

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA' DI INGEGNERIA
Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Analisi e Trattamenti termici di organi meccanici in movimento

Relatore : Ing. Emilio Ramous

Correlatore : Ing. Luciano Belloni

Laureando : MATTIA GAMBACORTA

Anno Accademico 2010-2011

INDICE:	pag.
Introduzione	2
Progetto 1 : MARTELLI PER MULINI DI FRANTUMAZIONE	4
1.1 Mulini a Martelli	4
1.2 Usura	7
1.3 Scelta del materiale per i martelli	10
1.4 Scelta del riporto	12
1.5 Saldatura	15
Progetto 2 : CAMICIE PER RULLI DI RAFFREDDAMENTO	17
2.1 Indagine sulla camicia "scoppiata"	17
2.2 Colata continua	18
2.3 Le camicie	19
2.4 Trattamenti termici	22
2.5 Conclusioni	24
Ringraziamenti	26
Bibliografia	27

Introduzione

Il mio tirocinio si è svolto presso l' Elettromeccanica Viotto S.r.l di San Donà di Piave (VE) nel periodo che va da maggio a settembre 2010.

La suddetta Azienda si occupa della costruzione, manutenzione e riparazione di impianti, macchine e componenti per l'industria siderurgica e dei cementi; nello specifico opera anche nel campo dei laminatoi, degli oleodotti, delle raffinerie e delle centrali termo ed idroelettriche [1].

La produzione in sé è molto variegata ed in particolare il reparto meccanico non è pensato al servizio di un determinato impiego, ma a seconda delle specifiche esigenze della clientela - come ho potuto io stesso constatare - si presta alla realizzazione di qualsivoglia impianto o parte di esso.

Tirocinio

Il progetto che mi era stato inizialmente assegnato riguardava la scelta del materiale adatto a placcare i martelli dei mulini per la frantumazione di coke e ceneri di caldaia.

Nel presentarlo primo ho descritto la funzione e la struttura di un mulino a martelli, soffermandomi sulla tipologia di materiali normalmente utilizzati per i martelli.

Poi ho ragionato sulle motivazioni che ci hanno spinto a preferire dei martelli placcati rispetto a quelli costituiti solamente da ghisa (ad esempio). Infine ho confrontato vari possibili riporti, tutti ovviamente adatti a rivestire organi atti alla frantumazione, nell' intento di scegliere il materiale che garantisse il miglior compromesso tra prestazioni, durata e costo.

Mi sono poi occupato di un secondo progetto riguardante invece l' improvvisa rottura della camicia di un rullo di raffreddamento di una ditta esterna. Tale cedimento era avvenuto in

esercizio, molto prima cioè della fine del ciclo di vita del suddetto cilindro, causando così un' interruzione della produzione.

L' azienda , avendo subito questo grave danno economico, si rivolgeva alla Viotto per ottenere delle camicie più durature per i propri rulli. Si trattava quindi di risalire al materiale utilizzato dai precedenti fornitori e, sulla base delle analisi chimiche effettuate, di capire qual era stato il motivo del cedimento.

A tale scopo, oltre a controllare quale acciaio fosse stato utilizzato per produrre la camicia, era importante indagare quali fossero i trattamenti termici più adatti ad un organo sottoposto sia a sollecitazioni di tipo meccanico che a forti gradienti termici.

Tutto questo per evitare di commettere gli errori che avevano portato al prematuro cedimento del pezzo e per scegliere con più accuratezza il materiale e i trattamenti che potevano garantire un' ottima durata al prodotto che ci era stato commissionato.

MARTELLI PER MULINI DI FRANTUMAZIONE

Il primo progetto, come precedentemente accennato, riguarda dei mulini di frantumazione utilizzati per macinare vari materiali tra cui ceneri di caldaia e coke all'interno di una centrale termoelettrica.

I martelli di questi mulini venivano normalmente prodotti in ghisa che garantiva delle buone prestazioni a fronte di un costo molto basso. I martelli però dovevano essere spesso sostituiti causando dei gravi rallentamenti.

Per questo motivo alla Viotto è stato richiesto di trovare un materiale che garantisse una durata maggiore dei martelli in semplice ghisa, senza aumentarne in modo eccessivo il costo.

Vediamo ora, prima di tutto, di capire cosa sia e da quali componenti sia costituito un mulino a martelli.

1.1 Mulini a Martelli



Fig. 1 - Fotografia di un mulino a martelli

Costituzionalmente sono simili ai frantoi ad urto, formati cioè da un rotore con la funzione di proiettare il materiale alimentato contro le pareti della camera interna provocandone la disgregazione, e differiscono sostanzialmente per:

- una camera di frantumazione chiusa inferiormente da griglie, con maglie la cui apertura determina la pezzatura in uscita;
- i martelli del rotore, che non sono fissi bensì liberi di oscillare attorno al perno di fissaggio;
- le piastre a copertura della carcassa che sono fisse e provviste di denti.

L'efficacia dell'operazione dipende dai percorsi subiti dall'inerte da frantumare, al primo urto contro i martelli in movimento segue la proiezione contro i denti della corazza e contro altro materiale in movimento; gli elementi più resistenti vengono serrati fra martelli e corazza.

Tutto ciò che non ha subito una riduzione tale da passare la griglia inferiore viene ripescato dai martelli e messo nuovamente in movimento.

