

# Influenza delle caratteristiche dello strato nanoporoso di allumina sul comportamento tribologico della lega di alluminio EN AW-6082 trattata secondo un innovativo processo di ossidazione anodica

E. Baroni, A. Fortini, C. Soffritti, M. Merlin, G. L. Garagnani

Il presente lavoro riguarda la caratterizzazione tribologica di una lega di alluminio da deformazione plastica EN AW-6082 trattata secondo un innovativo processo di ossidazione anodica in cui i nanopori dello strato di ossido anodico sono stati sigillati con ioni  $Ag^+$  (tecnologia G.H.A.®). I test tribologici, eseguiti in condizioni non lubrificate, sono stati condotti in configurazione ball-on-disk (normativa ASTM G99). Il disco, realizzato nella lega di alluminio scelta, è stato trattato G.H.A.® e sottoposto ad un processo di fissaggio a caldo con ioni  $Ag^+$ . I pin sferici, utilizzati come antagonista e anch'essi realizzati in lega EN AW-6082, sono stati trattati secondo processo G.H.A.® ma utilizzando n. 3 diverse condizioni sia di ossidazione anodica sia di sigillatura a caldo finale. Campioni trattati secondo un tradizionale processo di ossidazione anodica sono stati considerati come riferimento per il confronto delle proprietà tribologiche. In una prima fase dell'attività si è valutato l'effetto di una lucidatura meccanica sul comportamento tribologico in test condotti secondo le condizioni previste dalla normativa ASTM G99. Successivamente, le prove tribologiche hanno previsto due differenti velocità lineari pari a 0.05 e 0.10 m/s ed un carico di 5 N per confrontare coefficienti di attrito (COF) e tassi di usura specifici (WR). Sono state eseguite tre repliche per tutte le differenti condizioni considerate. I risultati hanno consentito di mettere in evidenza una sostanziale dipendenza del COF e della durabilità superficiale dalla velocità di strisciamento per i diversi accoppiamenti studiati.

**PAROLE CHIAVE:** LEGA DI ALLUMINIO, OSSIDAZIONE ANODICA, USURA, BALL-ON-DISK, MICROSTRUTTURA

## INTRODUZIONE

Le leghe di alluminio stanno assumendo un ruolo progressivamente sempre più importante in svariati settori grazie ad una serie di vantaggi che le contraddistinguono come la resistenza meccanica specifica, le elevate conduttività termica ed elettrica, la buona formabilità e la propensione al riciclo [1]. Le principali limitazioni al loro utilizzo sono rappresentate da scarsa resistenza a fenomeni di corrosione intensa e all'usura. Una delle soluzioni più comuni e in grado di garantire un miglioramento netto di queste ultime caratteristiche, è senza dubbio quella dei trattamenti di ossidazione anodica grazie ai quali viene promossa, a partire dall'immersione del componente in un bagno elettrolitico dalla composizio-

E. Baroni, A. Fortini, C. Soffritti, M. Merlin,  
G. L. Garagnani

Dipartimento di Ingegneria (DE), Università di Ferrara  
enrico.baroni@unife.it

ne chimica opportunamente definita, la formazione di uno strato di ossido anodico [2,3]. Tale strato, formato principalmente da  $\alpha$ -allumina ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) amorfa, è caratterizzato da un primo strato barriera, a diretto contatto con il metallo base, e da uno strato nanoporoso più esterno [4,5]. Diversi studi presenti in letteratura hanno consentito di mettere in evidenza come la morfologia e le proprietà meccaniche dello strato nanoporoso siano notevolmente influenzate dai parametri di processo, in modo particolare la composizione chimica dell'elettrolita utilizzato oltre che la differenza di potenziale e la densità di corrente del circuito elettrico alla base della cella elettrolitica [6-8]. La naturale propensione della struttura nanoporosa a fungere da naturale riserva di lubrificante ha permesso di mettere in luce come il rilascio del lubrificante nel corso delle prove di usura sia in grado di migliorare significativamente il comportamento tribologico delle leghe così trattate [9]. In quest'ottica, risulta di particolare interesse scientifico un trattamento noto come Golden Hard Anodizing (G.H.A.®), caratterizzato da un particolare procedimento di sigillatura per cui, grazie all'aggiunta di sali di argento contestualmente al processo di sigillatura a caldo, si promuove la sigillatura dello strato nanoporoso mediante ioni Ag<sup>+</sup>. In questo modo, le superfici trattate beneficiano dell'effetto combinato autolubrificante ed antibatterico degli stessi ioni Ag<sup>+</sup>, anche se sino ad oggi sono pochi i documenti presenti in letteratura in cui si è investigato nel dettaglio la resistenza ad attrito e usura di tali rivestimenti [3,10,11]. L'influenza delle caratteristiche geometriche dello strato nanoporoso sul comportamento tribologico di leghe di alluminio anodizzate è stata indagata in prove di usura con carichi inferiori a 1 N, mostrando come un aumento del carico implichi una diminuzione del COF per via della formazione di un tribolayer sulla superficie di contatto [12]. Guezmil et al. [13] hanno infine indagato il comportamento tribologico di strati anodizzati a diverse combinazioni di carichi di bassa entità e velocità di strisciamento, utilizzando acciaio 100Cr6 come controparte. Ciò che in letteratura è al momento difficile trovare è un'analisi dell'influenza della velocità di strisciamento per carichi normali di media entità (5-10 N) e su campioni in lega di alluminio anodizzata accoppiata con controparte della medesima natura.

