

Problematiche metallurgiche a monte di cedimenti per usura di organi meccanici

E. Costa

L'introduzione della parola Tribologia nel 1967 ha rappresentato il culmine di un lavoro, avviato nella seconda metà del XIX secolo, e in via embrionale anche prima, mirato a inquadrare in una prospettiva unificante le varie problematiche sollevate dal degrado nel tempo dei componenti adottati per la trasmissione di potenza e moto. La stagione che ha visto la nascita del termine tribologia è stata anche contrassegnata da un rilevante sforzo di ricerca e sperimentazione, condotto congiuntamente presso strutture pubbliche e laboratori industriali in diversi Paesi, per accumulare dati e sviluppare modelli del comportamento a usura e attrito di diversi sistemi di ampia diffusione nel mondo industriale.

Parole chiave: tribologia, trattamenti termici superficiali, acciaio

INTRODUZIONE

Si potrebbe pensare che il riconoscere la dignità di un nuovo termine a una disciplina possa equivalere a una sua definitiva consacrazione, e quindi anche ad una sua stabile collocazione nel campo degli studi e delle ricerche, ma la realtà delle cose mostra attualmente una verità in parte diversa. In particolare, l'elemento che desta maggiori preoccupazioni è costituito dall'interesse modesto, e in molti casi drasticamente calante, del sistema industriale verso la ricerca e la sperimentazione tribologica di base [1]. È infatti noto che, senza gli stimoli provenienti dal campo dell'applicazione, qualsiasi disciplina tende a cristallizzarsi, perdendo vivacità e capacità di individuare nuove conoscenze e nuovi fenomeni [2].

Nella realtà, occorrerebbe invece considerare con più attenzione il continuo incremento nella complessità dei tribosistemi realizzati e operanti nel mondo industriale. Tale complessità è di due specie distinte:

- Da una parte, si colloca la "complessità tecnica", legata in particolare alla crescente integrazione di funzioni, che implica un'architettura dei sistemi sempre più articolata
- Dall'altra, si pone la "complessità sistemica", un concetto con risvolti anche di natura filosofica, che si può riassumere nel detto che "il tutto non è (mai) semplicemente riducibile alla somma delle parti componenti".

La complessità sistemica è una delle principali basi concettuali della tribologia, e si contrappone all'approccio riduzionista, legato cioè all'applicazione estensiva del principio di causa-effetto.

Mano a mano che aumenta il livello di complessità dei sistemi, la consapevolezza dei limiti dell'approccio riduzionista cresce, ed emerge altresì con chiarezza la consapevolezza che alcuni problemi funzionali possono trovare risposta solo se ci si affida a un serio programma di valutazione dell'efficienza tribologica (Figura 1).

È quindi parso utile rileggere alcuni elementi che stanno all'intorno della definizione dei tribosistemi di interesse industriale, con speciale riferimento al campo delle trasmissioni di moto e potenza, per cercare di descrivere alcuni dei fattori che, essendo connessi alle modalità di gestione del ciclo di fabbricazione di corrente utilizzo al momento, possono



Fig. 1 – Cedimento dopo poche ore di servizio su ruota dentata in acciaio non correttamente carbocementata. I prodotti industriali non sempre mostrano proprietà tribologiche adeguate per l'applicazione. Fatalità o mancanza di conoscenze? [Archivio CERMET].

Fig. 1 – Fatigue and wear failure after few hours in service on a steel gear not properly case hardened. Mechanical parts do not always have a tribological behaviour suitable for the application. Casualty or lack of knowledge? [CERMET's archive].

innescare problematiche di natura tribologica in fase di esercizio.

L'articolo intende perciò offrire alcuni momenti di riflessione sull'importanza della definizione degli standard relativi al trattamento termico, attraverso la discussione di casi concreti riguardanti cedimenti e difettosità di natura tribologica, e quindi associati al funzionamento, derivanti da cicli di trattamento termico scelti e/o effettuati in modo non adeguato rispetto all'esigenza operativa (Figura 2).