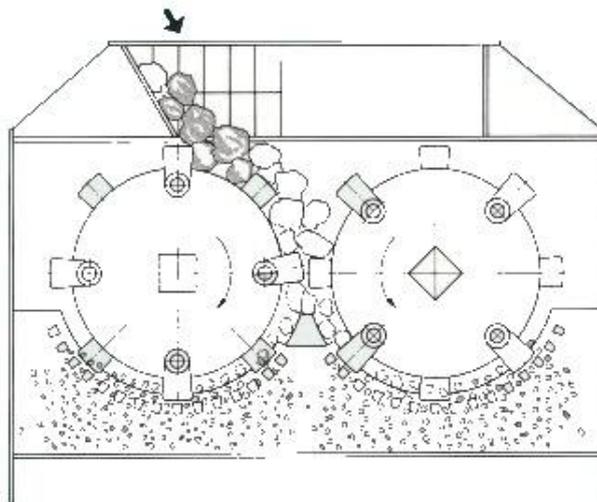


Fig. 2 - Schema semplificato di un mulino a martelli con due rotori

CARATTERISTICHE

La macinazione avviene per urto del materiale contro le masse rotanti; il successivo impatto contro la corazza è un'ulteriore efficace azione di rottura.

- CASSA: in acciaio elettrosaldato facilmente apribile ed ispezionabile.
- BOCCA DI CARICO: in lamiera di acciaio con disegno atto ad eliminare la proiezione all'esterno di parti di materiali - incernierata alla cassa.
- CORAZZA: fusa in ghisa speciale resistente agli urti - sfrutta l'energia d'urto del materiale onde ottenere frattura pura senza strisciamenti. E' ridotta al minimo l'usura.
- ALBERO: in acciaio di qualità, montato su supporti con cuscinetti oscillanti a rulli. Accurata protezione contro la polvere.
- GRIGLIA: in robusta lamiera d'acciaio forata, con spessore e fori adeguati alle finezze volute - facilmente sostituibile. La grigliatura, per esigenze particolari, può essere composta da barrotti, lamine, o lamiere a fori oblunghi.
- MARTELLI: solitamente fusi in acciaio al manganese oppure in ghisa legata antiusura, possono presentare svariate forme [2].

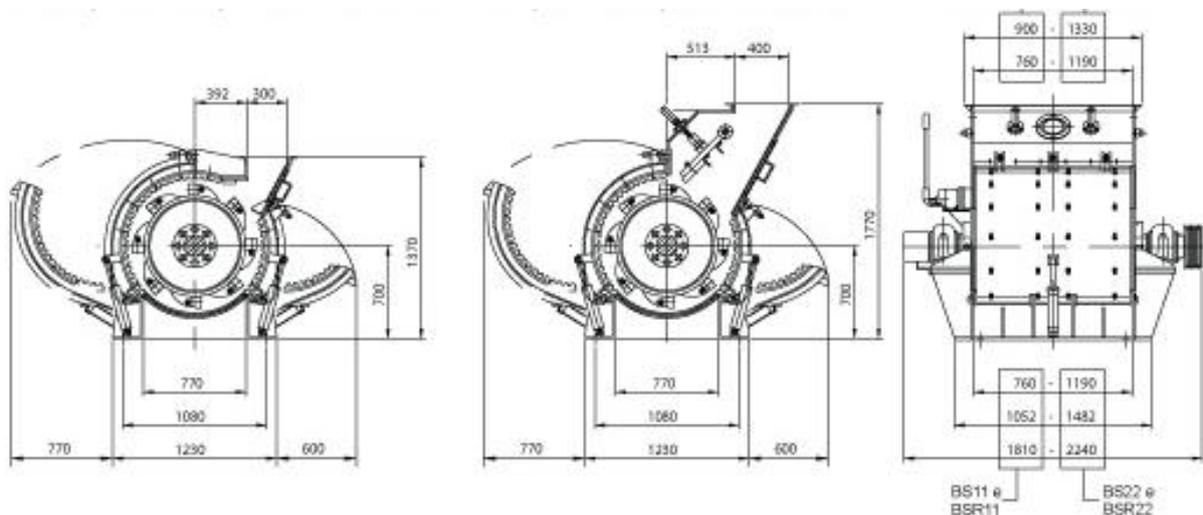


Fig. 3 – Sezioni di un mulino a martelli

Materiali che è possibile macinare con questo tipo di mulino:

- Impasti di argilla con umidità inferiore a 7% per produzione di mattoni, tegole e altri manufatti.
- Scarti di laterizi e piastrelle, chamotte.
- Calcare, marmo, dolomite.
- Refrattari, vetro, prodotti ceramici, riciclaggio nella produzione di nuovi manufatti.
- Ossido di calcio, ferroleghe, carbone, coke.

1.2 Usura

L'usura consiste nello spostamento progressivo (ed eventuale rimozione) di materiale da due superfici a contatto e in moto relativo tra di loro.

L'attrito è la causa principale dell'usura, la quale comporta un'alterazione delle dimensioni dei pezzi e una degradazione delle caratteristiche superficiali; costituendo sicuramente il più sensibile fattore di invecchiamento degli organi atti alla macinazione.

Possiamo distinguere diverse tipologie di usura: usura adesiva, usura abrasiva, usura corrosiva e usura per fatica.

L' **usura adesiva** si manifesta perché due aree metalliche a contatto hanno la naturale tendenza alla saldatura delle asperità superficiali a causa di valenze residue degli ioni metallici affiancati; quando poi le due superfici sono messe in movimento, le saldature (o adesioni appunto) si rompono per taglio.

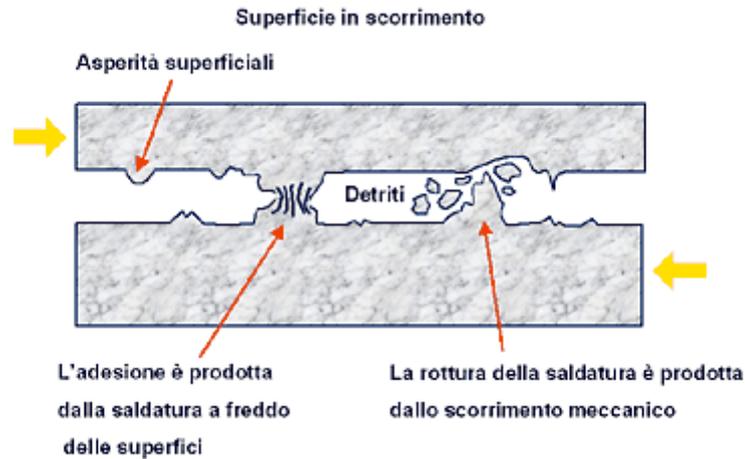


Fig. 4 – usura adesiva

Questo è il più comune tipo di usura, ma anche il meno pericoloso, in quanto la sua lenta azione nel tempo non causa cedimenti improvvisi nell' organo in esame.