Lo scopo del presente studio è pertanto l'indagine dell'influenza della velocità di strisciamento sul comportamento tribologico di lega di alluminio EN AW-6082, anodizzata utilizzando n. 3 trattamenti G.H.A.® caratterizzati da differenti parametri di processo di anodizzazione ed n. 1 ossidazione anodica convenzionale, accoppiati ad una controparte costituita dalla stessa lega base e trattata secondo il medesimo processo. In particolare, il duplice obiettivo è quello di valutare in una prima fase l'influenza di una lucidatura antecedente il trattamento di ossidazione anodica e mettere successivamente in evidenza eventuali differenze in termini di andamento del coefficiente di attrito (COF) nel tempo e poter confrontare i tassi di usura specifici (WR).

## MATERIALI E METODI

L'analisi del comportamento tribologico ha previsto l'impiego della lega di alluminio da deformazione plastica EN AW-6082, sottoposta a trattamento di ossidazione anodica. Nello specifico, pin a testa sferica di diametro pari a 10 mm sono stati sottoposti a n. 4 diversi trattamenti di ossidazione anodica. Alcuni pin sono stati sottoposti al processo brevettato con il nome di Golden Hard Anodizing (G.H.A.®) e diversificati per parametri di processo non rivelabili in quanto coperti da vincolo di riservatezza, ma che si differenziano per spessore finale dello strato di ossido anodico e per la eventuale sigillatura finale. Nel corso del presente lavoro tali trattamenti verranno denominati con le sigle G1, G2 e G3. Infine, un quarto classico trattamento di ossidazione anodica (OA) è stato considerato come riferimento per poter confrontare il comportamento tribologico dei diversi trattamenti innovativi considerati. Contestualmente, dischi aventi diametro pari a 75 mm e spessore pari a 3 mm, realizzati nella medesima lega di alluminio EN AW-6082, sono stati trattati secondo un processo G.H.A.® secondo gli stessi parametri di processo dei pin G1. Al fine di valutare un'eventuale influenza di operazioni preliminari di pulizia del substrato in lega di alluminio, parte dei dischi sono stati sottoposti ad una preliminare procedura di lucidatura meccanica delle superfici, che sono state poi successivamente anodizzate. I dischi lucidati e non lucidati verranno rispettivamente identificati dalle sigle G1\_L e G1\_NL. La caratterizzazione

preliminare dei trattamenti eseguiti ha previsto la valutazione di durezza, spessore e rugosità superficiale degli strati anodici realizzati sui componenti utilizzati per la campagna sperimentale. Microdurezze e spessori degli strati anodici sono stati determinati sulla base di misurazioni effettuate sulla sezione trasversale dei componenti a valle delle usuali operazioni di preparativa metallografica. Le prove di microdurezza sono state effettuate mediante micro-durometro Vickers Future-Tech FM-110 (Future-Tech Corp., Kawasaki, Giappone) utilizzando un carico di 10 g. Per ciascuno strato anodizzato analizzato, i valori di microdurezza e di spessore sono stati calcolati come media su n. 10 misurazioni. Mediante microscopio ottico metallografico Leica DMI8 A (Leica Microsystem, Wetzlar, Germania), dotato di software di acquisizione di immagini LAS v4.13, si sono determinati gli spessori dei diversi strati di ossido anodico. Infine, mediante profilometro 3D ottico a non contatto Talysurf CCI-Lite (Taylor Hobson, Leicester, UK) è stata inoltre valutata la rugosità di tutti i componenti coinvolti nella campagna sperimentale tribologica.

Le prove di usura sono state condotte in configurazione ball-on-disk mediante tribometro TR-20 LE (Ducom Instruments, Bengaluru, India). In una prima fase i test tribologici sono stati condotti seguendo le condizioni previste nella normativa di riferimento ASTM G99: distanza di strisciamento complessiva pari a 1000 m, velocità di strisciamento di 0.1 m/s, carico normale applicato pari a 10 N. Si è poi proceduto con l'esecuzione di prove tribologiche a

carico del disco trattato in grado di garantire una maggiore resistenza all'usura in modalità reciprocating con due diverse frequenze di inversione del moto, al fine di generare velocità di strisciamento lineari rispettivamente pari a 0.05 e 0.1 m/s. I test tribologici sono inoltre stati effettuati ad un carico normale costante pari a 5 N e regolando la durata di prova in modo da garantire la percorrenza in tutte le prove effettuate di una distanza pari a 100 m. Per ogni condizione testata sono state effettuate n. 3 repliche. Mediante il software WinDucom associato al tribometro utilizzato è stato possibile monitorare e registrare l'andamento del COF in tempo reale nel corso delle diverse prove. Per quanto riguarda l'usura dei pin utilizzati, si è calcolato il volume asportato a partire dall'estensione della traccia di usura, valutata a sua volta mediante stereomicroscopio Leica MZ6 (Leica Microsystem, Wetzlar, Germania) ad un ingrandimento di 20x ed elaborando le immagini mediante software Leica Application Suite (LAS). Ottenute le immagini allo stereomicroscopio, mediante il software di elaborazione di immagine LAS sono stati misurati i due diametri perpendicolari della traccia di usura a carico dei pin sferici. Calcolata la superficie media della traccia, si è poi calcolato il volume della calotta sferica asportata per ognuno dei pin studiati. Per le grandezze relative all'usura dei dischi, invece, si è proceduto con la valutazione dell'area trasversale delle varie piste di usura mediante profilometro ottico 3-D a non contatto, misurandola in 3 diverse zone della pista di usura. Conseguentemente, il WR è stato calcolato sia per i pin sferici sia per i dischi mediante la formula riportata in Eq. 1:

$$WR = \frac{V}{P \cdot L} \quad (1)$$

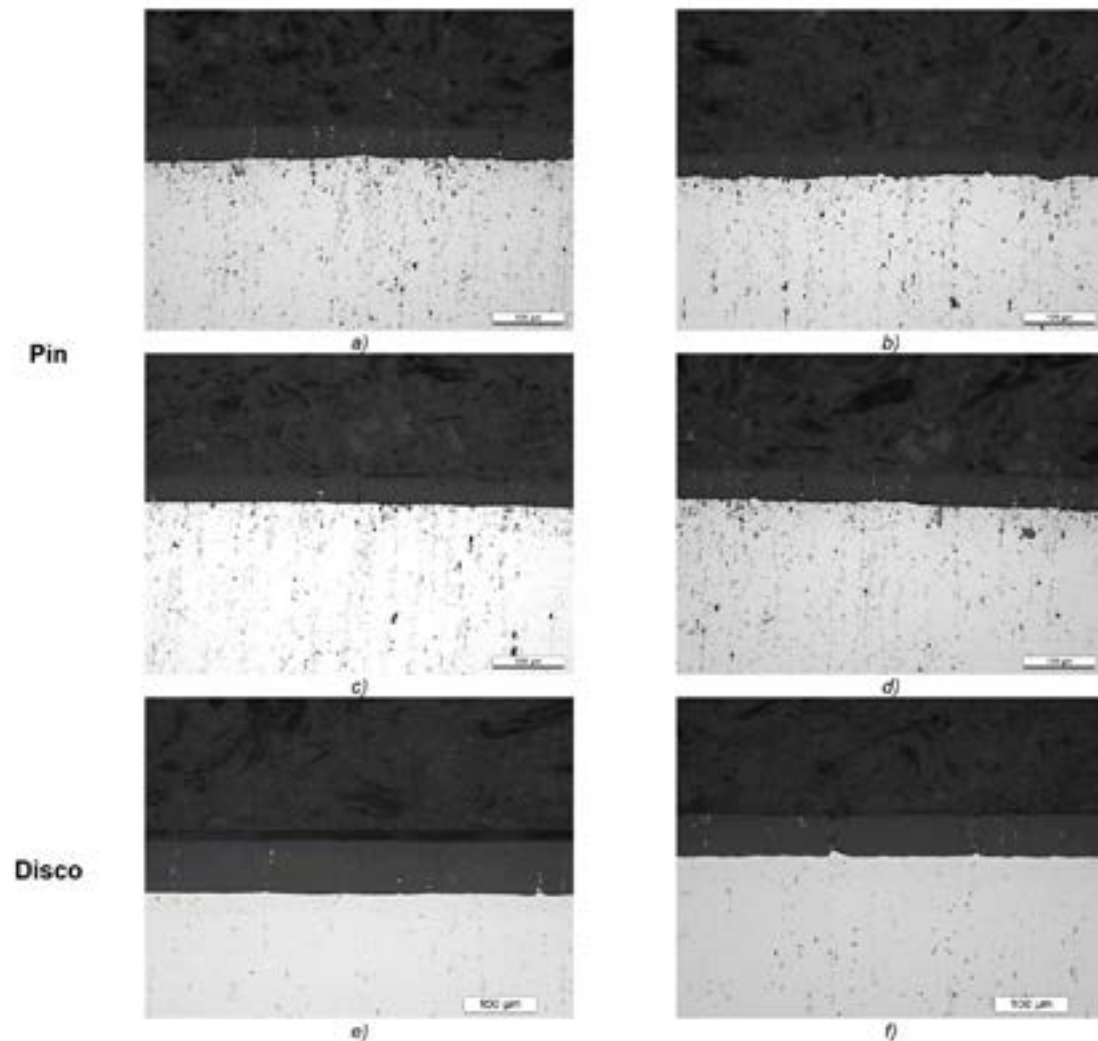
in cui V è il volume asportato (per il pin sferico è la calotta sferica asportata con superficie determinata analizzando le immagini catturate mediante stereomicroscopio, per i dischi è dato dal prodotto della sezione trasversale della pista di usura e l'estensione della pista di usura), P il carico normale applicato ed L la lunghezza totale di strisciamento per ogni test di usura.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

La caratterizzazione preliminare dei trattamenti eseguita a monte delle prove tribologiche sui dischi e sui pin ha consentito di determinare gli spessori e la microdurezza dei diversi strati anodizzati, oltre che i valori di rugosità Ra e Rz di pin e dischi utilizzati. In Fig.1 sono riportate le micrografie ottiche ottenute ad un ingrandimento di 200x dei diversi ossidi anodici realizzati ed utilizzate per la misura del loro spessore. È possibile osservare come

lo spessore vari in funzione dei diversi processi anodizzati nonostante, a livello macroscopico, non si evidenzino differenze sostanziali tra i diversi ossidi anodici. Nella loro sezione trasversale è possibile osservare gli intermetallici a base di Si e Mg che vengono inglobati nell'ossido dalla

