

# Ingranaggi sinterizzati per uso automobilistico

M. Asti, D. Bassan, M. F. Pidria

*Il processo della metallurgia delle polveri (Powder Metallurgy, P/M) annovera diversi vantaggi rispetto alle tecnologie concorrenti, quali una minore richiesta di energia e di materie prime, ed è adatta alla produzione industriale di componenti dalla forma complessa in grande serie. Tuttavia i componenti ottenuti tramite metallurgia delle polveri non raggiungono la resistenza meccanica tipica dei componenti massivi in acciaio. La densificazione superficiale di parti sinterizzate è una tecnologia molto promettente, in grado di ridurre, se non eliminare, questo divario di prestazioni. Il presente articolo descrive lo sviluppo di un processo di rullatura in grado di densificare la superficie dei denti di ingranaggi sinterizzati, con particolare attenzione alla metodologia di simulazione delle deformazioni elastoplastiche che avvengono durante la densificazione. Sono stati finora ottenuti risultati del tutto soddisfacenti, in grado di suscitare un rinnovato interesse da parte dell'industria automobilistica verso gli ingranaggi sinterizzati per applicazioni ad elevata potenza.*

**Parole chiave:** acciaio, fatica, metallurgia delle polveri, modellazione, tecnologie

## INTRODUZIONE

Le tecnologie tradizionali per la produzione di componenti metallici per applicazioni automobilistiche, come la forgiatura, la colata e le lavorazioni meccaniche, hanno spesso un forte impatto ambientale. La metallurgia delle polveri, essendo un processo di tipo "near net shape", o "net shape", è economicamente competitivo verso queste tecnologie e offre vantaggi significativi riguardo ai consumi di energia ed all'utilizzo delle materie prime (Figg. 1-2).

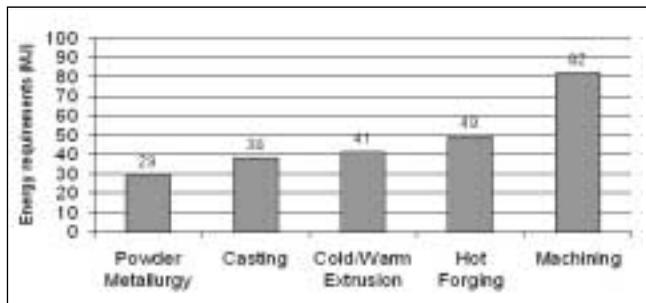


Fig. 1 – Vantaggi della P/M: consumo di energia (1).

Fig. 1 – Main P/M advantages: energy requirements (1).

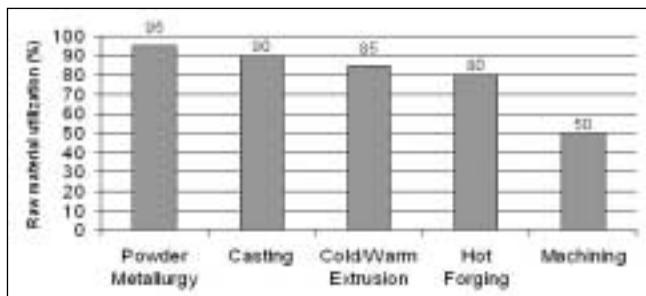


Fig. 2 – Vantaggi della P/M: utilizzo materiale grezzo (1).

Fig. 2 – Main P/M advantages: raw material utilizations (1).

Numerosi studi specifici hanno evidenziato l'inferiore impatto ambientale globale della tecnologia P/M rispetto ad altri processi di fabbricazione (2). I produttori di autoveicoli utilizzano questo processo già da diverso tempo, tanto che l'industria automobilistica rappresenta il mercato più importante per l'industria P/M. L'attuale produzione di parti automobilistiche sinterizzate è tuttavia rivolta solo a componenti soggetti a sollecitazioni basse o medie.

Il numero di tali componenti potrebbe aumentare in modo significativo solamente se la tecnologia P/M potesse offrire proprietà meccaniche migliori delle attuali a costi sostenibili. Secondo uno studio di Höganäs (3), il peso delle parti sinterizzate su un veicolo per trasporto passeggeri europeo potrebbe raggiungere un valore almeno pari a 27 kg (rispetto ai 7 kg medi attuali), se la loro resistenza meccanica fosse equivalente a quella dei componenti massivi ottenuti per lavorazione meccanica. Tale incremento di componenti sinterizzati sarebbe in massima parte rappresentato da ingranaggi per trasmissioni ad elevata potenza. Questo articolo riassume gli sforzi fatti per incrementare le proprietà meccaniche degli ingranaggi ottenuti per tecnologia P/M, attraverso l'impiego della tecnologia di densificazione superficiale, che rappresenta uno dei metodi più efficaci ed economicamente competitivi per migliorare le prestazioni di parti ottenute via P/M.