L' **usura corrosiva** è una degradazione superficiale che, per esplicitarsi, richiede un' azione meccanica e una chimica. Infatti sulla superficie dei materiali metallici posti in ambiente corrosivo a volte si forma uno strato di ossido che li protegge da un' ulteriore corrosione (passivazione); se però tale superficie è sottoposta ad un contatto strisciante con un' altra, questo strato viene rimosso, in tal modo viene sottoposta all' attacco chimico la porzione sottostante di materiale impedendo che la corrosione si fermi.

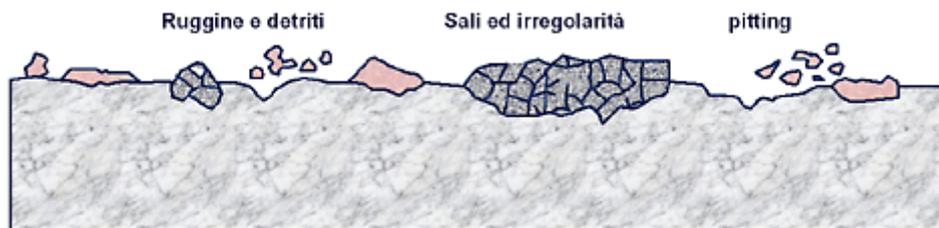


Fig. 5 – usura corrosiva

L' **usura per fatica** è causata dall' azione di sforzi periodici (anche modesti), sia di urto, sia indotti da movimenti di rotolamento o di strisciamento . Questi carichi ciclici creano delle discontinuità sia sulla superficie del metallo che sotto di essa e se le cavità si congiungono possono portare a sfogliatura (spalling).

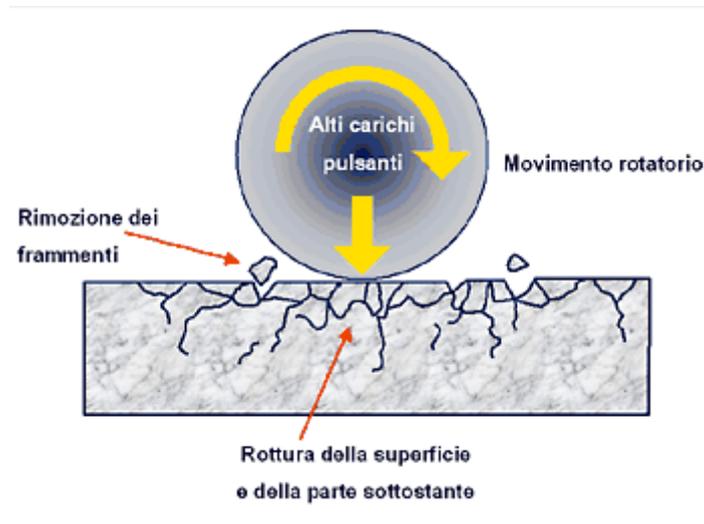


Fig. 6 – usura per fatica

L' **usura abrasiva** è quella che ci preoccupa maggiormente per quanto concerne la durata dei martelli dei nostri mulini.

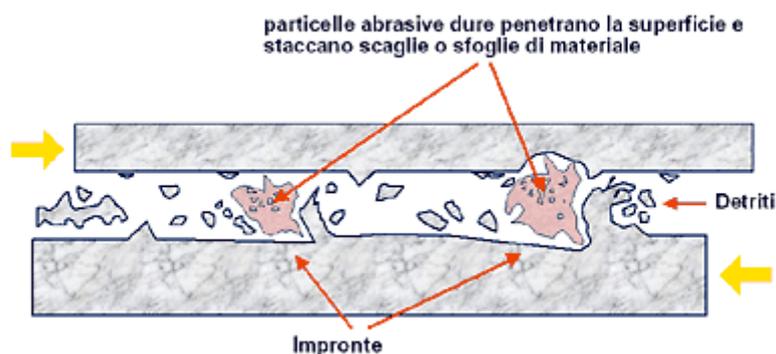


Fig. 7 – usura abrasiva

Essa è provocata dallo sforzo di compressione concentrato nel punto di contatto con il materiale da macinare e, a differenza dell' usura adesiva, si presenta come spostamento

plastico locale e affaticamento dei costituenti duttili, nonché come rottura dei costituenti duri delle superfici metalliche. Tale usura è caratterizzata dalla presenza di rigature provocate dalle particelle dure che vengono ancorate o trascinate per attrito sulla superficie [3].

Questo meccanismo di danneggiare gravemente il pezzo facilitando così l'azione anche degli altri tipi di usura.

Più un metallo risulta tenero, maggiore sarà l'effetto dell'abrasione; quindi per ottenere l'effetto opposto basterà ricorrere a uno qualsiasi dei metodi di indurimento dei metalli (alligazione, trasformazione martensitica, trattamenti termochimici, incrudimento, etc.).

Vedremo più avanti che, nel cercare di aumentare la durata dei nostri martelli, utilizzeremo dei riporti superficiali per aumentarne la durezza.

