

EFFETTO DELLA POROSITA' SULL'USURA PER STRISCIAMENTO- ROTOLOAMENTO DEL FERRO SINTERIZZATO

G. Straffelini, A. Molinari

Nel presente lavoro è stato studiato l'effetto della porosità sul comportamento ad usura per strisciamento-rotolamento a secco di ferro sinterizzato. Si è scelto di studiare questo materiale per evidenziare solamente il ruolo della porosità, ed evitare la complicazione data dall'uso di materiali con microstrutture complesse. Le prove sono state condotte in configurazione disco contro disco, utilizzando campioni con porosità totale compresa tra il 9.7 e 17.8%. La velocità di rotazione del disco campione è stata di 400 giri al minuto, quella del disco antagonista (del medesimo materiale) di 360 giri al minuto e il carico applicato di 30 N.

L'evoluzione dei meccanismi di usura è stata indagata mediante osservazioni al microscopio ottico ed elettronico dei frammenti e delle tracce di usura, misure di diffrattometria di raggi X dei frammenti di usura e osservazione metallografica, completata da prove di microdurezza, di sezioni ottenute perpendicolarmente alla traccia di usura. I risultati evidenziano come l'usura (severa) proceda per delaminazione con un contributo di ossidazione superficiale; la formazione di uno strato di densificazione superficiale influenza il processo tribologico ed in particolare il meccanismo di formazione dei frammenti di usura. Nonostante la densificazione, i pori presenti nei sinterizzati riducono la loro resistenza all'usura per rotolamento-strisciamento perché introducono regioni deboli dove la delaminazione è particolarmente facilitata.

PAROLE CHIAVE: metallurgia delle polveri, tribologia

INTRODUZIONE

È noto che la porosità riduce notevolmente le proprietà meccaniche dei sinterizzati [1, 2]. Per favorire l'utilizzo delle leghe ferrose sinterizzate in nuovi campi applicativi è quindi necessario capire l'influenza della porosità sui meccanismi di danneggiamento che, in esercizio, possono limitare le prestazioni dei manufatti prodotti mediante metallurgia delle polveri. Tra le modalità di danneggiamento che possono pregiudicare la vita di componenti meccanici sinterizzati ci sono anche quelle legate ai processi di usura che, a differenza, ad esempio, di quelle dovute alle sollecitazioni a fatica, sono molto meno studiate. Nel caso di strisciamento a secco, è stato verificato che se il contatto è conforme e le pressioni relativamente basse, una porosità intorno al 10% migliora le prestazioni del ferro sinterizzato [3], o quantomeno ne allevia gli effetti negativi [4], perché i pori superficiali possono intrappolare i frammenti di usura prodotti. Nel caso di usura per rotolamento-strisciamento il contatto è non conforme e, in particolare, di linea.

Conseguentemente la pressione superficiale, Hertziana all'inizio della prova, è in genere molto elevata, e questo influenza notevolmente le prestazioni dei materiali rendendo inefficace il meccanismo di intrappolamento dei frammenti nei pori [5]. In precedenti lavori è stato studiato il comportamento ad usura per strisciamento-rotolamento a secco di sinterizzati ferrosi con diverse microstrutture, ottenendo utili indicazioni anche relativamente alla resistenza a fatica di contatto dei materiali [6, 7]. Nel presente lavoro l'attenzione è focalizzata sul ferro sinterizzato, con l'obiettivo di evidenziare solo l'effetto della porosità sul comportamento a rotolamento-strisciamento dei sinterizzati ferrosi.

Materiali e procedure sperimentali

Per la presente ricerca sono stati realizzati, mediante una procedura industriale, dischi in ferro sinterizzato, aventi un diametro di 40 mm e un'altezza di 10 mm. Sono state utilizzate polveri di ferro a diversa comprimibilità e sono state scelte specifiche condizioni di pressatura in modo da ottenere cinque tipi di materiali con densità nominali comprese tra 6.4 e 7.2 g/cm³. La sinterizzazione dei campioni è stata condotta alla temperatura di 1050°C per 20 minuti. In Tab. 1 sono mostrate le densità reali dei campioni prodotti, la porosità totale, la porosità aperta (determinate con il metodo delle pesate multiple) e la durezza dei materiali (determinata con penetratore Brinell).

