

# MATERIALI E TECNICHE DI MODIFICAZIONE SUPERFICIALE PER POMPE OLEODINAMICHE A PALETTE: VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO TRIBOLOGICO

A.Ori, L. Ceschini, C.Martini, G. Sambogna, D.Veschi

*L'accoppiamento paletta-statore in una pompa oleodinamica a palette a cilindrata variabile presenta problemi di usura per strisciamento al contatto fra la superficie interna dell'anello statorico e la pala rotante. Nel presente lavoro è stata valutata la possibilità di migliorare la resistenza ad usura della coppia tribologica, prendendo in considerazione materiali e/o trattamenti superficiali alternativi a quelli attualmente impiegati (acciaio rapido HS6-5-2C per le palette e acciaio da nitrurazione 41CrAlMo7-10 per lo statore). A questo scopo, sono stati considerati sia un diverso materiale base (acciaio da cementazione 17NiCrMo6-4), che la deposizione di rivestimenti PVD-AE (TiN o multistrato TiN/carbonio amorfo). Sono quindi state eseguite prove di strisciamento a secco, in contatto pattino su cilindro, contro l'acciaio rapido HS6-5-2C, in condizioni di prova (carico, velocità e percorso di strisciamento) tali da essere significative per il contatto tribologico in esame. I risultati ottenuti hanno evidenziato che l'applicazione di rivestimenti sottili PVD consente di migliorare le prestazioni del sistema, in particolare per quanto riguarda la combinazione costituita da acciaio da cementazione rivestito con TiN/carbonio amorfo*

**PAROLE CHIAVE:** acciaio; rivestimenti; trattamenti superficiali; tribologia; selezione materiali

## INTRODUZIONE

Scopo del presente lavoro è la ricerca di materiali e/o trattamenti superficiali in grado di migliorare il comportamento tribologico dell'accoppiamento paletta-statore, in una pompa oleodinamica a palette a cilindrata variabile. Poiché la pala scorre lungo la superficie interna dell'anello statorico, il moto relativo tra le superfici porta ad un processo di usura per strisciamento. In queste condizioni prevale un meccanismo di usura adesiva, al quale può sommarsi una componente abrasiva [1, 2], dovuta all'azione dei frammenti di usura, eventualmente rimasti intrappolati tra le superfici, o degli eventuali detriti abrasivi in sospensione nell'olio lubrificante. Anche se il contatto paletta-statore è lubri-

ficato, la pellicola di olio in pressione, che dovrebbe teoricamente impedire il contatto diretto tra le superfici, non risulta efficace in tutte le posizioni angolari ed in tutte le condizioni d'esercizio. Esistono infatti diversi fattori, quali la forma costruttiva e la profilatura delle superfici, il potere lubrificante dell'olio, nonché l'alternanza di pressione, che possono provocare una temporanea riduzione o addirittura interruzione del velo di lubrificante, con conseguente danneggiamento per usura dei componenti. Le condizioni di contatto possono essere stimate come condizioni di attrito mediato quando la spinta esercitata dalla paletta sullo statore, derivante dalla coazione della forza centrifuga e dall'azione del fluido incamerato nei fori al di sotto della paletta alla pressione di mandata, è di lieve entità, e di attrito misto quando la pressione di contatto è maggiore. Il becco della pala, essendo di limitate dimensioni trasversali (Fig. 1), si comporta come una lama posta perpendicolarmente ad una superficie piana; lo statore presenta infatti una curvatura trascurabile nell'arco corrispondente alla lunghezza del contatto.

Allo stato attuale i materiali impiegati nell'accoppiamento tribologico in esame sono l'acciaio rapido HS6-5-2C per le palette e l'acciaio da nitrurazione 41CrAlMo7-10 per lo statore; il contatto non è diretto, bensì mediato dalla presenza di un film di olio lubrificante.

**A.Ori**

*Metalcastello spa, Castel di Casio (BO)*

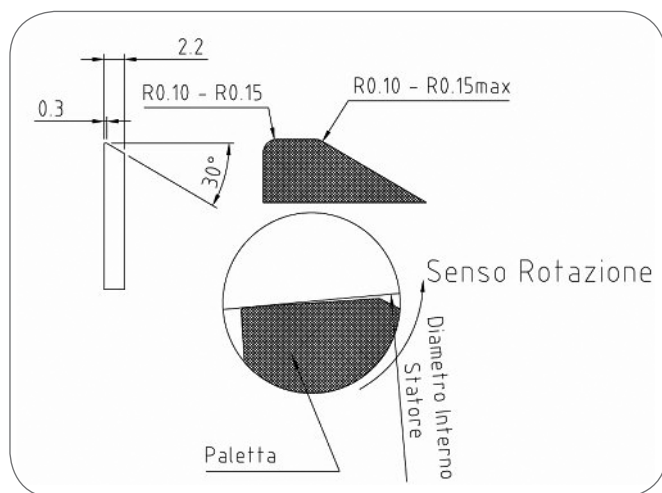
**L. Ceschini, C.Martini, G. Sambogna**

*Dipartimento di Scienza dei Metalli,*

*Elettrochimica e Tecniche Chimiche, Università di Bologna*

**D.Veschi**

*Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia (DIEM), Università di Bologna*



▲  
Fig. 1

**Schematizzazione del contatto paletta-statore e dimensioni della paletta.**

*Schematic representation of the shovel-stator contact.*

Le problematiche attualmente riscontrate nell'accoppiamento paletta-statore sono schematizzabili in usura dell'anello esterno, con segni di solcature ed in casi estremi grippaggio, accompagnata da formazione di bava in esercizio sulle palette. Con l'obiettivo di risolvere tali problematiche, l'attenzione è stata anzitutto rivolta alla possibilità di applicare al diametro interno dell'anello statorico un rivestimento sottile depositato da fase vapore (Physical Vapour Deposition, PVD). Sono infatti note le caratteristiche antiusura/antiattrito dei rivestimenti PVD [3]: nel caso dei rivestimenti a base di nitruri PVD (es. TiN), infatti, l'elevata durezza contrasta in modo efficace gli eventuali meccanismi di usura adesiva ed abrasiva, soprattutto quando applicati a sostrati di adeguata durezza [4].

In particolare, si è deciso di studiare il comportamento tribologico dell'accoppiamento prevedendo per lo statore due diverse alternative: (i) un rivestimento PVD convenzionale a base di nitrato di titanio (TiN) ed (ii) un rivestimento multistrato a base di carbonio polimerico (indicato con la sigla PLC, Polimer-Like Carbon), depositato su un interstrato in TiN, avente lo scopo di migliorare l'adesione al sostrato, che svolge un ruolo determinante nell'influenzare le prestazioni dei rivestimenti sottili [4, 5]. Nel rivestimento PLC la percentuale dei legami ad ibridazione  $sp^2$  (tipo grafite) è superiore a quella dei legami ad ibridazione  $sp^3$  (tipo diamante) [6]; il PLC è infatti un rivestimento messo a punto per espletare prevalentemente funzioni antiattrito, grazie alla presenza dei legami *graphite-like* [7, 8].

Un aspetto di fondamentale importanza che, in fase di progettazione, condiziona fortemente la scelta dei materiali e/o delle tecniche di modificazione superficiale, è sicuramente il fattore costo. L'anello statorico, in particolare, assume un peso importante sul costo totale della pompa, costo che è necessario contenere entro un intervallo medio-basso. Le pompe a palette a cilindrata variabile occupano, infatti, una posizione intermedia tra quelle ad ingranaggi (semplici, poco costose, piuttosto rumorose ed adatte a sostenere pressioni elevate, ma limitate da un punto di vista della variabilità della cilindrata) e le pompe a pistoni, che presentano un ormai consolidato campo di applicabilità (poco rumorose, controllabili da un punto di vista della cilindrata, ma limitate dal costo piuttosto elevato). Se quindi, attualmente, la ricerca nel campo delle pompe a pistoni è volta

ad un mantenimento delle prestazioni, affiancato ad un parallelo contenimento dei costi, l'ottica di mercato nel campo delle pompe a palette dovrà essere quella di mantenere costi, per quanto possibile, limitati, parallelamente ad un miglioramento prestazionale. È proprio in questo campo che uno studio del comportamento tribologico, affiancato da precise scelte progettuali, assume quindi una rilevante importanza.