1.2 Scelta del materiale per i martelli

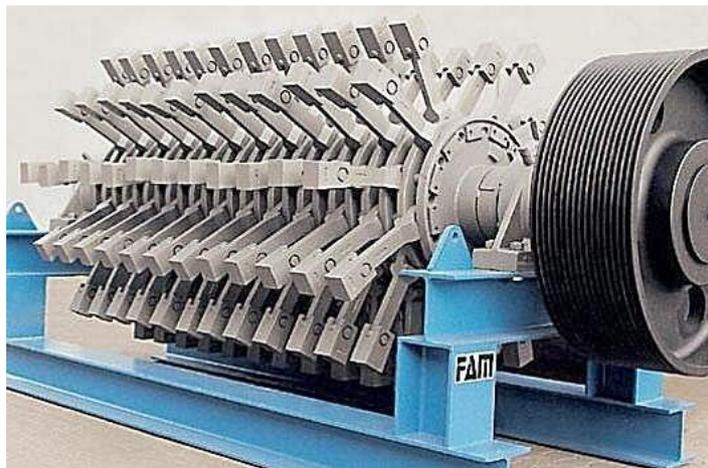


Fig. 8 – fotografia dei martelli di un mulino

I materiali più utilizzati per i martelli del mulino sono la ghisa e l' acciaio al manganese (come ho già detto precedentemente) .

Confrontiamo qui la **ghisa sferoidale**, che è duttile oltre che dura, e l' **Hadfield**, l' acciaio al 13% di manganese, che messo in esercizio si incrudisce aumentando notevolmente la sua durezza superficiale, mantenendo però uno strato sottostante molto tenace.

componenti (%)	Ghisa sferoidale	Hadfield
C	3.3-3.8	1.1-1.4 (1.15 optimum)
Mn	≤0.6	11-13
Si	1.8-2.8	<0.7
P	≤0.1	≤0.01
S	≤0.03	≤0.04

durezza superficiale (HRC)	55-60 (dopo la tempra)	superiore a 51 (dopo l' incrudimento)
carico di snervamento		380 Mpa
carico di rottura	420-700Mpa (con matrice perlitica)	1000Mpa

Caratteristiche	resiste all' usura	molto tenace e resistente all' usura
-----------------	--------------------	--------------------------------------

Tab. 1 – confronto tra Ghisa e Hadfield

Anche se la ghisa sferoidale presenta valori di durezza tendenzialmente più elevati, ed è sicuramente la più duttile tra tutte le ghise, l' acciaio al 13% di Mn risulta il miglior

compromesso tra durezza e tenacità , soprattutto considerando che i materiali che vogliamo frantumare non necessitano di durezza eccessive (carbone, coke, materiali silicei, etc.).

Nella realtà dei fatti, però, risulta economicamente svantaggioso utilizzare l' hadfield per tutto il martello, quando è solo la superficie di contatto tra esso e l' inerte da frantumare, che ci interessa.

Utilizzare un materiale più economico e poi placcarlo, risulta più vantaggioso; ricordandoci ovviamente che oltre alla durezza ci interessa preservare la durata del pezzo.

1.3 Scelta del riporto

Per poter sfruttare al massimo i martelli, facciamo delle ipotesi sul migliore materiale con cui placcarli, di modo da ottenere degli utensili da macinazione duri ed allo stesso tempo resistenti all' abrasione e all' usura del tempo.

Ho preso in esami 3 fili animati della Durmat, 2 della Lastek e 2 della Intermetal (denominati corodur); tutti adatti allo scopo, placcare martelli da frantumazione.

composizioni (%)	Durmat	Durmat	Durmat	LASTIFIL	LASTIFIL	Corodur	Corodur
	600	600Tic	601	8071T	2402G	65	68
C	0.5	1.8	0.5	medio tenore		5.2	5
Si	1	1.6	1			alto tenore	1
Mn	3	1.4	3	0.4			0.4
Cr	6.5	7	6	21			38
Mo	0.8	1.4	1.6	7			
V	0.4		1.5	1			
W			1	2			
Ti		5					
Nb				7			
B						2	

Durezza (HRC)	55-58	56-58	56-60	47-51	57	63-65 (fino a 800°C)	66-68 (fino a 750°C)
note	se preriscaldato resiste bene al formarsi delle cricche.	eccellente resistenza all' impatto e abrasione.	se preriscaldato resiste bene al formarsi delle cricche(come il 600)	buona saldabilità in particolare su acciai con elevato tenore di C.	notevole resistenza a corrosione, ossidazione e ai colpi.	resistenza all' abrasione.	resistenza all' abrasione.

Tab. 2 – confronto fra tutti i riporti duri; i dati riportati sono stati ottenuti dai siti web dei tre produttori: [4], [5] e [6]

Il **Corodur 68** risulta il materiale con la durezza media più elevata (67 HRC), ma anche molti degli altri dovrebbero possedere una durezza adatta a frantumare del coke (il nostro obiettivo). In ogni caso non ci possiamo basare solo su quel valore per determinare il materiale migliore.

Il **Lastifil 8071 T** potrebbe primeggiare per la sua ottima saldabilità, soprattutto se pensiamo di utilizzare come materiale base per i martelli dell' acciaio con elevato tenore di carbonio (solitamente più difficile da saldare).

Scegliendo questo materiale, però, non avrei la certezza che la sua durezza (solo 49 HRC di media) sia sufficiente allo scopo (la frantumazione per l' appunto) e soprattutto non sarei certo della lunga durata dello stesso, a causa dell' usura.

Anche il **Lastifil 2402G** ha delle buone caratteristiche, ma la scarsa trasparenza d' informazione della Lastex rispetto ai suoi concorrenti (non fornisce infatti le composizioni) ci fanno scartare questo materiale.

I **tre fili animati della Durmat** (in particolare il Durmat 601) sembrano essere un buon compromesso tra durezza e resistenza all' impatto e alla formazione delle cricche; ma i due Coromur rispettano le stesse caratteristiche di resistenza all' abrasione e al contempo posseggono durezza molto maggiori.

