

Effetto del trattamento termico superficiale sulla resistenza al pitting di ruote dentate

M. Boniardi, P. Davoli, F. D'Errico, F. Fusetti

Dopo una breve descrizione dei principali fenomeni che possono provocare il cedimento in esercizio di ruote dentate, si riportano alcune considerazioni circa l'effetto dei trattamenti termochimici sulla resistenza di tali componenti. Il trattamento di indurimento superficiale per dentature di ingranaggi più diffuso è probabilmente quello di cementazione: questo trattamento offre notevoli vantaggi ma ha anche alcuni inconvenienti, primo fra tutti l'elevata temperatura di trattamento, che impone una rettifica successiva per rimediare alle inevitabili deformazioni del pezzo. La nitrurazione o la nitrocarburazione sono trattamenti alternativi, che presentano numerosi vantaggi rispetto alla cementazione, in particolare la temperatura di trattamento nettamente più bassa che limita le deformazioni e non obbliga necessariamente ad una successiva lavorazione. In questo lavoro vengono messi in evidenza i principali punti a favore e contro dei due trattamenti termochimici, sulla base dell'esperienza consolidata e della letteratura più autorevole, nonché dell'attività sperimentale svolta. Alla luce di quanto presentato, va quindi probabilmente riconsiderata la scelta sul trattamento di indurimento superficiale da preferire per una serie di applicazioni per le quali attualmente viene scelta la cementazione. La nitrurazione, infatti, per effetto della limitatissima variazione di forma dopo il trattamento termico, è sicuramente confrontabile con la cementazione e in qualche caso può garantire risultati addirittura superiori.

Parole chiave: trattamenti termici, trattamenti superficiali, fatica, difettologia

INTRODUZIONE

Ormai da tempo sono noti i principali fenomeni di danneggiamento coinvolti nella vita utile di una ruota dentata. Molte classificazioni sono state date in forma più o meno simile e, sinteticamente, i vari tipi di cedimenti possono essere raggruppati sotto tre grandi famiglie: 1) cedimenti per fatica flessionale al piede del dente; 2) cedimenti per danneggiamento superficiale e sub-superficiale (fatica da contatto); 3) cedimenti per grippaggio (scuffing o scoring) [1].

Il corretto dimensionamento di un ingranaggio in fase di progettazione porta solitamente all'esclusione quasi completa del primo tipo di rottura. La rottura per fatica a piede di dente difficilmente può manifestarsi nel caso di ruote dentate costruite mediante l'impiego di materiali adatti e che hanno subito un corretto trattamento termico, particolare cura deve essere posta anche al montaggio dell'organo di trasmissione, sì da escludere fenomeni di errato allineamento che possono essere causa di inaspettati sovraccarichi lungo la linea di contatto tra dente e dente. Come conseguenza, la maggior parte dei disservizi sono, allora, imputabili agli altri due meccanismi indicati.

I cedimenti per grippaggio, d'altra parte, sono di solito collegati a fenomeni di scarsa o carente lubrificazione che si instaurano per via delle condizioni operative imposte da velocità di rotazione, temperatura e carico trasmesso. In generale, riconsiderati i parametri di esercizio dell'ingranaggio, l'ottimizzazione del sistema di lubrificazione porta alla riso-

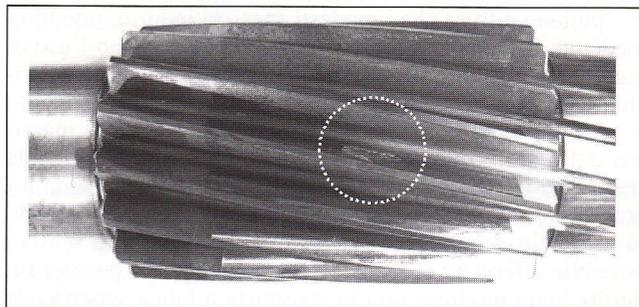


Figura 1: Pignone in 18 NiCrMo 5, spessore efficace di cementazione dopo rettifica: 0,9 mm, durezza superficiale pari a circa 700 HV (in evidenza la zona interessata dal pitting distruttivo).

Figure 1: Pinion manufactured from 18 NiCrMo 5 steel: effective layer hardened depth equal to 0.9 mm; surface hardness value about 700 HV (pitting area was circled in figure).

luzione del problema o, in alternativa, alla progettazione ex novo della ruota stessa.

Più complessa appare essere la questione che concerne le rotture imputabili a fenomeni di fatica da contatto, giacché entrano in gioco attivamente sia il materiale scelto, sia lo stato di sollecitazione locale prodotto dal contatto ripetuto in zone prossime alla superficie. Un tipico esempio di tale danneggiamento è mostrato in figura 1.

Lo stato di sollecitazione per fatica da contatto e quello dovuto alla fatica flessionale al piede del dente sono molto diversi tra loro. Nel caso della fatica da contatto la proprietà più importante del materiale utilizzato è certamente l'elevata durezza superficiale che garantisce il componente contro il danneggiamento per usura, mentre, nei confronti dei fenomeni di fatica flessionale, è necessario avere un materiale con adeguata resistenza meccanica e buona tenacità.

Marco Boniardi, Piermaria Davoli, Fabrizio D'Errico
Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano

Franco Fusetti

G. Elli Riduttori Settes S.p.A. Barbaiana di Lainate (MI)

Memoria presentata al 29° Convegno Nazionale AIM, Modena, 13-15 novembre 2002

I trattamenti termici e i trattamenti termochimici giocano allora un ruolo fondamentale permettendo di conciliare entrambe le specifiche nel medesimo tipo di acciaio. Da un lato il trattamento termico massivo (usualmente la bonifica) conferisce all'acciaio ottima resistenza e tenacità, mentre il trattamento superficiale (cementazione o nitrurazione) produce un sensibile incremento della durezza sulla superficie del dente inducendo, nel contempo, stati tensionali residui di compressione.

Nel caso del trattamento di cementazione l'incremento di durezza dipende dall'elevato tenore di carbonio (valori compresi tra 0,7 e 0,9 %) raggiunto negli strati superficiali a seguito del suo adsorbimento a temperature dell'ordine dei 900°C. L'indurimento superficiale si manifesta per fenomeni di soluzione solida interstiziale del carbonio nella matrice a base ferro che, dopo tempra, assume struttura martensitica. Le durezze raggiungibili sono comprese tra i 700 e i 900 HV, con spessori efficaci⁽¹⁾ dell'ordine di 1-2 mm. Al termine del trattamento di cementazione è sempre necessario effettuare le operazioni di lavorazione di finitura (rettifica) per via delle inevitabili deformazioni indotte sul pezzo e sulla dentatura in particolare, a seguito delle elevate temperature di processo comprese tra gli 825 °C ed i 925 °C e del successivo rapido raffreddamento (tempra in olio).

