

La misura del crown nella laminazione a caldo di semilavorati in lega di alluminio AA8011: misurazione e ottimizzazione

N. Pasquino, D. Fiorillo, C. Sinagra, L. Vescio

Il controllo della planarità dei laminati sottili in leghe di alluminio rappresenta una delle più importanti criticità di processo e influenza fortemente la qualità dei prodotti che, in larga parte, sono destinati al mercato della trasformazione ove sono sottoposti a processi di verniciatura, accoppiamento a polimeri, stampa litografica, tutte operazioni impossibili da realizzare su laminati non planari.

Per ottenere laminati piani è fondamentale lavorare già a monte nella laminazione a caldo delle placche: la misura del "crown", ossia il profilo di spessore misurato sulla larghezza dei laminati a caldo e la sua forma, rappresenta un prerequisito fondamentale per ottenere successivi laminati a freddo piani.

Preliminarmente al presente lavoro si è realizzata un'analisi causa-effetto del crown per capire quali sono i parametri che entrano in gioco durante la realizzazione di un profilo accurato (diagramma causa-effetto del crown). Ci si è quindi concentrati sulla deformazione termica dei cilindri (bombatura termica) per cercare di ottenere, su laminati a caldo, valori variabili del crown agendo sul raffreddamento dei cilindri di lavoro da parte del fluido lubro-refrigerante. Per verificare che i parametri esaminati avessero un effetto significativo sul crown è stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) a due vie con interazione.

Come strumento di elaborazione statistica dei dati sono state utilizzate le superfici di risposta.

Parole chiave: Lav. plastiche caldo - Lav. plastiche freddo - Crown laminazione a caldo - Alluminio e leghe

DIFETTI DI PLANARITÀ NEI LAMINATI A FREDDO

Nella foto di Fig. 1 vi è la rappresentazione di un difetto di planarità: la parte (a) rappresenta un tipico esempio di un laminato con alcuni difetti. Si immagini di tagliare il laminato, nella direzione di laminazione, in un certo numero di strisce in modo tale che ogni segmento sia piano (parte b). Si osservi che ogni striscia ha una lunghezza diversa dalle altre. La prima considerazione da fare è che il nastro in realtà è "isolungo" ovvero le strisce nelle quali è stato idealmente suddiviso sono vincolate ad avere la stessa lunghezza. Solo tagliando il laminato è possibile accorgersi di tali differenze, dunque si innescheranno al suo interno delle tensioni affinché questo sia isolungo. Inoltre durante la laminazione saranno presenti ulteriori sollecitazioni come quelle di tiro, che si sommeranno alle precedenti. In particolare le strisce più corte saranno soggette a sollecitazioni maggiori, in quanto dovranno essere tirate maggiormente rispetto alle strisce più lunghe per rendere il laminato iso-

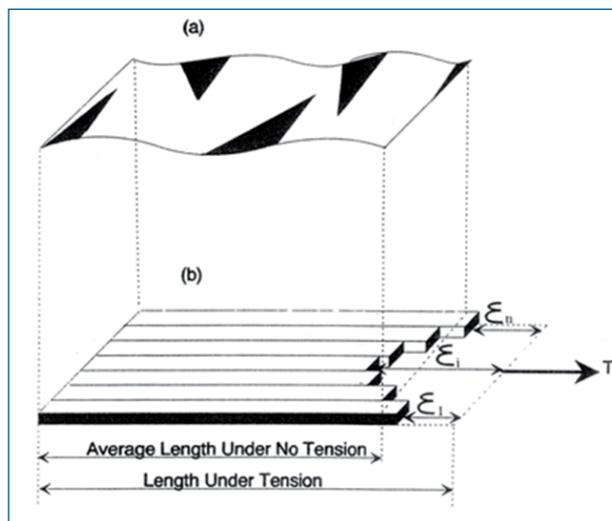


Fig. 1 – Difetto di planarità

Fig. 1 – Flatness defect

lungo. La parte centrale del nastro, ovvero quella che si vuole abbia uno spessore maggiore, sarà caratterizzata da strisce corte e quindi dovrà essere maggiormente sollecitata. Queste tensioni, se non controllate adeguatamente, possono portare ad alcuni difetti come quelle visualizzate in figura 2.

