

Usura da strisciamento a secco della lega di magnesio AM60 contro acciaio rapido rivestito

G. Straffelini, E. Gariboldi

Nel presente lavoro è stato studiato lo strisciamento a secco della lega Mg-6%Al-0.3%Mn (AM60) contro un acciaio rapido (di tipo AISI M2), rivestito con diversi film sottili di nitruri ad alta durezza (TiN, CrN e ZrN), prodotti commercialmente con tecnica PVD. L'intento è stato quello di simulare il processo di foratura della lega di magnesio con punte rivestite e capire quindi i meccanismi tribologici che impongono limiti al processo stesso, soprattutto in relazione alla formazione del tagliente di riporto. Sono state condotte prove nella configurazione blocco (l'acciaio rivestito) contro anello (la lega di magnesio), ad un carico di 200 N e ad una velocità di strisciamento di 0.8 m/s. Queste condizioni sono state scelte per simulare il comportamento tribologico del sistema, con riferimento a prove di foratura precedentemente condotte. I rivestimenti con nitruri non hanno comportato evidenti miglioramenti prestazionali in confronto alle punte in acciaio rapido non rivestito, ma i risultati ottenuti hanno permesso di proporre una metodologia di prova tribologica e delle linee guida per la selezione dei valori ottimali di avanzamento e velocità periferica per la foratura della lega di magnesio AM60.

Parole chiave: magnesio e leghe, foratura, tribologia

INTRODUZIONE

Le leghe di magnesio trovano crescente utilizzo in applicazioni in campo automobilistico, soprattutto grazie alla loro bassa densità. Per questo motivo diventa sempre più importante ottimizzare i processi di lavorazione per asportazione di truciolo di queste leghe, compresa la foratura. In effetti le leghe di magnesio sono considerate facili da lavorare per asportazione di truciolo, anche se permangono delle problematiche relative alla facile formazione del tagliente di riporto, che riduce tra l'altro la finitura superficiale del pezzo, e all'elevata reattività dei trucioli che, se troppo sottili, possono infiammarsi in contatto con l'ambiente esterno [1]. Per quest'ultimo motivo, e considerando anche motivazioni ambientali, si ritiene che la lavorazione a secco sia più vantaggiosa di quella realizzata impiegando fluidi da taglio [2]. In un precedente lavoro [3], è stata studiata la lavorabilità per foratura della lega AM60 (una lega di magnesio contenente 6%Al e 0.3%Mn) utilizzando punte in acciaio rapido rivestite con diversi depositi di nitruri (TiN, CrN e ZrN). Sono state eseguite prove di foratura con punte di 10 mm di diametro, con una velocità periferica di 63 m/s e a diversi avanzamenti, da 0.37 a 0.5 m/s. Il lavoro ha evidenziato il ruolo fondamentale esercitato dalla formazione del tagliente di riporto nella limitazione della durata dei processi di foratura. Su queste basi, nel presente lavoro è stata innanzitutto messa a punto una prova tribologica di laboratorio in grado di simulare in modo sufficientemente accurato i fenomeni tribologici che si hanno durante la foratura a secco, in modo da studiare i meccanismi responsabili della formazione del tagliente di riporto e l'influenza che su di essi hanno le caratteristiche dei vari depositi di nitruri. I risultati ottenuti hanno

permesso di proporre delle linee guida per la selezione dei parametri di taglio, che dovranno essere verificate mediante una specifica sperimentazione.

PROCEDURE SPERIMENTALI

Per simulare l'usura da strisciamento a secco che si ha nel processo di lavorazione per foratura nel contatto tra la punta in acciaio rapido (non rivestito o rivestito con riporti di TiN, ZrN e CrN) e il pezzo da lavorare in lega di magnesio, è stata utilizzata una configurazione di prova blocco contro anello. L'anello rotante, con un diametro di 45 mm e un'altezza nella zona di contatto di 5 mm, è in lega di magnesio AM60 (composizione nominale: Mg-6%Al-0.3%Mn; durezza: 52 HV). I blocchi antagonisti (che simulano la punta del trapano) sono in acciaio rapido AISI M2 e sono premuti contro la superficie esterna dell'anello. Sono state eseguite prove utilizzando un blocco in acciaio non rivestito e diversi blocchi rivestiti. I rivestimenti sono stati eseguiti per PVD, in un processo industriale. Le durezze dei rivestimenti, determinate con il metodo di Chicot e Lesage [4], sono pari a 2610 HV per il CrN, 2230 HV per il TiN e 3480 HV per il ZrN. Lo spessore dei rivestimenti varia tra 2 e 3 µm. L'acciaio non rivestito ha una durezza di 245 HV.

