

Per incrementare la vita a fatica di elementi meccanici si fa spesso ricorso a trattamenti termochimici, quali cementazione, nitrurazione o bonifica, abbinati alla pallinatura, che consiste essenzialmente in una deformazione a freddo degli strati superficiali. Gli effetti principali di questo trattamento sono l'introduzione di un campo di sforzi residui di compressione in superficie e l'incrudimento degli strati superficiali di materiale, che subiscono l'impatto di sfere metalliche accelerate da opportune macchine.

L'influenza della pallinatura sulla vita a fatica, legata non tanto alla prevenzione della nucleazione, quanto all'arresto della propagazione delle cricche, è qui quantificata assumendo come parametro significativo del trattamento il campo di tensioni residue di compressione. I provini cilindrici utilizzati sono in 39NiCrMo3, e sono stati suddivisi a secondo del trattamento subito: nitrurazione (lotto N), nitrurazione e pallinatura ad intensità 12 Almen (lotto 12A) e nitrurazione e pallinatura ad intensità 18 Almen (lotto 18A). Al variare del trattamento variano i campi di tensioni residue indotte, che sono state misurate sperimentalmente, attraverso successive asportazioni elettrolitiche ed analisi diffrattometriche ai raggi X. I diversi andamenti ottenuti sono riportati in figura 1.

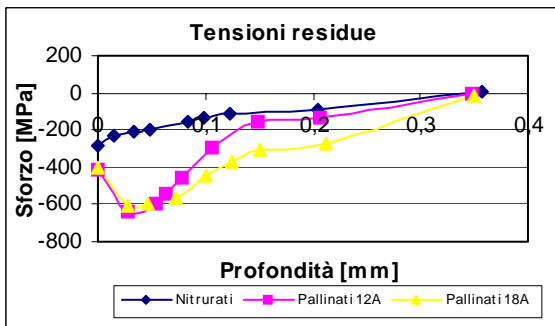


Figura 1: Differenti profili di tensioni residue al variare del trattamento

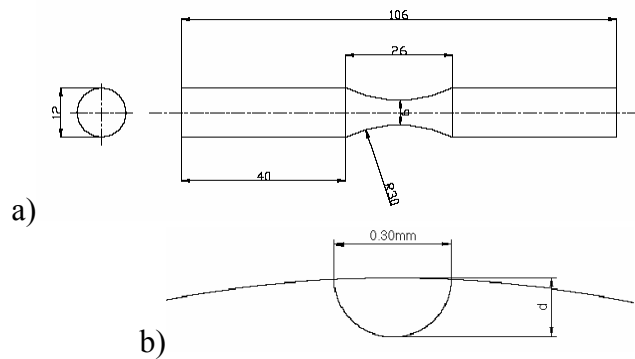


Figura 2: Geometria del provino (a) e del microforo (b)

Per elettroerosione è stato poi praticato in tutti i provini un microforo superficiale di forma semiellittica e completamente immerso nel campo di tensioni residue indotte, che svolge da epicentro per la propagazione della cricca, come è mostrato in figura 2.

Dalle prove di fatica flessionale, con il metodo Stair-Case, si è calcolato il corrispondente limite di fatica: i risultati sono riportati in tabella 1. La propagazione avviene sia dal microforo che da inclusioni interne del materiale, di forma indicativamente circolare, con un diametro  $\approx 20 \mu\text{m}$  e profondità media 0.5 mm, dunque fuori dalla zona di compressione delle tensioni residue indotte. Si è quindi potuto verificare sperimentalmente l'effetto di rallentamento o arresto della propagazione del difetto, legati agli sforzi residui di compressione indotti con la pallinatura.

Lotto	Profondità del microforo [mm]	Sito di nucleazione e propagazione	Limite di fatica [MPa]
N	0.150	Da foro	379
12A	0.100	Da foro e inclusioni	748
	0.150	Da foro	674
18A	0.100	Da inclusioni	762
	0.150	Da foro e inclusioni	724

Tabella 1: Risultati delle prove sperimentali eseguite sui tre lotti di provini

Sono stati realizzati dei modelli numerici agli elementi finiti basati sulla tecnica del sub-modeling, con la simulazione del contatto fra le facce della cricca e l'introduzione delle tensioni residue indotte da nitrurazione e pallinatura. Le cricche che si sviluppano superficialmente e che la pallinatura contribuisce ad arrestare sono tridimensionali, ma con fronte approssimabile ad un arco di ellisse; le cricche interne sono invece schematizzate con fronte circolare. Come parametro significativo nell'analizzare i risultati ottenuti, si è scelto il fattore di intensificazione degli sforzi,  $K_I$ , ricavato col metodo degli spostamenti dalle *crack opening*, lungo diverse direttrici di *mesh* [1, 2]. I valori così ottenuti per la cricca semiellittica sono riportati in figura 3 e tabella 2 in funzione dell'angolo  $\alpha$  che percorre il fronte della cricca: si noti come il fattore di intensificazione degli sforzi venga notevolmente influenzato dalle tensioni residue. Nel determinare la successiva propagazione a fatica, è infatti fondamentale l'influenza del valore degli sforzi di compressione dovuti a nitrurazione e pallinatura in corrispondenza dell'apice della cricca.

