

ACCIAI SOTTOPOSTI A TRATTAMENTI DUPLEX: RESISTENZA AGLI IMPATTI CICLICI E ALLA FATICA

N. Lecis, L. Signorelli, G. M. La Vecchia

L'impiego dei rivestimenti PVD interessa sempre un maggior numero di componenti in acciaio, non solo per garantirne un miglioramento nell'affidabilità in termini di resistenza ad usura, ma anche per assicurare miglioramenti in termini di resistenza locale ai carichi applicati, nonché incrementi di resistenza in presenza di sollecitazioni cicliche. In tale ottica si sono di recente sviluppati trattamenti "Duplex" che uniscono i vantaggi dei più tradizionali trattamenti termochimici di indurimento superficiale alla deposizione di film sottili in materiale ceramico PVD. Nel presente lavoro verranno illustrati i risultati ottenuti con prove di impatto ciclico (Impact test) su campioni di acciaio da bonifica in entrambe le condizioni bonificato o nitrurato, rivestiti con la metodica PVD. I risultati ottenuti in termini di tipo ed entità del danneggiamento hanno fornito un ulteriore parametro di valutazione in aggiunta al limite di fatica, ricavato sperimentalmente da prove di flessione rotante, in grado di suggerire l'impiego delle diverse combinazioni substrato/rivestimento in funzione delle richieste dettate dall'utilizzo. La caratterizzazione è stata completata, inoltre, da analisi microstrutturali (SEM) e di stato tensionale residuo (Rx).

PAROLE CHIAVE: trattamenti termici, fatica

INTRODUZIONE

Con il termine "trattamento duplex" si è soliti indicare la successione di un trattamento termochimico (in genere nitrurazione) e la deposizione di un rivestimento sottile (in genere ottenuto attraverso il ricorso alla tecnica PVD) [1-5]. Tale complessa ed onerosa metodica di modifica della superficie viene con vantaggio utilizzata in settori quali quello della produzione degli stampi per applicazioni a caldo e degli utensili sia da taglio sia per la lavorazione del legno [6-9], in quanto assicura un incremento della durata e della affidabilità dei componenti rivestiti rispetto a quanto ottenibile con interventi dedicati alla superficie di tipo più tradizionale.

La presenza di uno strato nitrurato sul quale viene depositato un film sottile di materiale ceramico porta, infatti, alla somma dei vantaggi tipici delle due fasi del trattamento duplex:

- alla nitrurazione viene, infatti, demandato il compito di assicurare la necessaria rigidità del substrato per poter operare, in esercizio, anche in presenza di elevate sollecitazioni di compressione, senza problemi di deformazioni localizzate che non sono in grado

di essere assorbite, senza rischio di formazioni di cricche, dal materiale ceramico con il quale è realizzato il film sottile;

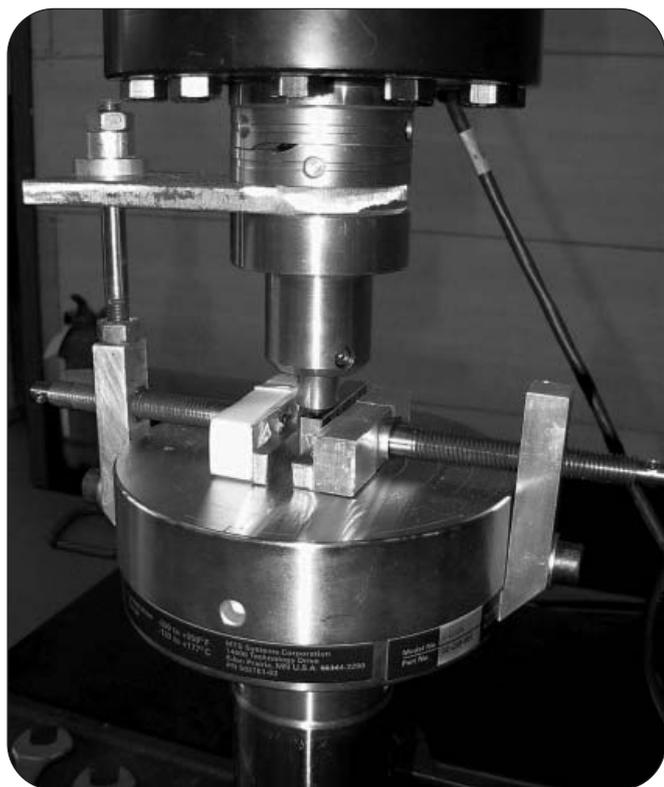
- al rivestimento PVD, opportunamente scelto in termini di composizione chimica e spessore, viene richiesto, invece, di assicurare un basso coefficiente di attrito [10], unitamente ad una durezza certamente superiore rispetto a quella ottenibile con il solo trattamento termochimico, condizioni queste che si traducono in un miglioramento della resistenza all'usura [11-12].

