilizzati per valutare il coefficiente di intaglio  $K_t$ . Infine le superfici di frattura sono state osservate mediante microscopia elettronica, per investigare i meccanismi di frattura e gli effetti dell'ambiente corrosivo.

### Abstract

The use of titanium alloys in the automotive, aerospace and naval industry is always increasing, due to their favorable strength to mass ratio and to their excellent fatigue performances. However, recent experiments on Ti-6Al-4V notched specimens in a methanol solution have shown a dramatic degradation of the alloy fatigue endurance limits, with a reduction of the maximum applied stress of up to 50%, at  $R=0.1$ . The aim of the present work is the investigation of the mechanical and chemical driving forces involved in the Ti-6Al-4V stress-corrosion mechanism in methanol. Experimental quasi-static tests on Ti-6Al-4V notched flat dog-bone specimens, with gage area submersed in methanol solution at different concentrations, were performed. Results in aggressive environment were compared with quasi-static tests in inert environment and with fatigue tests in methanol, in order to identify and decouple the chemical and mechanical effects. Numerical models of the specimens were developed, in order to evaluate the stress concentration factor  $K_t$ . Finally the fracture surfaces were observed by SEM in order to study in deep the fatigue mechanisms and the effect of the corrosive environment.

**Parole chiave:** Ti-6Al-4V, metanolo, tensocorrosione, prove quasi-statiche.

## 1. INTRODUZIONE

L'utilizzo di leghe di titanio per la progettazione di elementi strutturali in ambito aeronautico, navale e automobilistico è al giorno d'oggi ampiamente diffuso, grazie alle elevate caratteristiche meccaniche e alla ridotta densità di questi materiali. Il loro impiego risulta dunque indispensabile per quei componenti che debbano garantire contemporaneamente un'elevata resistenza, comparabile a quella degli acciai ad alte prestazioni, ed un peso ridotto. In ambito aerospaziale, le leghe leggere di titanio vengono tipicamente utilizzate per parti strutturali fortemente sollecitate in velivoli ad alte prestazioni, quali ad esempio le ordinate di forza dei motori e i carrelli di atterraggio, e negli stadi di compressione dei motori a turbina. Similmente, in campo automobilistico, l'utilizzo di tali materiali è sempre più diffuso, data la sempre crescente necessità di efficienza energetica degli autoveicoli. In campo navale, l'impegno di queste leghe è apprezzato, oltre che per le evidenti caratteristiche meccaniche, anche per la provata resistenza alla corrosione in ambiente marino.

Sebbene il titanio sia un materiale altamente reattivo, le leghe di titanio mostrano tipicamente un'elevata resistenza agli ambienti corrosivi, a causa della presenza di uno strato di ossido di titanio ( $\text{TiO}_2$ ) che tende a passivare l'azione dell'ambiente esterno [1]. Tuttavia, l'influsso di azioni meccaniche o abrasive può rimuovere questo strato superficiale, generando un'interazione diretta fra la lega di titanio e l'ambiente esterno, portando alla comparsa di fenomeni rilevanti di tensocorrosione in ambiente acquoso [2]. Tale interazione è generata anche dalla presenza di discontinuità superficiali, quali cricche, danneggiamenti e intagli, che rompono la continuità dello strato passivante di ossido, generando anche in questo caso suscettività alla tensocorrosione in acqua [2,3].

Questa dinamica è stata riscontrata anche in ambienti diversi dall'acqua, evidenziando in particolare un'elevata sensibilità delle leghe di titanio alla tensocorrosione in metanolo puro, qualora siano presenti sforzi applicati e vi sia presenza di cricche o intagli, come osservato nel cedimento di serbatoi di metanolo utilizzati in campo aerospaziale [4]. L'aggiunta di acqua in soluzione con il metanolo sembra tuttavia inibire questi effetti, permettendo la nuova formazione di ossidi che passivano l'effetto tensocorrosivo del metanolo su questa e altre leghe di titanio, come è stato osservato sulla lega Ti-6Al-4V [5,6].

Recenti esperimenti sul comportamento a fatica di provini leggermente intagliati ( $K_t = 1.18$ ) in lega Ti-6Al-4V, immersi in soluzione a varie concentrazioni di metanolo, hanno tuttavia dimostrato che, in presenza di sforzi applicati dinamici ( $R = 0.1$ ), l'effetto della corrosione risulta essere notevole anche per quantità molto elevate di acqua in soluzione [7]. Si riscontra inoltre una correlazione evidente fra la concentrazione di metanolo e il  $\sigma_{max}$  di rottura. Tale marcata sensibilità delle leghe di titanio esposte a miscele di acqua e metanolo può dare luogo a problemi di sicurezza in campo aeronautico, dal momento che l'iniezione di tali miscele nello stadio di compressione dei motori a turbina è utilizzata per recuperare le prestazioni in condizioni di bassa densità dell'aria esterna [8]. Tali problematiche si possono estendere ad altri elementi strutturali in lega di titanio, in caso di perdite, considerando che la maggior parte dei componenti aeronautici è continuamente sollecitata a fatica, per i gravosi e ripetuti carichi dinamici a cui i velivoli sono tipicamente sottoposti.

I pochi risultati sperimentali relativi allo studio di leghe di titanio in soluzione di acqua e metanolo, presentati in [5], e relativi al comportamento di provini piegati ad U, o alla variazione dell'allungamento percentuale durante prove di trazione, non consentono di quantificare, a livello progettuale, l'effettivo margine di sicurezza per la progettazione di componenti in Ti-6Al-4V che potrebbero essere esposti a questa particolare aggressione chimica.

