

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA  
Sede di Forlì

Corso di Laurea in  
INGEGNERIA MECCANICA  
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA  
in Comportamento Meccanico dei Materiali

**Disamina dell'effetto dei trattamenti superficiali sulle  
prestazioni a fatica di diversi materiali metallici**

CANDIDATO  
Alberto Balducci

RELATORE  
Chiar.mo Prof. Giorgio Olmi

Anno Accademico 2013/2014  
Sessione II



# INDICE

<b>Introduzione</b> .....	Pag. 6
---------------------------	--------

## **Capitolo 1: La vita a fatica e i trattamenti superficiali**

1.1 Cenni sulla vita a fatica .....	Pag. 8
1.2 I trattamenti superficiali	
1.2.1 Lo Shot Peening .....	Pag. 10
1.2.2 Il Laser Shock Peening .....	Pag. 11
1.2.3 L'Ultrasonic Peening .....	Pag. 12
1.2.4 Il Low Plasticity Burnishing .....	Pag. 13
1.2.5 Il Deep Rolling .....	Pag. 14
1.3 I Parametri di trattamento .....	Pag. 15
1.3.1 La copertura .....	Pag. 16
1.3.2 L'intensità di pallinatura .....	Pag. 17
1.3.3 I parametri del Laser Shock Peening .....	Pag. 19
1.3.4 I parametri di Ultrasonic Peening .....	Pag. 20
1.3.5 I parametri di Low Plasticity Burnishing e di Deep Rolling .....	Pag. 20
1.4 Riferimenti bibliografici capitolo 1 .....	Pag. 21

## **Capitolo 2: I materiali analizzati e le relative caratteristiche** .....

Pag. 23

2.1 Le leghe di alluminio	
2.1.1 Al 2024 .....	Pag. 24
2.1.2 Al 7050 .....	Pag. 29
2.2 Le leghe di titanio	
2.2.1 Il Ti-Al6-4V .....	Pag. 32
2.3 Acciai	
2.3.1 AISI 4340 .....	Pag. 35
2.4 Altre leghe	
2.4.1 Inconel 718 .....	Pag. 38
2.5 Riferimenti bibliografici capitolo 2 .....	Pag. 39

## Capitolo 3: Prove di laboratorio e analisi dei risultati

3.1	Test su leghe di alluminio	
3.1.1	Confronto tra Shot Peening e Laser Shock Peening su Al 7050 T7451 .....	Pag. 41
3.1.2	Confronto tra Shot Peening e Laser Shock Peening su Al 2024 T351 .....	Pag. 45
3.2	Test su Ti-Al6-4V	
3.2.1	Confronto tra Deep Rolling e Laser Shock Peening su Ti-Al6-4V.....	Pag. 51
3.2.2	Confronto tra Shot Peening e Laser Shock Peening su Ti-Al6-4V .....	Pag. 61
3.3	Test su AISI 4340	
3.3.1	Confronto tra Shot Peening e Laser Shock Peening su acciaio AISI 4340 .....	Pag. 67
3.4	Test su Inconel® 718	
3.4.1	Ultrasonic Peening su Inconel® 718 .....	Pag. 75
3.4.2	Low Plasticity Burnishing su Inconel® 718 .....	Pag. 79
3.5	Conclusioni generali .....	Pag. 81
3.6	Riferimenti bibliografici capitolo 3 .....	Pag. 83



## **Introduzione**

In questo lavoro vengono analizzate varie tipologie di trattamenti superficiali per incrudimento applicati su differenti metalli con il fine di fornire un termine di paragone utile alla scelta tra i vari trattamenti, in base al tipo di materiale da trattare.

A tal proposito, nel primo capitolo si tratterà della vita a fatica e verranno presentati i differenti trattamenti presi in considerazione, spiegandone il funzionamento e l'attuale applicazione.

Nel secondo capitolo, verranno illustrati brevemente i materiali analizzati, scelti in base all'applicazione di vari trattamenti superficiali, al fine di effettuarne il paragone sulla loro efficacia.

Nel terzo capitolo verranno presentate le prove e verranno commentati i dati ottenuti

Tenendo conto delle differenze morfologiche, dei differenti impieghi dei materiali e dell'influenza della scelta dei parametri di trattamento, un'ulteriore fine è quello di poter stimare anche l'efficacia del trattamento anche su altri metalli qui non analizzati per mancanza di dati.



# Capitolo 1

## La vita a fatica e i trattamenti superficiali

### §1.1 Cenni sulla vita a fatica

Per fatica si intendono l'insieme delle sollecitazioni variabili con il tempo a cui un componente è soggetto durante il funzionamento. In questo termine vengono raggruppati la fatica meccanica, termica, il pitting, il fretting, lo scoring...

Lo studio della fatica (il suo comportamento e le sue conseguenze) di un componente meccanico, durante il suo funzionamento, è importante per migliorarne l'affidabilità: la scelta del materiale più appropriato e dei trattamenti migliora la resistenza alle sollecitazioni (anche variabili) al quale sarà sottoposto durante la sua vita utile. Il fenomeno che tende ad accomunare le rotture per fatica è l'entità del carico, il quale normalmente risulta essere decisamente inferiore allo snervamento del materiale e la sua entità è inversamente proporzionale al numero di cicli a cui il componente è sottoposto.

Come noto, la cricca che genererà la rottura per fatica del componente prende vita dagli inevitabili difetti come vacanze, dislocazioni o fessurazioni del metallo del quale è costituito: i materiali metallici, infatti, sono generalmente policristallini, cioè sono costituiti da un elevato numero di cristalli o grani, ciascuno con proprie caratteristiche e proprietà meccaniche individuali e gli inevitabili difetti presenti nel materiale, alterano le originarie proprietà del cristallo e aumentano soprattutto la possibilità di scorrimento reciproco dei piani atomici. Secondo il Fuchs [8][15], i primi scorrimenti avvengono in quei grani che hanno i piani reticolari orientati secondo la direzione della massima tensione tangenziale applicata. In un secondo tempo si verificano gli scorrimenti più difficoltosi e così via. Gli scorrimenti, che avvengono sia sotto carichi statici sia sotto carichi ciclici, producono una progressiva alterazione della superficie dando vita a delle vere e proprie bande di intrusione ed estrusione, come viene rappresentato nella figura 1:

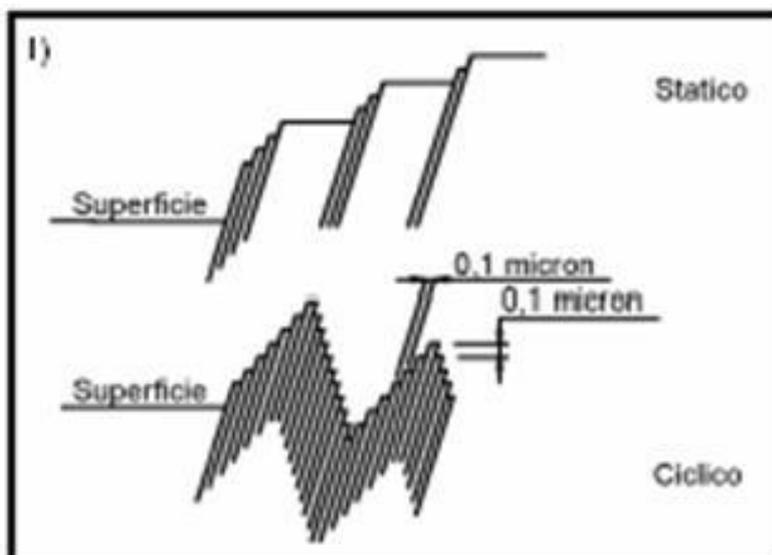


Figura 1: Bande generate da scorrimento degli strati superficiali [13]

Queste bande formano dei notevoli fenomeni di concentrazione delle tensioni: in questo modo si crea una micro-cricca che all'inizio è governata dalle tensioni tangenziali e, ad una profondità di qualche micron, devia, propagandosi a zig-zag tendenzialmente in direzione perpendicolare alla massima tensione normale. La micro-cricca procede, sotto il carico ciclico, dapprima lentamente poi sempre più velocemente. Se la zona si trova sempre in trazione si possono notare le comunemente definite "linee di spiaggia", ovvero le striature lasciate dalla cricca nell'avanzamento. La cricca procede finché la sezione utile non diventa insufficiente a sopportare il carico al quale è sottoposto il componente, generando cedimento istantaneo di tipo fragile.

Per aumentare la resistenza a fatica dei componenti, possono risultare pertanto utili i trattamenti superficiali per incrudimento, come quelli analizzati in questo documento.

## §1.2 I trattamenti superficiali

### 1.2.1 Lo Shot Peening

Lo Shot Peening è un processo di trattamento superficiale a freddo che prevede di colpire la superficie del pezzo da trattare tramite l'utilizzo di un getto controllato ad alta velocità (40-100 m/s) di pallini o cilindretti di acciaio [1]: l'impatto del pallino con la superficie del particolare causa lo scorrimento plastico delle fibre superficiali (in genere l'effetto interessa spessori di alcuni decimi di millimetro); il metallo sottostante, tuttavia non è interessato dalla deformazione plastica, così le fibre esterne plasticizzate tendendo ad allungarsi a differenza di quelle al di sotto dello strato plastico che tendono a riportarle nella posizione iniziale. Dall'equilibrio che ne risulta, lo strato plastico superficiale viene a trovarsi in compressione residua: tali tensioni hanno lo scopo di impedire la formazione o la propagazione di cricche, dannose per la vita a fatica del componente.

Esso non va confuso con la pallinatura convenzionale, la quale è un trattamento di pulizia delle superfici.

Nel trattamento di Shot Peening è molto importante il controllo dei parametri quali velocità dei pallini/cilindretti e dunque dell'energia cinetica con la quale colpiscono la superficie del componente da trattare, poiché una velocità insufficiente comporta una efficacia del trattamento bassa, viceversa una velocità eccessiva comporta uno stato di tensione superficiale eccessivo e/o il peggioramento della rugosità superficiale, che se eccessiva può essere essa stessa punto di innesco di cricche.

La scelta stessa dei pallini o cilindretti è un parametro che mi permette di ottenere tensioni superficiali con intensità differenti.

La scelta dei vari parametri di pallinatura avviene in base al materiale e dunque alla necessità di ottenere un determinato stato di tensione superficiale rispettando parametri di rugosità superficiale.

Possono essere trattati con efficacia tutti i materiali metallici come acciaio bonificato, acciaio cementato, acciaio nitrurato, leghe leggere in genere (in particolare ergal), titanio in tutti gli stati di trattamento termico, leghe di magnesio, leghe di boro, leghe o superleghe a base nichel, inconel, maraging, compositi a matrice metallica, etc.

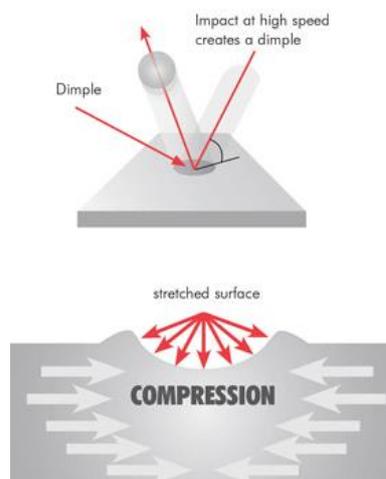


Figura 2: Meccanismo di impressione delle tensioni superficiali tramite Shot Peening [2]

### 1.2.2 Il Laser Shock Peening

Il Laser Shock Peening consiste nel generare la tensione superficiale tramite l'utilizzo di un laser ad alta energia a luce pulsata: la superficie del materiale da trattare è coperta da una vernice e al di sopra da uno strato d'acqua: quando viene azionato il laser, esso oltrepassa lo strato d'acqua colpendo la vernice al di sopra del pezzo, rimuovendola generando così plasma il quale, essendo ad altissima temperatura e pressione, genera un'onda elastoplastica che colpisce da un lato lo strato d'acqua (incomprimibile), dall'altro la superficie del pezzo, ottenendo così una compressione della superficie [4].

L'elevata pressione generata dal plasma, determina solitamente tensioni superficiali maggiori e con una profondità utile anch'essa maggiore, rispetto agli altri metodi di pallinatura.

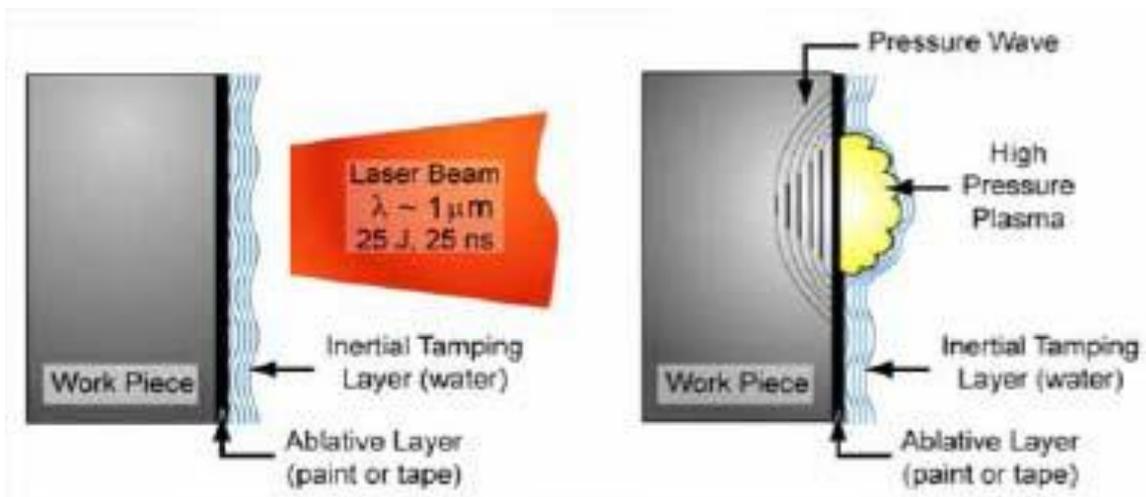


Figura 3: Schema di funzionamento Laser Shock Peening [3]

### 1.2.3 L'Ultrasonic peening

Il processo di Ultrasonic Peening, come suggerisce il nome, sfrutta ultrasuoni generati da un trasduttore elettro-meccanico per poter incrudire superficialmente la zona da trattare: queste onde mettono in movimento delle sfere, le quali urtano la superficie del pezzo essendo libere di muoversi assialmente tra il corpo di risonanza e la superficie da trattare. Quando lo strumento entra in contatto con la superficie da trattare, entra in un fenomeno di risonanza armonica con la superficie stessa (frequenza che deve essere scelta appositamente essendo differente per ogni tipo di metallo), la quale genera lo stato di compressione superficiale del pezzo.

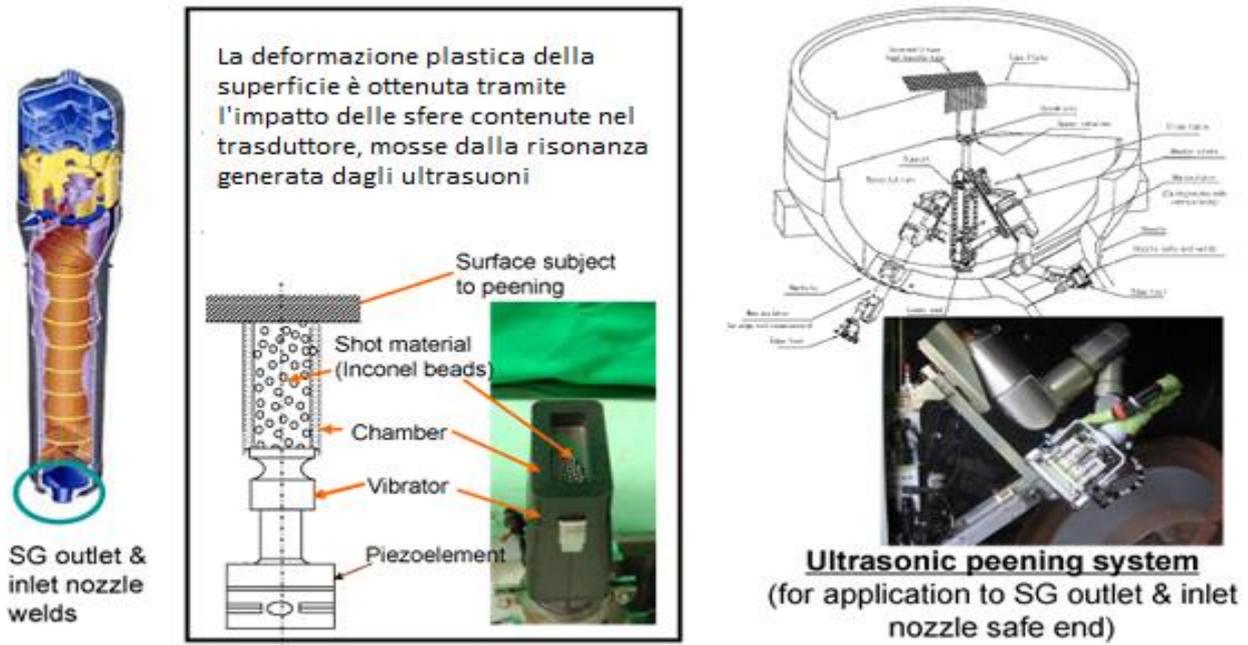


Figura 4: Schema del macchinario di Ultrasonic Peening [5]

### 1.2.4 Il Low plasticity burnishing [6]

Il processo di Low Plasticity Burnishing è un processo brevettato, nel quale abbiamo uno strumento dotato all'estremità inferiore di una sfera, sostenuta da un cuscinetto idrostatico: la sfera, essendo sospinta dal fluido del cuscinetto idrostatico, ricalca la superficie da trattare, generando così lo stato di tensione superficiale richiesto.

Questo processo differisce dai normali trattamenti superficiali per l'imprimere di una minima deformazione plastica sulla superficie del materiale, necessaria a generare le tensioni residue sulla superficie del componente da trattare e questa deformazione plastica mostra una buona stabilità, come mostrato nelle prove successive. Questo trattamento ha svariati impieghi per via della sua flessibilità, anche se richiede l'impiego di uno strumento specifico in funzione delle dimensioni dell'area da trattare.

Il Low Plasticity Burnishing viene impiegato per il miglioramento della resistenza a fretting fatigue e a damage tolerance (se il pezzo si cricca, la cricca si espande più lentamente nella vita a fatica in virtù dell'efficacia del trattamento) nelle turbine degli aerei

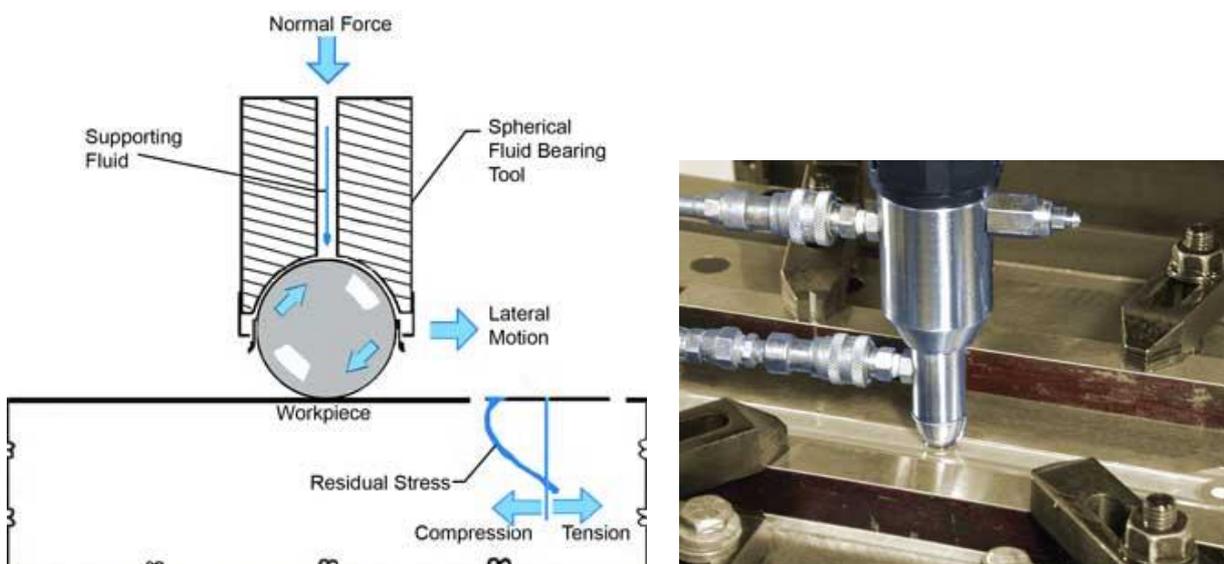


Figura 5. Schema di funzionamento del Low Plasticity Burnishing e esempio di applicazione [6]

### 1.2.5 Il Deep Rolling

Il Deep Rolling utilizza uno strumento dotato di un rullo sostenuto da appositi cuscinetti, montato su una macchina a controllo numerico: il rullo, sospinto con forza dal macchinario su cui è montato, ricalca la superficie, generando così lo stato di tensione superficiale.

I vantaggi di questo trattamento risiedono nel miglioramento della finitura superficiale del componente trattato (effetto dovuto al ricalcamento superficiale del materiale trattato) e nella possibilità di utilizzare un macchinario a controllo numerico già eventualmente in possesso dell'azienda che intende adottare questo trattamento, a patto che il macchinario risponda ai requisiti di forza e di ridotto cedimento elastico necessari per ottenere un trattamento efficace: nel momento in cui si va a effettuare il trattamento (soprattutto per materiali duri), la forza che viene impartita sul rullatore, da un lato ricalca la superficie del materiale, dall'altro provoca una forza contraria sui supporti del rullatore, che, se non sufficientemente rigidi, cedono, causando una riduzione della pressione di rullatura e di conseguenza una minore efficacia del trattamento.

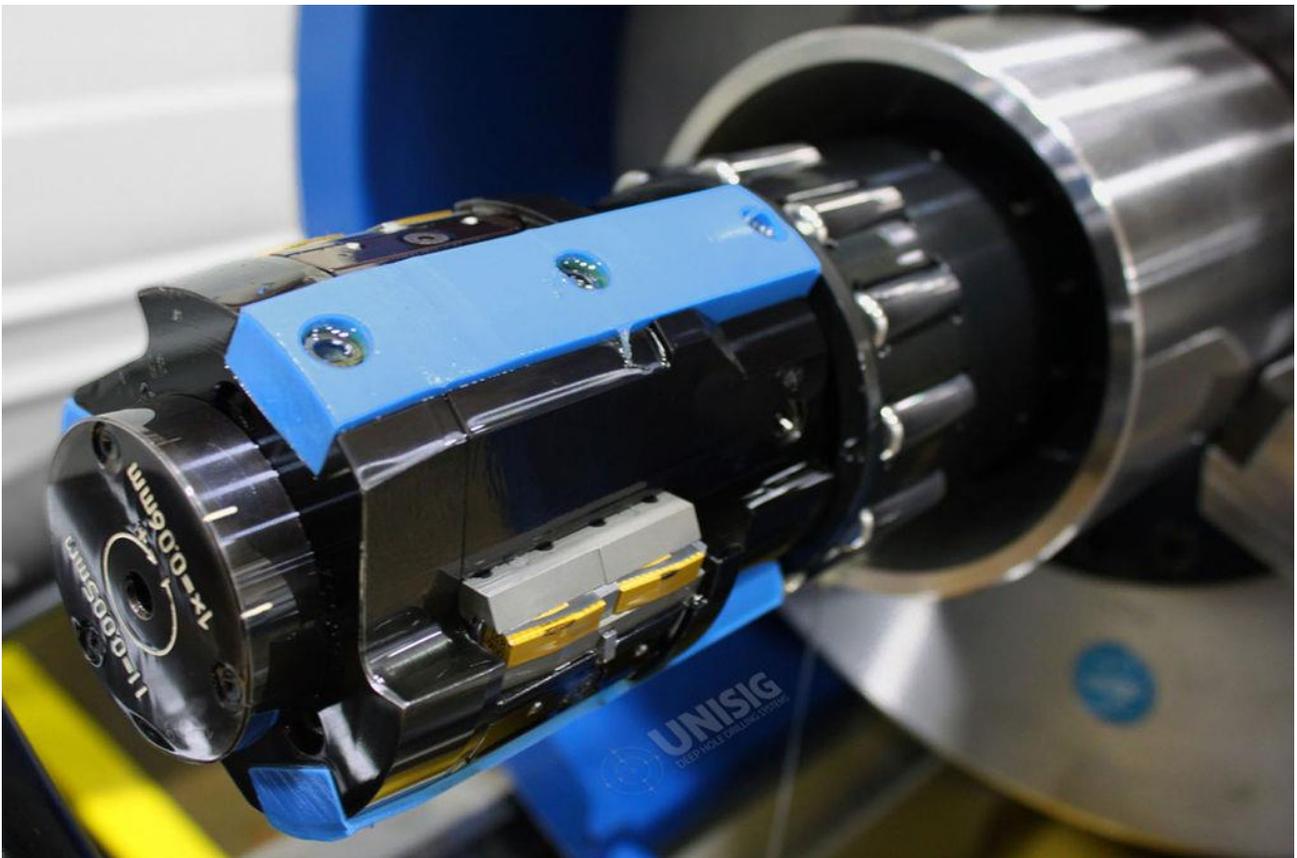


Figura 5. Esempio di applicazione del trattamento di Deep Rolling [7]

### §1.3 I Parametri di trattamento

Si è finora parlato genericamente dei trattamenti senza meglio specificare quali siano i parametri che influenzano l'efficacia. I principali parametri dei trattamenti analizzati, sono:

- durata del processo (copertura)
- velocità di lancio della graniglia (Shot Peening e Ultrasonic Peening)
- lunghezza d'onda ed energia del raggio laser (Laser Shock Peening)
- pressione dello strumento (Low Plasticity Burnishing e Deep Rolling)
- distanza del pezzo dal sistema di proiezione (Shot Peening, Laser Shock Peening e Ultrasonic Peening)
- angolo di impatto (Shot peening, Laser Shock Peening e Ultrasonic Peening)
- portata, uniformità, diametro, durezza e massa della graniglia (Ultrasonic Peening e Shot Peening)
- numero e diametro dei getti (Shot Peening)

La dimensione dei pallini, le caratteristiche del materiale di cui sono fatti e la velocità, sono parametri che determinano l'energia cinetica d'impatto:

$$E = \left( \frac{\pi * \gamma * D^3 * V^2}{12g} \right)$$

dove D è il diametro dello shot,  $\gamma$  il peso specifico, V la velocità e g la costante di gravità[8][9].

Nei trattamenti di Deep Rolling e Low Plasticity Burnishing, la quantità di tensioni residue impresse dagli strumenti alla superficie del componente da trattare è proporzionale alla forza impressa dal gruppo macchinario-utensile sulla superficie del pezzo.

### 1.3.1 La copertura [13]

La copertura è un parametro che misura l'estensione dell'area colpita dalla miriade di pallini (nel caso dello Shot Peening e Ultrasonic Peening), pulsazioni del raggio laser (Laser Shock Peening) o passate dello strumento (Deep Rolling e Low Plasticity Burnishing) che vanno a ricalcare l'area stessa: la copertura, infatti, è il rapporto percentuale tra la superficie realmente improntata e la superficie totale da trattare. Il controllo della copertura si effettua in corrispondenza dei punti critici, in relazione all'impiego del pezzo trattato mediante osservazione con ingrandimento di 50X della superficie. È fondamentale ottenere coperture prossime o superiori al 100% (o saturazione) affinché si possano rilevare sensibili miglioramenti nella vita a fatica di un componente. Esiste una relazione che lega la copertura alla durata del trattamento. Tale relazione è espressa dalla equazione seguente:

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n$$

Dove  $C_1$  è la copertura percentuale dopo un ciclo di trattamento,  $C_n$  è la copertura percentuale dopo  $n$  cicli. Si ritiene normalmente adeguata una copertura di circa il 98%, mentre al di sotto di questo valore il trattamento è generalmente considerato inefficace (UNI 5394-72).

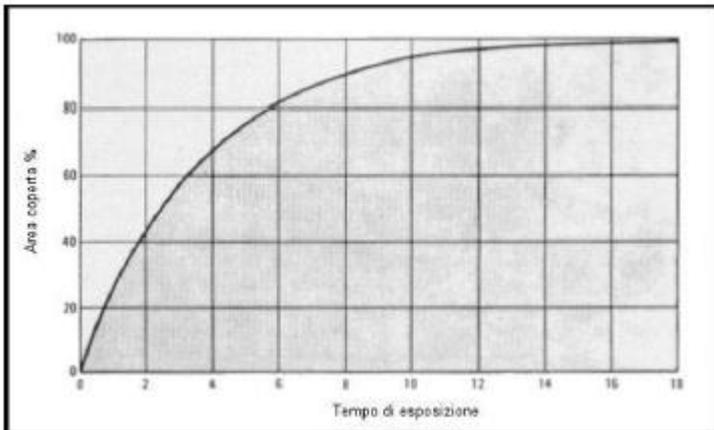


Figura 7. Percentuale di area coperta in funzione del tempo di esposizione[10]

Le immagini che seguono (8 e 9), mostrano esempi di superfici con copertura insufficiente e superfici correttamente coperte[8][11].

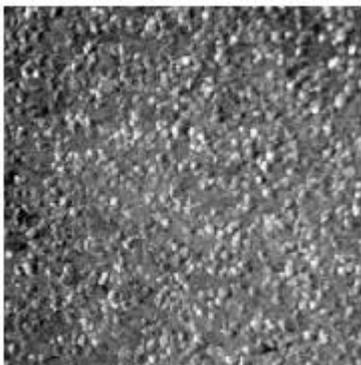


Figura 8: Superficie non totalmente coperta[12]

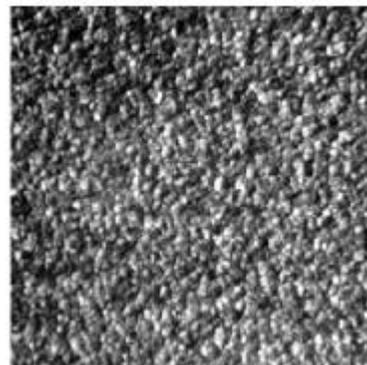


Figura 9: Superficie totalmente coperta[12]

### 1.3.2 L'intensità di pallinatura (Shot Peening) [13]

L'intensità è un parametro funzione della velocità, durezza, dimensioni e peso dei pallini e dell'angolo che forma la superficie pallinata con il flusso di pallini incidenti. L'intensità, è la caratteristica utilizzata per valutare l'effetto del trattamento: essa viene prescritta in base alla natura del pezzo da trattare ed ai requisiti ad esso richiesti. Le misure di intensità vengono condotte su una sottile lamina (chiamata Almen) ottenuta da nastro di acciaio C 70 (UNI 3545-68) laminato a freddo, temprato e rinvenuto con durezza HRC di 44-45, vincolata ed esposta ad un flusso di proiettili per un tempo necessario per arrivare a saturazione. Quando il campione viene rimosso dal supporto, esso è deformato ed incurvato per effetto delle deformazioni plastiche superficiali. La curvatura assunta dalla lamina in acciaio è una misura dell'intensità Almen, che viene espressa come freccia dell'arco che tale lamina forma. Si assume come valore dell'intensità di pallinatura caratteristica del getto quello corrispondente alla freccia  $f_i$  definita dalla relazione:

$$\Delta f_i = f_j - f_i = 10\% f_i$$

dove  $f_j$  è il valore ottenibile raddoppiando il tempo di esposizione ( $t_j = 2t_i$ , vedere Figura 10).

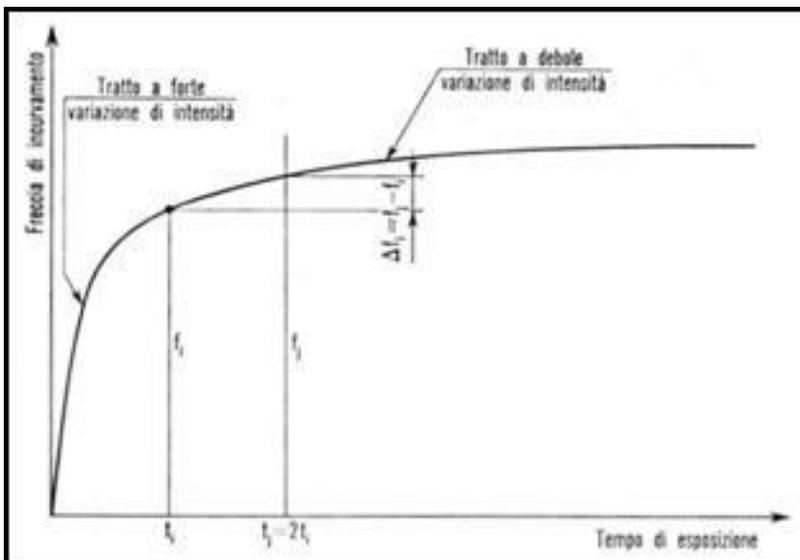


Figura 10. Intensità di pallinatura in funzione del tempo di esposizione[8]

In pratica si ritiene che la freccia  $f_i$  ricada immediatamente al di sopra della piega della funzione. Per la buona efficacia e riproducibilità della pallinatura, i pezzi devono essere sottoposti a tale operazione per un tempo almeno uguale a quello necessario per realizzare l'intensità caratteristica sopra definita.

