

# Resistenza a fatica di ruote dentate

Attraverso la tecnica PVD si vuole valutare la possibilità di incrementare la resistenza a fatica di ruote dentate rivestite con nitruro di cromo (CrN) depositato. La procedura di indagine proposta si basa sulla modellazione numerica del componente e, attraverso la misura delle tensioni residue indotte dal processo di deposizione e la rilevazione del profilo della microdurezza, viene proposto un metodo per valutare il numero di cicli di rottura di ruote dentate rivestite utilizzate nelle trasmissioni meccaniche in ambito automobilistico e motociclistico. Proprio la valutazione, per via numerica, del numero di cicli a rottura di ruote dentate rivestite e non rivestite (o del numero di cicli necessari per causare un danneggiamento parziale) ha consentito di evidenziare quali sono i miglioramenti indotti dalla presenza del trattamento in termini di incremento della vita del componente. I benefici apportati dal trattamento, non solo in termini di resistenza a fatica, sono stati analizzati ed evidenziati. In conclusione viene proposta una analisi di sensibilità degli effetti del trattamento (campo delle tensioni residue e caratteristiche meccaniche del substrato e del rivestimento) sulla velocità di propagazione dei difetti.

## Una tecnica per applicazioni meccaniche

La tecnica di deposizione PVD di rivestimenti sottili duri consente di migliorare le caratteristiche sia di resistenza a usura sia di resistenza a corrosione. Da anni la tecnica viene utilizza-

ta per rivestire componenti per le più svariate applicazioni meccaniche, dai componenti aeronautici e automobilistici agli utensili da taglio e agli stampi. Se da un lato il trattamento superficiale consente di migliorare le caratteristiche tribologiche ed è un ottimo sistema per proteggere il materiale in caso di ambiente aggressivo, dall'altro la tecnica di deposizione PVD potrebbe ridurre drasticamente la resistenza a fatica di componenti strutturali soggetti a carichi variabili. L'interfaccia rivestimento-substrato è infatti una zona debole, sede di discontinuità nelle caratteristiche fisiche e meccaniche del substrato e del rivestimento, è soggetta a un campo di tensioni residue di notevole entità e, se la superficie del componente non è adeguatamente preparata, si può verificare la delaminazione del rivestimento e la generazione di cricche di fatica in superficie. Se si considerano per esempio i componenti cromati, il rivestimento in questo caso è una ottima barriera contro la corrosione ma la vita dei componenti rivestiti è ridotta rispetto ai non rivestiti. Il campo tensionale residuo indotto dal rivestimento è forse il parametro che maggiormente influenza la resistenza a fatica e, nel caso in cui le tensioni in superficie siano di compressione, gli effetti sono benefici. Solo da pochi anni l'interesse per i rivestimenti sottili è cresciuto anche per le applicazioni in cui la resistenza a fatica, non solo la resistenza alla corrosione e all'usura, è il parametro discriminante per la scelta del processo di ottenimento di componenti quali bielle, alberi a gomiti, ruote dentate, palette di turbine. In letteratura sono

I rivestimenti sottili duri, CVD e PVD, si stanno sempre più diffondendo nelle applicazioni strutturali tanto che, partendo dall'ormai consolidato settore degli utensili da taglio, è sempre più frequente trovare esempi di particolari rivestimenti destinati all'industria aerospaziale, petrolifera, al settore dei trasporti, al settore biomedico o, più in generale, alla meccanica