Con le moderne metodiche di deposizione è attualmente possibile progettare "compositi" substrato/rivestimento con caratteristiche molto diverse, mirate ad un ampio spettro di applicazioni. Nell'ambito della caratterizzazione dei rivestimenti si stanno, quindi, negli ultimi anni sviluppando metodiche di prova che consentano di discriminare tra i rivestimenti, approssimando il più possibile le condizioni di esercizio.

Mentre la caratterizzazione ad usura, così come il grado di adesione di diversi tipi di acciaio accoppiati ad altrettanti diversi tipi di composizione chimica dei rivestimenti PVD, è in letteratura ampiamente documentata [14-16], meno frequenti sono i lavori pubblicati che si occupano del comportamento in presenza di sollecitazioni cicliche degli acciai sottoposti ai trattamenti duplex [17]. Ad integrare la caratterizzazione dei rivestimenti ceramici recentemente sono stati pubblicati lavori che, mediante prove di "impact test", caratterizzano il comportamento dello strato superficiale modificato sottoposto ad impatti ciclici ripetuti, condizione questa fondamentale per spiegare il danneggiamento di componenti che, sia pure in aree di ridotta dimensione, ripetutamente nel tempo, risultano sollecita-

N. Lecis, L. Signorelli
Politecnico di Milano,
Dipartimento di Meccanica

G. M. La Vecchia
Università di Brescia,
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale



▲
Fig. 1

Attrezzatura realizzata per le prove di indentazione ciclica.
Cyclic loading system developed at Politecnico of Milan for the impact test measurements.

ti al di sopra del carico di snervamento del pezzo rivestito [18-22]. Queste ultime sperimentazioni sono risultate essere la base di partenza per le prove sperimentali condotte nel presente lavoro nel quale sono stati caratterizzati, attraverso prove di impatto ciclico, (Impact test) campioni di acciaio 42CrMo4 sia allo stato bonificato che nitrurato in presenza ed in assenza di un rivestimento PVD tipo CrN. La strumentazione per la realizzazione delle misure è stata appositamente sviluppata, seguendo le indicazioni presenti in letteratura [3-4], nei laboratori del Politecnico di Milano. La caratterizzazione meccanica è stata completata da prove di fatica ed i risultati ottenuti sono stati interpretati anche attraverso analisi microstrutturali e misure di stato tensionale residuo.

PARTE SPERIMENTALE

Impact test

L'attrezzatura di prova (Fig. 1) è stata realizzata ed installata sulla macchina MTS 810 in dotazione presso i laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano e tipicamente impiegata per eseguire prove statiche e dinamiche.

Si è utilizzato un piatto di compressione del diametro di 155 mm, in dotazione alla macchina MTS 810, con la superficie di lavoro rettificata e fissata al pistone idraulico con un accoppiamento filettato; degli anelli elastici di tenuta tra piatto e pistone idraulico, pre-caricati ad un valore di forza di 4 kN, garantiscono il corretto accoppiamento tra piatto e pistone.

Sul piatto, un porta-campioni realizzato in alluminio consente di posizionare correttamente i provini e di tenerli fissi durante lo svolgimento della prova.

Sono stati realizzati due indenter intercambiabili, con sfere di acciaio

100Cr6, di diametro 6 mm e 10 mm rispettivamente, fissati alla traversa superiore dell'MTS 810 mediante accoppiamento filettato. Anche in questo accoppiamento sono stati impiegati degli anelli elastici di tenuta, in modo da assicurare che il serraggio tra sostegno e traversa fosse garantito durante il ciclaggio. Per poter applicare impatti ciclici in controllo di forza con distacco dell'indenter dal campione sottoposto a prova, è stato necessario progettare e realizzare un opportuno dispositivo denominato "stopper", avente la funzione principale di trasmettere al pistone idraulico un segnale di fine corsa superiore alla forza di 450N.

Esso è costituito da un'astina di acciaio che collega il piatto di compressione su cui è montato il campione, con una piastrina di acciaio interposta tra il sostegno dell'indenter e la cella di carico. Sull'apparecchiatura così realizzata è stato possibile impostare i seguenti valori dei parametri di prova:

- Fmax=450 N
- Fmin= - 1000 N
- Forma d'onda triangolare
- Frequenza: 2 Hz.
- Numero di Cicli: 10³, 10⁴ e 5x10⁴

Poiché i livelli di sollecitazione di compressione applicata sono medio/alti, nel corso della prova la forza di impatto esercitata dall'indenter causa delle plasticizzazioni locali nella zona di contatto che si traducono in uno stato di sollecitazione crescente al crescere del numero di cicli di carico e, quindi, in un progressivo incremento delle dimensioni dell'impronta.