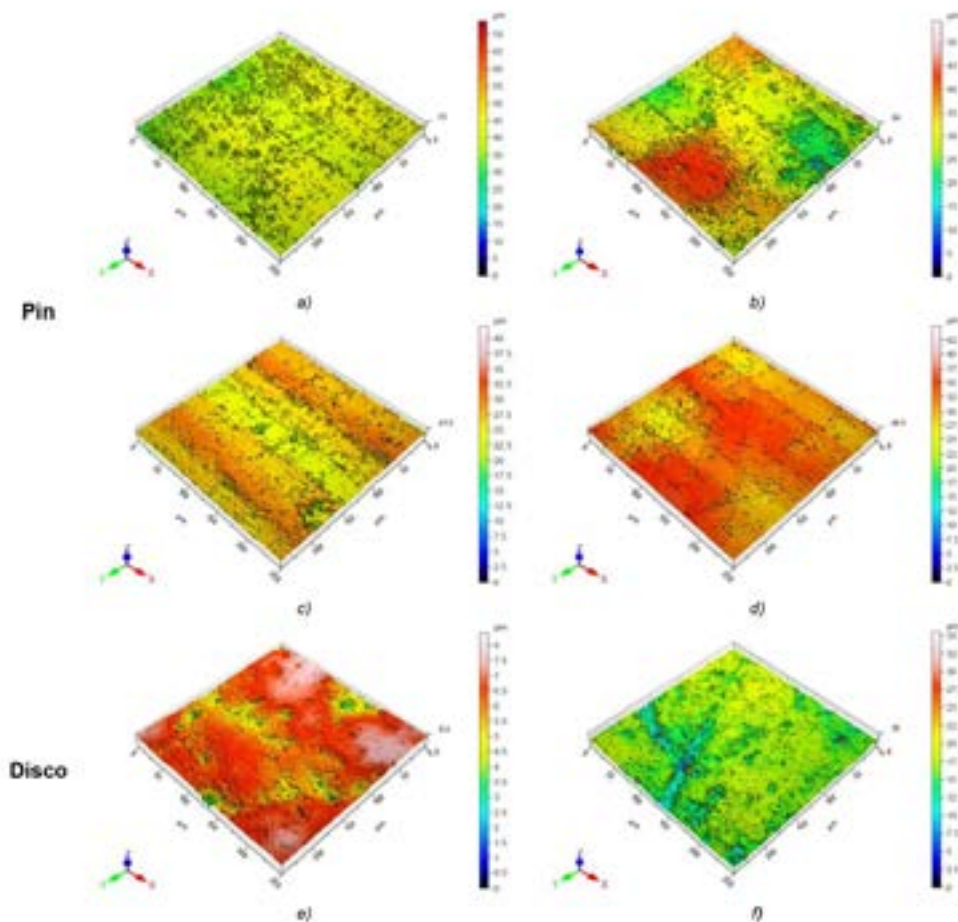
lega substrato, mentre l'Ag<sup>+</sup> non è visibile a causa delle sue ridotte dimensioni su scala ionica.



**Fig.1** - Micrografie ad ingrandimento 200x dei diversi strati anodizzati per la misura dello spessore: a) G1, b) G2, c) G3, d) OA, e) G1\_L e f) G1\_NL. / Micrographs used for thickness measurements: a) G1, b) G2, c) G3, d) OA, e) G1\_L e f) G1\_NL.

In Fig.2 sono raccolte le ricostruzioni tridimensionali delle superfici analizzate per ricavarne i valori di rugosità Ra ed Rz, indicative della topografia degli ossidi anodici ottenuti. Sfruttando la scala cromatica offerta dalla legenda è possibile constatare come i campioni G2 e G3 siano quelli contraddistinti da una maggiore irregolarità delle superfici se confrontati con i pin sferici G1 e OA. Analogamente per

i dischi studiati, il campione G1\_L sottoposto a preventiva operazione di lucidatura risulta essere quello con una topografia maggiormente omogenea. La determinazione computazionale dei parametri di rugosità Ra e Rz ha consentito di avere riscontro numerico della topografia superficiale dei campioni.



**Fig.2** - Immagini tridimensionali delle superfici di pin e dischi trattati: a) G1, b) G2, c) G3, d) OA, e) G1\_L e f) G1\_NL. / Tridimensional images of the treated surfaces of pins and disks: a) G1, b) G2, c) G3, d) OA, e) G1\_L e f) G1\_NL.

I dati acquisiti relativi alle rugosità Ra e Rz, allo spessore e alla durezza degli strati anodizzati sono raccolti in Tab. 1.

**Tab.1** - Valori di rugosità Ra e Rz, spessore e microdurezza degli strati anodici considerati. / Roughness Ra and Rz, thickness and microhardness values for the different anodized layers.

