

L'ingegneria delle superfici: lo shot peening

UNO DEGLI ARGOMENTI PIÙ "CALDI" DEL MOMENTO È SENZA DUBBIO L'INGEGNERIA DELLE SUPERFICI, INTESA COME QUELLA DISCIPLINA CHE MIRA AD INCREMENTARE LE CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DEI COMPONENTI MEDIANTE TRATTAMENTI LOCALIZZATI CHE NE MODIFICHINO LE PRESTAZIONI SUPERFICIALI LASCIANDO INVARIATE QUELLE "A CUORE". ESISTE UN TRATTAMENTO CONSOLIDATO DA ANNI A LIVELLO INDUSTRIALE CHE RIENTRA A PIENO TITOLO NEL CAMPO DELL'INGEGNERIA DELLE SUPERFICI: SI TRATTA DELLO SHOT PEENING, TALVOLTA INDICATO ANCHE COME PALLINATURA CONTROLLATA.

Francesco Chichi

Lo shot peening in breve

Nonostante sia un processo industriale assolutamente consolidato e maturo, lo shot peening (o pallinatura controllata) rimane tutt'oggi un processo troppo spesso sottovalutato se non sconosciuto.

La sua apparente semplicità esecutiva, il fatto di essere apparentemente simile a processi come la sabbiatura o la granigliatura fa sì che molti considerino lo shot peening poco più di una finitura superficiale, buona per smussare gli spigoli e dare una buona finitura alla superficie. In realtà lo shot peening è un trattamento estremamente raffinato e complesso, in grado di incrementare significativamente quasi tutte le caratteristiche di resistenza in esercizio dei materiali metallici. Tuttavia dietro la sua apparente semplicità si nasconde un processo che per sviluppare in pieno le sue potenzialità richiede una specifica competenza per la scelta dei materiali da utilizzare e per la messa a punto dei parametri di processo, messa a punto che, a sua volta, richiede attrezzature di controllo estremamente specifiche, pena il rischio di un'assoluta inefficacia o addirittura un danneggiamento del materiale trattato. A prima vista, nulla sembra distinguere lo shot peening da una semplice sabbiatura, con un ugello (più raramente una turbina) che proietta un getto di particelle di "sabbia" contro la superficie dell'oggetto sotto trattamento: in realtà, vedremo come la "sabbia" che viene sparata sia tutto tranne che sabbia, e che il modo con cui viene sparata porta a profonde modificazioni della struttura del materiale, con conseguente variazione di molte delle sue caratteristiche. Volendo descrivere in breve lo shot peening, possiamo definirlo un processo basato sulla proiezione di particelle solide, realizzabili in diversi materiali e normalmente indicate come "media", contro la superficie del materiale da trattare ad una velocità variabile da 30 m/s a 140 m/s, con l'obiettivo di indurre la plasticizzazione degli strati superficiali del materiale, plasticizzazione che a sua volta induce uno stato tensionale compressivo negli strati immediatamente adiacenti, come illustrato in figura 1.

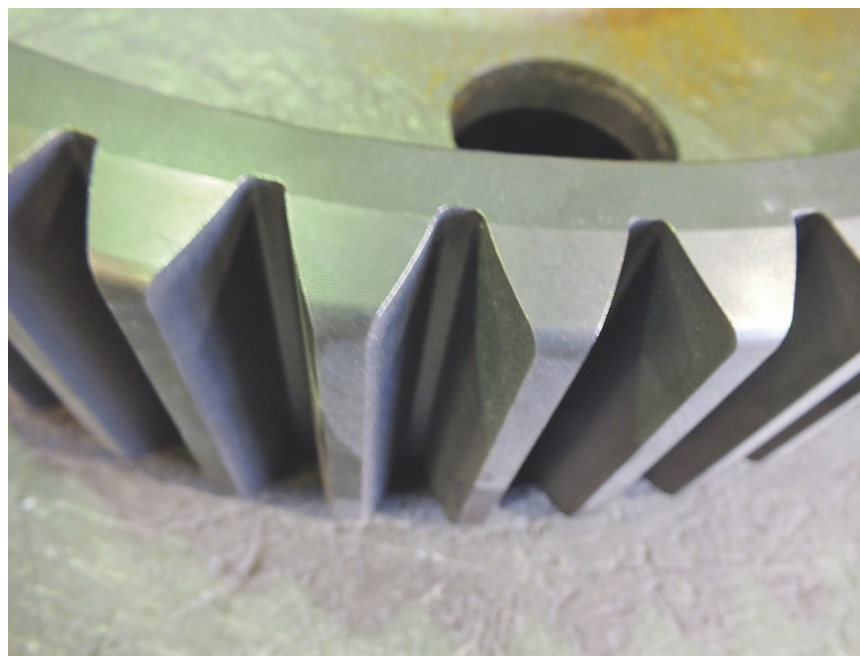
Tale plasticizzazione e conseguente stato tensionale trattivo in superficie comporta per il materiale

