

# Failure analysis di ruote dentate

P. Cerchier, E. R. Dal Piaz, L. Pezzato, A. Zambon, M. Dabalà, I. Calliari

Questo studio consiste in una *failure analysis* di ruote dentate montate su di una macchina agricola soggette a rotture dei denti avvenute in esercizio. Due ruote sono state oggetto di analisi metallografiche, composizionali e fotografiche, nonché di prove di micro durezza e di osservazioni al microscopio elettronico. Le analisi fotografiche hanno subito evidenziato una forte usura delle superfici del dente. Nonostante il meccanismo di rottura sia attribuibile alla fatica, non erano visibili le classiche linee di spiaggia sulla superficie di frattura e ciò probabilmente a causa del basso numero di cicli che hanno portato alla rottura delle ruote dentate. L'analisi della composizione e della microstruttura dell'acciaio non hanno evidenziato criticità. Erano infatti presenti all'interno del materiale solfuri ma non in quantità tale da giustificare il cedimento. In conclusione il materiale delle ruote non presentava anomalie pertanto le cause del cedimento degli organi analizzati erano da ricercarsi in un'errata progettazione degli stessi o in un loro errato montaggio.

**PAROLE CHIAVE:** FAILURE ANALYSIS, RUOTE DENTATE, ACCIAIO DA CARBOCEMENTAZIONE

## INTRODUZIONE

Le ruote dentate sono organi meccanici utilizzati per trasmettere tra due alberi un moto rotatorio (momento meccanico) con un rapporto di trasmissione costante attraverso l'ingranamento di denti a profilo coniugato.

Le ruote dentate vengono classificate principalmente nelle seguenti due categorie: cilindriche con denti paralleli all'asse di rotazione e cilindriche a denti elicoidali, in cui i denti sono inclinati rispetto all'asse.

Quest'ultime, grazie al graduale ingranamento, risultano essere meno rumorose; inoltre, a causa della maggiore superficie di contatto che le caratterizza, a parità di coppia scambiata, consentono di ridurre l'usura dei denti dovuta al contatto fisico.

Il mercato degli ingranaggi è molto vasto ed i settori in cui sono più utilizzati sono quello alimentare (impianti di macinazione, agitatori, nastri trasportatori, etc.), l'industria aeronautica (sistemi in motori ad elica o dispositivi per il controllo dei velivoli), l'automazione (robot industriali, posizionatori di precisione, attrezzature a funzionamento intermittente, ...) e quello dei mezzi di trasporto (dal settore automobilistico ai mezzi agricoli) [1]. Nel triennio 2013-2015 il mercato europeo degli ingranaggi ha avuto picchi attorno ai 9,4 miliardi di euro. Di questo mercato, Germania ed Italia risultano essere i principali fornitori, in grado di soddisfare circa il 70% della domanda (43% Germania, 27% Italia) [2]. Il materiale maggiormente impiegato per la produzione

**P. Cerchier, E. R. Dal Piaz, L. Pezzato,  
M. Dabalà, I. Calliari**

Dipartimento di Ingegneria Industriale,  
Università degli Studi di Padova, Padova

**A. Zambon**

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali,  
Università degli Studi di Padova, Vicenza

delle ruote dentate è l'acciaio. È molto importante che l'acciaio possieda elevata durezza superficiale, che garantisca contro il danneggiamento per usura, ma anche un'adeguata resistenza meccanica e buona tenacità contro i fenomeni di fatica flessionale.

I trattamenti termochimici consentono di ottenere entrambe le proprietà nello stesso componente. Infatti il trattamento termico massivo, quale la bonifica, conferisce al pezzo resistenza e tenacità mentre il trattamento superficiale (cementazione o nitrurazione) produce un sensibile incremento della durezza sulla superficie del dente inducendo, al contempo, stati tensionali residui di compressione.

Pertanto, benché vi siano molte applicazioni in cui le ruote dentate entrano in esercizio senza essere indurite superficialmente, per tutte le applicazioni speciali ove è richiesta elevata affidabilità della costruzione meccanica è invece abituale eseguire trattamenti di cementazione o nitrurazione.