	Pin				Disco	
	G1	G2	G3	OA	G1_L	G1_NL
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	$2.23 \pm 0.06$	$2.98 \pm 0.28$	$1.92 \pm 0.09$	$1.80 \pm 0.08$	$0.53 \pm 0.01$	$1.10 \pm 0.06$
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	$24.84 \pm 1.60$	$29.05 \pm 1.61$	$30.57 \pm 1.51$	$20.65 \pm 2.66$	$4.16 \pm 0.18$	$17.42 \pm 1.99$
Spessore [ $\mu\text{m}$ ]	$45 \pm 2$	$41 \pm 3$	$37 \pm 1$	$38 \pm 1$	$72 \pm 1$	$57 \pm 1$
HV0.01 [#]	$487 \pm 30$	$480 \pm 29$	$469 \pm 30$	$434 \pm 16$	$481 \pm 17$	$483 \pm 41$

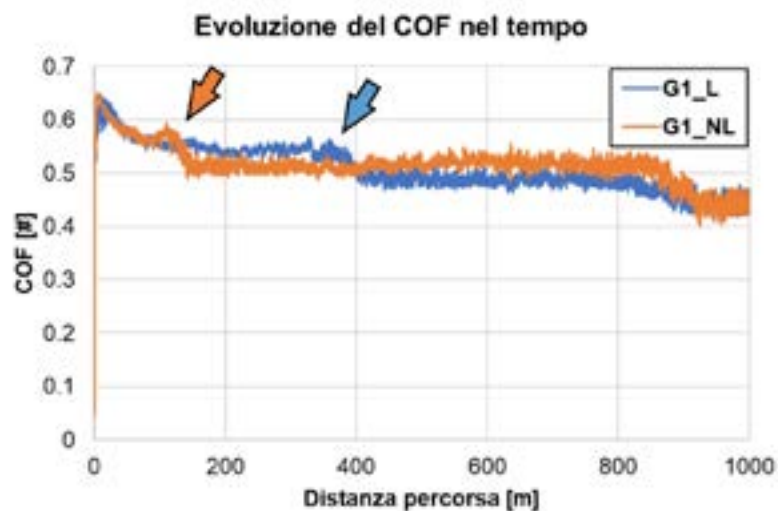
Sulla base dei risultati riportati in Tab. 1 è possibile constatare come i trattamenti G1, G2 e G3 eseguiti sui pin presentino durezza comparabili a quelle del trattamento G1\_L eseguito sul disco, a differenza del trattamento OA contraddistinto da una minor durezza. Gli spessori dei

trattamenti eseguiti sui pin sono piuttosto simili ma alquanto diversi rispetto a quello ottenuto sul disco. Pur non presentando alcuna differenza sostanziale in termini di durezza, è possibile osservare come la lucidatura meccanica eseguita sul campione G1\_L abbia favorito la

crescita di uno strato di ossido anodico più spesso e caratterizzato da una rugosità finale inferiore rispetto all'omologo campione G1\_NL. Differenza confermata anche dal valore della rugosità Rz che risulta ben quattro volte superiore per i dischi G1\_NL.

In Fig. 3 sono riportate le curve rappresentative dell'andamento del COF per ciascun accoppiamento tra i pin G1 e i dischi G1\_L e G1\_NL. Le frecce colorate presenti nel diagramma indicano il termine dello stadio stazionario caratteristico dello sfregamento tra strati anodizzati. Il grafico consente di mettere in evidenza come nel caso dell'accoppiamento G1-G1\_L il primo stato stazionario del COF, corrispondente allo sfregamento tra le due superfici anodizzate, fosse di durata maggiore al caso di

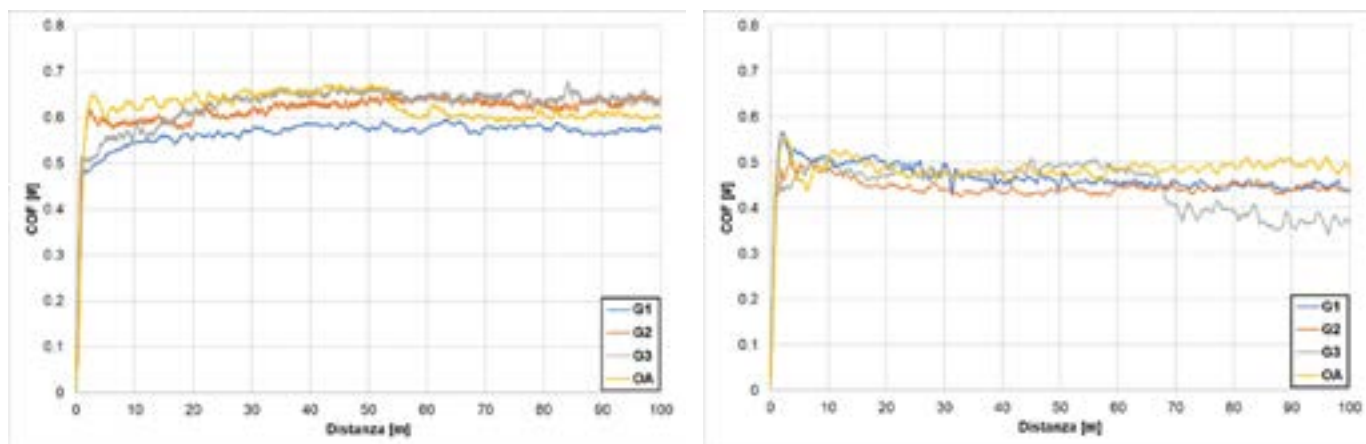
contatto G1-G1\_NL (rispettivamente la transizione nel valore di COF è visibile dopo circa 370 m e 120 m). In tale finestra le operazioni di lucidatura non hanno influenzato il comportamento tribologico in termini di COF: nel caso di contatto G1-G1\_L il COF è risultato essere pari a  $0.55 \pm 0.01$ , mentre per il contatto G1-G1\_NL pari a  $0.57 \pm 0.01$ . Dopo le transizioni indicate dalle frecce colorate, è possibile individuare due ulteriori stadi stazionari: un primo che termina dopo circa 800 m sia per G1\_L sia per G1\_NL relativo all'accoppiamento tra disco rivestito e substrato dei pin a testa sferica; un ulteriore stadio stazionario (da 900 m in poi) determinato dallo sfregamento tra i substrati scoperti dall'usura completa degli strati anodizzati.