L'obiettivo del presente lavoro è quindi quello di quantificare il contributo del processo di tensocorrosione per carichi meccanici quasi-statici, in termini di riduzione di sforzo massimo  $\sigma_{max}$ . I risultati ottenuti nel presente lavoro saranno poi confrontati con la riduzione dello sforzo massimo applicato  $\sigma_{max}$  ottenuto dalle prove di corrosione a fatica presentate in [7].

## 2. PROCEDURE SPERIMENTALI

Le prove quasi-statiche, in differenti concentrazioni di metanolo, sono state svolte presso il laboratorio di Meccanica Strutturale dell'Università di Bergamo su provini leggermente intagliati in lega Ti-6Al-4V, sfruttando la geometria riportata in [7] (Figura 1).

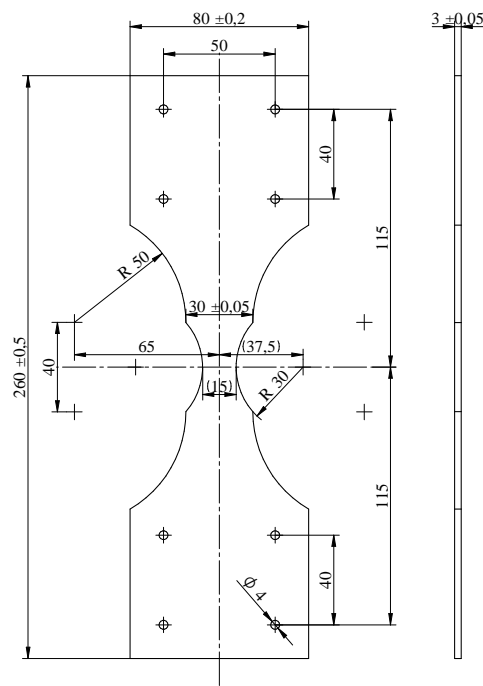


Figura 1: geometria dei provini per le prove quasi-statiche.

La composizione chimica del materiale utilizzato per i provini è riportata in Tabella 1.

Tabella 1: Composizione Ti-6Al-4V

Al	V	Fe	O	C	Ti
5.97	4.07	0.20	0.1885	0.03	Bal.

Le caratteristiche meccaniche del materiale, misurate prima del trattamento di invecchiamento lungo la direzione trasversale alla direzione di laminatura e coincidente con l'asse di applicazione del carico, sono risultate essere  $R_m = 1'100 \text{ MPa}$ ,  $R_{p02} = 1'050 \text{ MPa}$ ,  $E = 110'000 \text{ MPa}$ . Il materiale è stato poi solubilizzato a  $925^\circ\text{C}$  per 1 h, e ricotto a vuoto a  $700^\circ\text{C}$  per 2 h. Dopo le lavorazioni meccaniche, è stato predisposto un trattamento di normalizzazione.

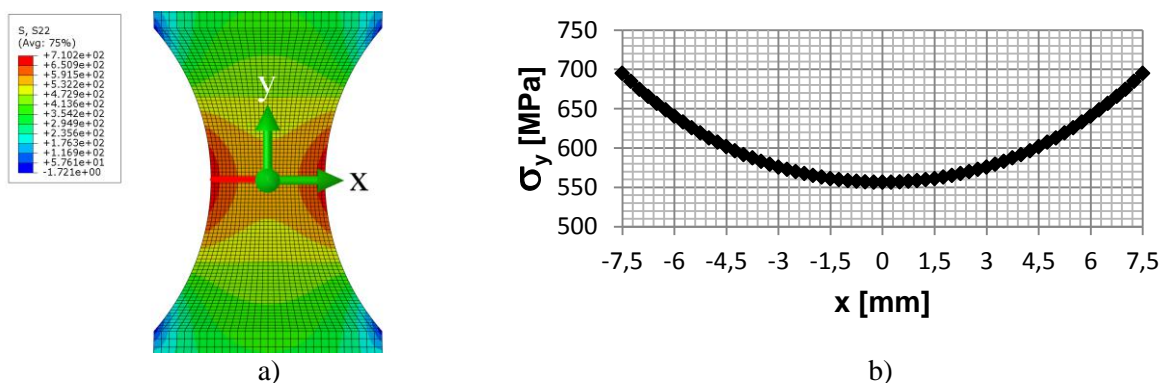


Figura 2: Simulazione con elementi Plane Stress del provino per la determinazione del coefficiente d'intaglio  $K_t = 1.18$ . a) Andamento di  $\sigma_y$  nella zona di gola, b) grafico di  $\sigma_y$  nei nodi di mezzzeria della gola (in rosso in Figura 3a).

Il coefficiente di intaglio dei provini è stato verificato mediante un modello FEM ricavato con elementi quadrangolari Plane-Stress con funzioni di forma quadratiche, atti a simulare una condizione di sforzo piano quale quella della prova di trazione. Il coefficiente di intaglio  $K_t$  è stato ottenuto

dividendo il massimo sforzo nodale  $\sigma_y$  ricavato nella sezione di gola per lo sforzo nominale  $\sigma_{nom}$ , ottenuto come rapporto fra la forza applicata e l'area di gola del provino, pari a  $45 \text{ mm}^2$ , ed è risultato essere pari a  $K_t = 1.18$ .