Questi casi illustrano diverse problematiche:

- Il primo riflette una situazione abbastanza comune di mancanza di dialogo fra azienda committente e fornitore di trattamento termico, con conseguenze scontate, ma che è sembrato opportuno riproporre
- Il secondo evidenzia una situazione in cui il trattamentista, posto a conoscenza delle condizioni d'esercizio del particolare, trova alla fine una soluzione adeguata
- Il terzo vede un soggetto intermedio, cioè indipendente e competente, come supporto di una situazione altamente critica

In generale è importante quindi definire bene cosa ci si

Enrico Costa
CERMET S.Cons.r.l. – Area Laboratorio Controlli e Ricerche

Memoria presentata al Convegno
"Attrito, usura e lubrificazione nella manutenzione industriale"
Napoli, 19 maggio 2005

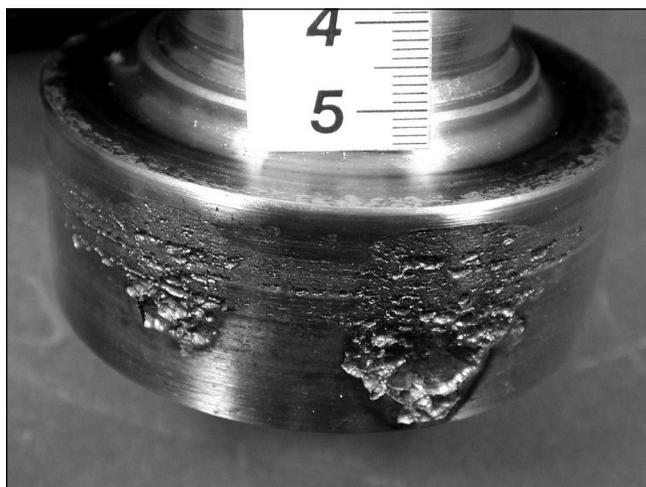


Fig. 2 – Usura da impatto ripetuto su rullo in acciaio temprato in superficie. A questo livello di danneggiamento, è essenziale capire le cause, suggerire i rimedi, o entrambe le cose? [Archivio CERMET].

Fig. 2 – Impact wear on a surface hardened steel roller. When such a damage is observed, the main goal is to understand why, or to define how to improve, or both? [CERMET's archive].

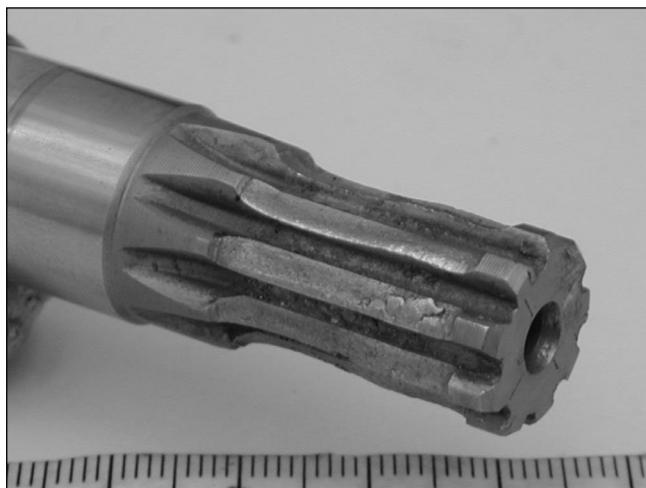


Fig. 3 – Usura severa su terminale scanalato di albero di motore elettrico dopo esercizio prolungato. L'incremento nelle prestazioni complessive di un sistema tribologico può determinare la comparsa di cedimenti rapidi per usura o attrito di singoli componenti, spesso in modo non prevedibile [Archivio CERMET].