Differente è invece il caso della nitrurazione. I valori di durezza raggiungibili sono molto più elevati (900-1200 HV) e sono conseguenza della formazione di composti interstiziali dell'azoto (nitru) negli strati superficiali. Lo spessore interessato da tale fenomeno di indurimento, tuttavia, è di gran lunga inferiore rispetto quello ottenibile mediante cementazione, essendo limitato a pochi decimi di millimetro (0,1-0,4 mm). Le basse temperature di processo annullano, però, i problemi di deformazione della dentatura, rendendo praticamente inutile l'operazione di rettifica finale.

E' opinione diffusa che i modesti spessori induriti, ottenibili mediante il trattamento di nitrurazione, sconsiglino l'uso di ingranaggi nitruati, soprattutto in condizioni di elevati carichi trasmessi. La ben nota teoria di Hertz relativa al contatto tra due superfici individua, infatti, la presenza di un massimo dello sforzo tangenziale in zone sub-superficiali: tale stato di sollecitazione è responsabile della formazione di microfratture interne all'acciaio e del conseguente cedimento in esercizio del componente [2]. Di conseguenza sembra possibile affermare che quanto maggiore sia lo spessore indurito, tanto migliore sarà la resistenza a fatica superficiale della ruota dentata. Diretta conseguenza di ciò è la valutazione del trattamento termico da preferire in termini di affidabilità e durata: quello di cementazione sembrerebbe offrire, dunque, maggiori vantaggi.

Spesso allora gli ingranaggi nitruati sono relegati a settori di nicchia in componenti con specifiche prestazioni quali il settore aeronautico, il settore automobilistico sportivo o il settore navale. In tali ambiti gli svantaggi derivanti da tempi lunghi di processo⁽²⁾ possono essere ampiamente compensati da significative migliorie, quali maggiore resistenza all'usura, notevole resistenza al micro-pitting, ridottissimi problemi di scuffing, maggiore controllo della velocità di avanzamento della cricca per fenomeni di pumping da lubrificante [3]. Da non trascurare, infine, i minori costi derivanti dall'eliminazione del processo di rettifica finale che, nel caso di grosse ruote dentate per impieghi navali, ad esempio, possono ricoprire una notevole quota-parte del costo totale del prodotto.

La recente letteratura tecnica sta cercando di far luce sull'ef-

(1) Per spessore efficace di indurimento si intende la distanza (misurata dalla superficie esterna) in corrispondenza della quale si rilevano valori di durezza pari a 550 HV.

(2) Per ottenere spessori di 0,4-0,5 mm sono richiesti tempi di permanenza in atmosfera dell'ordine delle 120 ore o più

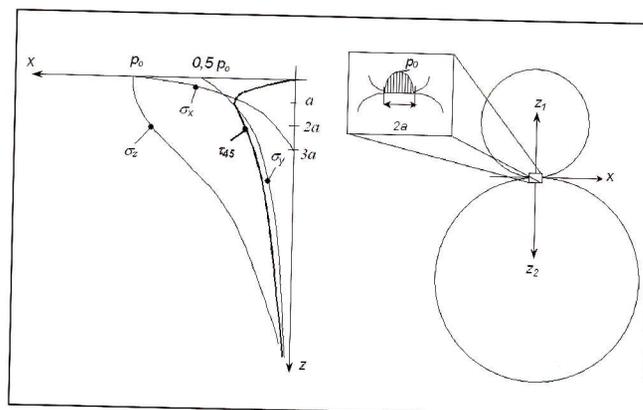


Figura 2: Andamento delle sollecitazioni originate lungo l'asse di carico in presenza di contatto Hertziano (puro rotolamento - primitiva del dente) in funzione della distanza dalla superficie.

Figure 2: Stress distribution below the surface (point belonging to load axis) caused by the contact pressure developed pressing together two elastic bodies (Hertz problem).

fettiva possibilità di ricorrere ad ingranaggi nitruati anche per quelle applicazioni tradizionali nelle quali il trattamento di cementazione appare ancora essere un caposaldo imprescindibile [4]. Si è riscontrato, infatti, che a parità di carico e di velocità in gioco, le ruote dentate nitruate non richiedono spessori induriti così profondi quanto quelli delle ruote dentate cementate: la differenza nell'entità dello spessore di indurimento appare essere ampiamente compensata dalla maggiore durezza superficiale e dalle migliori caratteristiche meccaniche del materiale base [5].

Nel presente lavoro si puntualizzeranno alcuni concetti fondamentali inerenti al danneggiamento prodotto per fatica da contatto, evidenziando le diverse modalità con le quali questo progredisce nel caso di ruote cementate e nitruate. I dati ed i risultati sperimentali ottenuti per una ruota dentata elicoidale cementata sono stati correlati con le più recenti esperienze reperite in letteratura relative alle ruote dentate nitruate.

STATO TENSIONALE DA CONTATTO

In figura 2 è riportato l'andamento delle sollecitazioni (lungo l'asse di carico z) in funzione della distanza dalla superficie interessata dal contatto tra due cilindri, premuti con una data pressione massima p_0 , nel punto mediano della fascia di contatto (zona interessata dalle deformazioni elastiche delle superfici antagoniste).

Poiché gli sforzi σ_x , σ_y e σ_z sono di compressione, tale distribuzione mostra come la sollecitazione critica in termini di potenziale danneggiamento del materiale risulti essere la τ_{45} ; tale sollecitazione registra un massimo in zona sub-superficiale ad una profondità pari a 0,79 volte la semi-ampiezza a dell'area di contatto Hertziano.

Consideriamo ora l'effetto di un trattamento termochimico: sia nel caso di trattamenti di cementazione che di nitrurazione si osserverà l'insorgenza, nelle zone superficiali dello strato indurito, di fenomeni di tensionamento residuo di compressione.

Nel caso della cementazione, lo stato di compressione è legato all'incremento del tenore di carbonio in superficie. In superficie la struttura austenitica dell'acciaio (ricca di carbonio) subisce la trasformazione in martensite a temperature inferiori rispetto quelle delle zone a cuore (caratterizzate da bassi tenori di carbonio). Come conseguenza la trasformazione strutturale $\gamma \rightarrow \alpha$ avverrà dapprima in corrispondenza delle zone a ridosso dell'interfaccia cuore-superficie, procedendo successivamente sia verso la superficie che verso

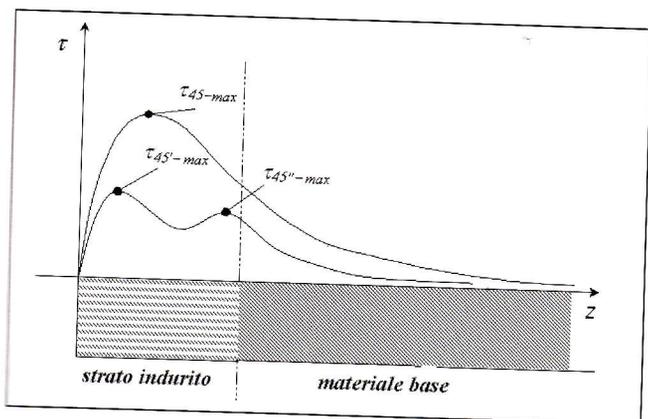


Figura 3: Confronto tra l'andamento della massima tensione tangenziale Hertziana da contatto e quella ottenuta tenendo conto del contatto Hertziano e delle sollecitazioni residue da trattamento termochimico.