Essendo ormai riconosciuti i vantaggi ottenibili dal punto di vista tribologico a seguito dell'applicazione di rivestimenti PVD, si è quindi pensato di compensare il maggiore costo di un rivestimento di questo tipo, scegliendo un materiale di base meno costoso dell'acciaio da nitrurazione attualmente usato. La scelta di un acciaio da nitrurazione, infatti, può ad oggi essere giustificata dall'esigenza di ottenere un buon compromesso tra caratteristiche di tenacità a cuore (richieste allo statore per resistere alle sollecitazioni esterne, da parte del sistema di regolazione della cilindrata e della pressione interna del fluido) e di durezza in superficie allo scopo di limitare i problemi di usura (in caso contrario infatti, la paletta, troppo aggressiva, rischierebbe di usurare eccessivamente l'anello fino, al limite, al raggiungimento di una condizione di grippaggio).

L'idea di applicare un rivestimento PVD cambia l'ottica di valutazione: per lo statore sarà in questo caso sufficiente possedere sufficienti caratteristiche di tenacità e di capacità di supporto del carico, dal momento che adeguati valori di durezza superficiale, atti a contrastare eventuali processi di usura, vengono garantiti dalla presenza del rivestimento. Da qui la decisione di affiancare, alla classica scelta progettuale che prevede l'utilizzo di un acciaio da nitrurazione, la proposta di sostituire quest'ultimo con un acciaio da cementazione, anch'esso dotato di adeguata tenacità e di elevata capacità di supportare i carichi applicati, ma sicuramente più economico. Tra le varie alternative possibili si è quindi scelto di prendere in considerazione l'acciaio 17Ni-CrMo6-4 cementato e temprato, che risulta, peraltro, essere il materiale costituente i rotori delle pompe analizzate.

## PARTE SPERIMENTALE

### Materiali

La valutazione del comportamento tribologico dell'accoppiamento paletta-statore, in una pompa oleodinamica a palette, è stata condotta mediante prove di laboratorio, in condizioni di strisciamento, utilizzando un tribometro tipo "pattino-su-cilindro". Il cilindro rotante (diametro: 40 mm; lunghezza: 400 mm) è stato realizzato nello stesso materiale attualmente impiegato per le palette (acciaio rapido HS6-5-2C temprato e rinvenuto), le cui caratteristiche, secondo norma UNI EN 4957, sono riassunte in Tab. 1.

Per i pattini stazionari (barrette 5x5x70 mm<sup>3</sup>) sono stati, invece, impiegati i materiali candidati per la produzione dello statore nelle pompe considerate. In particolare, sono stati prodotti pattini con diverse combinazioni substrato/rivestimento; come substrato sono stati utilizzati due diversi acciai da trattamento termochimico: (i) acciaio da nitrurazione 41CrAlMo7-10, le cui caratteristiche principali, secondo norma UNI EN ISO 10085, sono riassunte in Tabella 2; (ii) acciaio da cementazione 17NiCrMo6-4, le cui caratteristiche principali, secondo norma UNI EN ISO 10084, sono riassunte in Tab. 3.

Ad oggi, lo statore in acciaio 41CrAlMo7-10 subisce trattamenti termici di ricottura isoterma, bonifica e nitrurazione gassosa convenzionale, allo scopo di ottenere una durezza superficiale pari a 1100÷1200 HV per una profondità di 0.4÷0.6 mm, garantendo al contempo una buona tenacità al cuore; i provini per i pattini sono quindi stati sottoposti ai medesimi trattamenti.

L'acciaio da cementazione 17NiCrMo6-4, soluzione alternativa a quella attuale per lo statore, in vista della deposizione di un rivestimento antiusura, è stato cementato e temprato, allo scopo di ottenere una durezza minima di base pari a 60÷62 HRC, con profondità di cementazione di 0.3÷0.5 mm.

Gli acciai trattati per via termochimica sono stati successivamente rivestiti mediante PVD-AE (Physical Vapour Deposition-Arc Evaporation) con TiN o con un rivestimento a base di carbonio polimerico (Polymer-Like Carbon, PLC); in Tabella 4 sono sintetizzate le principali caratteristiche dei rivestimenti PVD. Prima

Composizione chimica	0.86÷0.94% C; 5.9÷6.7% W; 4.7÷5.2% Mo; 1.7÷2.1%V
Durezza allo stato ricotto	269 HB
T di tempra	1210°C (±10°C)
T minima di rinvenimento	560°C (±10°C)
Durezza minima	64 HRC

▲  
Tab. 1

**Caratteristiche dell'acciaio da utensili HS6-5-2C secondo norma UNI EN 4957.**

Main features of the tool steel HS6-5-2C according to the UNI EN 4957 standard.

Composizione chimica	0.38÷0.45%C; 0.4%Si max; 0.4÷0.7%Mn; 0.0025%P max; 0.035%S max; 0.8÷1.2%Al; 1.5÷1.8%Cr; 0.2÷0.35%Mo
Durezza massima allo stato ricotto	248 HB
T di ricottura di lavorabilità	650÷750°C
T di tempra	870÷930°C
T di rinvenimento	580÷700°C
T di nitrurazione	480÷570°C

▲  
Tab. 2

**Caratteristiche dell'acciaio da nitrurazione 41CrAlMo7-10 secondo norma UNI EN ISO 10085.**

Main features of the nitriding steel 41CrAlMo7-10 according to the UNI EN ISO 10085 standard.

Composizione chimica	0.14÷0.20%C; 0.4%Si max; 0.6÷0.9%Mn; 0.035%P max; 0.035%S max; 0.8÷1.1%Cr; 0.15÷0.25%Mo ; 0.4÷0.7% Ni.
T di cementazione	880÷980°C
T di tempra a cuore	830÷870°C
T di tempra superficiale	780÷820°C
T di rinvenimento	150÷200°C

▲  
Tab. 3

**Caratteristiche dell'acciaio da cementazione 17NiCrMo6-4 secondo norma UNI EN ISO 10084.**

Main features of the case hardening steel 17NiCrMo6-4 according to the UNI EN ISO 10084 standard.

Rivestimento	Struttura	Interstrato	Temperatura di deposizione °C	Durezza nominale <sup>e</sup>
TiN	cristallina	-	480 (su acciaio nitrurato) 140 (su acciaio cementato)	2300 HV <sub>0.005</sub>
PLC	amorfa	TiN	480 (su acciaio nitrurato) 140 (su acciaio cementato)	1100÷2000 HV <sub>0.01</sub>

<sup>e</sup>Dati del produttore [6]

▲  
Tab. 4

**Caratteristiche dei rivestimenti PVD depositati mediante evaporazione ad arco (AE).**

Main features (structure, interlayer, deposition temperature, hardness) of the PVD coatings deposited by Arc Evaporation (AE).

della deposizione PVD, le superfici dei provini sono state rettificare fino a rugosità Ra dell'ordine di  $0.15 \mu\text{m}$  (Tab. 5).