Fig. 3 – Severe wear on the grooved edge of a rotating shaft in an electric engine after extended service period. Increasing the overall performance of a tribological system can lead to a failure in short time of single components, very often in an unpredictable way [CERMET's archive].

aspetta dal trattamento termico e soprattutto confrontarsi con chi opera e detiene le competenze nel settore, oltre a tenere conto delle caratteristiche del sistema tribologico che si vuole mettere in funzione.

“CITIUS, ALTIUS, FORTIUS”: IL MOTTO DEL MIGLIORAMENTO

Il motto olimpico si adatta molto bene alle esigenze di innovazione dei prodotti industriali nel mondo moderno. I requisiti di prestazioni più elevate (citus = più velocemente, altius = più in alto), e più affidabili (fortius = più fortemente, robustamente), sono ormai un imperativo per qualsiasi costruttore, magari in abbinamento all'affinamento della selezione dei materiali e dei cicli di fabbricazione, per conseguire anche una riduzione dei costi finali di produzione.

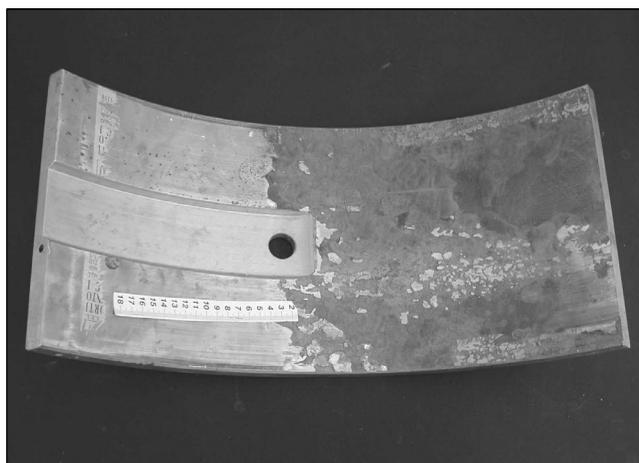


Fig. 4 – Usura per delaminazione di uno strato antifrizione su boccia in acciaio. L'introduzione di nuove tecnologie non sempre avviene con successo se non si rivede il disegno dei componenti del tribosistema [Archivio CERMET].

Fig. 4 – Delamination wear on a white metal coating on a steel bushing. Expected improvement sometimes cannot be reached only by introducing new technologies, but a general review of the design of tribosystem is required [CERMET's archive].

Questa spinta al miglioramento, insita nel concetto di concorrenza, determina una positiva tensione all'interno delle imprese, e stimola la curiosità e la creatività dei progettisti. Tutto ciò si traduce inoltre in effettivi benefici, dal punto di vista dell'utente finale, che può fruire di prodotti aggiornati e tecnicamente più efficienti.

In questa sfida al miglioramento continuo delle prestazioni, le problematiche tribologiche giocano un ruolo chiave, che non sempre è colto dalle imprese produttrici.

La reingegnerizzazione completa di un prodotto è assai onerosa, e richiede tempo. La prassi che usualmente viene adottata, specie per la realizzazione di apparati complessi, è invece quella di introdurre migliorie in alcune parti, capaci di accelerare taluni processi, mantenendo invariate le caratteristiche costruttive dei sistemi non aggiornati, per i quali è tuttavia da prevedere un aggravio delle modalità di lavoro. Quando le condizioni operative di tali sistemi superano le soglie tribologiche ammissibili, non sempre stimabili a priori solo sulla base di principi di estrapolazione, compaiono cedimenti e usure precoci (Figura 3).

Come fattore di rischio potenziale per il costruttore, vengono alla ribalta criticità ancora maggiori quando ci si propone di adottare materiali o finiture su cui non è presente in impresa un consolidato repertorio di esperienze. Infatti, in questo caso, le difficoltà di quantificare le soglie operative per i tribosistemi realizzati con materiali e processi innovativi, per i quali possono a volte manifestarsi cedimenti assolutamente peculiari, si abbinano a quelle legate alle problematiche di carattere esecutivo che l'introduzione di una nuova tecnologia comporta (affidabilità dei fornitori, metodi di lavorazione, stabilità dei processi, ecc.).

