

Monitoraggio con sensore piroelettrico del processo di saldatura laser a CO₂

F C. Fortunato⁽¹⁾, M. Mazzoni⁽¹⁾,

⁽¹⁾ IFAC-CNR, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), Italy

1 - Introduzione

In industrie come quella automobilistica o aerospaziale, il laser a CO₂ ad onda continua è ampiamente usato per la saldatura di lamine metalliche [1].

I sensori all'infrarosso sono spesso adoperati per il monitoraggio [2, 3] del processo di saldatura. L'energia infrarossa spesso viene presa in considerazione come importante parametro da monitorare [4]. Per questo scopo si è scelto di usare un sensore piroelettrico; spesso tali tipi di sensore sono utilizzati per l'allineamento del fascio laser IR [5] o in ambiti di human recognition [6]. Gli elementi piroelettrici costituiscono alcune camere FLIR.

Per quanto riguarda il monitoraggio on-line della saldatura, si è voluta testare la velocità di risposta del nostro algoritmo che analizza i segnali provenienti da questo tipo di sensore, progettato per piccole variazioni di irradianza legate alla formazione di difetti. In particolare si è studiata la capacità di fornire un segnale di allertamento in situazioni in cui una variazione della potenza laser o della distanza di sfocamento, rispetto a valori ottimizzati, ha portato all'insorgere di difetti. Tre differenti algoritmi, presi in considerazione per il monitoraggio, sono stati in grado di identificare i difetti, indipendentemente l'uno dall'altro. Due di essi sono poi stati usati insieme per garantire sia il tempo di allertamento più breve, sia l'identificazione delle cause di malfunzionamento nella saldatura.

1.1 - Saldatura laser

Quando il fascio laser a fuoco fonde il metallo, si ha la formazione di un key-hole, sostenuto dall'evaporazione di metallo dal bagno fuso. In seguito alla ionizzazione del gas di assistenza (N₂) e dei vapori metallici, si ha anche la formazione di plasma all'interno e superiormente al key-hole. L'emissione infrarossa dal bagno fuso è tipicamente nel range 900-2300 nm [2]. Nel caso in cui si usi l'azoto come gas di assistenza, il plasma da esso derivante oscura periodicamente sia il plasma dei vapori metallici sia il key-hole [7]. Al processo di saldatura sono associati diversi segnali caratteristici del rivelatore piroelettrico. I segnali bipolari dal sensore piroelettrico sono proporzionali alle variazioni nelle emissioni di radiazione (prevalentemente nella regione NIR). I contributi nell'ultravioletto, nel visibile e provenienti da retro-riflessioni sono stati minimizzati adoperando un filtraggio spettrale.

Poichè la risposta del sensore è una derivata nel tempo, ci si aspetta che sia più sensibile ai transienti indotti, anche quelli che si verificano in seguito all'oscuramento che precede la formazione del key-hole, dovuti a forti assorbimenti della radiazione laser e alla fase opaca del plasma.

2 - Setup sperimentale e metodo

Per il sensore piroelettrico si è usato un singolo elemento realizzato con un film di PVDF (spessore 9 µm, area 6x6 mm²), un amplificatore di transimpedenza a basso rumore e guadagno pari a 2 GΩ, ampia dinamica di uscita (± 15 V) e frequenza di taglio pari a 1 kHz. Il sensore è stato munito di ottica di raccolta e focheggiamento e di un filtro-modulatore di tipo ferroelettrico con trasmissione ottimizzata nel NIR fino a 7000 nm [8], allo scopo di raccogliere tutti i contributi IR derivanti dal bagno fuso e dalle zone circostanti. La frequenza di modulazione del filtro-modulatore non è stata ottimizzata rispetto ad alcuna frequenza del processo e la profondità di modulazione è risultata pari a circa il 12% [8].

Per l'acquisizione dati si è usato un oscilloscopio digitale LeCroy WaveJet 312A, con 8 bit di risoluzione verticale e frequenza di campionamento pari a 50 kHz.

La sorgente laser utilizzata è stata un laser a CO₂ (El.En.), potenza massima 2 kW. La testa di focheggiamento del CRF (Centro Ricerche FIAT) ha una distanza focale di circa 200 mm. Il gas di assistenza adoperato è stato l'azoto (N₂) ad un flusso pari a 5 l/min; la velocità della slitta sulla quale sono alloggiati i lamierini è stata di $v = 1.1$ m/min. I campioni sono lamierini in FePO₄, spessi 0.7 mm, con una zincatura spessa 10 µm. Data la presenza di zincatura, è richiesto un gap tra le facce dei due lamierini che si sovrappongono; nel nostro caso il gap usato è pari a 0.2 mm.

Il sensore è stato sistemato a 20 cm circa dal punto di saldatura, ad un angolo di circa 45° rispetto al piano di saldatura.

I segnali bipolari derivanti dal sensore sono proporzionali alle variazioni di emissione di radiazione che si verificano durante il processo di saldatura. Dal momento che si tratta di derivate temporali, il sensore è più sensibile ad un transiente indotto che ad una emissione di radiazione costante. Per tale ragione una radiazione costante ha bisogno di essere modulata per essere rilevata. Il segnale varia in un intervallo di valori di tensione entro la banda (in questo caso di 1 kHz). In pratica vengono privilegiate tutte le componenti caratteristiche che cadono in questa banda. Un tipico segnale ottenuto è riportato in Fig. 1a in

funzione del numero di campioni: il segnale è stato ottenuto in condizioni ottimizzate di potenza laser e distanza di fuoco, che hanno prodotto una saldatura priva di difetti. In Fig. 1b si può notare un dettaglio della prima parte del segnale, corrispondente alla formazione del key-hole, in funzione della distanza dal punto di inizio (lo zero della scala). Numerosi “spikes” contribuiscono alla parte negativa, mentre il valor medio in condizioni stazionarie è positivo e si attesta ad un valore di 0.47 V. La traccia corrispondente alla formazione del key-hole è caratterizzata da un segnale ampiamente negativo in corrispondenza del quale si ha una bassa efficienza di saldatura [10]. In tali condizioni la penetrazione si verifica ad una distanza di 2 mm dall’inizio.