Per il calcolo della pressione nominale agente durante il contatto tra sfera e piano si è fatto riferimento alla seguente formula, riportata in letteratura [21]:

$$P_n = \sqrt[3]{\frac{6 \times F_N \times E^2}{\pi^3 \times R^2}}$$

dove:

P_N: pressione nominale normale di contatto.

F_N: forza di carico applicata.

$\frac{1}{E_s^2} = \left[\frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right] + \left[\frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \right]$: Modulo elastico composito (con E_s ed E_b pari rispettivamente al modulo elastico del substrato ed al modulo elastico della sfera, ν_s ed ν_b indicano i coefficienti di Poisson del substrato e della sfera, rispettivamente di valore 0,26 - rivestimento CrN e 0,3 - acciaio)

Materiali utilizzati

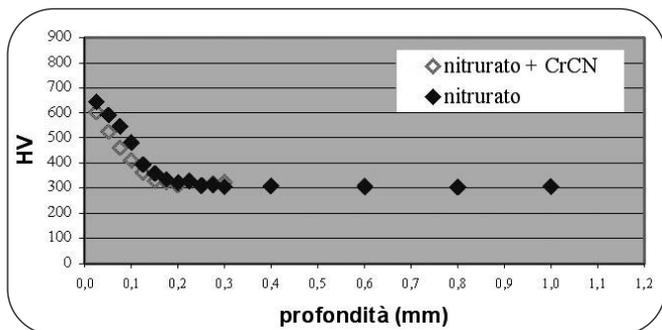
Le prove svolte nel presente lavoro sono state eseguite su un acciaio da bonifica 42CrMo4 (Tab. 1) fornito sia allo stato bonificato sia allo stato nitrurato; per entrambe le condizioni si è esaminato l'effetto di un rivestimento PVD CrN (5 μm di spessore) depositato con un impianto industriale ad arco sulla resistenza a fatica a flessione alternata e alle prove di impatto.

I due diversi trattamenti termici, cui in [23] sono riportati i dettagli, hanno portato ai seguenti valori di durezza: bonifica HRC=32; nitrurazione HV superficiale = 630 con gradiente riprodotto in Fig 2. Il dato di durezza superficiale ottenuto deve tener conto della ridotta temperatura di nitrurazione uti-

C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)	Al (%)
0.42	0.87	0.27	1.09	0.21	0.012	0.022	0.03

▲
Tab. 1

Analisi chimica della lega utilizzata come substrato.
Chemical composition of the steel used as substrate.



▲
Fig. 2

Profili di microdurezza 42CrMo4 allo stato nitruato e nitruato + rivestimento PVD.
Microhardness data of 42CrMo4 steel in the nitriding condition (◆) and after duplex treatment (◇).

lizzata (460 °C) e dei tempi (18 ore), scelta che limita lo strato di coltre bianca la cui presenza riduce l'adesione del successivo film PVD.

RISULTATI E DISCUSSIONE

In Fig. 3 è osservabile la microstruttura delle sezioni dei campioni utilizzati nelle diverse condizioni di preparazione della superficie. Si può osservare la buona adesione del rivestimento PVD sia sul 42CrMo4 allo stato bonificato che allo stato nitruato.

Fatica

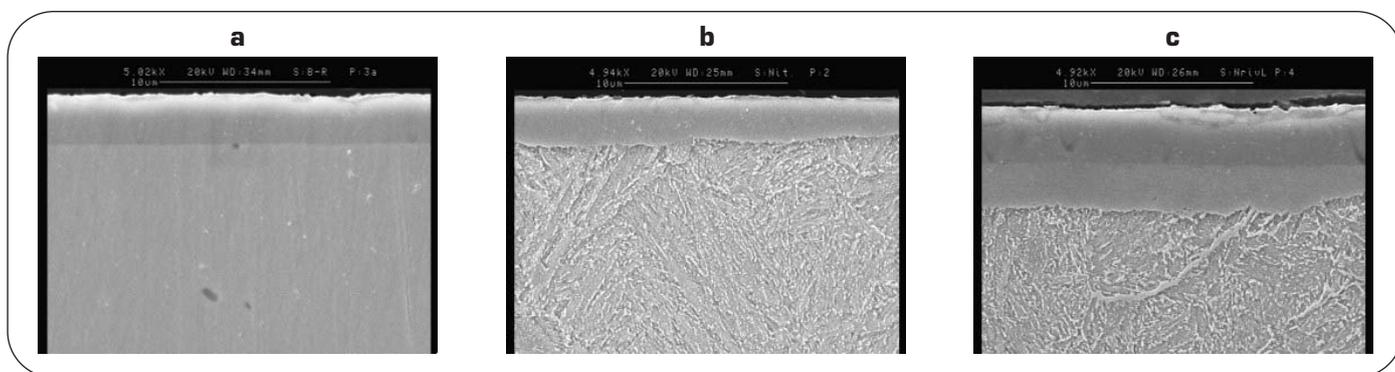
Le prove di fatica a flessione alternata sono state condotte utiliz-

zando una macchina di prova Italsigma a temperatura ambiente (33 Hz; R=H0). I provini sono stati considerati come non rotti dopo un numero di cicli pari a 3×10^6 e i risultati sono stati analizzati con il metodo stair-case.