Figure 3: A comparison between the stress distribution induced by a Hertzian contact which involved an homogeneous material, and that one relative to a case hardened material in which residual stress are present, too.

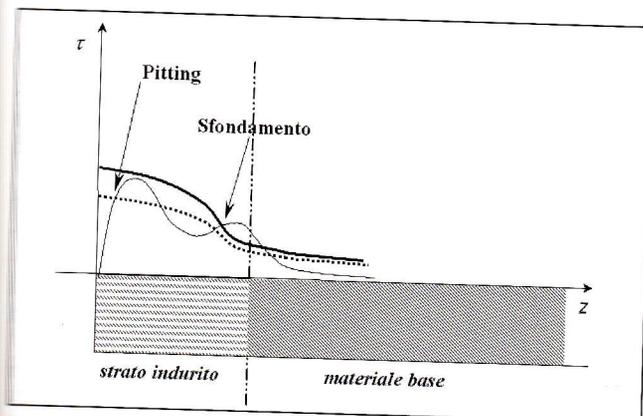


Figura 4: Schematizzazione dei fenomeni che provocano la formazione di pitting (linea tratteggiata) o di sfondamento dello strato indurito - case crushing - (linea continua) in una ruota dentata trattata superficialmente.

Figure 4: Subsurface failures caused by pitting or case-crushing phenomena: an exemplifying scheme.

l'interno. Le ultime zone ad essere interessate alla trasformazione saranno gli strati più esterni.

Dal momento che la trasformazione da austenite in martensite avviene con aumento di volume, in proporzione al tenore di carbonio disciolto, si manifesterà un tensionamento residuo di compressione in superficie ed uno stato di tensionamento residuo a trazione a cuore.

Si noti, in aggiunta, che un'eccessiva permanenza in atmosfera carburante, al fine di spingere quanto più in profondità la cementazione, spesso provoca effetti indesiderati. In presenza di strati superficiali iper-carburati, l'inizio della sovraccitata trasformazione avverrà contemporaneamente sia in corrispondenza degli strati più esterni che all'interfaccia cuore-superficie, producendo inevitabilmente l'insorgenza di tensioni residue di trazione [6,7].

La situazione legata al trattamento di nitrurazione è, invece, assai diversa. Il processo di nitrurazione, se condotto al di sotto delle temperature critiche di trasformazione ($\gamma \rightarrow \alpha$), non produce alcuna modifica alla microstruttura del materiale base [8]. Lo stato di tensionamento residuo di compressione deriva dalla formazione dei nitruri di ferro e/o degli altri elementi di lega negli strati superficiali con conseguente aumento locale del volume della massa metallica.

Appare evidente, quindi, che per una corretta valutazione

degli sforzi critici che possono indurre eventuali danneggiamenti nelle ruote dentate, occorre tener conto anche dello stato di tensionamento residuo.

In presenza di contatto Hertziano e di tensioni residue di compressione, l'analisi dello stato di sollecitazione è quello mostrato qualitativamente in figura 3.

Chiaramente rilevabili sono i due massimi nel diagramma relativo alla tensione tangenziale in funzione della distanza dalla superficie: l'uno in corrispondenza di una zona sub-superficiale, l'altro in corrispondenza dell'interfaccia cuore-superficie.

In sintesi è possibile affermare che i valori della tensione tangenziale legata al contatto Hertziano si riducono in presenza degli sforzi residui di compressione dovuti al trattamento di superficie. Questo diminuzione interessa tutte le porzioni sub-superficiali dello strato indurito, fino all'interfaccia con il materiale base (cuore). Qui, infatti, la tensione tangenziale raggiunge valori più elevati, a causa del tensionamento residuo di trazione (di cui si è discusso in precedenza), provocando la comparsa di un picco secondario di massima sollecitazione tangenziale.

Per valutare, in termini qualitativi, il tipo di danneggiamento indotto in una ruota dentata si può sovrapporre l'andamento della τ_{45} (tensione massima tangenziale) all'andamento della τ_{lim} (resistenza limite a fatica a taglio del materiale). Se il punto di intersezione risulta essere localizzato nelle immediate vicinanze della superficie, si incorrerà in fenomeni di pitting superficiale distruttivo. Se altrimenti tenderà a localizzarsi in corrispondenza dell'interfaccia cuore-superficie, ci si troverà di fronte a fenomeni di sfondamento dello strato indurito (case-crushing). (vedi figura 4).

Dal punto di vista fenomenologico del danneggiamento, comunque, la principale modalità di cedimento di una ruota dentata correttamente progettata [9] è per pitting superficiale e/o subsuperficiale [10].

L'INNESCO DELLE CRICCHE SUPERFICIALI E LA LORO PROPAGAZIONE

Sulla base di quanto visto sino ora, l'innescò delle cricche che portano al distacco di piccole porzioni di materiale (pitting) si localizza sempre in prossimità della superficie. Una distinzione è però doverosa.

1) Un primo approccio al problema prende in esame la possibilità di fenomeni di micropitting: il danneggiamento si origina proprio sulla superficie dell'acciaio in corrispondenza dei picchi del profilo di rugosità, dove hanno sede i microcontatti tra dente e dente con elevate sovra-pressioni locali. Qui si instaura un regime di tensioni analogo a quello derivante da un macrocontatto, salvo, ovviamente, l'entità delle massime tensioni raggiunte, sicuramente più accentuate [4]. Il fenomeno è generalmente conosciuto anche come micropitting correttivo, visto che porta solitamente ad una lucidatura spinta delle superfici a contatto. Le pressioni tendono allora a ridistribuirsi sulla superficie "lucidata" e, conseguentemente, il fenomeno si arresta. Talvolta, invece, il danneggiamento riesce a progredire per effetto di fenomeni di ramificazione secondaria (branching) che spesso provocano la formazione di micropit (che evolveranno in macro-pitting diffuso).