Giovanni Straffelini, Alberto Molinari

Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali,
Università di Trento,

Materiale	Densità nominale, g/cm ³	Densità reale, g/cm ³	Porosità totale, %	Porosità aperta,	Durezza, HB
Fe-64	6.4	6.39	17.8	17.8	45
Fe-66	6.6	6.58	16.1	14.8	49
Fe-68	6.8	6.75	14.2	11.2	50
Fe-70	7	6.95	11.7	6	56
Fe-72	7.2	7.15	9.7	1.8	62

Tab. 1

Densità, porosità e durezza dei materiali in studio.

Density, porosity and hardness of the materials under study.

Le prove di usura per rotolamento-strisciamento sono state condotte nella configurazione disco contro disco. La velocità di rotazione del campione è stata di 400 giri al minuto e quella dell'antagonista di 360 giri al minuto. Ne consegue che la velocità di strisciamento nella zona di contatto è stata di 0.083 m/s. È stato applicato un carico di 30 N, che ha indotto una pressione Hertziana iniziale compresa tra 50 MPa (nel materiale Fe-64) e 65 MPa (nel materiale Fe-72).

L'evoluzione dell'usura è stata determinata tramite misure di perdita in peso, eseguite con una bilancia di precisione, ad intervalli regolari. Ogni prova è durata 13 ore e sono state eseguite tre prove per ogni punto sperimentale.

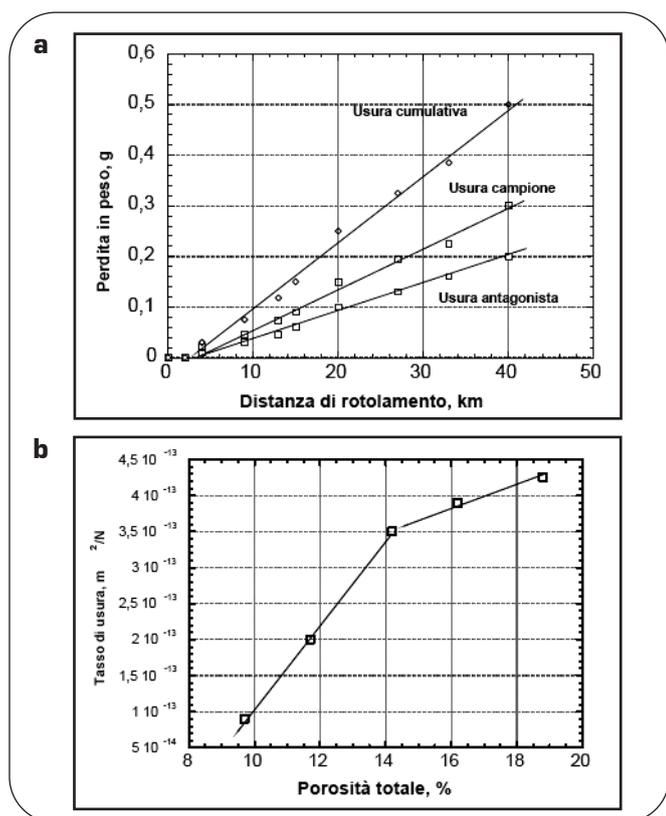


Fig. 1

1a Materiale Fe-64: andamento dell'usura del campione, antagonista e dell'usura cumulativa.

Fig. 1b Tassi di usura dei materiali in studio in funzione della porosità totale.

(a) Wear curves for material Fe-64. (b) Steady-state wear rates of the materials under study as a function of total porosity.

I meccanismi di usura responsabili del danneggiamento sono stati indagati mediante osservazioni al microscopio ottico ed elettronico dei frammenti e delle tracce di usura, misure di diffrattometria di raggi X dei frammenti di usura ed osservazioni metallografiche, completate da prove di microdurezza, di sezioni ottenute perpendicolarmente alla traccia di usura.

Risultati e discussione

In Fig. 1a è mostrato, a titolo di esempio, l'andamento dell'usura del materiale Fe-64 in funzione della distanza di rotolamento; è riportato l'andamento della perdita in peso del campione, dell'antagonista e l'usura cumulativa. Si può notare come, dopo una fase di rodaggio caratterizzata da usura molto bassa, venga raggiunto uno stato stazionario con una ben determinata pendenza delle curve di usura. Questo comportamento è mostrato da tutti i campioni in studio; in Fig. 1b è quindi mostrata la dipendenza del tasso di usura (con riferimento alla distanza di strisciamento percorsa nello stato stazionario) dei campioni in funzione della porosità dei materiali.