Per misurare l'intensità Almen, la piastrina di prova deve essere disposta in modo che il palpatore del comparatore appoggi sulla superficie che non è stata pallinata. Il comparatore viene azzerato appoggiando il dispositivo su una superficie piana. La risoluzione del comparatore deve essere tale da poter apprezzare i valori di freccia dalla provetta senza che l'errore sperimentale influisca significativamente sui risultati della lettura [8][11].

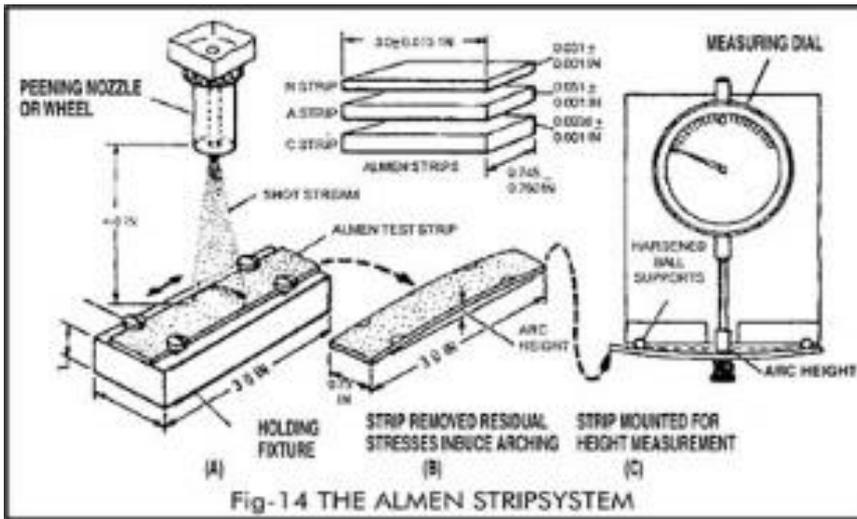


Figura 11. Schema della prova Almen. (A): semplificazione della prova. (B): l'inarcamento della piastrina di prova generato dalle tensioni superficiali. (C): comparatore [14]

### 1.3.3 I Parametri di Laser Shock Peening

Nel caso del Laser Shock Peening, il macchinario è costituito da un laser a luce pulsata ad elevata intensità, il quale impatta sulla superficie in modo costante. I parametri sui quali si può agire, compatibilmente con la resistenza e lo spessore del componente da trattare, sono:

Intensità della pulsazione

Durata della pulsazione

Numero di passate

Dimensioni zona di impatto

Materiale di copertura

Essendo il Laser Shock Peening un trattamento ancora in fase di sviluppo, ma dalle notevoli potenzialità applicative, soprattutto per via di una elevata profondità efficace, non esiste un mix di parametri valido per ogni materiale, in quanto dipende anche dalle caratteristiche del laser che si utilizza per effettuare il trattamento.



Figura 12: Effetto della variazione dei parametri del Laser Shock Peening su alcuni provini di Al-7050 [3]

### 1.3.4 I Parametri di Ultrasonic Peening

Considerato che l'Ultrasonic Shot Peening produce traiettorie casuali durante il trattamento (dovuto alla risonanza degli ultrasuoni nel trasduttore), si cerca considerare grossomodo omogenea la densità di impatto e le tensioni indotte sulla superficie dal trattamento. In questo modo i parametri del trattamento rimangono:

- Posizione e orientamento del pezzo rispetto al trasduttore
- Dimensioni e forma camera di impatto (in ambito industriale esse vengono create in base alla forma del componente da trattare, in modo da ottenere l'intensità e l'uniformità del trattamento richiesta) che influenzano così:
  - Velocità e angolo impatto dei pallini

Importante è anche la forma del trasduttore, al fine di ottenere la risonanza necessaria e conseguentemente una buona energia cinetica dei pallini: il trasduttore, utilizzando il fenomeno della risonanza, deve essere creato appositamente per il componente da trattare, in quanto la risonanza dipende dalla forma e dal materiale del componente da trattare.

### 1.3.5 I Parametri di Low Plasticity Burnishing e di Deep Rolling

Questi due trattamenti essendo caratterizzati da un ricalcamento superficiale operato dai relativi strumenti, i quali tendono a "spianare" la superficie del componente da trattare, utilizzano dunque parametri differenti da quelli di Shot Peening, Laser Shock Peening e Ultrasonic Peening.

I parametri di processo sui quali si può operare sono:

- Pressione di ricalcamento dello strumento sulla superficie del componente da trattare (compatibilmente con il ritorno elastico dello strumento o del macchinario sul quale è installato, con conseguente pressione superficiale applicata inferiore alle attese)
- Velocità di ricalcamento

L'efficacia del trattamento è anche influenzata dal tipo di materiale da trattare: un materiale particolarmente rigido genera un maggiore cedimento elastico dello strumento o del macchinario sul quale è installato lo strumento, con conseguente minore efficacia del trattamento. Altri fattori che influenzano il trattamento è lo stato di finitura superficiale e la forma del materiale da trattare: un componente più "rugoso" o dotato di forma complessa, non permette una azione uniforme degli strumenti sulla sua superficie, generando pertanto un comportamento non ottimale nella vita a fatica.

## **§1.4 Riferimenti bibliografici testi capitolo 1**

- [1] M. Bandini, La pallinatura controllata e le sue applicazioni, alumotive Settembre 2004, 106-112
- [2] <http://www.metalimprovement.co.uk/controlled-shot-peening.html>
- [3] U.C. Heckenberger, Elke Hombergsmeier, LSP to Enhance Fatigue Life of Al 7050 components, eLSP Meeting, Bertinoro 17-18 February 2011
- [4] <http://www.lambdatechs.com/laser-shock-peening.html>
- [5] S. Hirano, K. Hamasaki, K. Okimura, Maintenance Activities for Alloy 600 in PWR Plants, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.2, No.2, GA13
- [6] <http://www.lambdatechs.com/low-plasticity-burnishing-LPB.html>
- [7] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/Skiving-Tool-And-Machine.jpg/1024px-Skiving-Tool-And-Machine.jpg>
- [8] D. Colombo Shot Peening-la “pallinatura controllata” e le sue applicazioni nel ciclismo
- [9] [www.peenservice.it](http://www.peenservice.it)
- [10] M. Guagliano, E. Riva, Influenza della pallinatura sulla propagazione di cricche da fatica da contatto nelle ruote dentate, AIAS XXXI Convegno Nazionale, 18-21 Settembre 2002
- [11] M. Bighignoli, L’influenza della tribofinitura sulla fatica di ruote dentate pallinate in acciaio ed elevata resistenza, Tesi Università di Bologna-Facoltà di Ingegneria A.A. 2007/2008
- [12] [www.norblast.it](http://www.norblast.it)
- [13] F. Carlà, L’influenza del trattamento superficiale di pallinatura sulle prestazioni a fatica della lega Ti-Al6-4V, Tesi Università di Bologna-Facoltà di Ingegneria A.A. 2010/2011
- [14] <http://www.pshotblast.com/shot-peening-increases-fatigue-life-of-auto-components-page-4.php>
- [15] H.O. Fuchs, Metal Fatigue in engineering, John Wiley & Sons



## Capitolo 2

### I materiali analizzati e le relative caratteristiche

#### **Leghe di alluminio**

AA2024

AA7050

#### **Leghe di titanio:**

Ti-Al6-4V

#### **Acciaio:**

AISI 4340

#### **Altre leghe:**

Inconel® 718

## §2.1 Le leghe di alluminio

### 2.1.1 La lega 2024 [1]

È una lega di alluminio-rame, di impiego aeronautico, utilizzata anche per applicazioni generali sofisticate, caratterizzata da buone caratteristiche di lavorabilità alle macchine utensili e da elevata resistenza e tenacità, buona resistenza alla corrosione atmosferica, elevata resistenza alle alte temperature; i vari stati di trattamento applicabili le conferiscono proprietà variabili entro ampi limiti.

E' utilizzata in genere sotto forma di lamiere, piastre, barre, tubi.

Sono disponibili dal pronto gli stati:

T3 (lamiere, barre e tubi)

T351 (piastre)

T4 (lamiere)

Gli impieghi tipici di questa lega, sono in particolari strutturali e meccanici richiedenti elevati requisiti di resistenza e damage tolerance e soggetti a temperature fino a 180°C.

Qui sotto sono elencate le caratteristiche meccaniche minime a temperatura ambiente

#### Lamiere e piastre

Stato	Spessore (mm)		Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A %	Raggio di piega (1)(2)	HB (1)
T4	0.4	1.5	425	290	12	4.0 x s	120
	1.5	6.0	425	290	14	5.0 x s	120
T3 T351	0.4	1.5	435	290	12	4.0 x s	123
	1.5	3.0	435	290	14	4.0 x s	123
	3.0	6.0	440	290	14	5.0 x s	124
	6.0	12.5	440	290	13	8.0 x s	124
T3 T351	12.5	40	430	290	11		122
	40	80	420	290	8		120

Stato	Spessore (mm)		Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A %	Raggio di piega (1)(2)	HB (1)
T351	80	100	400	2850	7		115
	100	120	380	270	5		110
	120	150	360	250	5		104

(1) Valori orientativi (2) Piega a 90°

Tabella 1: Caratteristiche meccaniche minime a temperatura ambiente dell'Al2024 in lamiere [1]

### Barre

Stato	Spessore (mm)	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A %
T3	Fino a 50	450	310	8
	Da 50 a 100	440	300	8
	Da 100 a 200	420	280	8
	Da 200 a 250	400	270	8

Tabella 2: Caratteristiche meccaniche minime a temperatura ambiente dell'Al2024 in lamiere [1]

### Tubi

Stato	Spessore (mm)	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A %
T3	Fino a 30	420	290	8

Tabella 3: Caratteristiche meccaniche minime a temperatura ambiente dell'Al2024 in tubi [1]

Il grafico seguente, utile a comprendere le caratteristiche meccaniche a bassa ed elevata temperatura, presenta la resistenza alla rottura in funzione della temperatura come % della resistenza alla rottura a temperatura ambiente, dopo vari tempi di permanenza in temperatura.

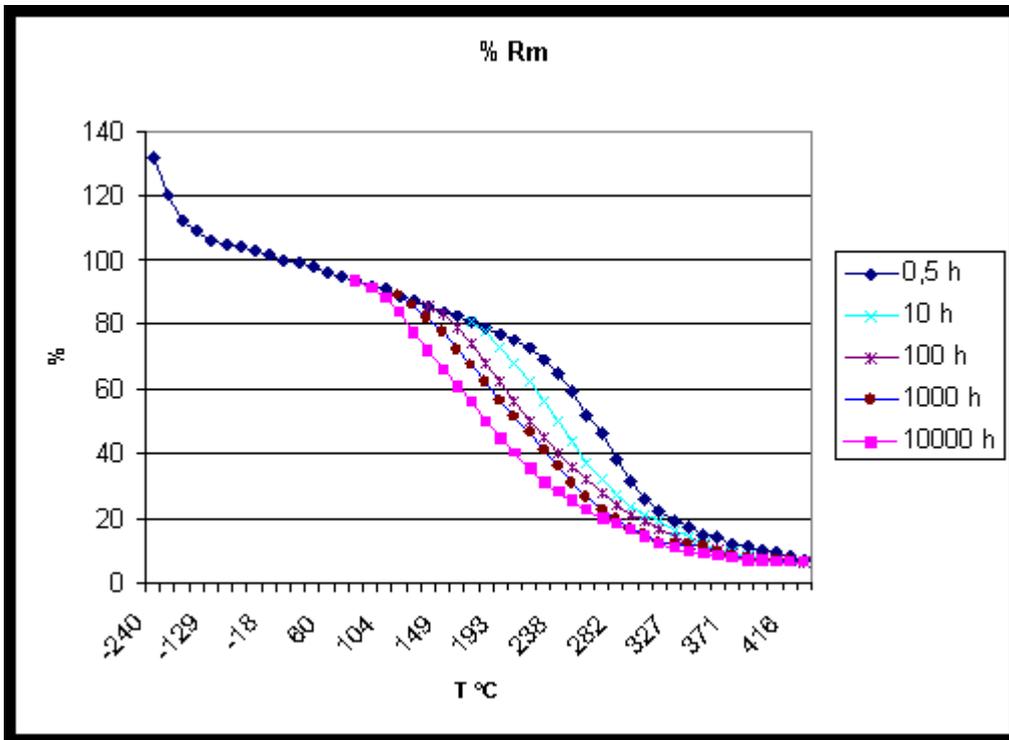


Figura 1: Resistenza al variare della temperatura dell'Al2024 in % rispetto alla resistenza a temperatura ambiente [1]

Il grafico seguente presenta il limite di snervamento in temperatura come % della limite di snervamento a temperatura ambiente, dopo vari tempi di permanenza in temperatura.

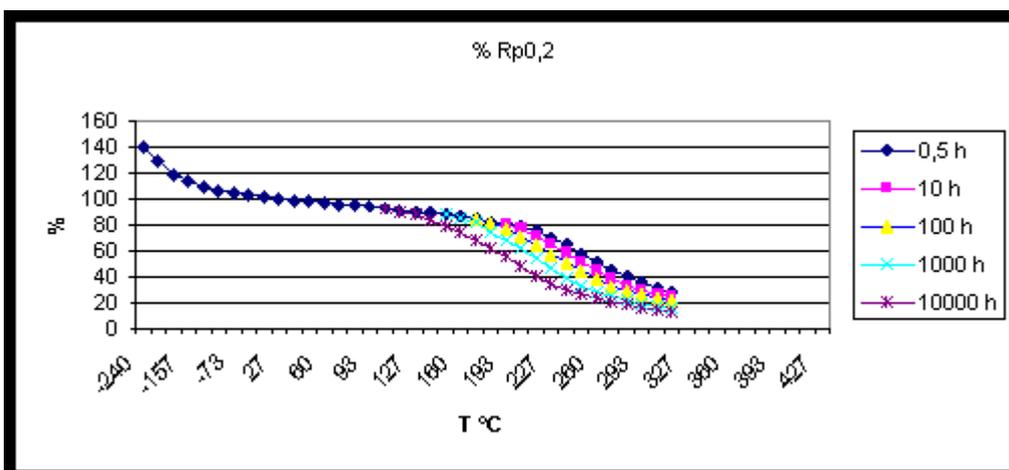


Figura 2: Limite di snervamento al variare della temperatura dell'Al2024 in % rispetto alla resistenza a temperatura ambiente [1]

### Caratteristiche fisiche

Densità: 2,780 g/cm<sup>3</sup> a 20 °C

Conducibilità termica a 20 °C: 126 W/m °C

Modulo di elasticità: 72600 MPa

Coefficiente di dilatazione termica lineare:

Temperatura °C	10 <sup>-6</sup> mm/mm °C
-50 > 20	21.1
20 > 100	22.9
100 > 200	23.8
200 > 300	24.7

Tabella 4: Coefficiente di dilatazione termica lineare dell'Al2024 al variare della temperatura [1]

### Caratteristiche tecnologiche:

La lega di alluminio Al 2024 presenta buona lavorabilità alle macchine utensili, una scarsa formabilità negli stati T3 e T4 e una scarsa saldabilità tramite TIG e MIG.

### Resistenza a fatica:

Le figure seguenti presentano i dati relativi alla resistenza a fatica a trazione per vari coefficienti di intaglio e vari rapporti di carico, secondo la simbologia americana.

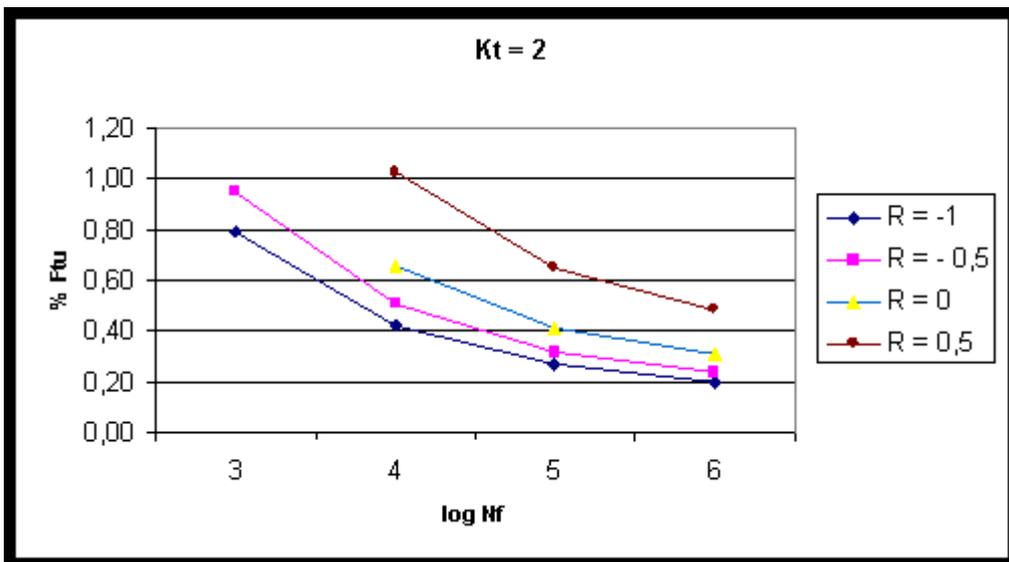


Figura 3 Resistenza a fatica a trazione per K<sub>t</sub>=2 e vari R [1]

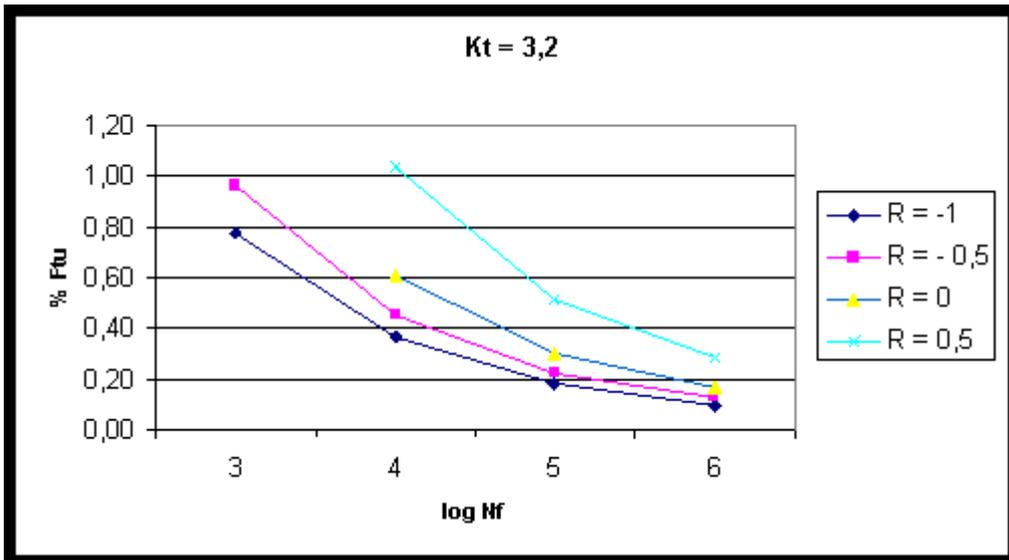


Figura 4: Resistenza a fatica a trazione per  $K_t=3.2$  e vari  $R$  [1]

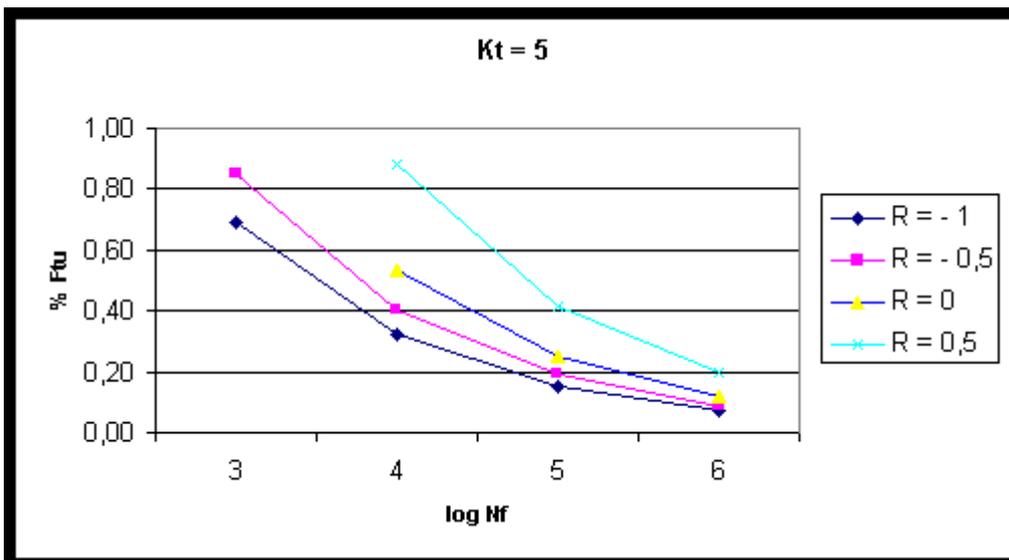


Figura 5: Resistenza a fatica a trazione per  $K_t=5$  e vari  $R$  [1]

### 2.1.2 La Lega AA7050 [2]

La lega AA7050 è una lega di alluminio-zinco-magnesio-rame di impiego aerospaziale, caratterizzata da elevatissimi valori di resistenza sia statica che a fatica, elevata temprabilità (che consente di ottenere tali elevati valori anche su forti spessori), elevati valori di tenacità alla frattura, buona resistenza alla tenso corrosione, ottima lavorabilità alle macchine utensili associata ad elevata stabilità dimensionale. Solitamente viene utilizzata sotto forma di piastre ed è disponibile pronta anche nello stato T7451.

Gli impieghi tipici di questa lega è per pezzi meccanici critici, di forma complessa, fortemente sollecitati sia staticamente che a fatica, specialmente se operanti all'esterno.

#### Caratteristiche meccaniche minime a temperatura ambiente

Stato	Spessore (mm)		Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	A %	HB (1)
T7451	6	38	508	439	9	160
	38	50	508	439	9	160
	50	76	501	432	6	160
	76	101	494	425	6	155
	101	127	487	418	5	155
	127	152	480	411	4	155

(1) Valori orientativi

Tabella 5: Caratteristiche meccaniche minime a temperatura ambiente della lega Al7050-T7451 [2]

#### Caratteristiche fisiche

Densità: 2,83 g/cm<sup>3</sup> a 20 °C

Conducibilità termica a 20°C: 157 W/m°C (stato T451)

Modulo di elasticità: 70700 MPa

Modulo di elasticità tangenziale: 26800 MPa

Modulo di Poisson: 0.33

**Coefficiente di dilatazione termica lineare:**

Temperatura °C	10 <sup>-6</sup> mm/mm °C
-50 > 20	21.7
20 > 100	23.5
100 > 200	24.4
200 > 300	

Tabella 6: Coefficiente di dilatazione termica lineare della lega Al7050 al variare della temperatura [2]

**Caratteristiche tecnologiche:**

Lavorabilità alle macchine utensili: Ottima

Saldabilità: Sconsigliata (TIG – MIG)

**Caratteristiche di resistenza a fatica**

Le figure seguenti presentano i dati relativi alla resistenza a fatica a trazione per vari coefficienti di intaglio e vari rapporti di carico, secondo la simbologia americana.

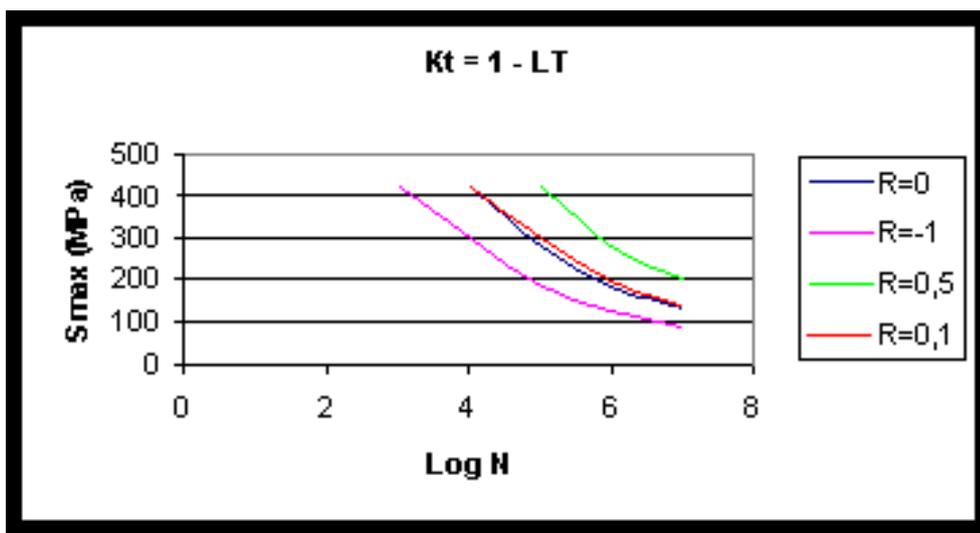


Figura 6: Resistenza a fatica a trazione della lega Al7050 per K<sub>t</sub>=1 - LT e vari R [2]

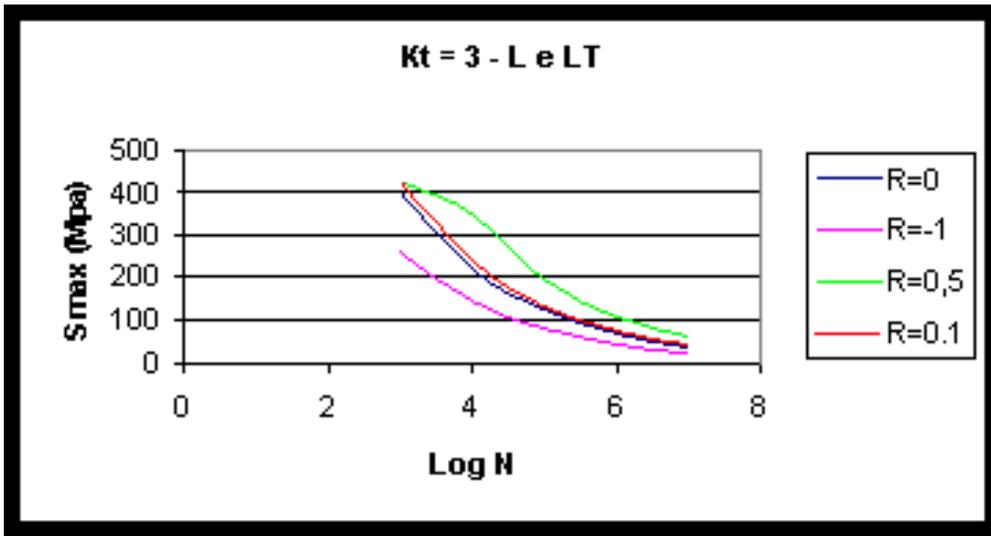


Figura 7: Resistenza a fatica a trazione della lega Al7050 per  $K_t=3 - L$  e  $LT$  e vari  $R$  [2]

#### Tenacità alla frattura:

La figura seguente presenta i dati relativi alla velocità di propagazione della cricca in funzione del fattore di intensità della sollecitazione per vari rapporti di carico, secondo la simbologia americana.

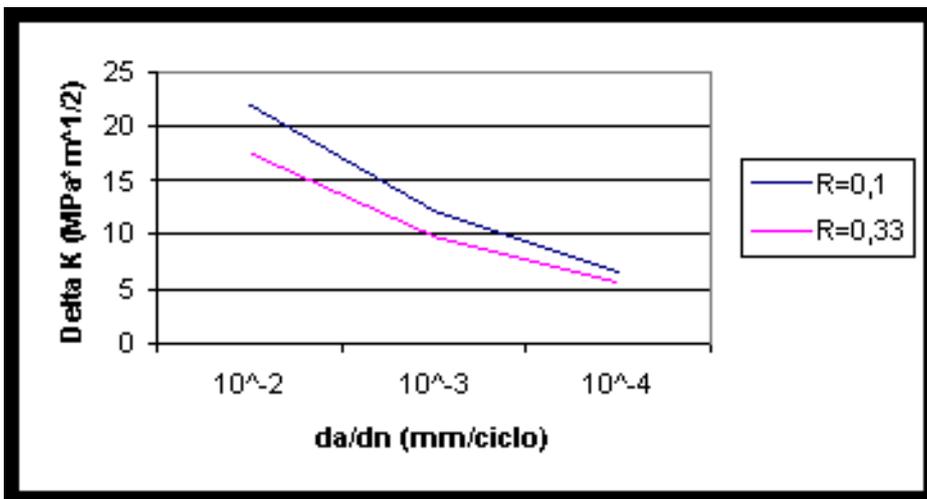


Figura 8: Velocità di propagazione della cricca nella lega Al7050 in funzione del fattore di intensità della sollecitazione per  $R=0,1$  e  $R=0,33$  [2]

## §2.2 Le leghe di Titanio

### La lega di Titanio Ti-Al6-4V [3]

Con questa designazione si contraddistingue una lega di titanio con contenuto di alluminio (Al) compreso tra 5,5÷6,75% e vanadio tra 3,5÷5%. Questa lega contiene anche altri elementi quali carbonio (C), ferro (Fe), azoto (N), ossigeno (O) ed altri in percentuali minime. Le specifiche variano da nazione a nazione con minime differenze nei limiti di presenza per alcuni elementi.

Specifi- cation	Desig- nation	Descrip- tion	Al	C	Fe	H	N	O	V	OT	Other
UNS	R56400	Weld Wir	5.5-6.75	0.1	0.4	0.015	0.05	0.2	3.5-4.5		bal Ti
UNS	R56401		6						4		bal Ti
UNS	R56402	Fill Met	5.5-6.75	0.04	0.15	0.005	0.012	0.1	3.5-4.5		bal Ti
<b>Europe</b>											
AECMA prEN2517	Ti-P63	Sh Strp Plt Bar Ann	5.5-6.75	0.08	0.3	0.01	0.05	0.2	3.5-4.5	0.4	bal Ti
AECMA prEN2530		Bar Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN2531		Frg Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3310		Frg NHT	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3311		Bar Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3312		Frg Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3313		Frg NHT	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3314		Bar STA	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3315		Frg STA	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3352		Inv Cast Ann HIP	5.5-6.75	0.1 max	0.3 max	0.015 max	0.05 max	0.22 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3353		Bar Wir STA	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3354		Sh Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3355		Ext Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3456		Sh Strp Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3457		Frg NHT	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3458		Bar Wir Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3464		Plt Ann	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti
AECMA prEN3467		Remelt NHT	5.5-6.75	0.08 max	0.3 max	0.0125 max	0.05 max	0.2 max	3.5-4.5	0.4 max	OE 0.1 max; bal Ti

Figura 8: Composizione chimica Ti-Al6-4V in varie forme [4]

La Ti-6Al-4V è la lega che tra i titani legati ha trovato la maggiore diffusione ed il maggiore sviluppo per le sue caratteristiche di versatilità e di resistenza alle alte temperature (400-500°C). Nonostante presenti una bassa resistenza, essa infatti ricopre circa la metà dell'intera produzione e consumo di titanio per la produzione di materiali metallici in campo industriale. Di questa quantità circa l'80% viene impiegato dall'industria aerospaziale, il 3% risulta utilizzato nel settore biomedico per la produzione di protesi ed il restante si suddivide soprattutto tra industria ciclistica e motociclistica [5][6]: nello specifico viene impiegata nella produzione di anelli, telai, dischi e pale, serbatoi, scatole, mozzi, elementi forgiati ed impianti biomedici, grazie alla sua elevata compatibilità con ossa e tessuti [7].

La lega Ti-6Al-4V ha inoltre bassa resistenza all'usura superficiale e tende a grippare a contatto con se stessa o con altri materiali. Trattamenti superficiali quali nitrurazione ed ossidazione possono migliorare la resistenza all'usura superficiale[7]. Dunque si può notare come la Ti-6Al-4V sia una lega altamente versatile

ed una lega utilizzabile anche per temperature comprese tra i 400°C ed i 500°C. Le più note ed utilizzate varianti di questa lega sono la Ti-6Al-4V Grado ELI (Extra Low Interstitial) e la Ti-6Al-4V Pd con l'aggiunta dello 0,2% di palladio. La prima presenta tolleranze più strette per ossigeno (max 13%) e ferro(max 0,25%) ed è particolarmente duttile e resistente a temperature criogeniche(-190°C azoto liquido, -224°C elio). La seconda è dotata di una resistenza alla corrosione superiore anche a quella ottima della lega base [8][5].

Per quanto riguarda il comportamento a fatica, il limite di fatica varia tra i 500 ed i 700 MPa. La morfologia del materiale e tutte quelle modifiche strutturali (microstrutture  $\alpha$  aciculari e morfologie a grana fine su tutte) che migliorano la resistenza a snervamento, portano un aumento della resistenza a fatica. Nel caso di grana fine, particolare resistenza viene apportata da raffreddamenti rapidi durante trattamenti termici di solubilizzazione. Nelle figure a seguire possiamo vedere l'influenza delle diverse variabili sui valori di carico a fatica (morfologia, velocità di raffreddamento in bonifica, granulometria).