disponibili articoli che riportano l'incremento, in termini di numero di cicli e di limite di fatica, di componenti rivestiti rispetto ai non rivestiti e proprio l'elevata entità delle tensioni residue indotte dal trattamento consente di giustificare il miglioramento del comportamento a fatica. Se da un lato dal punto di vista fenomenologico è ormai noto che se il rivestimento è opportunamente "progettato" si hanno effetti positivi in termini di resistenza a fatica, dall'altro le scelte del tipo di rivestimento (soprattutto la composizione chimica), della tecnica di deposizione dello spessore vengono condotte con considerazioni empiriche o demandate all'esperienza dell'operatore. Per scegliere i parametri ottimali di trattamento sarebbe quindi necessario sviluppare un modello che consentisse di valutare la sensibilità della variazione dei parametri di trattamento sugli effetti voluti in termini di resistenza a fatica. In letteratura sono presenti numerosi studi, sia sperimentali sia numerici, che trattano la caratterizzazione meccanica della superficie di componenti rivestiti con film sottili duri ma solo in pochi la resistenza a fatica è analizzata in termini di variazione del coefficiente di intensificazione degli sforzi di soglia e di propagazione della cricca dopo la nucleazione nel rivestimento o all'interfaccia rivestimento/substrato. In alcuni articoli la propagazione della cricca per fatica è stata simulata mediante il metodo degli elementi di contorno mentre il metodo degli elementi finiti ha permesso di simulare processi di nano-indentazione, al fine di avere informazioni dettagliate circa la durezza e la resistenza a frattura. Un modello numerico che consenta di simulare la presenza del rivesti-

mento su provini di flessione su quattro punti è stato sviluppato dagli autori e proprio attraverso tale modello è possibile prevedere il numero di cicli di rottura di provini con difetti localizzati in superficie in corrispondenza della zona rivestita. Il modello, ottimizzato per provini di laboratorio, dovrebbe essere "esportato" all'applicazione su componenti rivestiti con film sottili duri. Il componente analizzato è una ruota dentata a denti diritti in acciaio utilizzata in campo automobilistico. L'approccio iniziale è stato quello di valutare, attraverso la modellazione numerica, se il rivestimento sottile scelto per rivestire la ruota (PVD avente spessore  $4\ \mu\text{m}$ ) potesse incrementare la resistenza a fatica alla base dei denti del componente. Il modello numerico sviluppato necessita la conoscenza delle caratteristiche meccaniche del materiale della ruota e del rivestimento, la conoscenza del campo delle tensioni residue indotte dalla tecnica PVD sia nel rivestimento sia nel substrato, il profilo di microdurezza nel rivestimento e nel substrato. Il modello può essere utilizzato solo in assenza di delaminazione tra rivestimento e substrato.

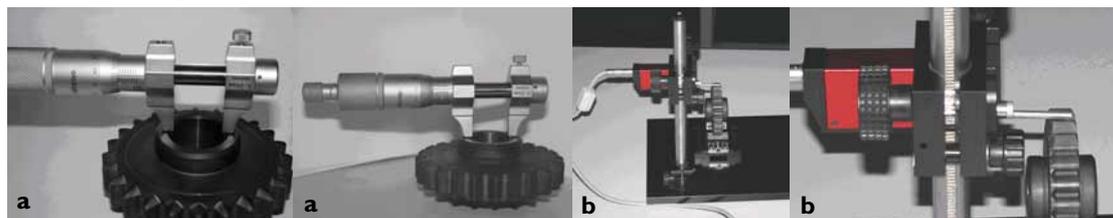
I difetti riproducibili sono quindi quelli dovuti a discontinuità presenti all'interfaccia rivestimento-substrato che possono essere simulati come cricche che propagano in direzione perpendicolare alla superficie del componente. Questa ipotesi è ben supportata solo se la superficie del componente è opportunamente preparata prima del rivestimento; del resto indagini reperibili in

letteratura hanno evidenziato che, se si cura la finitura superficiale del componente prima del trattamento, non si ha delaminazione. Le analisi condotte hanno messo in evidenza che il campo delle tensioni residue ha notevole influenza sulla propagazione delle cricche nucleate all'interfaccia rivestimento-substrato delle ruote dentate analizzate. Da una analisi di sensibilità della variazione del campo delle tensioni residue indotta dal trattamento sulla velocità di propagazione delle cricche di fatica è emerso che il parametro che governa il fenomeno è la tensione residua presente nello spessore del rivestimento (anche se limitato a soli  $4\ \mu\text{m}$ ). La scelta del materiale utilizzato come substrato è fondamentale per garantire adeguata leggerezza al componente; il passo successivo dello studio sarà valutare la possibilità di rivestire ruote dentate in alluminio o titanio e considerare non solo la resistenza a fatica alla base dei denti ma anche la resistenza a fatica superficiale.