L'analisi della Fig. 1b evidenzia innanzitutto come l'usura sia assai elevata per ogni materiale e, in particolare, come i valori del tasso di usura siano quelli tipici dell'usura severa. Questo risultato è in accordo con il fatto che la pressione specifica, data dal rapporto tra la pressione nominale di contatto e la durezza dei materiali, è intorno a 0.1, cioè assai elevata [8].

I dati in Fig. 1b mostrano inoltre come il tasso di usura aumenti notevolmente quando la porosità cresce dal 10 al 14%, mentre per incrementi ulteriori della porosità il tasso di usura cresce in modo più contenuto. Un'altra osservazione importante deriva dal confronto con i risultati del lavoro di Danninger, relativi allo strisciamento a secco di ferro sinterizzato [4].

Anche Danninger osserva un aumento del tasso di usura all'aumentare della porosità, ma questo incremento è molto più contenuto di quello evidenziato nel caso di usura per strisciamento-rotolamento; il tasso di usura, in particolare, passa da valori di circa $1 \cdot 10^{13} \text{ m}^2/\text{N}$ nel caso di porosità intorno al 10%, a circa $1.4 \cdot 10^{13} \text{ m}^2/\text{N}$ per porosità intorno al 19%. Per interpretare i risultati ottenuti, anche in confronto con le prove di strisciamento puro, è necessario comprendere i meccanismi di usura e, in particolare, il ruolo della porosità.

In Fig. 2a è quindi mostrata la tipica morfologia dei frammenti di usura, raccolti dopo 11 ore di prova, nel caso del materiale Fe-64. Si può notare la caratteristica forma a scaglie. In Figura 2b è mostrato lo spettro XRD dei frammenti, che evidenzia come essi siano prevalentemente di natura metallica (con la presenza di una certa, anche se minoritaria, quantità di ossidi). Queste osservazioni permettono di stabilire che l'usura è di tipo delaminativo, con un leggero contributo della triboossidazione, in accordo col fatto che l'usura è severa.

Ulteriori chiarificazioni sull'evoluzione del processo di delaminazione responsabile del danneggiamento tribologico possono essere ottenute dall'osservazione delle zone subsuperficiali, in corrispondenza delle tracce di usura. In Fig. 3 è mostrata una sezione metallografica perpendicolare alla traccia di usura (nella direzione dello strisciamento), nel caso del materiale Fe-70. Lo strato sub-superficiale danneggiato può essere suddiviso in tre zone distinte. Una zona corticale, dove è pre-

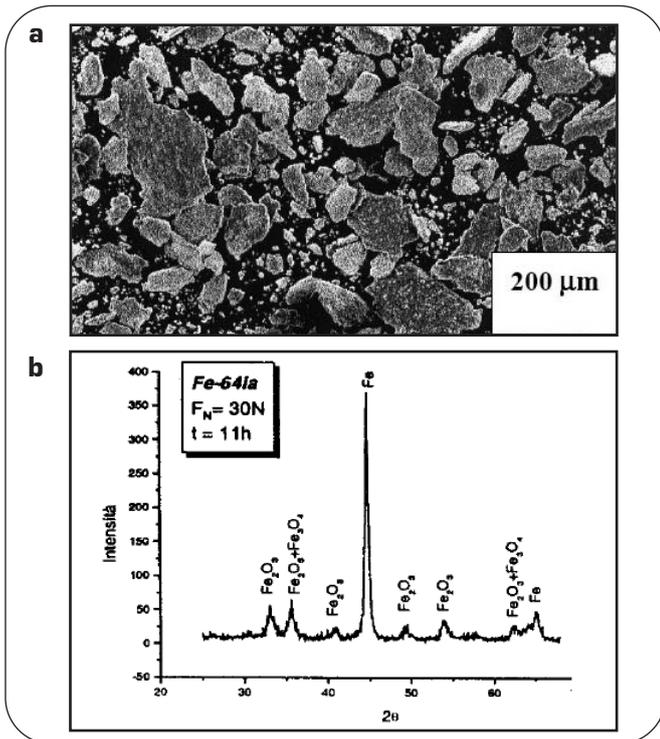


Fig. 2 a Morfologia dei frammenti di usura del materiale Fe-64 (SEM). b Spettro XRD dei frammenti di usura del materiale Fe-64. (a) Wear fragments of material Fe-64 collected after 11 hours of testing (SEM). (b) XRD spectra of wear fragments of material Fe-64 collected after 11 hours of testing.

