



# Leghe d'oro per la produzione di catene saldate al laser

## 1. Abstract

Fra le tecniche di saldatura delle catene prodotte a macchina l'utilizzo del laser sta assumendo sempre maggiore importanza in questi ultimi anni. Questo lavoro si propone di esaminare le catene prodotte a macchina e saldate con la tecnica laser sotto vari aspetti. A tale scopo sono state esaminate diverse condizioni operative di saldatura (potenza, tempo, tipo di atmosfera etc.) di catene di varie composizioni, in modo tale da definire come la saldatura sia influenzata dai vari parametri (composizione lega, conformazione fisica del filo, parametri della macchina laser etc.).

## 2. Introduzione

Da parecchi anni la saldatura laser è applicata su macchine a catena con buona conoscenza dell'influenza dei parametri laser (potenza, tempo etc.) sulla qualità del giunto saldato ma non è stata approfondita la correlazione di tali parametri con la composizione chimica della lega. Per cui il lavoro è stato sviluppato esaminando leghe a 14 carati di diverse composizioni in due fasi. Nella prima fase sono state esaminate 8 leghe di diversa composizione con varie condizioni di saldatura in modo da rilevare le variabili che hanno maggiore influenza sulla saldatura. Sulla base delle quali sono state formulate 10 nuove composizioni per completare l'analisi.

## 3. Teoria

La saldatura della catena in macchina, ormai presente da alcuni anni anche in sistemi produttivi ad alta produttività, ha ormai raggiunto livelli di affidabilità e praticità d'uso eccellenti. La saldatura dei lembi delle singole maglie in fase di formazione della catena a bordo macchina a mezzo di raggio laser è attualmente la tecnica più usata. La saldatura laser (LBW, Laser Beam Welding) possiede alcune caratteristiche che la

rendono particolarmente adatta a questo tipo di applicazione. Vengono di seguito elencate le più significative:

- Elevato grado di automatizzabilità, è possibile raggiungere cicli di saldatura elevati (oltre gli 8 Hz), con trasporto del fascio in fibra che offre un'ottima flessibilità applicativa anche su sistemi preesistenti.
- Ridotto apporto di calore, la zona termicamente alterata è limitata alla zona saldata e non intacca attrezzature o parti sensibili nelle immediate vicinanze.
- Possibilità di saldare sezioni molto sottili.
- Precisione, lo spot è di dimensioni molto piccole e può variare da 0.2 a 0.5 mm.
- Normalmente non è richiesta la presenza di gas protettivi.

La saldatura Laser può avvenire in due modi diversi in base al modo con il quale il calore si diffonde:

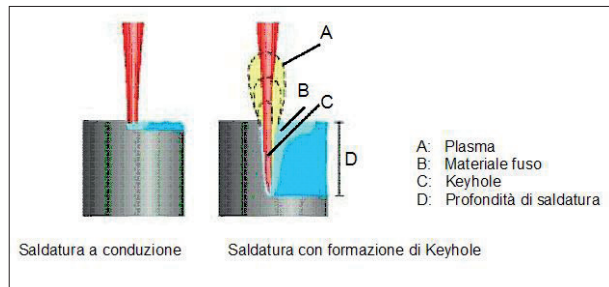
- Con formazione del Keyhole (penetrazione profonda della saldatura)
- In conduzione (saldatura a bassa penetrazione)

Nella saldatura con formazione del keyhole che interessa le prove eseguite, il fenomeno può essere così brevemente descritto:

Con densità di potenza molto elevate il trasferimento di energia è talmente elevato da determinare la vaporizzazione del metallo, una colonna di metallo vaporizzato che assorbe energia dal fascio laser, penetra nel corpo da saldare. Successivamente quando il fascio laser viene interrotto, una migrazione del materiale fuso circostante da luogo alla saldatura profonda. Essendo la densità di energia necessaria ad instaurare la formazione del keyhole molto più elevata di quella necessaria al suo mantenimento sono particolarmente adatti a questo modo di saldatura i laser pulsati, come quello utilizzato per le prove eseguite.

Altro fenomeno importante che ci consente di

saldare leghe ad alta riflettività e quello del grande decadimento della riflettività con aumenti elevati di temperatura, che trasforma il metallo da riflettente ad assorbente.