La prassi corrente per valutare l'idoneità all'uso di una nuova tecnologia, specie in alcuni comparti come quello delle macchine automatiche, consiste nel procedere alla sua applicazione su un pezzo di corrente produzione, spesso senza un'approfondita valutazione preliminare delle caratteristiche del tribosistema (geometria di contatto, tipo di sollecitazioni agenti, energia dissipata, ecc.). Il particolare prototipale viene poi sottoposto a test accelerati di funzionalità, dai cui esiti dipende l'accettazione o meno della nuova tecnologia proposta (Figura 4).

È chiaro che questo modo di procedere, dettato dall'esigenza di acquisire rapidamente gli elementi per una decisione, modificando il meno possibile le soluzioni tecniche adottate

dal costruttore, porta spesso a delusioni. Non a caso i fornitori di tecnologie di finitura e di materiali innovativi lamentano una certa "chiusura" da parte dei tecnici delle imprese costruttrici. Certamente questo rappresenta un terreno dove una migliore conoscenza delle basi della tribologia potrebbe sposarsi con le esigenze pratiche delle imprese, sia fornitrici sia utenti di tali tecnologie, suggerendo l'avvio di opportuni programmi di sperimentazione mirata e di innovazione.

IL DECENTRAMENTO DEI PROCESSI PRODUTTIVI

In ultimo, occorre considerare che i processi di produzione vengono sempre meno realizzati internamente alle aziende e sono sempre più decentrati all'esterno.

Ciò comporta che chi una volta realizzava una singola fase del processo produttivo, venga oggi coinvolto nell'approvvigionamento di particolari finiti.

Si tratta del concetto di filiera, per cui fornitori capo commessa hanno il compito di ideare e realizzare un ciclo di fornitura "chiavi in mano" per il committente finale.

Tutto ciò porta spesso benefici, perché si specializzano le competenze, dando così la possibilità di giungere a reali ottimizzazioni del processo di fabbricazione e delle prestazioni del prodotto, in termini di flessibilità (capacità di adattare

la risposta in funzione dei picchi di domanda), con il minimo di risorse; le aziende si trovano quindi sempre più spesso a trasferire ai fornitori esterni la necessità di adeguare i ritmi produttivi ed i livelli di specializzazione.

Tuttavia, in molti casi, i processi speciali non sono adeguatamente presidiati dalle aziende capo commessa, non essendo quello il loro prevalente ambito operativo, e ciò determina progressivamente una perdita di conoscenza del processo.

Il ruolo quindi degli operatori dei processi speciali, come sono i trattamenti termici, risulta fondamentale e decisivo per fornire le giuste indicazioni sulla realizzazione del processo, influenzando di conseguenza sulle prestazioni finali dei prodotti, anche se ciò può rappresentare un problema per gli operatori stessi, costretti a cercare un compromesso fra le esigenze specifiche di diversi committenti, impiantistica a disposizione e produttività.

ALCUNI CASI ESEMPLIFICATIVI

1) Coppia conica

Un utilizzatore doveva produrre una coppia conica destinata ad un utilizzo molto gravoso, e per questo decise di utilizzare un acciaio da cementazione legato al NiCrMo (17NiCrMo6-4 UNI EN 10084:2000), prescrivendo al trattamentista un ciclo di carbocementazione, con spessore efficace di indurimento di $1,3 \div 1,5$ mm, temprà e distensione per un valore di durezza superficiale di $61 \div 63$ HRC.

Il trattamentista eseguì il ciclo termico prescritto ed i particolari, dopo il controllo con esito conforme del valore di durezza superficiale, furono posti in esercizio.

Dopo un periodo di utilizzo di molto inferiore al previsto, in condizioni di esercizio compatibili con i dati di progetto, le coppie coniche manifestarono un cedimento esteso (Figura 5 e 6).