Nicola Pasquino, Dario Fiorillo

*Università di Napoli Federico II – Facoltà di Ingegneria
Gestionale Dpt DIEI*

Ciro Sinagra, Luca Vescio

Laminazione Sottile SpA – S. Marco Ev. (CE)

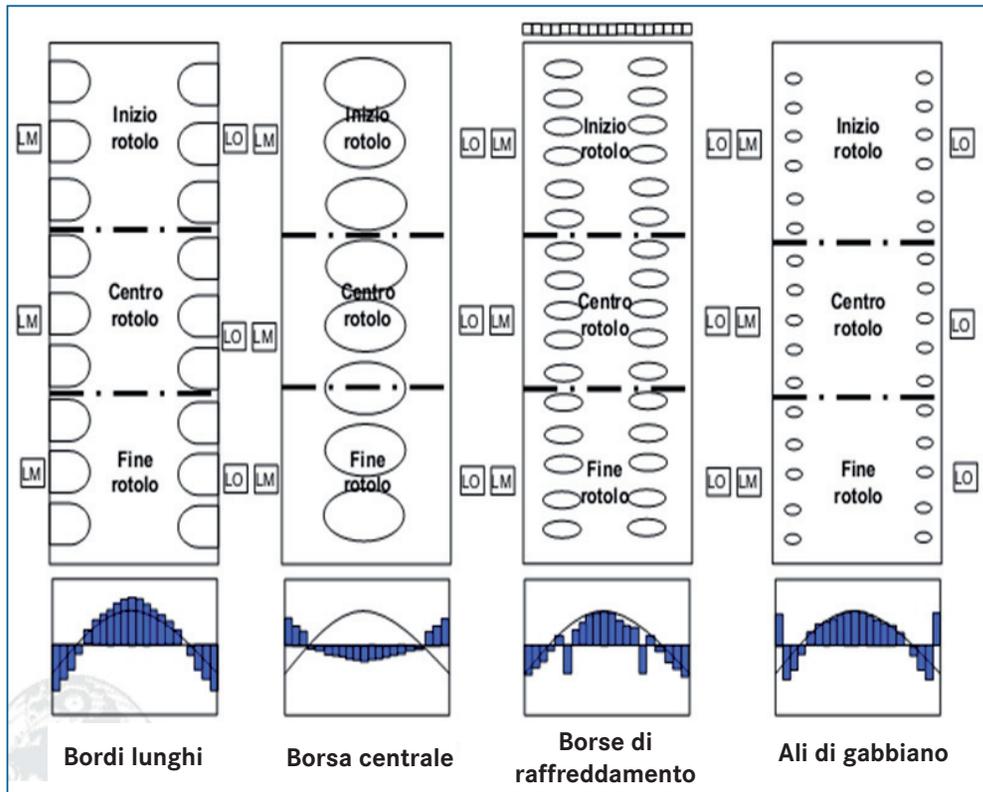


Fig. 2- Difetti di laminazione con relativi grafici di planarità

Fig. 2- Rolling defects with flatness graphics

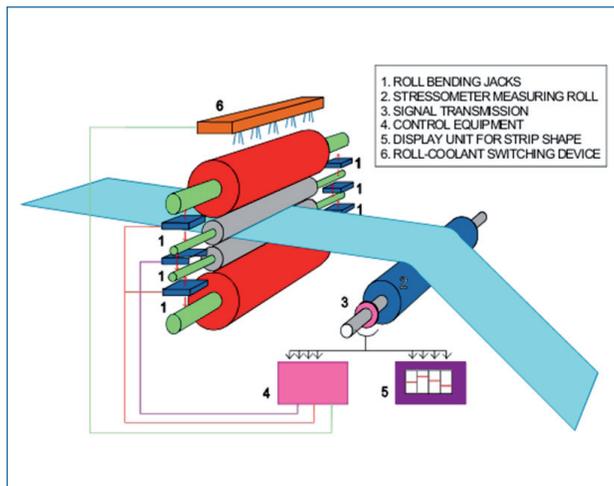


Fig. 3 - Schema Automatic Flatness control

Fig. 3 - Scheme of Automatic Flatness control

IL CONTROLLO DI PLANARITÀ NELLA LAMINAZIONE A FREDDO

Il controllo della planarità si effettua durante due fasi distinte del processo di lavorazione:

nel corso della laminazione a freddo, attraverso sistemi di controllo e regolazione automatica dei parametri di processo; [1-3]

con un'operazione successiva alla laminazione consistente nel livellamento delle tensioni interne residue mediante deformazione plastica del laminato.

Nei moderni laminatoi la planarità viene tenuta sotto con-

trollo con dei sistemi automatici (Automatic Flatness Control) che lavorano secondo uno schema del tipo riportato in figura 3. Il sistema può essere semplicemente correttivo, correttivo - predittivo o auto induttivo a seconda del grado di complessità del software e dei metodi di rilevazione. In altri termini si è cercato di sostituire le operazioni e le reazioni di un operatore esperto con un sistema automatico, il quale, non potrà far mai meglio di un ottimo operatore, garantisce almeno la costanza e la ripetitività dei risultati. Gli strumenti solitamente utilizzati per il controllo della planarità nella laminazione a freddo sono gli stressometri[4-5]. Sono tipicamente dei rulli che misurano la tensione, esercitata sulla larghezza del nastro laminato, nelle varie zone in cui esso può essere idealmente suddiviso. In particolare lo stressometro misura la componente ortogonale della forza di tiro attraverso celle di carico disposte sulla superficie dello strumento. Volendo realizzare un laminato più spesso al centro che ai bordi, al fine di ottenere una buona planarità, dovranno essere registrate maggiori sollecitazioni nella zona centrale del laminato. I rulli stressometrici hanno il vantaggio di essere alquanto affidabili e di non essere influenzati dal tipo di materiale, dall'altro lato però oltre ad elevati costi di investimento, essi richiedono una buona manutenzione ed una notevole esperienza nel loro uso.

Il processo di laminazione, per quanto controllato con i metodi elencati precedentemente, darà comunque luogo ad un prodotto con un livello di planarità non sempre accettabile per le lavorazioni successive. È dunque opportuno disporre di un'operazione a valle del processo produttivo: la stiratura, attraverso la quale vengono uniformate le differenze di lunghezza e lo stato tensionale interno del materiale riportando la planarità a livelli accettabili. [2]

LA MISURA DEL CROWN NELLA LAMINAZIONE A CALDO

La qualità dimensionale del prodotto in uscita al processo di laminazione a caldo ha come punto focale il controllo della distribuzione di spessore lungo la larghezza del nastro laminato. Quando una placca, prodotto di fonderia, viene lavorata attraverso laminazione a caldo lo spessore lungo la larghezza del laminato in uscita non è distribuito uniformemente. In genere si preferisce ottenere un materiale più spesso al centro che sui bordi. La geometria dello spessore lungo la larghezza del laminato prende il nome di profilo. Esistono due parametri che vengono analizzati per valutare il profilo del laminato: il crown e la planarità. [6-7]

Il crown rappresenta la differenza tra lo spessore al centro e la media dello spessore ai bordi di un laminato, rapportata allo spessore al centro. In particolare si consideri il seguente profilo.

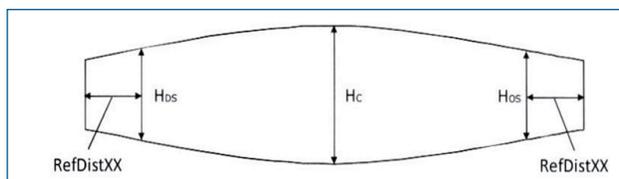


Fig. 4 - Sezione del nastro e calcolo del crown

Fig. 4 - Strip section and crown calculation

Il crown viene calcolato come:

$$Cr = \frac{H_c - \left(\frac{H_{DS} + H_{OS}}{2} \right)}{H_c} \%$$

dove:

- HC è lo spessore al centro;
- HDS e HOS sono gli spessori ai bordi;
- RefDistXX indica la distanza di riferimento dal bordo rispetto alla quale viene misurato lo spessore ai bordi nel calcolo del crown.