La saldatura a conduzione su leghe preziose può a volte essere usata per abbellire il cordone o livellare lo stesso in riparazioni per la chiusura di pori o parti in vista dove basta intervenire sullo stato superficiale.

Le prove eseguite al fine di testare le leghe a questa tecnica di saldatura, sono state fatte su una macchina Sisma mod. SGW/L, interfacciata ad un generatore laser Sisma mod. sl35. La macchina per catena usata nelle prove riesce ad immagliare fino a 500 anelli al minuto racchiudendo nel suo ciclo anche il tempo necessario a contenere la fase di saldatura. Il generatore laser usato è di tipo pulsato NdYAG a 1064 nm pompato a lampada.

Il fascio generato da un mezzo attivo del diametro di 6.35 mm con un sistema ottico convergente viene mandato in fibra, che funge da mezzo di trasmissione dell'energia. Caratteristica della fibra è quella di trasmettere quantità elevate di energia (fino a 105–107 W/cm<sup>2</sup>), essendo al tempo stesso flessibile e rendendo agevole il posizionamento a bordo macchina del sistema focalizzante il raggio laser. Un sistema ottico di focalizzazione, fissato sulla macchina e munito di un sistema di regolazione meccanica di precisione consente il posizionamento del raggio laser focalizzato nel punto di saldatura. La distanza focale dell'ottica di focalizzazione è di 70 mm e genera uno spot di saldatura variabile da 0,2 a 0.4 mm in funzione del diametro della fibra e della bontà della messa a fuoco. Particolari protezioni anteriori unite a flussi di aria ed un contenitore stagno preservano il sistema da inquinamento da olio e polvere normalmente presente in macchina. Un accurato controllo dei parametri del generatore laser in tempo ed energia consente una buona ripetibilità e costanza della saldatura. I parametri principali che definiscono una saldatura laser sono la densità di potenza ed il tempo di saldatura, che danno come risultante la dimensione della zona saldata ed indirettamente la qualità della saldatura. Dalla tabella sottostante si nota che la riflettività dei materiali di nostro interesse risulta essere molto elevata e pertanto la saldatura può avvenire sola-

mente in condizioni di KeyHole.

RIFLETTIVITA' SELETTIVA ALLA LUNGHEZZA D'ONDA DEL LASER ND:YAG	
Materiali (temperatura ambiente)	Percentuale riflettività
	Nd:YAG
ALLUMINIO	75%
RAME	98%
ORO	98%
FERRO	65%
ACCIAIO AL CARBONIO	63%
ACCIAIO INOSSIDABILE	53%
NICHEL	74%
TITANIO	60%
ARGENTO LUCIDATO	95%

Essendo la riflettività dei materiali preziosi e delle LORO leghe molto alta, dobbiamo tener conto in questo processo produttivo dello stato superficiale del prodotto ed in particolare della sua costanza (assenza di macchie o zone ossidate).

## 4. Parte Sperimentale

La lega presa come riferimento, molto utilizzata nella produzione di catene a macchina di elevata qualità, presenta la composizione del campione 1 illustrato in tabella 1. Per tutti i campioni testati è stata mantenuta costante la percentuale di Oro (585 millesimi, 14 carati europeo) e di Argento (83 millesimi), mentre è stata variata la composizione di Zinco, Rame, Iridio e Silicio.

La tabella 1 riporta le composizioni dei primi otto campioni esaminati.

Tabella 1-Composizione leghe

Composizione [millesimi]						
Campione	Au	Ag	Zn	Cu	Ir	Si
1	585	83	62.25	269,25	0.5	0
2	585	83	62.25	269,25	0	0
3	585	83	62.25	268,95	0.5	0.3
4	585	83	62.25	269,45	0	0.3
5	585	83	20.75	310,75	0.5	0
6	585	83	20.75	311,25	0	0
7	585	83	103.75	227,75	0.5	0
8	585	83	103.75	228,25	0	0

Come si può notare i primi quattro campioni hanno la stessa composizione di base (Au, Ag, Zn) e variano solo per le quantità di iridio e silicio. Il campione 1 ha solo l'affinatore del grano (Ir), il campione 2 non ha né iridio né silicio, il campione 3 ha sia iridio che silicio e il campione 4 ha solo silicio.