Quanto descritto è il tipico fenomeno che si manifesta su ruote dentate cementate. Le cricche superficiali si propagano inizialmente con un angolo compreso tra 30° - 60° rispetto alla primitiva del dente per poi spingersi in profondità di alcune decine di micron (10 - $20 \mu\text{m}$). Successivamente il piano di avanzamento della cricca devia parallelamente alla superficie esterna del dente (crescita complanare), per poi risalire in superficie dando così origine al pit. Frequentemente

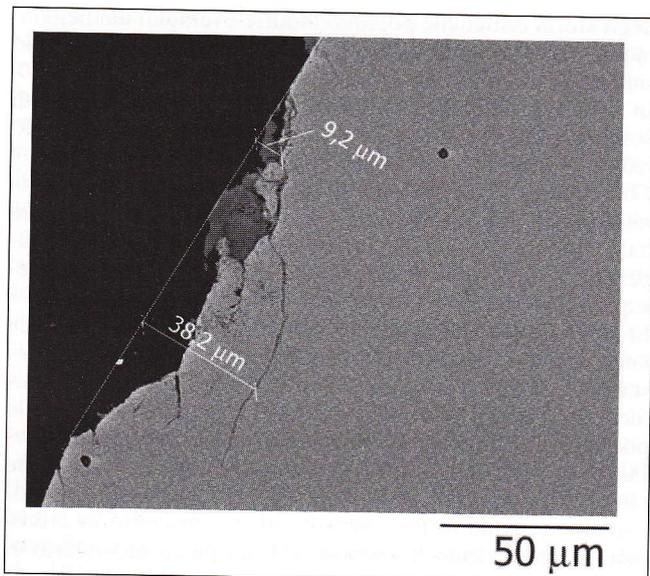


Figura 5: Esempio di micropitting superficiale interessato da fenomeni di branching (materiale 18 NiCrMo 5, cementato con spessore efficace pari a circa 0,8 mm, durezza superficiale 650 HV).

Figure 5: An example of micropitting damaging in presence of branching phenomena (carburised gear manufactured by 18 NiCrMo 5, effective layer hardened depth equal to 0.8 mm, surface hardness about 650 HV).

si assiste alla formazione di cricche secondarie che si propagano a partire dal ramo della cricca principale. Tali cricche secondarie sono molto più dannose delle precedenti poiché possono interessare strati sub-superficiali anche molto distanti dal profilo esterno. Un esempio particolarmente significativo in tal senso è evidenziato in figura 5.

Si osservi come la profondità di questi iniziali pit sia assai limitata: non si superano mai i 50-100mm di profondità.

E' evidente come, in questo caso, non è tanto la profondità di indurimento l'aspetto vincolante del trattamento, quanto piuttosto la durezza e tenacità dello strato nonché, cosa forse più significativa, l'insorgenza di stati tensionali residui di compressione.

Tenendo presente che le iniziali fessurazioni superficiali possono ramificarsi (branching) e proliferare anche a partire dalle cricche secondarie, si può dedurre che quanto più gli strati superficiali sono interessati da condizioni favorevoli alla propagazione delle cricche, tanto maggiore sarà la probabilità che il micropitting degeneri in macropitting distruttivo. In tal caso uno stato tensionale residuo di compressione non può che produrre effetti benefici, in quanto provocherà un'azione di contrasto all'apertura delle cricche (crack arrest).

Una effetto non trascurabile è connesso anche al tipo di lubrificazione imposta. Una volta formata la cricca, infatti, se il lubrificante rimane intrappolato all'interno, può da una lato ridurre l'attrito tra le superfici antagoniste, favorendo in tal modo la propagazione secondo il modo II di apertura delle cricche, dall'altro può instaurare i già citati fenomeni di pompaggio (pumping), favorendo la crescita secondo il modo I. Quest'ultima condizione è più frequente in regime di lubrificazione elastoidrodinamica, che impone all'apice della cricca stati di pressurizzazione elevati tali da favorire l'apertura [2].

Di gran lunga migliore risulta la resistenza al micropitting degli strati nitruati. A questo proposito si veda la figura 6, che si riferisce ad una ruota dentata nitruata. Il componente (con modulo pari a 4,2) ha lavorato per 10^8 cicli con una sollecitazione per fatica da contatto $\sigma_H = 1850$ MPa e non ha manifestato alcun fenomeno di macropitting [11]. In ogni caso il limitatissimo danneggiamento osservabile in figura 6

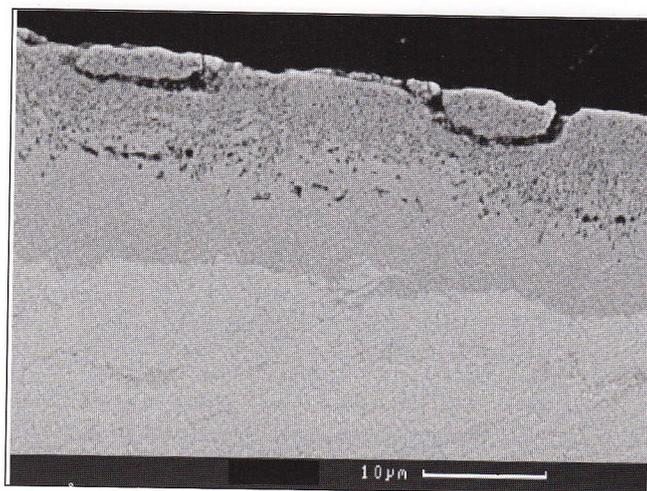


Figura 6: Esempio di micropitting superficiale (acciaio 31CrMo12, nitrazione a gas, durezza superficiale 1000 HV) che non ha dato origine a fenomeni di macrodanneggiamento [11].

Figure 6: Example of micropitting (31CrMo12 steel, gas nitrided, surface hardness about 1000 HV) not interested by macroscopic failure [11].

non ha provocato il disservizio dell'ingranaggio.

Il migliore comportamento delle ruote dentate nitruate rispetto a quelle cementate è da collegare alla presenza della coltre bianca ed alle caratteristiche fisico meccaniche dello strato nitruato.

Innanzitutto non si osservano fenomeni di branching con conseguente propagazione della cricca verso gli strati più interni del dente: tale caratteristica dipende dal differente comportamento a frattura degli strati nitruati rispetto agli strati cementati che, per contro, hanno anche la tendenza negativa a manifestare fenomeni di frattura intergranulare [12, 13].

Inoltre la natura quasi-ceramica degli strati nitruati induce nella zona prossima alla superficie (la coltre bianca) un aumento del modulo di elasticità rispetto agli strati cementati che, nonostante l'arricchimento in carbonio, non subiscono alterazioni in tal senso. Tale incremento comporta una diminuzione nella dimensione dell'area di contatto Hertziano con conseguente spostamento verso la superficie del picco di massima tensione tangenziale τ_{45} .

2) Un'altra ipotesi sul danneggiamento superficiale delle ruote dentate prende le mosse dalla teoria di Pedersen e Rice [2]. In tal caso la cricca nuclea nel punto dove il rapporto tra lo sforzo tangenziale applicato e la resistenza a fatica del materiale raggiunge il massimo valore. In questa zona l'applica-

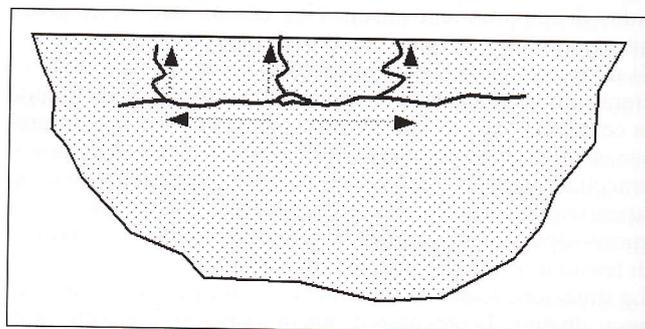


Figura 7: Schema dell'avanzamento planare di una cricca sub-superficiale, con propagazione verso la superficie secondo direzioni ortogonali (le frecce indicano la direzione di propagazione per fatica).