**Fig.3** - Andamento del COF nel corso delle prove di usura in condizioni di test ASTM G99. / COF variation during wear tests performed according to ASTM G99 standard.

Data la maggiore resistenza all'usura mostrata nel primo stadio di strisciamento stazionario, si è scelto il disco G1\_L come controparte per la seconda parte dell'indagine sperimentale. In Fig. 4 sono riportate le curve rappresentative dell'andamento del COF per ciascun accoppiamento studiato nella seconda fase dell'attività, rispettivamente nel caso di velocità di strisciamento pari a 0.05 m/s (Fig. 4a) e 0.10 m/s (Fig. 4b), nelle condizioni di prova indagate. A velocità più elevate, il COF di tutti gli accoppiamenti in-

dagati risulta essere inferiore rispetto ai medesimi accoppiamenti a velocità inferiori (0.05 m/s).



**Fig.4** - Andamento del COF nel corso delle prove di usura per le due diverse velocità di strisciamento considerate: a) 0.05 m/s e b) 0.10 m/s. / COF variation during wear tests conducted at two different sliding speeds: a) 0.05 m/s and b) 0.10 m/s.

In Tab. 2 sono invece raccolti i valori del COF stazionario per ciascun tipo di campione nelle diverse configurazioni di prova. È possibile notare come il COF cambi in modo sostanziale al variare della velocità di strisciamento. Per velocità più basse, il COF supera lo 0.60 per tutte le condizioni ad eccezione del trattamento G1 caratterizzato dal valore più basso del COF e pari a  $0.58 \pm 0.01$ . Il trattamento OA è invece risultato essere quello caratterizzato dalla più elevata variabilità con una deviazione standard pari a

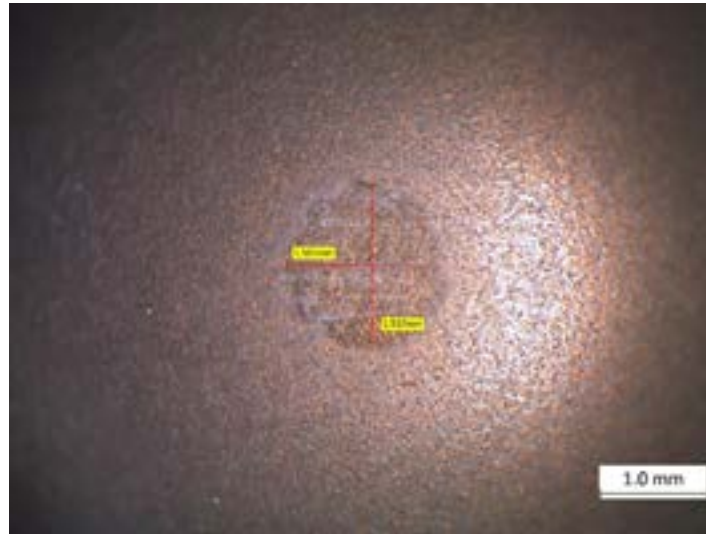
0.03. Per velocità più elevate, il COF risulta essere inferiore di oltre un punto decimale per ogni condizione studiata e presenta il suo valore minimo nel caso del trattamento G3, pur con una deviazione standard superiore alle altre condizioni.

**Tab.2** - Valori del COF stazionario per ciascuna condizione indagata. / Steady-state COF values for all the analyzed conditions.

	COF [#]			
	G1	G2	G3	OA
0.05 m/s	$0.58 \pm 0.01$	$0.63 \pm 0.01$	$0.64 \pm 0.01$	$0.63 \pm 0.03$
0.10 m/s	$0.46 \pm 0.01$	$0.44 \pm 0.01$	$0.44 \pm 0.05$	$0.48 \pm 0.01$

Al termine delle prove di usura si è proceduto con il calcolo del WR per ciascuna condizione, sia per il disco sia per i diversi pin. In Fig. 5 è riportata, a scopo esemplificativo, una delle immagini ottenute ad un ingrandimento di 20x mediante stereomicroscopio, attraverso cui è stata

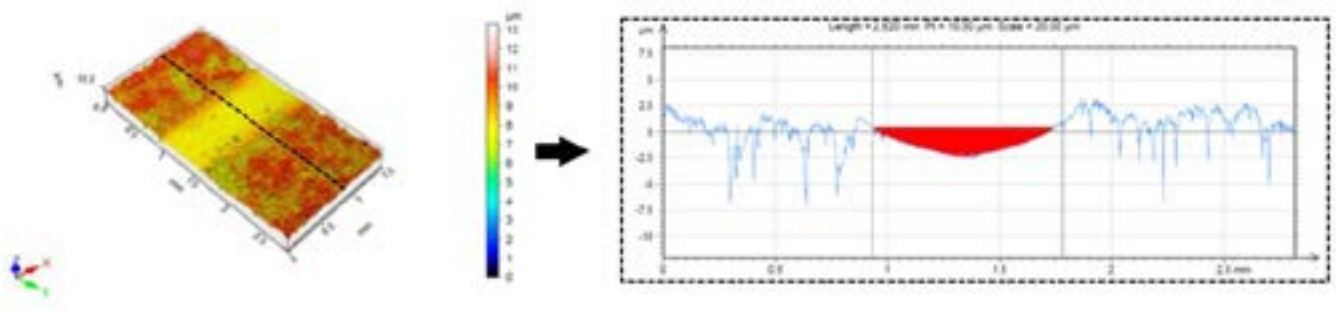
determinata l'estensione delle piste di usura e successivamente calcolato il volume di materiale asportato dal pin sferico e di conseguenza il WR.