I campioni 5 e 6 hanno una composizione molto diversa rispetto al campione 1 di base presentando una quantità di zinco molto inferiore rispetto ai primi quattro (e di conseguenza una quantità di rame più elevata). Il campione 5 ha anche iridio mentre il 6 non ha iridio.

I campioni 7 e 8 invece presentano un elevato contenuto di zinco (e di conseguenza poco rame)

rispetto ai primi quattro campioni di riferimento. Il campione 7 ha iridio mentre il campione 8 è senza iridio.

Sono state testate composizioni con o senza iridio per ottenere un filo con superficie diversa (grano più o meno piccolo, buccia d'arancia più o meno evidente), in modo da capire come si comporta la saldatura in funzione del tipo di superficie con cui interagisce.

Tali campioni sono stati fusi in staffa (dopo prefusione) presso la nostra azienda e quindi consegnati ad un produttore di catena che ha eseguito la laminazione e la trafilatura fino ad ottenere il filo da 0,4 mm, secondo le indicazioni di seguito riportate da noi fornite.

Prima laminazione: dalla sezione quadra 6x6 mm fino alla sezione quadra 3x3 mm (pari al 75% di riduzione), quindi ricottura in forno statico alla temperatura di 650°C per un tempo di permanenza di 20 minuti.

Seconda laminazione: dalla sezione quadra 3x3 mm fino alla sezione quadra 1,3x1,3 mm (pari al 80% di riduzione) quindi ricottura con le modalità sopra riportate.

Si passa quindi alla trafilatura: dalla sezione quadra 1,3x1,3 fino ad un filo di diametro 0,9 mm (pari ad una riduzione media del 62%) quindi ricottura con le stesse modalità sopra riportate. Da diametro 0,9 mm fino a diametro 0,4 mm (pari al 80% di riduzione) quindi ricottura.

Si vuole far notare che si è scelto di far produrre il filo ad una ditta produttrice di catena appositamente per avvicinarsi il più possibile alla pratica comune di produzione del filo, per capire se eventuali parametri esterni (comunque legati alla composizione della lega) possano influenzare la qualità della saldatura ottenuta (in particolar modo ci si riferisce alla qualità della superficie del filo esempio con buccia d'arancia oppure senza buccia d'arancia).

Una volta ottenuto il filo di diametro 0,4 mm si è determinata la dimensione media del grano cristallino dopo il ciclo precedentemente illustrato (prima dell'ottenimento della catena) quindi il filo è stato inviato alla ditta SISMA dove sono stati prodotti alcuni campioni di catena saldata con diversi parametri macchina.

## 5. Discussione dei risultati

In tabella 2 sono riportati i valori medi della dimensione del grano del filo utilizzato per produrre la catena e la temperatura solidus e liquidus determinata attraverso il DTA (analisi tecnica differenziale).

Parte del filo prodotto dall'azienda esterna ci è stato riconsegnato non ricotto per poter verificare l'operazione di ricottura eseguita da terzi. In tabella 2 sono riportate la dimensione media dei

grani rilevati nel filo ricotto da terzi e le dimensioni del grano rilevate nei campioni ricotti nel nostro laboratorio a 650°C per 20 minuti. Si fa notare che la dimensione media del grano è stata determinata appositamente dopo il ciclo di produzione del filo eseguito da un'azienda orafa esterna per avvicinarsi il più possibile alla pratica quotidiana di produzione di catena.

**Tabella 2-Dimensione media del grano e relativa temperatura di solidus e liquidus**

Dimensione Grano Filo Catena[ $\mu\text{m}$ ]	Dimensione Grano Laboratorio [ $\mu\text{m}$ ]	Intervallo di fusione [°C]
40	45	821-861
45	70	821-861
20	20	815-858
60	55	815-858
25	20	849-889
40	30	849-889
90	55	789-829
70	110	789-829

Le dimensioni del grano dei campioni ricotti in laboratorio corrispondono a quanto ci si aspettava in funzione delle varie composizioni tranne il campione 3 (con iridio e silicio) che stranamente presenta un grano minore del campione 1 (solo con iridio).