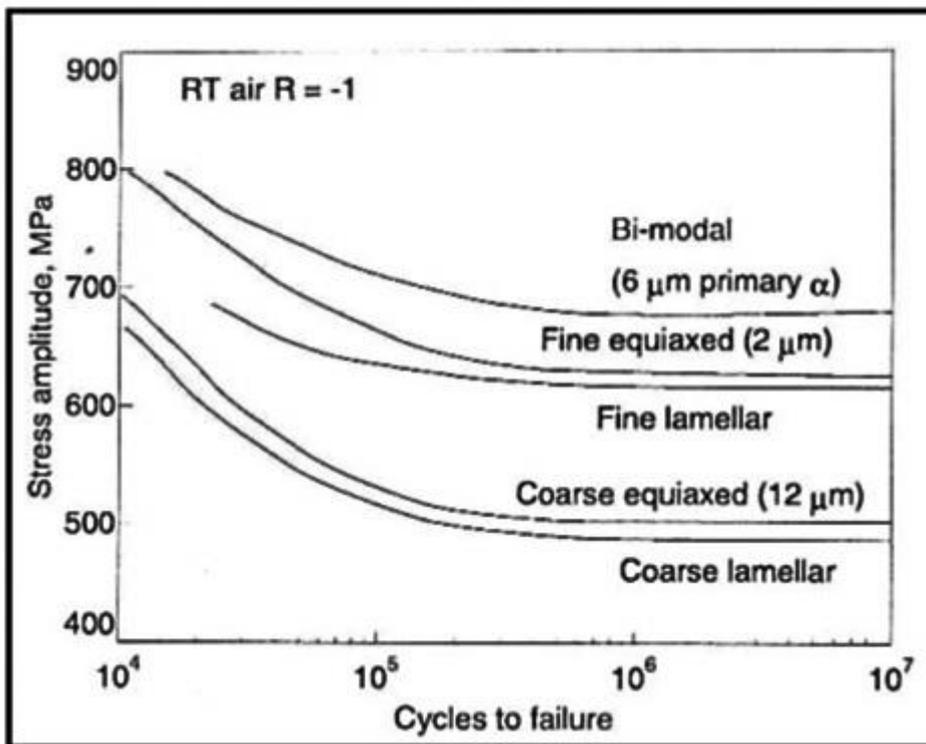


Figura 9: Comportamento a fatica di Ti-Al6-4V in varie morfologie [9]

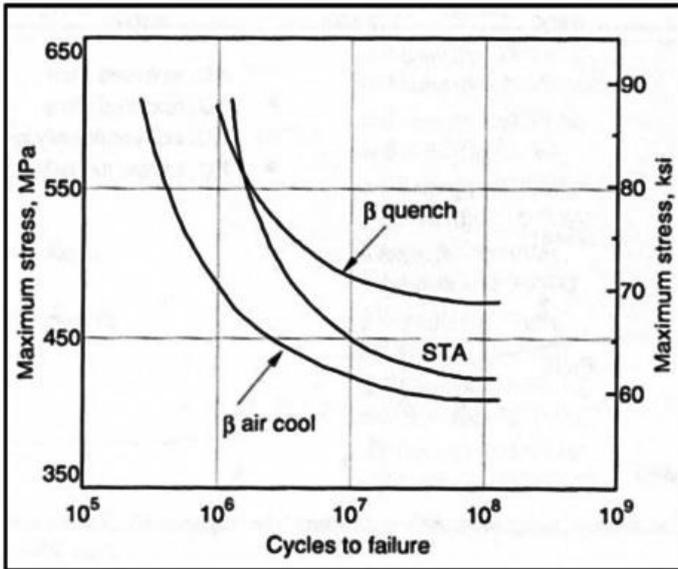


Figura 10: Effetto della variazione del raffreddamento durante la bonifica sulla vita a fatica del Ti-Al6-4V [9]

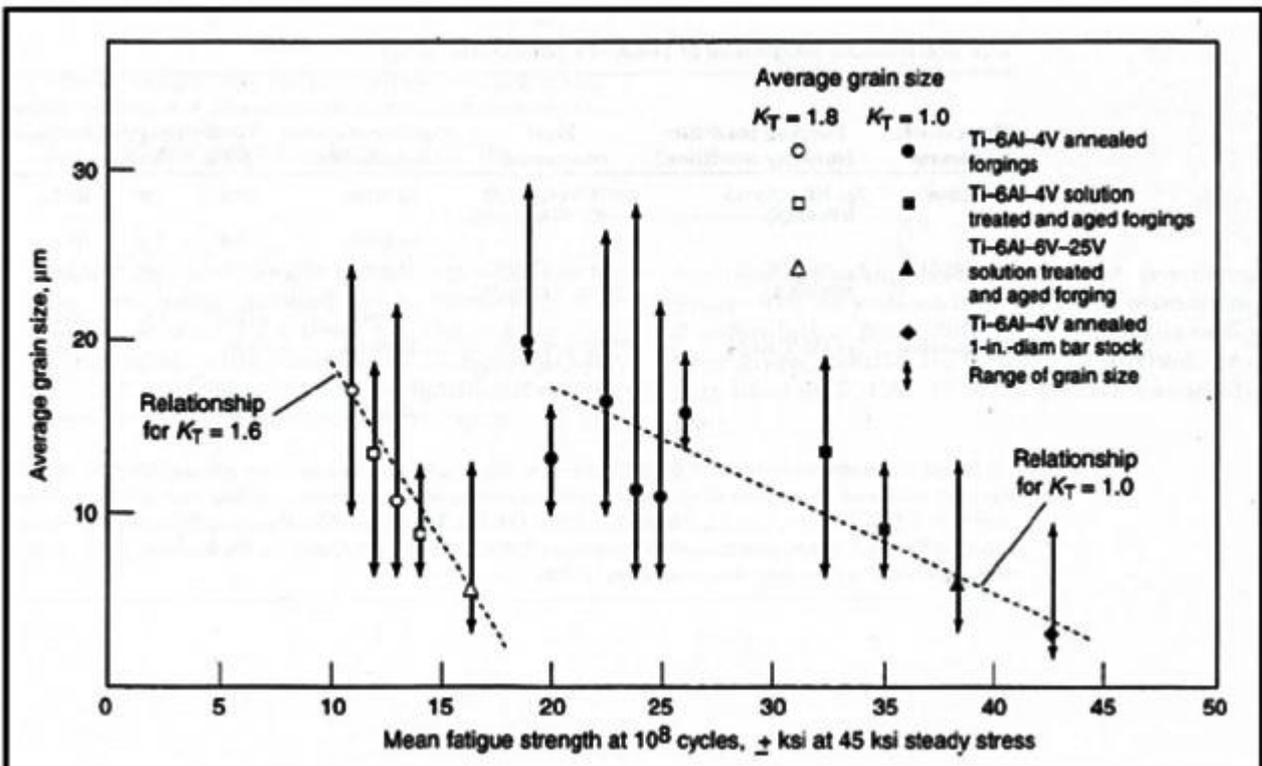


Figura 11: Effetto della granulometria sul comportamento a fatica del Ti-Al6-4V [9]

Nell'ultimo grafico si può vedere chiaramente l'influenza della dimensione dei grani per leghe di titanio preparate con diversi trattamenti termici. Il forte connotato statistico di tale proprietà si evidenzia nelle ampie bande di dispersione dei dati sperimentali. I valori medi evidenziano comunque un aumento praticamente lineare del limite di fatica al diminuire della dimensione dei grani.

## **§2.3 Le Leghe di acciaio**

### **L'acciaio AISI 4340 (o 40NiCrMo7)**

L'AISI 4340 (o 40NiCrMo7) è un acciaio debolmente legato, trattabile superficialmente, contenente nichel, cromo e Molibdeno. Questo acciaio è conosciuto per la sua durezza e per la sua capacità di offrire elevata resistenza se trattato superficialmente, mantenendo ugualmente una buona resistenza alla fatica.

Le tipiche applicazioni sono per uso strutturale, ad esempio per la costruzione di carrelli di atterraggio per aeromobili, per organi di trasmissione di potenza e alberi di trasmissione.

La lavorazione di questo acciaio è meglio effettuarlo previo ricottura o dopo tempra e rinvenimento: nella condizione di alta resistenza di 200 ksi o più, la lavorabilità è solo del 10-25% rispetto a quella che avrebbe in condizione di ricottura. Può essere lavorato tramite qualsiasi metodo convenzionali.

L'acciaio AISI 4340 è dotato di buona duttilità dopo ricottura e la maggior parte delle operazioni (quali trafilatura o ricalcamento) vengono effettuate in questa condizione.

L'AISI 4340 può essere fuso o saldato resistentemente. Le procedure di copertura pre e post saldatura di questo acciaio devono seguire metodi prestabiliti.

Nelle due pagine seguenti (figure 12 e 13) sono allegati estratti del manuale degli acciai IMS per il 40NiCrMo7 (corrispondente all'AISI 4340), nelle quali sono descritte le principali caratteristiche meccaniche e fisiche.

### Corrispondenze Comparable standards

SIAU	DIN	W.N.	AFNOR	BS	AISI/SAE
NCM4	(40NiCrMo8-4)	(1.6562)	-	-	(4340)

### Composizione Chemical analysis

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P e S
.37÷.44	.50÷.80	.15÷.40	.60÷.90	1.60÷1.90	.20÷.30	≤ .035

### Temperature per la lavorazione a caldo ed il trattamento termico Hot work and heat treatment temperatures

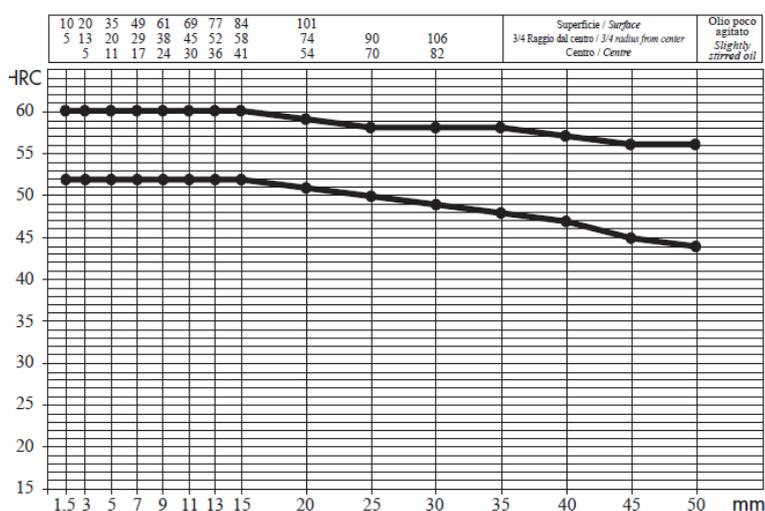
Punti critici Critical points	Fucinatura Forging	Normalizzazione Normalization	Ricottura subcritica Subcritical annealing	Ricottura isoterma Isothermal annealing	Tempra Hardening	Rinvenimento Tempering
Ac1 725					780÷800	830÷850
Ac3 770	1100÷900	840÷880	650÷680		↓	550÷650
Ms 310					640x4h	olio / oil

### Caratteristiche meccaniche / Mechanical properties

Stato Condition	Saggio Ø mm. Specimen Ø mm.	Re min. N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	A min. %	KCU min. J	Durezze HB allo stato HB hardness in the following conditions	
Bonificato Hardened and tempered	≤ 16	835	1030÷1230	11	30	Ricotto lavorabile / Soft-annealed	≤ 250
	≤ 40	785	980÷1180	11	30	Ricotto isoterma/Isothermal annealed	-
	≤ 100	735	930÷1130	12	30	Ricotto sferoidale/Spheroidal annealed	≤ 230
	≤ 160	665	850÷1030	13	30		
	≤ 250	635	780÷980	13	30		

### Temprabilità Hardenability

HRC / % Martensite	Diametro temprabile mm. / Hardenable diameter mm.	
90%	50%	olio / oil      acqua / water
55	44	150      -



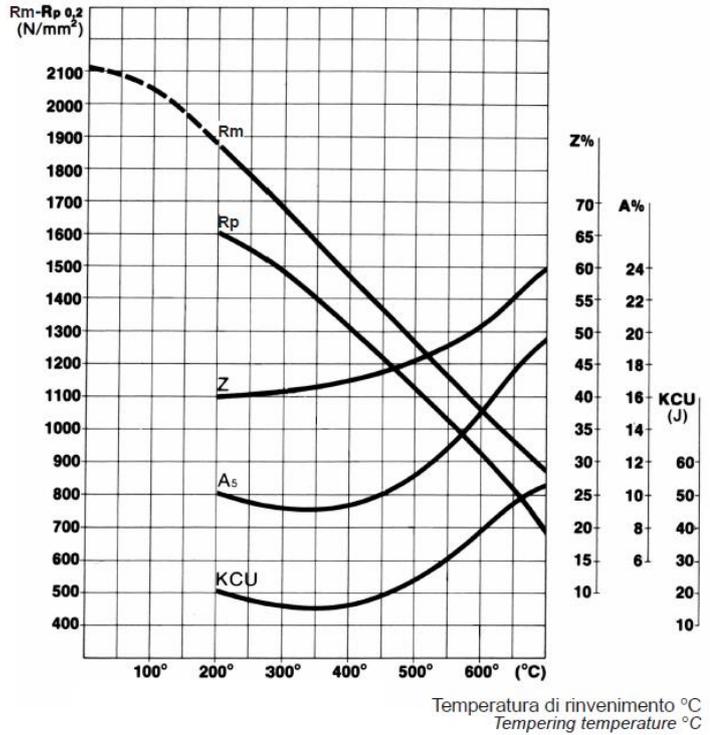
### Temprabilità Jominy Jominy hardenability

Distanza dall'estremità temprata Distance from quenched end	Durezza Rockwell Rockwell hardness	
mm.	HRc min	HRc max
1,5	52	60
3	52	60
5	52	60
7	52	60
9	52	60
11	52	60
13	52	60
15	52	60
20	51	59
25	50	58
30	49	58
35	48	58
40	47	57
45	45	56
50	44	56

Figura 12: Caratteristiche meccaniche e fisiche del 40NiCrMo7 (AISI 4340) [11]

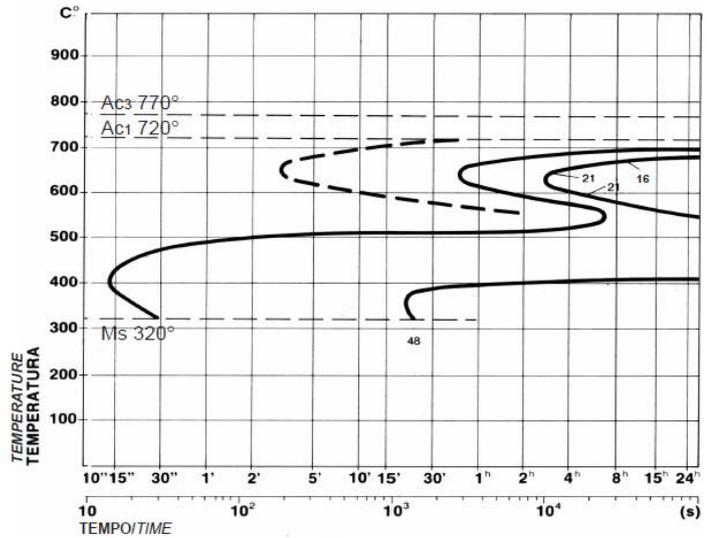
# 40NiCrMo7

## Diagramma di Rinvenimento Tempering curve



Trattamento: su Ø 10 mm    Tempra: 850 °C olio    Rinvenimento per 1 ora  
 Treatment: on Ø 10 mm    Hardening: 850 °C oil    Tempering for 1 hour

## Diagramma T.T.T. T.T.T. diagram



Trattamento: su Ø 10 mm    Austenitizzazione: 840 °C    Permanenza per 1/2 ora  
 Treatment: on Ø 10 mm    Austenitizing: 840 °C    Soak for 1/2 hour

Figura 13: Caratteristiche meccaniche e fisiche del 40NiCrMo7 (AISI 4340) [11]

## **§2.4 Altre leghe**

### **2.4.1 L'Inconel® 718 [10]**

L'Inconel® 718 (UNS N07718/W.Nr. 2.4668) è una lega brevettata a base di nichel-cromo, dotata di una elevata resistenza alle sollecitazioni ed una buona resistenza alla corrosione.

Questa lega trova applicazione soprattutto in campo aeronautico, in virtù delle sue buone doti di resistenza e della capacità di essere efficacemente impiegata in un range di temperature tra -252°C e 704°C. Le composizioni tipiche della lega sono mostrate nella tabella sottostante

Nickel (plus Cobalt) .....	50.00-55.00
Chromium.....	17.00-21.00
Iron .....	Balance*
Niobium (plus Tantalum).....	4.75-5.50
Molybdenum .....	2.80-3.30
Titanium.....	0.65-1.15
Aluminum .....	0.20-0.80
Cobalt .....	1.00 max.
Carbon .....	0.08 max.
Manganese .....	0.35 max.
Silicon .....	0.35 max.
Phosphorus.....	0.015 max.
Sulfur.....	0.015 max.
Boron .....	0.006 max.
Copper.....	0.30 max.

<sup>a</sup>Conforms to AMS specifications

\*Reference to the 'balance' of a composition does not guarantee this is exclusively of the element mentioned but that it predominates and others are present only in minimal quantities.

Figura 14: Composizione chimica della lega Inconel® 718 [10]

Questa lega è dotata di eccezionali caratteristiche di saldabilità, specialmente la sua resistenza alle rotture post-saldatura.

La facilità e l'economia con le quali la lega Inconel® 718 può essere fabbricata, in combinazione con la buona resistenza alle tensioni, alla fatica, al creep e alla rottura, comportano un ampio range di applicazioni. Un esempio sono le componenti per razzi a combustibile liquido, anelli, involucri e componenti di lamiera metallica di varie foggie per uso aeronautico, per turbine gas, e per contenitori conservazione cryogenica. Viene inoltre utilizzata per elementi di fissaggio e parti per strumentazioni.

## **§2.5 Riferimenti bibliografici capitolo 2**

- [1] <http://www.aviometal.com/aa2024.php>
- [2] <http://www.aviometal.com/aa7050.php>
- [3] F. Carlà, L'influenza del trattamento superficiale di pallinatura sulle prestazioni a fatica della lega Ti-Al6-4V, Tesi Università di Bologna-Facoltà di Ingegneria A.A. 2010/2011
- [4] S. Mall, T. Nicholas, Titanium matrix composites, mechanical behavior, Technomic Publication, 1998
- [5] D. Colombo, Titanio e il suo impiego nel settore motociclistico "stato dell'arte in Italia"  
<http://www.ing.unitn.it/~colombo/MOTOTITANIO/TitanioMOTO.htm#legaTi6Al4V>
- [6] Alloys of titanium Ti-Al6-4V <http://www.crptechnology.com/sito/en/materials/ti-6al4v-titanium-alloy.html>
- [7] Titanium Ti-Al6-4V (Grade 5), Annealed AMS 4928 AMS 4911  
<http://www.crpmeccanica.eu/PDF/titanium-ti-6al-4v-annealed-ams-4928.pdf>
- [8] Titanium alloys – Ti-Al6-4V Grade 5 <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547>
- [9] G. Petzow, G. Effenberg, a comprehensive compendium of evaluated constitutional data and phase diagrams, Metals Handbook, desk edition, 1993.
- [10] <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>
- [11] [http://www.ims.it/ims/ims\\_spa/cmscontent.nsf/documentsbyidweb/5rqmfr/\\$file/40nicrmo7.pdf](http://www.ims.it/ims/ims_spa/cmscontent.nsf/documentsbyidweb/5rqmfr/$file/40nicrmo7.pdf)



## Capitolo 3

### Prove di laboratorio e analisi dei risultati

#### §3.1 Test su leghe di alluminio

##### 3.1.1 Confronto tra Shot Peening e Laser Shock Peening Al7050-T7451

In questa prova [1] verranno confrontati i risultati ottenuti con Shot Peening e Laser Shock Peening effettuati su Al 7050-T7451.

Il materiale di partenza utilizzato per il test sono piastre di Al 7050-T7451 dello spessore di 40mm, laminate a freddo fino a 20 mm e dalle quali sono stati ricavati i provini, nella direzione di laminazione. I provini sono stati trattati termicamente a 474°C e rinvenuti prima per 4 ore a 120°C e poi per 24 ore a 160° C.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Others	Al
0.021	0.051	2.11	0.008	2.29	0.009	5.9	0.026	0.13	0.01	Balanced

Figura 1: Composizione chimica della lega Al7050-T7451 in % sulla massa [1]

La struttura così ottenuta è mostrata in figura 2

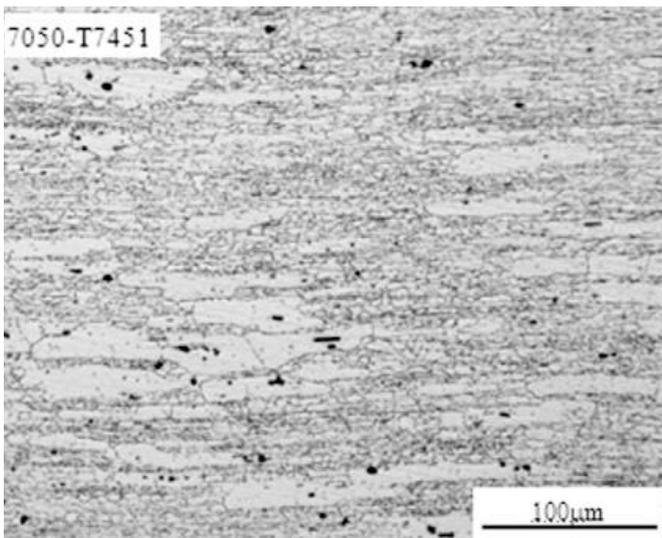


Figura 2: Microstruttura della lega di alluminio 7050-T7451 [1]

I provini utilizzati (figura 3) sono stati ottenuti dalle piastre di partenza con lavorazione alle macchine utensili, con finitura superficiale di Ra 0.8-1.2.

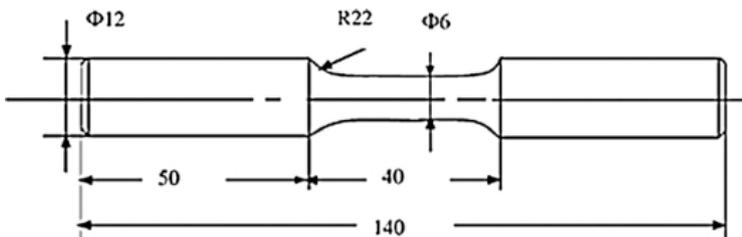


Figura 3: Schema dei provini utilizzati per i test [1]

I test sono stati effettuati utilizzando una macchina per prove di flessione rotante a quattro punti con frequenza di 50 Hz a temperatura ambiente. Il limite di fatica per  $10^7$  cicli è stato effettuato utilizzando il metodo stair-case [2,3]. L'analisi delle rotture superficiali è stata effettuata utilizzando un microscopio elettronico a scansione.

Per la prova sono stati impiegati tre gruppi di provini:

- Per il primo gruppo, sono stati impiegati provini così come usciti dalle macchine utensili.
- Per il secondo, sono stati utilizzati provini pallinati con differenti tipi di Shot Peening
- Per il terzo gruppo, sono stati trattati con Laser Shock Peening 2,4,6,8 volte, circa 60sec per ogni volta, con intensità di pulsazione di  $2 \times 10^9$  W, durata 50 nanosecondi, energia di 50 J a frequenza di 0.54 Hz, e intensità Almen ottenuta di 0.08 C. Come copertura è stata utilizzata vernice nera e come strato soprastante acqua.

Il grafico sottostante (figura 4) mostra la distribuzione delle tensioni compressive indotte dal trattamento sulla superficie dei provini trattati con vari tipi di Shot Peening

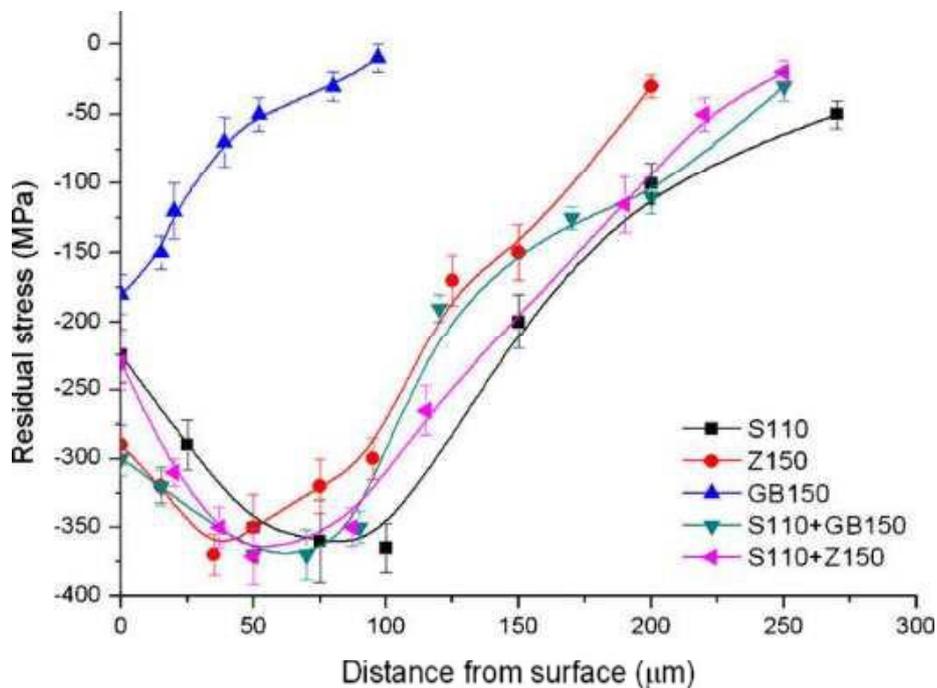


Figura 4: Andamento delle tensioni residue indotte da Shot Peening al variare della distanza dalla superficie. Le varie curve indicano i diversi tipi di Shot Peening [1]

Per i provini pallinati a 0.10A utilizzando pallini in fibra di vetro (GB150) con diametro di 0.15mm, il picco di tensioni residue è sulla superficie, l'intensità è più bassa tra tutti i trattamenti di Shot Peening ed inoltre anche la profondità efficace è la più bassa. I provini pallinati a 0.20A tramite o sfere ceramiche (Z150) di diametro 0.15mm o pallini di acciaio (S110) di diametro 0.28mm hanno mostrato un picco più elevato di tensioni residue compressive ed una migliore distribuzione delle stesse. Recentemente è stato sviluppato in laboratorio un doppio Shot Peening, con una prima fase dove vengono indotte le tensioni residue in profondità e una seconda fase con Shot Peening a bassa intensità per modificare la rugosità superficiale ed aumentare le tensioni residue sulla superficie. Per determinare l'effetto del doppio Shot Peening (pallinatura 0.20A con pallini di acciaio S110 e poi pallinato a 0.10A o con pallini ceramici Z150 o con pallini in fibra di vetro GB150) sulla resistenza a fatica del 7050-T7451, è stato analizzato l'andamento delle tensioni residue (risultati in figura sopra) e paragonato con gli altri tipologie di Shot Peening. Lo Shot Peening effettuato con

pallini in fibra di vetro, modifica la morfologia della superficie in maniera nettamente inferiore rispetto a quanto non venga modificata con pallini ceramici, le tensioni residue sulla superficie risultano inferiori e così come inferiore è la profondità efficace. Per questi provini pallinati a 0.2A, sia le tensioni residue superficiali che il picco di intensità di tensione compressiva impressa sono migliori di quelli dei provini pallinati a 0.1A con pallini di fibra di vetro. Il picco di tensione residua compressiva impressa ad intensità 0.2A è grossomodo lo stesso (370 MPa) per i differenti tipi di Shot Peening, tuttavia le tensioni residue superficiali cambiano a seconda di pallinatura singola o doppia, fenomeno che si verifica anche negli altri tipi di metalli [4].

La distribuzione delle tensioni residue per i provini trattati con Laser Shock Peening è mostrata in figura 5

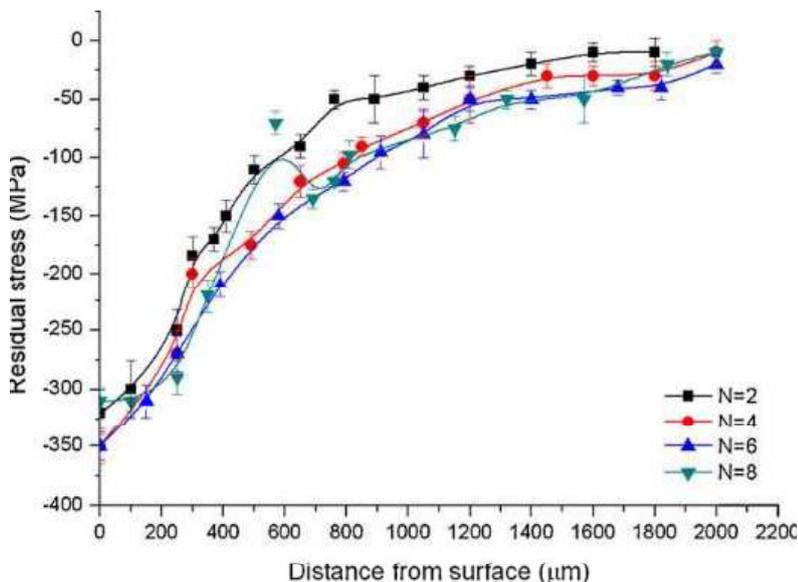


Figura 5: Andamento delle tensioni residue indotte da Shot Peening al variare della distanza dalla superficie. Le varie curve indicano i diversi tempi di trattamento [1]

Per i provini trattati per 120 s (N=2), il valore delle tensioni residue superficiali è di 320 MPa e la profondità efficace è di 1.8 mm. Per i provini trattati per 240 e 360 s (rispettivamente N=4, N=6), l'intensità delle tensioni residue superficiali di compressione è di 350MPa e la profondità efficace è intorno ai 2mm. Nel caso di N=8, con trattamento di 480s, le tensioni residue tendono a ridursi di intensità e la distribuzione diventa più complessa: le tensioni residue compressive, essendo legate alla deformazione plastica superficiale, quando il tempo di trattamento è breve, si ha incrudimento superficiale ma non tensioni sufficienti, con un tempo di trattamento lungo, si ha un rilassamento dovuto al modesto effetto all'esposizione al laser ad alta energia.

Comparando le tensioni residue indotte da Laser Shock Peening con quelle indotte da Shot Peening, la profondità efficace del trattamento di Laser Shock Peening è circa 10 volte maggiore rispetto a quella del trattamento di Shot Peening.

Nella tabella 1 sono riassunti i dati dei test effettuati

Surface treatment	Minimum fatigue life	Maximum fatigue life	Average fatigue life	FLPF
Machined baseline	$2.41 \times 10^4$	$2.69 \times 10^4$	$2.55 \times 10^4$	0
SP-GB150	$5.18 \times 10^4$	$5.52 \times 10^4$	$5.49 \times 10^4$	1.153
SP-S110	$4.74 \times 10^4$	$5.27 \times 10^4$	$4.84 \times 10^4$	0.898
SP-Z150	$8.84 \times 10^4$	$9.46 \times 10^4$	$9.23 \times 10^4$	2.620
SP-S110+Z150	$8.65 \times 10^4$	$9.21 \times 10^4$	$8.97 \times 10^4$	2.518
SP-S110+GB150	$1.15 \times 10^5$	$1.24 \times 10^5$	$1.19 \times 10^5$	3.667
LP-N=2	$9.19 \times 10^4$	$1.15 \times 10^5$	$9.92 \times 10^4$	2.890
LP-N=4	$1.52 \times 10^5$	$2.14 \times 10^5$	$1.94 \times 10^5$	6.608
LP-N=6	$1.46 \times 10^5$	$1.91 \times 10^5$	$1.65 \times 10^5$	5.471
LP-N=8	$9.54 \times 10^4$	$1.08 \times 10^5$	$9.98 \times 10^4$	2.914

Tabella 1: Misura dei cicli prima della rottura minimi, massimi e medi per i vari trattamenti analizzati [1]

Analizzando l'influenza dei trattamenti sulla superficie del materiale, si può notare dalle figura 6 (da lettera a a lettera c) che lo Shot Peening ha provocato diverse "ammaccature" dovute all'urto dei pallini sulla superficie, mentre il Laser Shock Peening ha lasciato una buona finitura superficiale (figura 6 d).