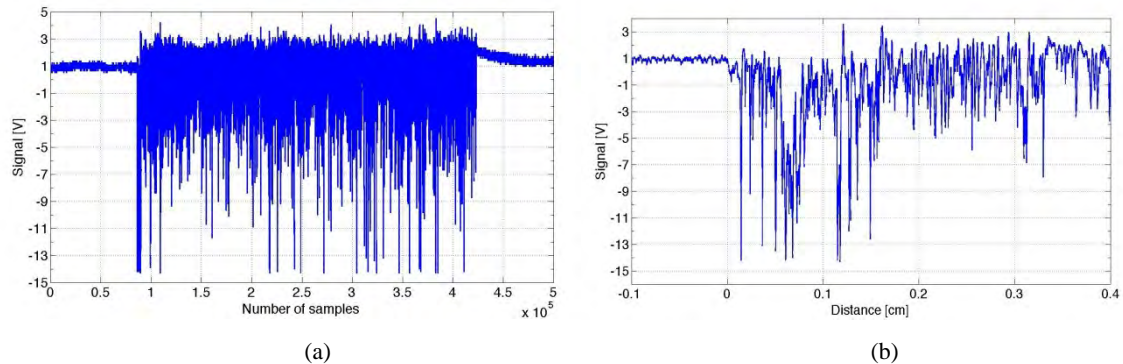


Fig. 1 - (a) Segnale dal sensore nel caso di miglior fuoco e potenza $P = 1940$ W.
(b) Uno zoom dello stesso segnale che mostra la formazione del key-hole.

I principali difetti sono stati trovati in corrispondenza di un segnale quasi costante, e/o di un brusco calo dello stesso, con un andamento generalmente meno ampio e meno profondo, ma simile a quello mostrato in Fig. 1b, tra 0 e 0.1 cm, nella fase di formazione del key-hole. Esempi tipici sono riportati nelle Fig. 2, 3 e 4. Questi tipi di difetti sono stati indotti da uno sfocamento del fascio laser, o da un calo della sua potenza rispetto al valore ottimale.

3 - Formazione dei difetti

Con il termine “difetto” si indicano le interruzioni nella saldatura dovute a mancate penetrazioni e i buchi presenti nei lamierini saldati. Essi sono associati ad uno o più crateri ed eiezioni di materiale fuso. Ciò nonostante i crateri visibili nella parte superiore dei lamierini non sempre corrispondono ad una mancata penetrazione nella parte inferiore. In Fig. 2 è mostrato un restringimento con circostanti eiezioni di materiale fuso nella parte superiore (b), in corrispondenza del quale si ha una mancata penetrazione nella parte inferiore (c) di circa 3 mm. Tale tipo di difetto è provocato dalla formazione di bolle all’interno del key-hole.

I segnali sono stati elaborati per una dimostrazione su PC con processore 2.2 GHz Intel core 2 duo, usando MATLAB®.

Per identificare i difetti con la maggior risoluzione spaziale (i.e. $18\mu\text{m}$, per una velocità di saldatura pari a 1.1 m/min), si è effettuata una elaborazione RMS del segnale, raggruppando un piccolo numero di dati, 50, acquisiti in 1 ms (tempo consistente con le caratteristiche della risposta temporale del sensore). Le forme d’onda impulsive possono essere accuratamente rilevate se il loro tempo di salita è maggiore della risposta temporale del sensore; tutti i transienti più brevi sono automaticamente attenuati. L’algoritmo è stato ottimizzato per rilevare i difetti in corrispondenza di un segnale “top-hat”, simili a quelli mostrati nelle Fig. 2a e 4a, con i risultati mostrati nelle Fig. 2e e 4b.

Dopo una fase di learning, durante la quale la potenza del laser e la distanza di sfocamento sono state cambiate separatamente, si è notato che i difetti vengono a trovarsi in un particolare intervallo di tensione, che è stato usato per la loro identificazione in campioni con lo stesso tipo di zincatura. Si è inoltre fatto uso di un tipo di analisi che considera la massima varianza di un certo numero di segnali, in particolare per il riconoscimento delle brusche variazioni legate alle differenze di potenza nella radiazione rilevata, che si è trovato essere in concomitanza con la formazione di un difetto.

L’analisi PCA e l’analisi attraverso le medie (MEAN) sono risultate particolarmente adatte a questo scopo. Il numero di campioni elaborati con queste due tecniche (i.e. 1375), corrispondente ad una lunghezza di saldatura di circa 0.5 mm (sempre alla velocità di scorrimento della slitta di 1,1 m/min), è

comunque risultato abbastanza piccolo così da poter sfruttare i vantaggi offerti dall'elevato sampling rate del segnale nell'individuazione dei difetti, che sono di lunghezza maggiore o paragonabile a 0.5 mm.