Anche ragionando per esclusione, il **Corodur 68** risulta il materiale migliore: esso cioè ci offre, almeno per quanto dichiarato dall' azienda produttrice, le migliori caratteristiche di durezza e resistenza all' abrasione così da resistere nel tempo e garantire, a fronte di una spesa non eccessiva, la possibilità di sostituire molto meno spesso i martelli da frantumazione del mulino.

In conclusione, però, non si può prescindere dal fattore economico, prima solo accennato, infatti l' azienda ha preferito optare per il **Corodur 65**, più economico, ma comunque efficiente; con i suoi 64 HRC infatti è sicuramente abbastanza duro da macinare il coke e garantire una lunga durata al pezzo.

La Intermetal fornisce fili animati in Corodur 65 saldabili per saldatura ossiacetilenica o ad arco sommerso.

1.4 Saldatura



Fig. 9 – esempio di saldatura

La **saldatura ossiacetilenica** spesso indicata con una di queste sigle : **OFW** (*OxiFuel gas Welding*), **AWS**, **OA** o **OAW** (*OxyAcetylene Welding*), è un procedimento di saldatura in cui l'energia viene fornita dalla combustione di acetilene in ambiente fortemente ossidante.

Questo procedimento, non richiedendo energia elettrica, è stato fra i primi ad essere studiato per la saldatura (1895) e fu utilizzato fin dagli inizi del XX secolo. Nella saldatura ossiacetilenica è quasi sempre richiesto che sia fornito materiale d'apporto, di solito sotto forma di bacchette, fondenti sotto la fiamma.

Nel caso specifico è molto probabile che verrà utilizzato un disossidante per evitare la passivazione superficiale, essendo i corodur acciai al cromo.

Invece la **saldatura ad arco sommerso**, indicata dalla sigla **SAW** (*Submerged Arc Welding*), consiste in un procedimento di saldatura ad arco a filo continuo sotto protezione di scoria.

La morfologia generale della zona di saldatura (cioè il fatto che l'arco scocchi sotto la scoria) permette di generare una grande quantità di calore che, essendo schermato dalla scoria, cattiva conduttrice termica, resta localizzato nel bagno di saldatura. Quindi la saldatura ad arco sommerso permette di operare con elevate velocità di saldatura e di deposito.

La saldatura ad arco sommerso è un processo che genera solitamente dei cordoli di saldatura più puliti e con meno difettosità.

In questo caso, però, dato che salderemo un riporto in cui i carburi sono un aspetto positivo dato che aumentano la durezza e dato che la saldatura ossiacetilenica risulta di molta più semplice realizzazione sceglieremo quest' ultima.

CAMICIE PER RULLI DI RAFFREDDAMENTO

2.1 Indagine sulla camicia "scoppiata"

Alla Viotto è pervenuta una richiesta da un' azienda che produce laminati d' alluminio tramite **colata continua**. Premetto che tale ditta normalmente si riforniva da terzi per i rulli di raffreddamento di cui ovviamente necessita, ma nel maggio 2009 la camicia di un rullo ha ceduto di schianto in esercizio (nel gergo del settore, è appunto "scoppiata") interrompendo la linea produttiva e causando gravi danni economici all' azienda stessa.