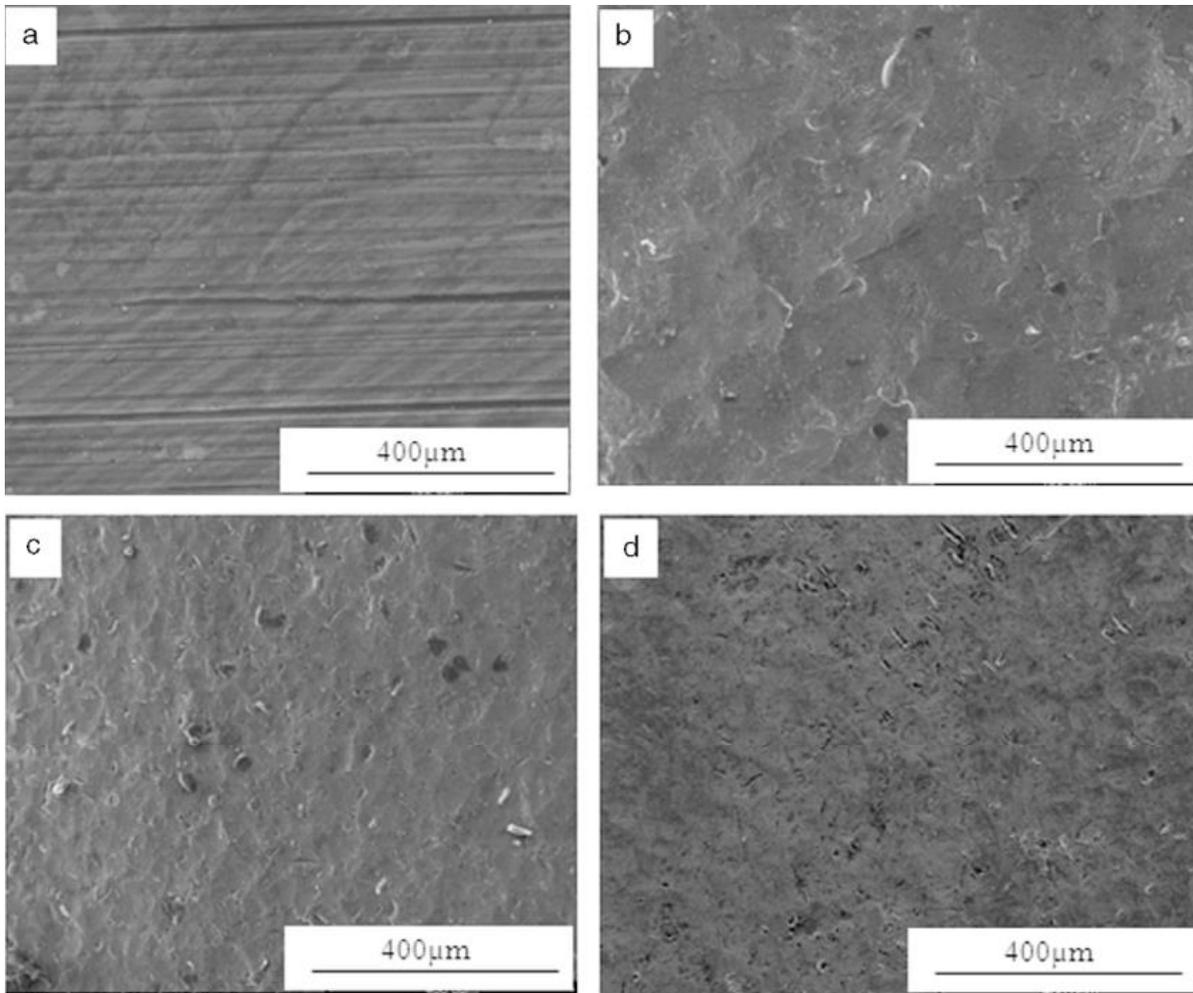


Figura 6: Analisi al microscopio della finitura superficiale del provino (a) base da macchina utensile; (b) trattato con SP110; (c) trattato con SP-S110+GB150; (d) trattato con LP-N=4 [1]

### 3.1.2 Confronto tra Shot Peening e Laser Shock Peening su Al 2024-T351 [5]

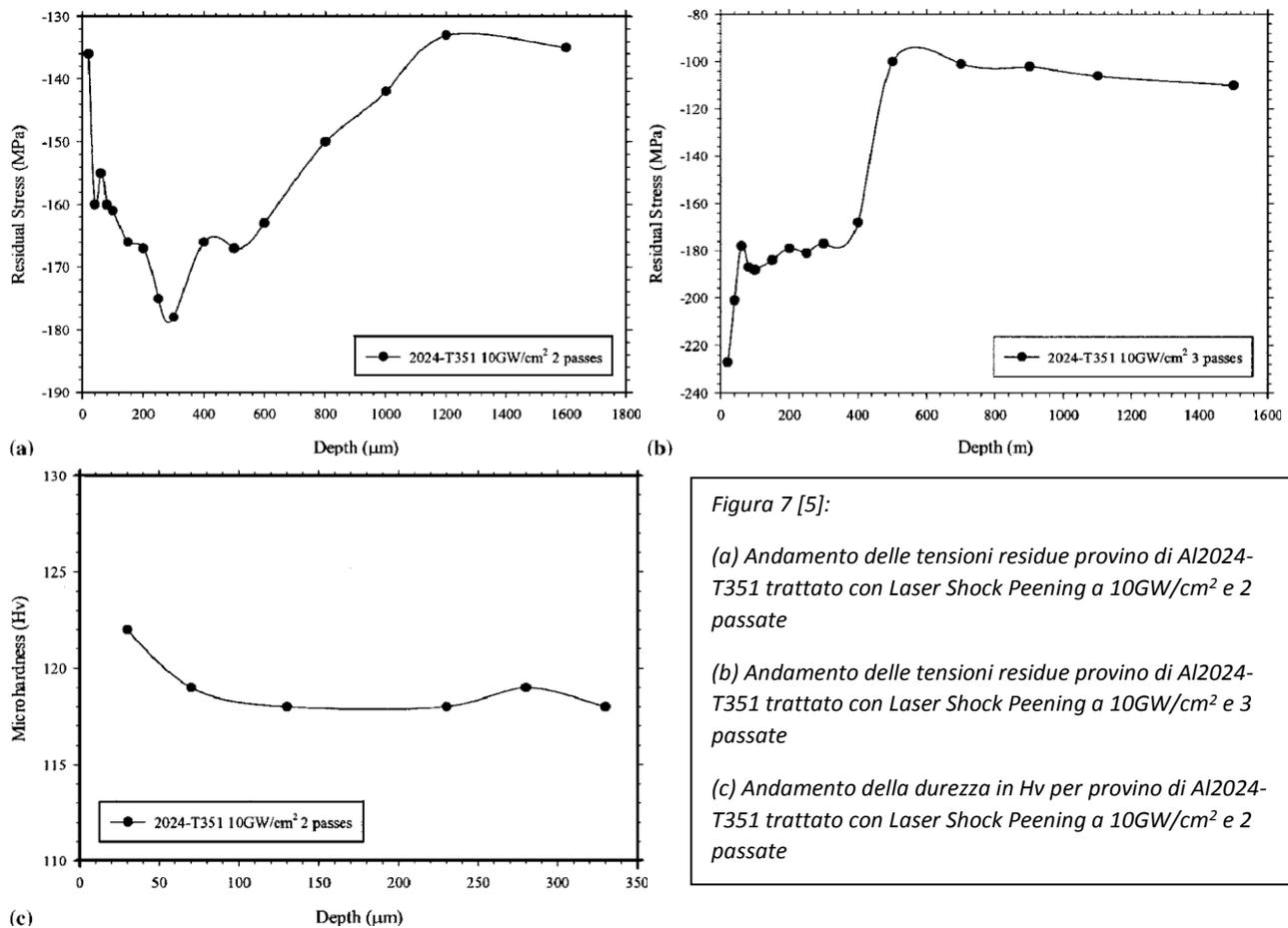
Il materiale di partenza sono lastre di Al 2024 laminate fino a spessore di 30 mm (caratteristiche e composizione chimica sono riportate in tabella 2)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.05	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1	0.25	0.15	Bal.

Tabella 2: Composizione chimica della lega Al 2024-T351 in % sulla massa [6]

L'intensità di Shot Peening è di 4A ottenuta con pallini S110 di acciaio (0.279 mm di diametro e durezza di 410.5-548.5 Hv) sparati con angolo di incidenza di 45° e copertura del 200%.

Il Laser Shock Peening, è stato effettuato con strato di copertura di alluminio di spessore 70 µm, strato soprastante traslucido di acqua e laser con lunghezza d'onda di 0.532 e energia di 1.3J con pulsazione di 6-7 nanosecondi. L'intensità del laser è stata settata a 10 GW/cm<sup>2</sup> (pressione stimata di 5 GPa) con distanza focale di 2 mm. Il trattamento è stato effettuato con una sovrapposizione del 50%. I grafici successivi mostrano l'andamento della durezza e delle tensioni superficiali (figura 7 per Laser Shock Peening e figura 8 per Shot Peening) in funzione della profondità:



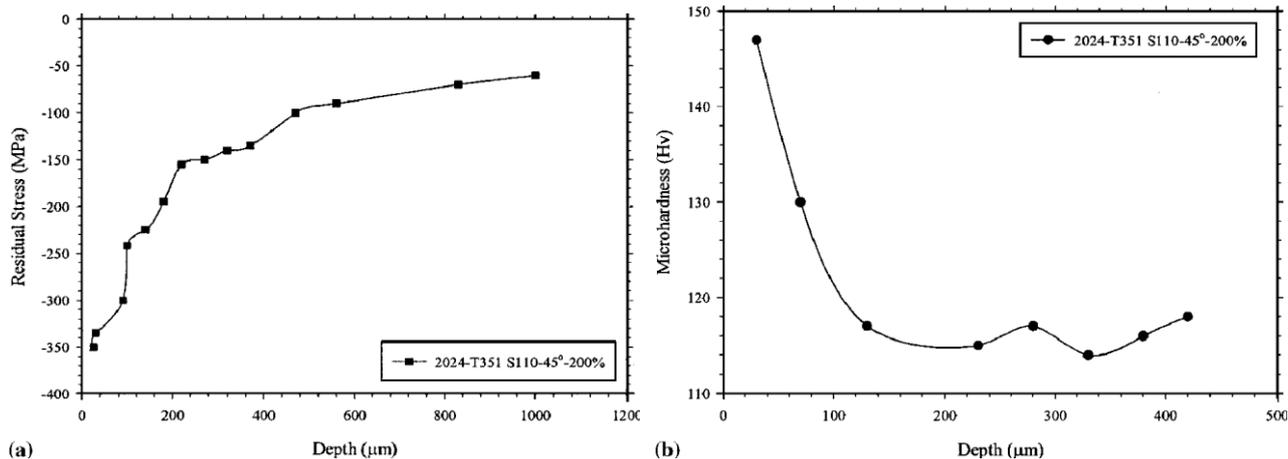


Figura 8 [5]:

(a) Andamento delle tensioni residue provino di Al2024-T351 trattato con Shot Peening a 4 A

(b) Andamento della durezza in Hv per provino di Al2024-T351 trattato con Shot Peening a 4 A

Inoltre, per capire se vi potesse essere un miglioramento del profilo delle tensioni in caso di pre-stress, è stato fatto prima del Laser Shock Peening un trattamento di Shot Peening. I risultati sono mostrati sotto (figura 9). Dal grafico della figura 9, si nota un netto miglioramento del profilo delle tensioni, sebbene sia influenzato dal precedente trattamento di Shot Peening.

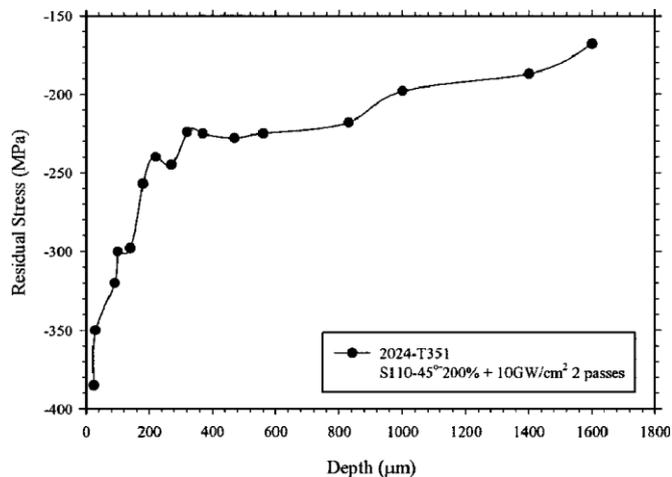


Figura 9: Andamento delle tensioni residue per doppio trattamento (Shot Peening a 4A + Laser Shock Peening a 10 GW/cm<sup>2</sup> e 2 passate) [5]

I test di fatica sono stati effettuati utilizzando una macchina a flessione rotante a 4 punti e a temperatura ambiente. I provini sono stati ricavati dalle lastre di partenza effettuando il taglio in direzione di laminazione utilizzando una macchina di elettroerosione. La forma dei provini è mostrata sotto figura 10.

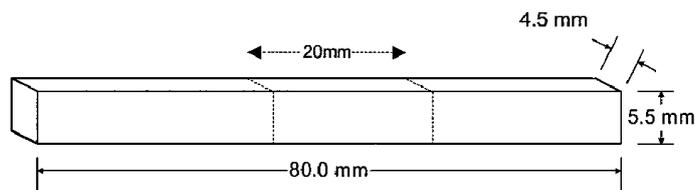


Figura 10: Caratteristiche dei provini utilizzati per i test. L'area delimitata dalle linee tratteggiate rappresenta la zona trattata [5]

Sono stati selezionati sei gruppi di trattamenti e di condizioni superficiali dei provini per poter valutare l'efficacia di Shot Peening e Laser Shock Peening e dell'influenza della finitura superficiale nella vita a fatica. Prima e dopo dei trattamenti, sono state effettuate misurazioni della finitura superficiale, per capire quale influenza hanno Shot Peening e Laser Shock Peening su di essa e se un'eventuale variazione della vita a fatica possa essere correlata con essa.

Roughness Parameters	Mirror Finish (a)	EDM Finish	S110-45°-200%	10GW/cm2 2 Passes	S110-45°-200% + 10 GW/cm2 2 Passes	10 GW/cm2 3 Passes
R <sub>a</sub> , μm	0.278	4.015	4.689	4.020	4.689	4.210
R <sub>t</sub> , μm	3.310	26.565	30.930	27.903	30.930	34.406
S, mm	0.048	0.073	0.122	0.076	0.122	0.088

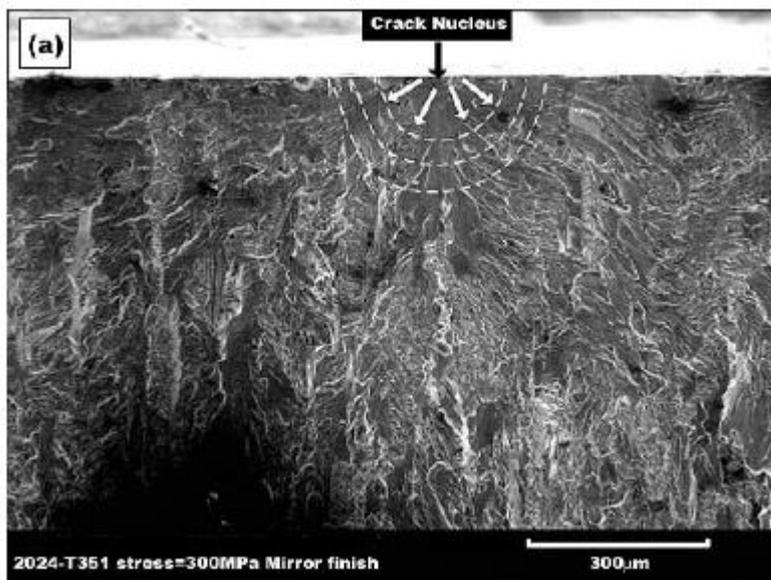
(a) The mirror finish was achieved using a succession of finer grade emery papers and diamond pastes to a ¼ micron size.

Tabella 3: Rugosità superficiale ottenuta dopo l'applicazione dei trattamenti presi in esame [5]

Analizzando i risultati nella tabella 3, il Laser Shock Peening non influisce particolarmente nella finitura superficiale, con l'eccezione del caso delle 3 passate, dove la finitura superficiale peggiora leggermente. Lo Shot Peening ha mostrato invece essere molto influente nella finitura superficiale, con un netto peggioramento dovuto ai segni degli impatti delle sfere sulla superficie.

Entrando nel merito dell'influenza dei trattamenti nella vita a fatica, sia il Laser Shock Peening singolo che il doppio trattamento (Shot Peening+Laser Shock Peening) hanno mostrato un evidente miglioramento della vita a fatica del materiale, indipendentemente dalla finitura superficiale di partenza. Tuttavia il doppio trattamento ha mostrato una prestazione inferiore a quella del singolo Laser Shock Peening, in virtù della minor duttilità residua del materiale. Anche il trattamento di Shot Peening si è rivelato efficace, ma solo se applicato su superficie non lucidata: su superficie lucidata, ha mostrato una modesta influenza sulla vita a fatica, probabilmente dovuto appunto al peggioramento della finitura superficiale dai quali difetti hanno origine le cricche di fatica: si stima che l'incremento delle tensioni residue superficiali indotte da Shot Peening vada a compensare il peggioramento della finitura superficiale, circa nell'ordine di 90-125 MPa di tensione nei primi 50 μm di profondità a fronte di un picco di tensioni residue tra 220 e 300 MPa

L'analisi delle fratture ha mostrato:



Nel provino lucidato a specchio (figura 11(a)) una singola cricca (probabilmente generatasi da una inclusione) che si propaga sulla superficie con forma semicircolare.

Figura 11a: Cricche da fatica nel provino lucidato a specchio [5]

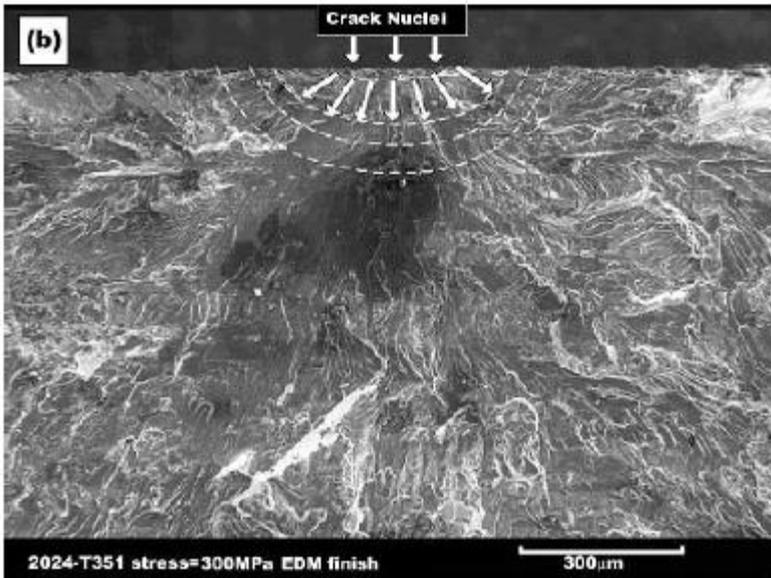


Figura 11b: Cricche da fatica nel provino non trattato e non lucidato [5]

Nel provino non trattato né lucidato (Figura 11(b)), si sono formate multiple cricche a seguito delle sollecitazioni

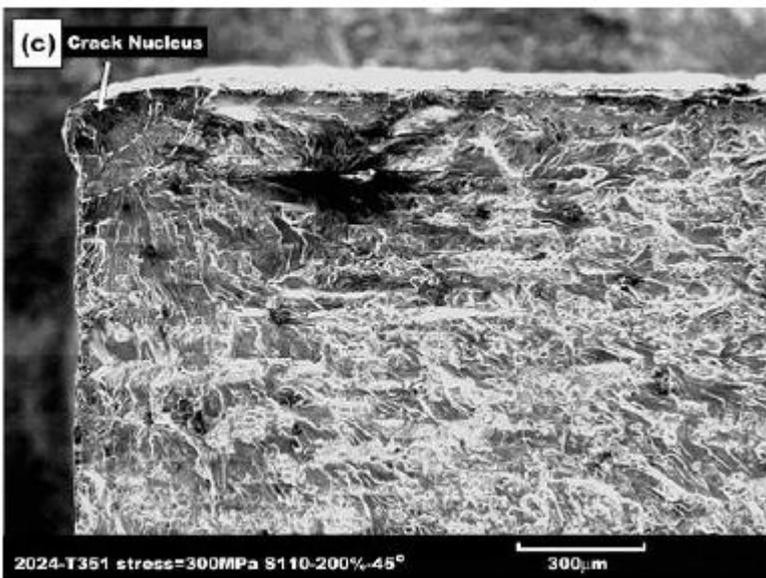


Figura 11c: Cricche da fatica nel provino trattato con Shot Peening a 4A [5]

Nel provino trattato con Shot Peening a 4A, ha mostrato uno sviluppo limitato e sfaccettato della cricca ed una evoluzione come a sfaldamento, che non può essere spiegato dalla rapida evoluzione della cricca d'angolo. Questo, tuttavia va a suffragio della teoria della perdita di duttilità del materiale, dovuta alla densità superficiale molto elevata e irregolare indotta dal trattamento

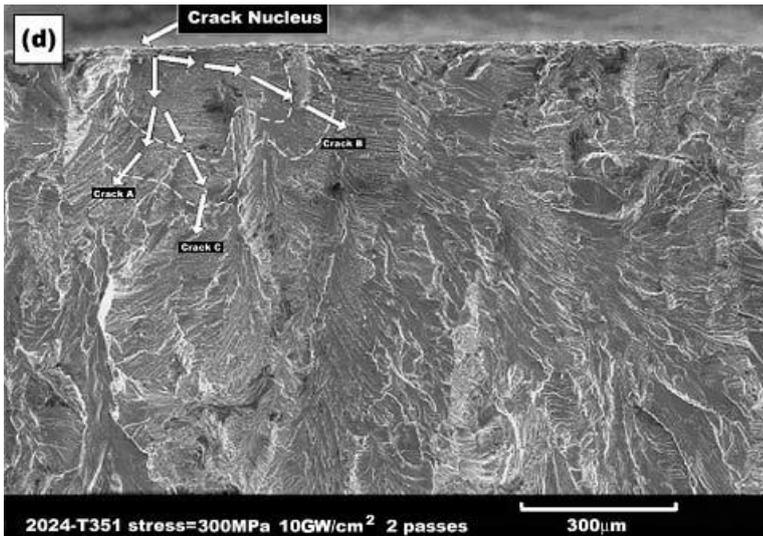


Figura 11d: Cricche da fatica nel provino trattato con Laser Shock Peening [5]

Nel caso di Laser Shock Peening, come mostrato nelle figure 11(d) e 11(e), l'evoluzione della cricca è a carattere ramificato.

Sia nei casi di due e 3 passate, è stato osservato che una cricca si propaga in direzione grossomodo parallela a quella della forza applicata: ciò indica uno sviluppo lento della stessa. Una più approfondita analisi della cricca, ha mostrato che si propaga nei punti di minima tensione residua.

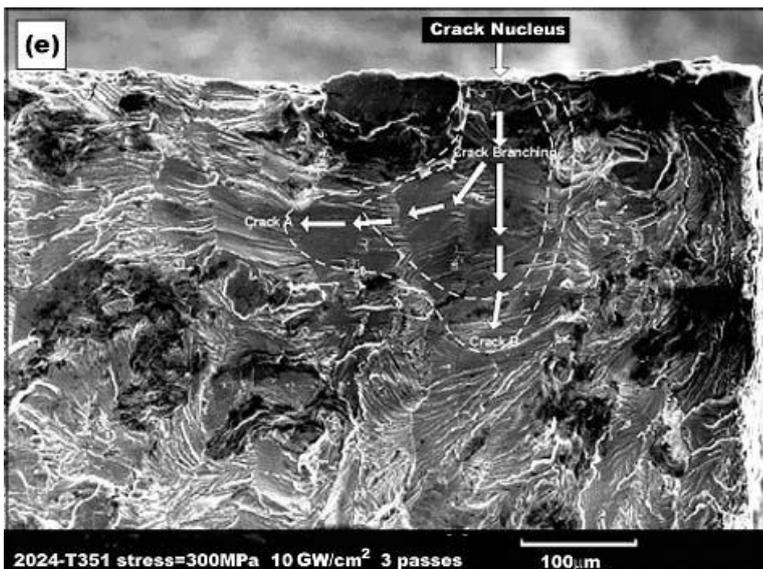
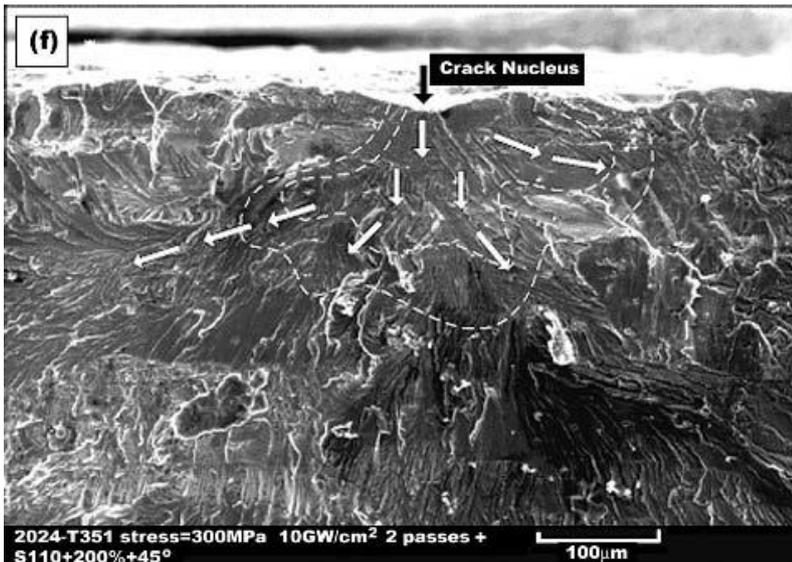


Figura 11e: Cricche da fatica nel provino trattato con 2 passate di Laser Shock Peening [5]

Una seconda ramificazione, perpendicolare alla prima, ha mostrato un evidente sfaccettamento, specialmente nel caso delle due passate di Laser Shock Peening (figura 11e).



Analizzando invece il caso del doppio trattamento, lo sviluppo della cicca è molto simile a quello del semplice Laser Shock Peening. Questo fenomeno è, con ogni probabilità, dovuto al rinvenimento della struttura superficiale del materiale, che quindi va a compensare la perdita di duttilità mostrata con Shot Peening (frattura ramificata ma non sfaldamento)

Figura 11f: Cricche da fatica nel provino trattato prima con Shot Peening e poi tramite Laser Shock Peening [5]

Concludendo, tutti i trattamenti analizzati hanno migliorato i limiti di fatica del materiale. Il Laser Shock Peening ha mostrato un incremento maggiore del limite di fatica rispetto a quello dello Shot Peening (quasi a livello del doppio trattamento) e il doppio trattamento Shot Peening + Laser Shock Peening ha mostrato migliorare notevolmente le tensioni residue indotte e il limite di fatica del materiale, tuttavia vanno scelti bene i parametri dei due trattamenti poiché il processo può portare alla riduzione della duttilità del materiale e quindi del relativo limite di fatica.

## §3.2 Test su leghe di Titanio

### 3.2.1 Confronto tra Deep Rolling e Laser Shock Peening su Ti-Al6-4V

Nel primo test [7] abbiamo una comparazione tra Deep Rolling e Laser Shock Peening, tramite l'utilizzo di provini ricavati da barre di 63.5mm di diametro, tagliate a 400mm, riscaldate a 940°C per 30 minuti e forgiate in piastre di 400x150x20mm da barre con rivestimento di vetro-lubrificante [8]. Queste piastre vengono successivamente trattate in soluzione per 1 ora alla temperatura di 925°C, raffreddate in aria e rinvenute per 2 ore a 700°C. Il risultato è una microstruttura caratterizzata da una distribuzione equiassiale di grani primari- $\alpha$  (64% del volume) e di colonie  $\alpha+\beta$  ( $\beta$ -trasformati). La dimensione dei grani- $\alpha$  disponibili è di circa 20  $\mu\text{m}$ , con un lieve allungamento nella direzione longitudinale della forgiatura; la spaziatura disponibile  $\alpha$ -lath è di circa 1-2 micron (figura 12). Utilizzando l'analisi differenziale termica, la temperatura di  $\beta$ -transizione è stata misurata essere 990-1005°C.

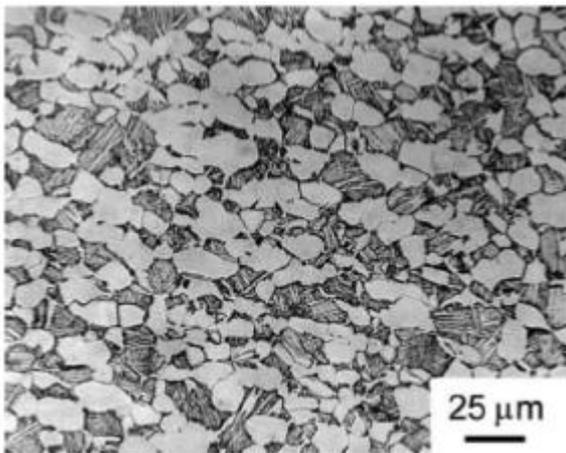


Figura 12: Analisi al microscopio della struttura granulare del Ti-Al6-4V del test [7]

Sono state condotte prove di trazione uniassiale in direzione longitudinale con una velocità di deformazione costante di  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Inoltre sono state effettuate prove di tenacità a frattura piane utilizzando provini precriccati a fatica di 25mm di spessore lavorati alle macchine utensili in direzione L-T.

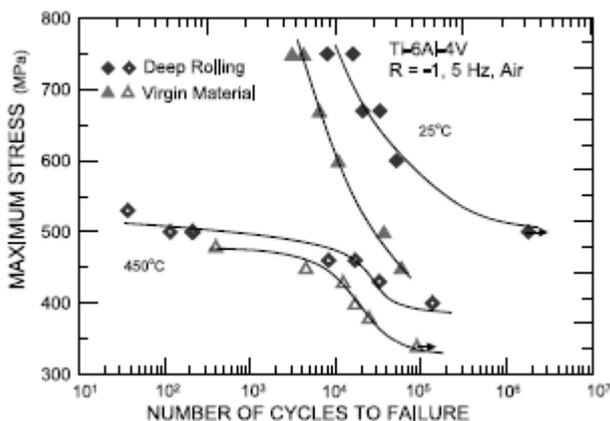


Figura 13: Grafico tensione/numero cicli a rottura per materiale base e trattato con Deep Rolling [7]

Entrando nel merito della prova, viene mostrato in figura 13 il grafico delle tensioni/numero di cicli a rottura (S/N) del comportamento a fatica (a  $R=-1$ ) del materiale Ti-Al6-4V base e rullato alle temperature di 25 e 450 °C. Questo può far notare come il Deep Rolling porti ad un significativo miglioramento nella vita a fatica osservata a temperatura ambiente, in particolare in quella ad alto numero di cicli: infatti a  $\sigma_a = 500 \text{ MPa}$  la

vita è aumentata approssimativamente di due ordini di grandezza. Allo stesso modo a 450°C è ancora evidente l'influenza benefica del Deep Rolling, anche se in misura ridotta: in particolare, in regime di fatica ad alto numero di cicli, la vita utile aumenta approssimativamente di un ordine di grandezza a  $\sigma_a=400$  MPa. Per entrambe le condizioni (Deep Rolling e materiale base), la durata del materiale è significativamente inferiore a 450°C rispetto a quella a 25°C, presumibilmente a causa della minore resistenza allo snervamento alle alte temperature.

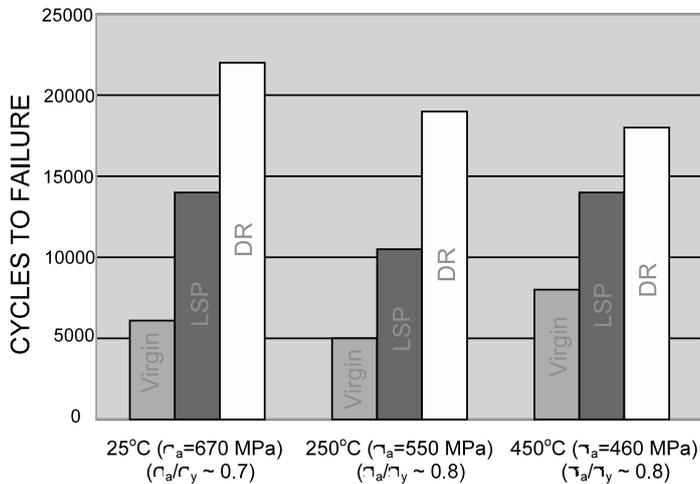


Figura 14: Istogramma del numero di cicli prima della rottura a 25, 250 e 450°C per materiale base, trattato con Laser Shock Peening e trattato con Deep Rolling [7]

Sebbene i maggiori benefici del trattamento sulla superficie si possano notare ad alto numero di cicli, l'effetto, in misura inferiore, è visibile anche in regime di bassi cicli. Questo è mostrato in figura 14 dove vengono confrontati la resistenza a fatica a basso numero di cicli dei provini di materiale base e rullato a 25 e a 450°C e ai quali vengono applicate tensioni di ampiezza vicina a quelle di snervamento, rispettivamente a 670 e 460 MPa, ( $\sigma_a/\sigma_y$  circa 0.7-0.8). Vengono anche mostrate, come termine di paragone, le equivalenti vite a fatica dei provini sottoposti a trattamento di Laser Shock Peening. Come mostrato anche in altri test [9, 10, 11], entrambi i trattamenti meccanici superficiali conferiscono significativi miglioramenti nelle vite a fatica, anche in caso di bassi cicli. In questa prova appare chiaramente che il processo di Deep Rolling sia considerevolmente più efficace rispetto a quello di Laser Shock Peening per i parametri di processo analizzati. Inoltre, si è visto che gli effetti benefici del Deep Rolling e del Laser Shock Peening persistono nel Ti-Al6-4V anche alle alte temperature (temperatura circa del 43% di quella di fusione).

Come i test a 450°C, le prove limite a 250°C ( $\sigma_a=550$  MPa,  $\sigma_a/\sigma_y$  circa 0,8) hanno mostrato una vita a fatica superiore del materiale trattato rispetto al materiale base. In aggiunta, per i parametri di progetto utilizzati, il Deep Rolling è risultato ancora più efficace del Laser Shock Peening nel migliorare la resistenza a fatica.