Le indagini di laboratorio accertarono che i valori di durezza superficiale e di spessore efficace di indurimento erano conformi, anche se verso i limiti massimi della tolleranza, le strutture metallografiche nelle zone non danneggiate si presentavano regolari, e la qualità del materiale corrispondente a quella dichiarata. Il danneggiamento evidenziava un duplice aspetto di usura e distacco della parte alta del dente.

Cosa era quindi accaduto? Che l'elevato spessore efficace di indurimento rispetto alle dimensioni della dentatura e l'elevata durezza superficiale avevano creato un eccessivo squilibrio tensionale fra lo strato cementato ed il nucleo, che sommandosi con le successive sollecitazioni funzionali aveva provocato la formazione di una cricatura nella parte superiore dei denti.

Il successivo distacco di frammenti e la loro interposizione nell'accoppiamento avevano portato alla progressiva espansione del danneggiamento fino ad una vera e propria "rilaminazione" del materiale del fianco dente.

Una maggiore collaborazione fra utilizzatore e trattamentista avrebbe probabilmente portato a scegliere uno spessore di indurimento più adeguato alle dimensioni della dentatura, ed un valore di durezza superficiale meno elevato, con maggiori probabilità di successo.

2) Pignone conico

Un utilizzatore doveva produrre un pignone conico, il cui principale requisito doveva consistere nella resistenza all'usura. Il trattamentista interpellato per un parere consigliò di adottare un classico acciaio da nitrurazione al CrAlMo (41CrAlMo7-10 UNI EN 10085:2003) con un ciclo termico di nitrurazione gassosa atto a conferire uno spessore di indurimento di $0,3 \div 0,4$ mm ed una durezza superficiale maggiore od uguale a 1000 HV. Nonostante le indicazioni suggerite dal trattamentista, a priori corrette, in breve tem-



Fig. 5 - Deformazione e usura della dentatura di un pignone [Archivio CERMET].

Fig. 5 - Wear and deformation on pinion teeth [CERMET's archive].

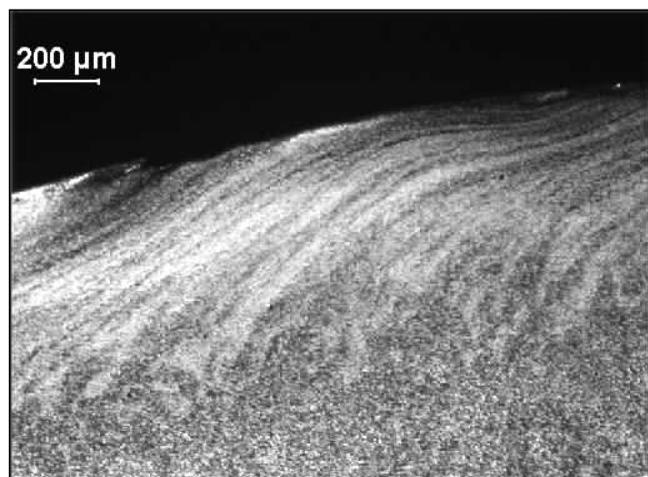


Fig. 6 - Deformazione superficiale del fianco del dente. 50x (in origine) - Attacco Nital 2% [Archivio CERMET].

Fig. 6 - Plastic deformation on the side of a tooth. 50x (in origin) - Chemical etching (Nital 2%) [CERMET's archive].