I parametri tribologici, che devono essere determinati per poter realizzare prove di strisciamento in grado di simulare adeguatamente il processo di foratura, sono il carico da applicare e la velocità di strisciamento. Come verifica sperimentale, è necessario controllare l'intensità del trasferimento e verificare che le temperature di contatto siano simili a quelle che si raggiungono durante la foratura.

Il calcolo più semplice riguarda la determinazione della velocità di strisciamento. Nelle condizioni di foratura studiate in [3] la velocità periferica era di circa 1 m/s; la velocità di strisciamento evidentemente diminuisce avvicinandosi al centro della punta. Nelle prove tribologiche è stata quindi scelta una velocità di strisciamento di 0.8 m/s, che è compatibile con le caratteristiche del tribometro e rappresenta bene la velocità di strisciamento efficace in foratura.

G. Straffelini

Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali, Università di Trento

E. Gariboldi

Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano

Memoria pervenuta il 27 settembre 2004

La determinazione del carico di prova è sicuramente più difficile e quindi necessariamente più approssimata. Con un approccio semplificato, la forza di taglio (F_C) e la forza di spinta ad essa ortogonale (F_T) possono essere valutate utilizzando le seguenti relazioni [5]:

$$\begin{aligned} F_C &= 0.2 \cdot u \cdot D \cdot f \\ F_T &= F_C / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

dove u è la pressione di taglio, che per la lega di magnesio in studio può essere posta a 550 N/mm², D è il diametro della punta e f è l'avanzamento. Svolgendo i calcoli si ottiene che, per un avanzamento di 0.37 mm/giro, la forza risultante R vale 455 N, per cui la forza normale alla faccia della spoglia anteriore principale vale circa 213 N, essendo data da $R \cos \beta$, dove l'angolo β è dato dalla somma dell'angolo di inclinazione dell'elica (35°) e di $\arctg(F_T/F_C)$. Considerando le caratteristiche del tribometro si è quindi deciso di eseguire prove di strisciamento con un carico di 200 N e una velocità di strisciamento di 0.8 m/s.

Prima di ogni prova i campioni sono stati puliti in acetone e in ultrasuoni per 15 minuti e pesati con una bilancia di precisione. Le prove sono state quindi interrotte ogni 30 minuti per poter pesare il disco in rotazione ed ottenere la curva di usura per ogni accoppiamento. Per gli antagonisti (i blocchi in acciaio rivestito) è stato evidentemente possibile valutare il danneggiamento per usura soltanto alla fine di ogni prova. La distanza di strisciamento totale è stata di 5760 m per ogni prova e le perdite in peso della lega di magnesio sono state convertite in variazioni di volume assumendo una densità della lega in studio pari a 1.784 g/cm³. Le caratteristiche del danneggiamento superficiale sono state indagate anche con osservazioni al microscopio ottico delle tracce e frammenti di usura.

Durante ogni prova è stato misurato in continuo anche l'andamento del coefficiente di attrito. Utilizzando una termocoppia di contatto (posizionata nel blocco, in un foro dal diametro di 0.8 mm posizionato a 5 mm dalla zona di contatto tribologico) è stato registrato anche l'andamento della temperatura superficiale.

RISULTATI E DISCUSSIONE

La Figura 1(a) mostra un esempio di notevole trasferimento di lega di magnesio sulla punta del trapano che si osserva durante le prove di foratura (nella terminologia tecnica questo strato trasferito è denominato anche tagliente di riporto). La Figura 1(b), che mostra la superficie del blocco rivestito di TiN al termine della prova, conferma che anche durante le prove di laboratorio si sono osservati intensi fenomeni di trasferimento della lega di magnesio dall'anello al blocco antagonista.