Figure 7: A scheme to explain the planar growth of a sub-surface micro-crack; the surface layer is secondarily interested by the rising to the surface (spalling growth of cavities).

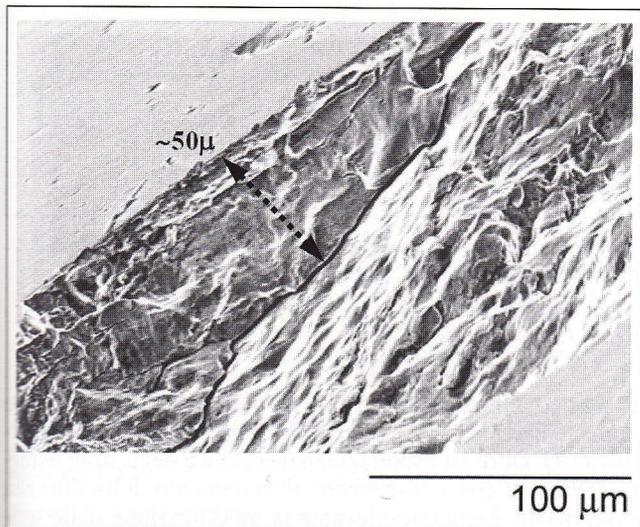


Figura 8: Esempio di cedimento sub-superficiale (spalling o pitting distruttivo). Si riconosce la traccia del piano di avanzamento complanare della cricca (acciaio 18 NiCrMo5)

Figure 8: An example of sub-surface failure (Spalling with macropitting). It is recognizable the trace of the crack opening plane (18 NiCrMo5 steel).

zione ciclica del carico porta ad una locale plasticizzazione del materiale, con conseguente innesco di microfratture [2]. Una volta innescata, la cricca propaga prevalentemente con crescita complanare, risalendo in superficie con piani di frattura pressochè ortogonali alla superficie (vedi figura 7).

Tale meccanismo, generalmente indicato con il nome di spalling (o pitting distruttivo, se la zona di materiale asportata risulta di dimensioni più contenute) [14], si compone di due stadi: una prima fase durante la quale la cricca nuclea, preferibilmente in corrispondenza di difetti e/o discontinuità microstrutturali [15] (inclusioni, bordi grano, ossidazioni intergranulari, ecc...) e una seconda fase durante la quale essa avanza per fatica prevalentemente con modalità intergranulare. Il tempo occorrente per la nucleazione del difetto è molto ridotto: possono formarsi fessurazioni all'interno del case già durante i primi cicli di vita del componente. La maggior parte della vita utile è spesa quindi in propagazione, qualora le condizioni lo permettano. Spesso, infatti, è possibile osservare cricche sub-superficiali non propagate, ovvero con dimensioni inferiori alla dimensione critica.

Da un punto di vista frattografico si osserva quanto mostrato in figura 8: si noti la traccia del piano di avanzamento sub-superficiale parallelo alla superficie, posto ad una distanza di circa 50 µm dalla superficie. Si osservi come, secondo questa ipotesi di cedimento, il danneggiamento si inneschi nelle zone molto prossime alla superficie. Anche in questo caso, quindi, sono le caratteristiche superficiali dello strato e non tanto lo spessore di indurimento i parametri che governano il danneggiamento.

L'EFFETTO DEL TRATTAMENTO TERMOCHIMICO SULLA RESISTENZA A FATICA

Lo spessore indurito risulta essere il principale parametro cui ci si riferisce, normalmente, per determinare l'effettiva qualità del trattamento termochimico: è noto infatti che al crescere della profondità di indurimento cresce proporzionalmente l'entità della zona interessata da benefici stati tensionali di compressione. Sperimentalmente è stato rilevato un migliore comportamento a fatica del componente al crescere della profondità di cementazione o nitrurazione [16, 17].

Tuttavia, sia nel caso della cementazione che della nitrura-

zione, un trattamento troppo spinto (al fine di aumentare lo spessore indurito), porta a risultati controproducenti. Per uno strato cementato si può rischiare di incorrere in fenomeni di iper-cementazione con il conseguente instaurarsi di stati tensionali residui di trazione, particolarmente dannosi nei confronti dell'innesco di micropitting. In generale, poi, uno strato indurito superficialmente per fenomeni termochimici, ha una tenacità a frattura minore rispetto al materiale base: lo spessore dello strato deve quindi essere limitato a quanto strettamente richiesto dalle caratteristiche tecniche e dal comportamento in esercizio del componente meccanico.

La profondità ottimale dovrebbe essere contenuta entro un certo intervallo, in funzione della dimensione del pezzo da trattare [18, 19]. Detto "t" lo spessore dello strato indurito e "D" la dimensione del componente⁽³⁾ i valori più accreditati del rapporto t/D sono variabili tra 0,05 e 0,11 (al variare della durezza del materiale base) oppure tra 0,10 e 0,22 (al variare del raggio della primitiva) [20, 21].

Un ruolo fondamentale è legato anche alle caratteristiche meccaniche del materiale base, vista la stretta correlazione esistente tra lo stato tensionale in superficie e quello all'interfaccia con il metallo base: aumentando lo spessore cementato (entro i limiti considerati di sicurezza al fine di preservare il dente da fenomeni di indebolimento superficiale), aumenta, infatti, la profondità della zona interessata dalle tensioni residue a compressione. Dato che tali tensioni dovranno essere compensate nelle porzioni più interne del materiale, a ridosso dell'interfaccia con il substrato si dovrà instaurare un campo di sforzi residui di trazione (con regimi, in valore assoluto, sicuramente più contenuti rispetto quelle a compressione).

Incrementare la capacità di carico del dente mediante l'ottenimento di spessori induriti maggiori, da un lato permette di abbattere il primo picco dello sforzo di taglio (figura 3), ma dall'altro potrebbe sortire l'effetto indesiderato di incrementare il secondo picco (per sovrapposizione con gli sforzi residui di trazione), sino a sovraccaricare il materiale base oltre il suo limite di resistenza a fatica.

Qualcosa di simile si verifica anche per gli strati nitrurati. Prove condotte su un acciaio AISI 4140, sottoposto a nitrurazione ionica per tempi variabili, hanno messo in evidenza che tempi di trattamento attorno alle 8 ore, danno i risultati migliori in termini di massima tensione a compressione raggiungibile. Tempi prolungati inducono effetti indesiderati in analogia a quanto visto per gli strati cementati [17].