- Indurimento superficiale
- Cambiamento della struttura metallurgica per plasticizzazione
- Instaurarsi di uno stato compressivo per una profondità di 20 – 80 mm
- Finitura superficiale

Vediamo quindi quali siano i meccanismi che portano a questo risultato, quali parametri di processo abbiamo a disposizione per modulare gli effetti del trattamento e cosa tali cambiamenti comportino per la funzionalità del componente in esercizio.

Fondamenti fisici dello shot peening

Come punto fermo iniziale, chiariamo immediatamente che con lo shot peening si rimane sempre e comunque in un ambito puramente meccanico: i meccanismi attraverso cui si interviene sulle caratteristiche del materiale sono meccanici, i parametri di processo su cui intervenire per l'ottimizzazione del risultato sono meccanici, così come meccaniche sono le caratteristiche che vengono modificate. Siamo quindi nell'ambito della meccanica, ma di una meccanica un po' "particolare", la cosiddetta meccanica dell'im-



patto, che non rientra né nella statica né nella dinamica

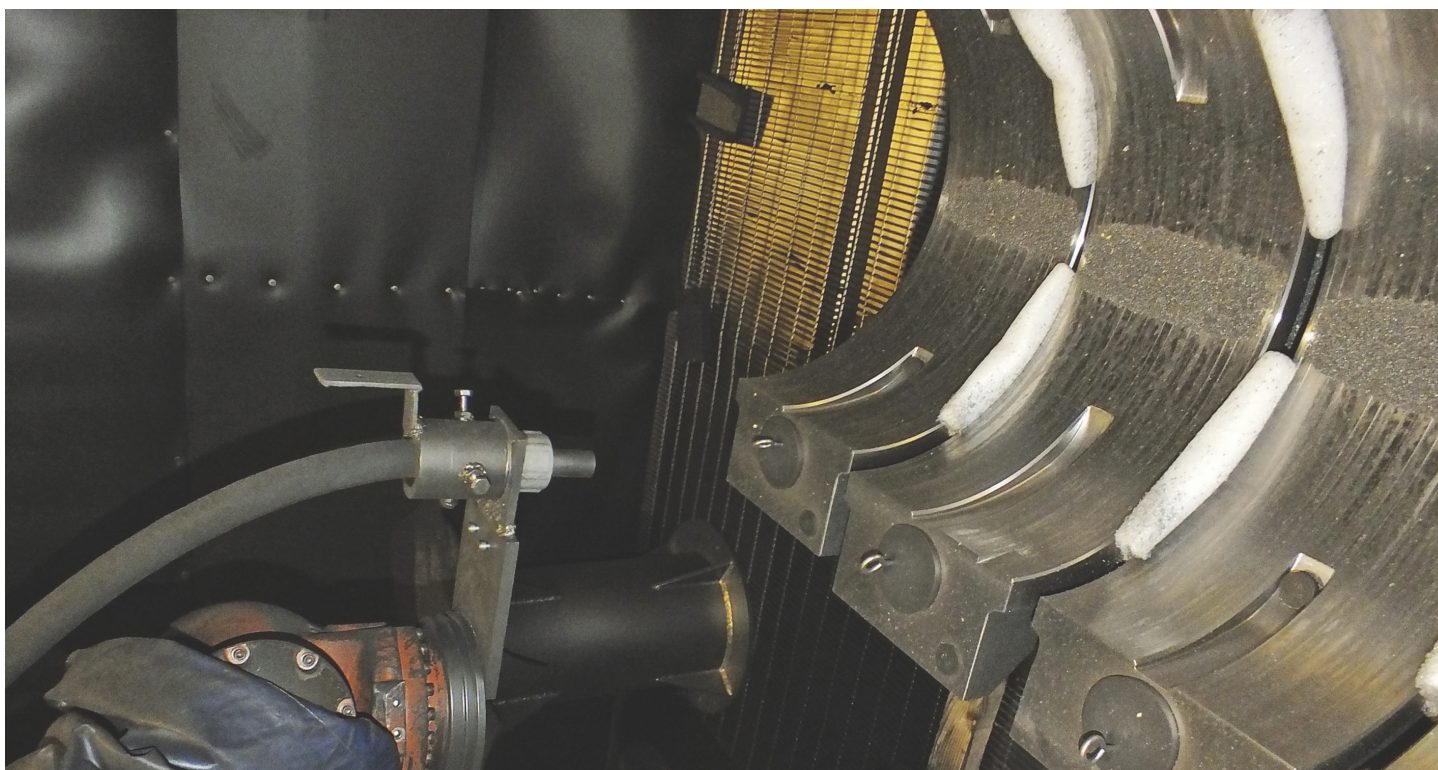
Solitamente, le sollecitazioni con cui si ha a che fare nel campo dell'ingegneria risultano essere sollecitazioni statiche o sollecitazioni dinamiche, dove:

- le sollecitazioni statiche sono quelle che possono essere affrontate come uno stato di equilibrio, ossia uno stato in cui l'applicazione della forza e la risposta delle strutture si considerano costanti per un tempo indefinito,
- le sollecitazioni dinamiche sono quelle in cui la sollecitazione si considera applicata per un tempo finito e si analizzano le evoluzioni temporali, di spostamento o deformazioni, delle strutture a cui tali forze sono applicate, considerando comunque tali evoluzioni temporali come una successione di stati di equilibrio statico.

Che ci si trovi di fronte a sollecitazioni statiche o dinamiche, in entrambi i casi si considera che sia sempre tutta la struttura dei corpi coinvolti a rispondere alle sollecitazione.

Al contrario si parla di meccanica dell'impatto quando gli effetti della sollecitazione indotta dall'urto si attuano in un lasso di tempo talmente breve che l'energia dell'impatto stesso non riesce ad essere redistribuita su tutta la struttura ma si concentra nella parte di struttura immediatamente adiacente alla zona di impatto, in una condizione in cui le caratteristiche del materiale risultano preponderanti rispetto alla geometria complessiva della struttura.

Quello che fa da confine tra il poter applicare le leggi della meccanica classica o il dover ricorrere alle leggi della meccanica dell'impatto è la velocità con cui i corpi entrano in contatto, o per meglio dire la relazione tra la durata dell'impatto e il tempo naturale della struttura colpita: in termini "intuitivi" possiamo dire che si entra nel campo della dinamica dell'impatto quando la velocità con cui l'energia trasmessa dall'urto si scarica sul materiale è superiore alla velocità con cui il materiale riesce a trasmettere tale energia al materiale adiacente: in questo caso tale energia



finisce per concentrarsi su un volume di materiale molto ristretto, amplificando a dismisura i suoi effetti. Pertanto nel caso di un impatto la grandezza significativa non è tanto la “quantità di energia” trasmessa dall’urto quanto una sorta di “densità di energia”, intesa come il rapporto tra l’energia dell’impatto e il volume di materiale che finisce per assorbirla. E poiché il volume coinvolto è tanto minore quanto maggiore è la velocità dell’impatto, ne consegue che, a parità di energia cinetica posseduta dalla particella che colpisce il materiale, quanto maggiore è la sua velocità tanto minore sarà il volume del materiale che ne assorbirà gli effetti, e quindi tanto maggiore sarà il contenuto di “danneggiamento” locale. La modellizzazione degli effetti di un impatto è molto più complessa rispetto a quella di una condizione di “classico” carico statico o dinamico, in quanto l’elemento costituito dal lasso di tempo entro cui l’impatto si sviluppa comporta scenari assolutamente diversi : dobbiamo anzi dire che non esiste una “meccanica dell’impatto” che permetta di modellarne i fenomeni in maniera esaustiva, ma solo diversi modelli semplificati che prendono in considerazione casi specifici (basta pensare che l’impatto può essere quello di un proiettile su una corazzatura, di un veicolo contro il guard-rail, di un granello di ghiaia contro un vetro e così via). Detto questo, possiamo tornare a concentrarci sul nostro shot peening.....