I provini sono stati attrezzati con un opportuno sistema di contenimento del metanolo, formato da un involucro in polipropilene non rigido, in modo da non modificare l'andamento degli sforzi nell'area di gola, fissato direttamente al provino mediante l'uso di mastice idraulico e nastro in PVC. La prova di trazione quasi statica è stata condotta su di un sistema a barre filettate, dotato di particolari afferraggi a cerniera, studiati in modo da ridurre al minimo le azioni di flessione indotte da eventuali disallineamenti. Il carico è stato misurato mediante cella di carico estensimetrica a ponte intero, verificata mediante comparazione con una cella di riferimento opportunamente tarata. L'errore massimo di misura nel campo utile di prova (20-50 kN) è risultato inferiore all'1%.

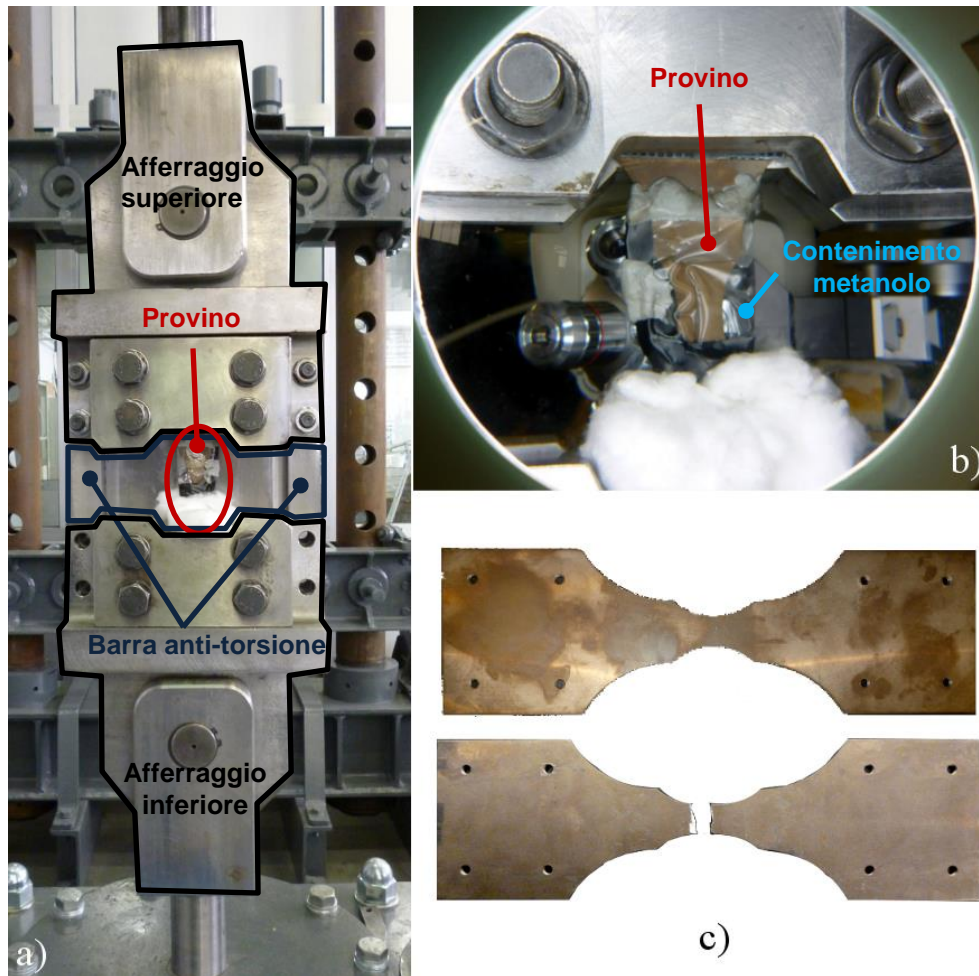


Figura 3: Setup di prova: a) Afferraggi a cerniera per la riduzione delle coppie parassite, con provino montato e sistema anti-torsione in posizione. b) Particolare del sistema di contenimento del metanolo durante una prova di carico (flangia anti-torsione rimossa). c) Provino testato in concentrazione di metanolo al 50%, prima della prova e dopo la rottura.

Le differenti soluzioni sono state preparate mescolando metanolo ( $\text{CH}_3\text{OH}$ , purezza  $\geq 99,8\%$ ) e acqua distillata, a seconda della concentrazione desiderata. Si sono testate le seguenti concentrazioni in volume di metanolo: 0%, 50%, 85%,  $\geq 99,8\%$ .

Le prove sono state condotte a partire da uno sforzo iniziale pari al 50% dello sforzo di snervamento del materiale, mantenendo il carico costante per 1 ora; se non si verifica alcuna rottura, il carico viene aumentato di un valore  $\Delta\sigma$ , nominalmente pari a 5 MPa, agendo su un sistema filettato a passo fine, mediante il serraggio di uno dei dadi di ancoraggio. Tale procedura viene ripetuta fino alla rottura del campione. La ricostruzione della curva di carico per la prova in soluzione a 85% di metanolo è riportata in Figura 4.