## Geometria e materiale delle ruote dentate

Le ruote dentate oggetto del presente studio fanno parte del cambio di una vettura di media cilindrata. In tabella 1 sono riportate le caratteristiche geometriche rilevate delle ruote in oggetto (figura 1a). Il materiale delle ruote dentate è l'acciaio 18NiCrMo5 (Uni 7846) e le ruote so-

**I. Rilevazione delle dimensioni delle ruote dentate (a) e misure di rugosità (b).**



Modulo m [mm]	Numero di denti del pignone $Z_1$	Numero di denti della ruota $Z_2$	Spessore B [mm]	Angolo di pressione normale $\alpha$	Angolo di pressione al punto di contatto singolo più esterno $\alpha_{en}$
2.95	11	24	13.3	22°	25° 2' 53"

**Tabella 1.** Caratteristiche geometriche delle ruote dentate.

**Tabella 2.** Composizione chimica dell'acciaio 18NiCrMo5.

%C	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%S	%P	%Al
0.16	0.9	1.0	1.3	0.2	0.27	0.19	0.015	0.031

no state cementate. Lo spessore efficace del trattamento è pari a 1 mm. La composizione chimica dell'acciaio è riportata in Tabella 2. Le misure di durezza delle ruote non rivestite (penetratore conico di diamante con angolo al vertice  $120^\circ$ , con carico applicato 100 N per 8 s), condotte sui fianchi e sulla testa dei denti, in corrispondenza delle gole e sulle superfici laterali delle ruote, hanno fornito un valore medio pari a 55 HRC. Le misure di rugosità, condotte con un rugosimetro portatile DIAVITE DH-5, hanno fornito un valore medio  $R_a=0.67 \mu\text{m}$  (figura 1b). La misura delle tensioni residue (diffrattometro D/max RAPID Rigaku), condotta sulla cresta dei denti e in prossimità delle gole delle ruote dentate, per le ruote non rivestite ha fornito un valore medio pari a  $-200 \text{ MPa}$ .

## Caratteristiche del rivestimento

Il rivestimento delle ruote dentate è nitrato di cromo (CrN) depositato con la tecnica PVD. Lo spessore del rivestimento è pari a  $4 \mu\text{m}$ . Il modulo elastico del rivestimento è pari a  $E=303 \text{ GPa}$  mentre il coefficiente di Poisson è  $\nu=0.2$ . Le misure di rugosità, condotte con un rugosimetro portatile DIAVITE DH-5, hanno fornito un valore medio  $R_a=0.91 \mu\text{m}$ . La misura delle tensioni residue (diffrattometro D/max RAPID Rigaku), condotta sulla cresta dei denti e in prossimità delle gole delle ruote dentate rivestite, ha fornito un valore medio pari a  $-1200 \text{ MPa}$ . Dato che la penetrazione del fascio RX è pari a  $10 \mu\text{m}$  i valori di tensione residua misurati non sono quelli relativi al solo rivestimento (nel quale comunque vi è un gradiente di tensioni residue). La misura delle tensioni residue nelle ruote rivestite alla profondità del materiale base ha fornito un valore medio pari a  $-40 \text{ MPa}$ . Il valore della tensione residua effettiva presente nel rivestimento pertanto sarà circa

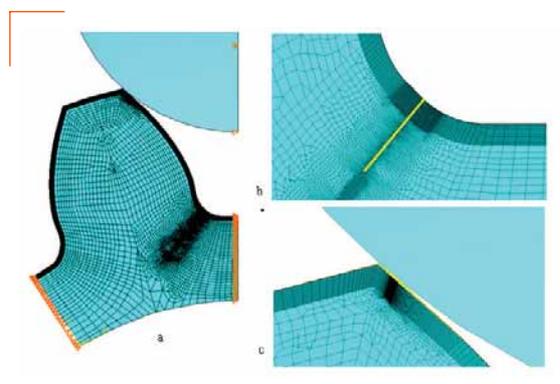
$-2500 \text{ MPa}$ , valore tipico misurabile per rivestimenti di questo tipo (da  $0.8 \text{ GPa}$  a  $3 \text{ GPa}$  in funzione del substrato). Le misure di microdurezza per il medesimo rivestimento ma, rispettivamente su acciaio duplex 2205 e su acciaio per utensili H11, hanno evidenziato che la durezza in superficie è pari a circa  $2500 \text{ HV}$ . All'interfaccia rivestimento-substrato la durezza si assesta sul valore medio della durezza del substrato e la durezza del rivestimento. Pertanto per le ruo-

te dentate rivestite la durezza in superficie è la medesima, mentre a cuore è stata utilizzata la durezza tipica per un acciaio da cementazione ( $300 \text{ HV}$ ). Il rivestimento ha dimostrato buona aderenza, ovvero assenza di delaminazione, con il substrato.