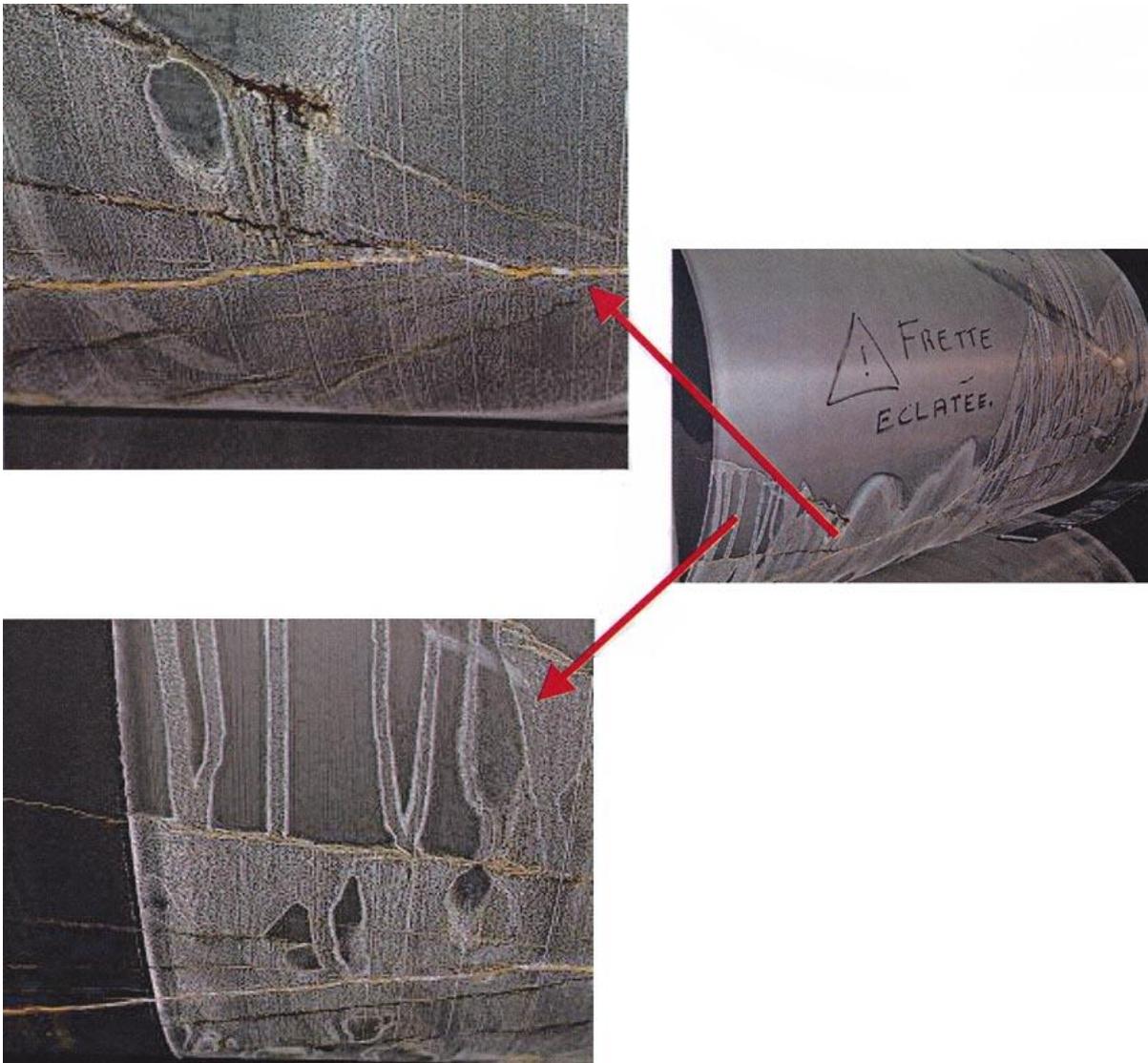


Fig. 10 – camicia "scoppiata" in esercizio

Quindi si sono rivolti alla Viotto commissionandole delle camicie (per i rulli) che avessero delle prestazioni ottimali.

Sostanzialmente il cliente dopo l' incidente vuole cambiare fornitore, pretendendo però da noi un prodotto migliore e più duraturo, quindi il mio intento è capire quale sia stato il motivo di quella rottura improvvisa e anticipata; impedendoci così di poter commettere un errore simile a quello che evidentemente l' azienda concorrente ha commesso.

Per capire a fondo il problema dobbiamo prima farci un quadro più generale della situazione e della tipologia di lavorazioni per cui il rullo è utilizzato dal nostro cliente.

2.2 Colata continua

La colata continua è un processo di produzione industriale in cui il materiale liquido(metallo) viene versato entro una forma permanente a fondo aperto, detta lingottiera e raffreddata esternamente con acqua.

Grazie al raffreddamento forzato, nella lingottiera il metallo si solidifica in superficie mentre rimane liquido in gran parte della parte interna della sua sezione. Tuttavia, questa pelle solidificata, fornisce una stabilità sufficiente all'intero del pezzo colato da poterlo fare scendere attraverso un percorso curvo, il cui diametro misura alcuni metri, e nel quale continua ad essere raffreddato forzatamente attraverso degli spruzzi d'acqua diretti oppure delle coppie di rulli.

Quest ultima tecnologia, che è quella utilizzata nel caso in esame, è comunemente nota come '**Twin-Roll Casting**' e ha il compito di trasformare l'alluminio grezzo caricato in un forno fusorio in un nastro di alluminio da utilizzare in successive operazioni di laminazione a freddo.

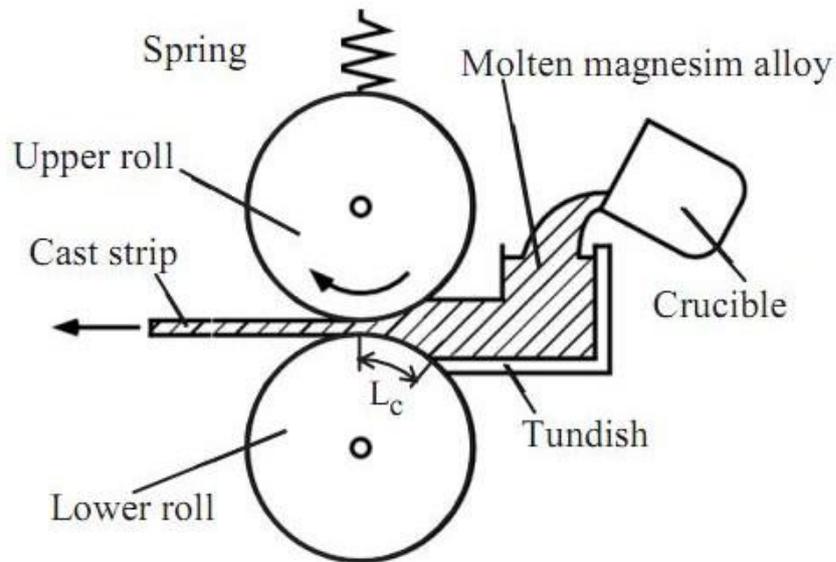


Fig. 11 – Schema illustrativo di un Twin-Roll casting orizzontale

Esso consiste in un processo di colata continua (di cui abbiamo appena parlato)- che offre il vantaggio di un prodotto più omogeneo e di qualità ad un costo inferiore rispetto alla colata discontinua - diretta all'interno di due cilindri (o rulli) controrotanti e raffreddati ad acqua.

2.3 Le Camicie

Le camicie, che avvolgono i rulli e che si troveranno tra questi ultimi e il getto fuso, hanno la funzione principale di estrarre il calore dall'alluminio per assicurarne la solidificazione.



Fig. 12 – fotografia di due camicie

Questa moderna configurazione (**nocciolo + camicia**) viene già utilizzata per la normale produzione dai leader mondiali nel settore della colata continua di tipo Twin-Roll ed ha dimostrato di poter far raggiungere i seguenti benefici:

- velocità maggiore per lo scambio termico;
- migliore uniformità della temperatura lungo la superficie della camicia;
- miglior risposta per il bilancio termico in produzione;
- minore slittamento della camicia rispetto al nocciolo dovuto alla loro maggior superficie di contatto;
- minore fatica per il materiale della camicia che è sottoposto ad alte tensioni durante il processo di colata;
- miglior controllo durante la colata di bassi spessori;
- drastica diminuzione del problema relativo al danneggiamento delle gole del nocciolo.