Analizzando le immagini ricavate al microscopio elettronico delle fessure delle striature di fatica, si può notare come il trattamento superficiale comporti un miglioramento della vita a fatica S/N dovuto dapprima dall'inibizione della formazione di cricche e successivamente rallentando la propagazione della frattura. La figura 15 mostra le striature e il tasso di sviluppo locale della cricca, stimata tramite gli spazi sulla superficie della cricca sul materiale grezzo e rullato, alle temperature di 25 e 450° (ampiezze rispettive di tensione di 750 e 400 MPa). Questi risultati indicano che il Deep Rolling ha una influenza positiva sulla vita a fatica (grazie ai benefici indicati prima) nell'ordine di 2-3 volte, comparato con il corrispondente comportamento nel materiale base.

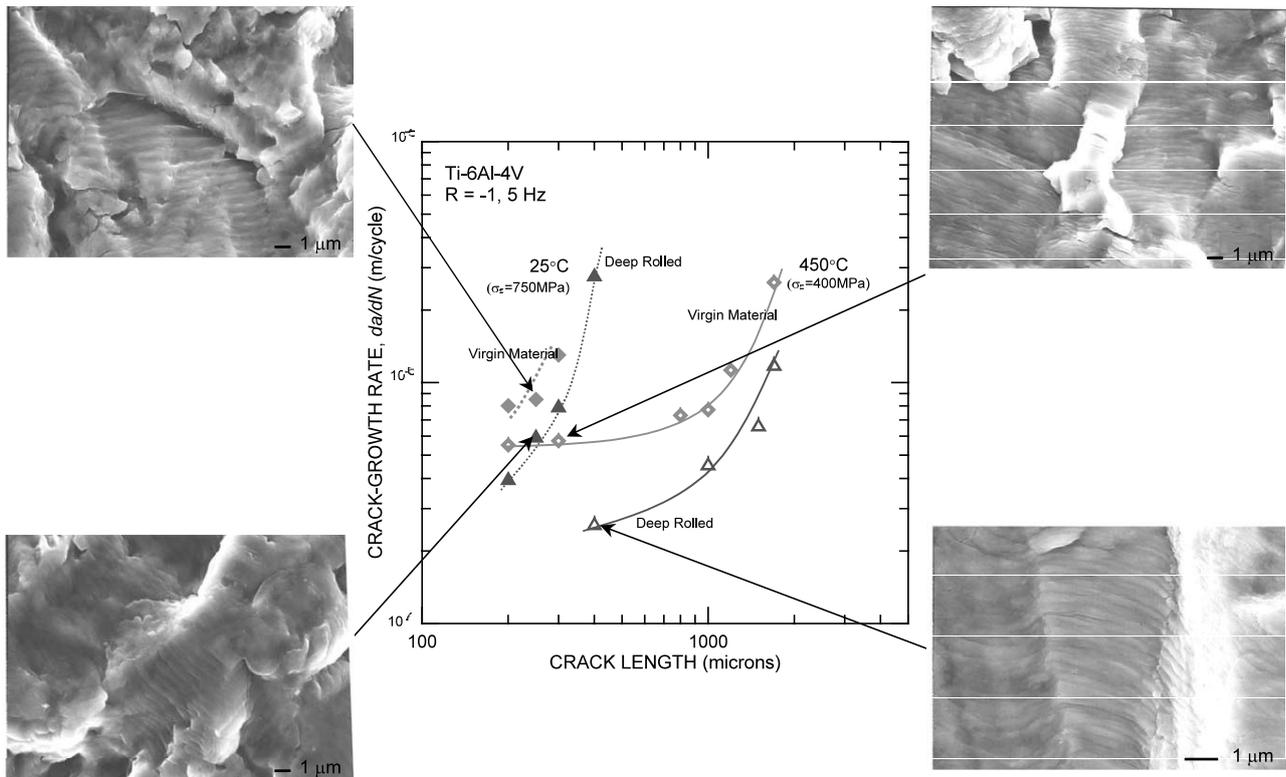


Figura 15: Tasso di sviluppo della cricca a 25°C e a 450°C, stimato attraverso la misura della distanza delle striature sulla superficie nel materiale base e trattato con Deep Rolling. Si può notare come nel materiale trattato con Deep Rolling si abbia un tasso di sviluppo iniziale della cricca minore rispetto a quello del materiale base [7]

Ancora, si può notare che questo effetto benefico del trattamento meccanico superficiale non sia solo presente a temperatura ambiente, ma anche alla temperatura analizzata di 450°.

#### Ampiezza della deformazione plastica

L'ampiezza della deformazione plastica, misurata durante i test S/N, può essere considerata come una affidabile misura dell'estensione del "danno" durante la vita a fatica dei materiali duttili [12].

Nella figura 16 (a), l'ampiezza della deformazione plastica, viene mostrata come funzione del numero di cicli applicati durante i test del materiale base, rullato e trattato con Laser Shock Peening alla temperatura di 450°C ( $\sigma_a = 460$  MPa,  $R = -1$ ). Per tutte e tre le condizioni del materiale è stato osservato un iniziale incremento (a bassi cicli) e conseguente decremento (ad alti cicli) dell'ampiezza della deformazione plastica. Comparato con il materiale base, in quello rullato viene osservata una minore ampiezza della deformazione plastica durante la maggior parte della vita del provino.

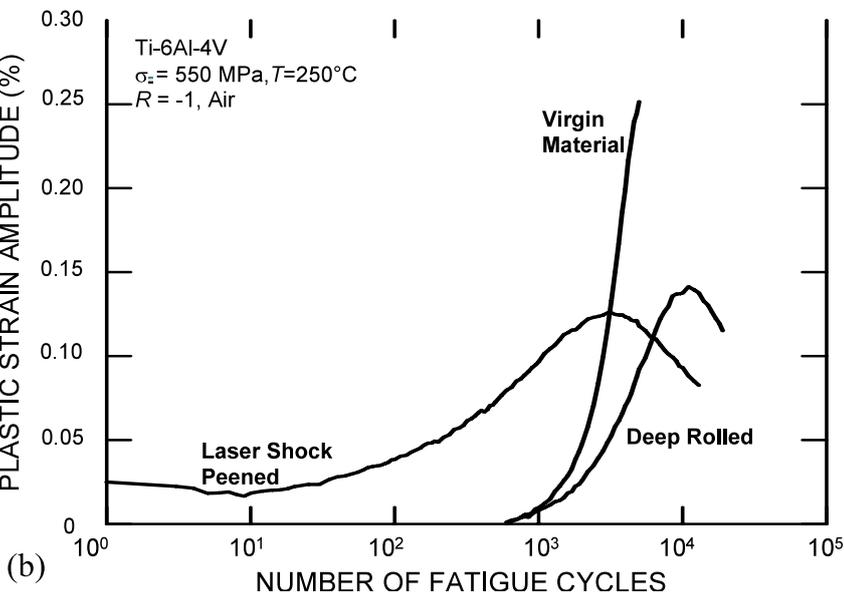
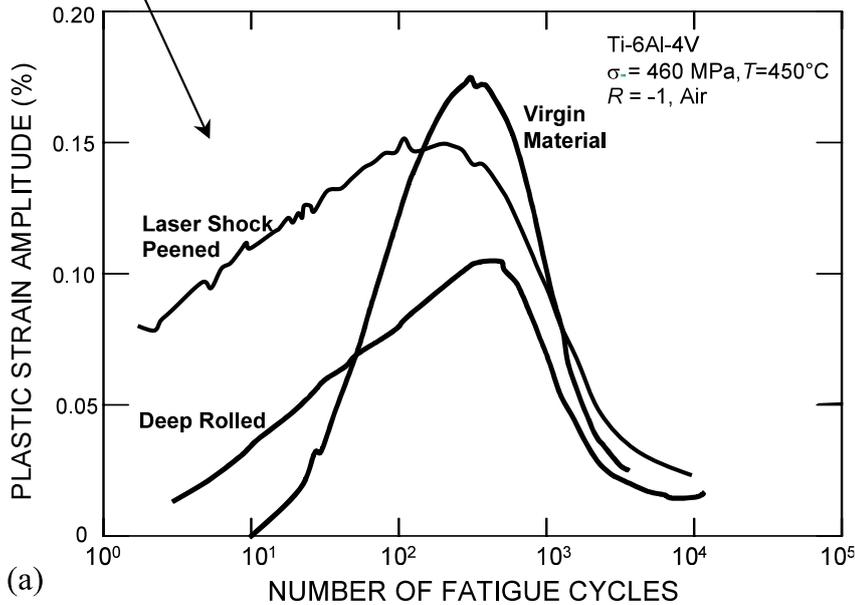
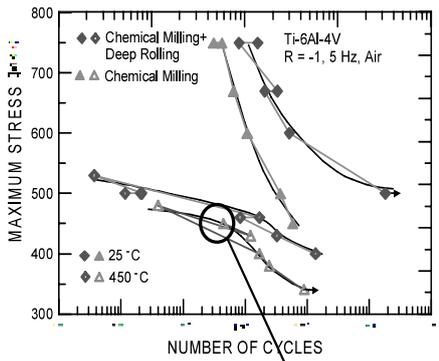


Figura 16: (a) Ampiezza della deformazione plastica per il materiale base, trattato con Deep Rolling, trattato con Laser Shock Peening misurata durante fatica ciclica a 450°C ( $\sigma_a=460$  MPa,  $R=-1$ , 5Hz) (b) Ampiezza della deformazione plastica per il materiale base, trattato con Deep Rolling, trattato con Laser Shock Peening misurata durante fatica ciclica a 250°C ( $\sigma_a=550$  MPa,  $R=-1$ , 5Hz) [7]

Questo effetto è visibile anche nel Laser Shock Peening, sebbene il fenomeno risulti alquanto ridotto. La figura 16a mostra anche la presenza di una iniziale periodo di “incubazione” quasi-elastico, precedente all’addolcimento ciclico nel materiale non trattato; questa fase di incubazione non è presente nei provini

trattati con Deep Rolling, dove l'addolcimento ciclico è presente fin dai primissimi cicli. La ragione di questa differenza di comportamento può essere imputata all'elevata densità delle dislocazioni nei negli strati superficiali del materiale trattato con Deep Rolling [13]. A temperatura ambiente ( $\sigma_a=670$  MPa,  $R=-1$ ), i provini non trattati e quelli trattati con Laser Shock Peening non hanno mostrato deformazioni plastiche rilevabili: cioè le ampiezze erano inferiori alla sensibilità dello 0,001% dell'estensimetro utilizzato. Anche i provini trattati con Deep Rolling hanno mostrato un comportamento simile, ad eccezione degli istanti prima del momento di formazione della cricca, dove è stata misurata una deformazione dello 0.01%. Misurazioni simili sono state effettuate anche a 250°C ( $\sigma_a=550$  MPa,  $R=-1$ ) e sono mostrate in figura 16b. A questa temperatura, il materiale non trattato mostra addolcimento ciclico durante l'intera vita, mentre in entrambe le condizioni di superfici trattate inizialmente, dapprima presentano addolcimento ciclico e successivamente un indurimento ciclico fino alla rottura.

### Rugosità superficiale e durezza

Sono state svolte misure della rugosità superficiale prima e dopo i trattamenti. Mentre Il Laser Shock Peening non ha manifestato alcuna alterazione significativa della morfologia superficiale, il Deep Rolling ha mostrato una importante riduzione della rugosità superficiale  $R_z$  (più del 50%). In particolare, raffrontato con la rugosità del materiale base di  $R_z=1.7\mu\text{m}$ , la rugosità dei provini trattati con Deep Rolling è risultata essere di  $0.8\mu\text{m}$ . Ciò va in direzione opposta allo Shot Peening, il quale tendenzialmente aumenta la rugosità superficiale del materiale [14]. Una superficie tanto liscia derivata dal Deep Rolling può portare ad un significativo miglioramento nella resistenza alla formazione di cricche e quindi sicuramente contribuisce ad un miglioramento della vita a fatica del componente.

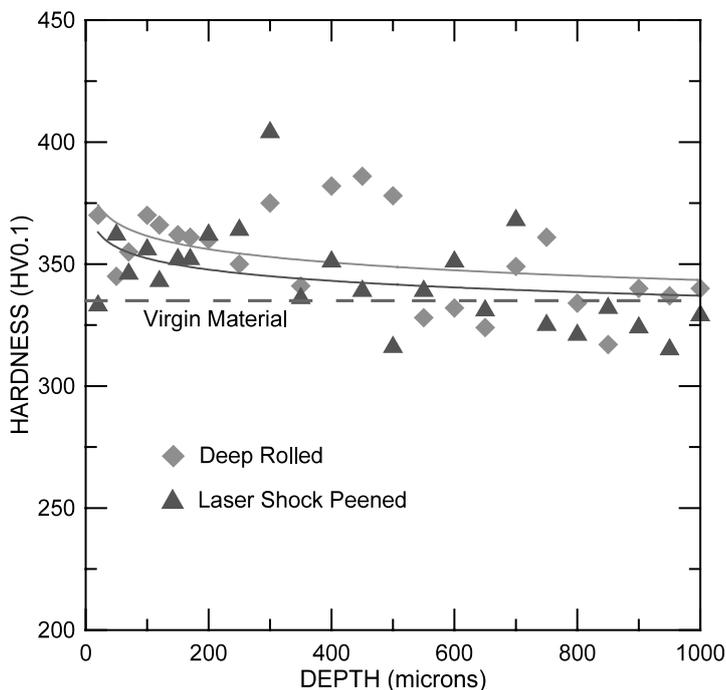


Figura 17: Grafico della durezza in funzione della distanza dalla superficie per materiale trattato con Deep Rolling e con Laser Shock Peening [7]

Per quanto concerne la durezza superficiale, presa perpendicolarmente alla microstruttura sia del materiale base che di quello trattato tramite Laser Shock Peening e Deep Rolling, rivela l'esistenza di uno strato incrudito nei provini trattati: la figura 17, mostrando l'andamento durezza in prossimità della superficie al

variare della profondità, comparata con una durezza Vickers di 300 VPN del materiale base, le strutture dei provini trattati tramite Deep Rolling e tramite Laser Shock Peening hanno mostrato un miglioramento della durezza superficiale di più del 10%. In particolare le microstrutture dei provini trattati (figura 18A), se comparate tramite l'analisi TEM con quelle del materiale base (figura 18b), hanno mostrato possedere una più elevata densità delle dislocazioni (nell'ordine di  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ), le quali contribuiscono all'aumento della durezza degli strati superficiali.

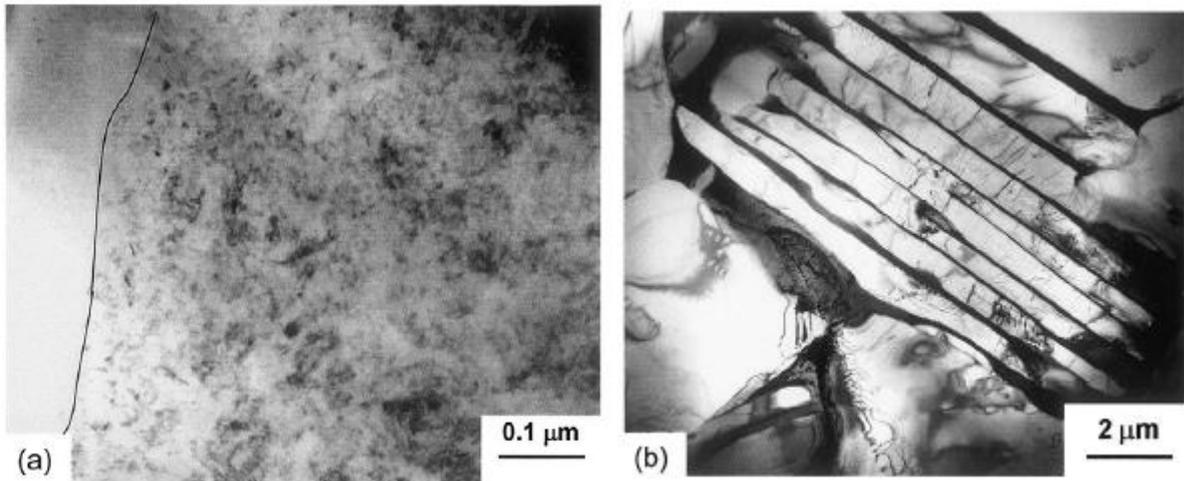


Figura 18: Analisi TEM della microstruttura superficiale Ti-Al6-4V base (b) e trattato con Deep Rolling (a) [7]

Sono state effettuate inoltre analisi ai raggi X per poter valutare l'ampiezza delle tensioni residue indotte e l'estensione dell'incrudimento indotto dai trattamenti negli strati superficiali prima dell'esposizione ai cicli di fatica. È stato osservato che entrambi i trattamenti hanno indotto significative tensioni superficiali sia sulla superficie dei provini che nelle zone in prossimità di essa. La figura 19 mostra l'andamento delle tensioni residue in funzione della profondità.

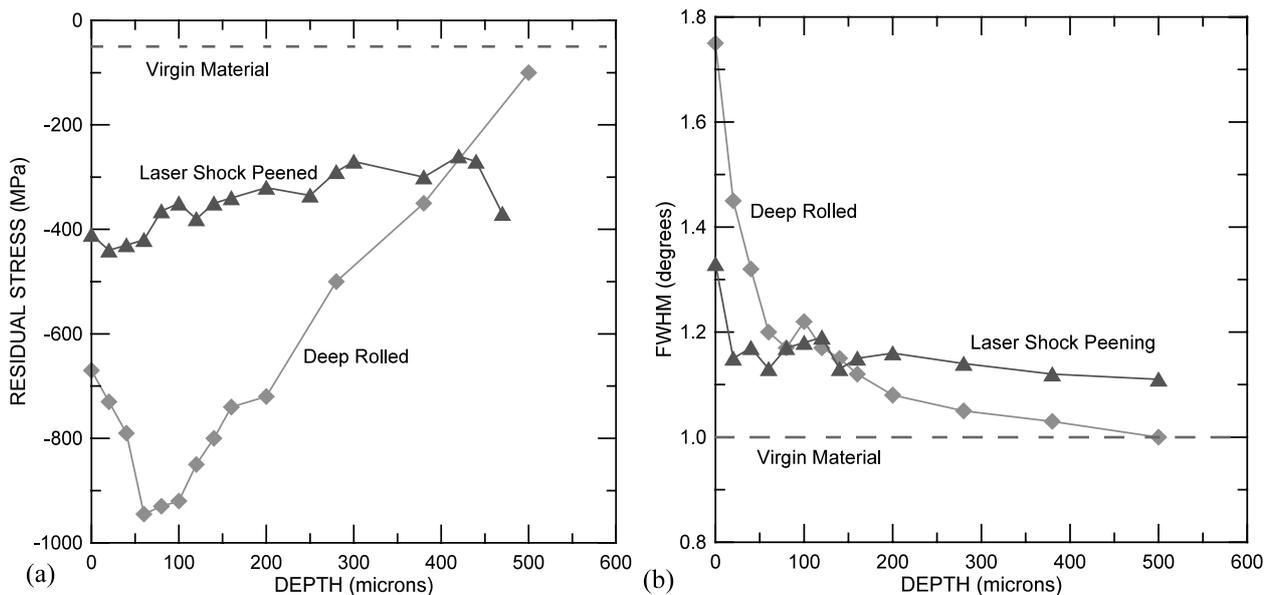


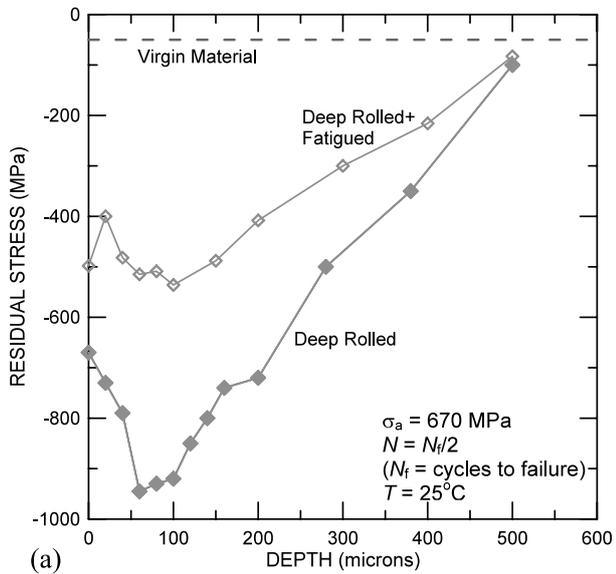
Figura 19: Andamento delle tensioni residue (a) e del FWHM (b) nel materiale base, trattato con Deep Rolling e trattato con Laser Shock peening [7]

È evidente che dopo Deep Rolling, il picco di tensione residua (930MPa) è subito al di sotto della superficie; queste tensioni residue di compressione decadono a livelli del materiale non trattato circa al di sotto dei 500  $\mu\text{m}$  di profondità. Le tensioni residue di compressione indotte dopo il Laser Shock Peening sono considerevolmente inferiori, con un valore massimo di circa 450MPa subito al di sotto della superficie. Tuttavia, la profondità efficace dei provini trattati con Laser Shock Peening (profondità nella quale vengono registrati valori di tensioni residue di compressione) è risultata essere maggiore rispetto a quella dei provini trattati con Deep Rolling e ha mostrato un decadimento più regolare con il passare dei cicli.

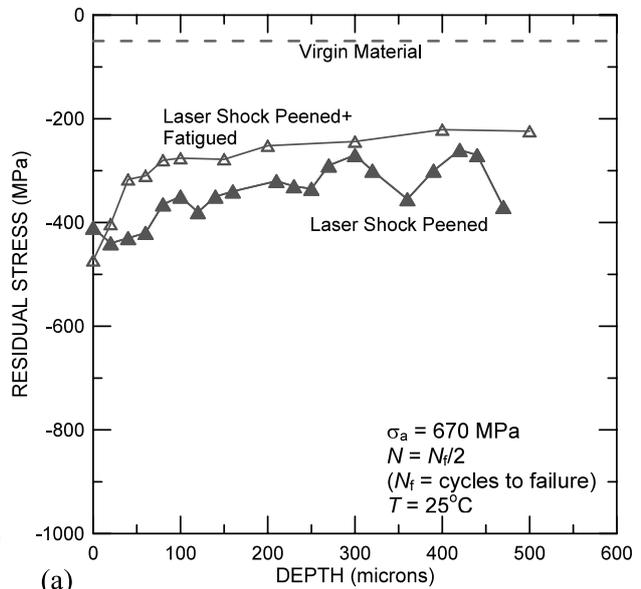
Il corrispondente andamento dei valori FWHM, che misurano il livello di incrudimento [15, 16] sono tabulati in figura 19b in funzione della profondità. Dall'analisi è risultato che il materiale trattato con Deep Rolling, presentando un incrudimento superficiale superiore rispetto a quello trattato con Laser Shock Peening, ha mostrato un marcato decadimento, circa ai livelli del materiale base. In particolare, queste misure indicano, per il Laser Shock Peening, sì un picco di tensioni residue inferiore a quello ottenuto con Deep Rolling, ma la profondità efficace di circa 500 $\mu\text{m}$  con un andamento lineare delle stesse tensioni, sono il motivo della maggior stabilità delle tensioni residue.

Il livello delle tensioni residue misurate dopo Deep Rolling sul materiale, risulta essere a livello di quello ottenuto dopo Shot Peening. L'analisi TEM della microstruttura in prossimità della superficie nel materiale trattato con Deep Rolling è mostrata in figura 18a: si può notare come il Deep Rolling favorisca una complessa disposizione delle dislocazioni, inoltre si vengono a formare i primi stadi di una struttura tipica dei primi stadi di una nanocristallizzazione indotta meccanicamente, generata dalla forte deformazione plastica [17, 18, 19].

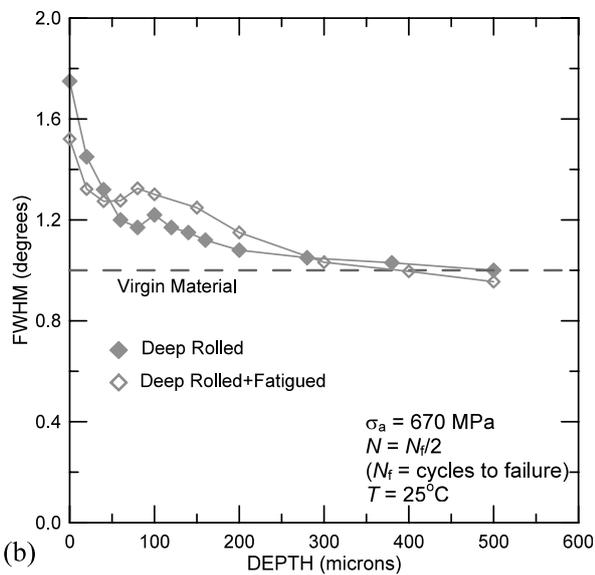
Fatica ciclica a temperatura ambiente



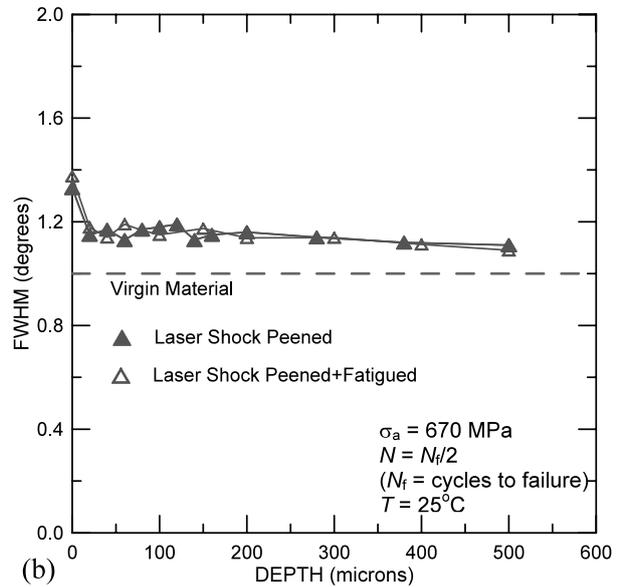
(a)



(a)



(b)



(b)

Figura 20: Andamento delle tensioni residue e dell'FWHM nel materiale base e trattato con Deep Rolling, in funzione della profondità, a 25°C [7]

Figura 21: Andamento delle tensioni residue e dell'FWHM nel materiale base e trattato con Laser Shock Peening, in funzione della profondità, a 25°C [7]

Nella figure 20 e 21, sono mostrati gli andamenti delle tensioni residue e dell'FWHM in funzione della profondità a temperatura ambiente. Come si può ben notare, si ha un importante miglioramento della vita a fatica del Ti-Al6-4V dopo i trattamenti, questo anche in funzione delle tensioni residue superficiali impartite dai trattamenti al materiale, le quali mitigano la tensione al quale è sottoposto il provino durante la vita a

fatica. In figura si può notare come si il Deep Rolling ottenga un picco di tensioni residue maggiore rispetto a quello del Laser Shock Peening, tuttavia l'inferiore efficacia in profondità comporti un precoce rilascio delle tensioni residue compressive indotte dal trattamento, con conseguente decadimento delle prestazioni (a metà della vita utile, il picco di tensioni residue è il 30% di quello che mostrava il materiale prima delle prove). Questo fenomeno è meno marcato nel Laser Shock Peening, in virtù della sua maggior efficacia in profondità. Al contrario la distribuzione dell'FWHM sia per Deep Rolling che per Laser Shock Peening, come mostrato in figura, è molto più regolare: ciò indica che la presenza di uno strato incrudito e la conseguente densità di dislocazioni, appaiono inalterate dall'esposizione a fatica del provino. In generale, sia i livelli di tensioni residue che di FWHM, rimangono comunque più elevati nel Deep Rolling rispetto al Laser Shock Peening, nonostante il maggior decadimento e ciò spiega la maggior durata della vita del provino trattato con Deep Rolling rispetto a quello trattato con Laser Shock Peening.

Analizzando il comportamento a fatica dei provini a 450°C, si sono ottenuti i seguenti risultati:

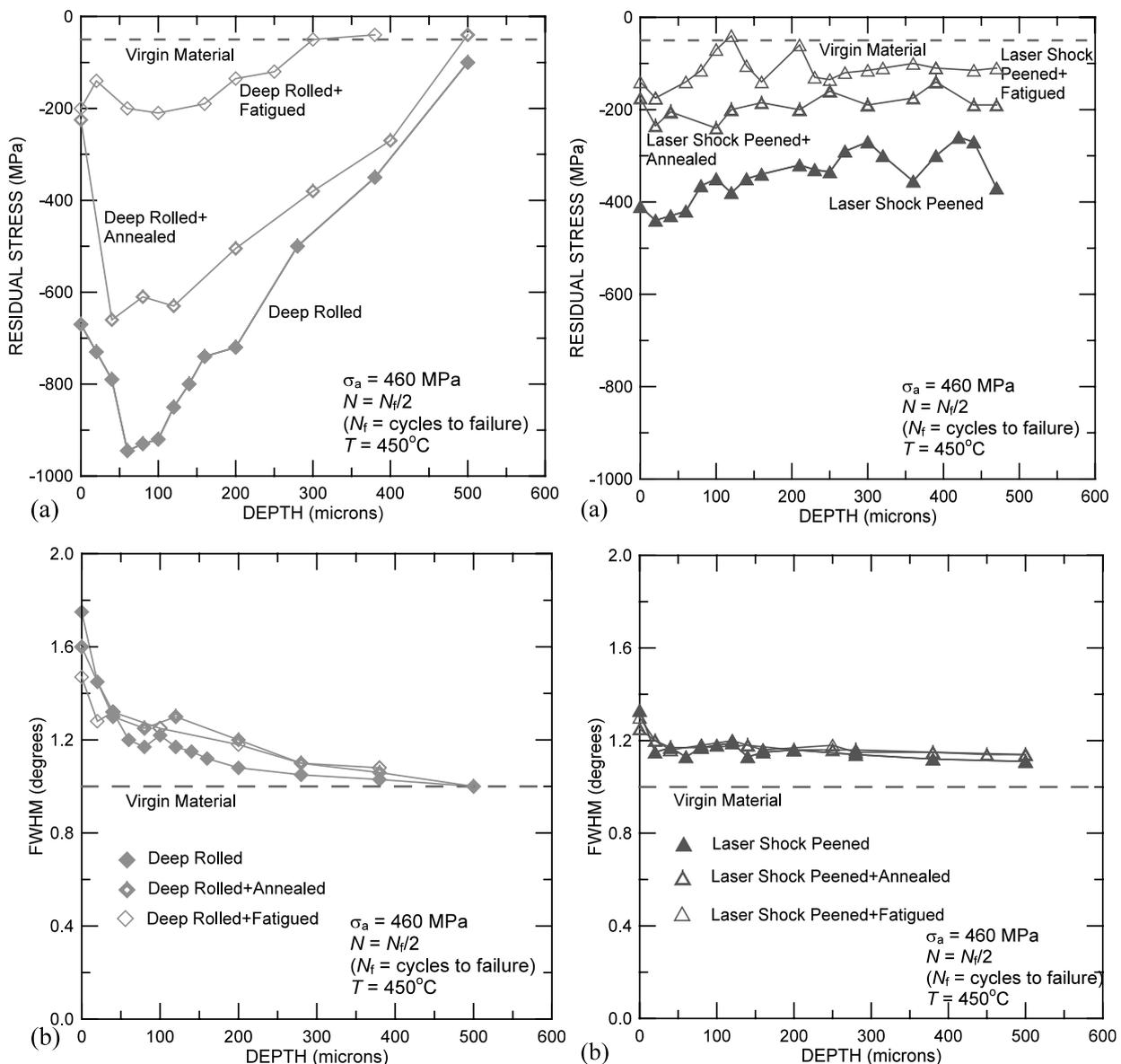


Figura 22: Andamento delle tensioni residue e dell'FWHM in funzione della profondità a 450°C [7]

Dai grafici delle prove, con fatica svolta a 450°C ( $\sigma_a=460\text{MPa}$ ) per metà della vita utile, e poi soggetti a ricottura a 450° per 45 minuti (approssimativamente la durata del test di fatica), si evince come la temperatura influenzi le tensioni in prossimità della superficie, riducendole, che unite alla fatica ciclica alla quale è stato sottoposto il provino, ne ha determinato il relativo annullamento. Questo effetto è ancora più marcato nel Deep Rolling, in virtù della maggior superficialità del trattamento: dopo l'esposizione a 450°C, il picco di tensioni residue è risultato essere di 200MPa, circa 2 - 3.5 volte minore rispetto a quello ottenuto in partenza. Comparando i valori dell'FWHM per Deep Rolling e Laser Shock Peening dopo l'esposizione a 450°C, non cambiano sia che il materiale sia stato sottoposto a fatica durante l'esposizione sia che non sia stato soggetto a fatica e ciò dimostra che l'incrudimento superficiale è abbastanza stabile a questa temperatura. Pertanto, visto l'effetto benefico dei trattamenti presi in esame sulla vita a fatica dei componenti, risulta importante ottenere picchi di tensioni residue elevati, essendo le strutture sufficientemente stabili con la temperatura e la fatica, cosicché un eventuale e fisiologico rilassamento delle tensioni comporti comunque livelli sufficienti di tensioni residue compressive. In questa ottica si è mostrato più efficace il Deep Rolling, nonostante la maggiore superficialità ed il relativo decadimento con temperatura e fatica, poiché il picco di tensioni residue è risultato essere molto maggiore rispetto a quello del Laser Shock Peening.

