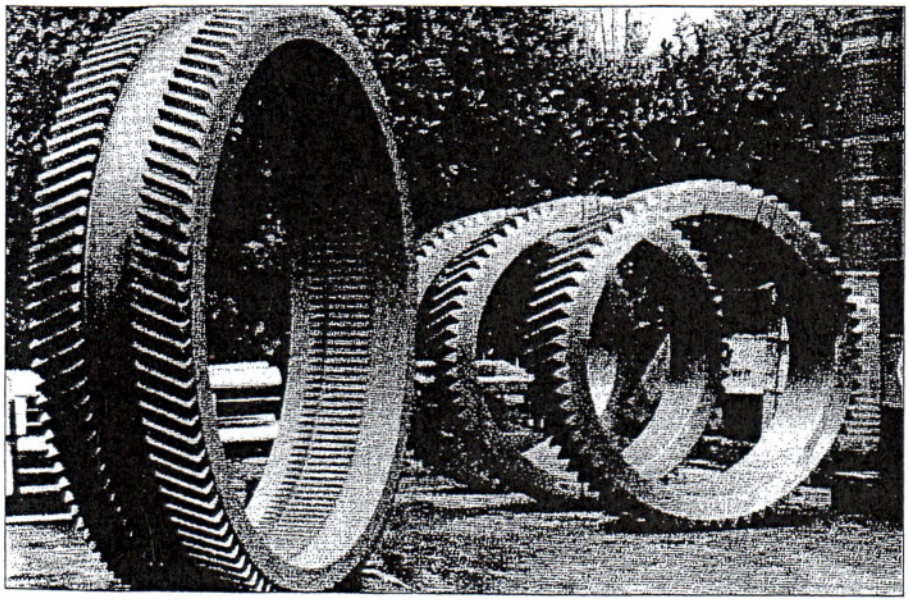
INGRANAGGI: cementazione e nitrurazione a confronto

Marco Boniardi, Piermaria Davoli, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano
Mario Caprioglio, Antonio Mancuso, Colmegna SpA

Il trattamento di indurimento superficiale per dentature di ingranaggi più diffuso è probabilmente quello di cementazione, che offre notevoli vantaggi ma che ha anche alcuni inconvenienti, fra i quali il principale è la elevata temperatura di trattamento, che impone una rettifica successiva per rimediare alle inevitabili deformazioni del pezzo. La nitrurazione è un trattamento alternativo, che presenta numerosi vantaggi rispetto alla cementazione, in particolare la temperatura di trattamento nettamente più bassa, che limita le deformazioni e non obbliga necessariamente a una successiva lavorazione. La superficie nitrurata, però, è accreditata di una resistenza inferiore del 10-15% a quella cementata, sia a fatica a flessione sia a pressione superficiale.
In realtà, scegliendo opportunamente i materiali, questa differenza può essere ridotta o annullata, a quanto risulta da sperimentazioni comparative svolte in importanti centri di ricerca. Ciò contribuisce a rendere competitivo il trattamento di nitrurazione, che presenta numerosi punti a suo favore. In questo articolo si mettono in evidenza i principali pro e contro dei due trattamenti, sulla base dell'esperienza consolidata e della letteratura più autorevole.



I meccanismi di cedimento delle ruote dentate

I meccanismi di cedimento delle ruote dentate in esercizio, quando sono chiamate a trasmettere potenza in maniera continuativa e in movimento, sono sostanzialmente tre:

a) il cedimento per *fatica flessionale* al piede del dente;

b) il cedimento per danneggiamento superficiale *(pitting* e *micropitting);*

c) il cedimento per grippaggio *(scuffing* o *scoring).*

Il cedimento del terzo tipo, per grippaggio, detto scuffing o scoring nella terminologia anglosassone, riguarda prevalentemente ingranaggi molto veloci, con velocità di strisciamento elevate. Esso è dovuto a microsaldature e successivi strappi fra le due superfici dei denti a contatto, rese possibili da rotture del film d'olio che le separa.

Sulle cause di questo tipo di cedimento, e soprattutto sulle verifiche da effettuarsi, non c'è ancora unanimità di vedute (né accordo completo in sede ISO sul tipo di verifica da proporre).

Il problema riguarda la valutazione delle condizioni locali di temperatura nel contatto, che possono dare luogo alla rottura del film d'olio e rendere quindi possibile la microsaldatura.

Da quanto risulta al riguardo in letteratura (vedi per es. l'accenno fatto da Winter-Niemann [1]), sembra che gli ingranaggi nitrurati abbiano capacità di resistenza al grippaggio un po' superiore a quella dei cementati.

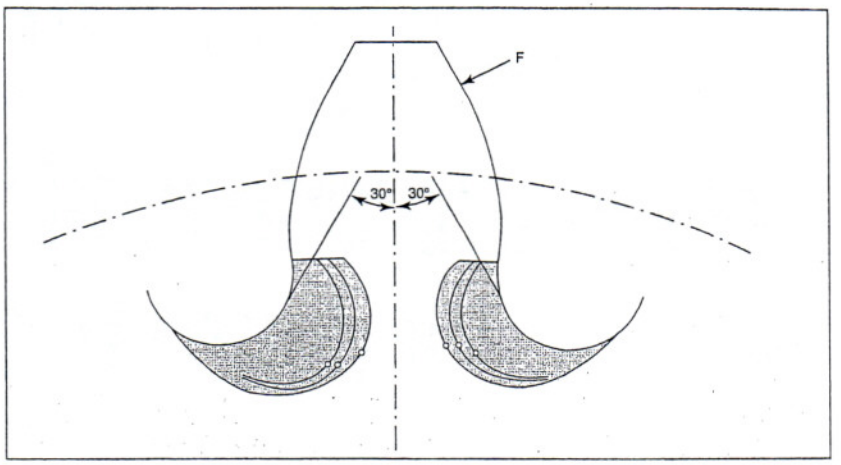


Fig. 1 - Andamento degli sforzi di flessione nella zona più sollecitata al piede del dente.

Fatica al piede del dente

Come è noto, il dente, per effetto della forza che si scambia con il dente coniugato, è soggetto a flessione (figura 1).

La sollecitazione di flessione è variabile nel tempo per vari motivi: perché il punto di contatto si sposta sul profilo del dente; perché l'entità della forza sul dente varia durante l'ingranamento; perché il dente è sollecitato solo per la frazione di tempo (o di rotazione) corrispondente all'ingranamento con la ruota coniugata.