Questo permette una riduzione dei costi e dei tempi per il ricondizionamento dei noccioli quando la camicia viene sostituita

Il materiale da utilizzare per le camicie deve essere prima di tutto idoneo alle lavorazioni a caldo, nello specifico per colata continua tipo 'Twin-Roll', deve cioè avere buona conducibilità termica, basso coefficiente di espansione termica, alta resistenza alla fatica di tipo termo-meccanico e impedire il più possibile il propagarsi delle microcricche, deve quindi avere una **tenacità** sufficiente.

Non è facile soddisfare tutte queste necessità, la scelta del materiale è infatti un compromesso tra la produttività, che potrebbe essere massimizzata da camicie con ottima conducibilità termica, ad esempio in rame, che però assicurerebbero al pezzo una vita breve; e camicie in super leghe che risulterebbero molto resistenti alle sollecitazioni termo-meccaniche e all'azione del tempo, ma non permetterebbero la solidificazione dell'alluminio alle normali velocità di colata.

Il risultato di tale compromesso è una lega basata sull'acciaio al carbonio, che deve quindi garantire una buona velocità di colata e delle buone caratteristiche meccaniche per mantenere la camicia in condizioni ottimali a lungo.

Per rispettare tali caratteristiche, rispetto ad acciaio qualsiasi, la nostra lega dovrà possedere un alto contenuto di **cromo**, **molibdeno** e **vanadio**. Infatti il Cromo fornisce resistenza all'addolcimento, insieme ai carburi di **Mo** e **V**, e aumenta la durezza e la resistenza all'ossidazione alle alte temperature; grazie al vanadio viene sviluppata una microstruttura fine e fornisce anche resistenza all'usura ; mentre il molibdeno aumenta la durezza (sempre per via del carburo che forma) e la resistenza ad alte temperature [7].

Dato che come abbiamo capito le composizioni dei vari elementi sono fondamentali, per prima cosa analizziamo la camicia scoppiata in esercizio e un' altra sempre del nostro cliente che è però arrivata alla fine del suo ciclo lavorativo senza presentare fratture.

Sono state fatte delle analisi chimiche da laboratori di fiducia dell' azienda per stabilire la composizione di queste due camicie assieme ad una di quelle che normalmente la Viotto produce (tutto questo per poter fare dei confronti).

L' analisi del laboratorio sulla camicia scoppiata :

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al
0.306	0.169	0.487	0.012	<0.005	3.053	1.011	0.446	0.39	0.008

Tab. 3 – Analisi chimica sulla camicia “scoppiata”

Secondo le specifiche fornite al cliente al momento dell' acquisto di tale camicia, questa doveva essere in **Mo22**, un' ottimo materiale per le lavorazioni a caldo (sempre secondo le specifiche), che però è ancora protetto da brevetto e se ne conosce solo approssimativamente la composizione chimica: tra il 2 e il 4% di Cr, circa l' 1% di Mo e tra lo 0.1 e lo 0.3% di V.

Nell' impossibilità di riferirsi a qualcosa che non conoscevano con precisione, i fautori dell' analisi hanno supposto che l' acciaio in questione sia un **HS-521** (acciaio con buone proprietà di durezza e tenacità) che però dovrebbe possedere tenori di molibdeno tra 1,45 e 1,55% e per quanto riguarda il vanadio tra 0.45 e 0.55% .

Bisogna innanzitutto ricordare che il Vanadio previene l'ingrossamento del grano ed è quindi importante per avere durezza ad alta temperatura, mentre il Molibdeno aumenta la resistenza

ad alte temperature; entrambi i carburi che essi creano (Mo_2C e VC) aumentano l'intervallo di elasticità, quindi la tenacità.

Si potrebbe quindi ipotizzare che la fratture di tipo fragile, sia dovuta al **basso tenore di Mo e V** e di conseguenza all' esigua presenza dei carburi che essi formano; infatti il comportamento fragile è associato ad una bassa tenacità.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al
0.33	0.33	0.33	0.005	0.001	2.99	1.05	0.19	0.17	0.007

Tab. 4 - analisi su camicie arrivate alla fine del ciclo di vita, del nostro cliente

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al
0.31	0.36	0.46	0.007	0.002	2.85	0.71	0.15	0.162	0.015

Tab. 5 - analisi su camicie "standard" della Viotto

Osservando però le analisi relative alle altre camicie, che non hanno subito fratture fragili, è subito evidente che i tenori di Mo e V, non solo non sono maggiori rispetto al caso della rottura improvvisa (come potevamo aspettarci dal mio precedente ragionamento) ma sono mediamente inferiori, soprattutto nel caso del V.

2.4 Trattamenti Termici

La causa della frattura può essere però ricercata in un'altra importante fase, quella dei trattamenti termici, ad esempio potrebbe dipendere da **cricche dovute alla tempra**, un trattamento indispensabile per ottenere la **martensite**.

Infatti, per gli acciai di queste camicie si è propensi ad ottenere una struttura di tipo martensitico (come avevo anticipato) che ha migliori proprietà di durezza e resistenza, questo grazie al minor numero di piani di scorrimento e alla migrazione del carbonio verso posizioni interstiziali che bloccano le dislocazioni.

La martensite si ottiene sottoponendo l' acciaio alla tempra, cioè si riscalda il pezzo fino ad ottenere una totale trasformazione in **austenite** e poi lo si raffredda fino ad una temperatura inferiore rispetto a quella in cui era iniziato l' austenizzazione; tale raffreddamento deve essere sufficientemente rapido per ottenere una buona percentuale di martensite.