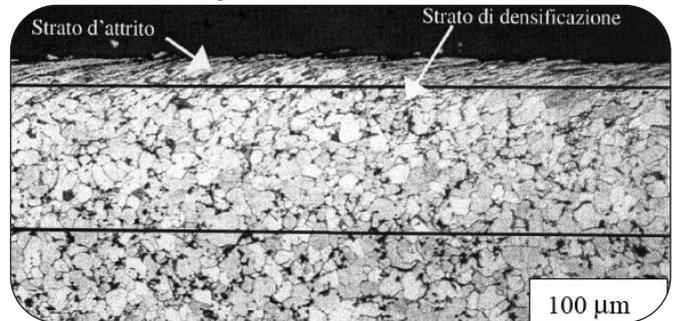


Fig. 3 Sezione metallografica perpendicolare alla traccia di usura che mostra le diverse zone di danneggiamento sub-superficiale (materiale Fe-70). Longitudinal section of worn Fe-70 material, showing the three damage layers.

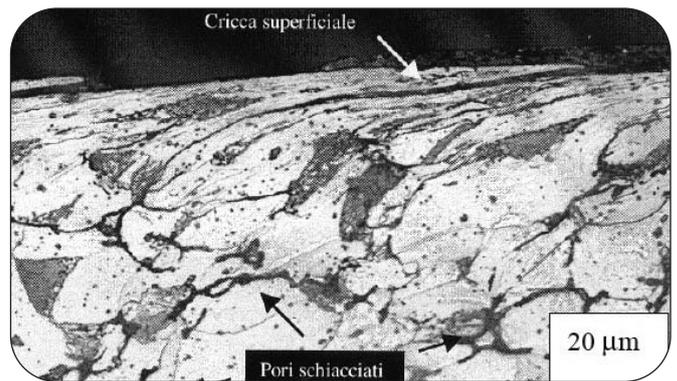


Fig. 4 Dettaglio dello strato d'attrito e della zona densificata (materiale Fe-70) che illustra il meccanismo di delaminazione. Longitudinal section of worn Fe-70 material, showing the "friction layer".

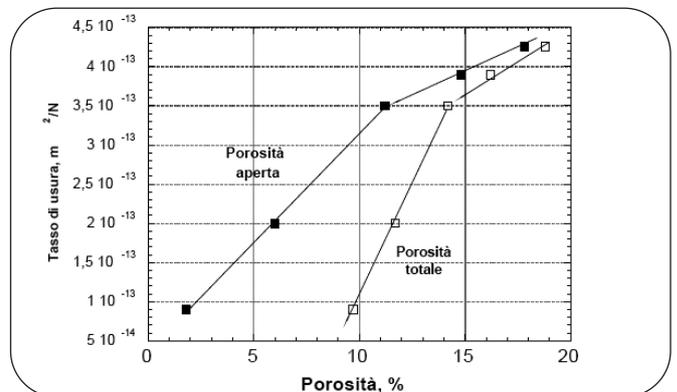


Fig. 5 Tasso di usura dei materiali in studio in funzione della porosità totale e della porosità aperta. Steady-state wear rates of the materials under study as a function of total and interconnected porosity.

sente un'elevata deformazione plastica per taglio (denominata "strato d'attrito"); una zona intermedia, dove si è avuta intensa deformazione plastica per compressione con chiusura dei pori ("strato di densificazione"); una terza zona più interna, rilevabile solo mediante misure di microdurezza, come sarà illustrato più avanti, dove la matrice del sinterizzato ha subito deformazione plastica ma non si è avuta densificazione ("strato incrudito").

La progressione degli eventi che conduce alla formazione del frammento di usura è quindi la seguente. Sotto l'elevata pressione applicata, la matrice ferritica plasticizza e, nelle zone più superficiali, i pori si chiudono [9]. L'attrito nelle zone di contatto induce elevati sforzi di taglio che contribuiscono alla deformazione plastica del materiale. Come evidenziato più in dettaglio in Fig. 4, le zone dove i pori si sono chiusi partecipano al flusso plastico per taglio e favoriscono la formazione dei frammenti di usura. Dove i pori si chiudono, infatti, si formano interfacce deboli, che inducono la formazione di frammenti di usura, sia in modo diretto sia diventando regioni dove si concentra il danneggiamento per fatica di contatto. Il fatto che la fatica superficiale contribuisca a velocizzare la formazione dei frammenti è dimostrato dal confronto con le prove di strisciamento puro, caratterizzate da usura delaminativa ma con tassi molto inferiori.