Di questi la cementazione, o carburazione, è il trattamento più impiegato: in questo caso la ruota viene tenuta per circa 2-5 ore ad una temperatura compresa fra 825°C e 925°C in atmosfera gassosa ricca in monossido di carbonio. In questa fase gli strati più superficiali del pezzo adsorbono carbonio raggiungendo un tenore dello 0,7÷0,9%. Successivamente il pezzo viene temprato in olio e rinvenuto a temperature comprese fra 150°C e 200°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 dell'ordine di 1-3 mm. Al termine del trattamento di cementazione è sempre necessario effettuare le operazioni di lavorazione di finitura (rettifica) per via delle inevitabili deformazioni indotte sulla dentatura in particolare, a seguito della tempra.[3]

Lo strato indurito efficace è il riferimento tramite cui viene determinata la qualità del trattamento termochimico. Il motivo principale risiede nel fatto che l'entità della zona interessata da benefici stati tensionali di compressione aumenta al crescere della profondità di indurimento. In particolare, il comportamento a fatica del componente risulta essere migliore con l'aumentare della profondità di cementazione [4, 5].

D'altro canto, un trattamento troppo spinto con un eccessivo spessore dello strato indurito è controproducente in quanto

si può incorrere nel fenomeno di iper-cementazione, con la formazione di tensioni residue di trazione e che possono risultare in seguito particolarmente dannose a causa della formazione di *micropitting*. Lo spessore dello strato deve essere limitato a quanto riportato nelle caratteristiche tecniche e dal comportamento in esercizio dell'ingranaggio, in quanto la tenacità a frattura del materiale tende a diminuire a seguito del processo di indurimento effettuato con processi termochimici. Per tali ragioni, la profondità ottimale dovrebbe essere contenuta entro un certo intervallo, in funzione della dimensione del pezzo da trattare [6, 7].

Un corretto trattamento di carbocementazione è quindi molto importante per evitare la rottura del componente in esercizio, ma non è l'unico fattore a determinarne l'affidabilità.

I vari tipi di cedimenti della ruota dentata 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*).

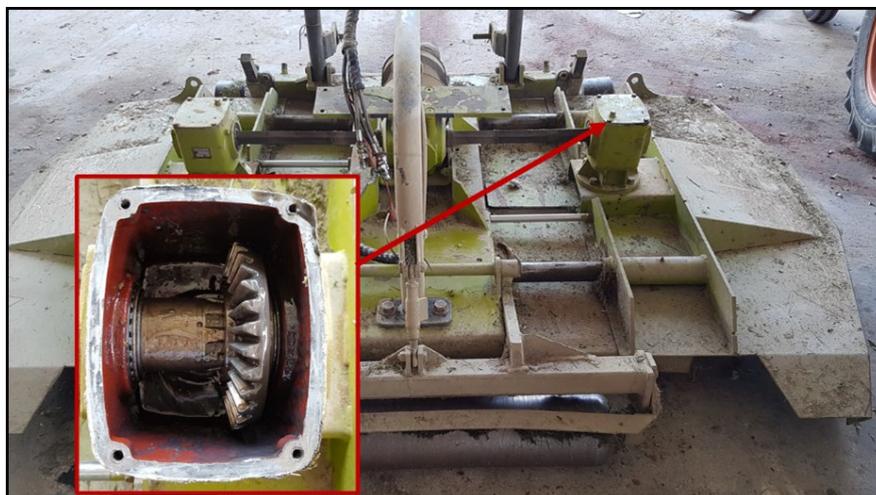
I cedimenti per grippaggio sono di solito collegati a fenomeni di scarsa o carente lubrificazione che si instaurano per via delle condizioni operative imposte da velocità di rotazione, temperatura e carico trasmesso.

Le rotture imputabili a fenomeni di fatica da contatto sono molto più complesse giacché entrano in gioco attivamente sia il materiale scelto, sia lo stato di sollecitazione locale prodotto dal contatto ripetuto in zone prossime alla superficie. Infine la rottura per fatica a piede del dente è la causa meno comune e può manifestarsi nel caso molto raro di un errato dimensionamento, dell'impiego di materiali non adatti, che hanno subito un errato trattamento termico o ancora dell'errato montaggio dell'organo di trasmissione [8].

In questo lavoro viene descritta una *failure analysis* comparativa su due ruote dentate che ha permesso di discriminare quali fossero i meccanismi prevalentemente coinvolti nel manifestarsi dei cedimenti. La *failure analysis*, o analisi delle rotture, è uno studio molto importante perché, identificando le cause di rottura di un componente, è possibile prendere i provvedimenti necessari per evitare che l'incidente si ripeta.