In una ruota dentata nitrurata il cedimento tende ad originarsi in zone interne al materiale base, a ridosso dell'interfaccia con lo strato indurito; il picco Hertziano delle τ_{45} si localizza, a causa del limitato spessore dello strato indurito, in prossimità dell'interfaccia case-core. Aumentare lo spessore nitrurato potrebbe, nella migliore delle ipotesi, lasciare pressochè inalterato il picco Hertziano, per via dell'esiguo incremento delle tensioni residue in zona di transizione. Con buona probabilità, anzi, si potrebbe addirittura incorrere nell'amplificazione del picco stesso, se questo dovesse localizzarsi molto in prossimità dell'interfaccia.

Un ulteriore aspetto da sottolineare, relativamente al cedimento di strati nitrurati, è la presenza di inclusioni non metalliche. Le inclusioni non metalliche fungono da inneschi preferenziali, dando origine alle ben note morfologie ad occhio di pesce (fish eye) che caratterizzano le superfici di frattura [22-24].

L'AUSTENITE RESIDUA NEGLI STRATI CEMENTATI

L'incremento oltremisura dello spessore dello strato cementato si accompagna con l'aumento del tenore di carbonio ne-

⁽³⁾ Nel caso di ruote dentate la dimensione di riferimento "D" è data dal modulo normale (m_n) della dentatura.

gli strati superficiali (iper-cementazione): è così favorito l'aumento significativo dell'austenite residua oltre a fenomeni di precipitazione di carburi e ossidazione a bordo grano. Quale sia l'effetto dell'austenite residua sulla resistenza alla fatica da contatto, non è stato ancora chiarito in modo definitivo.

I pareri sono contrastanti, essendo la letteratura a riguardo in parte contraria [25-28] ed in parte favorevole [29-33] alla sua presenza all'interno dello strato indurito.

L'elevata deformabilità che contraddistingue la fase γ all'interno di una struttura martensitica molto dura, produce effetti differenti a seconda delle caratteristiche dello strato indurito e del materiale base. Sotto l'azione di elevati carichi di contatto, le isole di austenite tendono a deformarsi facilmente, aumentando l'area di contatto con conseguente diminuzione della pressione locale. Si assiste quindi ad un contenimento del picco di tensione massima, che, tuttavia, tenderà a localizzarsi più in profondità, in funzione di quanto risulta aumentata la dimensione "a" della semi-impronta di contatto. D'altra parte una diffusa plasticizzazione delle isole di austenite scaricherebbe in parte le benefiche tensioni residue di compressione.

Vi è poi da sottolineare il ben noto fenomeno della trasformazione dell'austenite residua in martensite, per effetto della deformazione plastica indotta: questo provoca, al contrario, un effetto benefico legato all'aumento delle tensioni residue di compressione.

In definitiva si può affermare che le opinioni contrastanti in materia di austenite residua sono l'ovvia conseguenza della fenomenologia che governa il comportamento sotto carico della stessa: vale a dire che a seconda delle particolari condizioni la presenza di austenite residua potrà portare tanto dei benefici quanto accelerare il danneggiamento in relazione alle condizioni di carico applicate.

EFFETTO DELLE LAVORAZIONI MECCANICHE DI FINITURA

Uno dei principali problemi connessi con i trattamenti termici delle ruote dentate riguarda le conseguenti distorsioni, che richiedono spesso lavorazioni di macchina (rettifica) successive al trattamento, per riportare la geometria della dentatura ai valori di disegno.

Questo problema è tipico per le ruote dentate cementate. Il processo di cementazione, al quale fa sempre seguito il trattamento di tempra, induce invariabilmente dei fenomeni di deformazione permanente con variazione delle geometrie dei componenti.

Il vantaggio della nitrurazione è proprio quello di non richiedere, successivamente al trattamento, una lavorazione di macchina perché le distorsioni, grazie alla più bassa temperatura alla quale si svolge il trattamento (di regola tra i 500°C e i 570°C), sono di gran lunga minori rispetto alla cementazione e, quindi, trascurabili.

Questo vantaggio emerge in modo evidente se si tiene conto del fatto che la rettifica dopo cementazione (o comunque dopo un trattamento termico di indurimento superficiale qualsiasi, ad esempio la tempra a induzione) asporta, in maniera talvolta non uniforme, lo strato indurito; in ogni caso quanto più si asporta in profondità, tanto più diminuisce la durezza della superficie e si modifica lo stato tensionale residuo.

Recenti studi [34] hanno evidenziato che questo fenomeno può penalizzare la capacità di carico delle ruote: se la distorsione è marcata, ovvero se è richiesta un'estesa asportazione degli strati superficiali, si può arrivare a diminuire la durata utile al pitting anche del 30%.

A sostegno di questa ipotesi, sono state eseguite misure di tensioni residue superficiali sul pignone di figura 1. I risultati ottenuti sono esposti in tabella I.

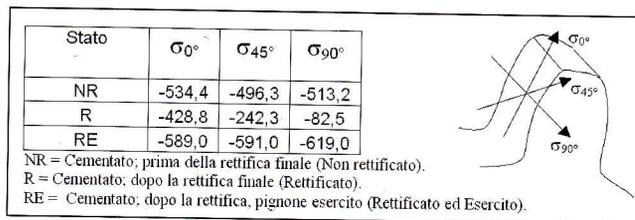


Tabella I: Tensioni residue misurate sulla superficie esterna del pignone di figura 1.

Table I: Residual stress measured on pinion surface shown in figure 1.

E' particolarmente significativo il confronto tra la situazione dopo cementazione (NR) e quella dopo cementazione e rettifica (R). Oltre all'asportazione meccanica degli strati esterni cementati con conseguente abbassamento della durezza superficiale, è più che rilevante la modificazione delle tensioni residue. Si va da una diminuzione del 20% nel caso della σ_{0° ad una riduzione di circa sei volte (!) nel caso della σ_{90° rispetto alla condizione prima della rettifica.

ULTERIORI OSSERVAZIONI SPERIMENTALI

Non sono molti i dati di letteratura utilizzabili a scopo comparativo, per valutare cioè in un confronto diretto la resistenza delle ruote dentate cementate e nitrate. Per ottenerli occorrono, infatti, prove specificamente concepite e nelle quali l'unica variabile, o quasi, sia il diverso trattamento termochimico. Qui di seguito si riportano i pochi risultati significativi (in pratica due) che è stato possibile reperire nella letteratura più recente; per un maggior approfondimento si veda [35].

Un primo lavoro di una certa importanza è quello di Albertin, Frohlich, Winter, Höhn e Michaelis [36] del 1994 che affronta alla radice il problema della resistenza delle ruote dentate nitrate e riferisce di un'estesa sperimentazione comparativa che è stata svolta allo scopo di accertarne la capacità di carico, sia a pressione superficiale, sia a flessione al piede del dente.