Le dimensioni del grano dei campioni prodotti da terzi confrontate con i valori di laboratorio presentano alcune anomalie come ad esempio il campione 1 che presenta un grano paragonabile con il campione 2 che non ha l'affinatore e addirittura maggiore del campione 3 che ha affinatore e silicio; altra anomalia (meno significativa) è il campione 7 che pur avendo l'affinatore presenta un grano maggiore del campione 8 che a parità di composizione non ha l'affinatore. Tali anomalie (a parte quella del campione 3 che è uguale al valore di laboratorio) si pensa siano imputabili alla procedura di ricottura.

Come si osserva dalla tabella 2 la dimensione del grano dei fili ricotti da terzi (da cui poi è stata ottenuta la catena) variano da 20 a 90  $\mu\text{m}$  e pertanto si avranno delle maglie di catena con diversa morfologia superficiale (con più o meno buccia di arancia).

Le catene sono state saldate al laser da un operatore che ha determinato gli idonei parametri di potenza e tempo dopo alcune prove preliminari, secondo la prassi comune (esame con microscopio ottico). Di seguito sono riportati i valori di potenza e tempo che secondo l'operatore garantiscono una buona saldatura.

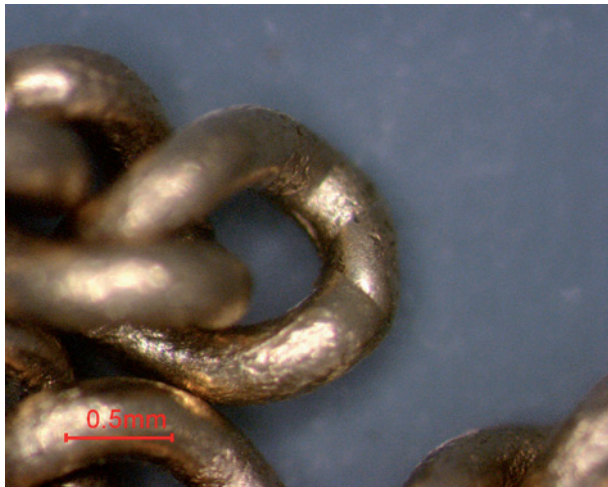
**Tabella 3-Valori di Potenza Tempo determinati dall'operatore per una buona saldatura**

Campione	Potenza [W]	Tempo [ms]
1	1086	8,0
2	1148	6,0
3	907	7,3
4	965	7,0
5	1648	3,4
6	1374	3,4
7	995	7,2
8	1025	6,3

A questo punto ogni catena è stata esaminata nei minimi particolari per determinare una corrispondenza tra ciò che la pratica comune considera una buona saldatura e la reale struttura del giunto saldato. Per tale scopo ogni campione è stato esaminato sotto due diversi aspetti:

- 1- sono stati fotografati i vari giunti di saldatura esternamente tal quali (che è il metodo adottato nella pratica ossia l'osservazione visiva);
- 2-osservazione della saldatura in sezione e della relativa microstruttura nel punto di fusione per compararla con l'osservazione visiva (del punto 1 di cui sopra);

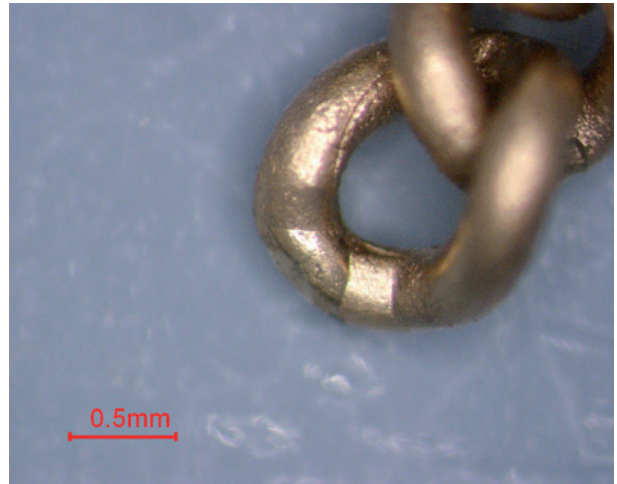
Di seguito vengono riportate le foto per i vari campioni in riferimento al punto 1.