E' proprio in quest' ultima fase che possono crearsi delle cricche da tempra, infatti durante il brusco raffreddamento si sviluppano delle pericolose tensioni interne; il cuore del pezzo è ancora caldo e quindi dilatato, mentre la parte esterna sta velocemente diminuendo la sua temperatura, contraendosi e creando così uno scompensamento che può portare alla formazioni di cricche molto piccole, che però data la scarsa tenacità del materiale possono propagarsi molto rapidamente.

Questo pericoloso inconveniente può essere risolto effettuando una “**tempra scalare martensitica**”: che consiste nello scaldare come di consueto il pezzo fino alla completa austenizzazione, ma poi raffreddarlo ad una temperatura di alcuni gradi sopra quella di inizio trasformazione e mantenere la temperatura costante finché essa non è uniforme in tutti i suoi punti; solo quando questo accade si raffredda in aria, di modo che lo sbalzo termico e quindi anche il diverso comportamento del pezzo (dilatazione-contrazione) sia minimo [8].

In ogni caso dopo la tempra, per rilassare le tensioni residue nel pezzo e quindi impedire il comportamento fragile dell' acciaio, si esegue il **rinvenimento** (meglio ancora se doppio) che consiste nello scaldare nuovamente la camicia ad una temperatura però inferiore a quella di trasformazione in austenite, mantenerla costante per un breve periodo e poi raffreddare fino a temperatura ambiente.

La questione fondamentale è che noi non conosciamo di preciso i trattamenti termici che sono stati eseguiti sul pezzo, anche se una tempra con doppio rinvenimento sarebbero stati d' obbligo.

Evitare la formazione di cricche da tempra non era certo impossibile e non possiamo escludere che la ditta produttrice abbia eseguito questi trattamenti termici a regola d' arte, ma

dati i risultati catastrofici, qualche dubbio sulla perfetta esecuzione dei trattamenti termici è legittimo da parte nostra,

Non è azzardato pensare che durante i trattamenti termici si siano formate delle micro-cricche o delle **tensioni residue** troppo elevate, che hanno poi portato alle formazioni di cricche macroscopiche, responsabili, assieme alla scarsa tenacità del materiale utilizzato, dell'improvvisa e prematura frattura della camicia.

Oltre alla possibilità che il tutto fosse dovuto a degli errori nella progettazione e messa in pratica dei vari trattamenti di riscaldamento e raffreddamento, è anche possibile che la rottura dipendesse dall'elevato valore dell'**interferenza** tra il rullo e la camicia che abbiamo poi visto in effetti riscontrato.

Infatti il valore del diametro interno della camicia e quello del diametro del rullo non possono coincidere perfettamente e sono solitamente previsti dei range entro i quali l'interferenza deve rimanere per assicurare una buona durata dell'insieme nocciolo-camicia.

In sostanza l'interferenza ci dà un'idea di quanto la camicia è stretta attorno al rullo, se il valore è troppo elevato, come in questo caso, la camicia risulta tensionata.

È quindi ipotizzabile che ci siano stati degli errori in fase di tornitura della camicia, a cui non si è posto rimedio, magari tramite rettifica.

Infatti è solo sulla camicia (esterna) che si poteva intervenire, il rullo ha dei solchi molto ben definiti perché deve consentire il fluire del liquido di raffreddamento e non può essere modificato (mediante asportazione di truciolo).

2.5 Conclusioni

Abbiamo in fine concluso che il materiale migliore, non conoscendo i reali tenori di Mo e V nell'MO22, fosse l'HS521.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0.27 -	0.1 -	0.45 -	max	max	2.9 -	1.45 -	0.42 -	0.48 -
0.29	0.2	0.55	0.015	0.01	3.0	1.55	0.48	0.53

Tab. 6 - range percentuale degli elementi nell' HS-521

Forgiate le camicie, procederemo con una tempra scalare martensitica, prima in acqua e poi in aria, in modo da ottenere una grana cristallina abbastanza fine, che garantirà delle buone proprietà meccaniche, e in modo da impedire la formazione delle tensioni interne che potrebbero portare alla prematura criccatura della camicia.

Alla tempra seguirà ovviamente un rinvenimento che eseguiremo a circa 600° C e che, oltre a rilassare le tensioni, provocherà la precipitazione dei carburi dei vari elementi metallici in lega.

In questo modo avremo un nuovo aumento di durezza e limiteremo il fenomeno del **creep** o scorrimento viscoso; tale fenomeno porterebbe, sotto un carico costante, alla progressiva deformazione del pezzo se esso si trovasse ad una temperatura superiore a quella di scorrimento, equivalente a circa 0.3 – 0.5 volte la temperatura di fusione [8] .

Pensiamo in questo modo di garantire una durata maggiore alle camicie ed evitare una rottura fragile delle stesse in esercizio, come era accaduto con i prodotti dei nostri concorrenti.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il professor E. Ramous, il mio relatore.

Ringrazio l' Ing. Belloni, il mio tutor aziendale durante questo tirocinio, e tutti gli altri dipendenti dell' Elettromeccanica Viotto che ho conosciuto durante i mesi passati in azienda.

Ringrazio poi i miei genitori, che mi hanno permesso di frequentare l' Università, ed anche il resto dei miei parenti e amici che mi hanno sempre sostenuto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.elettromeccanicaviotto.com>
- [2] <http://www.pennati.it/macinazione/>
- [3] G. M. Paolucci, *Lezioni di Metallurgia per la laurea in Ingegneria meccanica VOL. 1*, Libreria Progetto (2002)
- [4] http://www.durmat.com/alt/index_ital.html
- [5] <http://www.lastek.eu>
- [6] <http://www.intermetal.it>
- [7] Nicodemi Walter, *Acciai e leghe non ferrose*, Zanichelli (2000)
- [8] G. M. Paolucci, *Lezioni di Metallurgia per la laurea in Ingegneria meccanica VOL. 2*, Libreria Progetto (2001)