### Caratterizzazione microstrutturale e tribologica

La caratterizzazione dei materiali è stata effettuata mediante analisi metallografica con microscopio ottico (MO) ed analisi d'immagine, e microscopio elettronico a scansione (SEM) dotato di microsonda a dispersione di energia (EDS). Le fasi presenti sono state identificate mediante diffrattometria di raggi X (XRD), con geometria di Bragg-Brentano (radiazione  $\text{Cu } \alpha$ ). Lo spessore dei rivestimenti PVD e le caratteristiche dell'interfaccia substrato/rivestimento, sono stati valutati in sezione trasversale, su campioni preparati metallograficamente dopo inglobamento in resina (preceduto da deposizione di uno strato protettivo di Ni chimico, di circa  $20 \mu\text{m}$ ). La topografia superficiale dei pattini rivestiti è stata caratterizzata mediante microscopia a forza atomica (AFM), in modalità a contatto. Sia i cilindri che i pattini sono stati inoltre caratterizzati, prima delle prove tribologiche, mediante profilometria a stilo (raggio di curvatura:  $5 \mu\text{m}$ ) e misure sclerometriche (microdurezza Vickers misurata in sezione trasversale per i provini trattati termochimicamente, se-

condo norma UNI4847-70, con carico di  $1 \text{ kg}$  ( $\text{HV}_1$ ) per l'acciaio cementato e di  $0.5 \text{ kg}$  ( $\text{HV}_{0.5}$ ) per l'acciaio nitrurato; microdurezza Vickers "composita" [9]  $\text{HV}_{0.05}$  valutata sulla superficie per i provini rivestiti).

Le prove tribologiche sono state eseguite mediante un tribometro di tipo "pattino-su-cilindro" (descritto con maggiore dettaglio in [10]), che consente l'acquisizione continua, in funzione della distanza di strisciamento, della forza d'attrito, mediante una cella di carico a flessione, e dell'usura di sistema (pattino fisso+cilindro rotante), mediante un trasduttore di spostamento. Al termine delle prove, la profondità delle piste di usura è stata valutata mediante rugosimetro a stilo. Le prove sono state condotte in atmosfera di laboratorio ( $18 \pm 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ; umidità relativa  $40 \pm 60\%$ ), con carichi applicati compresi tra  $5$  e  $20 \text{ N}$ , velocità di strisciamento di  $0.8 \text{ m/s}$  e per una distanza di strisciamento di  $5000 \text{ m}$ . La scelta delle condizioni di prova deriva dal tentativo di simulare, pur nei limiti di una sperimentazione da laboratorio, le condizioni reali di esercizio dei componenti interessati. La stima della velocità di strisciamento e delle pressioni di contatto è stata effettuata conformemente a quanto descritto nella sezione 2.3.

	$E_i$ (GPa)	$\nu_i$
Pattino rivestito in TiN	300	0.2
Pattino rivestito in PLC	250	0.2
Cilindro in H56-5-2C	210	0.3

Tab. 5

Valori di modulo elastico e coefficiente di Poisson usati per la stima dei carichi applicati.

Elastic modulus and Poisson's ratio values used for the calculation of applied loads.

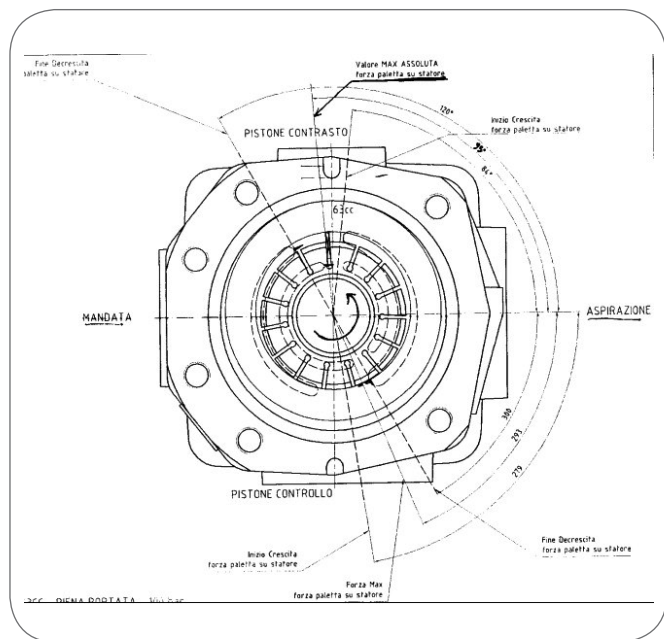


Fig. 2

Vista in sezione di una pompa a palette a cilindrata variabile.

Section of a variable displacement oleodynamic vane pump.

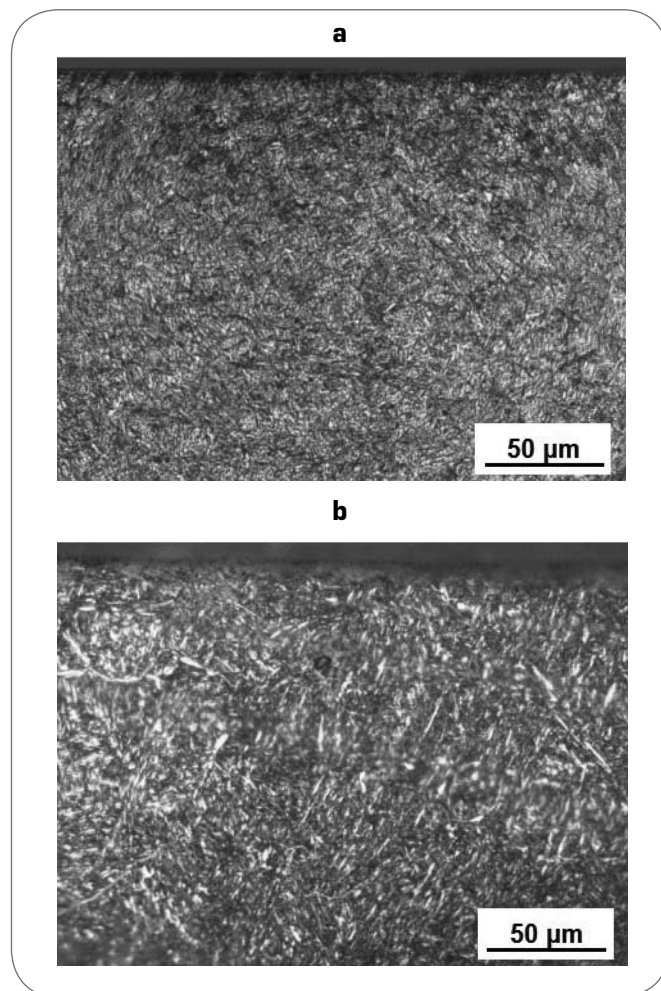


Fig. 3

Sezione trasversale degli acciai trattati termochimicamente: acciaio 17NiCrMo6-4 cementato (a) e acciaio 41CrAlMo7-10 nitrurato (b); attacco con Nital 2. Cross section of thermochemically treated steel: carburised 17NiCrMo6-4 steel (a) and nitrided 41CrAlMo7-10 steel (b); Nital 2 etching.

### Stima della velocità di strisciamento e della pressione di contatto

La velocità di contatto tra paletta e statore è stimabile come velocità periferica di scorrimento della paletta rispetto all'anello. La velocità periferica della paletta, libera di scorrere lungo le asole ricavate nel rotore, è data dal prodotto  $v = \omega \cdot r$ , dove  $r$  è la distanza tra il punto di contatto paletta-statore ed il baricentro della paletta stessa. Considerando un valore di  $\omega$  pari a circa 1500 rpm ed un valore di  $r$  pari a 0.005 m, si ricava un valore di velocità di 0.78 m/s (da cui la scelta di effettuare le prove di strisciamento a 0.8 m/s).

Per la determinazione della pressione specifica di contatto  $p$ , è fondamentale valutare il valore della forza che, agendo sulla paletta, la mantiene in continuo contatto con lo statore, come mostrato in Fig. 2. Questa forza può essere stimata come somma di tre contributi: (i) componente dovuta alla pressione nei fori sottostanti la paletta di riferimento; (ii) componente dovuta alla pressione del fluido intrappolato nel meato tra paletta e statore; (iii) componente dovuta all'azione centrifuga.

Il punto di partenza per il calcolo di queste tre componenti, e quindi della loro somma, è l'acquisizione dei dati relativi all'andamento della pressione del fluido, ricavato tramite i valori forniti da un pressostato in funzione di coordinate spazio-temporali.