Si può quindi ritenere che la porosità induce un aumento del tasso di usura non perché riduce la sezione utile resistente, come avviene tipicamente per le proprietà meccaniche come la resistenza a trazione o a fatica, ma perché da luogo alla formazione di ampie regioni "deboli" che in modo diretto o attivato dalla fatica di contatto favoriscono l'usura per delaminazione.

È chiaro quindi che i pori isolati e quelli aperti rispondono in modo diverso al danneggiamento per delaminazione osservato nei sinterizzati. La chiusura di pori prevalentemente isolati, infatti, produce regioni deboli di estensione relativamente limitata. La chiusura dei pori aperti, invece, produce regioni deboli molto estese, dato che i pori sono interconnessi tra di loro. Non sorprende quindi che la doppia pendenza nella relazione tra il tasso di usura e la porosità, evidente nel caso della porosità totale, sia molto meno marcata nel caso della porosità aperta dei materiali, come mostrato in Fig. 5.

A completamento del lavoro, sono stati realizzati dei profili di microdurezza (con un penetratore Vickers e un carico di 100 mN) sulle sezioni

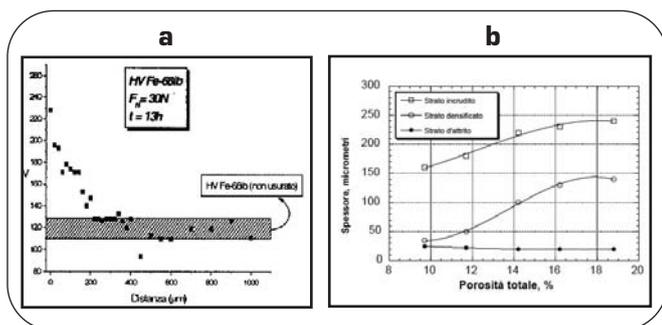


Fig. 6

a Profilo di microdurezza realizzato nella zona sub-superficiale danneggiata del materiale Fe-68. b Spessori delle diverse zone di danneggiamento sub-superficiale.

(a) Wear (a) Microhardness profile in the subsurface layer in material Fe-68. (b) Thickness of the three damaged layers, as a function of the total porosity.

ortogonali alle tracce di usura dei diversi campioni, con l'obiettivo di ottenere la profondità della zona incrudita; in Fig. 6a è mostrato un esempio di profilo nel caso del materiale Fe-68. In Fig. 6b sono quindi mostrati gli spessori delle diverse zone di danneggiamento sub-superficiale. Si può notare come lo spessore dello strato d'attrito diminuisca all'aumentare della porosità e questo può essere attribuito al fatto che all'aumentare della porosità aumenta anche il tasso di formazione dei frammenti, come illustrato in precedenza. Lo spessore degli strati di densificazione e di incrudimento, invece, cala all'aumentare della porosità, poiché all'aumentare della frazione di pori diminuisce la sezione utile resistente e quindi la capacità del materiale di sostenere la pressione di contatto.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato studiato l'effetto della porosità sul comportamento ad usura per strisciamento-rotolamento a secco di ferro sinterizzato, con porosità compresa tra il 9.7 e 17.8%.

I risultati delle prove tribologiche mostrano che, dopo una fase di rodag-

gio iniziale, è presto raggiunto lo stato stazionario. I valori del tasso di usura risultano assai elevati e tipici dell'usura severa, in accordo con il fatto che la pressione specifica di prova (data dal rapporto tra la pressione nominale di contatto e la durezza dei materiali) è intorno a 0.1, cioè assai elevata.

Il tasso di usura dei materiali aumenta notevolmente quando la porosità cresce dal 10 al 14%, mentre per incrementi ulteriori della porosità l'usura cresce in modo più contenuto. Dal confronto con dati di letteratura si evince che l'usura per strisciamento-rotolamento del ferro sinterizzato è notevolmente maggiore dell'usura per strisciamento puro.