È molto importante realizzare un profilo accurato durante la laminazione a caldo il quale non può essere modificato nei reparti a valle, in quanto eventuali modifiche provocherebbero difetti di planarità nonché difficoltà nell'esecuzione delle successive fasi del ciclo produttivo.

Ricordiamo che si definisce planarità di un laminato la capacità dello stesso di aderire ad un piano teorico, e di conseguenza la non planarità è la differenza tra il piano teorico ed il laminato.

Per misurare lo spessore del laminato a caldo, sia in lunghezza che sulla larghezza del nastro, vengono utilizzate due teste di misurazione, una posizionata nella center line

(che misura lo spessore su tutta la lunghezza del laminato) ed una, mobile, che effettua una scansione sulla larghezza del laminato (da queste misure si ottiene per calcolo la misura del crown).

La sorgente di raggi x dei due misuratori è contenuta all'interno di uno "shutter", assicurando che le radiazioni siano direzionate in prossimità del ricevitore mentre il misuratore è in funzione. Durante la fase di misura una parte della radiazione incidente viene assorbita dal prodotto e il ricevitore, montato dall'altro lato del nastro, rileva l'attenuazione del flusso radioattivo e genera un impulso elettrico proporzionale all'intensità della radiazione percepita, la quale dipende dallo spessore e dalla lega del laminato. Quando la misura si interrompe viene azionato lo shutter che provvede a chiudere l'apertura dalla quale le radiazioni vengono emesse.

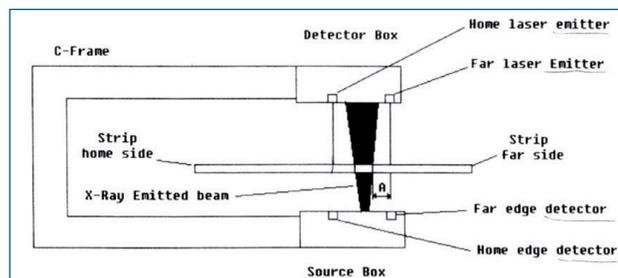


Fig. 5 - Schema di funzionamento misuratore RX

Fig. 5 - Functional scheme of thickness RX measurer

PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL CROWN

Per risolvere problemi complessi è necessario osservare il processo in modo sistematico evidenziando relazioni di causa-effetto tra l'output o le prestazioni del processo e una moltitudine di fattori. Quindi prima di analizzare il problema aziendale e vagliare delle possibili soluzioni è stata effettuata un'analisi preliminare su quelli che sono i parametri che incidono sul crown e quindi sul profilo di un laminato.

Il diagramma di causa-effetto è lo strumento per esprimere questa catena in modo semplice e facile; è noto anche col nome di diagramma a "lisca di pesce" perché la sua forma assomiglia allo scheletro di un pesce, a volte è anche detto ad "albero" o a "fiume". Le possibili cause di dispersione nelle caratteristiche qualitative debbono essere indicate nei diagrammi di causa effetto in modo tale che tutte le reciproche relazioni appaiano chiaramente evidenti.

Sono state vagliate numerose ipotesi per realizzare un sistema di gestione flessibile del crown in modo da apportare le idonee variazioni in modo rapido ed efficace in linea con le specifiche esigenze di lavorazione di ogni prodotto. Si è deciso infine, senza variare nessun altro parametro di processo, di agire sulla portata del fluido refrigerante dei cilindri, per agire sulla "bombatura termica", mediante

il potenziamento del sistema di lubro-refrigerazione reso flessibile dal frazionamento in due "rampe di raffreddamento".