### 3.2.2 Confronto tra Shot Peening e Laser Shock Peening su Ti-Al6-4V

Nella seconda prova [20] vengono analizzate l'influenza dell'Shot Peening e del Laser Shock Peening nel fretting fatigue, sempre nel Ti-Al6-4V. I provini sono stati ricavati da una singola piastra di laminato, ricotto (AMS 4911H, MIL-T.9046J, Grado 5). La piastra di partenza era di 1524mm di lunghezza (L) per 914mm di larghezza (LT) e 18.2mm di spessore (ST). La piastra poi è stata laminata a caldo, ricotta a 788°C per 1 ora e raffreddata in forno. La microstruttura che presenta dopo questi trattamenti è di grani equiassiali nelle 3 direzioni principali, con una dimensione dei grani di approssimativamente 15µm. La composizione chimica e le proprietà meccaniche rilevate vengono mostrate in tabella 1 e 2.

Il provino ha forma di "osso di cane" adattato da ASTM E466-96 [21] (figura 24)

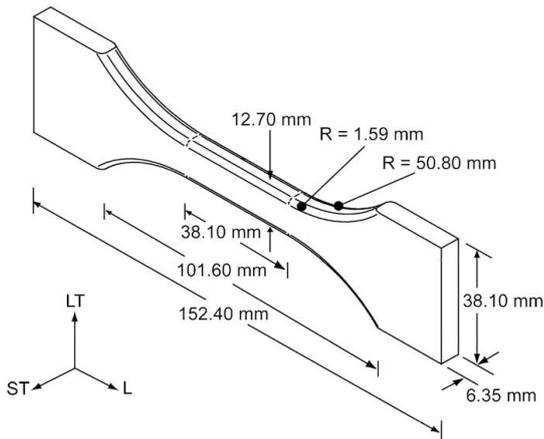


Figura 24: Geometria del provino impiegato e orientamento della direzione di sfregamento [20]

La misura della sezione è stata dettata dalla capacità di carico del macchinario e il provino è stato modellato con un generoso raggio di raccordo per minimizzare la concentrazione delle tensioni e prevenire rotture non indotte dallo sfregamento all'esterno della sezione. L'analisi delle tensioni agli elementi finiti del provino sollecitato, mostra un fattore di concentrazione delle tensioni  $K_t=1.07$ , che risulta adeguato in relazione alla prevista riduzione del 50-70% tra la pura resistenza a fatica (condizionata dalla concentrazione degli sforzi al raggio) e la resistenza a fatica da fretting (nella parte centrale del provino).

I trattamenti meccanici superficiali di Shot Peening ed Laser Shock Peening sono stati svolti in collaborazione con la Metal Improvement Company (MIC). Lo Shot Peening è stato applicato per AMS-S-13165NC, utilizzando pallini di acciaio di dimensione 110 con un range di durezza tra 55 e 62 HRC con una copertura del 200% per una intensità 8 Almen disponibile sull'intera sezione del provino (fig. A). Il Laser Shock Peening è stato applicato utilizzando una potenza di radiazione di 10GW/cm<sup>2</sup>, con una durata di pulsazione di 18ns e uno spot di 3mm.

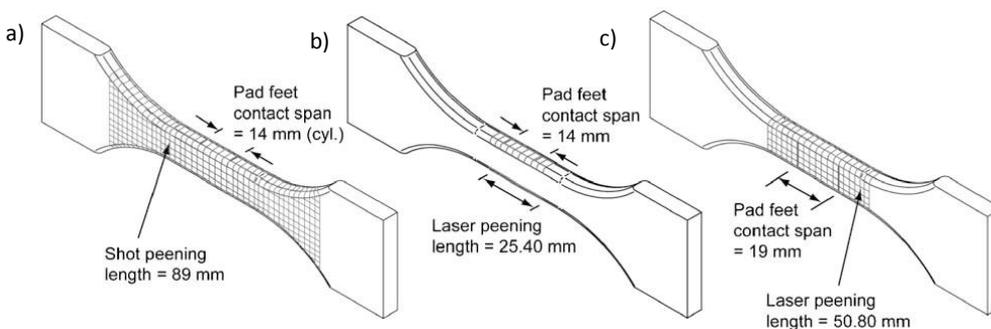


Figura 25: Zone trattate con: (a) Shot Peening (b) Laser Shock Peening 1 (c) Laser Shock Peening 2 [20]

Sono stati applicati due strati di trattamento di Laser Shock Peening sulla sezione del provino nella regione di contatto (contrassegnata come regione 1 nella figura 25(b)), con il secondo strato applicato fisicamente con uno sfalsamento del 50% rispetto alle impronte del primo strato (indicata come regione 2 in figura 25c).

Per poter quantificare le tensioni residue, il trattamento superficiale è stato applicato ad un'area a forma di parallelepipedo di 50.8mm di lunghezza per 44.5mm di larghezza e uno spessore di 12.7mm, ricavata dalla stessa piastra. Il profilo monodimensionale delle tensioni residue dalla superficie pallinata è stato misurato (verso l'interno del provino) tramite "slitting method" (noto anche come "crack compliance method" [22]).

È stato posto anche un estensimetro (0.79 mm di lunghezza) al centro della faccia non trattata (opposta dunque a quella pallinata). Il centro del provino è stato scavato in direzione L utilizzando una macchina di elettroerosione dotata di filo di ottone da 0.1mm e, ad ogni rimozione del materiale, è stata misurata la tensione residua. I dati così ottenuti, sono stati utilizzati per determinare la distribuzione iniziale delle tensioni in funzione della profondità applicando il metodo inverso [22, 23].

### Risultati del test

I profili monodimensionali delle tensioni residue indotte da Shot Peening e Laser Shock Peening sono mostrati in figura 26.

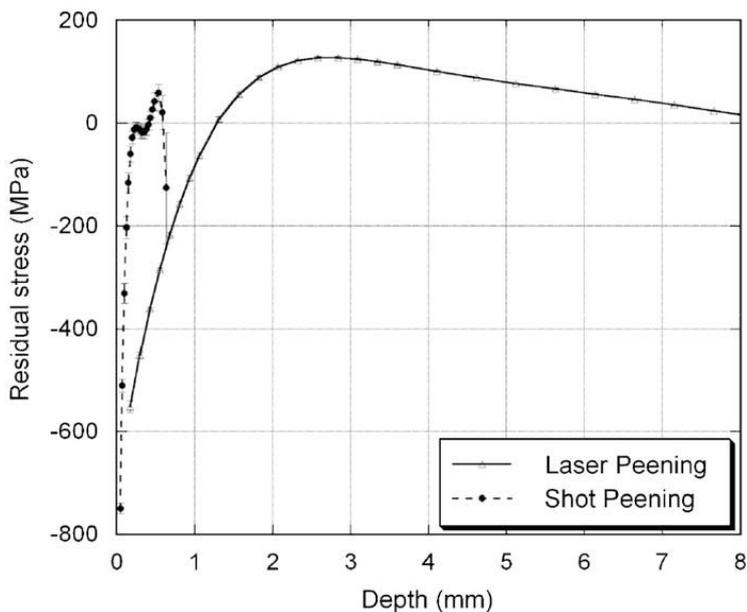


Figura 26: Andamento monodimensionale delle tensioni in funzione della profondità con Shot Peening e Laser Shock Peening [20]

Lo Shot Peening ha generato un picco di tensioni residue compressive di 750 MPa a 0.05mm dalla superficie mentre il Laser Shock Peening ha generato un picco di tensione residua di compressione di 552 MPa a 0.17 mm dalla superficie. Nonostante la differenza iniziale nelle profondità dei due trattamenti, l'andamento delle tensioni residue al di sotto della superficie del provino, è simile. La profondità efficace per il Laser Shock Peening è di 1.3mm e il picco di tensioni (non compressive) è a 2.8 mm dalla superficie, valori distanti da quelli dello Shot Peening (rispettivamente 0.4 e 0.5 mm).

Le tensioni residue indotte dal Laser Shock Peening lungo la direzione del carico di sfregamento, è mostrata nella mappa bidimensionale (figura 27a).

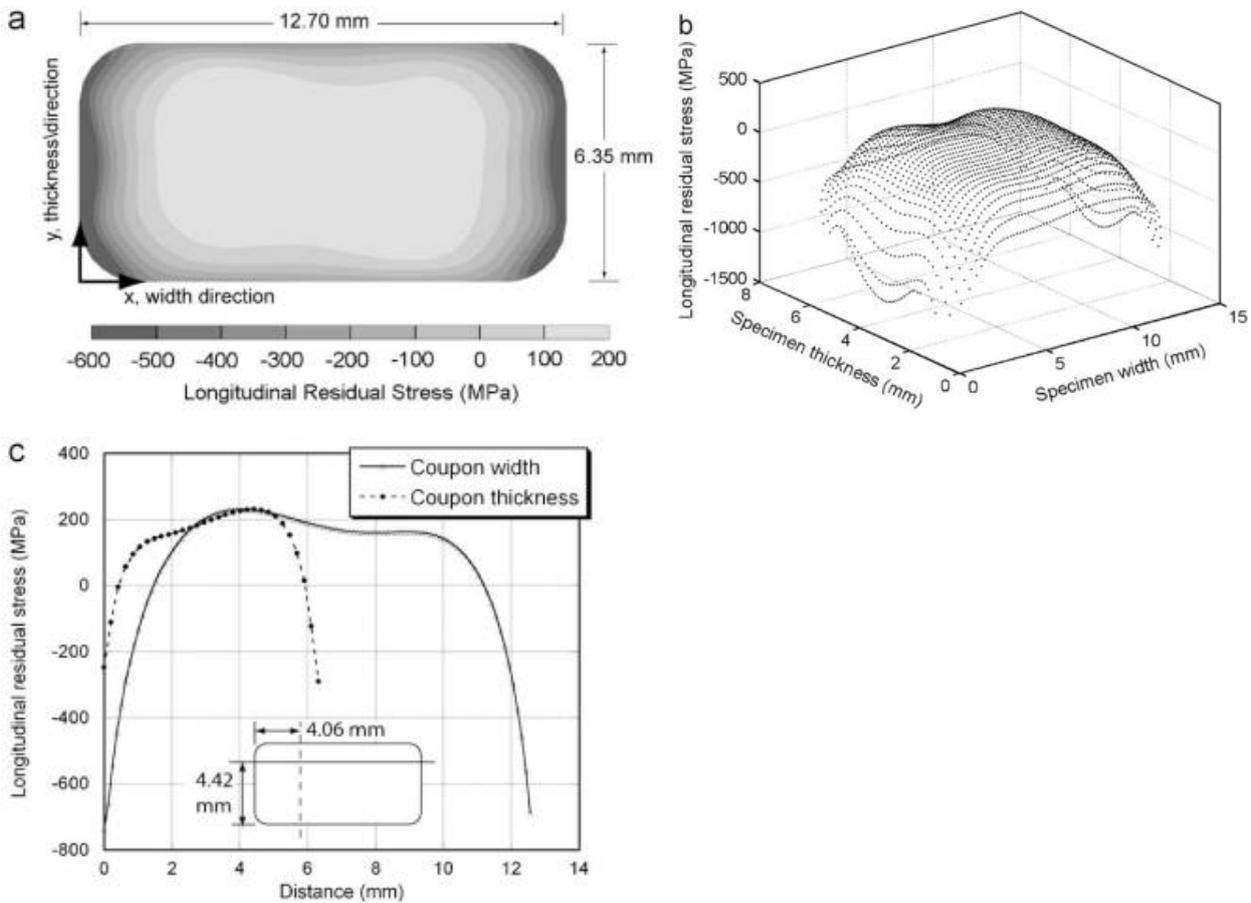


Figura 27 [20]:

(a) Grafico bidimensionale per l'andamento delle tensioni residue nella direzione del carico indotte da Laser Shock Peening

(b) Grafico tridimensionale delle tensioni residue in funzione di spessore e larghezza

(c) Grafico delle tensioni residue nel punto di massimo (spessore 4.06 e larghezza 4.42)

Il grafico mostra uno strato di tensioni residue di compressione attorno alla circonferenza, con un livello maggiore nei lati del provino, e una tensione compensatoria sotto la superficie generata dall'equilibrio delle tensioni stesse.

Il grafico tridimensionale delle tensioni residue ne mostra quantitativamente la distribuzione in funzione della posizione nella sezione trasversale (figura 27b)

Il picco (230 MPa) è risultato essere a  $(x,y)=(4.06, 4.42\text{mm})$ , relativa agli assi della figura a o approssimativamente al 32% della larghezza del provino ed al 70% della sua profondità.

Il grafico sottostante, mostra l'andamento delle tensioni residue in funzione dello spessore di 4.06 (linea tratteggiata) e larghezza 4.42 (linea continua) con il fine di mostrarne ancora meglio la distribuzione (figura 27c) e mostrare che il picco è situato all'incontro di queste due coordinate.

## Risultati vita a fatica

I dati S-N per ciascuna condizione di prova sono mostrati nella figura 28:

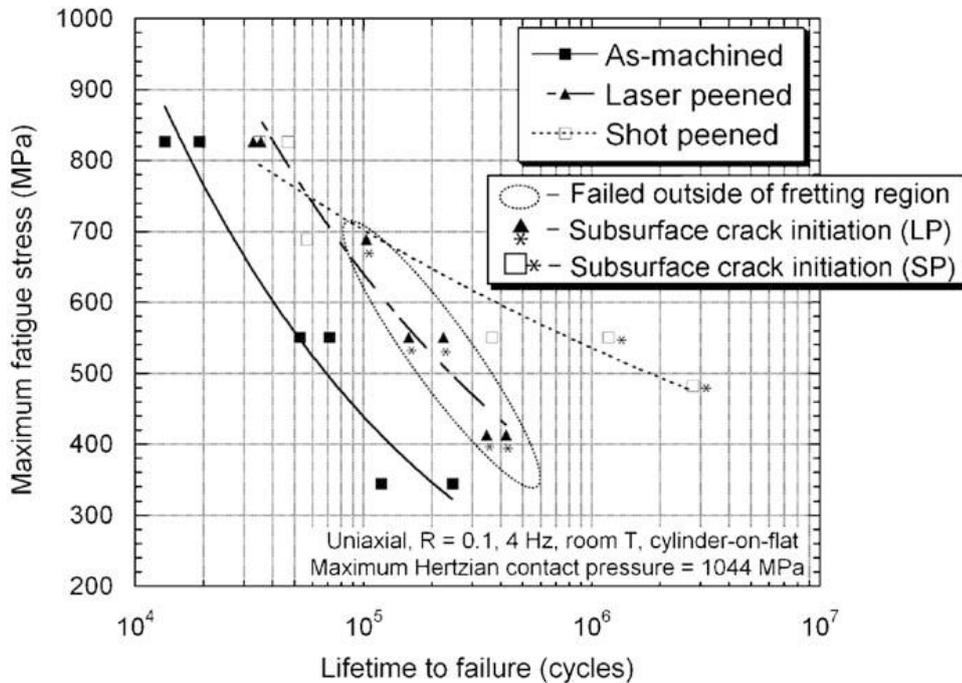


Figura 28: Grafico tensione-numero di cicli per materiale base, trattato con Shot peening e trattato con Laser Shock Peening [20]

Sia lo Shot Peening che il Laser Shock Peening hanno mostrato generare un significativo miglioramento della vita a fatica per ciascun livello di sforzo. Alla tensione maggiore (827 MPa), Shot Peening e Laser Shock Peening hanno mostrato una simile resistenza a fatica con LIF di rispettivamente 2.53 e 2.13. Al livello di sforzo più basso (550 MPa), lo Shot Peening ha mostrato un LIF di 10.8, mentre il LIF per l' Laser Shock Peening è risultato essere 3.1. Interpolando i dati dagli andamenti mostrati, lo Shot Peening ha mostrato un maggior incremento della resistenza a fatica rispetto al Laser Shock Peening in particolare nella zona a basso sforzo ed elevati cicli (figura 28). A 50000 cicli, la resistenza a fatica di Laser Shock Peening e Shot Peening sono simili, con un incremento di prestazione rispetto al materiale base del 40%. A 200000 cicli, la resistenza rispetto al materiale base aumenta dell'85% per lo Shot Peening e del 52 per il Laser Shock Peening.

Analizzando la rugosità superficiale del materiale base, quello trattato con Shot Peening e quello trattato con Laser Shock Peening si possono notare differenze, come anche nelle altre prove, lo Shot Peening (figura 29b) mostra una rugosità superficiale abbastanza elevata (1.4  $\mu\text{m}$ ) se comparata a quella del materiale base (figura 29a) (0.04  $\mu\text{m}$ ) e anche a quella del Laser Shock Peening (figura c) (0.2  $\mu\text{m}$ ), il quale tuttavia presenta delle ondulazioni dovute all'impronta del laser.

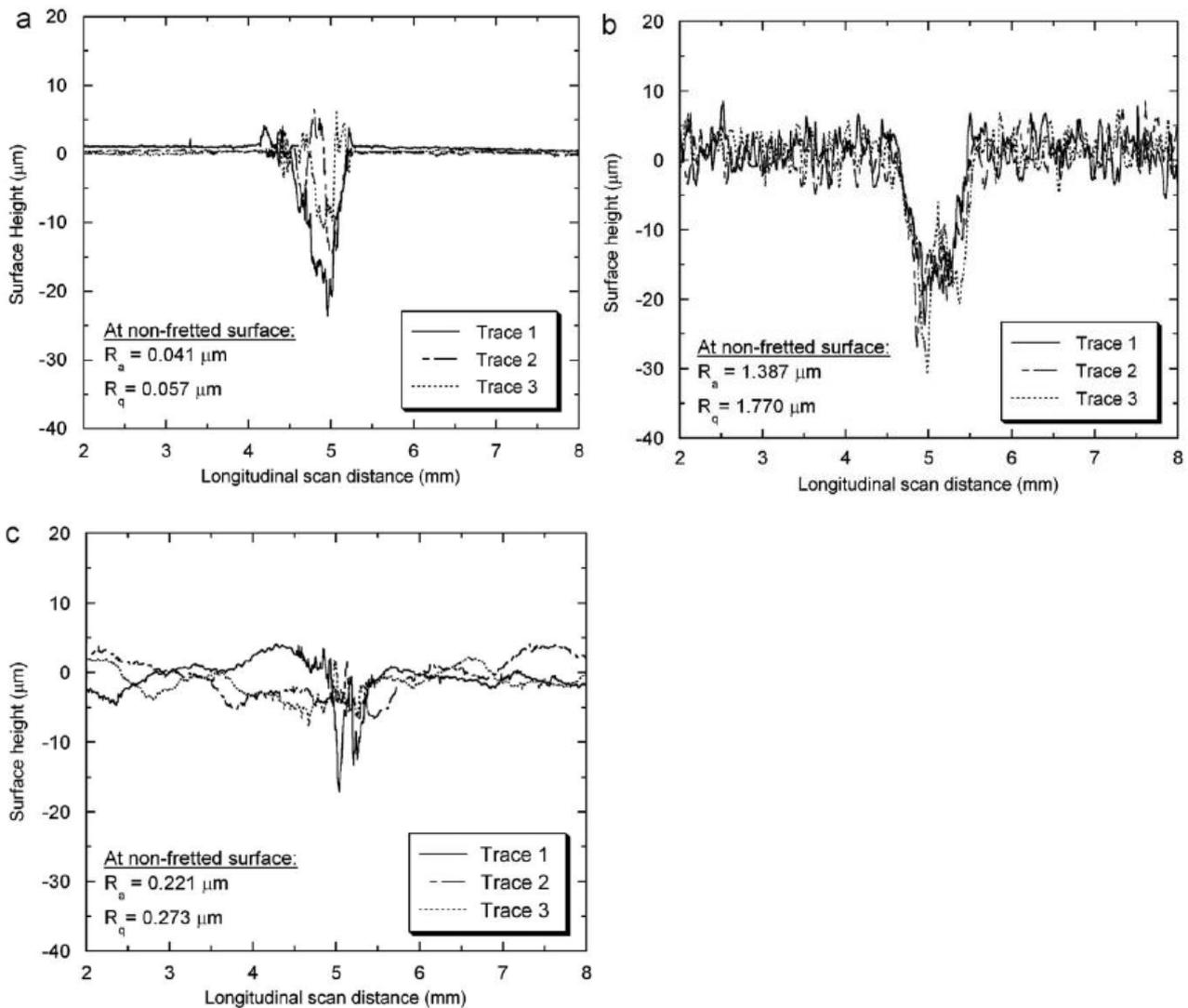


Figura 29: Andamento del profilo superficiale della scanalatura sollecitata a fretting fatigue a 827MPa per: (a) Materiale base; (b) Trattato con Shot Peening; (c) Trattato con Laser Shock peening [20]

Confrontando invece i segni lasciati dal fretting fatigue alla quale sono stati sottoposti i provini, la profondità maggiore è stata riscontrata nello Shot Peening (30  $\mu\text{m}$  di profondità) e la minore nel Laser Shock Peening (17  $\mu\text{m}$ ), anche se i segni sia per materiale base che per quello trattato con Laser Shock Peening non sono uniformi (presentano creste, rugosità e tracce differenti per ciascun provino) mentre quelle dei provini trattati tramite Shot Peening sono uniformi.

Venendo all'analisi delle rotture, esse sono legate al trattamento a cui è stato sottoposto il materiale e allo sforzo a cui è soggetto. Per i provini sottoposti a fatica a 827 MPa, indipendentemente dal trattamento, le rotture si sono verificate sul bordo esterno della zona di strisciamento (figura 28). A tensioni inferiori, le rotture si sono verificate per il Laser Shock Peening a 2-4 mm di distanza dalla scanalatura, in direzione parallela all'estensimetro verso il raggio di raccordo con punti di presa del provino. L'analisi della generazione della frattura ha mostrato che le rotture dei provini trattati con Shot Peening hanno origine dalla superficie per le prove a 827 e 689 MPa e a 0.3-0.5 mm dalla superficie per le prove effettuate a 550 e 482 MPa, mentre per i provini trattati con Laser Shock Peening e sottoposti a fatica a 827MPa le fratture hanno avuto origine a 3.0-3.5mm dallo spessore della superficie e 4.0-4.2mm dalla larghezza, corrispondente al punto di massima concentrazione delle tensioni, rilevato utilizzando la misura al contorno (figura 28). Come mostrato nelle figure 29a, 29b e 29c, le rotture dei provini (per materiale base, trattato con Shot Peening e con Laser Shock Peening) si sono propagate con un angolo compreso tra i 45 e gli 80° dall'asse di carico. Si sono verificate

anche cricche secondarie multiple sulla superficie, finché non si è generata una cricca principale di maggior profondità. L'apertura delle cricche è peculiare per ogni livello di tensione al quale il materiale è sottoposto oltre al trattamento: nel materiale base, le cricche hanno mostrato una maggior apertura, seguite da quelle del materiale trattato con Shot Peening e poi quello trattato con Laser Shock Peening, le quali sono risultate essere le più chiuse. È stata osservata anche una deviazione della cricca (figure 29 b e c) nei provini trattati con Shot Peening e Laser Shock Peening.

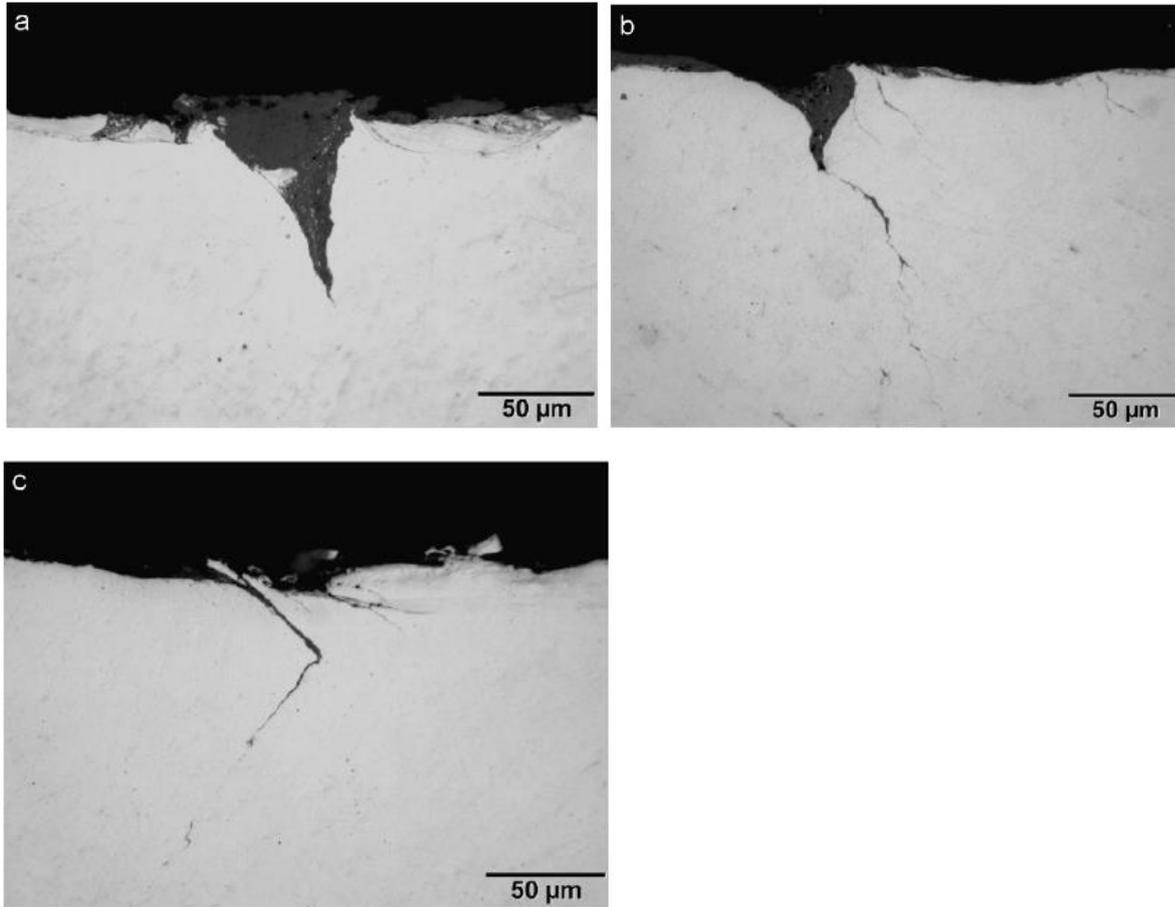


Figura 29: Cricche da fretting fatigue per: (a) Materiale base (circa 19000 cicli); (b) Trattato con Shot Peening (circa 56000 cicli); (c) Trattato con Laser Shock Peening (circa 36000 cicli). La direzione del carico è orizzontale [20]

## §3.3 Test su acciaio

### 3.3.1 Shot Peening e Laser Shock Peening su acciaio AISI 4340

Nella prova effettuata su AISI 4340 [24] abbiamo il confronto tra vari tipi di pallinatura Shot Peening e Laser Shock Peening. La composizione chimica dell'AISI4340 utilizzato è 0.41 C–0.73 Mn–0.8 Cr–1.74 Ni–0.25 Mo–0.25 Si, in %. Le proprietà meccaniche della lega sono: durezza 50-53HRC, carico di snervamento 1511MPa, carico di rottura 1864MPa, limite di fatica di 800 MPa (circa 50% del carico di snervamento). Queste proprietà sono state ottenute tramite tempra da 815° e rinvenimento a 230±5°C per 2 ore. Questo materiale è stato trattato tramite quattro tipi di pallinatura controllata: 0.0027 A (8 psi), 0.0063 A (13 psi), 0.0083 A (18 psi), 0.0141 A (45 psi), tutti con un afflusso di pallini di 3 kg/min, una velocità di 250mm/min, una distanza del getto di 200mm ed una rotazione di 30 giri/min. I pallini utilizzati sono S 230 ( $\phi$  0.7 mm) con una copertura del 200% effettuata con una macchina ad aria compressa secondo standard MIL-S-13165. Il trattamento è stato effettuato con un elevato controllo qualità dove vengono automaticamente selezionati i pallini in perfette condizioni. Per ciascuna serie di Shot Peening e di provini le curve S/N sono state ottenute tramite standard ASTM E 739. I provini utilizzati (figura 30) sono stati testati tramite flessione rotante ( $R=-1$ ) alla frequenza di 50 Hz a temperatura ambiente. I piani di frattura dei provini sottoposti a fatica sono analizzati utilizzando un microscopio a scansione elettronica per identificare i punti di origine delle cricche.

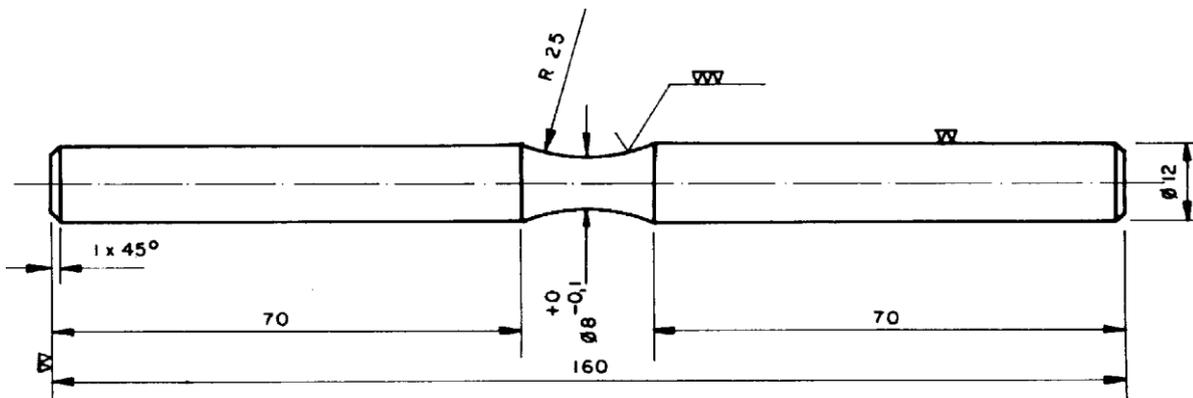


Figura 30: Disegno del provino utilizzato per la prova [24]

Le tensioni residue indotte da Shot Peening sono state misurate tramite analisi ai raggi-X [25]. L'accuratezza della misura è di  $\Delta\sigma = \pm 20$  MPa. Per ricavare il livello delle tensioni in funzione della profondità, gli strati sono stati rimossi tramite pulizia elettrolitica con soluzione non acida.

I risultati ottenuti, sono raccolti nella figura 31.

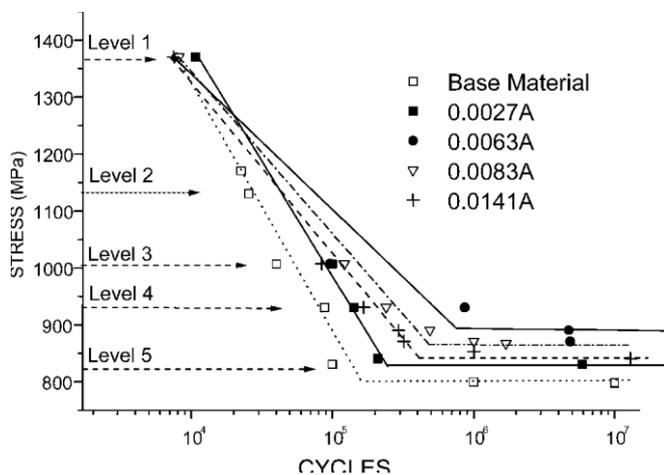


Figura 31: Comparazione delle curve S/N per il materiale base e trattato con i vari tipi di Shot Peening analizzati [24]

Per ottenere questi risultati, sono state effettuate 20 prove per ciascuna curva e sono stati tabulati i valori medi per ciascun livello di tensione. I cinque livelli di tensione indicati in figura 31 non sono tutti i livelli testati, tuttavia saranno i riferimenti di tensioni negli studi effettuati in tutto l'articolo. È possibile osservare in figura 31 un miglioramento della resistenza a fatica a medi e alti cicli dei provini trattati con Shot Peening se raffrontati al materiale base, mentre nel caso di tensioni elevate e bassi cicli (livello 1: 1370MPa), lo Shot Peening è risultato ininfluente (con l'eccezione nelle condizioni 0.027A, nella quale viene osservato un lieve miglioramento). È interessante sottolineare che le migliori condizioni di vita a fatica si hanno con le condizioni di pallinature intermedie: 0.0063 e 0.0083A. Non si sono riscontrate differenze apprezzabili nel limite di fatica nelle condizioni di limite minima (0.0027A) e massima (0.0141A) intensità di pallinatura. Tuttavia, la pallinatura per le condizioni analizzate presenta un miglioramento generale del limite di fatica dal 9% (0.0027A) al 12% (0.0063A) comparato al materiale base. Per le condizioni intermedie ( $10^5$  cicli, livello 3: 1007 MPa e livello 4: 931 MPa), il guadagno di vita a fatica rispetto al materiale base è molto più significativo, da 2 (0.0027A) a 10 volte (0.0063A).