La sperimentazione è stata molto accurata, ed i risultati comparativi sono riassunti nel grafico riportato in figura 9, nel quale sono riportati anche i risultati di prove eseguite da altri sperimentatori tedeschi (Weck). Appare evidente il fatto che la resistenza al pitting degli acciai provati (39Cr-MoV13.9 con nitrurazione a gas e 31CrMoV9 con nitrurazione ionica) è del tutto paragonabile a quella dell'AISI 9310H cementato.

Particolarmente significativo appare anche il lavoro di Bull, Evans, Shaw e Hoffman [11]. Gli autori hanno sottoposto a prova ruote dentate con modulo 4,2, realizzate sia con comuni acciai da cementazione (SAE 8620, 655H13 e 20Mn-Cr5) sottoposti a trattamento di cementazione gassosa (profondità di cementazione pari a 0,8mm), sia con acciai da nitrurazione (31CrMo12) nitrate in gas (profondità di nitrurazione 0,4mm).

Anche in questo caso la sperimentazione è stata accurata: nel caso della nitrurazione si è valutato, ad esempio, l'effetto della presenza o meno della coltre bianca in superficie. Il risultato più significativo è mostrato in figura 10 e riporta i dati relativi alla resistenza alla fatica da contatto per ruote dentate cementate e nitrate.

Di notevole interesse il dato numerico del limite di fatica da contatto per ruote nitrate: il valore ottenuto è dell'ordine di 1800 MPa, ben superiore a quanto previsto, ad esempio, dalla norma ISO [14] o dall'AGMA [9] per tali componenti. Sempre i medesimi autori sottolineano come il comportamento degli strati nitrate in cui è presente la coltre bianca

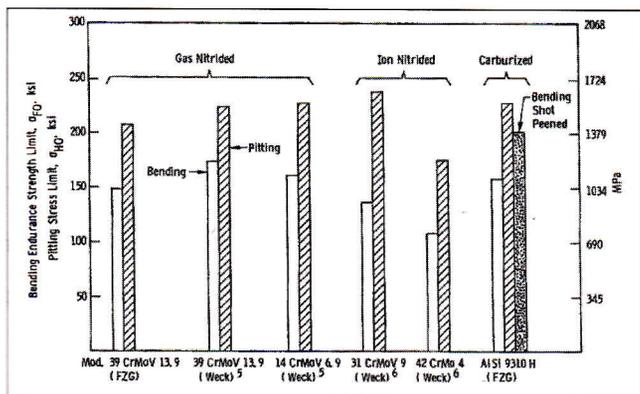


Figura 9: Confronto fra la resistenza a pitting ed a flessione a piede dente di ruote dentate in vari acciai al CrMo, cementati e nitrurati [36].

Figure 9: Pitting strengths compared to tooth bending fatigue limit for some Cr-Mo steels, carburised and nitrided [35].

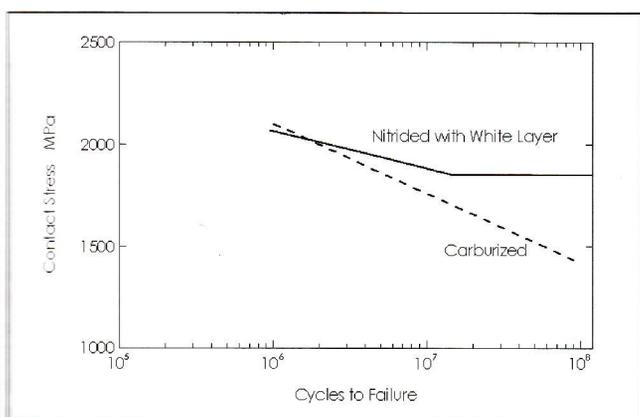


Figura 10: Resistenza alla fatica da contatto di ruote dentate nitrurate -in presenza di coltre bianca- e ruote dentate cementate (modulo: 4,2) [11].

Figure 10: Comparison of the surface contact fatigue strength of nitrided - with white layer -and carburized steel (4.2 mm module gears) [11].

sia superiore a quello dove la coltre bianca è stata rimossa: tale risultato è da correlare alla superiore resistenza al micropitting dello strato di coltre bianca degli acciai nitrurati. Dal medesimo grafico, inoltre, è interessante trarre alcune conclusioni circa l'andamento delle curve di resistenza a fatica per la ruota cementata e quella nitrurata. L'andamento della curva relativa al nitrurato manifesta le due zone classiche della curva di Wöhler: un tratto in pendenza, caratteristico della vita a termine ed un tratto rettilineo parallelo all'asse delle ascisse, corrispondente al valore di soglia rappresentativo della vita a fatica illimitata. Questo sta a significare che al di sotto di un certo valore della sollecitazione il fenomeno di danneggiamento si arresta: ciò è in perfetto accordo a quanto fin qui osservato circa il danneggiamento da pitting degli strati nitrurati.

Al contrario, per carichi maggiori, il danneggiamento si manifesta nella forma di case-crushing, unico danneggiamento riscontrabile in letteratura per questa tipologia di ruote [11]. Nettamente diversa e certamente più critica è la situazione del cementato: tanto agli alti che ai bassi carichi il danneggiamento è di natura progressiva e, in ogni caso, sembra essere ineliminabile.

CONCLUSIONI

Dall'insieme delle osservazioni esposte e sulla base dei dati

rilevati sperimentalmente o desunti dalla recente letteratura tecnica è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- la tipica modalità di cedimento delle ruote dentate è ascrivibile a fenomeni di danneggiamento superficiale tipo pitting che, almeno nelle fasi iniziali, interessano soltanto i primi micrometri dalla superficie del dente (max 100 mm);
- le caratteristiche più importanti per migliorare la resistenza al pitting delle ruote dentate cementate o nitrurate sono connesse con la resistenza a frattura dello strato superficiale e con lo stato tensionale residuo di compressione piuttosto che con la profondità totale dello strato indurito;
- con riferimento sia alla durezza superficiale che allo stato tensionale residuo di ruote cementate, si è osservato sperimentalmente che le lavorazioni finali di rettifica hanno un'influenza negativa, peggiorando entrambe le caratteristiche; nel caso, invece, di ruote nitrurate, l'assenza delle lavorazioni finali lascia inalterati gli effetti benefici del trattamento di indurimento;
- dall'esame della letteratura risulta che gli studi comparativi fra ruote cementate e ruote nitrurate sono assai rari; in ogni caso i lavori più attendibili evidenziano come la resistenza a fatica degli ingranaggi nitrurati è paragonabile, se non superiore, a quella dei cementati.
- nonostante ciò la normativa del settore (AGMA, ISO, ecc...) continua ad assegnare alle ruote dente nitrurate una capacità di carico inferiore rispetto alle ruote dentate cementate.

Contrariamente all'opinione diffusa la nitrurazione deve, quindi, essere rivalutata rispetto alla più tradizionale cementazione. Infatti gli ingranaggi nitrurati, tenendo conto di tutti gli aspetti del problema (in particolare la limitatissima variazione di forma/geometria dopo il trattamento termico), sono sicuramente competitivi in tutti quei casi nei quali viene normalmente adottata la cementazione, probabilmente per motivi di tradizione e/o di mancanza di conoscenze adeguate in materia.