## IL PROCESSO DI DENSIFICAZIONE SUPERFICIALE

Per la fabbricazione di ingranaggi, la tecnologia di pressatura e sinterizzazione consente costi di produzione molto ridotti; tuttavia, nella gran parte dei casi, le proprietà meccaniche raggiunte sono inadeguate per applicazioni ad elevato carico. L'incremento della densità finale del sinterizzato consente tuttavia di aumentare le proprietà resistenziali e a fatica di tali componenti: in particolare, aumentando la densità relativa oltre il 90%, le proprietà meccaniche migliorano radicalmente (4). Per ottenere questo incremento, diverse sono le tecnologie alternative:

- processi di compattazione innovativi (warm compaction, high velocity compaction) per migliorare la densità del pezzo stampato;
- sinteroforgiatura, che permette il raggiungimento di densità elevate, ma in molti casi non è economicamente com-

M. Asti, D. Bassan, M. F. Pidria  
Centro Ricerche Fiat - Materials Engineering Dept., Orbassano (TO), Italy

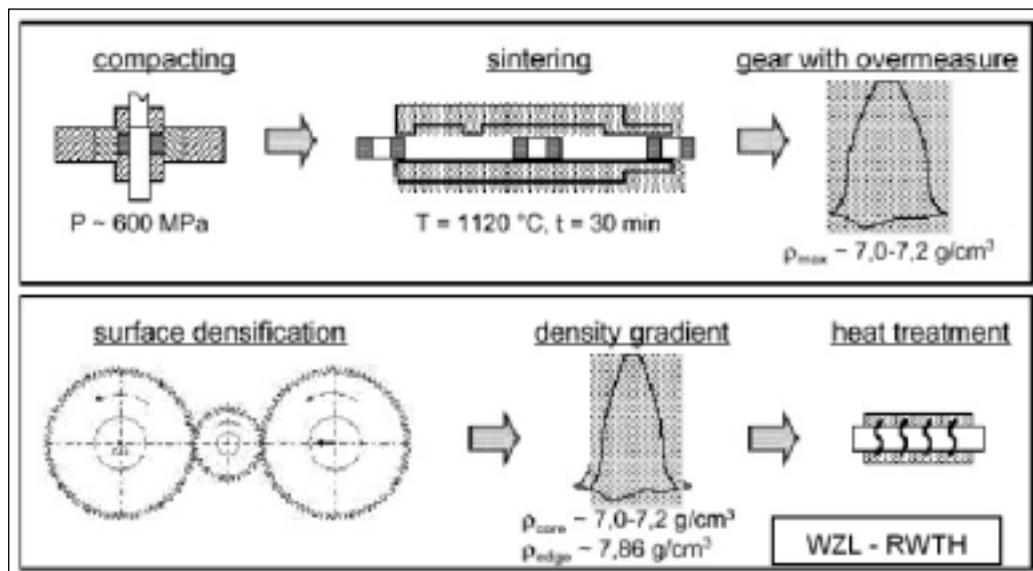


Fig. 3 – Schema del processo di densificazione superficiale tramite rullatura (per concessione di RWTH – WZL - Germany).

Fig. 3 – Scheme of surface densification technology via transverse rolling (courtesy of RWTH – WZL - Germany).

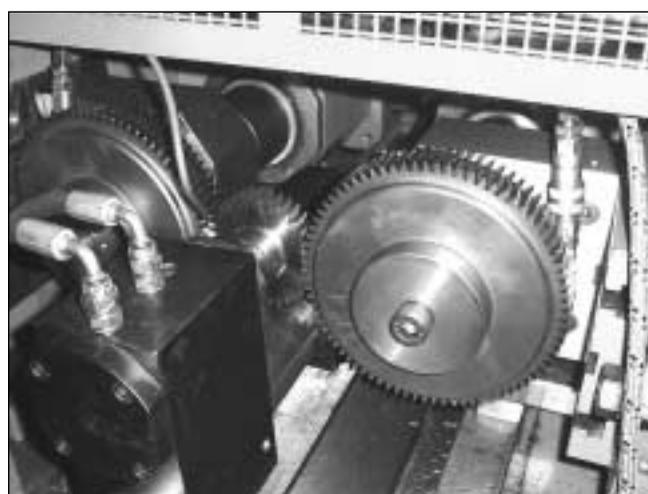


Fig.4 – Macchina rullatrice per la densificazione superficiale (per concessione di miniGears).

Fig.4 – Rolling machine for surface densification via transverse rolling process (courtesy of mG miniGears – Italy).