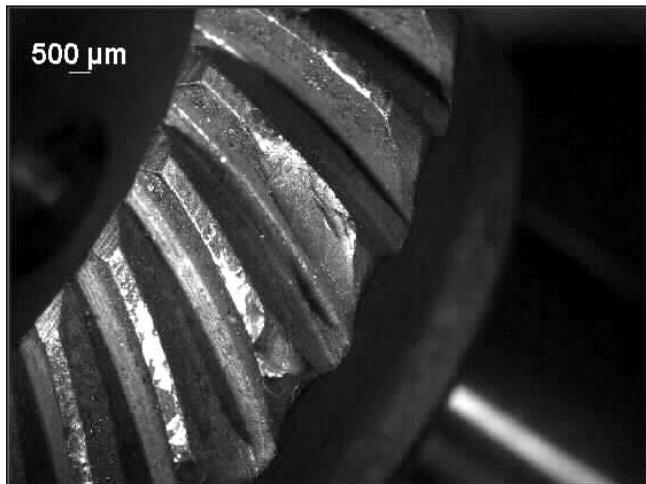


Fig. 7 – Deformazione e usura della dentatura di un pignone conico. 12x (in origine) [Archivio CERMET].

Fig. 7 – Wear and deformation on bevel pinion teeth. 12x (in origin) [CERMET's archive].



Fig. 9 – Componente in studio. [Archivio CERMET].

Fig. 9 – Studied part [CERMET's archive].

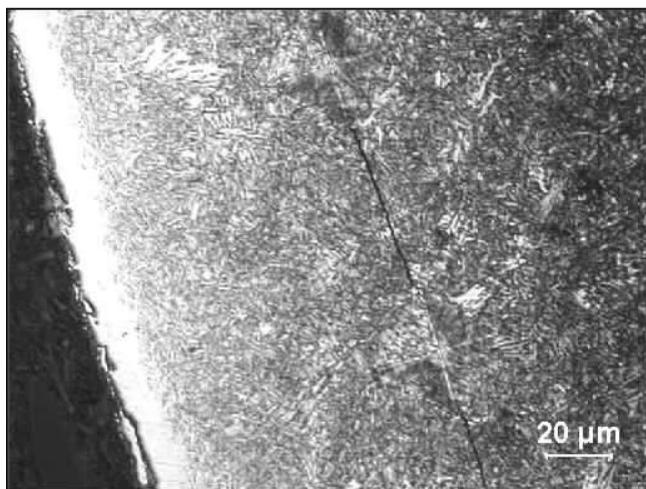


Fig. 8 – Fragilità dello strato nitrurato (una cricca congiunge due impronte di durezza Vickers) - 500x (in origine) – Attacco Nital 2% [Archivio CERMET].

Fig. 8 – Brittleness in the diffusion layer (a cracks joining two Vickers indentations). 500x (in origin) – Chemical etching (Nital 2%) [CERMET's archive].

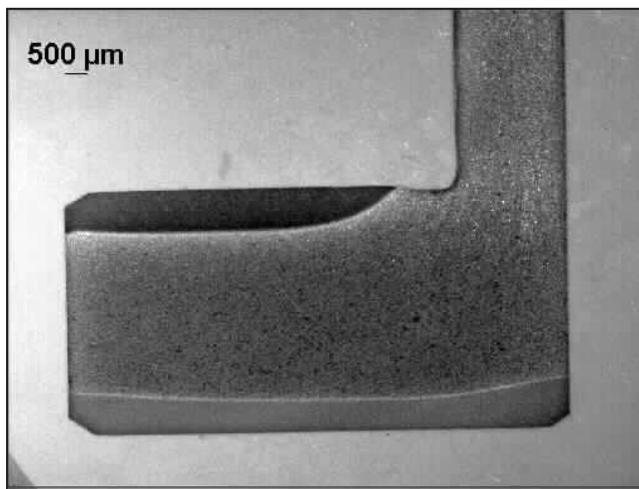


Fig. 10 – Zona del mozzo indurita per tempra superficiale. 6x (in origine) – Attacco Nital 2% [Archivio CERMET].

Fig. 10 – Surface hardened wheel-hub. 6x (in origin) – Chemical etching (Nital 2%) [CERMET's archive].

po si manifestò una scheggiatura dei denti del particolare (Figura 7).