Dalla teoria dell’impatto alla pratica dello shot peening

Per analizzare in dettaglio cosa avvenga durante un trattamento di shot peening e definire con chiarezza quali siano i meccanismi che entrano in gioco, consideriamo una singola particella all’interno del flusso proiettato dall’ugello

Nel momento in cui la particella viene espulsa dall’ugello, dalla meccanica tradizionale sappiamo che essa possiede un’energia

E pari a

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Dove

m= massa della particella
v= velocità della particella

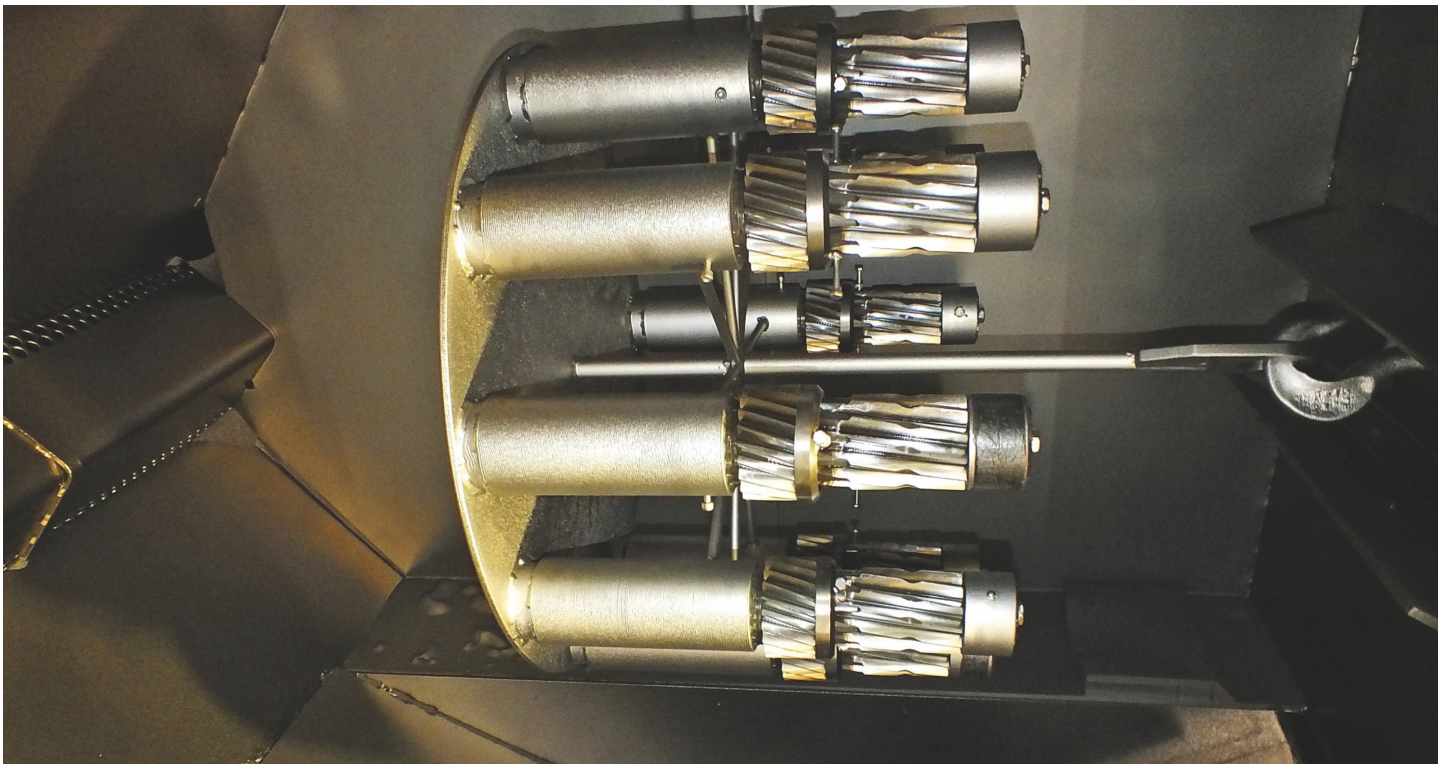
Nel caso in cui siano verificate le condizioni della meccanica dell’impatto, nel caso particolare dello shot peening il modello interpretativo parte dalle ipotesi che

- 1) le dimensioni delle particelle proiettate sono sempre infinitesime rispetto al componente da trattare
- 2) la massa delle particelle è sempre infinitesima rispetto alla massa del componente da trattare
- 3) la componente di velocità del componente da trattare è trascurabile rispetto a quella delle particelle, e quindi che l’intero contenuto energetico dell’impatto coincide con l’energia cinetica delle particelle

sotto queste ipotesi, nel momento in cui la particella impatta sulla superficie da trattare, dalla fisica incompenetrabilità dei corpi rigidi deriva la nascita di una pressione di contatto fortemente localizzata, pressione che si traduce in una forza di deformazione interna agente reciprocamente sui due corpi.