DOE (Design Of Experiment)

Al fine di ottenere una maggiore comprensione degli effetti del raffreddamento dei cilindri di lavoro mediante l'aggiunta di un'altra rampa di refrigerante, si è deciso di eseguire una analisi della varianza (ANOVA). Questo ha permesso di realizzare un test d'ipotesi sull'efficacia di determinati fattori ciascuno a più livelli, sulla variabile di nostro interesse il crown. Una volta verificata l'efficacia di questi fattori sulla variabile di uscita, sono state tracciate le superfici di risposta per valutare l'andamento del crown in funzione delle variabili di controllo scelte. È stata condotta questo tipo di analisi sia per la lavorazione con una rampa e per due rampe, in modo tale da poter confrontare i risultati e verificare se ci sia stato o meno un miglioramento del processo produttivo.

In particolare data la modifica apportata al processo, si è ritenuto opportuno scegliere come variabili di controllo: la larghezza del nastro e la pressione (di conseguenza anche la portata) di refrigerante. Si ricorda che l'apertura degli ugelli di una rampa di refrigerante dipende dalla larghezza del nastro, inoltre la pressione di refrigerante è il parametro di lavorazione che è possibile impostare ma come vedremo è la portata ad incidere sul raffreddamento.

Le variabili del piano fattoriale sono:

La larghezza del nastro: fattore a tre livelli di range, "A", "B", "C" crescenti

La pressione del refrigerante: fattore a cinque livelli "1", "2", "3", "4", "5" crescenti

In Tabella sono riportati i valori di portata del fluido lubro-refrigerante in % rispetto alla portata massima del laminaio.

ANOVA su lavorazione con una rampa aperta

Si riporta nella tabella 1 il piano sperimentale nel caso di una rampa aperta.

Fissata la pressione, fissata la larghezza del nastro la portata di refrigerante è univocamente determinata (Tab. 2).

Sulla base di questi dati è stata condotta un'ANOVA a due vie con interazione (Tab. 3).

Livello pressione	RANGE A	RANGE B	RANGE C
1	0,31 %	0,23 %	0,87 %
	0,32 %	0,93 %	0,91 %
	0,23 %	0,46 %	0,37 %
	0,38 %	0,65 %	0,29 %
	0,03 %	0,47 %	0,32 %
2	0,22 %	0,25 %	0,3 %
	0,13 %	0,28 %	0,3 %
	0,26 %	0,48 %	0,24 %
	0,11 %	0,16 %	0,27 %
	0,34 %	0,39 %	0,45 %
3	0,23 %	0,15 %	0,38 %
	-0,09 %	-0,03 %	0,35 %
	-0,07 %	0,49 %	0,05 %
	-0,15 %	0,5 %	0,15 %
	-0,13 %	0,2 %	0,14 %
5	0,08 %	0,56 %	0,09 %
	0,08 %	0,67 %	0,04 %
	0,03 %	0,45 %	0,28 %
	0,21 %	0,43 %	0,21 %
	0,16 %	0,26 %	0,3 %

Tab. 1 - Piano sperimentale valori del crown una rampa aperta

Tab. 1 - Experimental planning values of the crown a ramp open

Livello pressione	Larghezza A	Larghezza B	Larghezza C
1	33%	36%	38%
2	39%	42%	46%
3	44%	47%	50%
4	47%	51%	55%
5	51%	54%	58%

Tab. 2 - Portate di refrigerante una rampa aperta

Tab. 2 - Cooling flow ramp open

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F0	p-value	F crit
Pressione	0,7228	3	0,2409	8,191	1,664E-04	2,798
Larghezza	0,7343	2	0,3671	12,48	4,314E-05	3,190
Interazione	0,2254	6	0,03758	1,277	0,2853	2,295
Errore	1,411	48	0,02941			
Totale	3,094	59				

Tab. 3 - ANOVA a due vie con interazione una rampa aperta

Tab. 3 - Two-way ANOVA interaction with a ramp open

Dall'analisi della varianza riassunta in tabella si evince che il rapporto tra la varianza imputabile alla pressione e quella dovuta alla variabilità sperimentale è $F_0 = 8,191$ al quale corrisponde un p-value di $1,66E-04$; pertanto avendo scelto un rischio di prima specie $\alpha = 5\%$ è possibile accettare l'ipotesi alternativa di efficacia del fattore pressione. Stesso discorso vale per la larghezza del nastro dove il rapporto tra la varianza imputabile al fattore e quella dovuta alla variabilità sperimentale è $F_0 = 12,48$ al quale corrisponde un p-value di $4,314E-05$; pertanto avendo scelto un rischio di prima specie $\alpha = 5\%$ è possibile accettare l'ipotesi alternativa di efficacia del fattore larghezza. Viceversa non è possibile rigettare l'ipotesi d'inefficacia dell'interazione tra i due fattori, se non ammettendo un rischio del 28%.