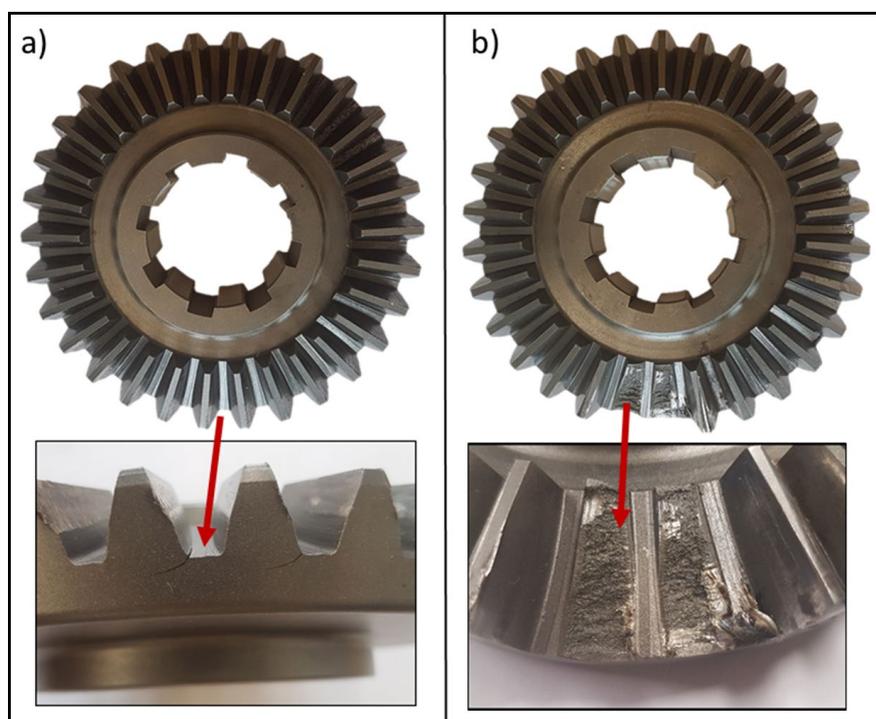
## MATERIALI E METODI

Il presente studio si propone di identificare le cause di alcune rotture di ruote dentate che erano parte della trasmissione di un trinciaerba (Figura 1). Le rotture si sono verificate ripetutamente e dopo poche ore di lavoro.



**Fig.1** - Immagine delle ruote dentate nell'ambiente di lavoro / gear wheels in the workplace

Sono state quindi analizzate due di queste ruote coniche, di diametro di 155mm. Una ruota, denominata A (Fig. 2a), sebbene possedesse ancora tutti i denti, presentava due cricche profonde alla base di due denti adiacenti, mentre l'altra ruota, denominata B (Fig. 2b), aveva due denti rotti in posizione adiacente



**Fig.2** - Immagine delle ruote dentate analizzate: una ruota con cricche alla base del dente (a) ed una con rottura di due denti adiacenti (b) / Image of the analyzed gear wheels: a wheel with cracks at the base of the tooth (a) and one with breakage of two adjacent teeth (b)

È stato esaminato un dente per ciascuna ruota, nel primo caso uno di quelli distaccati mentre nel secondo caso il campione è stato ricavato aprendo la cricca. I campioni sono stati puliti in acetone ed ultrasuoni. È stata determinata la composizione chimica dell'acciaio con un quantometro Thermofisher ARL iSpark 8860 e si è quindi proceduto con l'osservazione con stereomicroscopio (Zeiss Stemi 2000-C) e microscopio elettronico (SEM) (Cambridge Stereoscan 440 con sonda EDS Philips PV9800) delle superfici di frattura. Ciascun dente è stato anche tagliato, inglobato in sezione e lucidato. I provini sono stati quindi osservati al microscopio ottico (Leica DMRE) e al SEM per studiare le

## RISULTATI

Innanzitutto, osservando le ruote, si è notato che tutte le fratture sono avvenute alla base dei denti, punti ove lo sforzo indotto dalla flessione è massimo. Sono inoltre molto evidenti sui fianchi di tutti i denti segni di usura.

eventuali inclusioni presenti nell'acciaio. Successivamente i campioni sono stati attaccati chimicamente con una soluzione di alcool etilico contenente il 5% di acido nitrico (Nital 5%). Sono poi state effettuate prove di micro-durezza Vickers, con l'applicazione di un carico di 200g per 30 secondi.