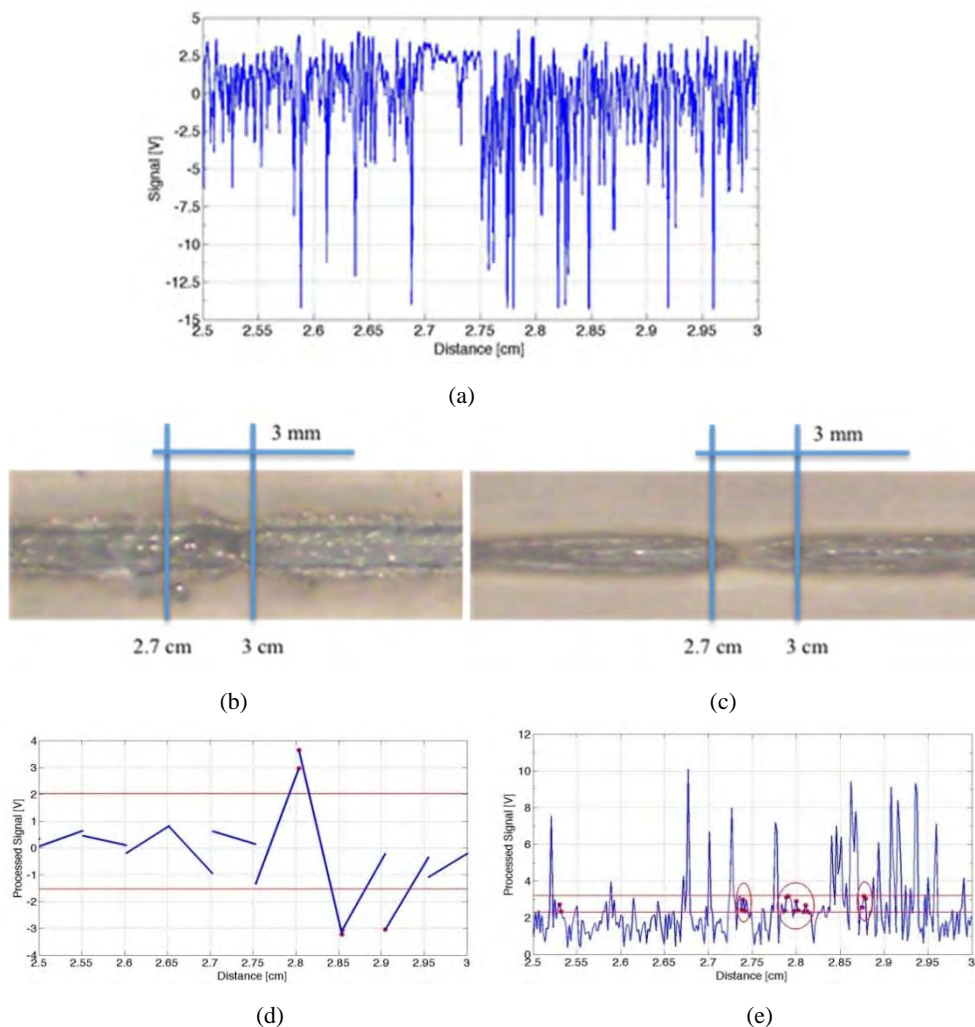


Fig. 2 - (a) Segnale relativo ad un tipico difetto con estensione da 2.7 cm a 3 cm.
 (b) Vista superiore del campione in cui si nota il cratere e le eiezioni associate.
 (c) Vista inferiore con la relativa mancata penetrazione.
 (d) Segnali di allertamento generati dall' algoritmo PCA in corrispondenza del difetto.
 (e) Segnali di allertamento generati dall' algoritmo RMS in corrispondenza del difetto.

4 - Descrizione del metodo PCA

L'Analisi alle Componenti Principali è una tecnica statistica molto utile per l'identificazione di patterns nei dati e l'individuazione di loro somiglianze e differenze. Il numero di campioni adoperati per la costruzione del data set è stato trovato nella fase di learning. Il metodo usato può essere descritto come una sequenza di passi:

- una volta raccolti i dati, cioè i segnali dal sensore piroelettrico, si è sottratta la media da ciascun data set e dalle corrispondenti lunghezze di saldatura;
- si è quindi calcolata la matrice di covarianza 2×2 . Gli autovettori derivanti da tale matrice sono tra loro perpendicolari e forniscono informazioni sui patterns nei dati;
- una volta trovati gli autovettori, essi sono stati ordinati sulla base del valore decrescente dei rispettivi autovalori e si è considerato solo il primo di essi, cioè quello con il maggior autovalore associato, scartando gli altri.

Sostanzialmente, con il metodo PCA si trasformano i dati in un nuovo sistema di coordinate, in modo che la maggior varianza associata a ciascuna proiezione dei dati viene a giacere sull'autovettore che si è

deciso di considerare. L'autovettore con il maggior autovalore (*FeatureVector*), rappresenta la *componente principale* del data set considerato nell'analisi. I dati finali (*Final_Data*) sono stati ottenuti moltiplicando la trasposta del *FeatureVector* per il data set originale, al quale era stata sottratta la media, (*RowData*).

$$Final_Data = FeatureVector^T \times RowData \quad (1)$$

Per la nostra analisi si è plottato ciascun segmento delle componenti principali, al quale si è aggiunta la media originariamente sottratta.

$$Re_Mapped_Data = (FeatureVector \times FinalData) + OriginalMean \quad (2)$$

5 - Generazione dei segnali d'allertamento

Una volta identificato il set ottimale dei valori dei parametri di saldatura, si è notato che un difetto può essere correlato ad un incremento del segnale bipolare che supera due valori di soglia, corrispondenti al massimo e minimo valore trovati nel caso di condizioni ottimizzate. Pertanto, ogni volta che l'ampiezza del segnale elaborato viene ad essere maggiore del massimo o minore del minimo, viene generato un segnale d'allertamento.

Visto che al momento non esiste uno strumento dedicato, in questa fase di simulazione i segnali sono stati elaborati usando MATLAB® e i segnali d'allertamento sono stati mostrati sullo schermo del PC non appena generati.

Nell'analisi PCA i segnali d'allertamento sono generati ogni volta che il *Re_Mapped_Data* attraversa almeno una delle due soglie di tensione. I valori delle soglie sono stati trovati come il massimo ed il minimo valore del *Re_Mapped_Data* durante la fase di learning, in condizioni ottimizzate. Sono stati considerati anche i risultati derivanti da $FeatureVector \times FinalData = Mapped_Data$.

Ciascun gruppo di 1375 campioni di dati è stato anche elaborato attraverso il valor medio dei segnali (algoritmo MEAN). Anche in questo caso si sono usate due soglie di tensione e si è notato che il tempo di elaborazione è molto basso, pari a circa 75 μ s. Uno dei risultati è mostrato in Fig. 3c.