I dati sperimentali ottenuti sottoponendo a prova le diverse tipologie di provini analizzati sono riportate in Tab. 2, dove è evidenziato anche l'effetto del rivestimento PVD sia sul comportamento a fatica (i valori percentuali indicano la variazione del limite di fatica a parità di substrato ma in presenza di coating) sia sullo stato tensionale residuo.

Il meccanismo di danneggiamento risulta nettamente diverso nel caso di campioni nitruati (Fig.4) e nel caso di campioni bonificati (Fig.5) indipendentemente dalla presenza/assenza di rivestimento. In particolare i campioni nitruati evidenziano sempre un innesco sub-superficiale in corrispondenza di inclusioni non metalliche di grossa dimensione presenti nella matrice. Tale situazione è giustificata dal gradiente di compressione imposto dal trattamento termochimico ad uno spessore di entità variabile con i parametri di nitruazione prescelti ma, comunque, sempre dell'ordine di qualche centinaia di micron. Tale stato di compressione esclude che l'innesco della cricca di fatica si determini in corrispondenza della superficie della provetta. La presenza del rivestimento PVD causa solo un netto incremento dello stato di compressione superficiale senza modificare in modo sensibile il gradiente di compressione riconducibile alla nitruazione e pertanto, anche in questo caso, la zona compressa adiacente alla superficie non verrà interessata dall'innesco della rottura.

Il trattamento di bonifica dell'acciaio 42CrMo4 condotto con tempra in olio, presenta, invece, un gradiente delle tensioni residue decisamente meno marcato con valori di compressione pressoché trascurabili e tali da non impedire la formazione di intrusioni ed estrusioni superficiali in grado di localizzare l'innesco



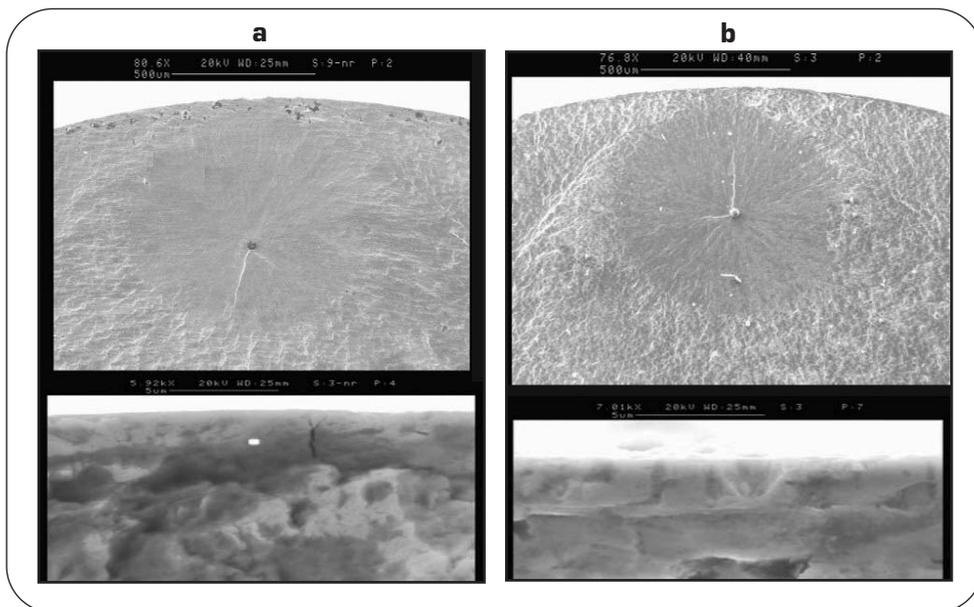
▲
Fig. 3

Micrografie SEM dei campioni analizzati: a) bonificato rivestito; b) nitruato; c) nitruato e rivestito.
Cross sections of different surface treated samples: a) quenched and tempered condition + PVD coating; b) nitrided condition; c) nitrided + PVD coating.