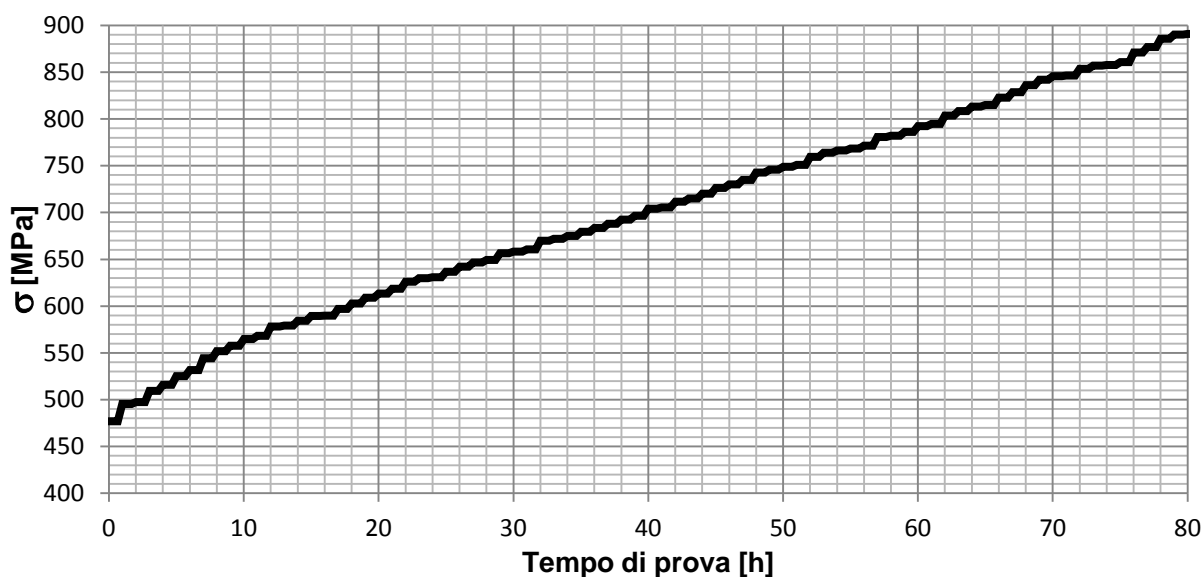


Figura 4: Curva di carico per la prova effettuata in soluzione di metanolo all'85%.

Durante l'incremento del carico, un'apposita flangia anti-torsione è stata montata sugli afferraggi, per evitare carichi indesiderati sul provino, per poi essere rimossa in prova. Per stimare la velocità di deformazione media  $\dot{\epsilon}_{media}$  durante tale fase, è stata utilizzata la formula seguente:

$$\dot{\epsilon}_{media} = \frac{\Delta\sigma}{E\Delta t} \quad [1/s]$$

dove  $\Delta\sigma$  è il valore dell'incremento di carico applicato fra uno step di prova e il successivo,  $E$  è il modulo elastico della lega Ti-6Al-4V,  $\Delta t$  il tempo di applicazione del carico fissato per tutte le prove a 10 minuti. Il valore nominale stimato è pari a  $\dot{\epsilon}_{media} = 7,58 \cdot 10^{-8}$  [1/s]. Si può dunque ipotizzare che durante la variazione del carico fra uno step e il successivo non si abbiano effetti dinamici apprezzabili sul provino tali da influenzare il comportamento a tensocorrosione della lega. Durante le pause del test, il provino è stato regolarmente scaricato e la soluzione di metanolo rimossa dall'area di gola, in modo da non influenzare i risultati delle prove con gli effetti della corrosione statica a sforzo nullo.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1. Prove quasi-statiche e confronto con le prove di fatica

In Figura 5 sono presentati i valori nominali di rottura  $\sigma_{max}$  ricavati nella presente campagna di prove, in funzione della concentrazione di metanolo in soluzione. Per confrontare l'andamento della tensocorrosione per un carico quasi-statico con l'effetto della corrosione a fatica, sono stati riportati in Figura 6 i valori di sforzo massimo di rottura a fatica  $\sigma_{max}$  ( $R = 0.1$ ), ottenuti dalla campagna di prove presentata in [7].

Dal confronto con le prove a fatica si nota immediatamente che il contributo chimico di tensocorrosione per concentrazioni di metanolo non elevate risulta notevolmente ridotto nelle prove quasi-statiche, mentre per una sollecitazione a fatica si ha una diminuzione di resistenza dovuta alla presenza di metanolo fin dalle basse concentrazioni. Le prove a fatica mostrano infatti una marcata riduzione di resistenza a una concentrazione di 5%, alla quale corrisponde una perdita pari al 24,2% in termini di  $\sigma_{max}$ , fino ad arrivare ad una riduzione del 56% per una soluzione al 95% di metanolo.

L'effetto chimico di tensocorrosione in condizioni di carico quasi-statiche sembra comparire invece solo per soluzioni molto aggressive, per percentuali di  $CH_3OH$  superiori all'85%, e con una riduzione finale della resistenza meno marcata, pari a -24% in metanolo puro ( $\geq 99,8\%$ ).