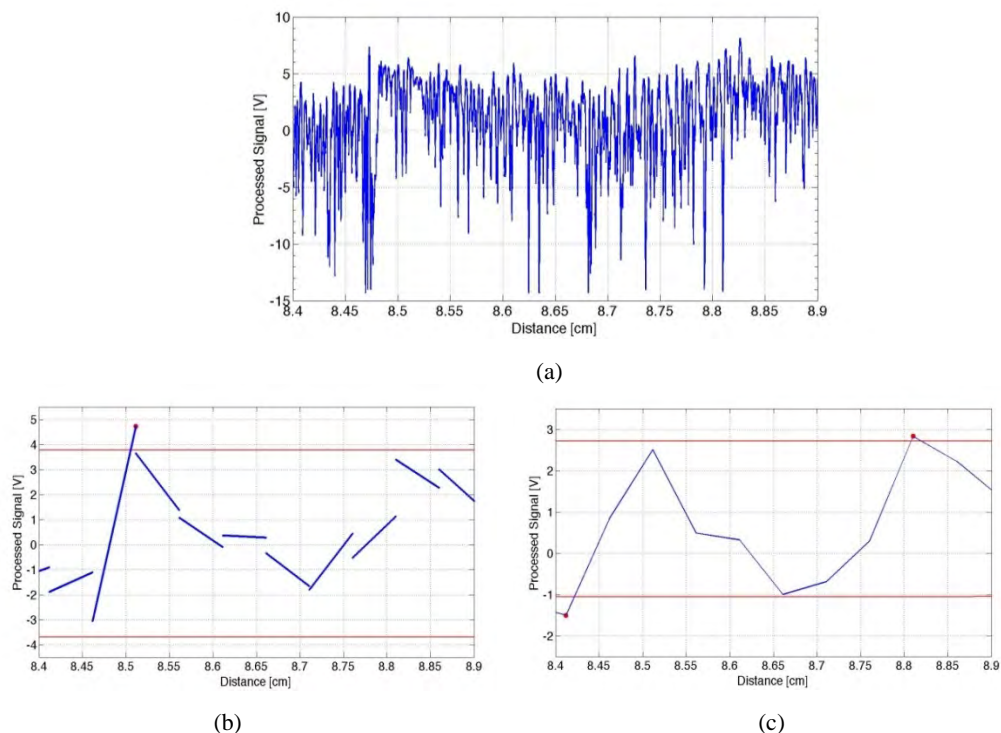


Fig. 3 - (a) Segnale in corrispondenza di una mancata penetrazione che si estende da 8.4 cm a 8.9 cm per un campione con differente zincatura da quella mostrata nelle figure precedenti.

(b) Segnali d'allertamento generati dall'algoritmo PCA in corrispondenza del difetto, per superamento del valore superiore di soglia.

(c) Segnali d'allertamento generati dall'algoritmo MEAN in corrispondenza del difetto, per superamento dei valori sia inferiore che superiore di soglia.

Per quanto riguarda l'algoritmo RMS, i segnali d'allertamento vengono generati ogni volta che una serie di tre valori rms consecutivi (relativi ad un gruppo di 50 campioni di dati) viene a trovarsi all'interno di un intervallo di due valori di tensione, anch'essi trovati nella rispettiva fase di learning. I tempi di elaborazione sono dell'ordine dei 20 μ s per l'algoritmo RMS e 200 ms per l'algoritmo PCA.

Anche se essi si discostano parecchio tra loro temporalmente, sulla scala della generazione del segnale d'allertamento questi due metodi sono in grado di segnalare gli stessi difetti con un lieve scarto spaziale, dell'ordine dei decimi di mm, come si può notare nelle Fig. 2 e 4.

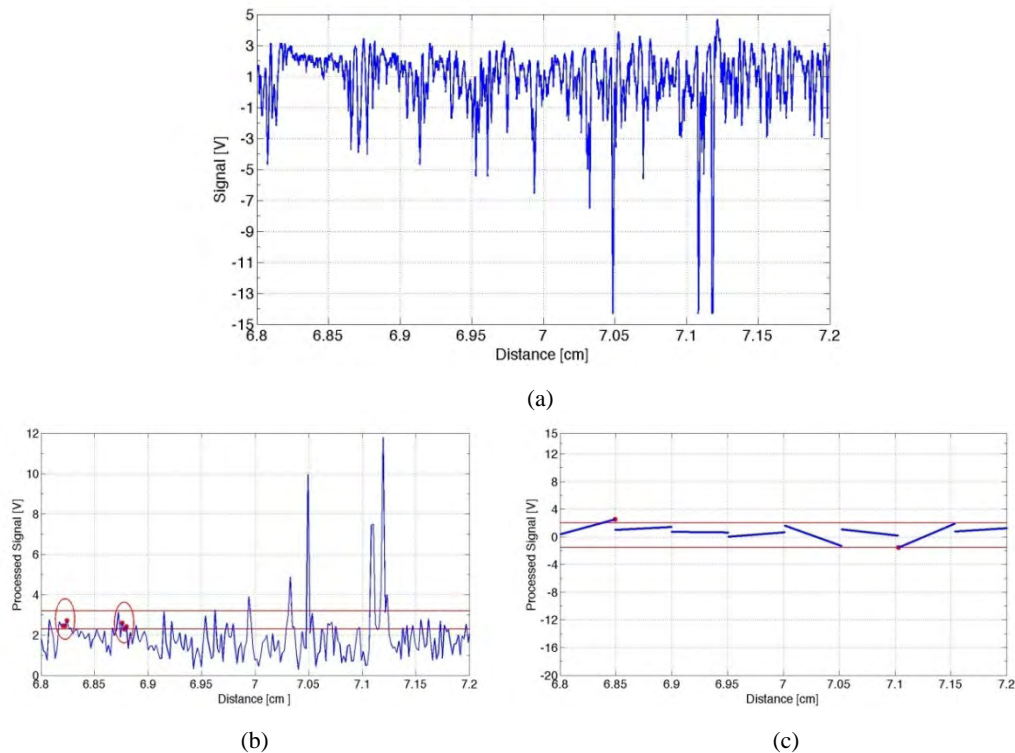


Fig. 4 - (a) Segnale relativo ad un difetto in un campione della stessa serie riportata anche in Fig. 2.
 (b) Segnali d'allertamento generati dall'algoritmo RMS.
 (c) Segnali d'allertamento generati dall'algoritmo PCA

6 - Formazione del key-hole

Grazie al metodo PCA siamo stati in grado di caratterizzare i malfunzionamenti nel processo di saldatura anche durante la formazione del key-hole.