**Fig.5** - Immagine esemplificativa ottenuta mediante stereomicroscopio della misura della dimensione delle piste di usura a carico dei pin sferici. / Example of measurement of a spherical-headed pin wear track on a stereomicroscope image.

Nella successiva Fig. 6 è rappresentata una ricostruzione tridimensionale delle piste di usura a carico dei dischi G1\_L ed uno dei profili estratti per la determinazione dell'area trasversale delle stesse tracce. Mediante tale

strumento è stato difatti possibile calcolare il volume di materiale asportato dai dischi ed il tasso di usura WR.

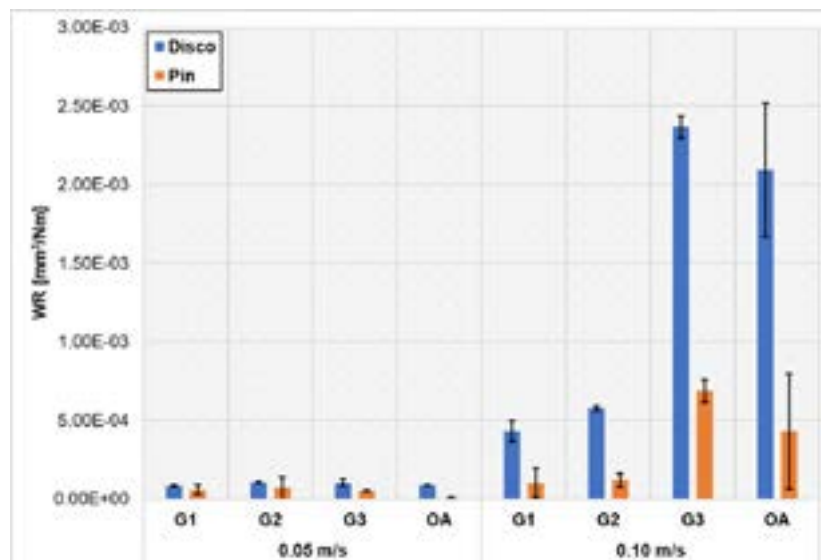


**Fig.6** - Esempio di ricostruzione tridimensionale e determinazione dell'area trasversale di una pista di usura su disco. / Example of 3-D reconstruction and profile extraction for the quantitative evaluation of the wear track's transversal area.

Dal grafico a barre riportato in Fig. 7 è possibile notare come nel caso di velocità di strisciamento basse (0.05 m/s) il WR si mantenga contenuto per tutti i trattamenti indagati. All'aumentare della velocità di strisciamento (0.10 m/s), i WR aumentano e in particolare sono le condizioni G3 e OA ad essere più gravose, sia ai danni del pin sia, soprattutto, del disco. Risulta inoltre interessante sottolineare come la condizione di ossidazione anodica tradizio-

nale OA sia quella caratterizzata dalle maggiori deviazioni standard, sia a carico dei pin sia del disco utilizzato come controparte.





**Fig.7** - Rappresentazione grafica ad istogramma dei diversi WR. / Histogram representation of WR values for each tested coupling.

## CONCLUSIONI

Il presente studio ha riguardato l'indagine tribologica di n. 3 varianti del trattamento G.H.A.® (G1, G2, G3) e di un trattamento classico di ossidazione anodica (OA) considerando l'effetto di due diverse velocità di strisciamento al fine di determinare in quali condizioni operative i diversi strati anodici possano garantire il migliore comportamento a usura se accoppiati con una controparte trattata con un processo G.H.A.® (G1\_L). A partire dalle evidenze sperimentali è stato possibile osservare che:

- La procedura di lucidatura effettuata sui campioni G1\_L ha determinato, a parità di condizioni di trattamento, una crescita più rapida dello strato di ossido anodico (visto lo spessore finale maggiore rispetto ai campioni G1\_NL) ed un'inferiore rugosità Ra e Rz. La durezza non è risultata essere influenzata dalla lucidatura, visti i valori analoghi presentati dai campioni G1\_L e G1\_NL.
- Nelle prove tribologiche in condizioni previste dalla normativa ASTM G99 è stato possibile mettere in evidenza come i trattamenti G1\_L e G1\_NL, accoppiati con pin sferico sottoposto ad analogo trattamento G1, presentino il medesimo COF. La differenza sostanziale risiede nella durata del regime stazionario di sfregamento reciproco: nel caso di contatto G1-G1\_L il COF pari a  $0.55 \pm 0.01$  e si

è mantenuto costante per circa 370 m; per il contatto G1-G1\_NL un COF di  $0.57 \pm 0.01$  è risultato essere costante solamente nei primi 120 m. Si è pertanto deciso di proseguire l'indagine tribologica utilizzando come disco antagonista il campione G1\_L.