SUBSTRATO	RIVESTIMENTO PVD	STRESS RESIDUO [MPa]	σ_{LIM} [MPa]
42CrMo4 Nitruato	Assente	-580 ± 40	723 ± 10
42CrMo4 Nitruato	Presente	-2350 ± 114	761 ± 10 (+5%)
42CrMo4 Bonificato	Assente	-49±8	428 ± 7
42CrMo4 Bonificato	Presente	-1980±86	529 ± 9 (+23%)

▲
Tab. 2

Risultati dello stato tensionale residuo superficiale e della caratterizzazione a fatica.
Residual stress and fatigue limit data.



▲
Fig. 4

Superfici di frattura di campioni con substrato nitrurato: a) nitrurato; carico 780 MPa; b) nitrurato rivestito; carico 760 MPa.
Fracture surfaces of fatigue samples: a) nitrided specimen loaded at 780 MPa; b) nitrided + PVD specimen loaded at 760 MPa.

della rottura per fatica alla superficie dei pezzi bonificati. L'introduzione del rivestimento PVD sui campioni bonificati trasferisce l'innesco alla zona di interfaccia con il substrato grazie all'elevato stato di compressione tipico del film ceramico.

Impact test

Alcuni campioni prismatici ricavati nelle stesse condizioni di

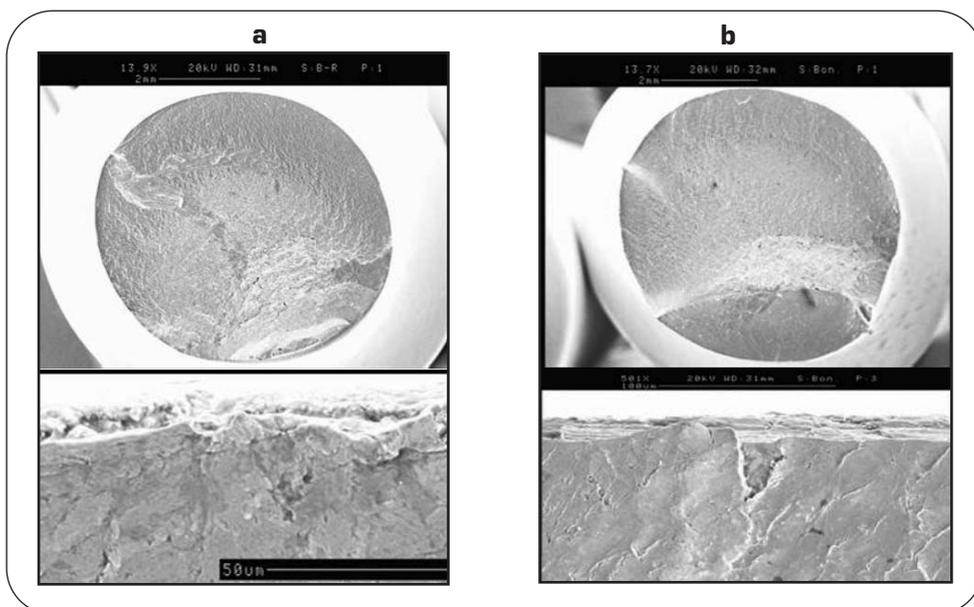
to le cricche risultano sempre essere multiple e di tipo circonferenziale.

Per giustificare il diverso comportamento alle prove di impatto da parte del rivestimento PVD al variare del trattamento termico effettuato sull'acciaio del substrato, si sono misurati i moduli elastici delle porzioni superficiali dei diversi campioni mediante il ricorso a prove di nano-indentazione condotte con diversi carichi applicati in modo da avere sempre un affondamento dell'indenter pari a 0.2 μm .

I risultati ottenuti (Tab. 3) sono stati utilizzati, seguendo le indicazioni proposte da Batista [25], per giungere ad una misura indiretta del gradiente di stress presente nella zona adiacente alla superficie del pezzo. Minore è la differenza tra i moduli elastici del rivestimento e del substrato, minore sarà il gradiente di stress che si instaura e quindi meno severo risulterà il danneggiamento dovuto ai carichi di punta simulati dalle condizioni di indentazione.

CONCLUSIONI

Mediante prove di fatica a flessione rotante, eseguite su acciai da bonifica 42CrMo4 rivestiti con CrN depositato con tecnologia PVD si è potuto ottenere un significativo aumento del limite di fatica rispetto al solo substrato nelle condizioni di bonifica. Tale aumento è notevolmente ridotto se si considera il substrato allo stato nitrurato in quanto lo stato di tensione residua permane in compressione



▲
Fig. 5

Superfici di frattura di campioni con substrato bonificato: a) bonificato; 480 MPa; b) bonificato e rivestito; 560 MPa.
Fracture surfaces of fatigue samples: a) quenched and tempered specimen loaded at 480 MPa; b) quenched and tempered + PVD coating specimen loaded at 560 MPa.