Il fenomeno del trasferimento, osservato in tutti i rivestimenti, inizia dopo pochi minuti dall'inizio della prova. Parte dei frammenti trasferiti, sotto forma di laminette, si accumula nella zona di contatto causando il continuo aumento dello spessore dello strato trasferito. Parte dei frammenti, invece, abbandona il sistema tribologico, causando l'usura del disco in magnesio. Al raggiungimento di uno spessore critico lo strato trasferito comincia ad estrudere, anche lateralmente, e improvvisamente abbandona il sistema tribologico.

In Figura 2 sono riportati gli andamenti della temperatura superficiale del disco e del coefficiente di attrito, misurati in prove senza interruzioni. Si può innanzitutto osservare come l'andamento della temperatura segua quello dell'attrito, in accordo col fatto che il riscaldamento superficiale è dovuto alla dissipazione di energia per attrito. Si osserva anche che l'attrito nelle fasi iniziali della prova continua a crescere fino al raggiungimento di un valore critico, dopo il quale si osserva un calo. Questo comportamento è stato osservato in

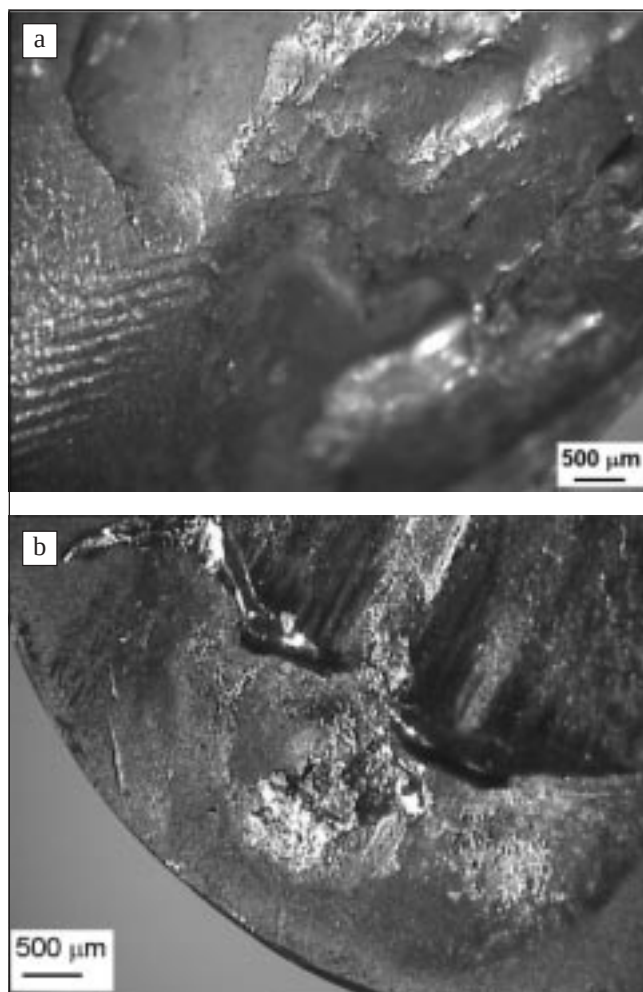


Fig. 1 – Esempi di trasferimento di lega di magnesio sulla punta del trapano dopo una prova di foratura (a), e sul blocco antagonista rivestito in TiN dopo la prova tribologica di laboratorio (b).

Fig. 1 – Examples of Mg transfer layer on the drilling tool (a), and on the TiN-coated block (b).

tutti gli accoppiamenti. L'aumento iniziale può essere attribuito alla diminuzione della durezza della lega di magnesio a causa del riscaldamento. Il coefficiente di attrito è esprimibile con la seguente relazione: $\mu = \tau_m / H$, dove τ_m è lo sforzo di taglio per separare le giunzioni a contatto (che dipende dal tipo di accoppiamento, che in questo caso, a causa del trasferimento, è lega di magnesio contro lega di magnesio) e H è la durezza della lega. Siccome H diminuisce all'aumentare della temperatura e τ_m è, invece, poco influenzato dalla temperatura dipendendo direttamente dal lavoro di adesione [6], è chiaro che il coefficiente di attrito cresce durante le fasi iniziali della prova. Al raggiungimento di uno spessore critico, tuttavia, lo strato trasferito, come detto, abbandona il sistema tribologico e deve quindi riformarsi.