Il test conferma dunque che i fattori scelti la pressione/portata di refrigerante e la larghezza del nastro abbiano effetto sulla grandezza d'interesse.

ANOVA su lavorazione con due rampe aperte

Si riporta nella tabella seguente il piano sperimentale nel caso di due rampe aperte:

Livello pressione	RANGE A	RANGE B	RANGE C
1	0,2 %	0,13 %	0,34 %
	0,11 %	0,22 %	0,28 %
	0,33 %	0,26 %	0,41 %
2	0,16 %	0,35 %	0,14 %
	0,28 %	0,23 %	0,24 %
	0,26 %	0,18 %	0,14 %
4	-0,36 %	0,33 %	0,2 %
	-0,34 %	0,42 %	0,24 %
	0,03 %	0,25 %	0,19 %

Tab. 4 - Piano sperimentale valori del crown due rampe aperte

Tab. 4 - Experimental planning values of the two ramps open

Fissata la pressione, fissata la larghezza del nastro la portata di refrigerante è univocamente determinata:

Livello pressione	RANGE A	RANGE B	RANGE C
1	61%	63%	67%
2	69%	73%	75%
3	76%	79%	84%
4	84%	86%	89%
5	88%	93%	96%

Tab. 5 - Portate di refrigerante due rampe aperte

Tab. 5 - Cooling flow two ramp open

Sulla base di questi dati è stata condotta un'ANOVA a due vie con interazione:

Origine della variazione	SQ	gdl	MQ	F0	p-value	F crit
Pressione	0,1064	2	5,32E-02	5,195	1,66E-02	3,554
Larghezza	0,1928	2	9,64E-02	9,414	1,59E-03	2,927
Interazione	0,3670	4	9,18E-02	8,960	3,6E-04	
Errore	0,1843	18	1,02E-02			
Totale	0,8506	26				

Tab. 6 - ANOVA a due vie con interazione due rampe aperte.

Tab. 6 - Two-way ANOVA with two flights interaction open

pertanto avendo scelto un rischio di prima specie $\alpha = 5\%$ è possibile accettare l'ipotesi alternativa di efficacia del fattore pressione. Stesso discorso vale per la larghezza del nastro dove il rapporto tra la varianza imputabile al fattore e quella dovuta alla variabilità sperimentale è $F_0 = 9,414$ al quale corrisponde un p-value di $1,59E-03$; pertanto avendo scelto un rischio di prima specie $\alpha = 5\%$ è possibile accettare l'ipotesi alternativa di efficacia del fattore larghezza.

Il test conferma anche per la configurazione a due rampe che i fattori scelti: pressione/portata di refrigerante e larghezza del nastro abbiano effetto sulla grandezza d'interesse: il crown.

A differenza della configurazione ad una rampa aperta, è possibile rigettare l'ipotesi d'inefficacia dell'interazione tra i due fattori. Inoltre è possibile osservare come i p-value dei singoli fattori, nella configurazione a due rampe, siano maggiori del caso precedente (circa due ordini di grandezza). Ciò è indice di una maggiore significatività del test condotto nel caso ad una rampa, in quanto un p-value meno elevato indica una minore probabilità di accettare l'ipotesi non vera.

LE SUPERFICI DI RISPOSTA

La metodologia delle superfici di risposta è un insieme di tecniche per applicazioni in cui la risposta di interesse è influenzata da diverse variabili. L'obiettivo è di ottimizzare questa risposta in funzione delle specifiche di crown dei vari prodotti.