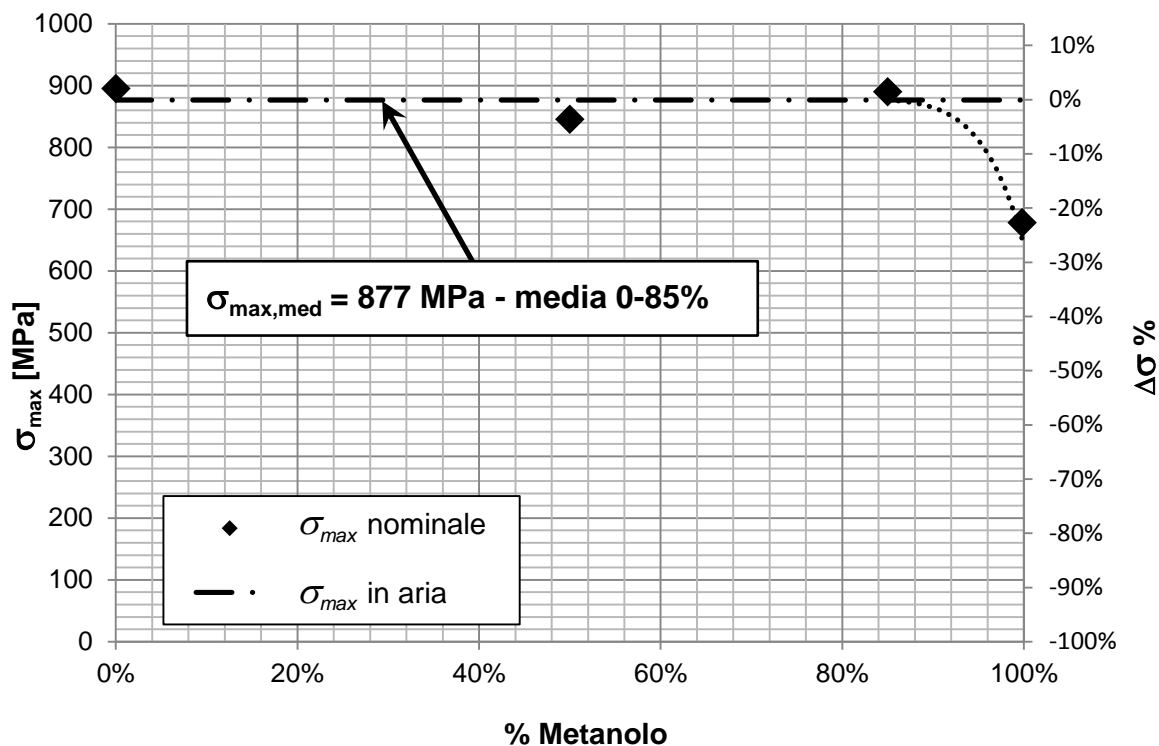


Figura 5: Sforzo nominale di rottura  $\sigma_{max}$ , ottenuto come rapporto fra il carico applicato e l'area nominale del provino ( $45 \text{ mm}^2$ ), in funzione della concentrazione di metanolo in soluzione,  $K_T = 1.18$ . Il valore della curva  $\sigma_{max,med}$  è calcolato mediando i valori di  $\sigma_{max}$  fino all'85% di metanolo.

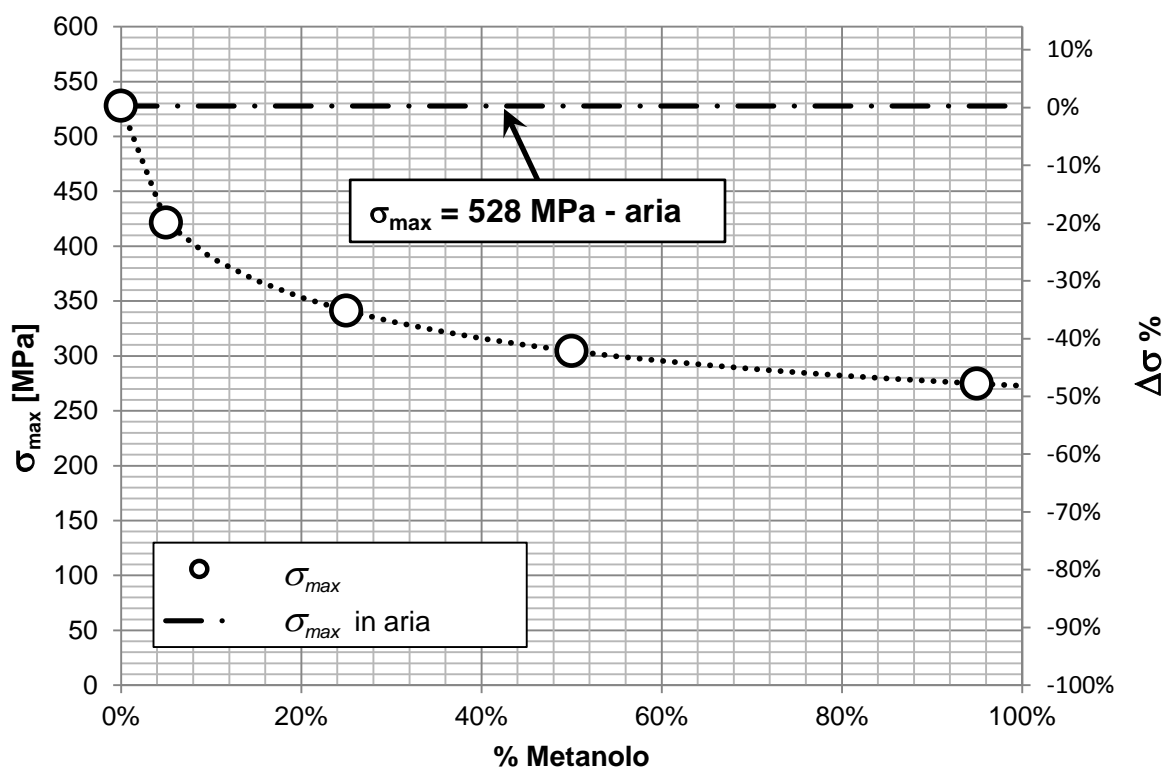


Figura 6: Sforzo di rottura massimo applicato a fatica  $\sigma_{max}$ , ottenuto da prove a carico pulsante assiale ( $R=0.1$ ), in funzione della concentrazione di metanolo in soluzione,  $K_t = 1.18$ , da [7].