## Modelli numerici

La modellazione numerica per elementi finiti, supportata da modelli analitici reperibili in letteratura, ha consentito di valutare la velocità di propagazione di difetti presenti nel rivestimento, o all'interfaccia tra rivestimento e substrato, alla base dei denti delle ruote dentate in direzione perpendicolare alla superficie. La buona aderenza tra rivestimento e substrato ha confermato la necessità di simulare la sola propagazione di difetti in direzione perpendicolare alla superficie.

La procedura è la seguente: il modello numerico consente di valutare il fattore di intensificazione degli sforzi (in modo "discreto", per ciascun valore di profondità del difetto) e di paragonarlo con quello di soglia (ricavabile attraverso modelli reperibili in letteratura). Se il fattore di intensificazione degli sforzi è maggiore rispetto a quello di soglia la cricca può propagare. Se



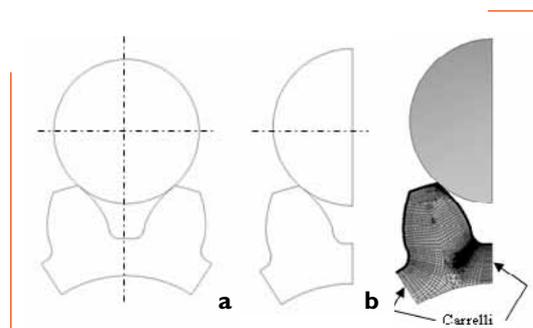
**3. Modello FEM del dente rivestito con difetto (a), particolare del rivestimento e del difetto nel modello FEM (b), particolare della zona di contatto tra rullo e dente (c).**

la cricca propaga si valuta la velocità di propagazione attraverso modelli di letteratura sviluppati per ruote dentate cementate e di conseguenza il numero di cicli che corrisponde alla propagazione fino a una data profondità. Sono state simulate differenti profondità di cricca:  $4 \mu\text{m}$ ,  $25 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$ ,  $190 \mu\text{m}$ ,  $300 \mu\text{m}$ , ipotizzando che la cricca non modifichi il proprio percorso durante la propagazione, ed è stato confrontato il numero di cicli di propaga-

zione con e senza la presenza del rivestimento. La procedura di calcolo numerico-analitica è stata convalidata dagli autori, per via sperimentale, nel caso di provini di flessione su quattro punti.

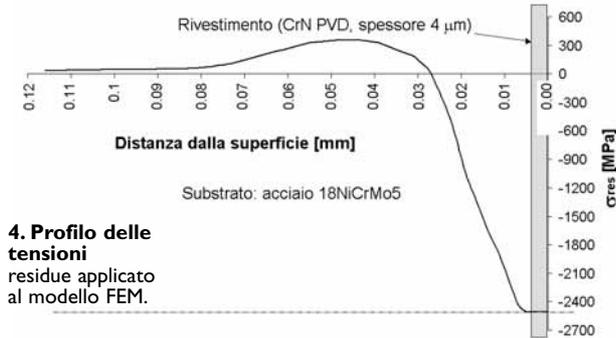
## Modelli agli elementi finiti

Il modello agli elementi finiti sviluppato è riportato in figura 2b. Il modello non consente di simulare l'ingranamento di ruota e pignone bensì di riprodurre le condizioni di prova in laboratorio descritte nelle indagini sperimentali (il rullo è l'elemento volvente di un cuscinetto in 100Cr6 avente durezza superficiale 60 HRC). In pratica l'azione di flessione indotta dall'ingranamento sul dente viene simulata attraverso l'azione di un rullo forzato tra due denti in corrispondenza del punto di contatto singolo più e-