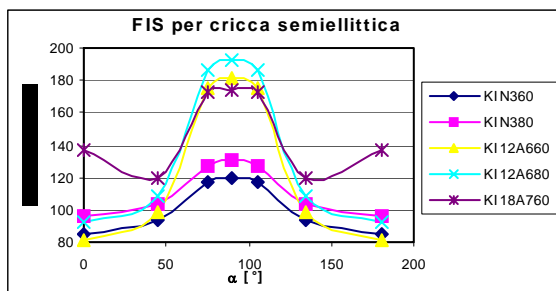


Figura 3:  $K_I$  lungo il fronte della cricca semiellittica

Provino	Esito sperimentale	$K_I$ cricca semiellittica [MPa $\sqrt{\text{mm}}$ ]
Nitrurato 360	Non rottura	119
Nitrurato 380	Rottura	130
Pallinato 12A 660	Non rottura	182
Pallinato 12A 680	Rottura	193
Pallinato 18A 760	Rottura	174

Tabella 2: Valori di  $K_I$  per la cricca semiellittica

Come si può osservare, nel caso della cricca semiellittica, la direzione più probabile di propagazione è risultata essere, per tutti i casi analizzati, quella posta in corrispondenza dell'asse minore della semiellisse, verso il centro del provino. Il  $K_I$  ottenuto con metodi numerici è stato poi confrontato con un caso presente in [3], simile a quello in esame, determinando l'andamento del fattore di intensificazione degli sforzi in funzione della propagazione della cricca, delle condizioni di carico e delle tensioni residue presenti. Il confronto dei risultati numerici con quelli teorici presenti in letteratura ha dato buoni risultati, per la profondità analizzata. Si è quindi decisa la generalizzazione dei risultati ottenuti numericamente, ricavando la funzione di forma per i tre profili di tensioni residue, indipendente dal carico applicato:

$$\beta = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}}$$

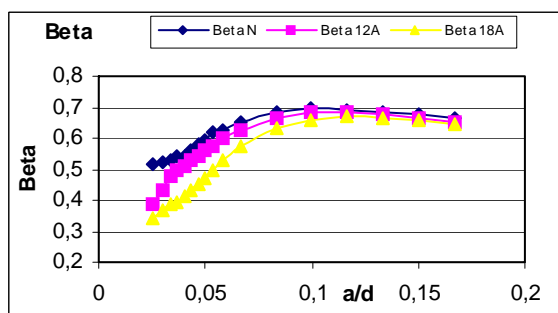


Figura 4: Funzione di forma della cricca semiellittica in funzione del rapporto profondità della cricca (a) – diametro minimo del provino (d)

Diametro ( $\mu\text{m}$ )	Distanza superficiale ( $\mu\text{m}$ )	$K_I$ [MPa $\sqrt{\text{mm}}$ ]	$\beta$ Funzione di forma
20	520	68	0.507
30	520	87	0.527
40	520	98	0.514
30	400	88	0.536

Tabella 3: Valori di  $K_I$  per la cricca circolare interna con pallinatura 18A

Per quanto riguarda la cricca interna del lotto 18A, è stato eseguito uno studio variandone le dimensioni nei diversi modelli costruiti agli elementi finiti. In particolare, si è analizzata l'influenza del diametro e della profondità cui è situata: i risultati ottenuti, in termini di  $K_I$ , sono riportati in tabella 3. Si sono poi comparati i risultati ottenuti nei due casi di cricca semiellittica e circolare: in

accordo con le prove sperimentali, i valori di  $K_I$  nei due casi sono confrontabili. Si è quindi potuto verificare come la cricca che porta al cedimento del provino, aumentando l'intensità di pallinatura, non propaghi più dalla superficie, ma da inclusioni situate al di fuori della zona di influenza delle tensioni residue di compressione. Come nel caso della cricca superficiale, si sono infine generalizzati i risultati ottenuti con una funzione di forma, i cui valori sono riportati in tabella 3. Per avere infine un'ulteriore conferma della correttezza del modello costruito, si sono confrontati i risultati numerici così ottenuti con quelli delle prove sperimentali, determinando il valore di soglia del fattore di intensificazione degli sforzi. Il  $\Delta K_{th}$  risulta influenzato dal profilo di microdurezza, dall'area della cricca e dall'intensità di pallinatura, secondo quanto riportato in [4] e [5].

#### *Bibliografia:*

- [1] X.K. Zhu, G.T. Liu, Y.J. Chao, *Three dimensional stress and displacement fields near an elliptical crack front*, Int. Journal of fracture, 109, 2001
- [2] M.K. Kassir, G.C. Sih, *Three-dimensional stress distribution around an elliptical crack under arbitrary loadings*, Journal of Applied Mechanics, september 1966
- [3] Y. Murakami, *Stress intensity factors handbook*, Committee on Fracture Mechanics, The Society of Materials Science, Vol. 2, Par. 9.29
- [4] M. Guagliano, L. Vergani, *Effect of crack closure on gear crack propagation*, Int. Journal of Fatigue, 23, 2001
- [5] Y. Murakami, M. Endo, *Effects of hardness and crack geometries on  $\Delta K_{th}$  of small cracks emanating from small defects*, The behaviour of short fatigue cracks, Mechanical Engineering Publications, London, 1986