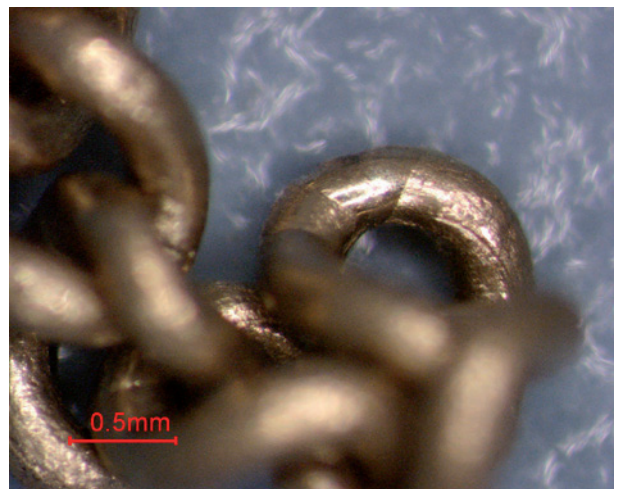
**Figura 1 - Campione 1 1086W 8 ms - Buccia di arancia evidente**



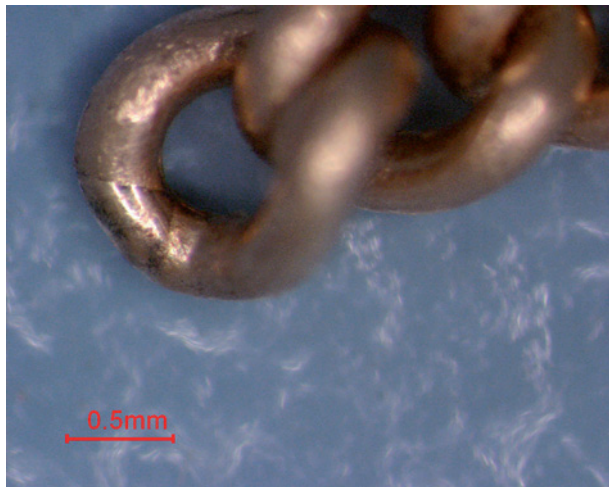
**Figura 2 - Campione 2 1148W 6 ms - Buccia di arancia evidente**



**Figura 3 - Campione 3 907W 7,3 ms - Buccia di arancia poco evidente**



**Figura 4 - Campione 4 965W 7 ms - Buccia di arancia evidente**



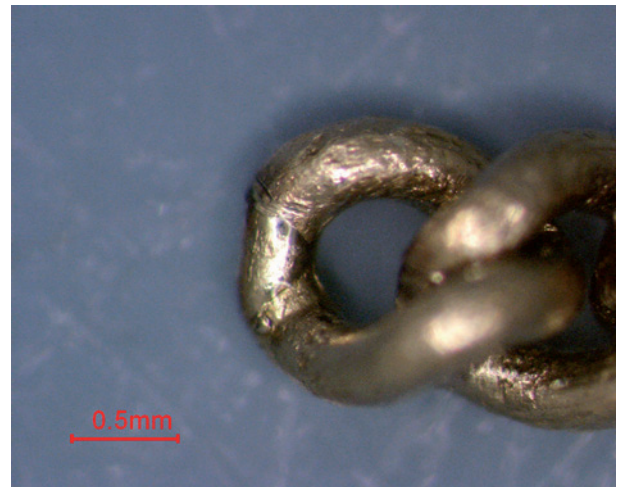
**Figura 5 - Campione 5 1648W 3,4 ms - Buccia di arancia poco evidente**



**Figura 6 - Campione 6 1374W 3,7 ms - Buccia d'arancia evidente**



**Figura 7 - Campione 7 995W 7,2 ms - Buccia d'arancia molto evidente**



**Figura 8 - Campione 8 1025W 6,3 ms - Buccia d'arancia molto evidente**

Possono già essere fatte alcune considerazioni sulla base di queste prime osservazioni.

Da un primo esame visivo tutti gli otto campioni presentano un cordolo di saldatura lucido che ricopre l'intera maglia.

Mettendo in relazione le composizioni, la dimensione del grano (reale), le temperature di fusione ed i valori di potenza e tempo portano alle considerazioni seguenti.