L'osservazione di frammenti di usura mostra che il danneggiamento superficiale avviene per delaminazione, con un contributo minoritario della triboossidazione. L'analisi degli strati danneggiati sotto le tracce di usura ha evidenziato che i pori superficiali si chiudono in seguito ad un processo di densificazione. Questi pori chiusi formano quindi delle interfacce deboli nel materiale, che inducono la formazione di frammenti di usura, sia in modo diretto sia diventando zone dove si concentra il danneggiamento per fatica di contatto.

I pori isolati e quelli aperti rispondono in modo diverso al danneggiamento per delaminazione. La chiusura dei pori isolati, infatti, produce regioni deboli di estensione relativamente limitata, mentre la chiusura dei pori aperti produce regioni deboli molto estese, dato che i pori sono interconnessi tra di loro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.F. BOCCHINI, Int. J. Powder Metall., 22 (1986) 185.
- [2] G. STRAFFELINI e A. MOLINARI, La metallurgia italiana, 10 (2002) 31.
- [3] S.C. LIM e J.H. BRUNTON, Wear, 113 (1986) 371.
- [4] A. SIMCHI e H. DANNINGER, Powd. Metallurgy, 47 (2004) 73.
- [5] G. STRAFFELINI, Attrito e usura, tecniche nuove, 2005.
- [6] A. MOLINARI, G. STRAFFELINI e P. CAMPESTRINI, Powd. Metallurgy, 42 (1999) 235.
- [7] G. STRAFFELINI, A. MOLINARI, B. TESI e T. BACCI, MST, 11 (1995) 351.
- [8] G. STRAFFELINI e A. MOLINARI, Powd. Metallurgy, 44 (2001) 248.
- [9] G. STRAFFELINI, T. MARCU PUSCAS e A. MOLINARI, Metall. Mater. Transactions A, 31 (2000) 3091.

ABSTRACT

EFFECT OF POROSITY ON THE ROLLING-SLIDING WEAR OF SINTERED IRON

Keywords:

Porosity reduces the mechanical properties of sintered alloys, because it reduces their load bearing section and induces a local stress and strain concentrating effect. In order to increase the application of sintered parts in the mechanical industry, it is therefore of paramount importance to understand the effect of porosity on the mechanical performance of these materials. In the present investigation the influence of porosity on the rolling-sliding behaviour of sintered iron is investigated.

The study has been focused on sintered iron in order to investigate the role of porosity only, and to avoid the influence of a complex microstructure. The wear tests were carried out in a disc-on-disc configuration, and the samples had a total porosity between 9.7 and 17.8%. Five types of materials were produced in an industrial plant, and to achieve the different porosity levels two types of powders were used. In Table 1, the main characteristics of the materials under study are reported.

The testing discs had a diameter of 40 mm and a height of 10 mm. The applied load was 30 N. The two discs rotated at 400 and 360 rev/minute, thus producing a sliding velocity of 0.083 m/s. An example of the wear curves is shown in Fig. 1a. In Fig. 1b the steady-state wear rates are reported as a function of total porosity. It can be observed that wear

rate noticeably increases in passing from a total porosity of 9.7% to 14.2%, whereas its increase is much lower in passing from 14.2% to 17.8%.

The acting wear mechanisms were investigated by means of optical microscopy of the worn traces, and by SEM and XRD analysis of the wear debris. The results of these investigations are shown in Figs 2-4. The experimental observations show that wear was by delamination. In addition, the existence of three different damaged regions in the sub-surface layer was highlighted. The first region is called "friction layer". Its thickness is around 20 micrometers, as shown in Fig. 6b. The second region, below the first one, is called "densification layer". Its thickness depends very much on the total porosity and increases from about 40 micrometers to 140 micrometers as porosity is increased from 9.7 to 17.8%. The third region, below the second one, is called "strain hardened layer". Its thickness depends on the hardness of the materials.

The delamination process directly involves the first and second layer. The removal of the wear fragments is favoured by the accumulation of plasticity by shearing. The formation of the fragments was found to be induced by the large interconnected pores that form weak areas after local densification. This interpretation is supported by the fact that the experimental wear rates are proportional to the interconnected porosity, rather than to the total porosity, as shown in Fig. 5.

Subsurface densification thus increases the load bearing section but it does not increase the wear resistance of sintered alloys. Interconnected pores, in fact, form weak regions after their closure.