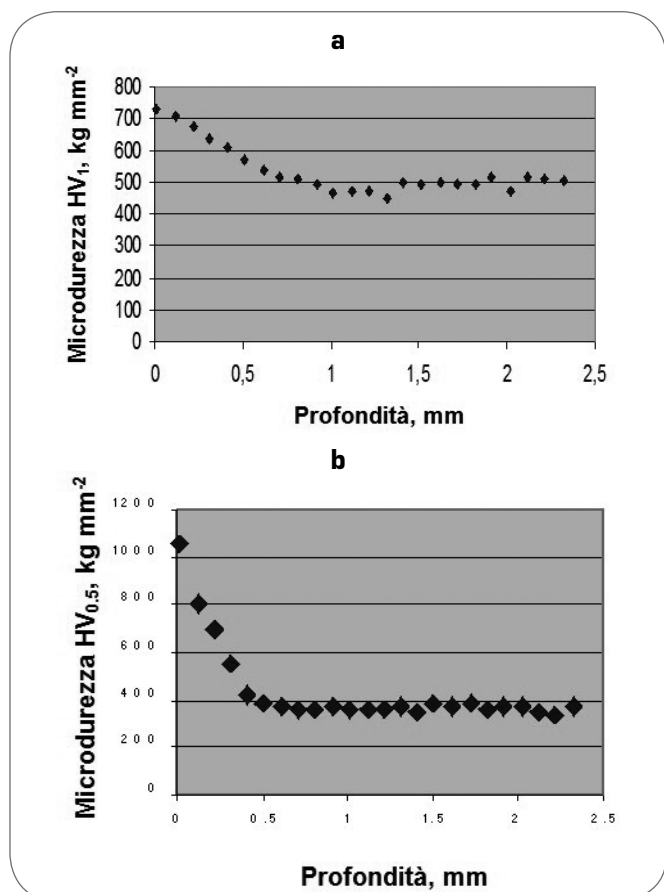


Fig. 4

**Profili di microdurezza in sezione trasversale per l'acciaio 17NiCrMo6-4 cementato (a) e per l'acciaio 41CrAlMo7-10 nitruato (b).**

Microhardness profiles through the cross section of carburised 17NiCrMo6-4 steel (a) and nitrided 41CrAlMo7-10 steel (b).

I tre contributi di forza vengono rispettivamente calcolati, su tutti i vani, come somma delle forze presenti in ogni vano in un certo istante. Il calcolo è stato effettuato per ogni vano, cioè per ogni posizione angolare della paletta di riferimento, e la risultante viene fornita dalla somma dei contributi su ciascun vano. Il procedimento è stato poi ripetuto per ogni istante di calcolo, e la risultante complessiva è stata ottenuta mediando le forze risultanti per ciascun istante.

La determinazione della pressione specifica di contatto tra paletta e statore richiede inoltre che, nota la forza di contatto tra i due componenti, si determini la superficie di accostamento relativo.

Per questa determinazione occorre tenere presente che, per assicurare una tenuta adeguata con lo statore, le palette sono conformate con spigolo vivo in sommità, disposte in modo che il vertice dell'angolo generato dallo smusso risulti rivolto secondo il senso di rotazione (Fig. 2). Questa conformazione fa sì che, durante la rotazione, il contatto paletta-statore sia assimilabile teoricamente al contatto su una linea, coincidente in questo caso con lo spigolo estremo della paletta, raccordato per esigenze di progettazione.

In questa situazione, per una stima della pressione specifica di contatto, si può fare riferimento alla teoria del contatto hertziano [11]. Tuttavia, la paletta non è un corpo indeformabile e, sotto l'azione della spinta di accostamento, tende a deformarsi, portando così il contatto ad espandersi su di un'area estesa. La valutazione di questa area dipende da diversi parametri, come la deformazione locale della paletta in corrispondenza del contatto, l'inflessione della stessa a seguito del moto di rotazione nonché dell'azione del fluido in pressione, gli inevitabili trafiletti di olio lungo il contatto che impediscono il grippaggio ed il regime di moto del fluido entro i meati che vengono a formarsi: ulteriore difficoltà risiede nel fatto che, i parametri ora citati, assumono valori diversi sia al variare del tempo che della posizione assunta dai componenti in contatto.

Allo scopo di ottenere una stima dell'area di contatto, si è scelto quindi di ricorrere ad un'analisi agli elementi finiti dell'elemento paletta: il programma utilizzato è un programma di Pre-Processor di tipo strutturale per la generazione automatica di maglie di elementi piani. Dal momento che il programma in questione non prevede casi di contatto tra due corpi, si è deciso di operare non secondo carichi imposti, bensì secondo spostamenti imposti: considerando il solo elemento paletta, si procede quindi iterativamente imponendo una precisa deformazione al corpo, fintanto che le reazioni interne non uguagliano il carico esterno. Il valore di deformazione che garantisce tale uguaglianza è stato in seguito utilizzato come stima dell'area effettiva di contatto. Dalla procedura di calcolo fin qui descritta si ricava quindi un valore indicativo della pressione specifica di contatto di contatto pari a 195 N/mm<sup>2</sup>.

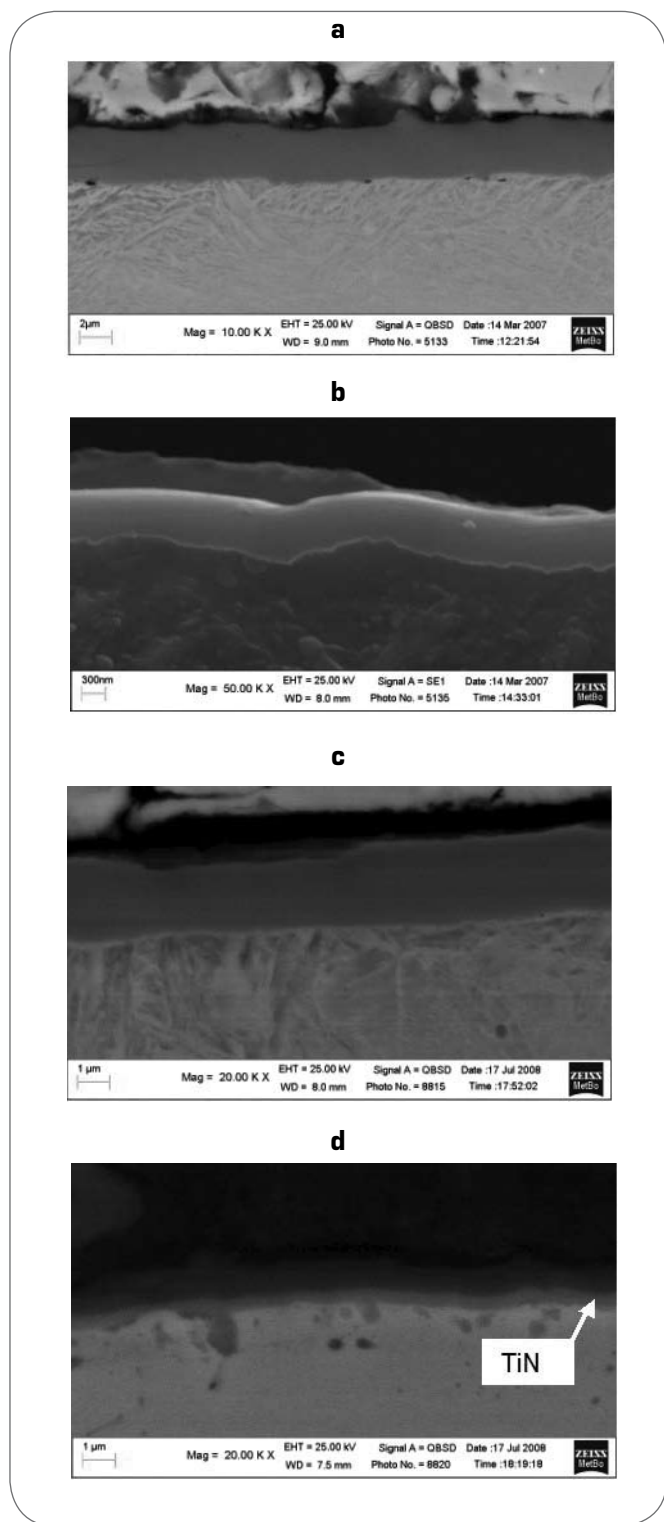
Dato che il tribometro impiegato nella sperimentazione realizza una condizione di contatto teoricamente localizzato su una linea, si può stimare la pressione massima di contatto  $p_0$  secondo la teoria hertziana [11] attraverso l'equazione (1):

$$p_0 = \sqrt{\frac{E^* W}{RL\pi}} \quad (1)$$

Dove  $L$  rappresenta la larghezza del pattino,  $R$  il raggio del cilindro e  $W$  il carico applicato, mentre  $E^*$  è espresso come segue:

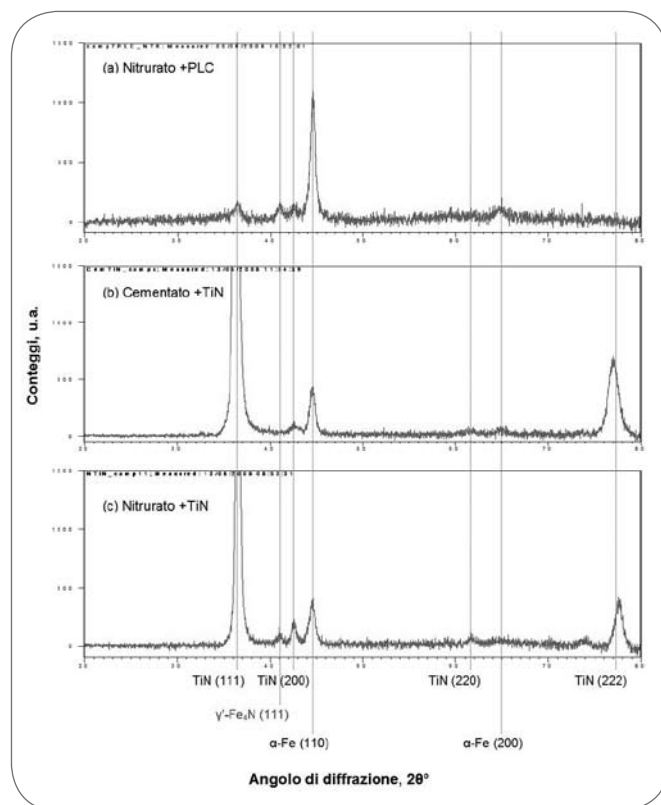
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

in funzione delle grandezze relative ai corpi a contatto  $E_i$  (mo-



▲  
Fig. 5

**Micrografie SEM delle sezioni trasversali dei pattini dopo rivestimento PVD: acciaio 41CrAlMo7-10 nitrurato + TiN (a); acciaio 41CrAlMo7-10 nitrurato + PLC (b); acciaio 17NiCrMo6-4 cementato +TiN (c); acciaio 17NiCrMo6-4 cementato + PLC (d).**  
SEM images of the cross sections of PVD coated sliders: nitrided 41CrAlMo7-10 steel + TiN (a); nitrided 41CrAlMo7-10 steel + PLC (b); carburised 17NiCrMo6-4 steel +TiN (c); carburised 17NiCrMo6-4 steel + PLC (d).



▲  
Fig. 6

**Spettri XRD dei pattini trattati e rivestiti PVD (radiazione Cu K $\alpha$ ).**  
XRD patterns of thermochemically treated and PVD coated sliders (Cu K $\alpha$  radiation).

dulo elastico del corpo i-esimo) e  $\nu_i$  (coefficiente di Poisson del corpo i-esimo). Per questa valutazione sono stati impiegati i valori indicati in Tabella 5, considerando per il rivestimento di TiN i dati riportati in [12,13], mentre per il PLC è stata effettuata una stima indicativa sulla base dei dati riportati in [14,15].

Imponendo  $p_0 = 195 \text{ N/mm}^2$ ,  $L = 5 \text{ mm}$ ,  $R = 20 \text{ mm}$ , si ricava quindi un valore di  $W$  pari a circa 90 N per la superficie rivestita in TiN e a 98 N per le superfici rivestite in PLC. Dato che il tribometro utilizzato nella sperimentazione non permette di simulare condizioni di contatto lubrificato, cioè opera in condizioni decisamente più gravose rispetto a quelle reali, si è ritenuto opportuno ridurre la forza specifica di contatto a valori compresi fra 5 e 20 N.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

### Caratterizzazione microstrutturale

Le micrografie in Fig. 3 mostrano la microstruttura degli acciai sottoposti a trattamento termochimico, usati per la produzione dei pattini, atti a simulare il comportamento tribologico dello statore. Per quanto riguarda l'acciaio da cementazione (Fig. 3a), i risultati dell'osservazione confermano la corretta esecuzione del trattamento di cementazione, tempra e rinvenimento di distensione, mostrando la presenza di martensite rinvenuta. Per quanto riguarda l'acciaio da nitrurazione (Fig. 3b), la zona superficiale appare ricca di nitruri, mentre non risulta visibile lo strato di coltre bianca, in conseguenza del

	Spessore efficace trattamento termochimico $\mu\text{m}$	Spessore rivestimento PVD $\mu\text{m}$	Durezza superficiale $\text{HV}_{0.05}$	Rugosità $R_a$ $\mu\text{m}$
HS6-5-2C	-	-	800	$0.13 \pm 0.02$
41CrAlMo7-10 nitrurato	400	-	1200	$0.14 \pm 0.04$
41CrAlMo7-10 nitrurato + TiN	400	$4.0 \pm 0.3$	1400	$0.25 \pm 0.05$
41CrAlMo7-10 nitrurato + PLC	400	$0.7 \pm 0.2$	1200	$0.19 \pm 0.04$
17NiCrMo6-4 cementato	600	-	720	$0.13 \pm 0.04$
17NiCrMo6-4 cementato + TiN	600	$2.2 \pm 0.2$	1100	$0.18 \pm 0.05$
17NiCrMo6-4 cementato + PLC	600	$1.1 \pm 0.2$	720	$0.16 \pm 0.03$

Tab. 6

**caratteristiche di materiali e rivestimenti studiati.**

Main features of materials and coatings under examination (thickness, hardness, roughness).

fatto che i provini sono stati sottoposti a rettifica superficiale, allo scopo di ottenere valori rugosità sufficientemente bassi, così da favorire la successiva applicazione dei rivestimenti PVD. A cuore risulta evidente la struttura tipica di un acciaio bonificato.

I profili di microdurezza in sezione trasversale per entrambi gli acciai trattati termochimicamente sono riportati in Fig. 4. Nel caso dell'acciaio 17NiCrMo6-4 (Fig. 4a) si è rilevato uno spessore efficace di cementazione dell'ordine di  $0.6 \pm 0.7$  mm ed un valore di durezza massima in superficie di circa 720  $\text{HV}_1$ . Nel caso dell'acciaio da nitrurazione (Fig. 4b) lo spessore efficace è risultato pari a circa 0.4 mm e la durezza massima in superficie di circa 1100  $\text{HV}_{0.05}$ .

Micrografie SEM delle sezioni trasversali dei pattini, dopo rivestimento PVD, sono mostrate in Figura 5. Tutti i rivestimenti PVD mostrano una buona continuità dell'interfaccia rivestimento/substrato e uno spessore relativamente uniforme; nel caso del rivestimento PLC su acciaio cementato (Fig. 5d), di spessore leggermente superiore al PLC su acciaio nitrurato (Fig. 5b), è visibile l'interstrato di TiN. Nel caso del PLC, lo spessore globale del rivestimento multistrato è risultato inferiore per l'acciaio da nitrurazione, rispetto a quello da cementazione (Tab. 6).