I segnali sono stati ottenuti per un'accensione laser sincrona rispetto al movimento del campione. In Fig. 5 si riportano cinque casi relativi alle medesime condizioni di zincatura, gas di assistenza, velocità della slitta (1.1 m/min) e potenza laser (1940 W). Viene cambiata la distanza di sfocamento, indicata come differenza Δ (in mm) rispetto al miglior fuoco. Vengono anche riportate le due soglie usate per l'identificazione dei difetti.

Durante la formazione del key-hole, si può notare come i segnali si sviluppino in maniera differente per sfocamenti negativi e positivi. Ad esempio, è possibile distinguere molto rapidamente uno sfocamento positivo da uno negativo grazie all'ampiezza dei segnali negativi.

Di seguito si descrivono e confrontano i risultati ottenuti per mezzo degli algoritmi RMS, MEAN e PCA. I dati sono stati raccolti dopo la formazione del key-hole e fino alla fine del processo di saldatura per una lunghezza di circa 10 cm. Il grado di bontà nell'individuazione del difetto è stato valutato su base statistica, tramite la percentuale di successo lungo tutta la lunghezza di saldatura, come riportato di seguito.

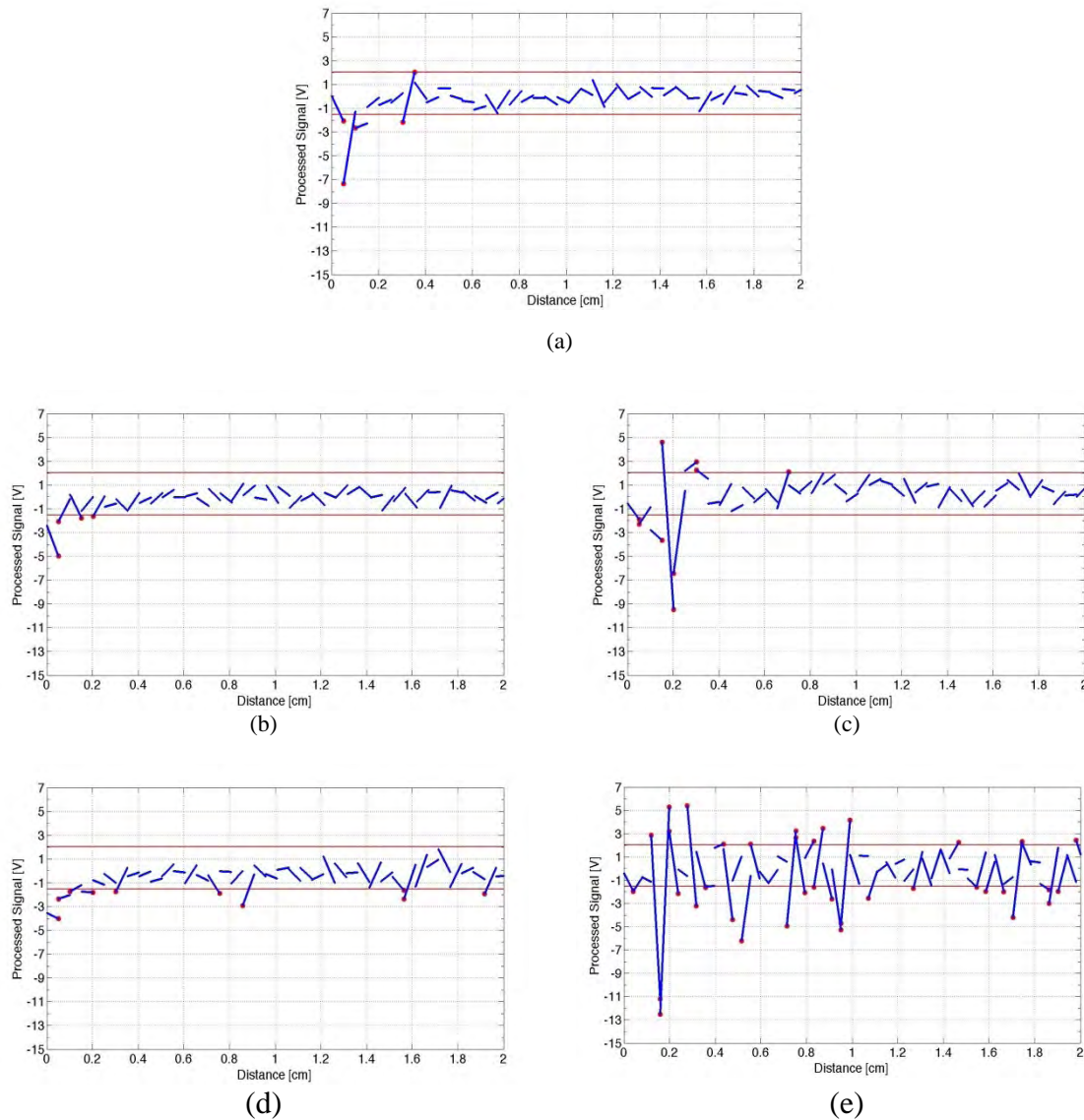


Fig. 5 - Alcune tracce relative alla formazione del key-hole per differenti distanze di sfocamento, Δ . **(a)** $\Delta = 0$. **(b)** $\Delta = -2$ mm. **(c)** $\Delta = +2$ mm. **(d)** $\Delta = -4$ mm. **(e)** $\Delta = +3$ mm.

