



La Robot Laser Hardening (RLH) è una procedura ampiamente utilizzata nel trattamento superficiale dei metalli. Modificandone le proprietà superficiali, consente di ottenere diversi vantaggi pratici, quali minori costi di lavorazione, nessun utilizzo di olii refrigeranti e prodotti chimici, elevata flessibilità, tempra locale, deformazione minima, elevata precisione e un processo automatizzato e integrato. Tuttavia, la rugosità finale dipende molto dai parametri applicati in modi che non sempre è facile comprendere e prevedere.

La tempra laser, o *laser hardening* in anglosassone, rappresenta un trattamento termico superficiale molto diffuso, in grado di aumentare anche in modo significativo la durezza dei metalli. Sotto il raggio laser, infatti, si forma la martensite, una struttura metallica molto dura e fine, che indurisce il materiale di partenza.

A differenza di altri processi di tempra termica (tempra volumetrica, per correnti ad alta frequenza, riscaldamento elettrico...), il processo laser non è un metodo volumetrico, ma superficiale e locale, che esclude così cambiamenti significativi nella geometria delle parti (macro e micro). Il laser concentra infatti tutta la sua energia sulla superficie, lasciando il nucleo di materiale nel suo stato originale: minore è calore diffuso, minore è la distorsione nel metallo.

Per di più, la tempra laser può essere eseguita anche senza arrivare a fondere gli strati superficiali, evitando così di influenzare la rugosità della superficie e la necessità di ulteriori lavorazioni (ad esempio molatura, lucidatura...). A tutto questo si aggiunge altresì la possibilità di indurire [materiali](#) piuttosto convenzionali, rendendoli così adatti a sostituire le più costose e complesse leghe speciali, utilizzate di solito per garantire la necessaria resistenza a usura. Quando il raggio laser è veicolato da un robot, il processo prende la denominazione di *Robot Laser Hardening* (RLH). L'impiego dei robot aggiunge alla tempra laser altri vantaggi, quali estrema precisione, velocità, efficienza energetica e altro ancora. In un precedente lavoro pubblicato su **Trattamenti e Finiture** (03/2019) è stato già mostrato come il RLH porti a indurire il materiale fino ad oltre 1,5 mm di profondità, migliorando nettamente la resistenza a usura e fatica, a fronte di un costo aggiuntivo non superiore al 15-20%.

Il ciclo termico dalla RLH è tra l'altro il più veloce tra i cicli termici proposti dai metodi di tempra più comuni. Questo garantisce un'elevata velocità di riscaldamento e di raffreddamento delle superfici con effetti quali: elevata durezza superficiale, dispersione ed uniformità della struttura, diminuzione del coefficiente di attrito, aumento della capacità portante degli strati superficiali. Inoltre, non emergono problemi di adesione tra lo strato indurito ed il substrato, tipici, ad esempio, dei rivestimenti. Infine, le moderne attrezzature RLH consentono di trattare superfici di grande complessità e dimensione, con benefici marcati sulla produttività: questo avviene tanto per la maggiore automazione dei processi ora consentita, ma anche per il fatto di trattare le sole zone di interesse.

## Materiali e metodi

In [Figura 1](#) è mostrata la piccola cella laser robotizzata utilizzata nello studio. Grazie a questa attrezzatura, è stato possibile trattare i provini di metallo mediante RLH modificando due diversi parametri di processo, temperatura e velocità, e di studiarne gli effetti sulla rugosità superficiale.

L'obiettivo del lavoro, in particolare, è stato quello di arrivare a prevedere la rugosità utilizzando tecniche piuttosto insolite, quali i grafi e l'intelligenza artificiale.

Un grafo è un concetto matematico che si è rivelato piuttosto utile in diverse situazioni, sia teoriche sia applicative. Può essere visto come un insieme di nodi utilizzati per rappresentare oggetti disgiunti tra loro e tra i quali esiste una connessione (solo) quando un nodo "vede" l'altro. Questa "rete di visibilità" diventa un grafo di posizioni interscambiabili, che consiste tipicamente in un insieme di punti, legami ed ostacoli nel piano euclideo (2D). In particolare, un grafo di visibilità è un tipo di grafico in cui ogni spigolo incidente a un vertice mostra la direzione degli altri vertici visibili.

Un sistema di intelligenza artificiale (AI) può essere esemplificato come un sofisticato algoritmo in grado di risolvere compiti complessi, anche senza avere a disposizione tutte le informazioni necessarie, grazie a modalità operative imprevedibili, più simili a una forma di intelligenza intuitiva che a una valutazione razionale. L'uso dei sistemi AI è consolidato nello studio dei materiali e nella previsione delle loro proprietà anche in situazioni del tutto eccezionali. In un precedente lavoro articolo di **Trattamenti e Finiture**, ad esempio, una rete neurale artificiale di tipo tradizionale è stata utilizzata per calcolare la resistenza alla trazione degli strati di carburo di alluminio-silicio a partire dall'angolo di salita dell'onda di emissione acustica.

Nella presente analisi, i grafi sono stati utilizzati per trasformare le superfici da analizzare (ossia quelle trattate mediante RLH) in schemi numerici tali da poter essere così classificati attraverso un riconoscimento di schemi (*pattern*).

Allo scopo, sono state utilizzate e confrontate:

- la programmazione genetica (GP): un metodo efficiente e universale per risolvere i problemi di regressione simbolica, *data mining*, ottimizzazione di progetto e ricerca di comportamenti emergenti, attraverso algoritmi evolutivi basati sui concetti di selezione naturale ed evoluzione. Anche in questo caso, l'output è rappresentato dalla rugosità superficiale.
- le reti neurali convoluzionali (CNN): una tipologia speciale di reti neurali artificiali, basate su indicatori di caratteristiche locali invarianti, collegate tra loro da parametri adattabili (pesi). In queste reti, uno strato di convoluzione è spesso seguito da uno strato di *pooling*, che comprime le informazioni (solitamente massimizzando o mediando i valori locali) al fine di ridurre efficacemente le grandi quantità di dati (che sono tipiche nell'analisi di immagini). Entrambi i livelli, convoluzione e *pooling*, possono essere riapplicati più volte per ampliare la coerenza dei dati. L'uscita dell'ultimo strato (output) prevede variabili *target*, nel nostro caso la rugosità superficiale.