**2. Modalità di applicazione del carico (a) e modello FEM (b).**

sterno (figura 2a). Il modello è realizzato con elementi finiti piani che riproducono un comportamento in stato piano di sforzo. Sono stati modellati due denti e, sfruttando la simmetria del problema, una sola metà del cilindro e dei due denti è stata riprodotta per elementi finiti (figura 2b). I vincoli di tipo carrello (spostamenti nulli in direzione perpendicolare alla superficie) imposti sulla superficie di contorno di sinistra del modello (figura 2b) non riproducono il reale vin-



**4. Profilo delle tensioni residue applicato al modello FEM.**

colo dei denti alla restante parte della ruota dentata. Non è stata riprodotta tutta la ruota dentata per non appesantire eccessivamente il modello; del resto il difetto è localizzato alla base del raccordo del dente, lontano dai vincoli, nella zona in cui si concentrano gli sforzi di flessione maggiori. La formulazione di un modello semplificato è giustificata anche dal fatto che l'obiettivo del presente studio è valutare se la presenza del rivestimento può incrementare la vita della ruota dentata trattata rispetto a quella non rivestita (è quindi importante soprattutto che i modelli siano uguali). Il modellatore utilizzato è MSC-Patran 2004, mentre il solutore è Abaqus 6.4. Sono state condotte analisi con comportamento del materiale lineare elastico e si è trascurata la plasticizzazione all'apice del difetto (figura 3). Le tensioni residue sono state applicate per mezzo di una procedura basata sui gradienti di temperatura: un profilo di temperatura opportuno, con la temperatura assegnata ai nodi dalla superficie verso l'interno, ha consentito di simulare la presenza del profilo delle tensioni residue ottenuto mediante misure sperimentali e riportato in figura 4. Il profilo delle tensioni residue è stato ricavato avendo nota solo la tensione residua in superficie e impostando un profilo equilibrato. Gli autori hanno verificato che variazioni nell'andamento del profilo delle tensioni residue non influenzano in modo significativo il valore del fattore di intensificazione degli sforzi ricavato attraverso il modello FEM dato l'elevato valore della tensione residua in superficie. Il carico applicato è relativamente alto (al cilindro che sollecita due denti è stata applicata una forza in direzione verticale pari a 52000 N che genera uno sforzo massimo alla base del dente pari a 1500 MPa).

È stato simulato un carico pulsante da zero. La variazione del fattore di intensificazione degli sforzi  $\Delta K$  è stata calcolata utilizzando i valori di spostamento relativo delle facce della cricca ( $\theta$  è la posizione angolare rispetto alla direzione di propagazione,  $E$  è il modulo elastico del materiale,  $\nu$  è il coefficiente di Poisson,  $r$  è la distanza dall'apice del difetto,  $u$  è la metà dello spostamento relativo fra le facce della cricca):

$$K_I = 2G \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \frac{u}{f(\theta)} \quad (5)$$

$f(\theta) = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ k + 1 - 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$  in stato piano mentre  $k = (3-\nu)/(1+\nu)$  in stato piano di deformazione.

Nelle tabelle 3 e 4 si riportano i valori di  $\Delta K_{eff} = (\Delta K_I - \Delta K_{res})$ , che tengono in considerazione l'effetto del campo delle tensioni residue, rispettivamente per la ruota non rivestita e per la ruota rivestita. Il trattamento PVD, date le elevate temperature di deposizione, elimina gli effetti benefici, in termini di tensioni residue, indotti dal trattamento di cementazione. Gli autori hanno verificato il medesimo comportamento per campioni pallinati e rivestiti con trattamento PVD [9]. Dall'analisi della tabella 3, per la ruota non rivestita, si ricava che la cricca può propagare ( $\Delta K_{eff} > \Delta K_{th}$ ) solo per difetti aventi profondità superiore a 4  $\mu\text{m}$ . Dall'analisi della tabella 4, per la ruota rivestita, si ricava che la cricca può propagare ( $\Delta K_{eff} > \Delta K_{th}$ ) solo per difetti aventi profondità superiore a 25  $\mu\text{m}$ .  $\Delta K_{eff}$  per la ruota rivestita con CrN assume valori apprezzabili solo per cricche con profondità maggiore a 25  $\mu\text{m}$ . È da notare inoltre che  $\Delta K_{eff}$  as-

sume circa lo stesso valore a 300  $\mu\text{m}$ , sia per la ruota rivestita sia per la ruota non rivestita; ciò significa che l'effetto benefico delle tensioni residue indotte dal rivestimento non si sente più a profondità elevate e il comportamento con o senza rivestimento è il medesimo per profondità di cricca superiori a circa 200  $\mu\text{m}$ . In tabella 5 è riportato il numero di cicli per raggiungere la medesima profondità di cricca rispettivamente per ruota cementata e ruota rivestita con CrN.