Si può anche notare come la massima temperatura superficiale sia di circa 250°C. Come detto nel paragrafo precedente, la prova di laboratorio è valida se anche la temperatura di contatto durante le prove di foratura è sostanzialmente simile. Questa temperatura è molto difficile da valutare e, in prima approssimazione, può essere stimata con la seguente relazione [7]:

$$T = T_0 + 0.04 \cdot u/pC \cdot [(v \cdot t) / \alpha]^{0.333} \quad (2)$$

dove T è la temperatura superficiale in °C, T_0 è la temperatura ambiente, u è la pressione di taglio, già definita (in Nm/mm³), v la velocità di taglio (in m/s), t la profondità di

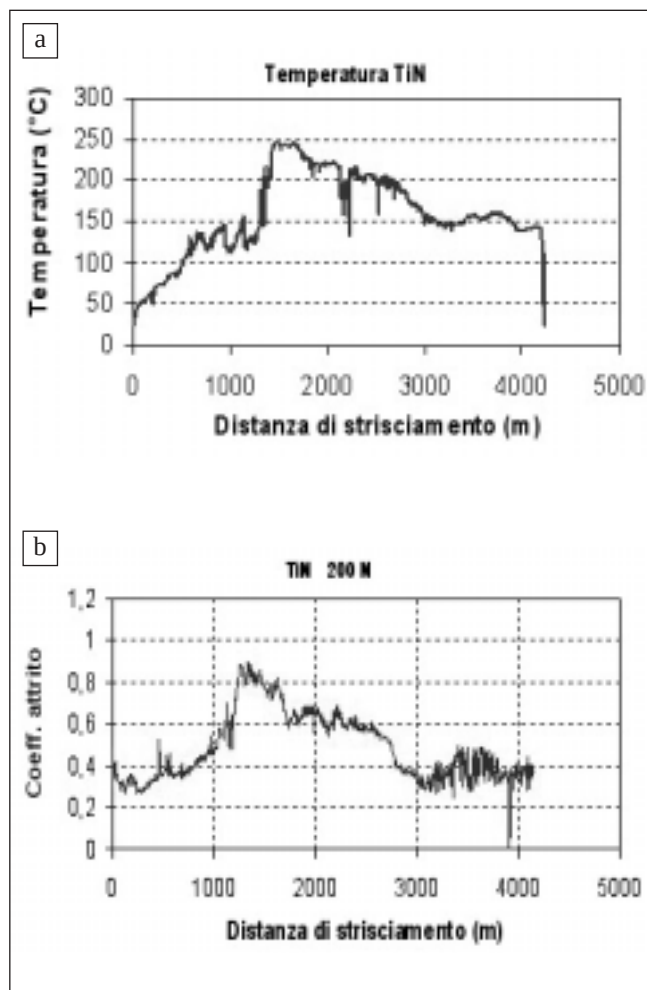


Fig. 2 – Andamento della temperatura superficiale (a) e dell'attrito (b) durante la prova (condotta senza interruzioni) contro il blocco rivestito in TiN.

Fig. 2 – Evolution of surface temperature (a) and friction (b), in the case of the test carried out using the TiN-coated block.

taglio (in m), ρC è il prodotto tra densità e capacità termica (in $J/mm^3^{\circ}C$) e α la diffusività termica (in m^2/s) del materiale lavorato. Con le opportune sostituzioni si ottiene che T vale circa $270^{\circ}C$. Questo risultato è in buon accordo con le misure sperimentali, riportate in Tabella 1. Si può notare come nel caso del blocco non rivestito sia stato ottenuto un valore di circa $240^{\circ}C$, mentre nel caso dei rivestimenti la temperatura superficiale misurata sia maggiore, in particolare nei rivestimenti di CrN e ZrN, caratterizzati da una conducibilità termica inferiore di quella del TiN.