In Fig. 6 sono riportati gli spettri di diffrazione acquisiti sulla superficie dei pattini rivestiti. Nel caso del campione nitrurato rivestito con PLC (Fig. 6a), l'analisi XRD conferma sia la presenza della fase  $\gamma'$ - $\text{Fe}_4\text{N}$  (prodotta dal trattamento termochimico), che dell'interstrato di TiN. Inoltre, i diffrattogrammi in Fig. 6 mostrano che tutti rivestimenti a base di TiN (Fig. 6-b, c) hanno un'orientazione preferenziale (111), tipica dei rivestimenti depositati mediante PVD-AE [16]. Non si rilevano invece riflessi attribuibili al rivestimento PLC, coerentemente con la struttura amorfa di quest'ultimo.

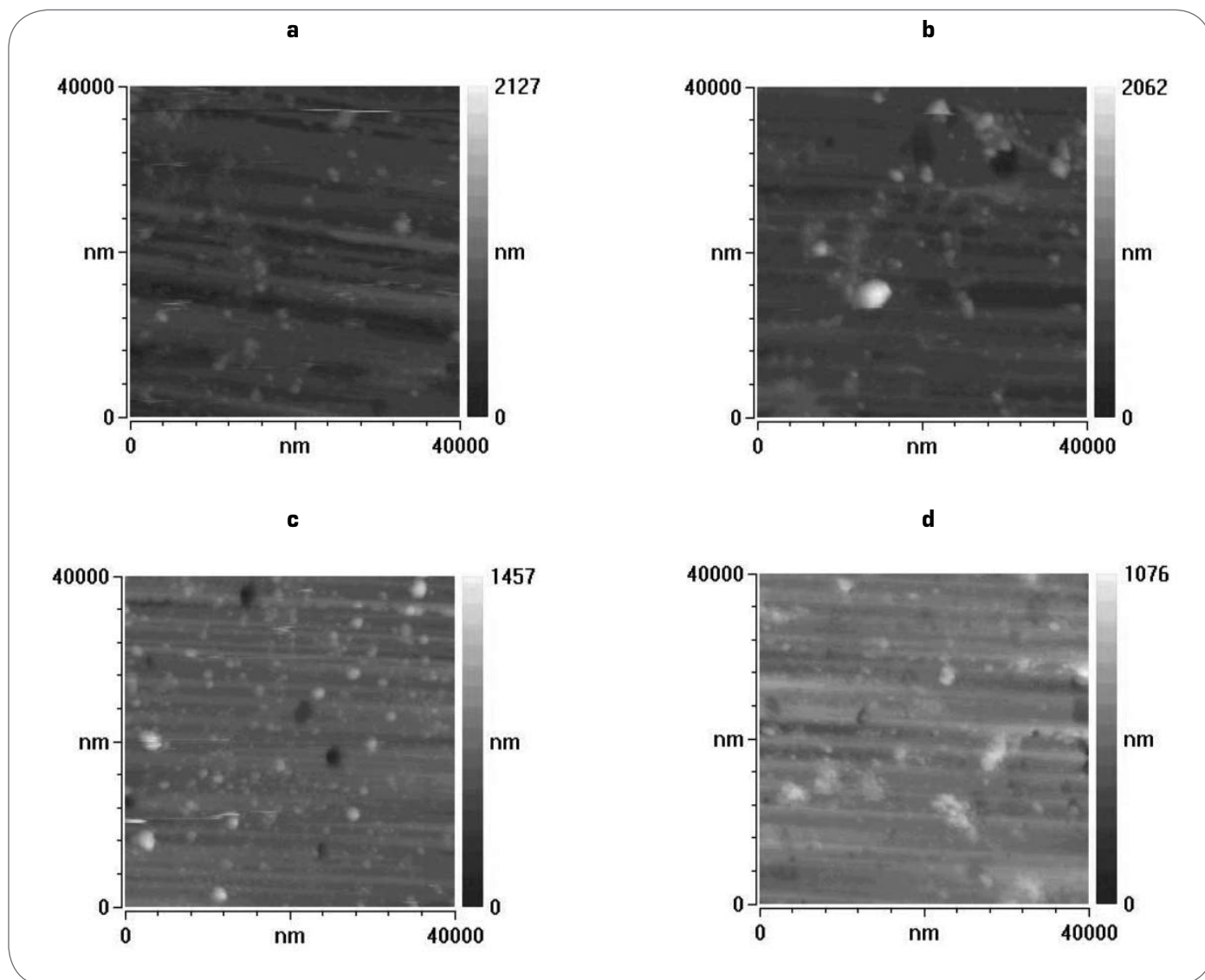
L'analisi topografica mediante AFM (Fig. 7) mostra che tutti i rivestimenti PVD replicano la topografia del substrato, essen-

do ancora evidenti le tracce della rettifica; la deposizione sia di TiN che di PLC porta tuttavia ad un incremento di rugosità (come mostrato dai dati in Tab. 6), a seguito della formazione di gocce (in giallo chiaro nelle immagini AFM), durante la deposizione ad arco.

Le caratteristiche principali rilevate sui materiali usati per le prove tribologiche sono riassunte in Tabella 6. I valori di microdurezza "composita" riportati in Tabella 6 (non indicativi delle proprietà intrinseche degli strati PVD, ma utilizzabili al fine di confrontare le diverse combinazioni rivestimento/substrato) mostrano che la deposizione degli strati di TiN incrementa la durezza del sistema substrato/rivestimento, mentre in queste condizioni di misura non si evidenzia il contributo degli strati PLC a causa del loro basso spessore. I valori più elevati si ottengono nel caso dell'acciaio da nitrurazione rivestito con TiN grazie, ovviamente, alla maggiore durezza del substrato.

**Caratterizzazione tribologica**

La valutazione della resistenza ad usura dei materiali della sperimentazione è stata effettuata misurando la profondità massima delle piste di usura sui pattini, al termine delle prove (5000 m), mediante profilometria a stilo. I risultati sono riportati negli istogrammi di Fig. 8-a per l'acciaio da nitrurazione e in Fig. 8-b per quello da cementazione, in funzione del carico applicato, per la velocità di strisciamento utilizzata nella sperimentazione (0,8 m/s). I dati evidenziano un danneggiamento per usura crescente con il carico applicato, per tutti i materiali studiati. Nel caso dei materiali non rivestiti è evidente la presenza di un valore critico del carico (20 N), in corrispondenza del quale si è osservata una transizione da un regime di usura moderata tribossidativa, ad un regime di usura severa, con componenti di delaminazione ed abrasione. Quest'ultima componente è risultata più importante nel caso dell'acciaio da nitrurazione, probabilmente per la maggiore durezza dei detriti di usura, conducendo a tassi di usura più elevati rispetto all'acciaio da cementazione. L'applicazione dei rivestimenti PVD ha condotto ad una significativa riduzione del danneggiamento per usura, al carico più elevato della sperimentazione (20 N). Un tale comportamento è da porsi in relazione all'efficacia di tali rivestimenti nel ridurre sia l'area reale di contatto, per l'elevata durezza, che la tendenza



▲  
Fig. 7

**Immagini AFM delle superfici dei pattini impiegati per le prove tribologiche: (a) acciaio 41CrAlMo7-10 nitrurato + PLC (a); acciaio 41CrAlMo7-10 nitrurato + TiN (b); acciaio 17NiCrMo6-4 cementato + PLC (c); acciaio 17NiCrMo6-4 cementato + TiN (d).**

*AFM images of the surfaces of sliders for tribological testing: (a) nitrided 41CrAlMo7-10 steel + PLC (a); nitrided 41CrAlMo7-10 steel + TiN (b); carburised 17NiCrMo6-4 steel + PLC (c); carburised 17NiCrMo6-4 steel + TiN (d).*

a formare giunzioni adesive, per la modificazione della natura chimico-fisica delle superfici. Il miglior comportamento tribologico è stato rilevato per l'acciaio da cementazione rivestito con PLC, a tutte le condizioni di carico. Questo risultato può essere interpretato alla luce della natura di questo rivestimento multistrato, caratterizzato da uno strato superficiale di C amorfo, al di sotto del quale si trova uno strato di TiN (circa 1/3 dello spessore totale), a contatto con il sostrato. Lo strato di C amorfo esercita un'azione di lubrificazione solida a seguito della grafitizzazione che si verifica durante il contatto [15,17,18], riducendo così la resistenza a taglio delle giunzioni adesive, mentre il TiN, contribuisce, per l'elevata durezza, a ridurre l'area di contatto. Entrambi questi fattori contribuiscono a ridurre in modo significativo il meccanismo di usura adesiva, prevalente in condizioni di strisciamento. Meno efficace è risultata invece l'applicazione del PLC sull'acciaio

nitrurato, probabilmente a causa del minore spessore globale del rivestimento, che anticipa l'affioramento del sostrato e la conseguente formazione di detriti abrasivi di elevata durezza (per la presenza dei nitrucci), che danneggiano il rivestimento stesso, più che nel caso dell'acciaio da cementazione.