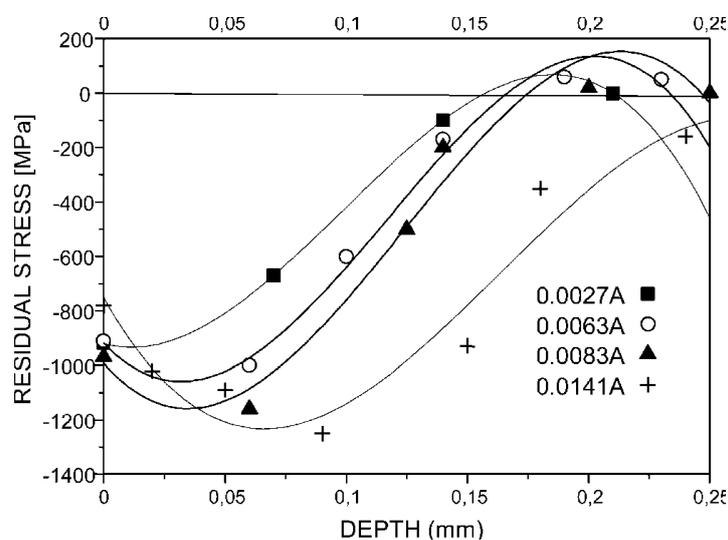


Figura 32: Andamento delle tensioni residue nelle varie condizioni di Shot Peening [24]

La figura 32 l'andamento delle tensioni residue in funzione della profondità. Per tabulare i punti misurati sperimentalmente, sono state utilizzate delle equazioni cubiche [26]. Le tensioni residue impresse dai trattamenti sulla superficie sono grossomodo le stesse, eccetto per la 0.0141A. Questo risultato concorda con le osservazioni effettuate da [27], nelle quali viene dichiarato che le tensioni superficiali sono più correlate alle caratteristiche meccaniche (durezza e ritorno elastico) e alla rugosità superficiale, piuttosto che all'intensità di pallinatura. Allo stesso modo è inoltre possibile notare che, con l'aumentare dell'intensità di pallinatura, aumentano la profondità e il picco di tensioni residue [28, 29]. Dato che il miglioramento della vita a fatica, conseguenza delle tensioni compressive indotte sulla superficie dalla pallinatura, ci si aspetterebbe un miglioramento della vita a fatica del materiale, a fronte di un favorevole andamento delle tensioni residue: la correlazione tra l'andamento delle tensioni residue e il miglioramento della vita a fatica non è chiara e quindi ad un favorevole andamento delle tensioni residue, non corrisponde necessariamente una migliore vita a fatica. Infatti, per le condizioni 0.0141A, il basso valore di tensione residua sulla superficie non corrisponde alla minore vita a fatica, tuttavia il fatto di mostrare la più maggiore profondità efficace e il maggior picco di tensioni residue, non ha corrisposto alla migliore vita a fatica. Altri esempi possono essere dati dalle condizioni 0.063 e 0.083 A: in entrambi i casi sono state riscontrate la migliore resistenza a fatica a medi e alti cicli confrontate con le altre condizioni di pallinatura, tuttavia le loro profondità efficaci e i loro picchi di tensioni residue sono valori intermedi nei grafici di andamento delle tensioni residue. Ciò dimostra che il comportamento a fatica nel materiale studiato attraverso il trattamento di pallinatura è più complesso

che lo studio delle tensioni residue introdotte dai trattamenti. Per avere una migliore comprensione del fenomeno, viene effettuata l'analisi delle cricche superficiali del materiale trattato con i vari tipi di Shot Peening analizzati e di quello base per identificare i punti di origine delle cricche.

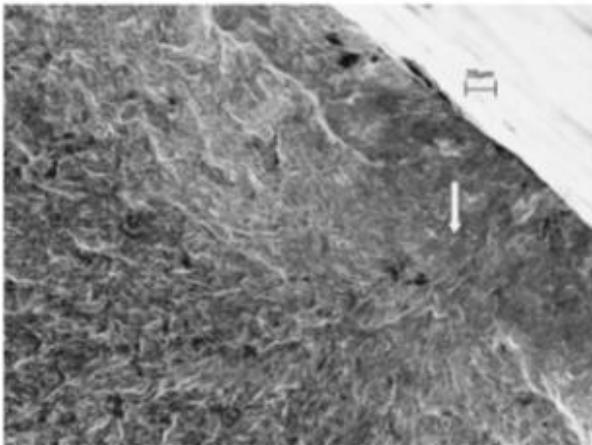


Figura 33: Cricca del provino 7D, tabella 4 [24]

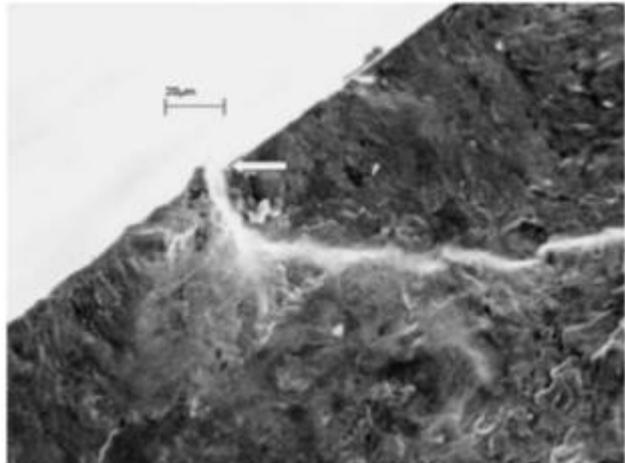


Figura 34: Cricca del provino 12E, tabella 4 [24]

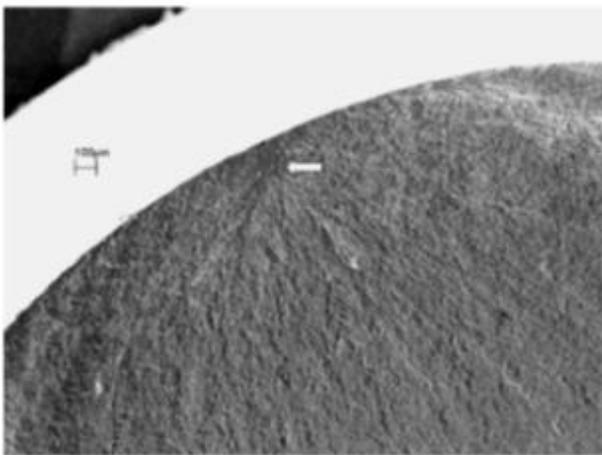


Figura 35: Cricca del provino 9D, tabella 4 [24]

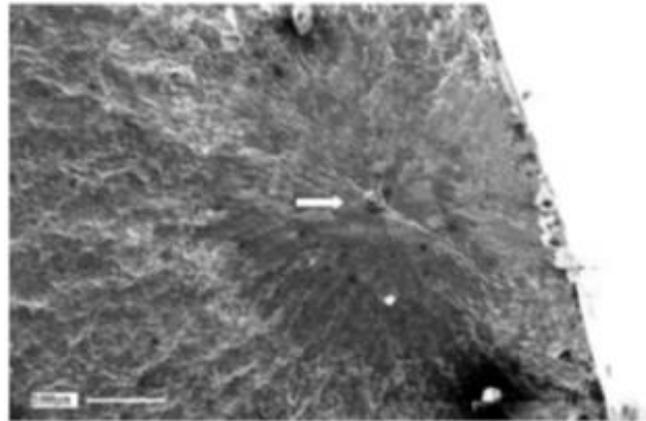


Figura 36: Cricca del provino 8C, tabella 4 [24]

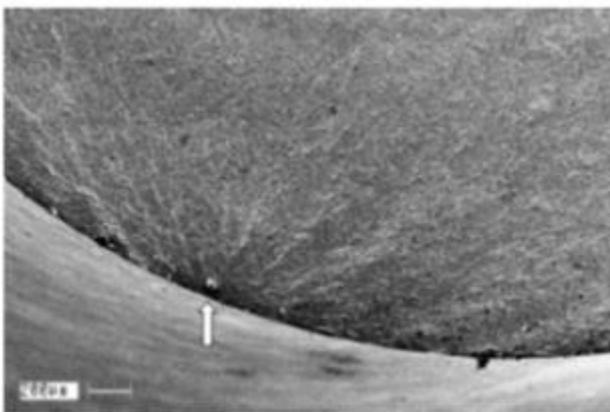


Figura 37: Cricca del provino 9B, tabella 4 [24]

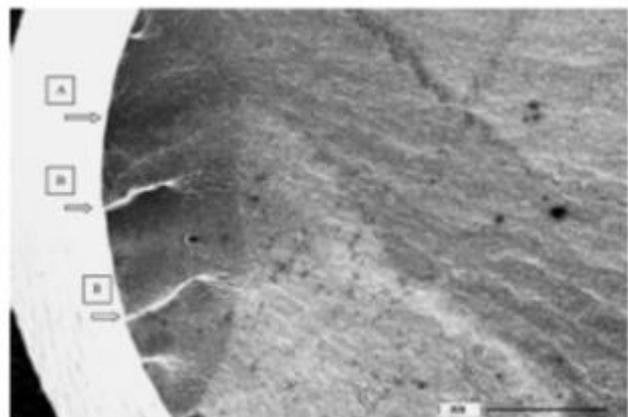


Figura 38: Cricca del provino 2E, tabella 4 [24]

Le figure da 33 a 38, mostrano l'analisi micrografica dei provini. Nelle figure 33 e 34, le cricche sono state osservate al di sotto della superficie e mostrano chiaramente l'influenza delle tensioni residue. Mostrano, inoltre un punto di origine ben definito (figura 34) e molte volte la cricca non ha origine dalla superficie. In tutti i provini trattati con Shot Peening (in maniera minore quelli soggetti a fatica a bassi cicli (livello1, figura 2)), le cricche hanno avuto origine dalla superficie. Questo fenomeno può essere spiegato dal fatto che le forze ai quali sono stati sottoposti i provini hanno superato le tensioni residue superficiali. Nei provini non trattati con Shot Peening, è normale che le cricche abbiano origine dalla superficie poiché si hanno le maggiori tensioni dovute alle sollecitazioni indotte dal test. Lo stesso fenomeno di origine delle cricche dalla superficie, si è verificato anche nei provini trattati con Shot Peening e sollecitati ai livelli di tensione 3 e 4, anche se, come mostrato in precedenza, si è avuto un incremento del numero di cicli prima della rottura rispetto a quelli del materiale base. È inoltre interessante come talvolta (anche se molto raramente) le cricche (figura 36) abbiano avuto origine da una imperfezione della superficie: per spiegare questo fenomeno, va analizzato un fattore altrettanto importante di influenza della vita a fatica, quali sono le inclusioni (in particolare, la figura 37 mostra una cricca originatasi da una inclusione e figura 38 mostra diversi punti di origine delle cricche): questo fattore è influente soprattutto quando il materiale è soggetto ad elevate tensioni (livello 1), nel quale non si ha apparente influenza delle tensioni residue.

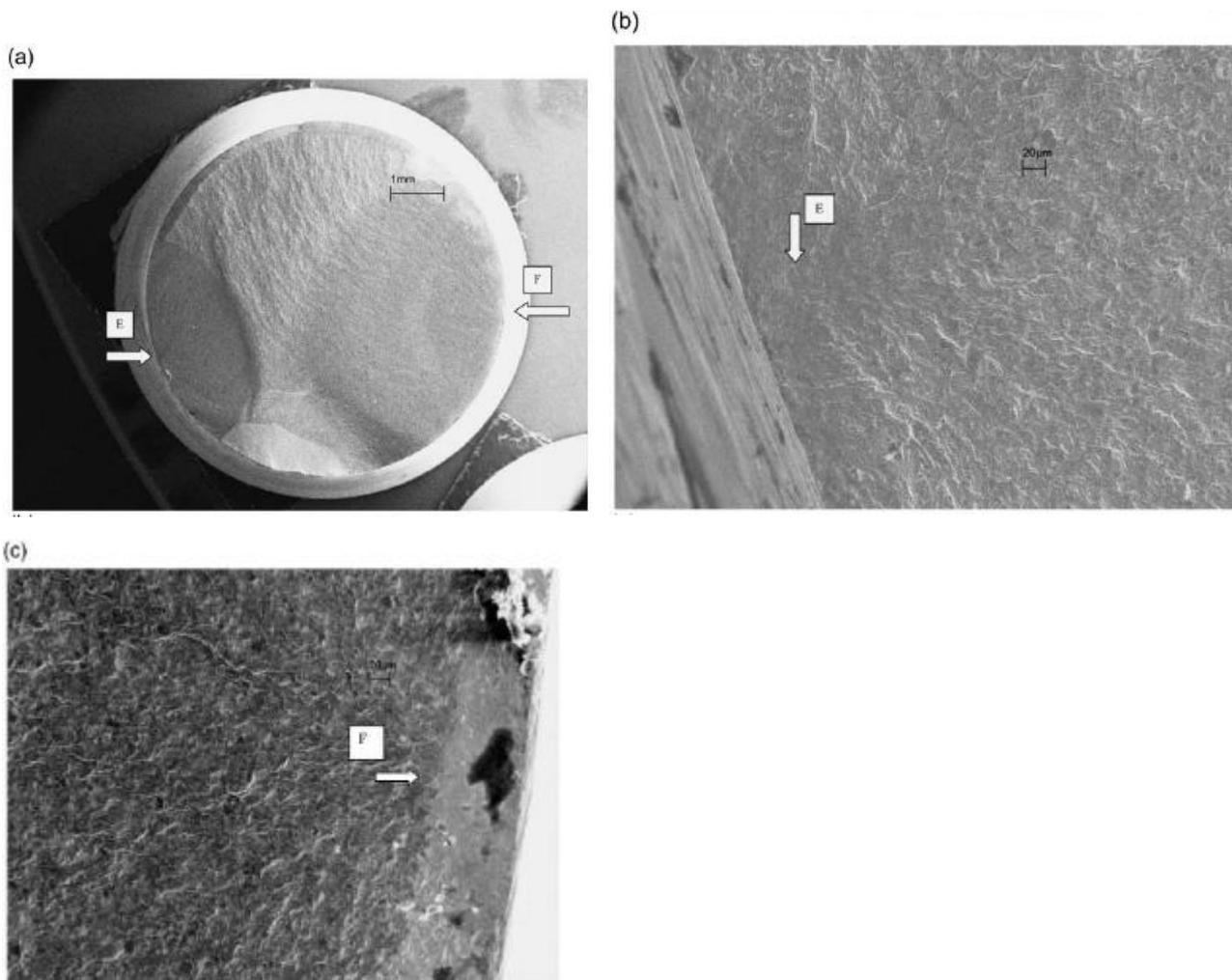


Figura 39: Immagini delle cricche superficiali del provino 5D, parte E ed F della tabella 4

In figura 39, si ha un altro tipico caso di origine della cricca, nel quale si hanno 2 fronti di propagazione della cricca (E ed F), entrambi con i loro relativi punti di origine al di sotto della superficie.

Un riassunto dell'analisi fatta finora, è mostrato in figura 40:

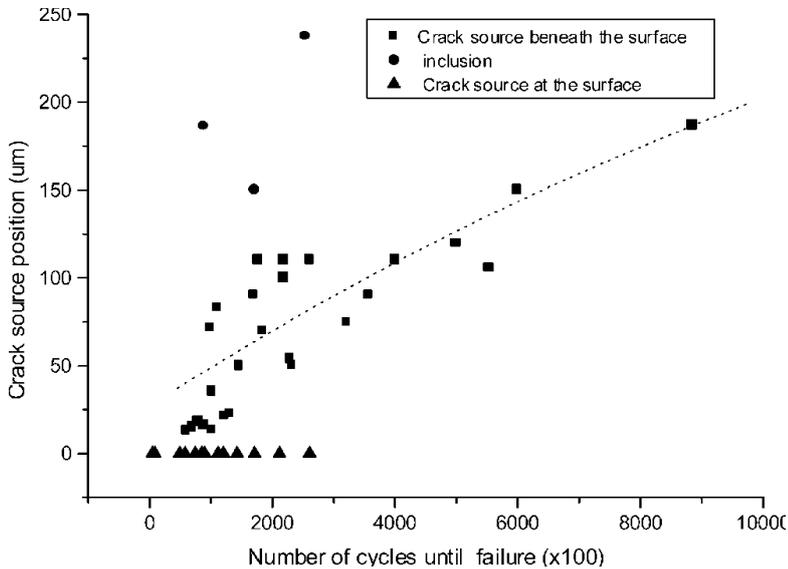


Figura 40: Grafico della posizione delle cricche in funzione del numero dei cicli

I punti di forma quadrata mostrano la posizione dei punti di origine delle cricche, indipendentemente dalle condizioni di Shot Peening, in funzione del numero di cicli a rottura: si può osservare una tendenza all'avere punti di origine delle cricche sempre più in profondità man mano che crescono il numero di cicli prima della rottura (andamento descritto dalla linea tratteggiata).

I punti circolari mostrano invece i punti di origine delle cricche generati da inclusioni: essi non sono correlati con i punti quadrati, ma dipendono dalla tensione applicata e dal tipo di inclusioni nel materiale.

Dal grafico è emerso un ulteriore fenomeno: la generazione delle cricche superficiali e sotto la superficie circa allo stesso numero di cicli (solo a basso numero di cicli): ipotizzando una correlazione, questa può essere spiegata come un fenomeno dovuto alle tensioni residue. Infatti, come noto, le tensioni residue impartite dai trattamenti superficiali, da un lato spingono in profondità le cricche, dall'altro tendono a rallentare lo sviluppo di quelle originatesi sulla superficie.

È stata fatta una analisi approfondita del comportamento del materiale trattato e soggetto alle condizioni di tensione 3 e 4 (1007, 931 MPa) e comparato al livello 1 (1370 MPa), al fine di verificare un miglioramento delle prestazioni del materiale e capire il nesso tra origine delle cricche e tensioni applicate. I risultati sono mostrati in tabella 4 (pagina seguente)

Level 1: 1370 MPa				Level 3: 1007 MPa				Level 4: 931 MPa			
S	Nf ( $\times 10^2$ )	CS ( $\mu\text{m}$ )	FS (MPa)	S	Nf ( $\times 10^2$ )	CS ( $\mu\text{m}$ )	FS (MPa)	S	Nf ( $\times 10^2$ )	CS ( $\mu\text{m}$ )	FS (MPa)
<b>Base</b>											
1A	67	0	800	5A	452	0	800	9A	1225	0	800
2A	59	0	800	6A	419	0	800	10A	980	0	800
3A	59	0	800	7A	360	0	800	11A	703	0	800
4A	56	0	800	8A	353	0	800	12A	624	0	800
Average	60	SD=5		Average	396	SD=48		Average	883	SD=274	
<b>0.0027 A</b>											
1B	125	0	1194	5B	1457	50	1152	9B	2117	0	1194
2B	112	0	1194	6B	1111	0	1195	10B	1307	23	1198
3B	100	0	1194	7B	892	0	1195	11B	1201	0	1194
4B	91	0	1194	8B	578	0	1195	12B	1013	14	1202
Average	107	SD=15		Average	1010	SD=370		Average	1410	SD=487	
<b>0.0063 A</b>											
1C	100	0	1193	5C	1097	38	1257	9C	19602	225	794
2C	92	0	1193	6C	1014	35	1258	10C	9048	204	762
3C	75	0	1193	7C	875	16	1242	11C	3567	80	1163
4C	46	0	1193	8C	869	186	775	12C	2295	54	1237
Average	78	SD=24		Average	964	SD=111		Average	8628	SD=7881	
<b>0.0083 A</b>											
1D	101	0	1225	5D	1848	70	1247	9D	5529	105	1114
2D	100	0	1225	6D	1425	20	1287	10D	1697	90	1177
3D	86	0	1225	7D	986	72	1241	11D	1224	22	1289
4D	42	0	1225	8D	590	13	1272	12D	1115	0	1225
Average	82	SD=28		Average	1212	SD=544		average	2391	SD=2107	
<b>0.0141 A</b>											
1E	86	0	1121	5E	1202	0	1121	9E	2320	50	1323
2E	85	0	1121	6E	743	0	1121	10E	2097	0	1121
3E	82	0	1121	7E	741	0	1121	11E	1707	150	1149
4E	47	0	1121	8E	681	15	1212	12E	485	0	1121
Average	75	SD=19		Average	842	SD=242		Average	1652	SD=818	

S= Specimens; Nf= Number of cycles until failure; CS= Distance of crack source from the surface; FS= Fatigue strength by the Goodman relation; SD= Standard deviation of fatigue date life.

Tabella 4: Riassunto risultati dei test [24]

A sinistra della tabella vi sono le condizioni di trattamento Shot Peening applicate, nella prima riga orizzontale, sono mostrati i livelli di tensione applicati nei test, mentre la prima colonna indica ciascun provino analizzato, la seconda il numero di cicli prima della rottura, la terza la distanza del punto di origine della cricca dalla superficie e la quarta colonna indica la resistenza alla tensione applicata.

Oltre alle riflessioni fatte in precedenza sull'origine delle cricche in caso di materiale base e fatica a bassi cicli, si può notare che le condizioni 0.0063A e 0.0083A hanno mostrato i migliori risultati nella vita a fatica e nella maggior parte delle prove. In queste condizioni di trattamento, le cricche hanno avuto origine al di sotto della superficie. Nei provini 8C e 11E, le cricche hanno avuto origine da inclusioni, nel 12 E la cricca ha avuto origine da un difetto della superficie e di conseguenza un limite di fatica inferiore a quello di 10 E.

Sono state effettuate anche prove per analizzare l'andamento delle tensioni residue con l'avvicinarsi della rottura: i provini sono stati sollecitati a fatica e, al formarsi della cricca, sono stati tolti dal macchinario del test per analizzarne i livelli di tensioni residue.

Il primo test è stato effettuato a 0.0141 A (dove si sono viste essere maggiori le tensioni residue) ai livelli di sollecitazione 2 ( $10^3$  e  $10^4$  cicli), 4 ( $10^4$  e  $10^5$  cicli) e 5 ( $10^7$  cicli). Le misure delle tensioni residue sono state effettuate a 0.05, 0.1 e 0.15 mm di profondità. I risultati sono riportati nelle figure da 41 a 43 (pagina successiva)

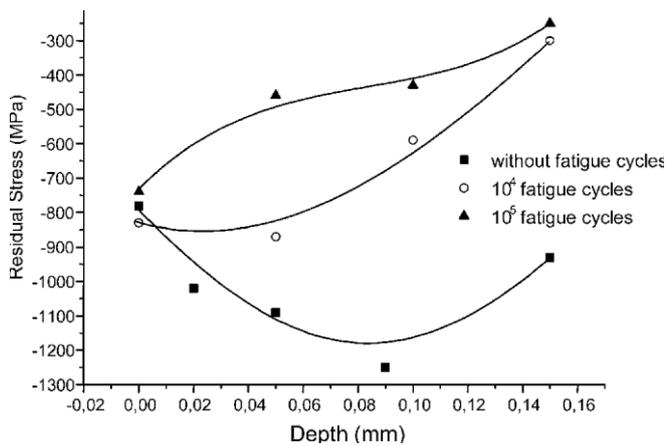


Figura 41: Rilassamento delle tensioni residue di Shot Peening 0.0141A e livello di sollecitazione 4 [24]

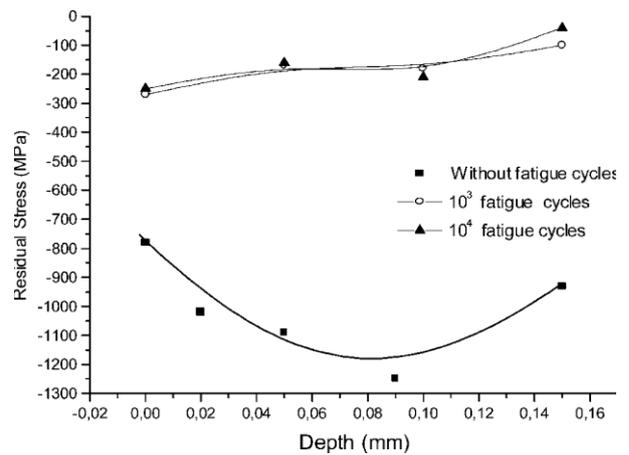


Figura 42: Rilassamento delle tensioni residue di Shot Peening 0.0141A e livello di sollecitazione 2 [24]

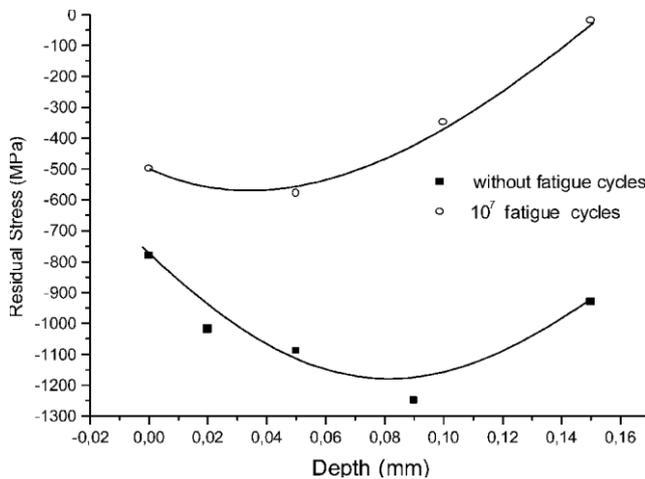


Figura 43: Rilassamento delle tensioni residue di Shot Peening 0.0141A e livello di sollecitazione 5 [24]

In figura 41 è possibile notare il risultato per il livello 4: si ha a  $10^4$  e  $10^5$  cicli una variazione del campo delle tensioni residue rispetto al valore di partenza e, nonostante non si sia avuta una variazione delle tensioni sulla superficie, al di sotto di essa si è verificato un notevole calo con l'aumento dei cicli al quale era sottoposto il provino.

La figura 42, che rappresenta il livello 2, mostra come a bassi cicli ed elevate tensioni, si abbia un calo delle tensioni sotto e sulla superficie, anche se non vi è variazione tra  $10^3$  e  $10^4$  cicli, il che suggerisce una stabilizzazione del fenomeno.

La figura 43 mostra il caso di livello 5 (840 MPa): anche in questo caso si è evidenziato un calo delle tensioni rispetto alla situazione di partenza, in questo caso dovuto non allo sforzo elevato al quale era soggetto il provino, ma al numero elevato di cicli. Si può dunque considerare i casi di livello 2 e 5, come i limiti di sollecitazione.

Il calo di tensioni verificatosi nel materiale a livello 2 e 5, è da spiegarsi come una sovrapposizione della compressione del test di flessione rotante con quella superficiale, e, al sommarsi del fenomeno per carichi elevati, produce una plasticizzazione della superficie, con conseguente rinvenimento delle tensioni impartite dallo Shot Peening. Il successivo andamento è calante fintanto che, ad elevati cicli, è l'incrudimento ciclico a far ridurre le tensioni residue.

Prove analoghe sono state effettuate a 0.0083A (figura 44) e 0.0063A (figura 45), entrambi a livello 4

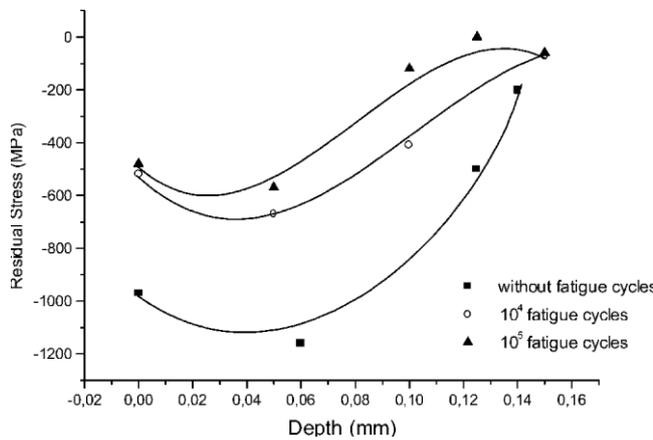


Figura 44: Rilassamento delle tensioni residue di Shot Peening 0.083A, livello di sollecitazione 4

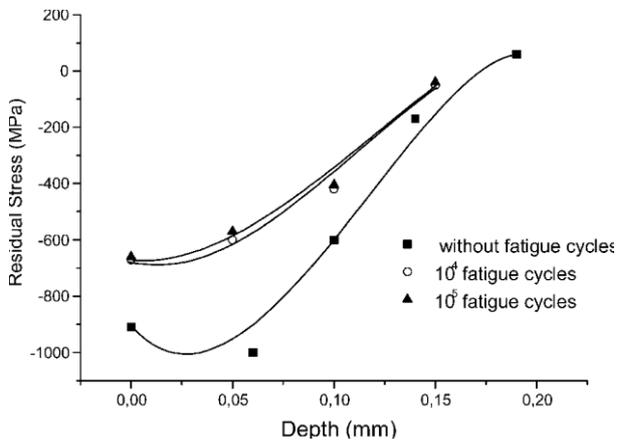


Figura 45: Rilassamento delle tensioni residue di Shot Peening 0.063A, livello di sollecitazione 4

Analizzando la figura 45, si può notare come vi sia un rilassamento delle tensioni, maggiormente visibile a  $10^5$  cicli, con picco di tensioni residue passato da circa 1150 MPa nel materiale di partenza a circa 500 MPa dopo  $10^5$  cicli. Anche nel caso di 0.0063A si ha un rilassamento delle tensioni, anche se in maniera inferiore rispetto a 0.0083A, cosa che spiega la migliore performance di 0.0063A rispetto a 0.0083A nella vita a fatica.

La presenza di un picco di tensioni residue più elevato per 0.0141A anche dopo  $10^5$  cicli rispetto a quello di 0.0063A porterebbe a ritenere che il limite di fatica risulti maggiore, invece risulta inferiore per l'origine di cricche a partire dalla superficie (dovuto alla maggior rugosità superficiale, indotta dal trattamento), a differenza di 0.063A, le cui cricche hanno origine sotto la superficie.

### §3.4 Test su Inconel® 718

Nei test successivi, non abbiamo una prova che possa confrontare direttamente utilizzando lo stesso tipo di provini e gli stessi carichi l'efficacia e le prestazioni generate dai trattamenti analizzati, tuttavia verranno riportati i dati di test effettuati in situazioni differenti per poterne valutare l'efficacia, soprattutto rispetto al materiale base.

#### 3.4.1 Ultrasonic Peening su Inconel® 718

Nel primo test [30] viene analizzato l'Ultrasonic Peening, trattamento finora non analizzato su altri materiali, ma che su Inconel® 718 ha trovato applicazione. Anche se non sono state fatte delle vere prove di fatica, tuttavia si può confrontare le tensioni residue indotte da Ultrasonic Peening con quelle degli altri trattamenti e predire in maniera plausibile la vita a fatica del materiale, utilizzando i modelli matematici conosciuti.

Il materiale della prova è Inconel® 718, con durezza superficiale di  $43 \pm 2$  HRC, in lastre di 10mm x 10mm x 3.2mm.

Prima dei test le piastre sono state pulite meccanicamente (al fine di garantire la stessa pressione di pulizia per ogni provino) per 15 min utilizzando grana di diamante da  $3 \mu\text{m}$  e poi per 5 min utilizzando  $\text{Al}_2\text{O}_3$  diluito.

Una volta trovata la frequenza di risonanza del trasduttore, sono state fissate la relativa frequenza e la forza ( $f=19.15$  kHz,  $P=30\%$  per sfere di WC/Co, mentre per sfere di acciaio  $f=20.40$  kHz e  $P=30\%$ ). Fissati tali valori, i parametri che possono essere variati sono: tempo del processo, distanza tra materiale e trasduttore e dimensione, quantità e materiale delle sfere. Nell'esperimento sono state utilizzate sfere di 10g e di 2mm di diametro. I materiali delle sfere utilizzati nella prova sono l'acciaio e il WC/Co. Il WC/Co in virtù della sua differente densità rispetto a quella dell'acciaio, ha comportato l'utilizzo di un numero di pallini che è la metà del numero di quelli di acciaio impiegati.

Sono state analizzate 3 differenti distanze del materiale dal trasduttore (12, 25 e 38 mm) e conseguentemente 3 differenti energie e durate del trattamento (rispettivamente 1, 8 e 15 min).

Per misurare le tensioni residue derivate dai trattamenti, sono state effettuate analisi ai raggi X prima e dopo i trattamenti. La tabella 5 elenca i risultati ottenuti

Sample	Material of the shot balls	Distance sample-booster, $H(\text{mm})$	USP treatment time, $t(\text{min})$	Residual stress before USP, $\sigma_{\text{bef}}$ (MPa)	Residual stress after USP, $\sigma_{\text{aft}}$ (MPa)	Stress change induced by USP test, $\Delta\sigma$ (MPa)
001	Steel	12	1	$273 \pm 21$	$143 \pm 25$	$-130 \pm 46$
002		12	8	$-336 \pm 26$	$-548 \pm 29$	$-212 \pm 55$
003		12	15	$-34 \pm 13$	$-413 \pm 22$	$-379 \pm 35$
004		25	1	$-340 \pm 17$	$-351 \pm 24$	$-11 \pm 41$
005		25	8	$-256 \pm 18$	$-368 \pm 21$	$-112 \pm 39$
006		25	15	$93 \pm 7$	$-241 \pm 19$	$-334 \pm 26$
007		38	1	$146 \pm 19$	$145 \pm 23$	$-1 \pm 42$
008		38	8	$-433 \pm 24$	$-512 \pm 30$	$-79 \pm 54$
009		38	15	$-3 \pm 18$	$-256 \pm 26$	$-253 \pm 44$
011	WC/Co	12	1	$-420 \pm 27$	$-632 \pm 34$	$-212 \pm 61$
012		12	8	$-409 \pm 22$	$-708 \pm 35$	$-299 \pm 57$
013		12	15	$-139 \pm 16$	$-699 \pm 36$	$-560 \pm 52$
014		25	1	$-398 \pm 22$	$-576 \pm 39$	$-178 \pm 61$
015		25	8	$-397 \pm 25$	$-734 \pm 36$	$-337 \pm 61$
016		25	15	$-317 \pm 19$	$-739 \pm 41$	$-422 \pm 60$
017		38	1	$-207 \pm 17$	$-276 \pm 26$	$-69 \pm 43$
018		38	8	$-507 \pm 25$	$-694 \pm 41$	$-187 \pm 66$
019		38	15	$-545 \pm 25$	$-759 \pm 37$	$-214 \pm 62$

Tabella 5: Valori delle tensioni residue misurate prima e dopo Ultrasonic Peening [30]

I risultati indicano una disomogeneità delle tensioni nei provini di partenza nonostante l'uniformità del trattamento di pulizia effettuato in partenza, pertanto per misurare l'efficacia del trattamento bisogna misurare le tensioni prima e dopo il trattamento.