Progressivamente tale energia di deformazione assorbe l’energia cinetica della particella fino ad annullarne la velocità, ponendo termine alla cosiddetta fase di compressione, al termine della quale l’energia di deformazione può, alternativamente,

- essere rimasta nel campo elastico
- aver raggiunto il campo plastico



- aver superato il limite di rottura .

Al termine della fase di compressione inizia la fase di restituzione, in cui la componente di energia di deformazione rimasta in campo elastico genera la forza sufficiente a portare al distacco della particella (o di quello che ne è rimasto...) dal corpo impattato . Come abbiamo appena visto, l'impatto della particella può avere anche l'effetto di indurre una deformazione plastica sul materiale colpito : e nel caso dello shot peening è proprio questa deformazione plastica l'effetto voluto. Ricordando il meccanismo anticipato nella parte iniziale dell'articolo, il meccanismo attraverso cui si arriva alla plasticizzazione superficiale del materiale è quello visto in figura 1

- a) La sollecitazione indotta dall'urto delle particelle proiettate induce una deformazione plastica compressiva del materiale superficiale ortogonalmente alla superficie stessa.
- b) Per effetto Poisson, a tale deformazione plastica compressiva corrisponde una deformazione plastica di segno opposto parallelamente alla superficie
- c) Il materiale sottostante, ancora in campo elastico, risulta sollecitato in trazione, a cui risponde con una risposta elastica in compressione, generando quindi i desiderati stati compressivi

La gestione del processo

La rapida trattazione appena vista dei meccanismi dell'impatto ci fa capire come la sola energia di impatto delle particelle proiettate non possa assolutamente essere in grado di far prevedere gli effetti, ma che tali effetti siano frutto della combinazione tra

- velocità di impatto
- massa della singola particella
- caratteristiche meccaniche del materiale dei media (durezza, modulo elastico, limiti di rottura e snervamento)
- caratteristiche meccaniche del materiale trattato (durezza, mo-

dulo elastico, limiti di rottura e snervamento)

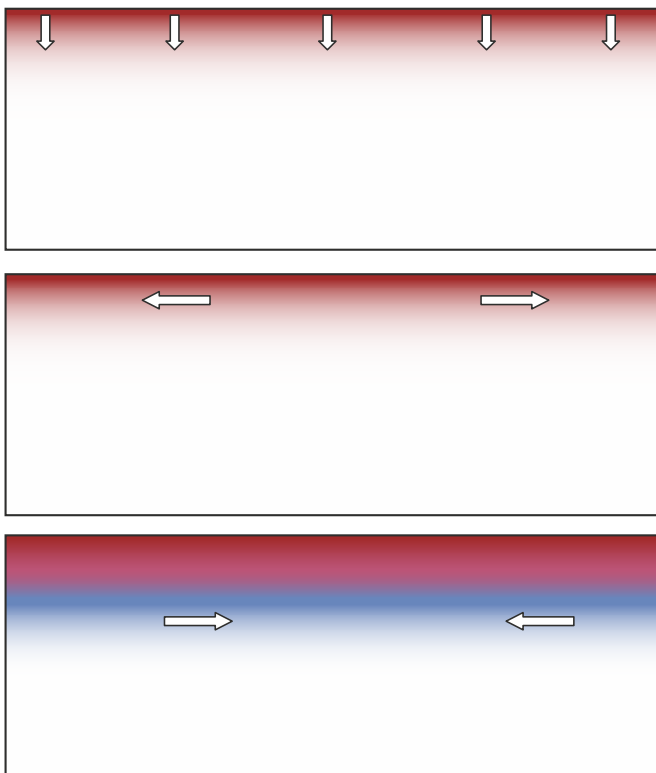
Per avere una prima comprensione intuitiva di come i vari parametri influiscano sul processo, consideriamo l'effetto di variazioni della massa e della relativa velocità associata, a parità di tutte le altre caratteristiche coinvolte. La velocità influisce direttamente sulla densità di energia nel punto di impatto: aumentando la velocità di impatto diminuisce la zona entro cui l'energia di impatto si disperde, concentrandone quindi gli effetti sulla superficie. La massa dei media influisce invece sulla dimensione della particella e relativa impronta sul materiale trattato, con conseguente effetto sulla rugosità finale del manufatto. Inoltre, è intuitivo considerare che all'aumentare delle dimensioni della particella aumenta l'energia eventualmente necessaria per arrivare alla sua frantumazione, aumentando quindi la capacità potenziale delle particelle di trasferire sul materiale energia utile al processo di deformazione superficiale. Questo significa che, a parità di energia cinetica delle particelle proiettate, la scelta di un processo ad alta velocità con media di piccole dimensioni comporta una profondità efficace del trattamento ridotta e una ottima finitura superficiale, mentre la scelta di una bassa velocità accoppiata a particelle di dimensioni maggiori garantisce una maggiore penetrazione del processo ma con una maggiore rugosità della superficie finale. Passando invece ad analizzare la relazione tra le caratteristiche meccaniche del materiale dei media e quello del componente, la prima considerazione da fare è che la durezza del materiale utilizzato per le particelle proiettate deve sempre essere maggiore o uguale a quella del materiale trattato.