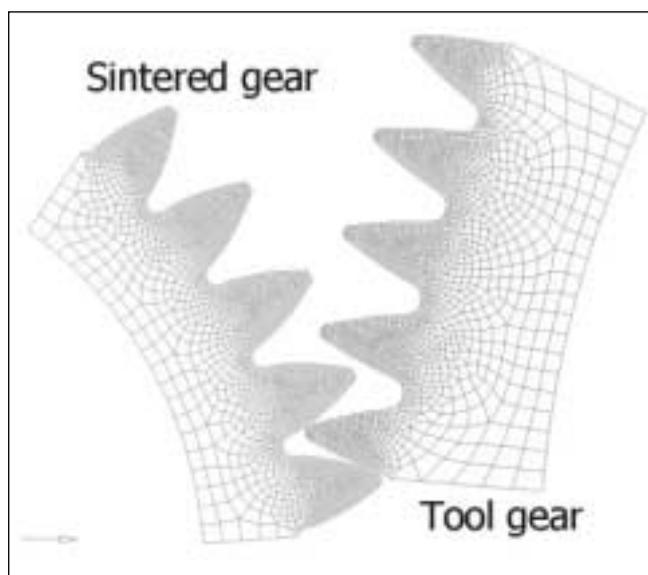


Fig. 5 – Simulazione della rullatura.

Fig. 5 – Rolling simulation scheme.

petitiva rispetto ai processi convenzionali (5);

- densificazione superficiale tramite rullatura.

Solitamente la rottura degli ingranaggi sinterizzati avviene per fatica a flessione, o per fatica da contatto. Le zone critiche sono la base del dente ed il suo fianco. In entrambi i casi gli sforzi massimi si trovano nella zona superficiale o leggermente sotto (contatto hertziano). Per questi motivi, una tecnologia, come la densificazione superficiale per rullatura, che incrementa la resistenza nella zona superficiale dei componenti è particolarmente indicata per raggiungere gli scopi sopra esposti.

La tecnologia di densificazione superficiale può essere riassunta come segue (Fig. 3):

- pressatura delle polveri ed ottenimento di una preforma;
- sinterizzazione (convenzionale a 1120°C);
- rullatura per densificare la superficie del dente;
- trattamento termico.

La preforma (ossia l'ingranaggio con un sovrametallo predefinito) viene posizionata fra due (o tre) utensili rullatori (Fig. 4). Il movimento radiale dei rullatori comporta la riduzione della distanza interassiale e densifica la superficie dei denti della preforma (incluso sia il fianco sia la base del dente). Solitamente la direzione di rullatura viene invertita per ottenere una densificazione simmetrica del materiale, e si adotta un lubrificante per evitare danneggiamenti da usura e/o generazione di trucioli.

La tecnologia è particolarmente competitiva dal punto di vista economico se non sono necessarie altre lavorazioni/finiture superficiali. Per questo motivo il profilo del dente generato dopo la rullatura rappresenta un aspetto critico: la geometria dei profili (dell'utensile rullatore e dell'ingranaggio preforma) ed il comportamento elasto-plastico (legato alle proprietà del materiale) sono i principali parametri che influenzano l'intero processo. Un approccio empirico, basato su prove sperimentali, rappresenta una metodologia costosa e dalle tempistiche troppo lunghe; per questi motivi si rende necessario il supporto di metodologie numeriche per l'ottimizzazione dei principali parametri.

#### MODELLAZIONE DEL PROCESSO DI RULLATURA

L'utilizzo della simulazione numerica ad elementi finiti (Finite Element Modelling, FEM) permette di valutare il comportamento elasto-plastico del materiale durante la rullatura. L'obiettivo principale di tali analisi è la definizione della forma del dente nell'ingranaggio P/M (preforma) e dell'utensile rullatore.

Nel presente lavoro è stato impiegato un codice commerciale, con cui il processo è stato modellato come segue: un ingranaggio rappresenta l'utensile rullatore, mentre la seconda ruota rappresenta la preforma (Fig. 5); la densificazione superficiale si ottiene riducendo la distanza fra l'asse della preforma e quello dell'utensile per ogni passaggio di rullatura.

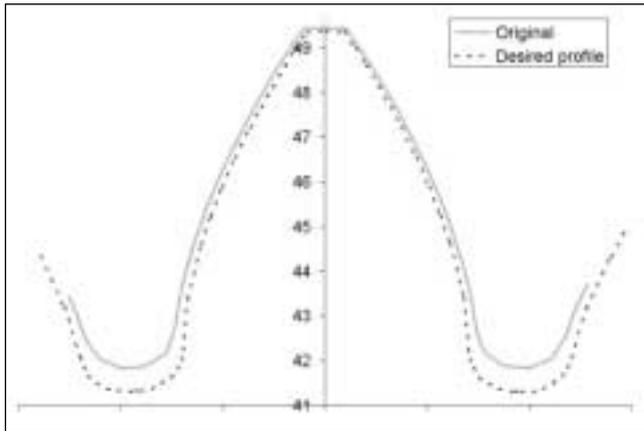


Fig. 6 – Profilo iniziale e finale.