La sollecitazione è quindi tipicamente di fatica, *pulsatoria* (nel caso di ruota dentata che trasmette coppia nello stesso verso e che ingrana con una sola altra ruota) o *alternata* (nel caso di ruota folle intermedia). In figura 1 è illustrato l'andamento delle sollecitazioni nella zona dove sono più elevate, cioè in corrispondenza del raccordo al piede del dente; è evidente come queste dipendano dalla posizione della forza e quindi dal relativo braccio rispetto alla sezione di piede. Il cedimento per fatica (il cui aspetto tipico è riportato in figura 2) avviene quando si supera, in quella zona, il livello di sollecitazione ammissibile di fatica (pulsatoria o alternata) per il materiale col quale il dente è realizzato. La rottura in generale si nuclea in superficie e poi si propaga secondo un andamento tipico, grosso modo ortogonale alla direzione dello sforzo, per poi portare alla separazione fisica del dente dal corpo ruota.

Danneggiamento superficiale

Il danneggiamento superficiale, noto come *pitting,* è dovuto a un fenomeno di fatica, causato dal ripetersi ciclico delle sollecitazioni di contatto del dente con il dente della ruota coniugata.

Queste sollecitazioni sono variabili nel tempo per gli stessi motivi per i quali lo sono quelle di flessione. Unica differenza il fatto che, per ovvi motivi, la sollecitazione di contatto non può essere che pulsatoria (nel caso di ruote intermedie, saranno

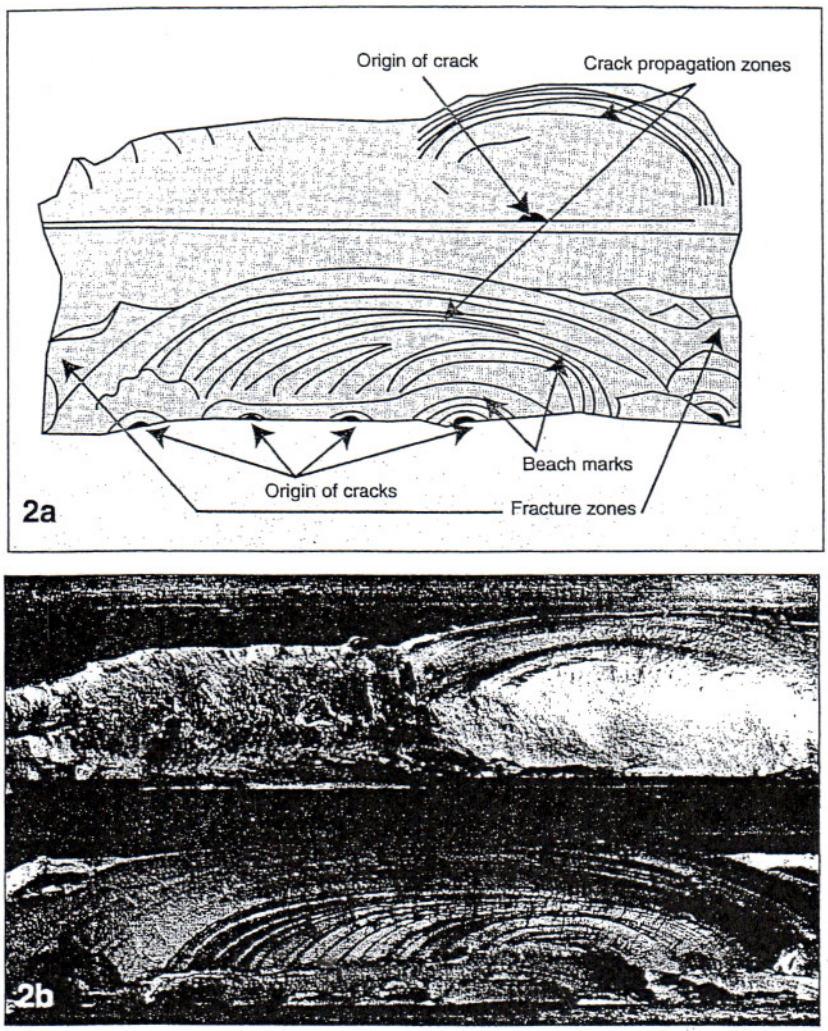


Fig. 2 - Aspetto di una rottura per fatica al piede del dente [2].

interessati i due fianchi del dente). Si tratta quindi di una sollecitazione tipicamente di fatica. La pressione di contatto fra i due profili (vedi figura 3) causa uno stato di sforzo nello strato superiore del dente che può essere studiato applicando la teoria di Hertz del contatto fra due cilindri lungo la generatrice.

Il parametro di riferimento è la pressione di contatto calcolata con la formula di Hertz, che ha l'andamento indicato in figura 4 e che assume il valore massimo p_0 (vedi per esempio [3]).

Sotto la superficie, per effetto della pressione di contatto, si crea uno stato di sforzo con l'andamento indicato in figura 5, nel quale le componenti del tensore dello sforzo sono date in funzione del valore massimo p_0 della pressione di contatto e in funzione della profondità (riferita alla larghezza dell'area di contatto *2b*). Si osserva subito che, mentre le componenti normali dello sforzo σ_x, σ_y, σ_z calano man mano che ci si allontana dalla superficie, le componenti di scorrimento τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{yz} hanno andamenti crescenti che raggiungono il massimo a una certa profondità; in particolare la τ_{yz} raggiunge il massimo, che vale $0,3\ p_0$, alla profondità di $0,79\ b$, per poi decrescere.

Sono queste sollecitazioni sotto-superficiali di taglio, di fatica ad andamento pulsatorio, che causano il cedimento per *pitting*, il quale inizierebbe sotto la superficie per poi propagarsi verso la superficie stessa fino a produrre il *pit*, il piccolo cratere che unendosi ad altri crea il danneggiamento noto come *pitting*. Inoltre il materiale così liberatosi si mescola con l'olio lubrificante, che lo diffonde anche ad altri organi (cuscinetti ecc.), col rischio di causarne indirettamente il danneggiamento. In figura 6 è illustrato l'aspetto tipico del danneggiamento per *pitting*, che è largamente quello più numeroso nella pratica industriale.

I trattamenti termochimici delle ruote dentate

Anche se esistono molte applicazioni in cui le ruote dentate vanno in esercizio senza essere indurite superficialmente, per le applicazioni speciali ove è richiesta elevata affidabilità della costruzione meccanica è, invece, abituale eseguire i trattamenti termochimici di cementazione (detta anche carburazione) o, in alternativa, di nitrurazione.

In entrambi i casi si tratta di due processi termochimici di adsorbimento superficiale di particolari elementi chimici (carbonio per la cementazione e azoto per la nitrurazione) che inducono, come ri-

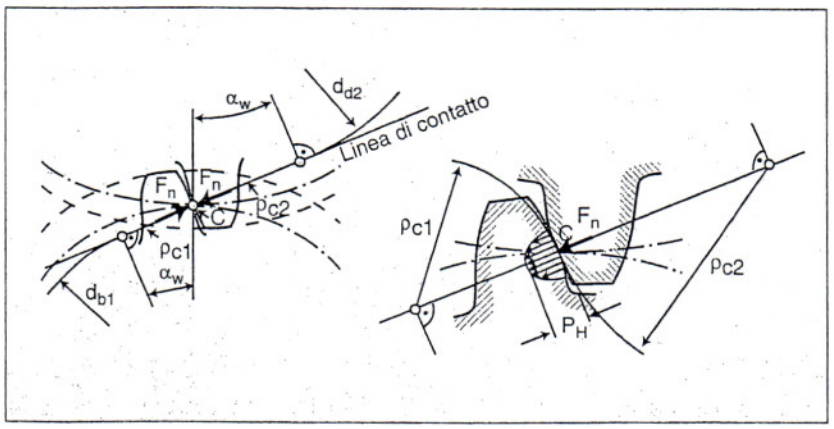


Fig. 3 - Contatto fra i denti e pressione di contatto.

sultato, un sensibile incremento della durezza superficiale del dente. Di seguito sono indicate le principali caratteristiche per ciascuna tipologia di trattamento, rimandando ad altri studi per gli opportuni approfondimenti ([4], [5], [6]).

Nel caso della cementazione il trattamento precede sempre le operazioni finali di rettifica della dentatura. La ruota dentata viene riscaldata a una temperatura compresa tra gli 825 °C e i 925 °C in corrispondenza della quale avviene l'adsorbimento di carbonio a opera di un'atmosfera gassosa ricca di CO (normalmente ottenuta per combustione di idrocarburi in difetto di ossigeno); dopo circa 2-5 ore o più di trattamento si ottengono gli effetti metallurgici desiderati (principalmente l'incremento di carbonio in superficie). Successivamente il pezzo viene temprato in olio e, quindi, si provvede a eseguire il trattamento termico di rinvenimento a temperature comprese tra i 150 °C e i 200 °C.

Le modalità con cui avviene l'incremento di durezza sono ben note: il carbonio presente in superficie (con tenori compresi tra 0,7 e 0,9, a seconda del tipo di acciaio impiegato), si discioglie nella matrice a base ferro inducendo, nell'acciaio, il fenomeno di indurimento per soluzione solida interstiziale che si esplica con la tempra.

In generale si ottengono durezze superficiali dell'ordine dei 700-900 HV per una profondità di circa 1-3 mm anche se, modificando opportunamente i parametri di processo (temperatura, tempo di trattamento e potere cementante dell'atmosfera), è possibile ottenere strati induriti con differenti caratteristiche.

Da un punto di vista microstrutturale non si osservano sensibili modificazioni rispetto all'acciaio base: dopo tempra e rinvenimento, la struttura in superficie è sempre martensitica rinvenuta anche se con tenori di carbonio più elevati rispetto alla zona a cuore.

Non tutti gli acciai possono essere sottoposti al trattamento di cementazione: per problemi di cinetica del processo, la loro composizione chimica deve necessariamente presentare un tenore di carbonio non superiore allo 0,2%. I più utilizzati sono acciai debolmente legati al Cr-Ni o, meglio, al Cr-Ni-Mo e, in qualche caso, acciai al Mn-Cr o al solo carbonio. L'incremento di resistenza al *pitting* degli ingranaggi così trattati è direttamente correlato all'aumento della durezza superficiale, mentre il sensibile miglioramento della resistenza a fatica è da mettere in relazione sia all'aumento delle caratteristiche meccaniche tensili (resistenza statica e a fatica), sia all'insorgenza di uno stato tensionale di compressione sulla superficie del dente.

Esiste anche la possibilità di eseguire, in alternativa, il cosiddetto trattamento di carbonitrurazione, ovvero un trattamento di cementazione dove sono presenti, nell'atmosfera del forno, sostanze nitruranti in piccola quantità (3-8% di ammoniaca). Le caratteristiche meccaniche e metallurgiche degli strati carbonitrurati sono "grosso modo" confrontabili con quelle ottenibili con la cementazione, anche se qualche autore osserva un certo miglioramento in termini di resistenza ai fenomeni di *pitting* rispetto alla cementazione classica.

Di tutt'altra natura è invece il trattamento di nitrurazione.

La nitrurazione viene eseguita su pezzi finiti di macchina utensile (prima sgrossati, poi temprati e rinvenuti, quindi finiti di rettifica) in quanto le temperature di trattamento sono sufficientemente basse da non indurre modificazioni

dimensionali alla geometria della ruota dentata.
Il trattamento di nitrurazione prevede un riscaldamento a temperature dell'ordine dei 500 °C-550 °C in un'atmosfera ricca di ammoniaca con un mantenimento che oscilla tra le 15 e le 120 ore: la variabilità della durata di trattamento è, prevalentemente, funzione della profondità di indurimento richiesta ovvero delle caratteristiche di impiego del componente.
L'azoto che penetra negli strati superficiali dell'acciaio entra in soluzione solida nel reticolo cristallino del ferro e va a formare, soprattutto, composti interstiziali dell'azoto (nitruri) sia con il ferro stesso sia con gli altri elementi di lega dell'acciaio (prevalentemente $Fe_{2\div3}N$, Fe_4N, AlN, CrN): il fenomeno di indurimento prende il nome di rafforzamento per precipitazione e l'aumento di durezza superficiale è indotto dalla presenza di questi nitruri di elevata/elevatissima durezza. Poiché questi composti sono di natura ceramica o quasi-ceramica, le caratteristiche meccaniche e metallurgiche delle superfici nitrurate ricordano molto da vicino quelle di un materiale ceramico: elevatissima durezza (900-1200 HV), basso coefficiente d'attrito, ottima resistenza all'usura adesiva, buona resistenza ai fenomeni corrosivi. Lo spessore interessato a tali modificazioni è, tuttavia, molto più limitato rispetto alla cementazione: si va da 0,1 mm a 0,6 mm in funzione della temperatura del forno, della durata del trattamento termochimico e del potere nitrurante dell'atmosfera. Anche in questo caso vi sono acciai più adatti di altri a essere nitrurati: di solito si usano acciai a medio tenore di carbonio legati al Cr-Mo, al Cr-Mo-V, all'Al-Cr-Mo. Per le specifiche applicazioni delle ruote dentate i più indicati risultano essere il 31CrMo12 e il 31CrMoV9. Si segnalano, però, anche applicazioni dove vengono utilizzati tradizionali acciai da bonifica, quali il 42CrMo4.
L'incremento di resistenza al *pitting* e alla fatica delle ruote dentate nitrurate è, come nel caso degli ingranaggi cementati, da ricondurre al sensibile incremento di durezza della superficie e all'insorgenza di uno stato tensionale residuo di compressione sulla superficie dei denti stessi.