CAMPIONE	E[GPa]	$E_c E_s / E_s$
bonificato	229 ± 7	
Bonificato + PVD	323 ± 46	0.41
nitruato	243 ± 39	
Nitruato + PVD	281 ± 58	0.15

▲
Tab. 3

Risultati delle prove di nanoindentazione sui diversi campioni e relativo gradiente di stress.

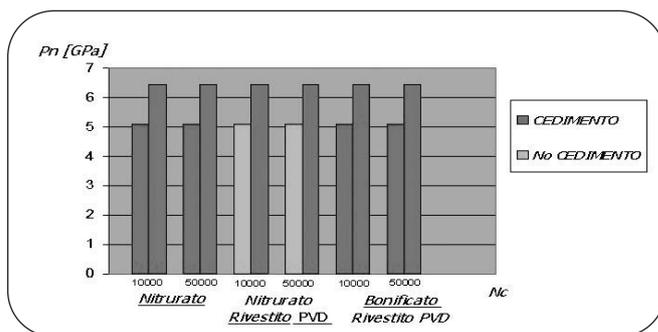
Nano indentation measurements on different substrates. Calculate stress gradient values: E_c = coating Young's Modulus; E_s = substrate Young's Modulus.

per una profondità sufficientemente ampia e tale da inibire l'ingresso della cricca di fatica anche in assenza di film ceramico.

Dalle prove di impact test eseguite in laboratorio dopo aver messo a punto la strumentazione necessaria, si riscontra un buon comportamento dell'acciaio nitruato e rivestito PVD a bassi carichi imposti, mentre cedimenti si verificano nelle altre condizioni di prova valutate.

Il miglior comportamento dei rivestimenti duplex alle prove di impatto è risultato, infine, correlabile, al rapporto tra i moduli elastici del substrato e del "composito" rivestimento/substrato.

L'insieme dei risultati ottenuti consente di affermare che la scelta del materiale del substrato e, qualora sia praticabile, del miglior ciclo di trattamento termico dello stesso, deve essere fatta in funzione delle modalità di sollecitazione alle quali verrà a essere sottoposto il componente rivestito. Infatti, se da una parte il rivestimento PVD ottenuto per deposizione di un generico materiale ceramico su acciaio, non può che migliorare le condizioni di contatto (basso coefficiente d'attrito), e quindi, in generale, porta ad un miglioramento del comportamento ad



▲
Fig. 6

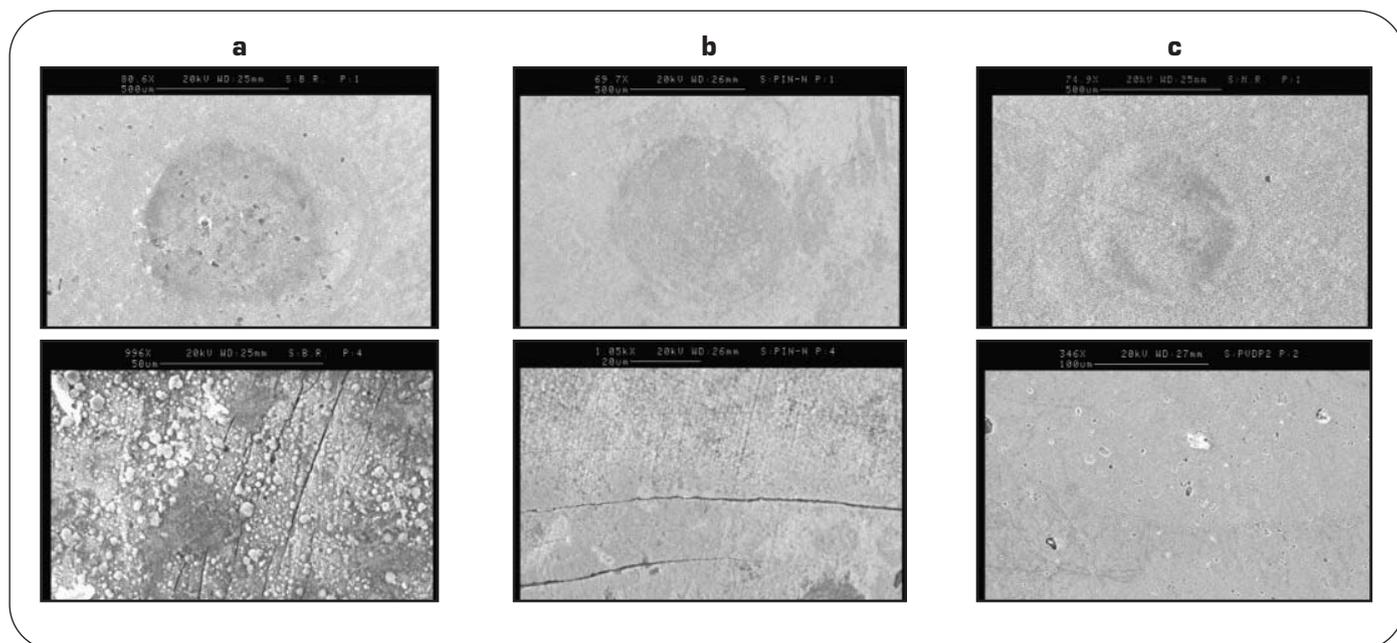
Risultati delle prove di impatto ciclico.