Nel grafico successivo (figura 46) sono mostrati i cambiamenti delle tensioni superficiali indotte dai trattamenti.

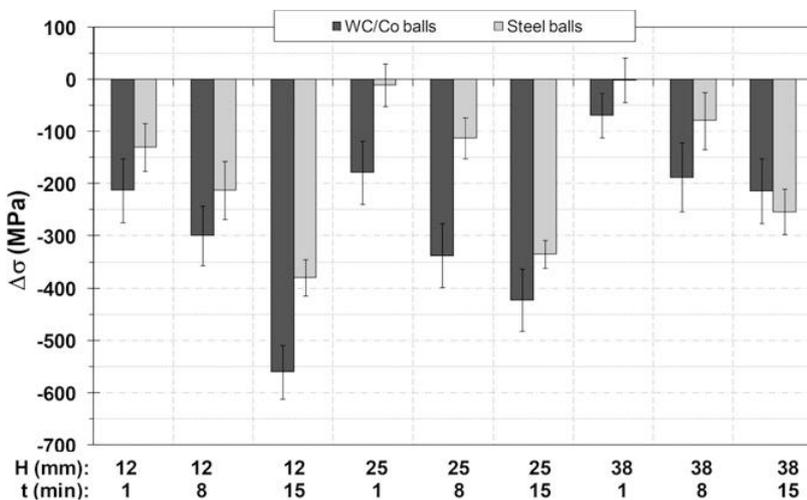


Figura 46: Variazione di tensione superficiale indotta dai trattamenti di Ultrasonic Peening [30]

Si può notare la maggior efficacia delle sfere di WC/Co rispetto a quelle di acciaio, fatto imputabile oltre alla differente densità delle sfere, anche alla maggior durezza delle sfere di WC/Co:  $1620 \pm 1.0$  Hv contro  $830 \pm 40$  Hv per le sfere di acciaio

L'eccezione che conferma la regola è rappresentata da  $H=38$  e  $t=15$  min, dove sia le sfere di acciaio hanno mostrato la stessa variazione di tensioni di quelle di WC/Co, anche se tuttavia si può notare come le tensioni per le sfere di acciaio abbiano un picco di  $-256$  MPa e quelle di WC/Co a  $-759$  MPa. Questo elemento deve essere tenuto in considerazione in virtù della capacità delle sfere di WC/Co di imprimere importanti livelli di tensioni residue (per trattamenti superiori al minuto, siamo nell'ordine dei 700 MPa, indipendentemente dalla distanza, pertanto questo valore può essere indicato come limite dell'efficacia).

Analizzando l'influenza della distanza della superficie da trattare con il trasduttore, si nota come la vicinanza ad esso influisca positivamente sull'efficacia del trattamento, fenomeno spiegabile con una maggior energia cinetica (dovuta appunto alla minore distanza dal trasduttore) delle sfere e quindi una maggior forza di impatto. Questo fenomeno influenza anche l'efficacia del trattamento in caso di geometrie complesse, essendo impossibile garantire la distanza efficace e quindi si potrebbe ottenere un trattamento insufficiente. La difficoltà di ottenere un trattamento omogeneo è evidenziata anche dalla distribuzione delle tensioni superficiali, le quali presentano importanti variazioni tra le zone trattate e quelle limitrofe e questo influisce dunque anche sulla progettazione dei componenti eventualmente da trattare con Ultrasonic Peening.

Sample	Material of the shot balls	Distance sample-booster, H(mm)	USP treatment time t (min)	Measured residual stress $\sigma_{res}$ (MPa)	Stress change induced by USP test with respect to initial state, $\Delta\sigma$ (MPa)
010	Steel	25	0	$273 \pm 20$	0
			5	$178 \pm 33$	$-65 \pm 33$
			10	$-159 \pm 25$	$-402 \pm 25$
			15	$-266 \pm 26$	$-509 \pm 26$
			20	$-287 \pm 27$	$-530 \pm 27$
			25	$-256 \pm 33$	$-499 \pm 33$
020	WC/Co	25	0	$-259 \pm 26$	0
			0.5	$-563 \pm 31$	$-304 \pm 31$
			1	$-627 \pm 34$	$-368 \pm 34$
			1.5	$-632 \pm 34$	$-373 \pm 34$
			2	$-703 \pm 36$	$-444 \pm 36$
			4	$-704 \pm 36$	$-445 \pm 36$

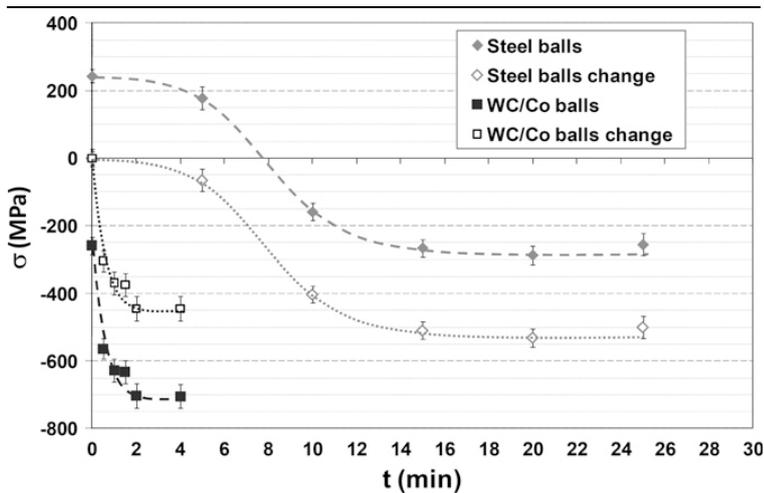


Tabella 6: Dati relativi all'influenza durata del trattamento sul picco di tensioni residue

Il tempo di trattamento, come mostrato nella tabella 6, influenza notevolmente l'efficacia del trattamento: nonostante non si siano verificati cambiamenti a livello di microstruttura, si sono generate elevate tensioni compressive superficiali, dovute all'importante deformazione plastica subita dal materiale. Per analizzare i limiti del trattamento (distanza massima del trasduttore e tempo massimo di applicazione, oltre il quale si verifica un plafonamento dell'efficacia del trattamento e/o un rinvenimento delle tensioni residue), sono state effettuate prove a varie distanze e vari step di tempo (tabella sopra): per sfere di acciaio, il limite di tempo è stato verificato essere intorno ai 18 min, mentre per le sfere di WC/Co, è stato provato essere intorno ai 2 min, in virtù delle caratteristiche del materiale delle sfere. Il plafonamento delle tensioni oltre un certo limite al variare del tempo, è spiegabile tramite la deformazione plastica che subisce il materiale: al deformarsi esso aumenta la propria densità, pertanto occorre una energia cinetica sempre maggiore per deformarlo ulteriormente, energia che oltre un certo limite non può essere fornita da un determinato pallino che dunque richiede la sostituzione con un pallino più duro e dotato di maggior energia cinetica.

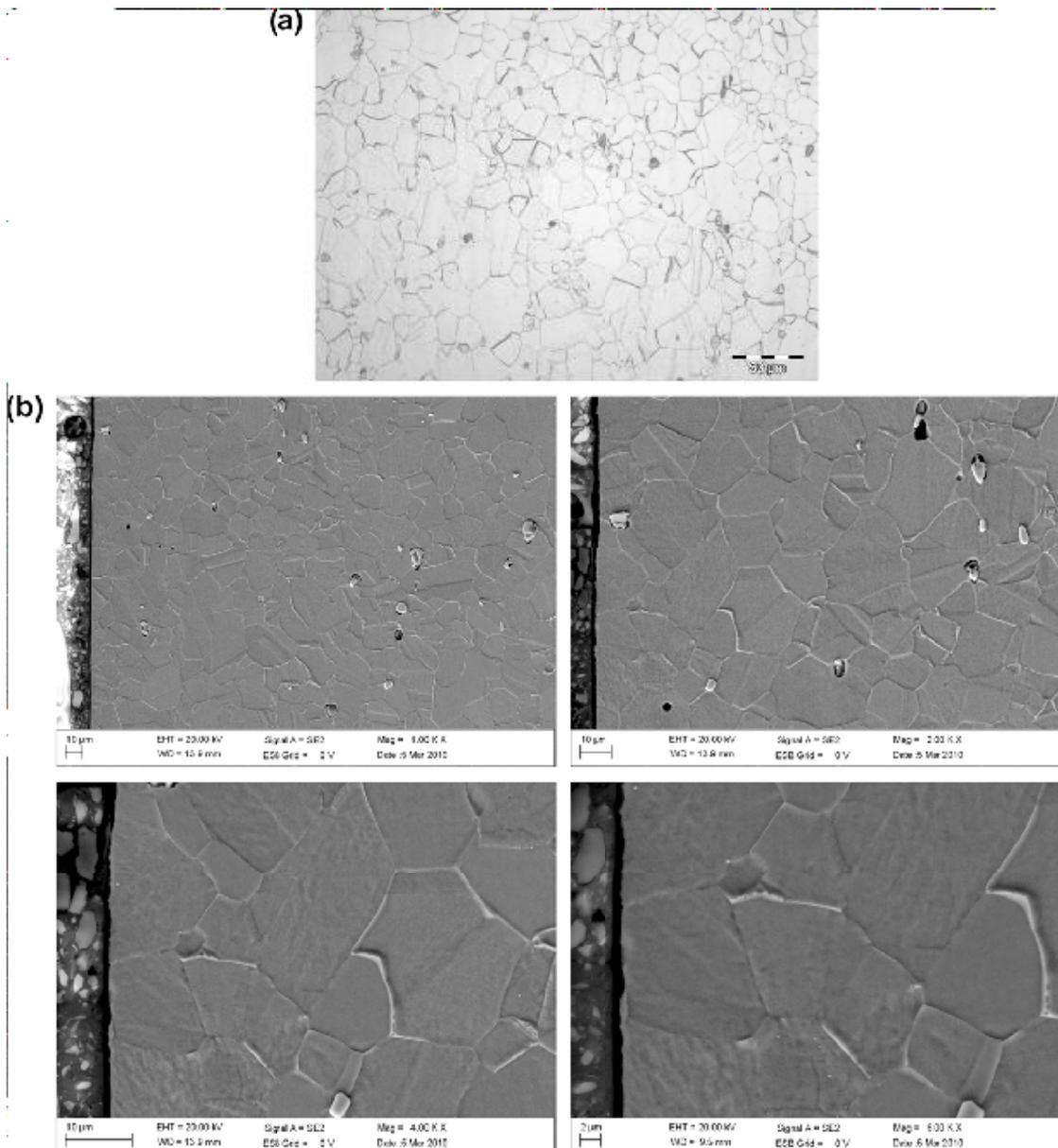


Figura 47: (a) Analisi al microscopio della superficie di IN718 utilizzato (b) Analisi al microscopio elettronico a scansione del materiale trattato con Ultrasonic Peening per  $t=15$  min e  $H=12$ mm con pallini di WC/Co [30]

Analizzando la microstruttura del materiale utilizzato negli esperimenti, si può notare una non omogenea disposizione di grani equiaxiali di diverse dimensioni (alcuni aventi diametro inferiore ai  $10 \mu\text{m}$  altri maggiori di  $40 \mu\text{m}$ ), come mostrato nella figura (47a).

In figura 47b sono raccolte alcune sezioni trasversali del provino 014, trattato con pallini di WC/Co per 15 min ad una distanza dal trasduttore di 12 mm, poiché in queste condizioni si hanno i maggiori cambiamenti delle tensioni superficiali. Microstrutture simili sono state osservate anche negli altri provini trattati, ma nessuna ha presentato nanocristallizzazione, come mostrato anche dall'assenza di amplificazione del picco di diffrazione, sintomo appunto di un affinamento della grana superficiale del materiale.

Comparando la rugosità superficiale, come previsto, in virtù della maggior durezza ed energia cinetica (energia dovuta alla maggior densità e alla minor probabilità di urto delle sfere nel trasduttore, essendo quelle di WC/Co la metà di quelle di acciaio), le impronte lasciate dalle sfere di WC/Co sono più profonde e ciò comporta una maggior rugosità superficiale.

### 3.4.2 Low Plasticity Burnishing su Inconel®718

Nell'ultimo test [31], abbiamo un confronto tra Low Plasticity Burnishing e Laser Shock Peening su Inconel® 718.

Il materiale di partenza è Inconel® 718 in barre certificato AMS 5662J e AMS 5596G. Il materiale è stato trattato a 982°C e rinvenuto prima per 8 ore a 732°C, poi, sempre per 8 ore, a 607°C.

Da questo materiale sono stati ricavati dei provini di 50.8 x 25.4 x 9.5 mm, dapprima puliti meccanicamente e poi trattati tramite elettroerosione al fine di ottenere una superficie priva di incrudimento e tensioni residue dovute alla lavorazione. Per effettuare le prove di fatica, è stata utilizzata una macchina di flessione rotante a 4 punti.

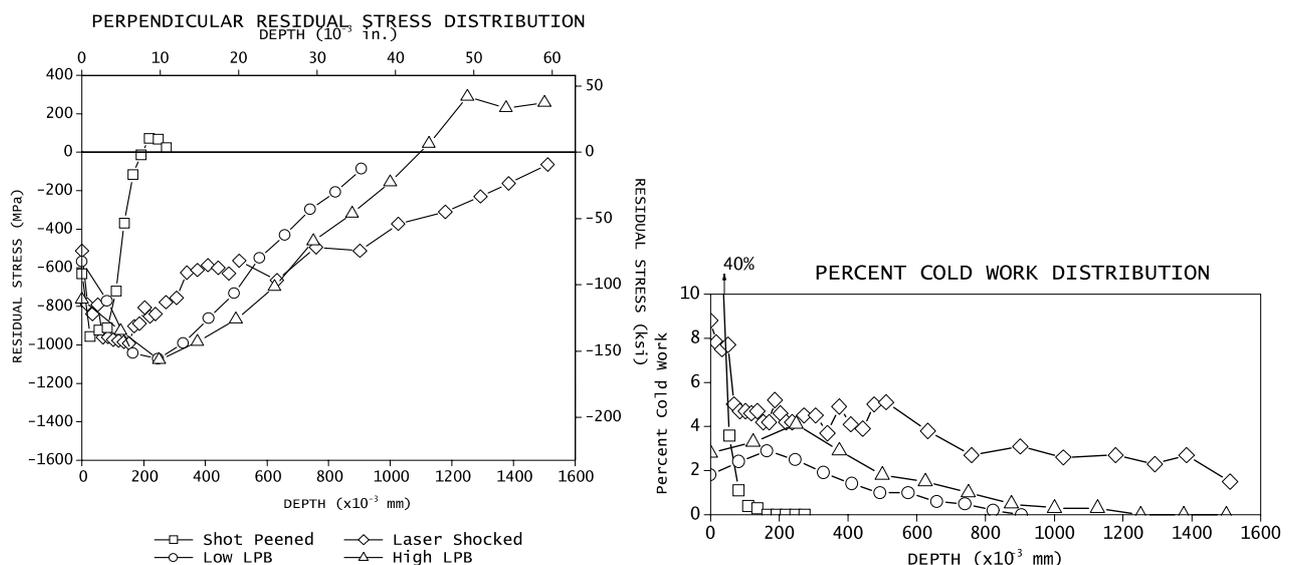


Figura 48: Andamento delle tensioni residue su Inconel® 718 trattato tramite Shot Peening a 8A, Laser Shock Peening e Low Plasticity Burnishing [30]

La figura 48 mostra un confronto dell'efficacia dei trattamenti sulla superficie dell'IN718: sono stati presi in esame Shot Peening, con intensità di 8A e copertura del 200%, Low Plasticity Burnishing e Laser Shock Peening a 3 passate.

Dai grafici si evince, come verificatosi anche nelle altre prove effettuate su altri materiali, che lo Shot Peening genera un picco di tensioni residue molto pronunciato ed un altrettanto pronunciato decadimento dell'efficacia all'aumentare della profondità. Il Laser Shock Peening, a differenza di altri articoli analizzati, ha mostrato un altrettanto pronunciato picco di tensioni residue, imputabili molto probabilmente alle multiple passate effettuate, cosa che spiega anche una elevata profondità efficace. Risultati apprezzabili, come verificatosi anche nel Ti-Al6-4V li ha mostrati il Low Plasticity Burnishing, in particolare con importante forza applicata (high Low Plasticity Burnishing).

Confrontando anche la stabilità delle tensioni residue impartite con l'aumento della temperatura (analisi effettuata sui grafici, figure da 49 a 52), lo Shot Peening ha mostrato una sensibile riduzione del picco delle tensioni residue dopo esposizione per 10 ore a 600°C (passato da 1200 MPa a circa 850 MPa), mentre quasi a parità di picco di tensioni residue (1100 MPa), l'esposizione per 10 ore a 600°C del provino, ne ha modificato leggermente il posizionamento (spostandolo lievemente più in profondità), ma lasciandone quasi invariata l'entità.

Il discorso non è altrettanto valido nel caso di Medium e High Low Plasticity Burnishing, dove da un lato hanno mostrato picchi di tensioni residue nettamente superiori a quelli di Shot Peening e Low Low Plasticity

Burnishing (in particolare l'High Low Plasticity Burnishing ha mostrato un picco di circa 1600 MPa), tuttavia hanno mostrato una maggior sensibilità delle tensioni residue impartite all'esposizione per 10 ore a 600°C: questo fenomeno è dovuto, con ogni probabilità, ad un "rinvenimento" e ridisposizione della struttura superficiale plasticizzata, con conseguente tendenza al ritorno a condizioni di maggior stabilità.

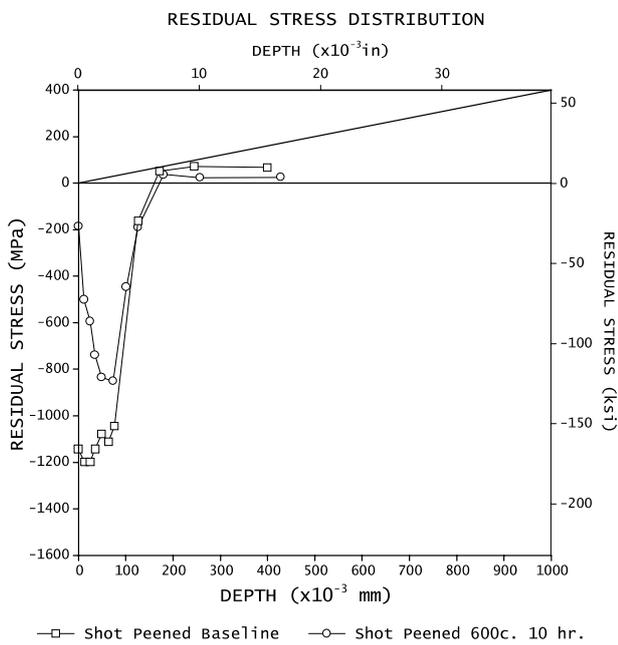


Figura 49: Andamento delle tensioni residue su Inconel® 718 trattato con Shot Peening prima e dopo esposizione per 10 ore a 600°C [31]

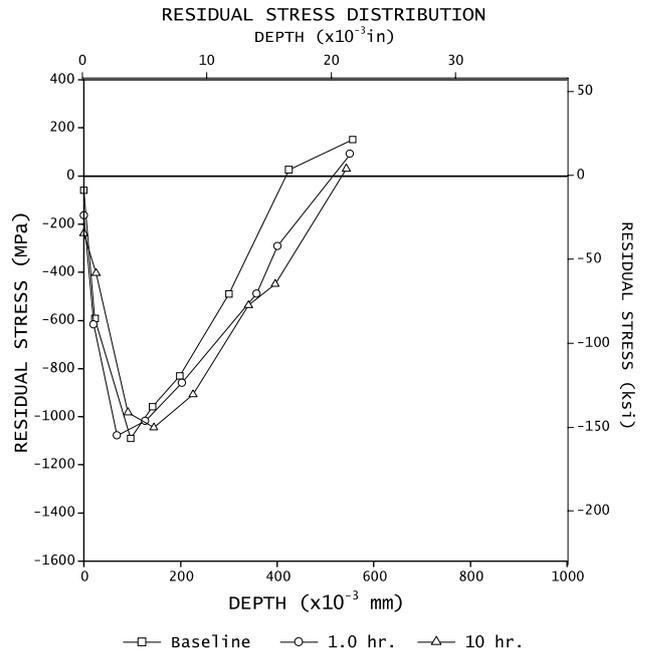


Figura 50: Andamento delle tensioni residue su Inconel® 718 trattato con Low Plasticity Burnishing prima e dopo esposizione per 10 ore a 600°C [31]

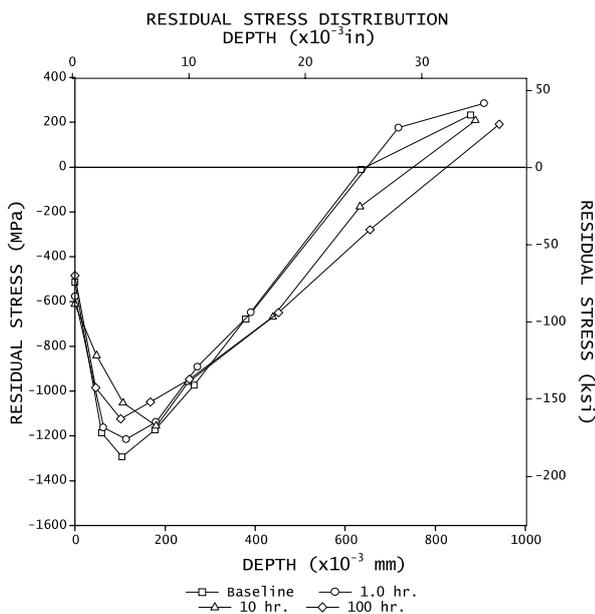


Figura 51: Andamento delle tensioni residue dell'Inconel® 718 trattato con Medium Low Plasticity Burnishing 600C [31]

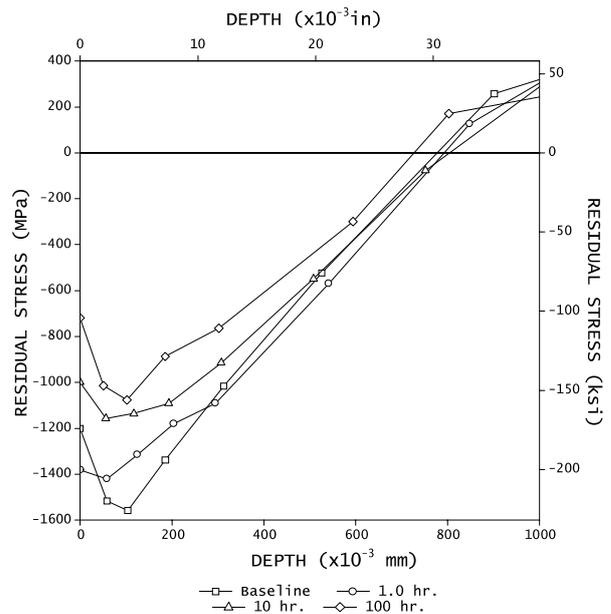


Figura 52: Andamento delle tensioni residue dell'Inconel® 718 trattato con High Low Plasticity Burnishing 600C [31]

### **§3.5 Conclusioni generali**

È fondamentale una corretta progettazione dei componenti nella vita a fatica alla quale sono sottoposti e la scelta del materiale. Tuttavia molto spesso per motivi economici o di peso o di concentrazione delle tensioni in determinate zone del componente, risulta molto utile un trattamento per incrementare la resistenza del materiale e in questo ambito, sono svariati i trattamenti impiegabili (possono essere termici o per incrudimento, come quelli analizzati).

I trattamenti analizzati in questo lavoro, si sono dimostrati tutti efficaci nel migliorare la resistenza alla vita a fatica dei materiali trattati, tuttavia, come visto negli esperimenti, non esiste un vero e proprio trattamento “perfetto” per un materiale o per tutti i materiali: vanno accuratamente scelti i parametri dei trattamenti da impiegare, anche utilizzando esperienze precedenti. Infatti, vuoi per le differenti caratteristiche fisiche dei materiali, vuoi per differenti esigenze progettuali (ad esempio la necessità di ridurre le tensioni in un determinato punto, nel quale si concentrano), può risultare più indicato un trattamento rispetto ad un altro.

Dei trattamenti analizzati, il Low Plasticity Burnishing e il Deep Rolling hanno mostrato una possibile applicazione anche in situ, al fine di limitare (in una progettazione a Damage Tolerance) lo sviluppo delle cricche affioranti.

Low Plasticity Burnishing e Deep Rolling, in virtù del tipo di trattamento, hanno mostrato anche miglioramenti della finitura superficiale dei materiali e ciò torna utile non solo per la riduzione dei punti di innesco superficiali delle cricche, ma anche per fini progettuali, qualora venga richiesta una superficie liscia ed uniforme. Tuttavia, questi trattamenti hanno mostrato limiti mano a mano che aumenta la durezza del materiale da trattare (quali ad esempio acciai o ghisa), poiché in queste situazioni è maggiore il cedimento elastico dello strumento, con conseguente riduzione della pressione di ricalcamento.

L’Ultrasonic Peening è risultato essere un valido trattamento con picchi di tensioni residue e profondità efficaci analoghe a quelle dello Shot Peening, tuttavia la necessità di creare un trasduttore che possa generare una specifica risonanza tale da imprimere una elevata energia cinetica ai pallini, ne limita l’impiego con conseguenti aggravii di costi qualora venissero modificate geometria e/o materiale del pezzo da trattare.

Lo Shot Peening essendo dotato di una ampia flessibilità di impiego (il macchinario di pallinatura non viene cambiato al variare del componente da trattare, variano solo i parametri di trattamento) e di un costo di trattamento contenuto (circa 30-40€ al metro), è un trattamento molto diffuso in ambito industriale con conseguenti continui affinamenti. Nello Shot Peening sono molto importanti sia la scelta del pallino che l’energia impressa dal macchinario ad essi, questo poiché se l’energia di impatto fosse troppo bassa (caso di materiale duro, pallino tenero e/o dotato di energia cinetica bassa), il trattamento risulterebbe inefficace; viceversa se l’energia di impatto fosse eccessiva, causerebbe un notevole peggioramento della finitura superficiale (con innesco di cricche superficiali dalle porosità) e/o un aumento della fragilità superficiale del materiale, con conseguente effetto contrario a quello desiderato.

Il Laser Shock Peening è un trattamento molto analizzato in campo accademico in virtù della sua capacità di ottenere buoni picchi di tensioni residue, ma soprattutto per la notevole capacità di penetrare in profondità, con conseguente minor decadimento con l’aumentare dei cicli e/o della temperatura al quale è sottoposto il componente trattato. Al momento, è un trattamento ancora “acerbo” in campo industriale (eccetto alcune determinate applicazioni in campo aeronautico, dove le necessità progettuali richiedono precise caratteristiche, espresse solo da questo trattamento) poiché il costo di trattamento è ancora eccessivo (circa 300-400€/mq) a fronte di comportamenti analoghi a quelli degli altri trattamenti. In futuro, con la riduzione dei costi del macchinario che genera il raggio laser e con il miglioramento prestazionale del trattamento, si prevede una ampia applicazione in campo industriale, anche in virtù della possibilità di creare macchinari per Laser Shock Peening da portare in situ e dunque applicarlo efficacemente alle riparazioni.

Una metodologia di trattamento che ha mostrato elevate potenzialità (soprattutto prestazionali) è il doppio trattamento, prima con Laser Shock Peening e poi con Shot Peening. Questa metodologia di trattamento unisce i vantaggi del Laser Shock Peening (l'elevata stabilità delle tensioni e l'elevata profondità efficace) con quelli dello Shot Peening (elevato picco di tensioni residue), anche se, come mostrato nei test, questo miglioramento presenta un massimo, oltre il quale il trattamento va ad inficiare la duttilità del materiale, con conseguente decadimento della prestazione.

### **§3.6 Riferimenti bibliografici capitolo 3**

- [1] Y.K. Gao IMPROVEMENT OF FATIGUE PROPERTY IN 7050-T7451 ALLUMINIUM ALLOY BY LASER PEENING AND SHOT PEENING, *Materials Science and Engineering A* (2011).
- [2] G.S. Geng, J.H. Xu, Surface integrity and fatigue property of a high speed milled titanium alloy, *Advanced Materials Research* 53-54 (2008) 305-310.
- [3] Y.-K. Gao, F. Lu, M. Yao, Influence of mechanical surface treatments on fatigue property of 30CrMnSiNi2A steel, *Surface Engineering* 21 (2005) 325-328.
- [4] Y.-K. Gao, M. Yao, J.-K. Li, An analysis of residual stress fields caused by shot peening, *Metallurgical and Materials Transactions A* 33A (2002) 1775-1778.
- [5] C.A. Rodopoulos, J.S. Romero. S.A. Curtis, E.R. de los Rios, P. Peyre, Effect of Controlled Shot Peening and Laser Shock Peening on the Fatigue Performance of 2024-T351 Alluminium Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance – Volume 12(4) August 2003* 414-419.
- [6] Anon: *Metals Handbook*, 9th ed., H.E. Boyer and T.L. Gall, ed., American Society of Metals, Metals Park, OH, 1997.
- [7] R.K. Nalla, I. Altenberger, U. Noster, G.Y. Liu, B. Scholtes, R.O. Ritchie, On the influence of mechanical surface treatments-deep rolling and laser shock peening-on the fatigue behavior of Ti-Al6-4V at ambient and elevated temperatures, *Materials Science and Engineering A335* (2003) 216-230.
- [8] D. Eylon, Summary of Available Information on the Processing of the Ti-Al6-4V HCF/LCF Program Plates, Univ. Of Dayton, Report 1998.
- [9] C.S. Montross, T. Wei, L. Ye, G. Clark, Y.W. Mai, *Int. J. Fat.* 24 (2002) 1021.
- [10] A. Drechsler, T. Dörr, L. Wagner, *Mater. Sci. Eng. A* 243 (1998) 217.
- [11] G. Hammersley, L.A. Hackel, F. Harris, *Optics Lasers Eng.* 34 (2000) 327.
- [12] L.F. Coffin, *Trans. ASME* 76 (1954) 931.
- [13] B. Scholtes, I. Altenberger, U. Noster, in: T. Chandra, K. Higashi, C. Suryanarayana, C. Tome (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials-Thermec 2000 (Special Issue: J. Mater. Processing Tech.)*, Sec. A1, Vol. 117/3, Elsevier Science, UK, 2001.
- [14] B. Scholtes, *Eigenspannungen in mechanisch randsschichtverformten werkstoffzuständen*, DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, Germany, 1990.
- [15] B. Scholtes, Assessment of residual stresses, in: V. Hauk (Ed.), *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*, Elsevier, Amsterdam, 1997, p.590.
- [16] G.A. Webster, in: H.P. Lieurade (Ed.), *Fatigue and Stress of Engineering Materials and Structures*, IITT-International, Gournay-Sur-Marne, France, 1989, p.9.
- [17] I. Altenberger, B. Scholtes, U. Martin, H. Oettel, *Mater. Sci. Eng.* 264A (1999) 1.
- [18] K. Lu, J. Lu, *J. Mater Sci. Technol.* 15 (1999) 193.
- [19] C. Moelle, Ph.D. thesis, University Berlin (TU), Germany, 1996.
- [20] K. K. Liu, M. R. Hill, The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-Al6-4V coupons, *Tribology International* 42 (2009) 1250-1262.

- [21] ASTM E466-96. Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials. ASTM Standards, Pennsylvania: ASTM, 1999.
- [22] Prime MB, Residual stress measurement by successive extension of a slot: the crack compliance method, *Appl. Mech. Rev.* 1999, 52, 75-96.
- [23] Rankin JE, Hill MR, Hackel LA., The effects of process variations on residual stress in laser peened 7049-T73 aluminium alloy, *Mater. Sci. Eng.* 2003, A349, 279-291.
- [24] M.A.S. Torres, H.J.C. Voorwald, An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel, *International Journal of Fatigue* 24 (2002), 877-886.
- [25] Gurova T et al., Study of residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension in a 5.0Cr and 0.5Mo steel, *Scr. Mater.* 1997, 36(9), 1031-1035.
- [26] DeLizia AT, Influence of shot peening on the residual stresses in spring steel plate. In: *Proceedings of ICP-2, Chicago, 1984*, 237-240.
- [27] Li Jk, Zhang R, Yao M., Experimental study on the compressive residual stress field introduced by shot peening, *ICRS3*, 1991, 750-757.
- [28] Faraahi GH, Lebrun JL, Couratin D, Effect of shot peening on residual stress and fatigue life of a spring steel. *Fatigue Fract. Eng. Master Struct.* 1995, 18(2), 211-220.
- [29] Turnbull A et al., Improving the fatigue crack resistance of waspaloy by shot peening, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 1998, 21, 1513-1524.
- [30] A. Sandá, V. García Navas, O. Gonzalo, Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample, *Materials and Design* 32 (2011) 2213-2220
- [31] J. Telesman, T. Gabb, P. Kantzos, FOD resistance and fatigue crack arrest in low plasticity burnished IN718, NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH