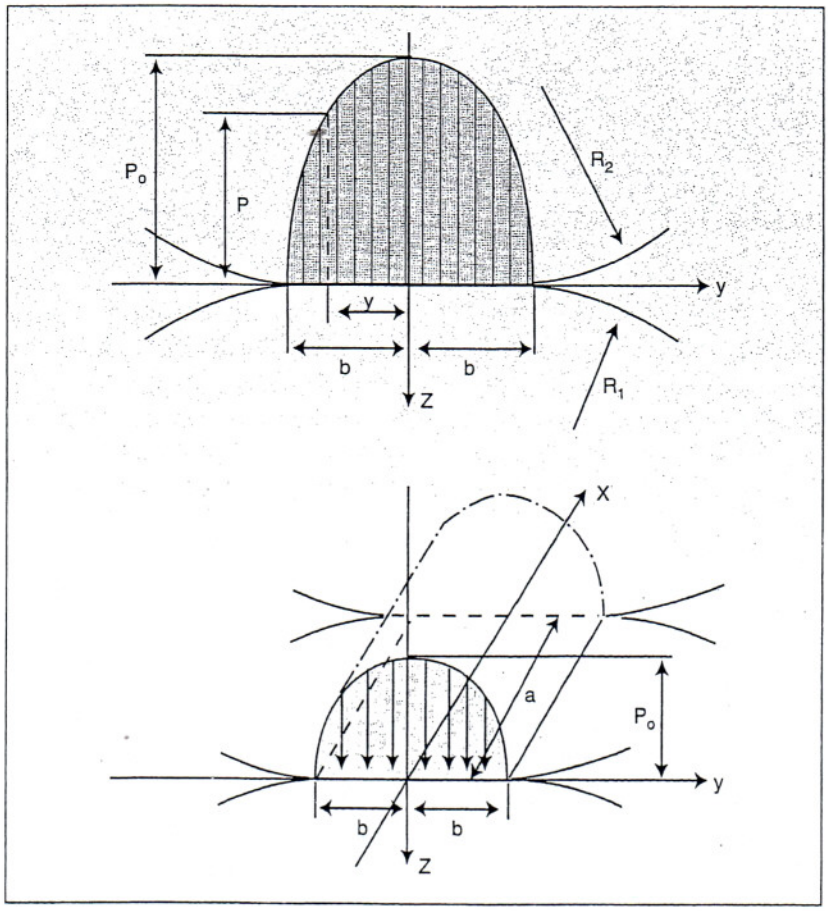


Fig. 4 - Pressione di contatto e schiacciamento secondo Hertz nel caso di due cilindri di larghezza a.

Ingranaggi induriti superficialmente: il problema della profondità dello strato indurito

Sia per la flessione sia per la pressione superficiale, il problema della resistenza del materiale riguarda essenzialmente lo strato più esterno: quello al piede del dente, sul raccordo di fondo, nel primo caso, e quello di tutto il fianco, nel secondo caso. I trattamenti termici che vengono utilizzati per migliorare la capacità di resistenza delle ruo-

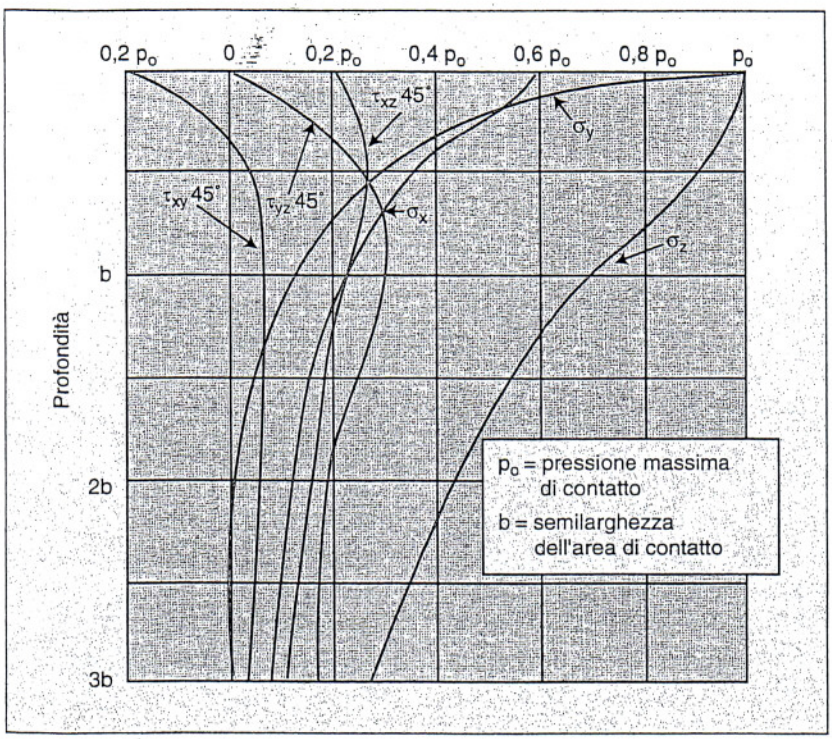


Fig. 5 - Andamento in profondità delle componenti di sollecitazione, nel caso di due cilindri a contatto.

te dentate devono produrre miglioramenti per entrambi gli aspetti, senza eccessivi sbilanciamenti fra i due. Per quanto riguarda in particolare i trattamenti superficiali, è importante che i miglioramenti siano tali da aumentare la resistenza a fatica a flessione, e allo stesso tempo incrementino la resistenza al danneggiamento superficiale. Per far questo occorre che sia interessato dal trattamento, con effetti migliorativi, lo strato superficiale per una profondità sufficiente a coprire la zona nella quale le sollecitazioni assumono il valore massimo. Zona che è teoricamente il bordo esterno per la flessione, e lo strato superficiale, per una profondità opportuna, per la sollecitazione da contatto.

In sintesi, occorre che il trattamento (per esempio tempra superficiale a induzione o alla fiamma, cementazione, nitrurazione, carbonitrurazione) raggiunga una "penetrazione" sufficiente a produrre gli effetti migliorativi attesi. Questi trattamenti superficiali provocano un incremento della durezza superficiale, che viene presa a indicatore dell'efficacia del t.t. stesso anche dal punto di vista delle caratteristiche di resistenza a fatica del materiale. Ciò che interessa particolarmente, oltre al valore della durezza in superficie, è l'andamento in profondità, il gradiente, che deve garantire che vi siano livelli sufficientemente elevati di durezza alla profondità alla quale si hanno le sollecitazioni più elevate (per esempio la τ_{yz} calcolata con la teoria di Hertz). Da tenere presente anche l'insorgere di tensioni residue di compressione, favorevoli alla resistenza.

La resistenza degli ingranaggi cementati e nitrurati

Norma italiana UNI 8862

La norma UNI 8862 del 1987, parte 1, al punto 5 (parametri limite) specifica i valori dei limiti di fatica degli ingranaggi metallici, specificando che si tratta dei *"valori massimi orientativi di σ_{Hlim} e di σ_{Flim} in funzione dei materiali e delle durezze superficiali delle dentature"*, e che *"questi valori hanno origine sperimentale e sono il limite di fatica, con percentuale di avaria dell'1%, in prove di laboratorio. Essi si riferiscono a materiali controllati e sottoposti ai più appropriati trattamenti termici"*.

Riguardo ai cementati e nitrurati, i valori sono quelli riportati nella tabella 1.

Come si osserva, l'indicazione è abbastanza generale, non correla i limiti alla durezza (indicando solo un campo di durezza) e indica che i nitrurati hanno una resistenza inferiore ai cementati: a fatica superficiale del 12%, e del 10% a flessione. Mentre però per i cementati si specifica lo *"spessore efficace di indurimento"* in rapporto al modulo in maniera abbastanza precisa (0,15 – 0,25 m_n), questo rapporto è molto più generico per i nitrurati: si va da 0,08 per spessore 0,4 mm su m_n= 5 a 0,3 per spessore 0,6 su modulo 2 mm.

In ogni caso, pur nella genericità dell'indicazione, il progettista che utilizzi questa norma si trova di fronte all'indicazione che i nitrurati resistono un 10% in meno dei cementati, e per di più *"per ingranaggi con interasse modesto"*.

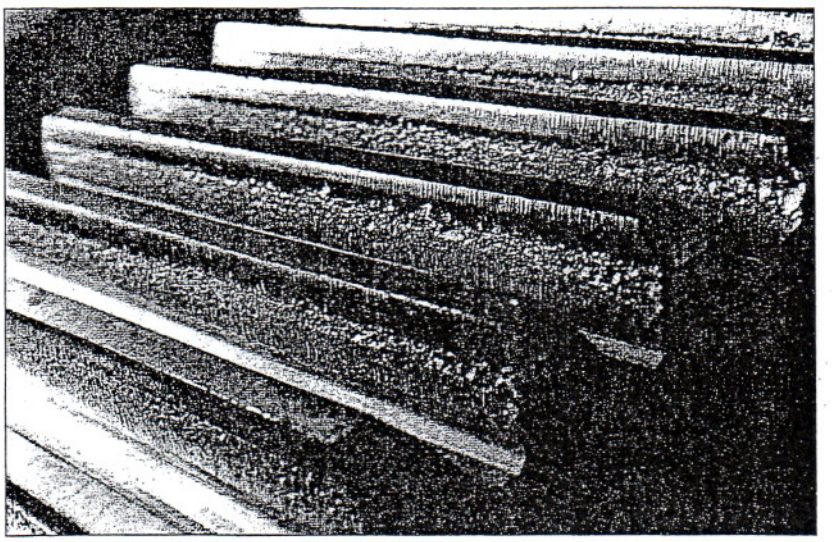


Fig. 6 - Aspetto tipico del danneggiamento per pitting [2].

Norma ISO 6336

Più dettagliata è la norma ISO 6336 del 1996. Nella parte 5 "Strength and quality of materials" vengono forniti, sotto forma di diagrammi e in funzione della durezza superficiale, i valori di σ_{Hlim} e di σ_{Flim} per i materiali metallici per ingranaggi. La prima differenza con UNI sta nel fatto che i valori sono dati in funzione della durezza; differenza che in realtà non esiste per i cementati e i nitrurati, in quanto – nel campo di durezze ammesso – i limiti sono indipendenti dalla durezza stessa (per altri acciai invece dipendono dalla durezza).

Riguardo alla profondità di indurimento, si specifica che per i nitrurati deve essere compresa fra 0,4 e 0,6 mm (senza riferimenti al modulo).

La differenza più importante con la UNI sta nell'influenza della qualità del materiale e del trattamento termico sui limiti di fatica. Vengono indicate quattro qualità, corrispondenti ad altrettanti livelli di controllo qualitativo: ML, MQ, ME ed MX (solo per alcuni materiali).

Le definizioni sono le seguenti:

"ML stands for modest demands on the material quality and on the material heat treatment process during gear manifactur";

"MQ stands for requirements that can be met by experienced manufacturers at moderate cost;

ME represents requirements that must be realized when a high degree of operating reliability is required";

"MX represents requirements for through hardened alloyed steels with special considerations on hardenability and microstructure".

Per quanto riguarda gli acciai da nitrurazione e da cementazione, le tabelle 4 e 6 della norma riportano in dettaglio i controlli e le specifiche corrispondenti ai livelli di qualità.

Da rilevare il fatto che, per i nitrurati, viene messo in evidenza quanto segue:

- bassa capacità di sopportare sovraccarichi da parte delle ruote dentate nitrurate, a causa della bassa pendenza della curva S-N nel tratto a termine;
- elevata sensibilità agli urti;
- particolare cautela nell'utilizzo di acciai contenenti Al: per il Nitralloy N e 135 sono possibili solo i gradi ML e MQ, con limitazione di σ_{Flim} a 250 N/mm² per il grado ML e a 340 N/mm² per il grado MQ;
- opportunità di una buona qualità nella lavorazione (tolleranze strette) in modo da limitare il valore del K_V (fattore dinamico), causa la già citata bassa capacità di sopportare

LA NITRURAZIONE COL PROCESSO NITREG

È interessante notare che da alcuni anni la tecnica di nitrurazione gassosa ha compiuto sensibili progressi; in modo particolare si è affermata la tecnologia Nitreg che si caratterizza per un'accurata gestione e controllo del processo di nitrurazione (Np) e per l'utilizzo di mirate atmosfere in miscela.

Questa evoluzione, rispetto ai precedenti processi gassosi, consente di ottenere:

- valori di durezza superficiale tendenzialmente più elevati (+ 50 HV1);
- maggiori profondità di indurimento;
- strutture più tenaci.

A fronte del suo sviluppo, l'impiego del trattamento di nitrurazione gassosa si sta già estendendo ai più comuni acciai da bonifica o da cementazione (es. UNI 39NiCrMo3, 40CrMo4, 20MnCr5, 18NiCrMo5), interessando applicazioni industriali che richiedono specificamente caratteristiche apprezzabili di resistenza a fatica, oltre alla resistenza al danneggiamento superficiale, e sostituendo così la convenzionale cementazione e tempra.

TAB. 1 - PARAMETRI LIMITE DEI MATERIALI SECONDO UNI 8862

Materiale	Durezza	s_{Hlim} [N/mm²]	s_{Flim} [N/mm²]	Note
Acciaio legato cementato	HRC = 58÷62	1650	525	Valori validi per spessori efficaci di indurimento da 0,15 fino a 0,25 m_n al termine delle lavorazioni.
Acciaio bonificato nitrurato	HV1= 700÷850	1450	470	Valore valido (eccetto per gli acciai all'alluminio) per nitrurazione gassosa prolungata o per un adeguato spessore di indurimento (da 0,4 a 0,6 mm per m_n da 2 a 5 mm) e per ingranaggi con interasse modesto.

sovraccarichi.
Nella tabella 2 sono riportati, per i tre gradi di qualità, i valori di σ_{Flim} e di σ_{Hlim} indicati dalla norma per i cementati e i nitrurati, con indicazione del campo di durezza al quale si applica.
Si osserva quindi che i nitrurati presentano, secondo ISO, limiti inferiori di circa il 13÷15% rispetto ai cementati, sia per la flessione sia per la fatica superficiale (*pitting*).

Dati di letteratura sul confronto cementati-nitrurati

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 nitrurate.
Per ottenerli occorrono infatti prove specificamente concepite e nelle quali l'unica, o quasi l'unica, variabile sia il diverso trattamento termico: in particolare la geometria delle ruote, per garantire le stesse curvature del profilo, gli stessi valori del raccordo al piede dei denti, la stessa cinematica e quindi le stesse relazioni fra coppia applicata, pressione di contatto e sforzo al piede, e il gradiente della durezza, che dovrebbe essere confrontabile per i due trattamenti.
Qui di seguito si riportano i pochi risultati significativi che è stato possibile reperire nella letteratura più recente; spesso si tratta di risultati specifici, quali per esempio la resistenza all'urto dei nitrurati, più che di confronto fra i due trattamenti. Come regola generale, è indagata molto più a fondo la resistenza dei cementati rispetto a quella dei nitrurati.
Maenosono et al. [7], delle Università di Kyushu e di Saga, Giappone, hanno posto l'attenzione sulla resistenza all'impatto delle ruote dentate nitrurate, ossia ai carichi impulsivi che possono essere presenti, come è noto, nelle trasmissioni a ingranaggi. Le dentature nitrurate avrebbero prestazioni inferiori alle cementate, come risulta anche dalle prove da loro eseguite; ma la loro indagine si è indirizzata verso un acciaio nitrurato che migliora la resistenza alla fatica da impatto rispetto agli acciai tradizionalmente utilizzati (per es. SC45).
Quindi, anche da questo punto di vista (impatto, ossia trasmissioni con carichi dinamici importanti), sembra che sia possibile con successo utilizzare i nitrurati al posto dei cementati pur di scegliere un acciaio adatto.
Gli stessi autori [8] hanno investigato anche una ghisa malleabile (denominata FCD400, con C=3,65%, Si=2,72%, Mn = 0,15%) nitrurata al plasma e hanno osservato che la riduzione di resistenza a fatica da impatto dovuta al processo di nitrurazione della ghisa è minore di quella dello stesso processo su un acciaio con C = 0,15%, rendendo così simile la resistenza delle ruote nitrurate realizzate coi due materiali.
Un approccio relativamente recente alla resistenza a fatica

TAB. 2 - VALORI DI σ_{FLIM} [N/MM²] SECONDO ISO 6336 PER CEMENTATI E NITRURATI

Materiale	Durezza	ML	MQ	ME	Note
Cementato	55÷65 HRC	310	425÷500	525	ML,MQ,ME: richiesta adeguata profondità di cementazione MQ: dipende dalla durezza a cuore e della prova Jominy
Nitrurato	55÷65 HRC	270	420	460	

VALORI DI σ_{HLIM} [N/MM²] SECONDO ISO 6336 PER CEMENTATI E NITRURATI

Materiale	Durezza	ML	MQ	ME	Note
Cementato	57÷65 HRC	1300	1500 (57÷62 HRC)	1650 (58÷62 HRC)	ML,MQ,ME: richiesta adeguata profondità di cementazione
Nitrurato	57÷65 HRC	1120	1250 (60÷65 HRC)	1450 (60÷65 HRC)	

a flessione dei denti di dentature indurite superficialmente (in particolare cementate) è quello di ipotizzare la presenza di una cricca (di piccole dimensioni) in superficie, o di ritenere che possa nuclearsi per effetto delle sollecitazioni ripetute, e di studiarne poi la propagazione per fatica utilizzando i metodi della Meccanica della Frattura. Analogo approccio può essere seguito per il *pitting*, che riguarda ovviamente la superficie del dente soggetta alla pressione di contatto, valutata con la teoria di Hertz.

Gli studi su questi due aspetti non sono molti, e comunque non risulta che ve ne siano di comparativi fra ruote dentate cementate e nitrurate. I lavori [9], [10] e [11] sono alcuni fra i più recenti che sono stati pubblicati sull'argomento.

Riguardo ai nitrurati e ai carbo-nitrurati, *Tesker* dell'Università Tecnica di Volgograd (Russia) [12] riferisce di prove effettuate su ingranaggi di un trattore, che avrebbero confermato alcuni valori ottimali di profondità dello strato indurito che l'autore propone sulla base del calcolo; purtroppo i risultati sperimentali sono pochi e non sistematici, e non è possibile trarne indicazioni comparative.

Il lavoro di *Albertin, Frohlich, Winter, Höhn* e *Michaelis* [13] del 1994 affronta alla radice il problema della resistenza delle ruote dentate nitrurate, 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.

La sperimentazione è stata molto accurata e i risultati comparativi sono riassunti nel grafico riportato in figura 7, nel quale vengono riportati anche i risultati di prove eseguite da altri sperimentatori tedeschi *(Weck)*. Appare evidente il fatto che la resistenza al *pitting* degli acciai provati (39CrMoV13.9 nitrurato a gas, e 31CrMoV9 con nitrurazione ionica) è del tutto paragonabile a quella dell'AISI 9310H cementato. Quest'ultimo è un acciaio con C=0,07-0,13%, Mn=0,40-0,70%, Si=0,15-0,30%, Cr=1,00-1,45%, Mo=0,08-0,15%, Ni=2,95-3,55%, quindi non molto diverso dal 16NiCrMo12 salvo la minore percentuale di Mo.

Gli autori osservano comunque che i nitrurati sono sensibili ai sovraccarichi di flessione al piede del dente, che sono dunque da evitarsi mantenendo le sollecitazioni nei limiti dei valori ammissibili; ciò concorda con le osservazioni di *Maenosono* e di altri sperimentatori, descritte più sopra.

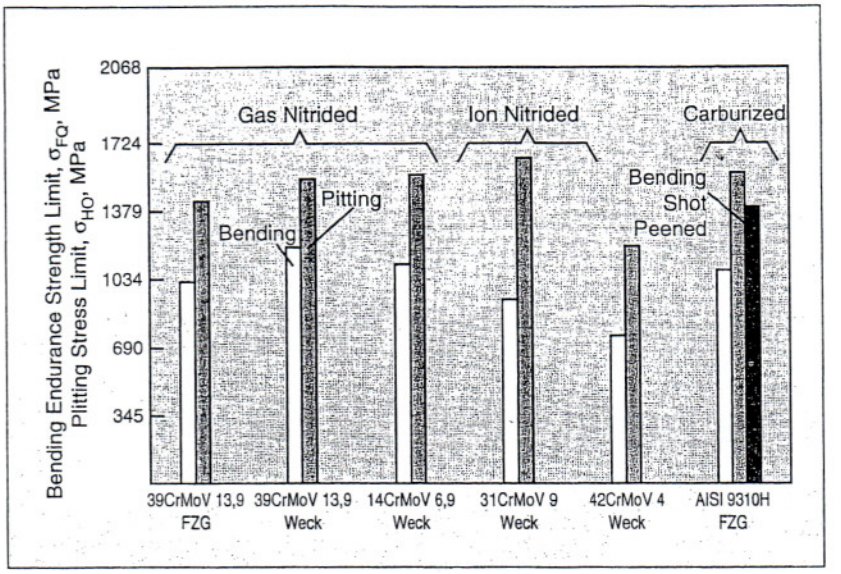


Fig. 7 - Confronto fra la resistenza a pitting e a flessione di ingranaggi in vari acciai al CrMo, cementati e nitrurati secondo Albertin et al dell'FZG- TU Monaco di Baviera [13].

Importanza dei controlli non distruttivi e delle tensioni residue

L'importanza delle tensioni residue per quanto concerne la resistenza a fatica, in generale, e la resistenza al *pitting* e alla fatica a flessione dei denti, in particolare, è nota in letteratura da molto tempo (vedi per esempio il recente lavoro sugli ingranaggi [14]). È ben riconosciuto il fatto che *tensioni residue di compressione* contribuiscono a migliorare la resistenza a fatica, perché si oppongono all'apertura della cricca di fatica e quindi alla nucleazione e conseguente propagazione, mentre le *tensioni residue di trazione* hanno l'effetto contrario e sono perciò, in generale, da evitarsi.

Nel caso delle ruote dentate gli sforzi residui derivano da due effetti: il trattamento termico e le lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo (fresatura e rettifica).

Il t.t. in genere dà tensioni residue favorevoli, cioè di compressione, mentre le lavorazioni meccaniche con asportazione di truciolo tendono a darne di sfavorevoli, cioè di trazione (vedi per esempio [15] per quanto riguarda la tornitura).
Il problema principale, nel caso dei t.t. per ruote dentate, è quello di controllarne il valore ottenuto e quindi l'effetto benefico che se ne può ottenere, che non va dato per scontato e che talvolta può essere considerato compreso nel vantaggio dell'indurimento superficiale. Nelle simulazioni e nei calcoli dello stato di sforzo sotto la superficie, come osserva giustamente *Tobie* dell'FZG, occorre sovrapporre gli effetti dello stato di sforzo dovuto al contatto al campo di tensioni residue.
Queste ultime vanno misurate, perché il loro calcolo è complesso, e fonte di possibili errori. Occorre quindi prevedere questi accurati controlli sui denti delle ruote che saranno oggetto della sperimentazione.
Come osservano giustamente anche *Convert* [16] e *Peyrac* [17] del Cetim, le misure non solo delle tensioni residue, ma anche dell'austenite residua, per le ruote dentate cementate sono molto importanti; quest'ultima, fra l'altro, non dovrebbe superare il 25%. Viene suggerito anche di tracciare il gradiente delle tensioni residue in profondità (la misura coi raggi X media il valore dello sforzo su circa 5-10 μm di profondità); ma ciò fa diventare distruttiva la misura (occorre effettuare asportazione di materiale per via elettrolitica ecc.), e non può essere effettuata su ruote dentate oggetto di prove successive.