#### Analisi dei costi

Un'analisi dei costi del ciclo completo di lavorazione per lo statore della pompa analizzata, basandosi su valori di mercato, ha mostrato che i costi di produzione dello stesso, in acciaio da cementazione rivestito con PLC, risultano inferiori rispetto a quelli che si avrebbero utilizzando l'acciaio da nitrurazione non rivestito, il tutto tenendo conto anche di un eventuale incremento di spessore dell'anello statorico, a seguito delle diverse caratteristiche resistenziali del materiale. Una tale riduzione è stata stimata pari a circa il 16% nel caso



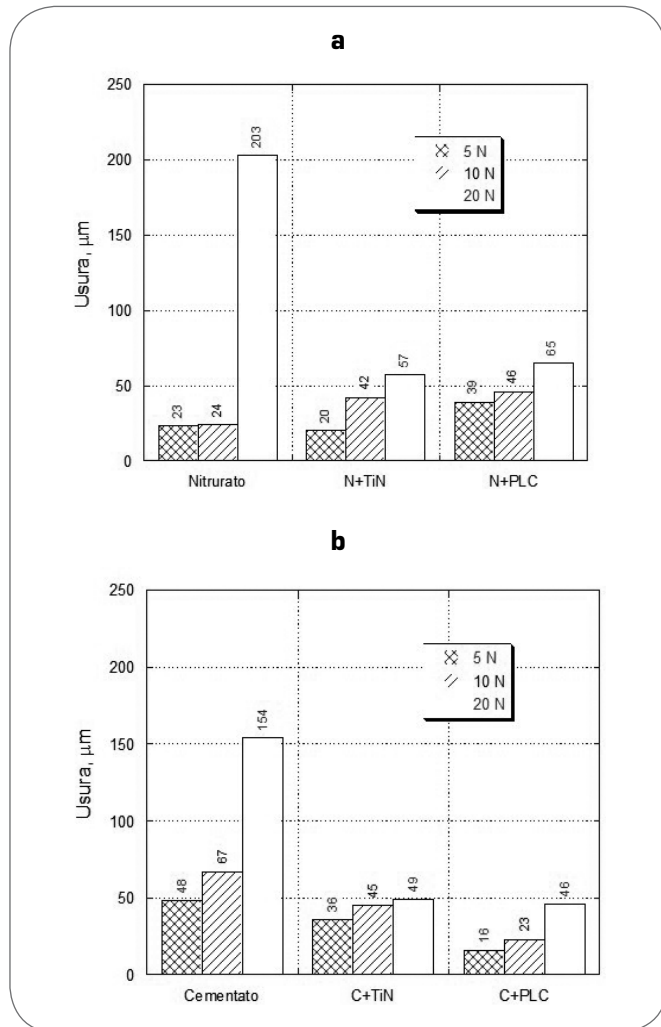


Fig. 8

**Profondità massima delle piste di usura rilevate sui pattini al termine delle prove (5 km), in funzione del carico: acciaio da cementazione (a), acciaio da nitrurazione (b), con e senza rivestimenti PVD.**  
*Maximum depth of wear tracks measured on the sliders at the ends of the tests (5 km) as a function of applied load: carburised 17NiCrMo6-4 steel (a), nitrided 41CrAlMo7-10 steel (b), with and without PVD topcoat.*

della pompa di minori dimensioni ed è stata valutata una possibile ulteriore riduzione dei costi, all'aumentare delle dimensioni della pompa stessa.

## CONCLUSIONI

Lo studio del comportamento tribologico, in condizioni di strisciamento a secco, di materiali per l'accoppiamento paletta-statore in una pompa oleodinamica a cilindrata variabile, ha mostrato che l'applicazione di rivestimenti sottili PVD su acciaio da cementazione (relativamente al componente statore) conduce ad un miglioramento della resistenza ad usura. Rispetto alla soluzione progettuale attuale, che consiste nella produzione dello statore in acciaio da nitrurazione non rivestito, infatti, la soluzione proposta (acciaio da cementazione + PVD) incrementa sensibilmente la resistenza ad usura, soprattutto ad alti carichi applicati.

L'applicazione dei rivestimenti PVD (TiN e PLC), sia su acciaio da cementazione che su acciaio da nitrurazione, consente di ridurre l'usura, soprattutto ad alti carichi. Il multistrato PLC, costituito da carbonio amorfo su TiN, è risultato il più idoneo ad incrementare la resistenza ad usura.

Dal punto di vista dell'analisi dei costi, la produzione di uno statore in acciaio da cementazione, rispetto ad uno da nitrurazione, pur tenendo conto di un probabile incremento di spessore legato alle diverse caratteristiche resistenziali del materiale scelto rispetto a quello attualmente utilizzato, risulta estremamente conveniente, al punto tale che anche l'applicazione di un rivestimento PLC sul diametro interno dello statore porterebbe ad un costo totale inferiore rispetto a quello attuale.

## RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare l'ing. E. Tartarini della Berarma srl per la fornitura dei campioni e per la collaborazione alla sperimentazione. Si ringrazia inoltre il Dott. D. Romagnoli della STS Service and Tools srl di Monte S. Pietro (BO) per la deposizione dei rivestimenti PVD.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] I.M. HUTCHINGS, "Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials", Edward Arnold (1992).
- [2] G. STRAFFELINI, "Attrito e usura - Metodologie di progettazione e controllo", Tecniche Nuove (2005).
- [3] R.F. BUNSHAH, "PVD and CVD Coatings", in: ASM Handbook on-line, Volume 18 "Friction, Lubrication, and Wear Technology", ASM International, Materials Park, OH, USA (2007).
- [4] K.HOLMBERG, A.MATTHEWS, "Coatings Tribology" Elsevier (1994).
- [5] N. FUJISAWA, D. R. MCKENZIE, N. L. JAMES, J. C. WOODARD, M. V. SWAIN, Wear 260 (2006) 62-74.
- [6] Nota tecnica, STS Service and Tools, Italy (2007).
- [7] H. E. SLINEY, "Solid Lubricants", in: ASM Handbook on-line, Volume 18 "Friction, Lubrication, and Wear Technology", ASM International, Materials Park, OH, USA (2007).
- [8] S. YANG, D.G. TEER, Surface and Coatings Technology 131 (2000) 412-416.
- [9] A. THOMAS, Surface Engineering 3 (1987) 117-122.
- [10] L.CESCHINI, G.S.DAHEN, G.L.GARAGNANI, C.MARTINI, Wear 216 (1998) 229-238.
- [11] J. A. WILLIAMS, R. S. DWYER-JOYCE, "Contact between solid surfaces" in: Modern Tribology Handbook, Volume 1: Principles of Tribology, Ed. by B. Bhushan, CRC Press (2001).
- [12] K. HOLMBERG, A. LAUKKANEN, H. RONKAINEN, K. WALLIN, Tribology International (2008), doi:10.1016/j.triboint.2008.04.013
- [13] G.M. LA VECCHIA, N. LECIS, S.TROGLIO, La Metallurgia Italiana 4 (2006) 21-28
- [14] W. ÖSTERLE, D. KLAFFKE, M. GRIEPENTROG, U. GROSS, I. KRANZ, CH. KNABE, Wear 264 (2008) 505-517.
- [15] J.ROBERTSON, Materials Science and Engineering R 37 (2002) 129-281.
- [16] M. CARBUCICCHIO, C. MARTINI, G. PALOMBARINI, M. RATEO, Hyperfine Interactions 139/140 (2002) 259-265, 2002.
- [17] R. HAUERT, Tribology International 37, (2004), 991-1003
- [18] S.NEUVILLE, A.MATTHEWS, Thin solid films 515(2007) 6619-6653

## ABSTRACT

### MATERIALS AND SURFACE MODIFICATION TECHNOLOGIES FOR VARIABLE DISPLACEMENT OLEODYNAMIC VANE PUMPS: EVALUATION OF THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR

**Keywords:** oledynamic vane pump, shovel, stator, sliding, wear, tribology, carburising, nitriding, PVD, TiN, PLC

The aim of the present work was the selection of new materials and/or surface treatments for the improvement of the tribological behaviour of the vane-stator couple, in a variable displacement oleodynamic vane pump.