7 - Risultati

Nelle tabelle seguenti $\Delta = f - f_0$ è lo sfocamento, f la distanza di sfocamento rispetto al miglior fuoco f_0 , P è la potenza del laser, N il numero dei difetti (mancate penetrazioni), l_x è la lunghezza minima-massima dei difetti, $p_1(l_1)$ è la posizione (lunghezza) del primo difetto, $1w$ è la posizione del primo segnale d'allertamento, $t1w$ è il tempo trascorso (incluso il tempo di elaborazione) fino al primo segnale d'allertamento, AD/N è il numero dei difetti che si sarebbero evitati sulla base del solo primo segnale d'allertamento, e w è il numero di allertamenti prodotti.

Nella Tab. 1 sono riportati i risultati ottenuti dall'analisi PCA sia in condizioni di potenza laser ottimale e differenti distanze di fuoco, sia in condizioni di miglior fuoco e potenze differenti. I difetti presi in considerazione nella Tab. 1 e nella Tab. 3, per l'algoritmo MEAN, sono quelli di lunghezza maggiore o uguale a 0.5 mm, dal momento che entrambi gli algoritmi sono stati applicati ad un set di campioni di dati, ai quali corrisponde una risoluzione spaziale paragonabile a questa lunghezza.

La stessa analisi è stata ripetuta con l'algoritmo RMS e i risultati sono riportati nella Tab. 2. In base alla risoluzione spaziale utilizzata in combinazione con quest'ultimo algoritmo, siamo stati in grado di individuare difetti di lunghezza anche minore di 0.5 mm ma, al fine di confrontare i risultati dell'elaborazione RMS con quelli derivanti dagli altri due metodi, tali casi non sono stati riportati nella Tab. 2.

Il numero di segnali d'allertamento è generalmente più alto rispetto al numero dei difetti per tutti i metodi dal momento che il numero di falsi positivi non è zero, e più allertamenti sono stati generati per un difetto considerato per l'intera lunghezza. Grazie ai valori di soglia determinati nella fase di learning, si è raggiunta una percentuale di difetti evitati grazie al solo primo allertamento pari al 100%, con l'eccezione di un unico caso per ciascun metodo, anche diminuendo la potenza fino al limite inferiore per la salatura (i.e. 1650 W).

Tab. 1 - Risultati dell'algorithm PCA da *Re_Mapped_Data*.

Δ_P mm_W	N	lx mm	p ₁ (I ₁) mm (mm)	lw mm	t lw s	AD/N %	w
- 4_1940	10	2-11	4 (2.5)	4.00	0.42	100	18
- 3_1940	7	2-47	0 (47)	1.00	0.25	100	82
- 2_1940	3	1.5-2	76 (2)	81.00	4.62	66.67	7
0_1940	0	-	-	-	-	100	0
+ 1_1940	5	2-6	18 (2)	18.70	1.22	100	5
+ 2_1940	8	2-8	0 (2)	0.00	0.20	100	44
+ 3_1940	7	1-6	2 (5)	5.90	0.52	100	61
0_1650	1	100	0 (100)	1.01	0.25	100	18

Tab. 2 - Risultati dell'algorithm RMS.

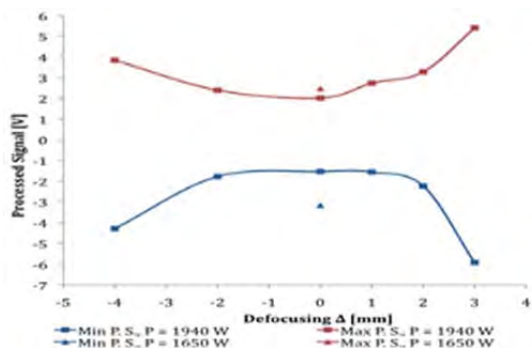
Δ_P mm_W	N	lx mm	p ₁ (I ₁) mm (mm)	lw mm	t lw s	AD/N %	w
- 4_1940	10	2-11	4 (2.5)	1.30	0.07	100	20
- 3_1940	7	2-47	0 (47)	0.37	0.20	100	57
- 2_1940	3	1.5-2	76 (2)	14.45	0.79	100	11
0_1940	0	-	-	-	-	100	0
+ 1_1940	5	2-6	18 (2)	20.12	1.10	100	11
+ 2_1940	8	2-8	0 (2)	0.04	0.00	100	47
+ 3_1940	7	1-6	2 (5)	15.38	0.84	71.43	51
0_1650	1	100	0 (100)	98.40	5.37	100	1

In questa serie di simulazioni di malfunzionamento, gli algoritmi RMS e MEAN si sono rivelati più veloci nel fornire il primo allertamento (tempo medio < 1 s), dal momento che i tempi di elaborazione penalizzano il metodo PCA. In ogni caso i tempi di primo allertamento appaiono abbastanza confrontabili per tutti i metodi, facendo emergere una certa complementarità tra gli stessi. Ad esempio, nelle Tab. 1 e 2, un AD/N diverso dal 100% per un metodo è completamente bilanciato da quello ottenuto con l'altro metodo, che invece raggiunge il 100%. Tale discorso vale anche per l'algorithm MEAN.

Tab. 3 - Risultati dell' algoritmo MEAN.

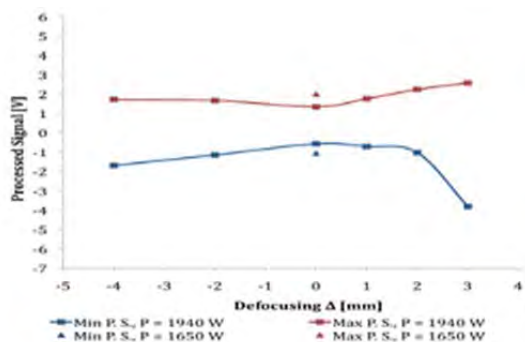
Δ_P mm_W	N	lx mm	p_1 (I_1) mm (mm)	1w mm	t 1w s	AD/N %	w
- 4_1940	10	2-11	4 (2.5)	4.54	0.25	100	9
- 3_1940	7	2-47	0 (47)	1.01	0.06	100	58
- 2_1940	3	1.5-2	76 (2)	14.18	0.77	100	8
0_1940	0	-	-	-	-	100	0
+ 1_1940	5	2-6	18 (2)	36.02	1.96	80	4
+ 2_1940	8	2-8	0 (2)	0.00	0.00	100	33
+ 3_1940	7	1-6	2 (5)	0.79	0.04	100	65
0_1650	1	100	0 (100)	15.43	0.84	100	41