Utilizzando la procedura proposta da M.F.Ashby e collaboratori [8], è possibile stimare la temperatura di flash che si

raggiunge, durante lo strisciamento, presso le asperità a contatto. I valori che si ottengono nel caso delle prove di laboratorio sono compresi tra $430^{\circ}C$ (per la prova con blocco non rivestito) e $459^{\circ}C$ (per la prova col rivestimento di ZrN). Con lo stesso approccio si ottiene che nel caso delle prove di foratura, riportate nel riferimento [3], la temperatura di flash varia da $245^{\circ}C$ (punta non rivestita) e $275^{\circ}C$ (punta rivestita con ZrN). Da questa valutazione emerge chiaramente come la temperatura di flash è sicuramente sufficiente ad innescare la fusione incipiente della lega, dato che il composto basofondente β ($Mg_{17}Al_{12}$) è caratterizzato da un punto di fusione di $437^{\circ}C$ [3]. Questo risultato mostra che il massiccio trasferimento osservato sia nelle prove di laboratorio che nelle prove di foratura è dovuto ad un notevole rammollimento della lega a causa delle elevate temperature di flash. Dalle misure sperimentali delle perdite in peso dei dischi in lega di magnesio è stato possibile determinare i tassi di usura sperimentali, definiti come il rapporto tra il volume di usura e la distanza di strisciamento percorso (espressi quindi in mm^3/m). Questi valori sono riportati in Tabella 1, insieme ai valori sperimentali delle temperature massime superficiali. E' chiaro che i valori del tasso di usura sono rappresentativi, per quanto detto, dell'intensità del fenomeno di trasferimento. E' necessario anche notare che al termine di ogni intervallo di prova una parte dei frammenti di usura, estrusi lateralmente rispetto alla direzione di strisciamento, rimaneva sempre attaccata al disco; siccome la rimozione di questi frammenti non è stata possibile, è chiaro che i tassi di usura sperimentali sono inferiori a quelle reali. Il confronto tra il comportamento dei diversi rivestimenti è comunque significativo, ed evidenzia come l'intensità del trasferimento sia inferiore nel materiale non rivestito e nel rivestimento TiN rispetto agli altri due rivestimenti. I dati di Tabella 1 evidenziano inoltre come l'usura sia severa e come l'intensità del trasferimento dipenda dalla temperatura superficiale raggiunta. In effetti il trasferimento avviene per usura adesiva e il fenomeno dell'adesione è intensificato da una riduzione della durezza del materiale, sempre più evidente all'aumentare della temperatura superficiale.

Per quanto riguarda il danneggiamento dei rivestimenti, va osservato che tutti i rivestimenti hanno mostrato un certo danneggiamento al termine della prova, caratterizzato dalla rimozione di parti del rivestimento stesso in alcune zone. Si può supporre che questa rimozione avvenga per adesione, quando lo strato trasferito abbandona il sistema tribologico.

OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

I risultati esposti e l'interpretazione proposta permettono di ricavare alcune linee guida utili per migliorare il processo di foratura delle leghe di magnesio e per progettare una nuova sperimentazione rivolta all'ottimizzazione del processo di foratura delle leghe di magnesio.

Il limite prestazionale alle prove di foratura è dato dal fenomeno della formazione del tagliante di riporto, cioè del severo trasferimento di lega di magnesio sul tagliante della punta. Il trasferimento avviene perché si raggiungono elevate temperature di contatto, che facilitano notevolmente il fenomeno dell'adesione. Il trasferimento può essere quindi ridotto diminuendo opportunamente i carichi tribologici: la velocità di strisciamento (cioè la velocità periferica della punta), e il carico applicato (cioè l'avanzamento). Il lavoro di Chen e Alpas [9], che hanno studiato l'usura per strisciamento della lega di magnesio AZ91 (del sistema Mg-Al-Zn), sostanzialmente simile alla lega in studio, contro un acciaio AISI 52100, conferma che per un carico di 200 N e una velocità di strisciamento di 0.8 m/s, si raggiunge un regime di usura severa con intenso trasferimento di lega di magnesio sull'antagonista in acciaio. I risultati del lavoro di Chen

Rivestimento	Tasso di usura ($10^3 mm^3/m$)	Temperatura massima superficiale, $^{\circ}C$
CrN	60	≈ 270
ZrN	60	≈ 270
TiN	52	≈ 250
Non rivestito	48	≈ 240

Tabella 1 – Tassi di usura e temperature superficiali della lega di magnesio.

Table 1 – Experimental wear rates of the Mg alloy and maximum surface temperature.

a Alpas mostrano inoltre che riducendo il carico a circa 150 N, e mantenendo la stessa velocità di strisciamento, l'usura adesiva diminuisce notevolmente e da severa diviene moderata. Con riferimento ai calcoli riportati in precedenza si ottiene che un carico di 150 N si raggiunge con un avanzamento di circa 0.24 mm/giro.