In this application, the rotating vane slides against the stator and, even if the contact is mediated by a lubricating oil film, the relative motion between the two parts generates a sliding wear process. In this case, adhesive wear generally prevails, but in some cases also an abrasive component [1,2] can take part in the process, due to wear debris trapped between the contacting surfaces or dispersed in the lubricant. Moreover, in some working conditions, the lubricant film may locally decrease in thickness or be completely removed as a consequence of different factors, such as geometric features of the contacting bodies, lubricant efficiency of the oil, as well as the balance of pressures, with a consequent significant increase in the wear damage. The geometry of the contacting parts (vane-stator) is shown in Fig. 1 and 2. The following materials are currently used: (i) a HS6-5-2C high speed steel (Table 1) for the vanes and (ii) a 41CrAlMo7-10 nitriding steel (Table 2) for the stator. The main tribological problems, in this contact, are the wear damage of the outer ring of the stator (with the formation of ploughing marks or, in the worst situations, seizure), associated with formation of built-up edges on the vanes.

In order to improve the tribological behaviour of the system, the application of a thin PVD coating on the surface of the stator has been proposed, on the basis of the well-known anti-wear and anti-friction properties of these coatings, mainly due to their high hardness, which is effective in limiting both abrasive and adhesive wear when the coatings are deposited onto substrates of adequate load bearing capacity [3,4]. Two different PVD coatings have been considered: (i) a conventional TiN and (ii) a polymer-like carbon (PLC) coating deposited onto a TiN inter-layer (in order to improve adhesion [4,5]). The fraction of graphite-like  $sp^2$  bonding in the PLC coating is higher than the fraction of diamond-like  $sp^3$  bonding [6], therefore PLC mainly acts as an anti-friction coating [7, 8]. The main features of the PVD coatings considered in the present work are listed in Table 4.

Cost is another important aspect in material selection; we tried to compensate the increase of cost connected with the deposition of PVD coatings, with the selection of a different substrate. A 17NiCrMo6-4 carburising steel (the same presently used for the production of the rotors in the vane pumps) has been chosen as an alternative to nitriding steel, because of its good mechanical strength combined with lower cost. The main features of the 17NiCrMo6-4 steel are listed in Table 3.

The microstructure and phase composition of both the substrates and the coated materials have been checked by optical and scanning electron microscope and XRD analysis, respectively. Figure 3 shows the cross-section of the thermochemically treated steels; in particular, Figure 3b shows that the white layer has been removed from the nitrided surface, before PVD deposition. The microhardness profiles in Figure 4 show the thickness of the hardened layers (summarised also in Table 6, together with surface hardness and roughness values).

The PVD treatment was carried out in an Arc Evaporation (AE) industrial unit. The deposition temperature was 480 °C for the nitriding steel and 140 °C for the carburising steel. The thickness of the coatings was estimated by SEM analyses of the cross sections (Fig.5) as 4 µm for TiN and 0.7 µm for PLC deposited on the nitrided steel, while it was 2.2 µm for TiN and 1.1 µm for PLC deposited on the carburised steel (Table 6). XRD analysis of PVD coated sliders showed the presence of the TiN interlayer below the PLC amorphous coating (Fig. 6). AFM topographies of PVD coated surfaces showed a roughness increase, due to the formation of droplets during the PVD depo-

sition (Fig. 7). The composite microhardness values, summarised in Table 6, point out that the highest values of hardness are achieved by the nitriding/TiN combination.

The tribological behaviour of the presently used materials (HS6-5-2C high speed steel against 41CrAlMo7-10 nitrided steel), as well as of the proposed alternative solutions, has been evaluated by dry sliding tests (slider on cylinder contact geometry). All the sliders (both uncoated and PVD coated) were tested against a rotating cylinder made of a HS6-5-2C high speed steel (quenched and tempered to 63 HRC, with an average surface roughness  $R_a=0.1$  µm).

The testing conditions have been selected by comparison with the in-service conditions of the pump: the same sliding speed (0.8 m/s) has been used, whereas the applied loads have been chosen on the basis of the evaluation of the specific contact pressure (estimated in the real case by the finite element method, FEM) by the hertzian contact theory [11]. The applied loads were therefore set to 5, 10 and 20 N, and the total sliding distance was fixed at 5000 m. During the tests, the friction force and total wear (i.e. cumulative wear of both fixed slider and rotating cylinder) were continuously measured by means of a load cell and a linear variable displacement transducer (LVDT), respectively, and the data were recorded as a function of sliding distance. After the tests, separated values of the wear scar depth on both slider and counter-material, were evaluated by means of a stylus profilometer. Worn surfaces and wear debris were observed and analysed by SEM, in order to identify the dominant wear mechanisms.

The results of the wear tests for the nitrided steel and the carburised steel, with or without PVD coatings, are shown in the histograms of Fig.8 (a and b), respectively. The plots give the maximum wear scar depth, measured at the end of the tests on the fixed sliders and shows that the wear damage increases with the applied load, for all the tested materials. In the case of the uncoated steels, a critical load (20 N) that leads to a transition from a mild oxidative wear regime to a severe wear regime, with components of both delaminative and abrasive wear, can be identified. The contribution due to abrasive wear was higher for nitrided steel, probably due to the superior hardness of the wear debris, which lead to higher wear rates than for carburised steel. Deposition of PVD coatings significantly reduced the wear damage of the thermochemically treated steels, mainly at the highest applied load of 20 N. This can be related both to the reduction in the contact area and to the lower tendency to form adhesive junctions. The best tribological performance was given by the carburised steel coated with PLC, under all the conditions tested in this work. This result can be explained on the basis of the nature of this multilayer coating, characterized by a surface layer of amorphous C, below which there is a TiN interlayer (about 1/3 of the total coating thickness). The amorphous C layer acts as a solid lubricant, due to its graphitization during the sliding contact, which leads to a decrease in the shear strength of the adhesive junctions, while the TiN layer, due to its high hardness, significantly reduces the contact area. Both factors contribute to a significant decrease of the adhesive wear component. The PLC coating deposited on the nitrided steel, instead, was less effective in improving the wear resistance, probably due to its lower thickness, that reduces the life of the coating and leads to the formation of hard debris from the substrate (due to the presence of nitrides), with a consequent severe wear damage of the coating itself.

A cost analysis of the whole production cycle of the stator, for the pump considered in this work, showed that the total production cost, in the case of a carburising steel coated with PLC, was about 16% lower than in the case of using an uncoated nitrided steel. This cost reduction is possible even taking into account the increase of the thickness of the stator, which is needed because of the lower material strength of the carburised steel.

As a conclusion, the deposition of PVD coatings on a carburised steel substrate led to a significant improvement of the wear resistance, under dry sliding conditions, of the investigated tribological couple, mainly at high applied loads. In particular, the best performance was given by the multilayer PLC coating, consisting of amorphous C on TiN. This solution allowed also a reduction of the production costs.