Impact test results: (■) damage at impact crater (□) no damage at impact crater.

usura, dall'altra la diversa rigidezza del substrato, così come il diverso gradiente di tensioni residue indotto dal ricorso a differenti trattamenti termici, può modificare, anche in modo sensibile, il comportamento a fatica e la resistenza all'impatto ciclico. Poiché, inoltre, l'introduzione di una fase di nitruazione su un componente che dovrà essere rivestito con tecnica PVD rappresenta un ulteriore aggravio di costi per il prodotto, aver a disposizione dati sperimentali che simulano il comportamento del pezzo rivestito in presenza di sollecitazioni cicliche, condizione questa molto frequente in esercizio, è un ulteriore strumento per stabilire il miglior compromesso tra affidabilità del prodotto e costi per realizzarlo.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i dott. Mancuso e Caproglio della Colmengna per l'esecuzione dei trattamenti di nitruazione utilizzati nel presente lavoro.



▲
Fig. 7

Impronte di impact test ottenute sui diversi substrati a 500 N e 5x10⁴ cicli e relativi ingrandimenti: a) bonificato rivestito; b) nitruato; c) nitruato e rivestito.

impact craters morphologies after 5x10⁴ impacts at 500 N.

BIBLIOGRAFIA

- 1] J.C.A. Batista, C. Godoy, V.T.L. Buono, A. Matthews, *Materials Science and Engineering A336* (2002) 39–51
- 2] B. Navinsek, P. Panjan, I. Urankar, P. Cvahte, F. Gorenjak, *Surface and Coatings Technology*, 142-144 (2001) 1148-1154
- 3] SangYul Lee, *Surface & Coatings Technology*, 193 (2005) 55–59
- 4] M. Pellizzari, A. Molinari, G. Straffelini, *Surface and Coatings Technology*, 142-144 (2001) 1109-1115
- 5] M. Bader, H.J. Spies, K. Hock, E. Broszeit, H. J. Schroder, *Surface & Coatings Technology*, 98 (1998) 891-896
- 6] P. Panjan, M. Cekada, R. Kim, M. Sokovic, *Surface & Coatings Technology*, 180 –181 (2004) 561–565
- 7] A. Chala, L. Chekour, C. Nouveau, T. C. Saied, M.S. Aida, M.A. Djouadi, *Surface & Coatings Technology*, 200 (2005) 512–516
- 8] B. Navinsek, P. Panjan, F. Gorenjak, *Surface & Coatings Technology*, 137 (2001) 255-264
- 9] G.S. Fox-Rabinovich, S.C. Veldhuis, G.C. Weatherly, A.I. Kovalev, S.N. Korshunov, V.N. Scvortsov, *Surface & Coatings Technology*, 187 (2004) 230-237
- 10] U. Wiklund, M. Larsson, *Wear* 241 (2000) 234–238
- 11] M. Pancielejko, W. Precht, A. Czyzniewski, *Vacuum* 53 (1999) 57-60
- 12] M. Dubar, A. Dubois, L. Dubar, *Wear* 259 (2005) 1109–1116
- 13] T. Bjork, R. Westergard, S. Hogmark, J. Bergstrom, P. Hedenqvist, *Wear* 225–229 (1999) 1123–1130
- 14] P. van Essen, R. Hoy, J.-D. Kamminga, A.P. Ehasarian, G.C.A.M. Janssen, *Surface & Coatings Technology*, 200 (2006) 3496– 3502
- 15] J.-D. Kamminga, P. van Essen, R. Hoy and G.C.A.M. Janssen, *Tribology Letters*, Vol. 19, No. 2, June 2005 (2005) 65
- 16] A. Alasaran, A. Çelik, C. Çelik, I. Efeoglu, *Materials Science and Engineering A* 371 (2004) 141–148
- 17] J. Smolik, M. Gulde, J. Walkowicz, J. Suchanek, *Surface & Coatings Technology*, 180 –181 (2004) 506–511
- 18] A.R. Bantle, A. Matthews, *Surface & Coatings Technology*, 74-75, (1995) 857-868
- 19] J.C.A. Batista, C. Godoy, A. Matthews, *Surface & Coatings Technology*, 163-164, (2003) 353-361
- 20] E.S. Zanoria, L.E. Seitzman, *Surface & Coatings Technology*, 182, (2004) 161-170
- 21] K.D. Buzakis, A. Siganos, *Surface & Coatings Technology*, 185, (2004) 150-159
- 22] C.A. Batista, C. Godoy, G. Pintude, A. Sinatora, A. Matthews, *Surface & Coatings Technology*, 174-175 (2003) 891-898
- 23] N. Lecis, G.M. La Vecchia, M. Boniardi, F. D'Errico, *Surface & Coatings Technology*, 201 (2006) 2335-2340