Una spiegazione di questo fenomeno risiede nella probabile maggior efficacia dello strato protettivo di  $\text{TiO}_2$  sotto condizioni di carico quasi-statiche. L'effetto protettivo dell'ossido di titanio sulla superficie della lega Ti-6Al-4V può essere compromesso dalla presenza di azioni meccaniche e da forti discontinuità superficiali quali la formazione di cricche [1-5]. Possiamo quindi supporre che nelle prove di fatica l'azione di carico dinamica e la formazione di cricche a livelli di sforzo più bassi siano in grado di generare una rottura meccanica dello strato di  $\text{TiO}_2$ . Una volta rimossa la protezione dell'ossido di titanio e generate meccanicamente le cricche di fatica, si può avere corrosione in fessura, che sembra impedire la nuova formazione di ossido sui bordi delle cricche anche per basse concentrazioni di metanolo.

Per quanto riguarda la rottura statica, lo strato di ossido tende invece a rimanere intatto, a causa della staticità del carico e dell'assenza di cricche fino a valori prossimi a quello di rottura, garantendo così la protezione della lega per concentrazioni di metanolo più alte rispetto al caso a fatica. A livelli di concentrazione molto elevati – nel nostro caso superiori all'85% – l'azione aggressiva del metanolo è in grado di intaccare la lega Ti-6Al-4V anche senza effetti meccanici di danneggiamento dello strato superficiale di  $\text{TiO}_2$ .

In letteratura, risultati simili sono stati trovati in [5], dove è analizzato il comportamento di provini di Ti-6Al-4V immersi in una soluzione di metanolo, acqua e una leggera percentuale di acido cloridrico (0,166%), sottoposti ad una prova di trazione ( $\dot{\epsilon} = 1,9 \cdot 10^{-4}$  [1/s] – velocità costante di applicazione della deformazione). Gli Autori hanno notato una brusca diminuzione dell'allungamento percentuale dei provini per una soluzione con concentrazione di metanolo superiore al 99%.

Sempre in [5] sono presentati risultati relativi al tempo di rottura di provini piegati ad U di Ti-6Al-4V, immersi in una soluzione di acqua, acido cloridrico e metanolo. Tali dati mostrano una decisa riduzione del tempo di rottura per percentuali di metanolo fra il 99% e il 99,6%, salvo poi mostrare un ripristino del tempo di rottura a valori tipici di concentrazioni più basse in caso di presenza di metanolo purissimo. In Figura 7 è riportato l'andamento di tali dati sperimentali in funzione della percentuale di acqua in soluzione.

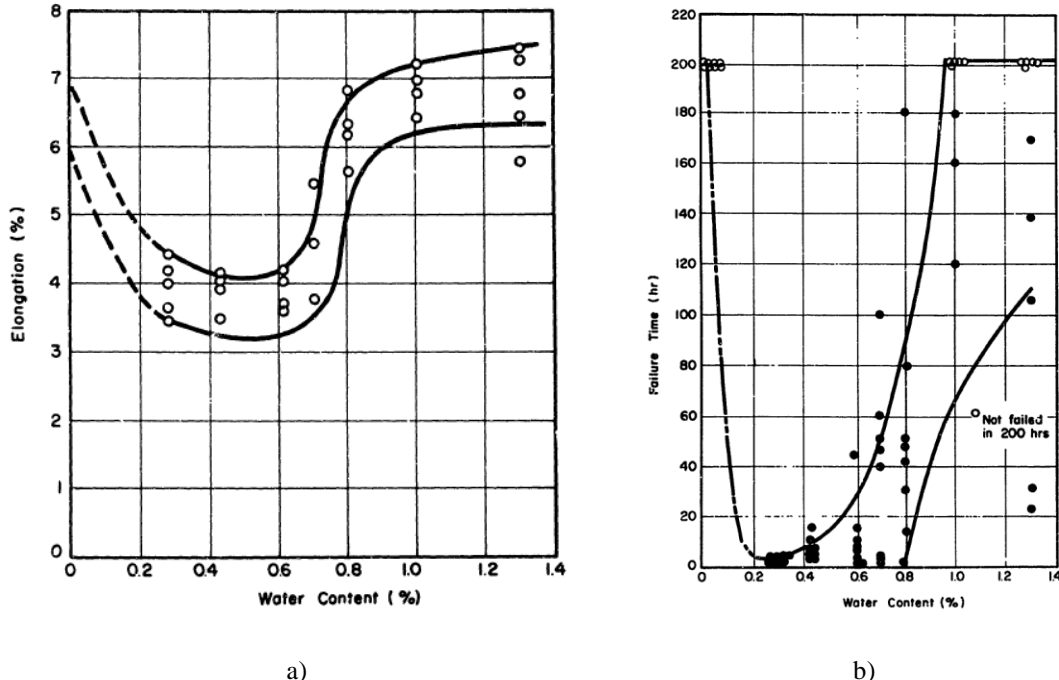


Figura 7: a) Allungamento percentuale in funzione della concentrazione di  $\text{H}_2\text{O}$ , in una soluzione contenente 0.166% di HCl e metanolo per la restante parte. Prova di trazione ( $\dot{\epsilon} = 1,9 \cdot 10^{-4}$  [1/s]) su provini in Ti-6Al-4V; b) Tempo di rottura in funzione della concentrazione di  $\text{H}_2\text{O}$ , in una soluzione contenente 0.166% di HCl e metanolo per la restante parte, su provini piegati a U in Ti-6Al-4V, da [5].