Fig. 6 – Initial and desired profiles.

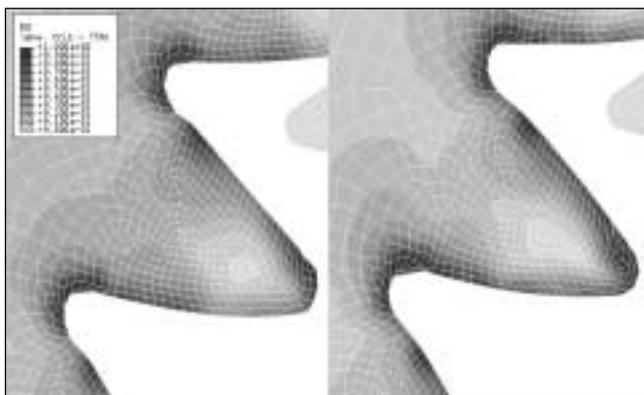


Fig. 7 – Simulazione della rullatura superficiale di ingranaggio P/M, densità relativa ottenuta a basso e alto numero di passaggi.

Fig. 7 – Modelling of surface rolling on P/M preform tooth: Relative Density (RD) obtained after different process step number (respectively low / high number of rolling revolutions).

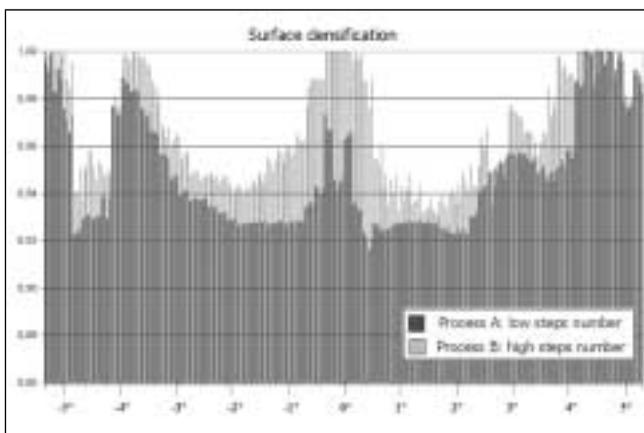


Fig. 8 – Densificazione superficiale (confronto a basso ed alto numero di passaggi di rullatura; asse x: sviluppo del profilo dente - asse y: densità relativa).

Fig. 8 – Surface densification distribution (low / high number of rolling revolutions); axis x: tooth profile development (degree) - axis y: relative density

ra. Test specifici sono stati effettuati per ricavare le proprietà meccaniche del materiale sinterizzato in esame in condizioni di sollecitazioni simili a quelle tipiche del processo di rullatura.

Un output importante della simulazione così effettuata è la distribuzione di densità dopo la densificazione. La preforma P/M è stata simulata partendo da una densità iniziale del 90% (7.0 g/cm<sup>3</sup>), mentre il comportamento elasto-plastico è stato riprodotto utilizzando un modello di plasticità per metalli porosi basato sulla teoria della plasticità di Gurson (6), modificata da Tvergaard (7).

Il processo di rullatura è continuo, ma nell'analisi FEM è stato suddiviso in vari passi, che approssimano il moto rotatorio e di avanzamento continuo dell'utensile sulla preforma. Ogni step di riduzione dell'interasse è stato simulato in cinque fasi: posizionamento, avanzamento, rullatura, allontanamento, rotazione di riposizionamento. In Fig. 6 il profilo della preforma iniziale è confrontato con quello desiderato in base alle specifiche di progetto, mentre in Fig. 7 si presenta la densificazione superficiale ottenuta in due diverse condizioni di rullatura. È possibile individuare alcune zone in cui la densificazione raggiunge valori più elevati, verificando l'influenza dei profili iniziali (della preforma e dell'utensile) sulla densificazione superficiale della preforma.

L'analisi FEM ha quindi dimostrato che il processo di densificazione è assai influenzato dal numero di passi (ossia dal numero di rotazioni), anche con interasse finale delle due ruote invariato. In particolare, con un numero maggiore di passi di rullatura (ovvero con un numero di giri di rotazione più elevato a parità di velocità di avanzamento) la densità finale del sinterizzato aumenta. Inoltre, la distribuzione finale di densità diventa più omogenea. Si può affermare pertanto che l'entità dell'avanzamento influenza la densificazione superficiale (Fig. 8-9), nonostante che la forma finale del profilo risulti sostanzialmente invariata.

Al fine di ottenere proprietà meccaniche uniformi è richiesta una buona ed omogenea densificazione superficiale e le informazioni numeriche ottenute via FEM sono adatte ad ottimizzare il design dei profili. Per ottenere maggiori valori di densificazione dove necessario, sono stati quindi studiati diversi profili migliorati.