In particolare si andrà di seguito a tracciare l'andamento del crown in funzione della larghezza del nastro e della pressione di refrigerante prima e della portata poi, sia per la configurazione ad una rampa sia a due rampe in modo tale da avere un confronto tra le due condizioni, verificare se ci sia stato o meno una variazione significativa ed identificare delle zone di ottimo. Si riportano nelle figure 6, 7, 8 e 9 le superfici di risposta con contour plot nel caso di una e due rampe di refrigerante aperte:

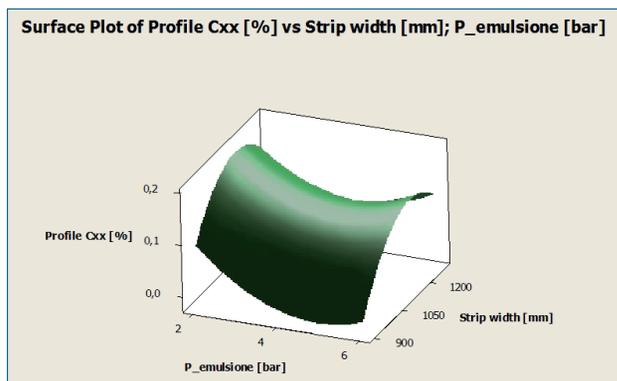


Fig. 6 - Superficie di risposta: Crown; Pressione; Larghezza (una rampa)

Fig. 6 - Response surface: Crown; pressure; Width (single ramp)

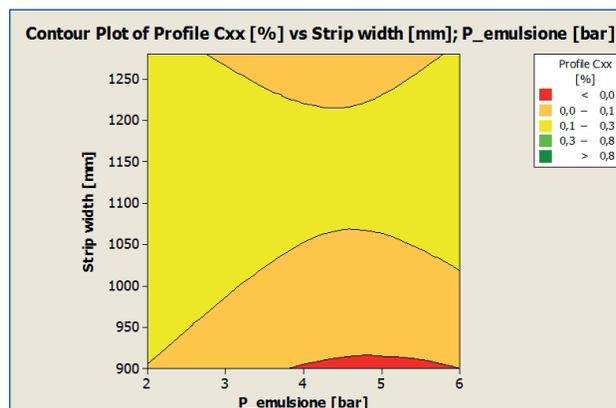


Fig. 7 - Contour plot: Crown; Pressione; Larghezza (una rampa)

Fig. 7 - Contour plot: Crown; pressure; Width (single ramp)

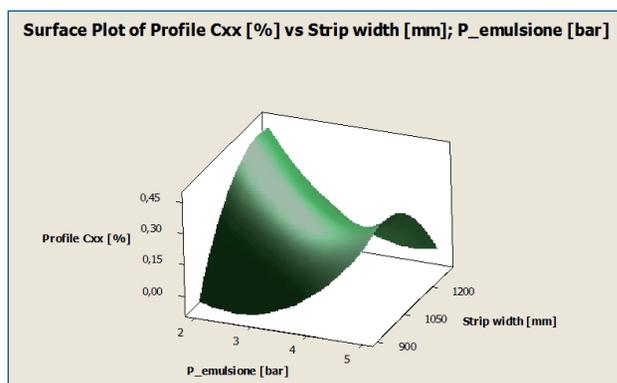


Fig. 8 - Superficie di risposta: Crown; Pressione; Larghezza (due rampe)

Fig. 8 - Response surface: Crown; pressure; Width (two ramps)

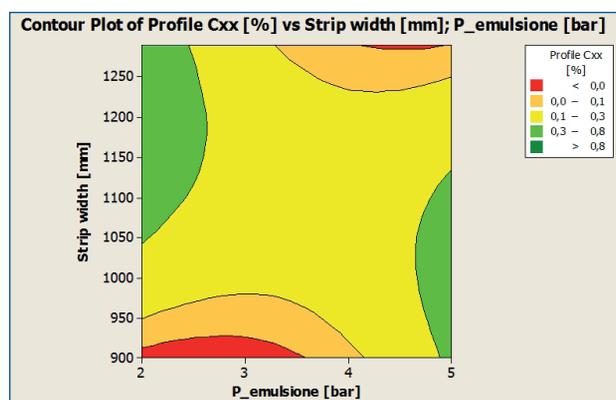


Fig. 9 - Contour plot: Crown; Pressione; Larghezza (due rampe)