Per valutare la sensibilità del metodo PCA nel distinguere uno sfocamento positivo da uno negativo, o da un calo della potenza laser durante il processo di saldatura, in Fig. 6 si riportano il massimo e minimo valore dei *Re_Mapped_Data* per i casi mostrati in Tab. 1, relativi a due differenti potenze. Dalla figura 6a, si nota come a fuoco ($\Delta = 0$), entrambi i segnali rimappati a potenza più bassa (1650 W) siano in valore assoluto più grandi di quelli relativi alla miglior potenza (1940 W). Inoltre, anche il valore assoluto della media di questi valori risulta il più piccolo tra tutti i casi riportati in Tab. 1 come si può dedurre dalla tabella a destra della Fig. 6a, contenente i valori medi degli stessi massimi e minimi per ogni caso della Tab. 1.

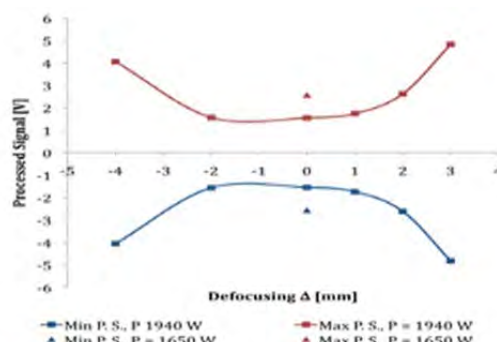


Δ_P mm_W	Valor Medio V
- 4_1940	-0.22745
- 2_1940	0.30815
0_1940	0.23865
+ 1_1940	0.583
+ 2_1940	0.521
+ 3_1940	-0.2661
0_1650	-0.3553

(a)



(b)



(c)

Fig. 6 - Valori massimo e minimo di (a) *Re_Mapped_Data*, (b) dati MEAN, e (c) *Mapped_Data* per differenti distanze di sfocamento e due valori di potenza laser.

Le possibili combinazioni di valori riportati in tabella variano tra circa 40 mV e 940 mV:

$$40 \text{ mV} = |-0.2661 - (-0.22745)| \text{ differenza tra } \Delta = 3 \text{ e } \Delta = -4;$$

$$940 \text{ mV} = |0.583 - (-0.3553)| \text{ differenza tra } P = 1940 \text{ e } P = 1650 \text{ a } \Delta = 0.$$

Dal momento che alla più piccola differenza corrisponde una differenza notevole nei valori assoluti sia dei rispettivi minimi che massimi (circa 1.6 V), un'implementazione basata su entrambi i parametri potrebbe rivelarsi utile per distinguere le varie cause di malfunzionamento.

Avvalendosi dell'algoritmo PCA associato con i *Re_Mapped_Data*, si è ottenuta una discriminazione superiore rispetto all'uso dei soli *Mapped_Data* (Fig. 6a e Fig. 6c rispettivamente); questa discriminazione è risultata maggiore anche di quella ottenuta nel caso dell'analisi MEAN, i cui risultati sono riportati in Fig. 6b.

L'andamento riportato in Fig. 6, con un minimo in corrispondenza della miglior distanza di fuoco, è rilevabile anche a potenze più basse, come mostrato in Fig. 7, dove vengono riportate le misure ottenute con una potenza laser inferiore a quella ottimale anche se adoperando una serie di lamierini zincati, differente da quella con la quale si sono ottenuti i dati riportati nelle Tab. 1, 2 e 3.

La serie completa di risultati relativi ai casi mostrati in Fig. 7 è riportata nelle Tab. 4, 5 e 6 per gli algoritmi PCA, RMS e MEAN, rispettivamente.

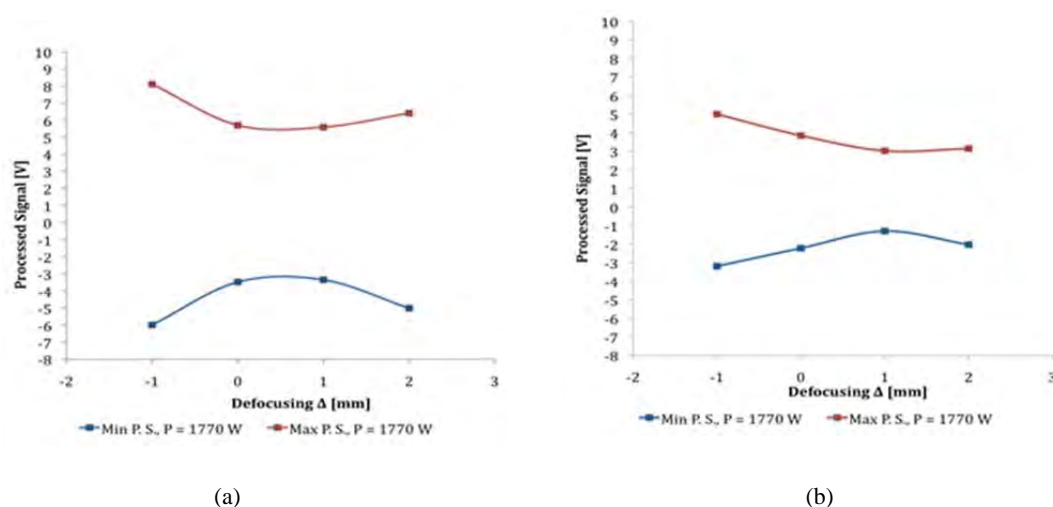


Fig. 7 - Valori massimo e minimo di (a) *Re_Mapped_Data* e (b) dati MEAN di un campione zincato (seconda serie), a diverse distanze di sfocamento e per una potenza laser di 1770 W.