In Fig. 10 una prima ipotesi delle modifiche alla base del dente della preforma P/M è mostrata: questa modifica serve a migliorare l'omogeneità della distribuzione di densificazione, evitando concentrazioni localizzate di materiale alla base del dente sulla preforma. Inoltre, la modifica consente

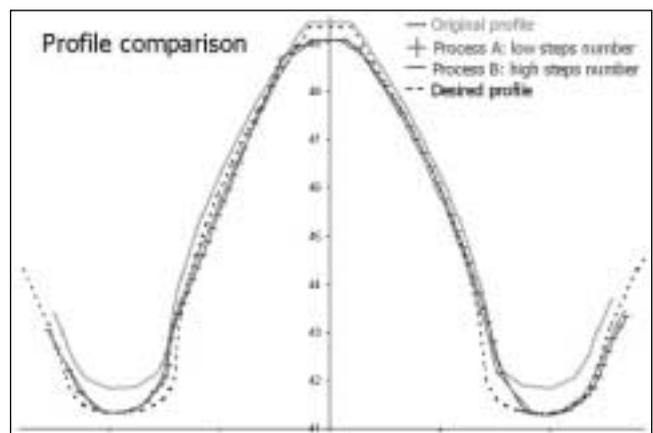


Fig. 9 – Profilo finale (confronto tra basso e alto numero di passaggi di rullatura).

Fig. 9 – Final shape profile (low / high number of rolling revolutions).

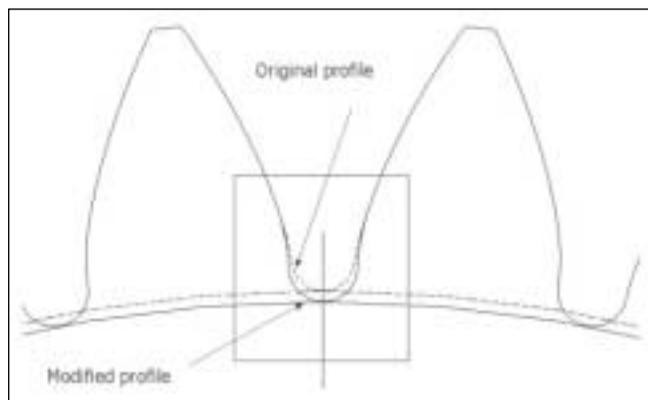


Fig. 10 - Modifiche al profilo della preforma.  
Fig. 10 - P/M gear shape profile modification.

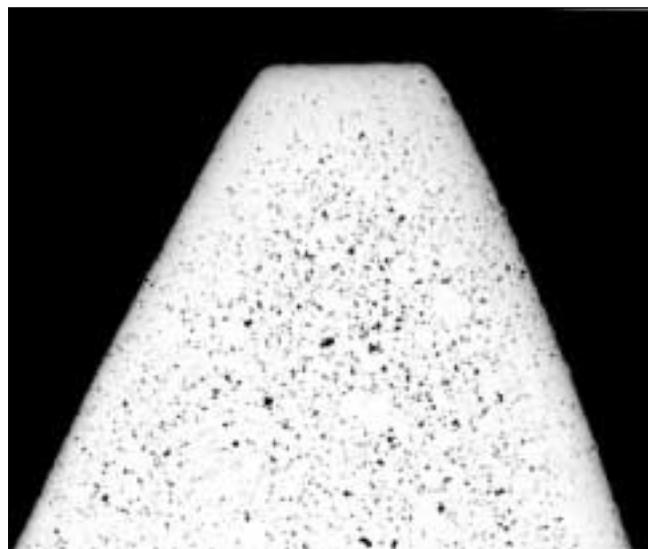


Fig. 11 - Distribuzione dei pori.  
Fig. 11 - Pore distribution in spur gear tooth.

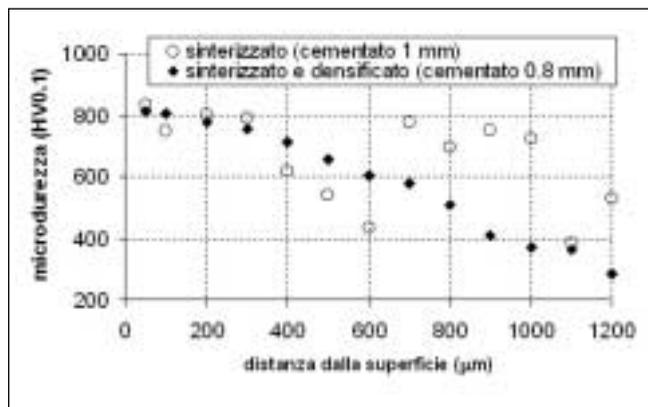


Fig. 12 - Profilo di microdurezza.  
Fig. 12 - Micro-hardness profile.

una migliore omogeneità superficiale di densificazione. Tuttavia, come mostrato in Fig. 9, il diametro esterno dopo rullatura risulta ancora non ottimale. La modifica del profilo alla base del dente serve perciò a garantire una migliore rispondenza al disegno richiesto.