Il problema della distorsione dovuta al t.t. e i vantaggi della nitrurazione

Come è noto, uno dei principali problemi di tutti i t.t. delle ruote dentate riguarda le conseguenti distorsioni, che richiedono talvolta lavorazioni di macchina successive al trattamento per riportare la geometria della dentatura ai valori di disegno.
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, sono di gran lunga minori rispetto ad altri t.t., e spesso quasi trascurabili.
Questo vantaggio emerge ancora di più se si tiene conto del fatto che la rettifica dopo cementazione (o comunque dopo un t.t. di indurimento superficiale qualsiasi, per es. la tempra a induzione) asporta, in maniera talvolta non uniforme, lo strato indurito; e quanto più asporta in profondità, tanto più diminuisce la durezza della superficie.
Secondo *Rakhit* della Solar Turbines questo fatto può penalizzare la capacità di carico delle ruote. In un recente studio [18] e nel suo libro [19] egli calcola la differenza fra la durezza superficiale e quella più bassa che "affiora" dopo la rettifica; se la distorsione è limitata, e quindi lo spessore di materiale da asportare è piccolo, la penalizzazione è piccola, ma se la distorsione è importante si può arrivare a diminuire la durata utile al *pitting* anche del 30%. La penalizzazione viene introdotta attraverso un apposito *Distorsion Derating Factor (DDF)* che, a seconda dei materiali, del gradiente della durezza e della severità della distorsione, può raggiungere valori fra 0,9 e 0,72, come appare dal-

		Hardness versus case depth gradient		Distortion severity		
Gear material	High or low alloy	Hardness drop less than half a point HRC for every 0.05 mm (0.002 in.). Stock overalloccated (0.127 mm, or 0.005 in.)	Hardness drop more than half a point HRC for every 0.05 mm (0.002 in.). Stock overalloccated (0.127 mm, or 0.005 in.)	Low (within 1 AGMA class below pre-heat-treat quality)	High (over 1 AGMA class below pre-heat-treat quality	Distortion derating factor (DDF)
Air melt						
4320	High		X	X		0.80
8620H	Low		X		X	0.80
9310H	High	X			X	0.80
17CrNiMo6	Low		X		X	0.75
Vacuum melt						
4320	High		X	X		0.85
4330M	High	X			X	0.80
9310H	High	X		X		0.85
HP 9-4-30	High	X		X		0.90

Fig. 8 - Il distorsion derating factor DDF secondo Rakhit per le ruote dentate cementate [18].

la figura 8.
È un ulteriore argomento a favore della nitrurazione nei confronti della cementazione, perché questo fattore si applica solo per i cementati e non per i nitrurati.
La criticità della questione della profondità di cementazione è confermata anche dal lavoro di *Tobie* dell'FZG di Monaco di Baviera, che osserva come possa essere penalizzante sulla capacità di carico uno strato indurito di profondità insufficiente, e conclude che è bene valutare con cura la profondità ottimale in relazione alla resistenza desiderata [20].

Conclusioni

Questi sono gli aspetti principali che emergono dal confronto fra ingranaggi cementati e nitrurati:
1. dall'esame della letteratura risulta che sono pochissimi gli studi comparativi fra nitrurazione e cementazione;
2. le normative (in particolare la ISO 6336) assegnano ai nitrurati una capacità di carico inferiore di circa il 15% a quella dei cementati;
3. dallo studio comparativo scientificamente più valido, quello svolto dall'FZG della T. U. di Monaco di Baviera (Germania), risulta invece che la resistenza a fatica dei nitrurati è paragonabile a quella dei cementati.
Va quindi probabilmente riconsiderata, alla luce di quanto visto, la scelta sul trattamento termico di indurimento superficiale da preferire per una serie di applicazioni per le quali attualmente viene scelta la cementazione.
Infatti la nitrurazione, tenendo conto di tutti gli aspetti della questione (e in particolare i vantaggi dati dalla limitatissima variazione di forma dopo il trattamento), è sicuramente competitiva in molti casi nei quali viene adottata – probabilmente per motivi di tradizione e di mancanza di conoscenze certe in materia – la cementazione.

Bibliografia

[1] G. Niemann, H. Winter, *Elementi di macchine*, voll. I, II, III, EST – Springer, Milano, 1986.
[2] ANSI/AGMA 1010-E95– *Appearance of Gear teeth-Terminology of wear and failure.*
[3] C. Lipson, R.C. Juvinall, *Handbook of Stress and Strength*, Ed. The Macmillan Co., New York.
[4] K.E. Thelning, *Steel and its heat treatment*, Butterworths, 1975.
[5] G. Parris, *Carburising – Microstructures and properties*, 2nd edition, ASM Internationa, 1999.
[6] AA. VV., *Source book on nitriding*, ASM, 1977.
[7] K. Maenosono, A. Ishibashi, K. Sonoda, *Impact fatigue strength of gear teeth case hardened by plasma nitriding*, ASME Power Transmission and gearing Conference, 1996.
[8] K. Maenosono, A. Ishibashi, K. Sonoda, *Effect of plasma nitriding upon impact fatigue strength of gears made of ductile iron*, 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris, 1999.
[9] K. Inoue, S. Lyu, G. Deng, M. Kato, *Fracture Mechanics based evaluation of the effect of surface treatments on the strength of carburised gears*, VDI Berichte nr. 1230, 1996
[10] T. Masumaya, *Bending strength of carburized gear teeth with a micro notch*, 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris, 1999.
[11] S. Glodez, *Numerical simulation of micropitting on gear teeth flanks*, 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris, 1999.
[12] E.J. Tesker, *A study of the contact strength of highly loaded cemented and nitro-cemented gearing*, International Gearing Conference, Newcastle, UK, 1994.
[13] L. Albertin, R.L. Frolich, H. Winter, B.-R. Höhn, K. Michaelis, *Load Carrying Capacity of Nitrited Gears*, AGMA 94FTM4, St. Louis, 1994.
[14] M. Benedetti, V. Fontanari, P. Oster, T. Tobie, *Influence of residual stresses on fatigue behaviour of surface treated gears*, Convegno AIAS 2001.
[15] E. Capello, P. Davoli, A. Bassanini, A. Bisi, *Residual stresses and surface roughness in turning*, in "Trans. ASME – Journal of Engineering Materials and Technology", july 1999.
[16] F. Convert, *La diffraction X au service des engrenages – analyse des contraintes et dosage de l'austenite*, 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris, 1999.
[17] C. Peyrac, *Traitements combinés cementation/grenaillage: influence sur les contraintes residuelles*, 4th World congress on Gearing and Power Transmission, Paris, 1999.
[19] A.K. Rakhit, *Influence of heat treat distorsion on the pitting life of ground, carburized and hardened gears*, 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris, 1999.
[20] T. Tobie, *Case Depth and Load Capacity of case-carburized Gears*, 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris, 1999.