Quest'ultima considerazione appare in controtendenza con quanto ottenuto nelle prove sperimentali del presente lavoro, dove l'impiego di una soluzione con contenuto di  $\text{CH}_3\text{OH}$  di purezza pari a  $\geq 99,8\%$  ha mostrato la maggior riduzione di resistenza rispetto alle altre prove. Dato che il recupero delle caratteristiche di allungamento in [5] avviene per intervalli di concentrazione di metanolo estremamente ridotti – da 99,6% a 99,85% – la purezza della soluzione utilizzata per le prove di trazione quasi-statica del presente articolo, non nota con così elevata precisione, non consente di verificare questo comportamento.

I risultati di [5] mostrano in ogni caso la presenza di un effetto di tensocorrosione della lega Ti-6Al4V dovuto alla presenza di alte concentrazioni di metanolo.

### 3.2. Osservazioni al SEM

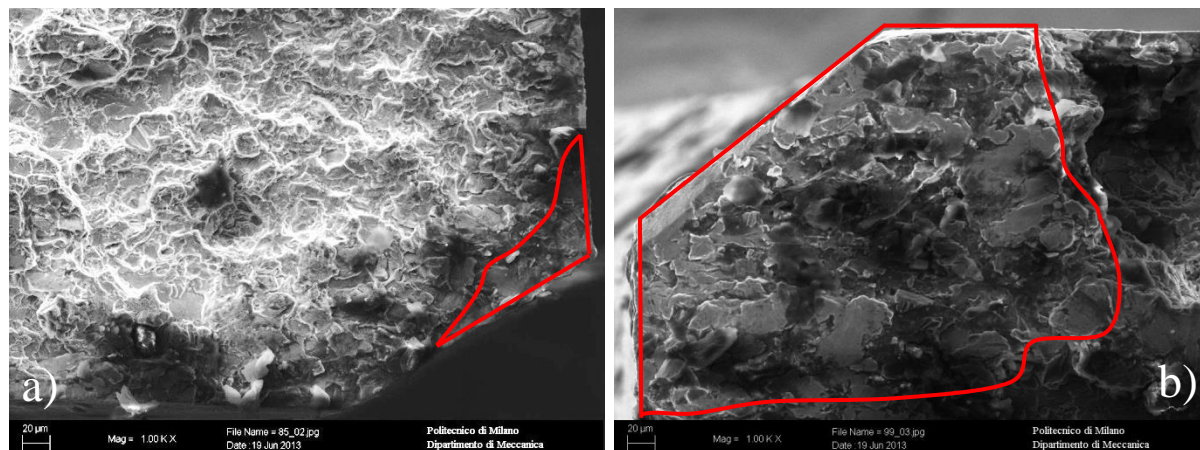


Figura 8: Scansione SEM della zona di innesco – 1000x – con indicazione dell'area corrosa dalla soluzione acqua-metanolo (in rosso) all'aumentare della concentrazione di metanolo – a) area corrosa all' 85% di metanolo, b) area corrosa per metanolo puro ( $\geq 99,8\%$ ).

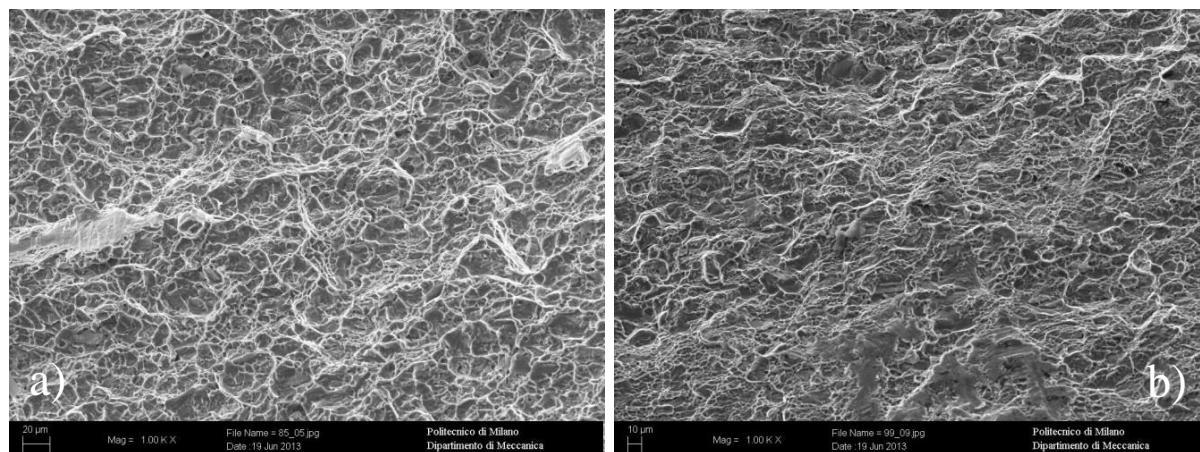


Figura 9: Scansione SEM delle superfici di frattura lontano dalla zona di innesco – 1000x – a) campione immerso in metanolo all'85%, b) campione immerso in metanolo puro ( $\geq 99,8\%$ ).