Possiamo così riassumere i principali output dell'attività di simulazione:

- verifica funzionale dei profili della preforma e dell'utensile rullatore;

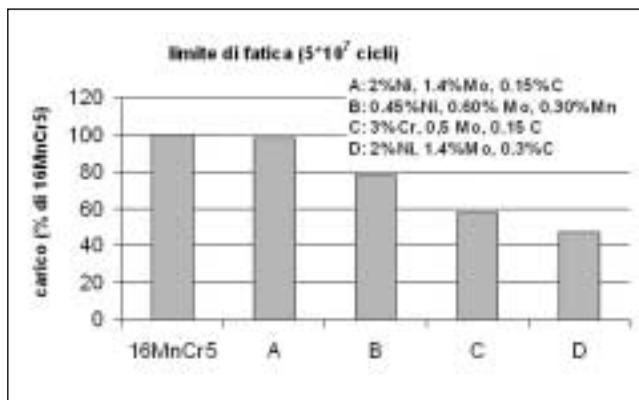


Fig. 13 - Risultati delle prove di "Rolling Contact Fatigue".  
Fig. 13 - Rolling contact fatigue tests results.

- valutazione del comportamento elasto-plastico dei materiali accoppiati;
- ottimizzazione dei parametri del processo di rullatura, in termini di entità e modalità di avanzamento;
- valutazione della distribuzione di densità lungo il profilo del dente.

Dalle analisi svolte, si può affermare che il profilo finale è influenzato prevalentemente dalla forma della ruota utensile. D'altra parte, la densificazione superficiale è influenzata dalla preforma P/M e dalla forma dell'utensile rullatore, ma anche dai parametri di processo e dalle proprietà del materiale. Con la simulazione del processo è possibile esplorare diverse configurazioni e parametri, per identificare i profili ottimizzati della preforma e dell'utensile.

#### MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI

Il processo di rullatura determina un materiale con una frazione di porosità decrescente dall'interno del componente verso la superficie (Fig. 11), fino a raggiungere uno strato completamente densificato. La profondità dello strato densificato dipende dallo spessore del dente ed è dell'ordine di alcuni decimi di millimetro (la profondità di densificazione è comunemente definita come la distanza dalla superficie in cui la densità supera il 98% della densità teorica (8)).

Il trattamento termico deve ovviamente essere ottimizzato per l'applicazione. La profondità di cementazione in particolare non deve superare la profondità di densificazione dovuta al processo di rullatura (9). Come conseguenza, la durezza dopo trattamento termico è in tutto paragonabile a quella di un acciaio cementato ed, inoltre, senza porosità, si possono evitare fenomeni di tempratura (Fig. 12).

La valutazione delle prestazioni a fatica di un materiale così ottenuto è stata eseguita tramite prove di "Rolling Contact Fatigue" su macchine tipo "twin disk" o a quattro dischi. Come materiale di riferimento è stato scelto un acciaio cementato 16MnCr5 (con profondità di cementazione 0.7 mm). È stato scelto, per la definizione del limite di fatica, un numero di cicli pari a  $5 \cdot 10^7$ , confrontando le prestazioni di differenti polveri a diverse profondità di densificazione. In Fig. 13 i risultati riguardanti tre materiali densificati superficialmente (varianti A, B, C) ed un materiale solamente sinterizzato (variante D) sono presentati. La variante D rappresenta il materiale P/M di riferimento, sinterizzato in condizioni convenzionali (pressatura semplice e sinterizzazione, con densità  $7.0 \text{ g/cm}^3$  e profondità di cementazione pari a 1 mm), ma non densificato. Le varianti A e B hanno profondità di densificazione di 1 mm, la variante C di 0.3 mm. Dal confronto si osserva che la variante A raggiunge lo stesso limite di fatica dell'acciaio 16MnCr5.

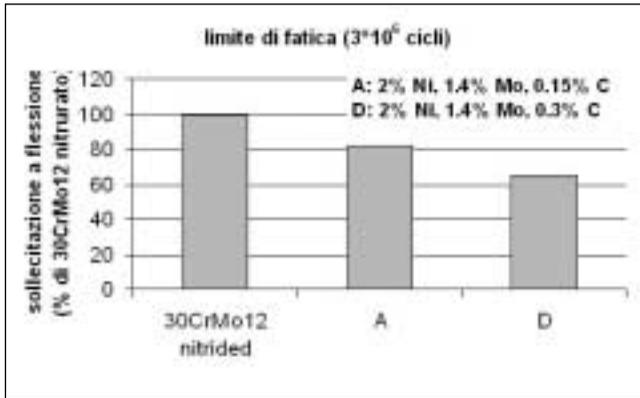


Fig. 14 – Risultati delle prove di fatica a flessione a base dente.