Impiegando un microdurometro (Leitz Durimet), è stato realizzato un profilo di durezza a partire dal bordo esterno del dente e procedendo fino al cuore, permettendo di calcolare la profondità raggiunta dal trattamento di carbocementazione.

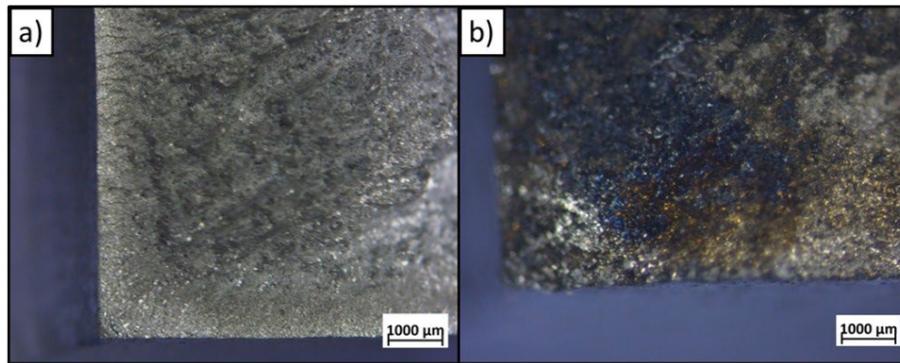
L'usura non è inoltre distribuita in maniera uniforme su tutto il fianco dei denti.



**Fig.4** - Evidenti segni di usura al fianco dei denti delle ruote analizzate. / Clear signs of wear on the side of the teeth of the analyzed wheels.

La presenza delle cricche alla base dei denti della ruota A indica come queste si propagano per fatica durante diversi cicli di carico-scarico. Nonostante ciò le superfici di frattura osservate non presentano linee di spiaggia o la tipica morfologia della rottura per fatica. Questo fa supporre che

la propagazione sia avvenuta molto velocemente, ovvero nell'arco di relativamente pochi cicli. Inoltre nei punti di innesco (Fig. 3) non sono visibili macroscopicamente difetti.



**Fig.5** - Foto allo stereomicroscopio dei punti di innesco delle cricche nella ruota A (a) e B (b). / Stereomicroscope photos of the trigger points of cracks in wheel A (a) and B (b).

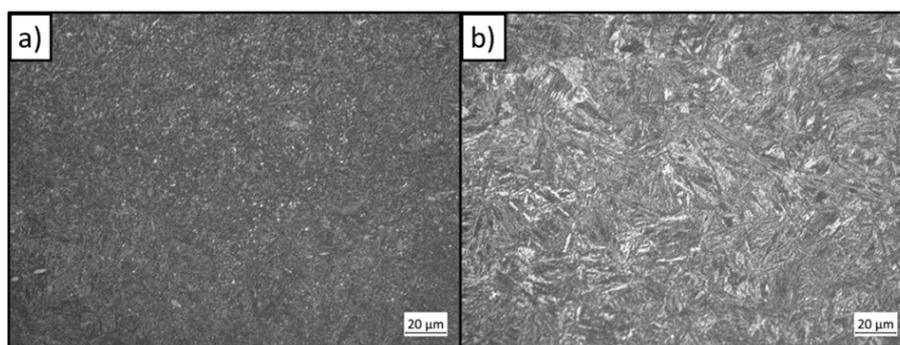
**Tab.1** - Composizione delle ruote dentate analizzate / Composition of the analyzed gear wheels.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Al [%]	V [%]
0,22	1,238	0,253	0,0238	0,0107	1,141	0,0983	0,018	0,0234	0,004
Cu [%]	Ca [%]	Sn [%]	Ti [%]	Co [%]	As [%]	Pb [%]	B [%]	Nb [%]	Ta [%]
0,175	0,0008	0,0079	0,0019	0,0141	0,0097	0,0002	0,0004	0,0014	0,0001
Zr [%]	W [%]	Zn [%]	Sb [%]	Mg [%]	Bi [%]	N [%]	Fe [%]		
0,0017	0,0012	0,0009	0,0009	0,0006	0,0001	0,001	96,75		