Anche in questo caso il numero di segnali d'allertamento è risultato maggiore del numero di difetti e la percentuale di difetti evitati grazie al solo primo allertamento è del 100%. Anche in questo caso esistono un certo numero di falsi positivi e per ogni difetto è stato prodotto un numero di allertamenti superiore ad uno. In condizioni di potenza laser inferiore al valore ottimale e di sfocamento, l'identificazione dei difetti ha avuto maggior successo. Tutto ciò non deve sorprendere se si considera la crescente complessità del processo legata ad una crescente potenza del laser.

Tab. 4 - Risultati dell'analisi PCA da *Re_Mapped_Data*, seconda serie di campioni

Δ_P mm_W	N	lx mm	p_1 (l_1) mm (mm)	lw mm	t lw s	AD/N %	w
-2_1770	8	1.5-47.5	0 (7)	1.44	0.28	100	97
-1_1770	21	1-7	0 (6)	0.96	0.25	100	70
0_1770	20	1-15	0 (3.5)	0.48	0.23	100	80
+1_1770	14	2-16	0 (8)	2.4	0.33	100	106

Tab. 5 - Risultati algoritmo RMS, seconda serie di campioni

Δ_P mm_W	N	lx mm	$p_1(l_1)$ mm (mm)	1w mm	t 1w s	AD/N %	w
- 2_1770	8	1.5-47.5	0 (7)	1.19	0.1	100	39
- 1_1770	21	1-7	0 (6)	0.73	0.4	100	45
0_1770	20	1-15	0 (3.5)	0.41	0.2	100	47
+ 1_1770	14	2-16	0 (8)	0.18	0.1	100	54

Tab. 6 - Risultati algoritmo MEAN, seconda serie di campioni

Δ_P mm_W	N	lx mm	$p_1(l_1)$ mm (mm)	1w mm	t 1w s	AD/N %	w
- 2_1770	8	1.5-47.5	0 (7)	5.27	0.29	100	61
- 1_1770	21	1-7	0 (6)	1.44	0.08	100	33
0_1770	20	1-15	0 (3.5)	18.18	0.99	85	37
+ 1_1770	14	2-16	0 (8)	6.71	0.37	100	39

8 - Conclusioni

Il sensore piroelettrico usato può essere considerato appropriato per il monitoraggio on-line della saldatura con laser a CO₂, per il tempo di risposta e la sensibilità.

Le caratteristiche dei segnali prodotti dal sensore, una volta effettuata la fase di learning, sono risultate adatte per un'adeguata identificazione dei difetti, che include anche la formazione del key-hole per un'identificazione molto celere dei malfunzionamenti. Si è mostrato che gli algoritmi MEAN, PCA e RMS sono in grado di rilevare i difetti di saldatura e fornire di conseguenza segnali d'allertamento riguardanti il malfunzionamento. Il metodo MEAN offre il tempo d'allertamento più breve, il metodo RMS il tempo d'elaborazione più breve, mentre il metodo PCA consente la migliore individuazione della cause di malfunzionamento nel processo di saldatura laser.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato finanziato dal Ministero Italiano per l'Università e la Ricerca con il progetto FIRB RBIP06WJ4W *SMART-FLEX*. Un ringraziamento particolare va ai colleghi dell'IFAC e del CRF, per la strumentazione fornita e l'aiuto durante la fase di sviluppo del progetto.

Bibliografia

1. Steen, W. M. 1991 *Laser material processing*, 1st ed.; Springer Verlag: New York, USA 1991.
2. Kogel-Hollacher, M. 2009 *Laser Solutions Short Courses, Process Monitoring & Control-Various Approaches for Different Applications*. ICALEO 28th International Congress on Application of Lasers & Electro-Optics, Orlando 2-5 Nov. 2009.
(http://www.laserinstitute.org/uploads/pdf/SC3_Kogel_Final.pdf)
3. Norman, P.; *Process monitoring and analysis of laser welding and of milling*, Doctoral thesis, 2008.
(<http://epubl.luth.se/1402-1544/2008/35/>)

4. Sanders P.G., Leong K.H., Keske, J. S., Kornecki G. Real-time Monitoring of laser beam welding using infrared weld emissions. *J. Las. Appl.* **1998**, *10*, 205-211.
5. Mazzoni M., Capineri L., Masotti L. A large area pyroelectric sensor for CO₂ laser beam alignment. *IEEE Sensors Journal* **2007**, *7*, 1159-1164.
6. Fang J.S., Hao Q., Brady D.J., Shankar M., Guenther B.D., Nikos P. Pitsianis, Ken Y. Hsu Path-dependent human identification using a pyroelectric infrared sensor and Fresnel lens arrays. *Optics Express*, **2006**, *14*, 2, 609-624.
7. Seto N., Katayama S., Matsunawa A. High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior during high power CO₂ laser welding: Effect of shielding gas on porosity formation *J. Las. Appl.* **2000**, *12*, 6, 245-250.
8. Capineri L., Cusanno F., Masotti L., Toci G., Mazzoni M., Kobayashi J. A high responsivity PVDF pyroelectric sensor and perspectives for a ferroelectric electrooptic modulator in a remote temperature measurement system. In *Proceedings of the 7th Italian Conference Sensors and Microsystems*, Editors Di Natale C., D'Amico A., Dori L., Cardinali G.C., Nicoletti S.; World Scientific Publ. Singapore Co.bPte. Ltd, 2002; 314-318.
9. Capineri L., Masotti L., Mazzoni M. Pyroelectric PVDF sensor modeling of the temporal voltage response to arbitrarily modulated radiation *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **2000**, *47*, 1406-1411.
10. Majumdar J. Dutta, Manna I. Laser processing of materials. *Sādhanā* **2003**, *28*, Parts 3 & 4, 495-562.
11. Sibillano T., Ancona A., Rizzi D., Lupo V., Tricarico L., Lugarà P.M. Plasma plume oscillations monitoring during laser welding of stainless steel by discrete wavelet transform application. *Sensors* **2010**, *10*, 3549-3561.