Il trasferimento può essere ridotto anche utilizzando un rivestimento autolubrificante (a base di MoS_2 , ad esempio) che riduce i fenomeni adesivi che lo innescano, o rivestimenti in diamante, ottenuti con tecnica CVD [10]. L'uso di questi rivestimenti per le operazioni di taglio con asportazione di truciolo delle leghe di magnesio appare assai promettente a causa dell'elevata conducibilità termica del rivestimento stesso, che riduce la temperatura di contatto e quindi la temperatura di flash, e della possibilità di raggiungere un basso valore del coefficiente di attrito in opportune condizioni tribologiche. Un inconveniente di questo tipo di rivestimenti è costituito dalla loro ridotta adesione ai substrati in metallo duro (WC-Co), che devono essere quindi opportunamente pretrattati [11]. In questo modo potrebbe essere possibile ridurre l'intensità del fenomeno del tagliente di riporto mantenendo elevati i valori dell'avanzamento in foratura. In un nuovo progetto di ricerca queste indicazioni verranno utilizzate con l'intento di determinare i parametri ottimali per la foratura delle leghe di magnesio.

REFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Morales, H.J., Magnesium, machinability and safety, SAE Technical Paper No. 800418, SAE, Detroit, MI, 1980.
- [2] Videm, M., Hansen, R.S., Tomac, N. & Tonnesen, K., Metallurgical considerations for machining magnesium alloys, SAE Technical Paper No. 940409, SAE, Detroit, MI, 1994.
- [3] Gariboldi, E., Drilling a magnesium alloy using PVD coated twist drills, Journal of Materials Processing Technology, 134, pp. 287-295, 2003.
- [4] Chicot, D. & Lesege, J., Absolute hardness of films and coatings, Thin Solid Films, 254, pp. 123-130, 1995.
- [5] Shaw, M.C., Metal cutting principles, Oxford, Clarendon, 1989.
- [6] G. Straffelini, A simplified approach to the adhesive theory of friction, Wear, 249, pp. 79-85, 2001.
- [7] Yang, L.J., Determination of the wear coefficient of tungsten carbide by a turning operation, Wear, 250, pp. 366-375, 2001.
- [8] Ashby, M.F., Abulawi, J. & Kong, H.S., On surface temperatures at dry sliding surfaces, Cambridge, 1990.
- [9] Chen, H. & Alpas, A.T., Sliding wear map for magnesium alloy Mg-9Al-0.9Zn(AZ9A), Wear, 212, pp. 106-116, 2000.
- [10] Manuale di Trattamenti e Finiture, Tecniche Nuove, Milano, pp. 133-136.
- [11] Straffelini, G., Scardi, P., Molinari, A. & Polini, R., Characterization and sliding behaviour of HF CVD diamond coatings on WC-Co, Wear, 249, pp. 461-472, 2001.

A B S T R A C T

DRY SLIDING WEAR OF THE AM60 Mg-ALLOY AGAINST COATED TOOL STEEL

Keywords:
Mg-alloys, drilling, tribology

In the present investigation, the wear behavior of the AM60 Mg-alloy (Mg-6%Al-0.4%Mn) dry sliding against coated tool steel has been investigated. Different coatings, produced by the PVD technology on AISI M2 tool steel, were tested: TiN, CrN and ZrN. The aim of the study was to understand the wear mechanisms acting during the drilling process of the AM60 alloy. In particular, the mechanisms responsible for the formation of a transfer layer on the drilling tool were investigated, since this layer strongly limits the

tool performance. For this, different laboratory dry sliding tests in a block-on-disk configuration were carried out. Each disk was made by the Mg-alloy and the tool steel blocks were coated by the selected thin films. The applied load was 200 N and the sliding velocity was 0.8 m/s. These conditions were chosen with the aim of simulating the tribological conditions present during a drilling test, studied in a previous investigation. The results showed that the dry sliding tests were actually able to simulate the wear mechanisms encountered during the drilling of the Mg-alloy. They further showed that the proposed coatings do not induce an evident improvement in the performance of the tribological system under study. The knowledge of the wear mechanisms, however, allowed us to propose new types coatings for future investigations.