Fig. 14 – Tooth root bending fatigue results.



Fig. 15 – Ingranaggio motore per veicoli industriali.

Fig. 15 – Engine spur gear for trucks.

Le prestazioni di fatica a flessione sono state valutate tramite “pulsatore” su ingranaggi reali. Come riferimento è stato preso un ingranaggio motore a denti diritti (30CrMo12, profondità di nitrurazione 0.3 mm). La variante D (non densificata superficialmente) presenta un limite di fatica inferiore del 35% rispetto al 30CrMo12, mentre la variante A (profondità di cementazione 1 mm, profondità di densificazione 1 mm) limita il divario a meno del 20% (Fig. 14). Secondo i risultati correnti, quindi, il processo di densificazione superficiale non consente ancora il raggiungimento dello stesso limite di fatica dell'acciaio nitrurato.

Il vantaggio più importante della tecnologia sviluppata è comunque rappresentato dal costo finale dell'ingranaggio sinterizzato, stimato inferiore del 24% rispetto al corrispondente ingranaggio di normal produzione (Fig. 15). Questo risultato può essere raggiunto solo con la messa a punto ottimale del processo di rullatura, cosicché, per ottenere la qualità superficiale desiderata dopo le operazioni di sinterizzazione e rullatura, non sono necessarie ulteriori operazioni di finitura.

#### CONCLUSIONI

La densificazione superficiale dovuta a rullatura è una delle tecnologie più promettenti, per migliorare la resistenza mec-

canica di parti ottenute tramite P/M, in particolare di ingranaggi altamente sollecitati. Per superare gli aspetti più critici della tecnologia e per raggiungere la massima efficienza del processo, è necessario l'aiuto fornito da metodologie di progettazione numeriche (analisi FEM).

I risultati dei test di fatica mostrano un comportamento soddisfacente, in particolare riguardo alla resistenza al “Rolling Contact Fatigue” di ingranaggi P/M. Tuttavia sono indispensabili ulteriori sforzi di messa a punto del processo per incrementare le proprietà inerenti la fatica a flessione alla base del dente. I risultati ottenuti nel caso in studio sono comunque comparabili con quelli riportati in letteratura (10) relativamente ad altri ingranaggi sinterizzati e densificati superficialmente.

#### RINGRAZIAMENTI

Il lavoro descritto è stato parzialmente finanziato dalla Comunità Europea nell'ambito del progetto HIGH DENS (GRD1-1999-10674) del Quarto Programma Quadro. Si ringraziano pertanto i partner del consorzio per la loro attiva collaborazione: Höganäs (SE, coordinatore), miniGears (I), Regienov (F), Sinterstahl (D), WZL-RWTH (D).

#### RIFERIMENTI

- (1) A.A.V.V., "PM2 Industry Vision and Technology Roadmap", U.S. Department of Energy - Office of Industrial Technologies, September 2001
- (2) J. Tengzelius, "Life Cycle Assessment (LCA) of powder metallurgy", 2000 Powder Metallurgy World Congress, November 12-16, 2000, Kyoto, Japan
- (3) J. Tengzelius, "Challenges for the iron powder industry in the next millennium", EURO PM 97, Monaco di Baviera, ottobre 1997.
- (4) ASM Handbook, Vol. 7, Powder Metal and Technologies and Applications, pag 947-948
- (5) R. Slattery, F. Hanejco, M. Marucci, J. Müller, "Powder Metallurgy of High Density Helical Gears", SAE 2003-01-0336
- (6) Gurson, A. L., "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I--Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Materials", Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 99, pp. 2-15, 1977.
- (7) Tvergaard, V., "Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Condition", International Journal of Fracture Mechanics, vol. 17, pp. 389-407, 1981.
- (8) G. Rau, L.S. Sigl, M. Krehl, "Highly loaded P/M gears produced by selective surface densification", SAE 2003-01-0334
- (9) S. Bengtsson, L. Forden, L. and C. Kuylenstierna, "Performance and properties of surface densified PM transmission gears" Proceeding PM2 Tech World Congress 2002, Orlando, pp 2-50, 2-63, 2002
- (10) C. Sandner, R. Ratzl, "Sintered gear – Achievable load-carrying capacities by conventional and new production methods", VDI-Report nr. 1665, 2002.

SINTERED GEARS FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS

**KEY-WORDS:** steel, powder metallurgy, surface densification, modelling, gear

Powder Metallurgy (P/M) technology, being a "near-net" or "net" shape process, represents a cost competitive process, in particular for complex shape parts manufactured in large scale. Moreover P/M technology offers significant advantages regarding the energy consumptions and raw material utilization towards competitor processes.