In questo caso gli esami di laboratorio accertarono la conformità delle caratteristiche di materiale, della durezza superficiale e dello spessore indurimento. La causa quindi dell'inconveniente, anche per la concomitanza di un assemblaggio in esercizio non ottimale, era da ricercare nell'eccessiva presenza di "coltre bianca" superficiale e nell'elevata fragilità dei primi "strati" nitrurati, come dimostrato dalla formazione di una criccatura conseguente all'esecuzione di due impronte HV ravvicinate (Figura 8).

L'anomalia fu poi eliminata con l'utilizzo di un acciaio legato al solo CrMo (42CrMo4 UNI EN 10083-1:1998) e l'esecuzione di un ciclo di nitrurazione con minore spessore di indurimento.

3) Ruota dentata

Un utilizzatore doveva produrre un particolare per applicazione motoristica (Figura 9). Per lo specifico accoppiamento in esercizio con altri pezzi, il campione richiedeva un'elevata durezza e resistenza all'usura della dentatura, una sufficiente tenacità della "cartella" in prossimità del mozzo, ed

un'elevata resistenza all'usura dei diametri interno ed esterno del mozzo.

Considerando anche il costo del particolare e la necessità di ricavare il pezzo da barra, la collaborazione con vari trattamentisti aveva portato ad effettuare una serie di prove di cicli termici (tempra totale, carbocementazione, nitrocarbura-zione, ecc.) con limitati risultati: o insufficienti caratteristiche di resistenza all'usura, o eccessive deformazioni a seguito del trattamento termico.

La collaborazione con un centro di ricerca portò alla definizione di una soluzione soddisfacente, con la messa a punto di un ciclo di tempra e distensione in atmosfera leggermente carburante, seguito da una tempra superficiale per induzione sui diametri esterno ed interno del mozzo (Figura 10 e 11), utilizzando come materiale un acciaio non legato (C 55 UNI EN 10083-2:98).

Il basso spessore della dentatura del particolare permise di ottenere una durezza sufficiente in tale zona, mentre in prossimità del mozzo si ottenne una minore velocità di raffreddamento, ed una conseguente durezza inferiore. La successiva tempra localizzata per induzione del mozzo ottenne valori di durezza e spessore di indurimento adeguati alle esigen-

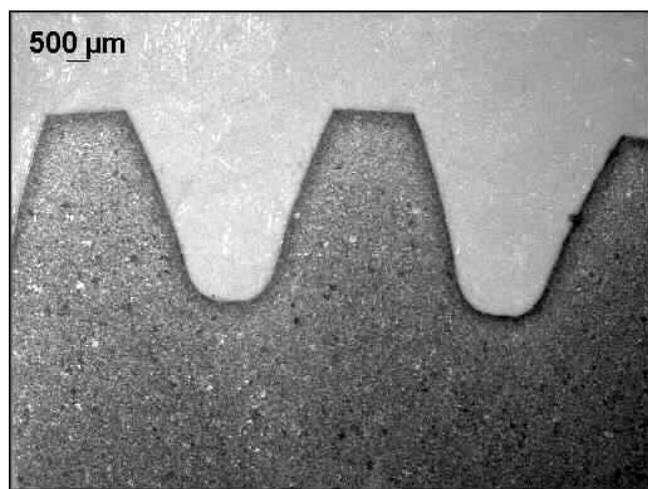


Fig. 11 – Zona dentata. 10x (in origine) – Attacco Nital 2% [Archivio CERMET].

Fig. 11 – Teeth after heat treatment. 10x (in origine) – Chemical etching (Nital 2%) [CERMET's archive].

ze funzionali richieste.

Lo scambio di informazioni e la collaborazione fra i tre “attori” aveva permesso di raggiungere un compromesso ottimale fra qualità ed economicità per la realizzazione del particolare.

CONCLUSIONI

Il trattamento termico riveste sicuramente il ruolo di un processo delicato e nel contempo complicato da adattare in ogni occasione ai diversi prodotti, al fine di conferire loro caratteristiche ottimali.

E' di importanza fondamentale quindi la collaborazione fra committente e fornitore nella risoluzione delle varie problematiche, e nel conseguimento di soluzioni tecnicamente efficaci e soddisfacenti, anche dal punto di vista economico. L'esperienza infatti porta a concludere che modificare le condizioni operative di un sistema senza un'analisi delle caratteristiche di ogni componente costituisce la premessa per molti cedimenti dovuti a usura.

Il successo, dal punto di vista dell'ottimizzazione del comportamento tribologico, deve quindi essere ricercato come naturale conseguenza del lavoro congiunto di chi progetta e di chi deve realizzare il componente.

In questo contesto è utile poter disporre di soggetti indipendenti e competenti per avvallare le soluzioni più critiche e per le quali una eventuale diffidenza reciproca fra committente e fornitore può costituire un ostacolo insormontabile.

I laboratori di ricerca, ad esempio, rappresentano un tramite importante fra committente e fornitore sia nella condivisione di standard di processo che per assicurare continuità allo sviluppo di prodotti.

Con la loro presenza possono favorire lo sviluppo di un approccio collaborativo tra cliente e fornitore di trattamenti termici, e in ogni caso possono offrire un contributo decisivo per il mantenimento della competitività dei prodotti e dei processi delle aziende, in particolare nei momenti di difficoltà di mercato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E.Costa, Tribologia del 2000: quali speranze, La metallurgia italiana n° 5/1998
- [2] W.O.Winer, E.C.Gwaltney, Trends and directions for tribology research and development in the coming years, Tribology 2000-plus, Esslingen (D), TAE, 2000

ABSTRACT

ON THE INFLUENCE OF METALLURGICAL DEFECTS IN WEAR FAILURES OF MECHANICAL COMPONENTS

Keywords:

tribology, surface heat treatments, steel

Almost 40 years have passed since the birth of the word Tribology. Even if great progress has been reached in the comprehension of some aspects of the tribological interaction between surfaces, a great work, both on the scientific and the technological point of view, is still to be done (Figure 1 and Figure 2). Wear and friction failures are still a general concern of mechanical Industry, and this statement is particularly true when considering the tribological properties of the surface heat treatments, which represent the most common way to improve wear and friction behaviour on steel parts.

The relationship between customer and heat treatment supplier must be oriented to a common aim: to produce parts which can be put in exercise demonstrating to be fit for purpose, with a total cost still acceptable for the market.

The paper deals with the analysis of typical features of the industrial manufacturing of mechanical components, involving critical paths for the selection of heat treatment parameters in order to obtain a satisfying tribological behaviour for the system produced (Figure 3 and Figure 4).

Owing to the lack of predictive power of Tribology, in the selection of the heat treatment process designers can only

make reference to their own experience and that of their suppliers: hence, a cooperative approach between customer and heat treatment supplier must be encouraged. Unfortunately, this does not always happen!

Three different cases are reported as examples in the paper:

- In the first case, there is no cooperation between customer and supplier, and therefore tribological results are not acceptable (Figure 5 and Figure 6)
- In the second case, there is more cooperation between customer and supplier, and the bad tribological performance obtained in a first step, is promptly improved in a second step, till reaching a very satisfying level (Figure 7 and Figure 8)
- In the third case, a third body is added, whose presence is particularly important in order to make customer and supplier confident each other, in adjunction with the technical contribution in terms of competence, know-how and experience (Figure 9, Figure 10 and Figure 11)

Some final remarks can be drawn:

- Tribology must develop a predictive power, in order to improve its general consideration in the design departments
- Customer and heat treatment supplier are not enemies, so both should work with the aim to cooperate in order to manufacture a competitive product, also in terms of tribological performance
- Research centres can give an important contribution in making customer and heat treatment supplier work together in a suitable and effective manner.