ABSTRACT

IMPACT TEST AND FATIGUE BEHAVIOR OF DUPLEX AND NON DUPLEX TREATMENTS

Keywords: Quenching and tempering steel, Nitriding, CrN coating fatigue, Impact test

The continuing increase in the use of coated components is due to their improved performances also in presence of a high variety of substrates on which the coating can be deposited. In fact the durability of coated components is usually higher than uncoated ones especially when wear and corrosion resistance must be improved [14-16].

Among the coating technologies a well known position is assured from the PVD process used not only on several substrates (both ferrous and non ferrous alloys can be coated with PVD layers) but also in different chemical compositions (from the traditional TiN coatings to the more complex ceramic multilayer tailored for peculiar applications).

Metallurgical studies on PVD coatings have been focused on the increasing of the mechanical properties such as fatigue, thermal fatigue, contact fatigue and toughness by controlling chemical composition, hardness and internal stress distribution ceramic layers. Nowadays the mechanical behaviour of newly developed PVD-coated components can be achieved by means of the so called "duplex treatment" [1-5] consisting in a thin PVD film deposited on a nitrided steel substrate.

The nitrided case minimises the substrate deformation under the service applied loads while the high hardness and low friction coefficient characterizing the PVD coating increase the wear performance of the substrate treated parts.

In the present research work a 42CrMo4 steel was considered in the following conditions: A) quenched and tempered, B) quenched and tempered + CrN PVD coating, C) nitrided D) nitrided + CrN PVD coating (duplex treatment).

The functional coating was obtained by means of an arc device settled to obtain a 5 µm total thickness.

In order to verify the coating properties under dynamic loading and to simulate a wide range of tribological damage conditions, an "Impact Test" apparatus was appositely arranged at the Politecnico of Milan (Fig. 1). During the Impact test each specimen was cyclically loaded up to 5×10^4 cycles by a spherical indenter (diameter 6 mm) [18-22]. At the end of each test samples were observed by means of a scanning electron microscope (SEM) in order to investigate the mechanism of

coating failure that resulted adhesive or cohesive.

The mechanical characterization included also hardness and microhardness investigations carried out in order to measure the hardness profiles and the Young's modulus of all considered samples. Using a rotating bending machine, fatigue tests were also carried out in the different conditions induced by thermochemical treatments and/or coatings. Experiments were executed at room temperature, in air, at a test frequency of 33 Hz using a sinusoidal load wave form and a load ratio $R=0$. The endurance limit was set after 3×10^6 stress cycles.

Results of the fatigue tests were analyzed according to the stair-case up and down method.

The fracture surfaces of the cycled samples were also examined by SEM in order to identify the microstructural parameters governing the fatigue crack nucleation. A good adhesion of the CrN layer was detected (Fig. 3) for all the examined substrate conditions; in addition no significant modification of the substrate mechanical properties can be reported (microhardness data on Fig. 2).

The impact test shows a better resistance for the duplex treated specimens with respect both nitrided samples and quenched and tempered + PVD coated ones.

Impact craters obtained at low loading applied stress (500 N and 5×10^4 cycles) do not show any cracks (Fig. 6-7); on the contrary when the maximum load is applied (1000N), several cracks affect the duplex treated surface.

The stress gradient value calculated from the difference between the coating Young's modulus and the substrate Young's modulus can be used to interpret the experimental results: the condition minimizing this difference minimizes the impact damage too (Table 3).

In all the considered conditions the rotating bending fatigue test (Table 2) allows the PVD tested to increase the fatigue limit even if in different percentages with respect to uncoated specimens. In particular, considering the nitrided 42CrMo4 steel grade, good fatigue behaviour was detected without any additional coating step. On the contrary a beneficial effect of PVD coating is evident in the quenched and tempered condition where the surface residual stress gradient due to the heat treatment is not able to produce a high level of compression stress and therefore to increase the fatigue behaviour.

In conclusion the introduction of a duplex treatment instead of a less expensive nitrided treatment has to be certainly considered for its positive effect in terms of improved wear resistance and load capability while can not be proposed only on the basis of a significant increases in the fatigue behaviour.