Dall'analisi della tabella 5 si osserva che per la ruota rivestita un difetto superficiale avente dimensioni inferiori a 25  $\mu\text{m}$  non può propagare, mentre per la ruota cementata si ha la propagazione, per il carico applicato, di difetti aventi profondità maggiore o uguale a 4  $\mu\text{m}$ . Per la ruota rivestita, perché la cricca propaghi fino a 300  $\mu\text{m}$  è necessario un numero di cicli pari a 111694 contro i 3098 cicli della ruota non rivestita. È evidente il beneficio indotto dalla presenza del rivestimento. La maggior parte del numero di cicli viene inoltre speso per passare da 25  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  per la ruota rivestita; proprio per difetti di queste dimensioni si risente maggiormente dell'effetto benefico delle tensioni residue in superficie che riducono la velocità di propagazione di tali difetti. Il modello numerico della ruota rivestita, senza però che sia applicato il campo delle tensioni residue indotte dal trattamento, porta a un numero di cicli dell'ordine di grandezza del numero di cicli della ruota cementata. Il campo tensionale residuo indotto dal trattamento PVD è pertanto il maggiore responsabile dell'incremento del numero di cicli, a parità di profondità di propagazione, per la ruota rivestita.

## Indagini sperimentali

È stato sviluppato un dispositivo di prova per verificare a flessione i denti degli ingranaggi og-

**Tabella 3.**  
Valutazione di  $\Delta K_{eff}$  per la ruota cementata e non rivestita.

Profondità Cricca [ $\mu\text{m}$ ]	Durezza [HV]	Distanza nodo [m]	$u$ [m]	$u_{res}$ [m]	$\Delta K_I$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$\Delta K_{res}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$\Delta K_{eff}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$\Delta K_{th}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]
4	600	1,E-06	3.436E-08	0,0E+00	5.62	0,00	5.62	3.33
25	600	5,E-06	2.141E-07	0,0E+00	15.65	0,00	15.65	4.50
50	600	5,E-06	2.953E-07	0,0E+00	21.59	0,00	21.59	4.50
100	600	5,E-06	3.897E-07	3,34E-10	28.49	0,00	28.49	4.50
190	600	5,E-06	4.757E-07	5,61E-10	34.77	0,00	34.77	4.50
300	600	5,E-06	5.231E-07	5,78E-10	38.24	0,00	38.24	4.50

**Tabella 4.**  
Valutazione di  $D_{K_{eff}}$   
per la ruota rivestita  
con CrN.

Profondità Cricca [ $\mu\text{m}$ ]	Durezza [HV]	Distanza nodo [m]	$u$ [m]	$u_{res}$ [m]	$\Delta K_I$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$\Delta K_{res}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$\Delta K_{eff}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]	$\Delta K_{th}$ [MPa $\sqrt{\text{m}}$ ]
4	1600	1,E-06	1,62E-09	0,0E+00	0,27	0,00	0,27	7,62
25	300	5,E-06	4,11E-09	0,0E+00	0,30	0,00	0,30	3,44
50	300	5,E-06	1,09E-07	8,71E-10	8,00	0,06	7,94	3,20
100	300	5,E-06	3,15E-07	4,74E-08	23,07	3,47	19,60	3,49
190	300	5,E-06	4,38E-07	3,62E-08	32,02	2,65	29,38	3,49
300	300	5,E-06	4,94E-07	2,51E-08	36,13	1,84	34,29	3,49