Fig. 9 - Contour plot: Crown; pressure; Width (two ramps)

RIASSUMENDO

Per la valutazione dell'efficacia dell'intervento effettuato (introduzione di una seconda rampa di raffreddamento dei cilindri di lavoro) si è proceduto alla rilevazione e successiva elaborazione dei valori del crown, in funzione della larghezza del laminato e della pressione/portata del fluido erogato su un numeroso database di rotoli laminati prima e dopo la modifica. Come strumento di elaborazione statistica dei dati sono state utilizzate le superfici di risposta. Per confermare che i parametri larghezza del nastro e pressione/portata di refrigerante avessero un effetto significativo sul crown, è stata condotta un'analisi della varianza a due vie con interazione. Per entrambe le configurazioni analizzate, una rampa e due rampe, è stato possibile rigettare l'ipotesi di inefficacia dei fattori.

Tracciate le superfici di risposta e analizzati i relativi contour plot si è subito evidenziato l'allargamento dello spazio dei valori del crown ottenuto nella configurazione a due rampe. È stato, inoltre, possibile identificare, in funzione della larghezza del nastro e della pressione di refrigerante, delle zone in cui si ritiene possibile ottenere un crown ottimale all'interno degli intervalli di specifica per i vari prodotti.

BIBLIOGRAFIA

- 1] R. Zocchi, C. Sinagra - Fenomeni di attrito e usura durante la laminazione dell'alluminio - Lamiera n.10/1990
- 2] M. Moschini, C. Sinagra, R. Zocchi - Il controllo della planarità attraverso il livellamento delle tensioni interne - VIII Convegno Nazionale Lamiera 24-25 maggio 1990 - Bologna
- 3] VAI TECH - Automatic gauge & Flatness Control for Cold Rolling Mills - Poole February 2003
- 4] ABB - Stressometer® Systems for Flatness Measurement & Control
- 5] TSUZUKI Shigeru, KIRA Yoichi, MISUMI Kenji - Flatness Control System of Cold Rolling Process with Pneumatic Bearing Type Shape Roll - IHI Engineering Review Vo I . 42 No. 1 February 2009
- 6] Dan Miller - Process integration in the rolling of aluminium strip I-nnoval Technology, Banbury, OX16 1TQ, UK
- 7] C. Sinagra - Deformazione a caldo e a freddo di nastri in alluminio - Giornata di studio LA METALLURGIA NELLA DEFORMAZIONE PLASTICA: RICERCA E INDUSTRIA A CONFRONTO - Milano, 28 Giugno 2012

Crown measurement of hot rolled AA8011 alloy strip : measurement and optimization

Keywords: Hot Rolling - Cold Rolling - Crown In Hot Rolling - Flatness Measurement

Flatness Control on thin rolled aluminium alloys products is one of the most critical aspects of the process and strongly impacts on its final quality . These materials are largely used in the converting market where they undergo to lacquering processes , to coupling with polymers, printing. All these operations would be almost impossible on non flat rolled aluminium surface.

To get a flat surface on the final products, it is essential to work already on the hot rolling of the slabs. The measure of the “crown” , ie the thickness profile measured across the width of the hot-rolled-coil, and its shape, is a fundamental prerequisite for obtaining flat coils in the cold rolling process.

Prior to the present work, it has been made an analysis of cause-effect of the crown in order to understand which parameters can be involved in generating an accurate profile (cause and effect diagram of the crown).

We have afterwards focused on thermal deformation of cylinders (thermal camber) for achieving, on the hot-rolled coils, variable values of the crown by acting on the cooling of the work rolls by fluid lubrication coolers.

To verify that tested parameters had a significant effect on the crown, we conducted an analysis of variance (ANOVA) with two way interaction. As a statistical data tool, we used the “response surface method”.