- Il trattamento G1 è risultato essere quello in grado di garantire il valore inferiore del COF pari a  $0.58 \pm 0.01$  senza compromettere l'integrità dello strato anodizzato. I valori del COF delle prove eseguite a 0.10 m/s non sono indicativi dell'accoppiamento tra le diverse combinazioni di ossidi anodici.
  - All'aumentare della velocità di strisciamento, sono i pin trattati secondo i processi G3 e OA a soffrire maggiormente, manifestando valori del WR di diversi ordini di grandezza più elevati rispetto alle velocità inferiori. Inoltre i valori del WR dei processi G3 e OA manifestano deviazioni standard più elevate.
- Ulteriori indagini sono in corso per comprendere l'effetto degli ioni di argento che sigillano lo strato di ossido anodico nei trattamenti G.H.A.® nel corso delle prove tribologiche ed il modo in cui lo stesso argento influisca sulle proprietà ad usura del rivestimento.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Gli autori desiderano ringraziare l'azienda G.H.A.® Europe S.r.l. di Zola Predosa (BO) per aver fornito il materiale studiato nel presente lavoro ed in particolare il Prof. Franco Cicerchia e l'Ing. Costantino Cicerchia per il costante supporto tecnico.

## REFERENCES

- [1] Kaufman J. G., Introduction to aluminum alloys and tempers, ASM International, Materials Park, 2000, p. 87.
- [2] Bensalah W., Feki M., De-Petris Wery M., Ayedi H. F., Chemical dissolution resistance of anodic oxide layers formed on aluminum, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China* 21, 2011, 1673-1679.
- [3] Soffritti C., Fortini A., Nastruzzi A., Sola R., Merlin M., Garagnani G. L., Dry sliding behavior of an aluminum alloy after innovative hard anodizing treatments, *Materials* 14, 3281, 2021, 1-19.
- [4] Keller F., Hunter M. S., Robinson D. L., Structural features of oxide coatings on aluminum, *Journal of Electrochemical Society* 100, 1953, 411-419.
- [5] Takahashi H., Chiba M., Role of anodic oxide films in the corrosion of aluminum and its alloys, *Corrosion Reviews* 36(1), 2018, 35-54.
- [6] Sulka G. D., Parkola K. G., Anodizing potential influence on well-ordered nanostructures formed by anodisation of aluminum in sulphuric acid, *Thin Solid Films* 515, 2006, 338-345.
- [7] Bensalah W., Elleuch K., Feki M. De-Petris Wery M., Ayedi H. F., Optimization of anodic layer properties on aluminum in mixed oxalic/sulphuric acid bath using statistical experimental methods, *Surface & Coatings Technologies* 201, 2007, 7855-7864.
- [8] Aerts T., Dimogerontakis T. H., De Graeve I., Fransaeer J., Terryn H., Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film, *Surface & Coatings Technologies* 201, 2007, 7310-7317.
- [9] Lee G.-S., Choi J. H., Choi Y. C., Bu S. D., Lee Y.-Z., Tribological effects of pores on an anodized Al alloy surface as lubricant reservoir, *Current Applied Physics* 11, 2011, S182-S186.
- [10] Santecchia E., Cabibbo M., Hamouda A. M. S., Mushavarati F., Popelka A., Spigarelli S., Dry sliding tribological properties of a hard anodized AA6082 aluminum alloy, *Metals* 10(2), 2020, 1-15.
- [11] Nastruzzi A., Cicerchia F., Fortini A., Nastruzzi C., Gold hard anodized (GHA) materials with antimicrobial surface properties: mechanical, tribological and microbiological characterization, *Emergent Materials* 4, 2021, 249-263.
- [12] Kim H.-S., Kim D.-H., Lee W., Cho S. J., Hahn J.-H., Ahn H.-S., Tribological properties of nanoporous anodic aluminum oxide layer, *Surface & Coatings Technologies* 205, 2010, 1431-1437.
- [13] Guezmil M., Bensalah W., Khalladi A., Elleuch K., De-Petris Wery M., Ayedi H. F., Effect of test parameters on the friction behaviour of anodized aluminium alloy, *International Scholarly Research Notices* 2014, 2014, 1-9.

# Influence of the nanoporous alumina layer characteristics on the tribological behaviour of EN AW-6082 aluminum alloy treated by an innovative hard anodizing process

The present work concerns the tribological characterization of an EN AW-6082 wrought aluminum alloy treated according to an innovative anodic oxidation process in which the nanoporous anodic oxide layer was sealed with  $\text{Ag}^+$  ions (G.H.A.® technology). The tribological tests in dry conditions were conducted in ball-on-disk configuration (standard ASTM G99): the disc, made of the selected aluminum alloy, was treated with G.H.A.® and subjected to the standard process of hot fixing with  $\text{Ag}^+$  ions. Spherical-headed pins, used as counterpart material and made of the same aluminum alloy, were treated with G.H.A.® using n. 3 different conditions of anodic oxidation and final heat sealing. Samples treated with a traditional hard anodizing treatment were also taken in account to compare the wear properties of the different surfaces. Firstly, the influence of a preliminary polishing procedure before anodizing treatment on the anodic oxide characteristics was evaluated together with the tribological behavior in wear tests complying ASTM G99 standard. In the second part of the work, tribological tests were conducted at linear speeds equal to 0.05 and 0.10 m/s and a load of 5 N to compare the coefficient of friction (COF) and specific wear rates (WR). All wear tests were performed in triplicate. The results allowed to highlight a substantial dependence of the COF and of the surface duration on the sliding speed for the couplings examined.

**KEYWORDS:** ALUMINUM ALLOY, HARD ANODIZING, WEAR, BALL-ON-DISK, MICROSTRUCTURE

[TORNA ALL'INDICE >](#)