Definito questo punto, vediamo cosa comportano le altre caratteristiche meccaniche dei materiali

Il modulo elastico dei materiali influisce sul rising time : aumentando la rigidità del materiale diminuisce il tempo necessario per completare la fase di compressione ed iniziare la fase di restituzio-

La creazione degli stati tensionali trattivi presenti al termine di un trattamento di shot peening

- La sollecitazione indotta dalle particelle che colpiscono la superficie porta alla deformazione plastica compressiva del materiale superficiale ortogonalmente a tale superficie
- Per effetto Poisson, a tale deformazione plastica compressiva corrisponde una deformazione plastica di segno opposto parallelamente alla superficie
- Il materiale sottostante, ancora in campo elastico, risulta sollecitato in trazione, a cui risponde con una risposta elastica in compressione, generando quindi i desiderati stati compressivi



ne, accorciando il tempo in cui il materiale può arrivare a deformarsi e quindi la penetrazione dello stato plasticizzato, come appena visto nella trattazione di massa e velocità.

Per avere una conferma intuitiva basti pensare al rimbalzo di una sfera di acciaio su una lastra parimenti di acciaio o su una di alluminio: il "rimbalzo" nel primo caso è molto più alto e molto più veloce, ad indicare come la deformazione elastica della lastra di acciaio sia più rapida e permetta di restituire una maggiore quantità di energia. Pertanto materiali "rigidi" tendono ad accorciare i tempi di risposta all'urto e quindi la profondità di penetrazione a vantaggio della deformazione superficiale. Il limite di deformazione plastica assume invece un significato completamente diverso per le particelle proiettate e per la superficie colpita: nel caso delle particelle esso regola l'eventuale aumento della superficie di contatto tra particelle e materiale sotto trattamento a seguito della deformazione, con conseguente diminuzione della densità di energia: costituisce quindi un primo limite alla quantità di energia trasferibile dalle particelle alla superficie colpita. Nel caso del materiale della superficie colpita, il limite di deformazione plastica assume invece una importanza doppiamente fondamentale, in quanto è proprio il suo superamento ad innescare il meccanismo di plasticizzazione che sta alla base di tutti gli effetti dello shot peening. Un basso limite di snervamento minimizza la quantità di energia accumulata in deformazione elastica e quindi massimizza la parte di ener-

gia utilizzata per la plasticizzazione del materiale, per cui un basso limite di snervamento favorisce l'aumento della profondità di penetrazione.

D'altro canto è noto come lo stato tensionale compressivo indotto sia una frazione percentuale (dal 50 al 70 %) del limite di snervamento, per cui un basso limite di snervamento limita anche il valore dello stato compressivo raggiungibile

Il limite di rottura risulta invece più significativo per le particelle proiettate che per il materiale trattato.

Nel caso della particella esso influisce direttamente sulla fragilità delle particelle stesse, e quindi della quantità di energia utile trasferibile dalle particelle al materiale trattato: particelle con bassi limiti di rottura possono essere utilizzati come una sorta di "limitatore di sicurezza" per impedire plasticizzazioni eccessive del materiale trattato (per evitare, ad esempio, rugosità troppo elevate o variazioni geometriche in zone soggette a ridottissime tolleranze)

Nel caso del materiale trattato il limite di rottura influisce invece sulla comparsa di cricche superficiali, dovute alla componente di trazione parallela alla superficie indotte per effetto Poisson dalle sollecitazioni in compressioni generate normalmente alla superficie

Si ringrazia 2Effe Engineering srl per la collaborazione prestata alla stesura del servizio e per il permesso di pubblicazione delle foto scattate all'interno dello stabilimento di Soiano del Lago (BS) ■

© RIPRODUZIONE RISERVATA