La composizione chimica dell'acciaio è riportata in Tabella 1. Secondo la norma UNI EN 10084 l'acciaio risulta essere 20MnCrS5, comunemente chiamato Case Hardening Steel. Un tenore di carbonio relativamente basso è funzionale a una corretta carbocementazione. In questo caso, infatti, durante il trattamento è più accentuato il gradiente di concentrazione tra il carbonio presente sulla superficie del pezzo e quello presente all'interno del pezzo stesso e perciò il

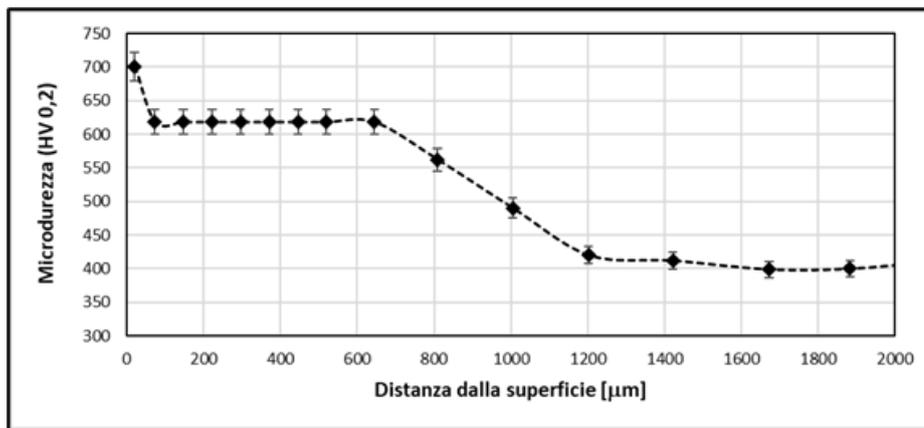
processo di diffusione del carbonio è favorito. Il manganese migliora la temprabilità dell'acciaio ed è utilizzato come disossidante, mentre lo zolfo migliora la lavorabilità alle macchine utensili.

L'analisi al microscopio ottico evidenzia una microstruttura consistente in martensite rinvenuta che arriva fino a cuore e uno strato carbocementato uniforme lungo tutto il profilo del dente.



**Fig.6** - Microstrutture delle ruote dentate: strato superficiale ricco in cementite (a) e martensite rinvenuta a cuore del dente (b).

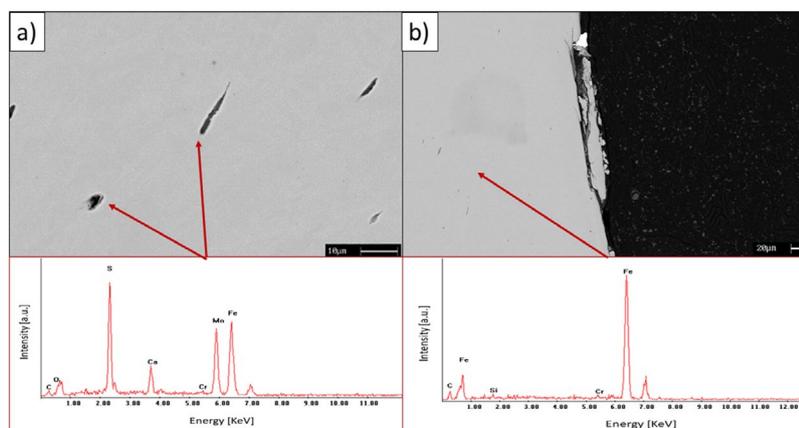
I risultati delle misure di micro-durezza effettuate sono state riportate in Fig. 4.



**Fig.7** - Profilo di durezza Vickers dalla superficie del dente analizzato. / Vickers hardness profile from the surface of the analyzed tooth.

Dai dati è possibile notare che lo strato indurito efficace carbocementato aveva uno spessore di circa 800 µm e che il dente aveva una durezza in superficie di 700 HV, dato nella norma. L'analisi al SEM non ha evidenziato particolarità sulla

superficie di frattura mentre nella sezione del pezzo ha mostrato la presenza di numerosi solfuri di manganese (Fig. 8a) ed il pitting presente in corrispondenza della superficie fortemente usurata (Fig. 8b).



**Fig.8** - Immagine SEM con spettro EDS dei solfuri di manganese (a) e del pitting sulla superficie usurata del dente (b). / SEM image with EDS spectrum of manganese sulphides (a) and pitting on the worn surface of the tooth (b).

## CONCLUSIONI

Sono state analizzate due ruote dentate ai fini di identificarne le cause di cedimento verificatosi dopo poche ore di esercizio. L'osservazione delle stesse ha subito evidenziato una rottura per fatica a piede del dente.

Sebbene la superficie di frattura non presentasse la tipica morfologia della fatica questo fatto è stato imputato al fatto che la cricca si è propagata velocemente durante pochi cicli di carico-scarico.

Si è verificato che l'acciaio analizzato presenta una composizione chimica compatibile con il 20MnCrS5 in accordo alla UNI 10084 il quale è un acciaio adatto alla produzione di ingranaggi. La microstruttura e l'andamento dei valori di micro-durezza hanno evidenziato corretti trattamenti termici massivi ed una regolare esecuzione del trattamento di carbocementazione della superficie. Sono presenti all'interno del materiale solfuri di manganese ma non in quantità tale da giustificare il

cedimento.

Sono altresì evidenti severi segni di usura che non sono distribuiti in modo uniforme sul fianco del dente: poiché il materiale delle ruote non presenta anomalie, le cause del cedimento degli organi analizzati sono da ricercarsi in un'errata progettazione degli stessi o in un loro errato montaggio. La correttezza del dimensionamento riveste un ruolo fondamentale sulla durata di questi componenti meccanici. Una progettazione geometrica poco accurata ed imprecisa può portare al mancato rispetto di alcune tolleranze e causare strisciamenti. Anche assemblaggio ed installazione ricoprono un ruolo determinante per l'esercizio, e quindi la vita utile, delle ruote dentate. Un corretto assemblaggio deve infatti evitare l'errato allineamento dei denti che può essere causa di inaspettati sovraccarichi lungo la linea di contatto tra dente e dente.

In conclusione questo studio ha evidenziato come, nello svolgimento di una failure analysis, è importante non trascurare nessuna delle possibili cause di rottura: sebbene errori di progettazione e assemblaggio siano poco frequenti, nel caso in esame questi sono infatti stati i responsabili dell'evidente forte usura sul fianco dei denti e delle frequenti rotture per fatica dopo poche ore di esercizio.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Sorrenti A. Analisi di mercato di riduttori e moltiplicatori meccanici: attrattività e prospettive di business, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano. 2011; 64 – 76.
- [2] CBI. Centre of the Promotion of Imports from developing countries. Exporting gears and gearing system to Europe. 2017.
- [3] Boniardi M, Diavoli P, D'Errico F, Fusetti F. Effetto del trattamento termico superficiale sulla resistenza al pitting di ruote dentate. La Metallurgia Italiana; 2003; 25-32.
- [4] Genel K, Demirkol M. Effect of case depth on fatigue performance of AISI 8620 carburized steel, International Journal of Fatigue 21. 1999; 207.
- [5] Genel K, Demirkol M. Effect of ion nitriding on fatigue behaviour of AISI 4140 steel, Materials Science and Engineering A 279. 2000; 207.
- [6] Taucher H. Fatigue Strength of Steels and Cast Irons (in German), Fachbuchverlag, Leipzig. 1978.
- [7] Dawes C, Cooksey RJ. Heat Treatment of Metals, Special Report 95; 1966.
- [8] Boniardi M, Diavoli P, Caprioglio M, Mancuso A. Ingranaggi: Cementazione e nitrurazione a confronto. Organi di trasmissione. 2003; 112-122.

# Failure analysis of gear wheels

This study consists of a failure analysis of gear wheels mounted on an agricultural machine subject to several breakages in operation. Two gears were the subject of metallographic, compositional and photographic analyzes, as well as micro hardness tests and electron microscope observations. The photographic analyzes clearly highlighted a strong wear of the tooth surfaces. Although the failure mechanism is attributable to fatigue, the classic fatigue morphology patterns on the fracture surface were not visible and this was probably due to the low number of cycles that led to the failure of the gears. The analysis of the composition and microstructure of the steel did not reveal any critical issue. In fact, sulphides were present within the material but not in such quantities as to justify the failure. In conclusion, the material of the wheels did not present anomalies, therefore the causes of the failure of the analyzed parts were to be found in an incorrect design or in their incorrect assembly.

**KEYWORDS:** FAILURE ANALYSIS, GEARWHEELS, CARBURIZING STEEL