Per valutare il contributo della miscela acqua - metanolo nella dinamica di rottura dei provini in lega Ti-6Al-4V, è stata condotta un'analisi delle superfici di frattura mediante microscopia elettronica, realizzata presso il laboratorio CLASD del Politecnico di Milano. In prossimità dell'innesco finale della cricca è stata individuata un'area dove l'effetto diretto della corrosione della miscela appare evidente per il campione immerso in metanolo puro ( $\geq 99,8\%$ ). L'area corrosa risulta invece minima nella zona di innesco relativa alla prova all'85% di  $\text{CH}_3\text{OH}$ , e completamente assente a concentrazioni inferiori. Il confronto fra le due regioni è riportato in Figura 8. Questa osservazione si accorda con l'andamento dei carichi di rottura che mostrano un brusco calo in corrispondenza del test in ambiente contenente la massima concentrazione di metanolo. Lontano dalle zone di innesco la rottura è molto



simile indipendentemente dalla concentrazione, e di carattere prevalentemente duttile, come mostrato in Figura 9.

#### 4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato dunque analizzato il comportamento a tensocorrosione della lega Ti-6Al-4V in soluzione di acqua e metanolo a varie concentrazioni, in condizioni di carico quasi statiche. I risultati ottenuti sono stati confrontati con il comportamento a fatica di provini a pari  $K_t$  dello stesso materiale nel medesimo ambiente corrosivo, al variare della concentrazione di CH<sub>3</sub>OH. Per approfondire lo studio degli effetti tensocorrosivi al variare della concentrazione di metanolo, sono state effettuate osservazioni delle superfici di frattura mediante microscopia elettronica. Riassumendo dunque i risultati della presente campagna di prove, possiamo affermare che:

- Il contributo chimico di tensocorrosione del metanolo su un provino intagliato ( $K_t = 1.18$ ) in lega Ti-6Al-4V sottoposto a carico statico risulta essere attivo solo per alte concentrazioni dell'agente corrosivo in acqua. Per concentrazioni in volume di metanolo fino a 85% non si sono avute significative riduzioni dello sforzo di rottura  $\sigma_{max}$  dei provini. La massima riduzione della resistenza per metanolo a concentrazione superiore a 99,8% è risultata pari al 24%.
- Il confronto dei risultati ottenuti nel presente lavoro con i dati ricavati da uno studio del comportamento a fatica ( $R=0.1$ ) di provini intagliati in Ti-6Al-4V con uguale  $K_t$  ha evidenziato un comportamento dinamico differente rispetto al caso statico, mostrando una marcata influenza della corrosione a fatica a partire da basse concentrazioni di metanolo ( - 24%  $\sigma_{max}$  a 5% di volume di CH<sub>3</sub>OH, -55,8% a 95%).
- In base a queste considerazioni, si può supporre che, durante una sollecitazione assiale pulsante, l'effetto chimico sia maggiormente influente a causa della rimozione dello strato protettivo di TiO<sub>2</sub>, dovuta all'azione meccanica e alla prematura comparsa di cricche, che portano alla presenza di corrosione in fessura. In condizioni di carico quasi-statiche si ha probabilmente un minor danneggiamento dello strato di ossido, che risulta dunque in grado di resistere all'azione di aggressione esercitata dalla miscela di acqua e metanolo fino a concentrazioni di CH<sub>3</sub>OH pari all'85%.
- La variazione del carico a rottura per prove quasi-statiche, comparata con il carico massimo per prove a fatica in funzione della concentrazione di metanolo, ha permesso di quantificare la riduzione di sforzo dovuta agli effetti chimici nei due casi. Tale informazione è preziosa per la progettazione di componenti strutturali in lega Ti-6Al-4V in presenza di metanolo, e definisce un riferimento utile a seconda che il componente sia realizzato per lavorare in campo dinamico o quasi-statico.
- L'indagine delle superfici di frattura mediante microscopia elettronica ha rivelato un attacco corrosivo della superficie dei campioni testati nella soluzione contenente il 99,8% di metanolo. Tale aggressione chimica ha determinato l'innescio prematuro di un difetto che ha poi portato alla rottura finale con carichi decisamente inferiori a quelli riscontrati a concentrazioni di metanolo più basse.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Aladjem, "Anodic oxidation of titanium and its alloys", *Journal of Materials Science*, 8, 688–704 (1973).
- [2] A.L. Pilchak, A.H. Young c, J.C. Williams, "Stress corrosion cracking facet crystallography of Ti-8Al-1Mo-1V", *Corrosion Science*, 52, 3287–3296 (2010).
- [3] B.F. Brown, *Stress Corrosion Cracking in High Strength Steels and in Titanium and Aluminum Alloys*, Naval Research Lab, Washington, DC, 6–7 and 278–301 (1972).
- [4] R. L. Johnston, R. E. Johnson, G. M. Ecord and W. C. Castner, NASA Technical Note, D-3868 (1967).

- [5] C.M. Chen, H.B. Kirkpatrick, H.L. Gegel, “Stress Corrosion Cracking of Titanium Alloys in Methanolic and Other Media”, Technical rept. Apr 1969-Sep 1970, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, p. 66 (1972).
- [6] S.P. Trasatti, E. Sivieri, “Corrosion behaviour of titanium in non-aqueous solvents”, *Materials Chemistry and Physics*, 92, 475–479 (2005).
- [7] S. Baragetti, “Corrosion fatigue behaviour of Ti-6Al-4V in methanol environment”, *Surface and Interface Analysis*, published online (2013).
- [8] C. Soares, *Gas Turbines: A Handbook of Air, Land and Sea Applications*, Elsevier, (2008).