RINGRAZIAMENTI

Un sincero ringraziamento va a tutte le persone che con la loro competenza hanno reso possibile questo lavoro. In modo particolare P. L. Antona, sempre vivace interlocutore metallurgico, Pietro Elli, per la disponibilità e la cortesia dimostrata, M. Caprioglio e A. Mancuso per le puntuali "dritte" sui trattamenti termici, E. Pirovano e A. Balzarotti per le appassionante idee innovative.

BIBLIOGRAFIA

1. P.J.L. Fernandes, C. McDuling, Engineering Failure Analysis, Vol. 4, n°2 (1997) p.99.
2. R. Pedersen, S. L. Rice, SAE Trans., 69 (1961) p.370.
3. D. Benuzzi, E. Bormeti, G. Donzella, Proc. XXX Conv.AIAS, Alghero (2001) p. 293.
4. G. P. Cavallaro, T. P. Wilks, C. Subramanian, K. N. Strafford, P. French, J. E. Allison, Surface and Coating Technology, 71 (1995) p.182.
5. D.P.Townsend, Dudley's Gear Handbook, 2nd edition, Mc Graw-Hill Inc., USA (1992), p. 12.37.
6. C. Dawes, R. J. Cookse, Heat Treatment of Metals, Special Report 95 (1966) p.77.
7. G.Parrish, Heat Treatment of Metals, 2 (1976) p.49.
8. H.C.Child, Engineering Design Guide No. 37, Publ. Oxford Univ. Press (1980).
9. AA.VV., AGMA Standard, ANSI/AGMA 2001-C95, AGMA, 1500 King Street, Alexandria, Virginia 22314 (2001).

MEMORIE

4/2003

10. AA.VV., Metals Handbook, Vol. 11 - Failure Analysis and Prevention, 9th Ed., ASM, Metals Park, Ohio (USA), 1986.
11. S.J. Bull, J. T. Evans, B. A. Shaw, D. A. Hoffman, J. Engineering Tribology, 213 (1999) p.305.
12. R. Roberti, G.M. La Vecchia, G. Donzella, Proc. Conf. on Materials Development in Rail, Tire, Wing, Hull Transportation, AIM, Milano (1992) vol.2, 155-162.
13. M. Guerrini, Tesi di Laurea, Università di Brescia, relatori R. Roberti, G.M. La Vecchia (1993).
14. AA.VV., AGMA Standard, ANSI/AGMA 1980-110.04, AGMA, 1500 King Street, Alexandria, Virginia 22314 (1980).
15. S.Preston, Mat. Trans. JIM, (1993) p.34.
16. K.Genel, M.Demirkol, Int. J. of Fatigue, 21 (1999) p.207.
17. K.Genel, M.Demirkol, Mat. Science & Eng., A279 (2000) p.207.
18. H.Taucher, Fachbuchverlag, Leipzig (1978).
19. C. Dawes, R. J. Cooksey, Heat Treatment of Metals, Special Report 95 (1966) p.47.
20. G.Parrish, Heat Treatment of Metals, 5 (1977) p.45.
21. D. M. Dudley, Gear Handbook, McGraw Hill, New York (1962) p.10.
22. H. J. Spies, Steel Res., 64 (1993) p.441.
23. T. Bell, N. Loh, J. Heat Treat., 2 (1982) p.232
24. P. De La Cruz, M. Oden, T. Ericsson, Mater. Sci. Eng., A242 (1998) p.181
25. G.Parrish, Heat Treatment of Metals 4 (1976) p.101
26. B.B.Vinokur, S.E. Kondratyuk, L.I. Markovskaya, R.A. Khrunik, A.A. Gurmaza, V.B. Vainerman, Met. Sci. Heat Treat., 21 (1979) p.927.
27. C.G. Li, Q. D. Zhou, G.S. Song, Z.S. Fang, Wear, 162-164 (1993) p.75.
28. X. H. Fan, L. He, Q. D. Zhou, Proc. Int. Conf. On Wear of Materials, Denver, CO, 1 (1989) p.9.
29. D.H. Breen, SAE Technical Paper 841083 in SP-584 (1984) p.1.
30. F. C.Tournier, L.Faure, Trait. Therm., (1985) 197 p.43.
31. G: G. Yang, W.M.Garrison, Wear, 129 (1989) p.93.
32. H: J.M. Tong, Y.Z. Zhou, T.Y. Shen, H.J. Deng, Wear, 135 (1990) p.217.
33. I. Z. Dong, F.X. Wang, Q.Q. Cai, M.X. Zheng, Y.Q. Cheng, Wear, 105 (1985) p.223.
34. A. K. Rakhit, Heat Treatment of Gears, ASM International, Materials Park, 2000.
35. M. Boniardi, P. Davoli, M. Caprioglio, A. Mancuso, Organi di Trasmissione, 4, 2002
36. L. Albertin, R.L. Frolich, H. Winter, B.R. Höhn, K. Michaelis, AGMA Technical Paper, 94FTM4, AGMA, 1500 King Street, Alexandria, Virginia 22314 (1994).

A B S T R A C T

**THE EFFECT OF SURFACE TREATMENTS
ON PITTING FAILURE OF GEARS**

Following to a short description of the main failure mechanisms involved in gear life, it will focus on the effects of thermochemical treatments on the in-service life of these parts.

The most common method used for improving hardness of a spur gear surface is the carburising treatment. This one has to be evaluated looking at both its advantages and the not ones, just like the high temperature requisite for this process. The unavoidable deformations which follow the great heating of the parts, impose a succeeding grinding to make the teeth profiles keep the tolerance required.

On the contrary, because of its lower temperature of process, nitriding or nitro-carburising are much less subjected to the problem of deformation, so not requiring secondary finishing operations.

Improving life of a spur gear means to interact with damaging phenomena which lead parts to failure.

Commonly, the main damaging mechanism for gears are

classified into three classes: 1) the bending fatigue, which lead to failure of the teeth roots; 2) scoring or scuffing phenomena, promoted by a bad or insufficient lubrication; 3) surface and sub-surface damaging of the teeth profiles caused by contact fatigue phenomena.

As the first and the second typologies of damaging can be controlled and limited by an accurate design of gear (getting better the load distribution on the material) and with a re-designing of the lubrication system, respectively, the last one (damaging for contact fatigue) is much less easy to prevent.

This fact depends essentially by the way of starting and propagating the damage in contact fatigue phenomena: both the way of loading trasmission and all the material properties are involved.

In this viewpoint, understanding which state of stress is induced by the surface contact between two bodies, as the way of starting and propagating the damage until the failure for the fatigue contact may surely lead to a properly discuss about which method of case hardening is the best appropriate for improving the contact fatigue strength of gears.

4/2003