**Tabella 5.**  
Numero di cicli per  
ruota  
cementata e ruota  
rivestita con CrN.

	Profondità del difetto [ $\mu\text{m}$ ]	Numero di cicli	Profondità del difetto [ $\mu\text{m}$ ]	Numero di cicli
Ruota dentata cementata	4-25	2580	4-25	Non propaga
	25-50	266	25-50	106777
	50-100	145	50-100	3506
	100-190	75	100-190	924
	190-300	32	190-300	487
Ruota dentata rivestita CrN (4 $\mu\text{m}$ )				

getto del presente lavoro. Il disegno di assieme tridimensionale del sistema è riportato in figura 5 con un'immagine del sistema montato su una macchina di prova universale Galdabini da 100 kN. L'osservazione al microscopio delle ruote dopo le prove preliminari e l'utilizzo dei liquidi penetranti hanno evidenziato che sia per la ruota cementata sia per la ruota rivestita con CrN non si ha propagazione di cricche di fatica alla base dei denti (il carico applicato è lo stesso utilizzato nei modelli FEM che, senza difetto superficiale, non prevedono la propagazione di cricche di fatica nel caso di rivestimento CrN, oppure portano alla propagazione del difetto fino a 300  $\mu\text{m}$  dopo circa 3100 cicli, in presenza di difetti superficiali con profondità superiore a 4  $\mu\text{m}$ ). Questo risultato è giustificato probabilmente dall'assenza di difetti nella zona più sollecitata dei campioni (il modello numerico sviluppato consente di prevedere il numero di cicli per passare da una profondità di cricca a una maggiore solo se un difetto è già presente in superficie o in prossimità della superficie). L'analisi delle zone di contatto tra rulli e fianchi dei

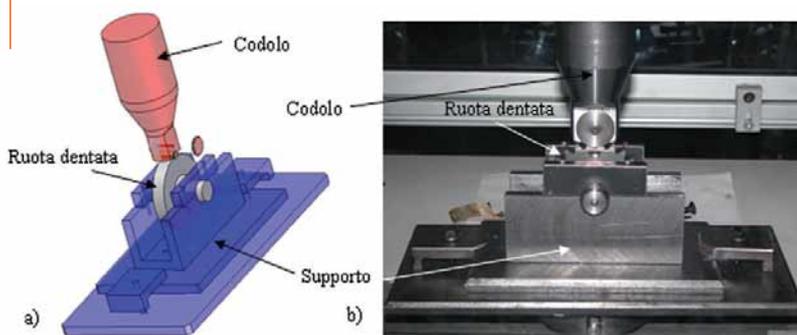
**7. Immagini della zona di contatto rullo-fianco del dente dopo le prove per le ruote rivestite con CrN.**



**6. Immagini della zona di contatto rullo-fianco del dente dopo le prove per le ruote cementate.**

denti consente invece di formulare alcune ipotesi sulla resistenza alla fatica superficiale, anche se il dispositivo di prova non è adatto a prove di fatica superficiale. Le immagini delle superfici di contatto dopo le prove ad alto carico per le ruote cementate sono riportate in figura 6, mentre

**5. Disegno di assieme tridimensionale del sistema di prova (a) e immagine del sistema di prova montato su una macchina di prova universale Galdabini da 100 kN (b).**



in figura 7 sono mostrate le superfici danneggiate delle ruote rivestite con CrN. Dalla comparazione delle immagini riportate nelle figure 6 e 7 è possibile notare come le impronte impresse sui fianchi dei denti rivestiti oltre a presentare un colore più scuro, probabilmente dovuto alla minore ossidazione, siano contornate da un profilo color nero antracite, presumibilmente lo spes-

sore del rivestimento stesso. Durante la prova della ruota rivestita (figura 7c) si è verificato un distacco in scaglie del materiale (rivestimento CrN), fenomeno assente per la ruota non rivestita. Tale fenomeno è decisamente da imputare all'elevato carico di prova che ha portato al danneggiamento eccessivo della zona interessata dal contatto, con distacco di scaglie di nitruro di cromo.

## Ringraziamenti

Si ringrazia l'ing. Emanuele Rota per il prezioso aiuto nell'esecuzione delle analisi numeriche e gli ingegneri Alessandro Colombo e Giovanni Raineri per la collaborazione nell'esecuzione delle prove sperimentali.

S. Baragetti, Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, Università degli Studi di Bergamo, sergio.baragetti@unibg.it

A. Terranova, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, angelo.terranova@polimi.it