Car manufacturers have focused the attention on P/M for several years and automotive industry represents, in fact, the most important market sector for sintered parts; anyhow, most automotive components made by P/M need only low to medium strength. P/M parts will increase their importance in cars only if they can guarantee improved mechanical strengths. The present paper summarizes the efforts to increase the mechanical properties of P/M gears. In particular, increasing the density above 90% of theoretical density means increasing radically the mechanical properties of P/M materials. One of the most promising technology suitable for this aim is the surface densification through transverse rolling process. Moreover this kind of technology is particular suitable for gear manufacturing. In fact gears, usually, fail due to bending fatigue or to rolling contact fatigue and their critical areas are the tooth root zone and the flank: in both cases, stress peaks are in the surface region or slightly below the surface. Therefore a technology that increases the strength in the component surface area can be considered as particularly suitable for gears production.

The surface rolling technology can be simply described as follow: the preform (i.e. P/M gear with a certain amount of stock material) is placed between two (or three) rolling tools. The radial movement of one rolling tool towards the other allows the densification of the preform material at the tooth surface (both flank and root surface).

The technology is particularly cost competitive if no machining/finishing is required on the tooth surface. For this reason the tooth profile generated after the rolling process represents a critical aspect: profile geometry of both rolling tool and preform gear in addition to elasto-plastic behavior (linked to material properties) are the main parameters influencing the entire process. A simply empirical approach (trial and error) is too expensive and time consuming, so that the support of numerical methods to the optimization of the relevant process parameters is fundamental.

A commercial Finite Element code has been used and adapted for the purpose. For a comprehensive analysis, specific tests have been performed in order to utilize P/M materials' mechanical properties measured in testing conditions similar to the ones occurring during surface rolling (elasto-plastic compression and deformation).

An important output of the simulation process is the density distribution on the tooth profile. It is possible to distinguish some areas where densification occurs up to a greater extent and therefore to define how the initial profiles (both of preform and tool) affect the final preform surface densification.

Moreover, the FEM analysis has demonstrated that the densification process is strongly influenced by the number of steps (i.e. of rolling revolutions), even with the same center distance reduction. In particular, increasing the number of rolling steps the gear final surface density increases and the final density distribution becomes more homogeneous. It can be stated that the feeding amount influences the surface densification, although no significant influences have been detected in the final shape profile.

Since a good and homogeneous surface densification is required to deliver uniform mechanical properties, the numerical information obtained via FEM could be used to design an optimized shape profile. We can summarize the main outputs of the simulation activity as follows:

- optimization of preform and rolling tool profile;
- analysis of elasto-plastic behavior of mating materials;
- optimization of rolling process parameters in terms of feeding amount;
- evaluation of density distribution along the tooth contour.

After the process development and optimization, specific tests have been performed in order to evaluate the improved strength characteristics of manufactured gears. Rolling capability tests have been performed on surface densified rollers in twin and four disk equipments. Case hardened 16MnCr5 steel has been selected as reference material. The endurance limit evaluation has been set at  $5 \cdot 10^7$  cycles comparing the performance of different powders at different densification depths. Variant A (one single press and sintering step,  $7.0 \text{ g/cm}^3$  density, surface densified at 1 mm depth and case hardened 1 mm deep) reaches the same endurance limit of 16MnCr5 steel.

Tooth root bending fatigue performance has been evaluated through pulsator testing on real gears. A spur engine gear (30CrMo12, nitriding depth 0.3 mm) has been selected as reference. Results have been compared with a bare sintered gear (variant D) and a surface densified gear (variant A material, case hardened 1 mm deep, densification depth 1 mm). Variant D shows an endurance limit that is 35% less than 30CrMo12, while the variant A gap is reduced to about 20%. According to current results, surface densification process, still being considerably beneficial, does not allow to reach the same endurance limit of massive nitrided steel. As expected, the major advantage of the new technology has been recognized in the final cost of the final P/M part, which has been estimated in 24% cost saving compared to correspondent cut and shaved spur gear. This result can be achieved only with the appropriate setup of the rolling process so that no finishing operation is required to obtain the desired surface quality after sintering and rolling operations.

As a conclusion, the surface densification by transverse rolling represents one of the most promising technology in order to improve the mechanical strengths of P/M parts, in particular highly-loaded gears. In order to overcome the critical aspects of the technology and to achieve the maximum process efficiency, a fundamental help is required by the numerical methodologies (FE analysis) to avoid 'trial and error' process drawbacks. Fatigue test results show satisfactory behavior in particular regarding rolling capability resistance. Further efforts are necessary concerning the gear performance towards tooth root bending fatigue.