Per i primi 4 campioni, la cui composizione varia solo per la presenza o meno di iridio e silicio, non ci sono state particolari difficoltà nell'ottenere un buon giunto di saldatura. Il campione 3 è stato quello che in assoluto ha presentato la maggiore facilità ad essere saldato. Tale campione è quello con la più piccola dimensione del grano cristallino e quindi con minore buccia di arancia infatti risulta essere il più lucido e luminoso.

I campioni 5 e 6 hanno un contenuto di zinco inferiore rispetto ai primi quattro e conseguentemente un contenuto di rame maggiore e presentano una dimensione del grano cristallino comparabile con essi. I campioni sono saldabili in modo soddisfacente ma necessitano di potenze molto maggiori rispetto a tutti i campioni. Ciò è stato messo in relazione alla maggiore riflettività dovuta alla maggiore quantità di rame ed in parte al più elevato punto di fusione (vedi tabella 2 dove sono riportate le temperature di fusione).

I campioni 7 e 8 hanno un contenuto di zinco maggiore rispetto ai primi quattro (conseguentemente un minor contenuto di rame) e presentano una dimensione del grano cristallino molto grande, infatti si nota una buccia di arancia molto evidente. Si sono avute maggiori difficoltà nel saldare la catena per la formazione di giunti saldati con rigonfiamento (in seguito rilevatesi bolle). Questi due ultimi campioni necessitano di una potenza inferiore rispetto a tutti gli altri.

In riferimento al punto 2 di seguito sono riportate le microstrutture dei punti di fusione in sezione.

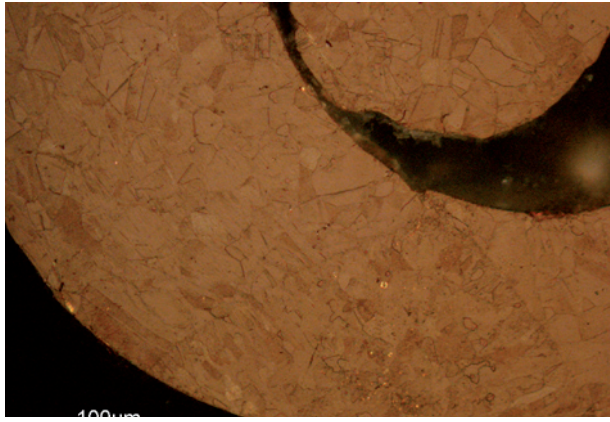


Figura 9 - Micrografia Campione 1

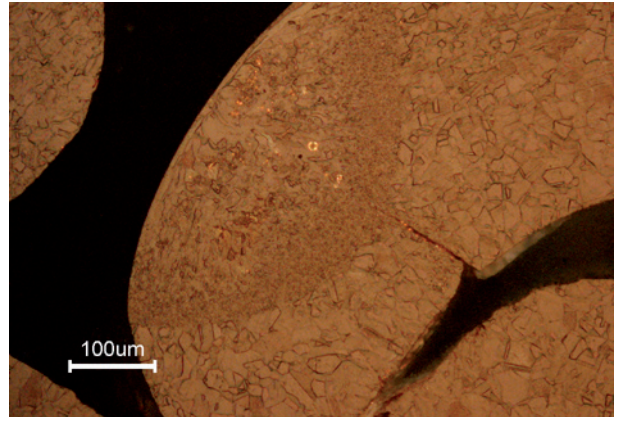


Figura 13 - Micrografia Campione 5

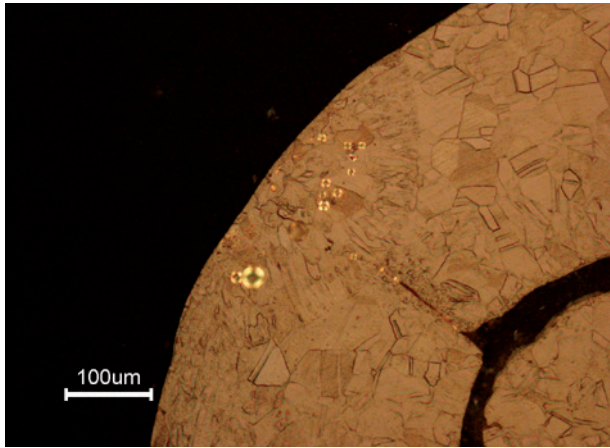


Figura 10 - Micrografia Campione 2

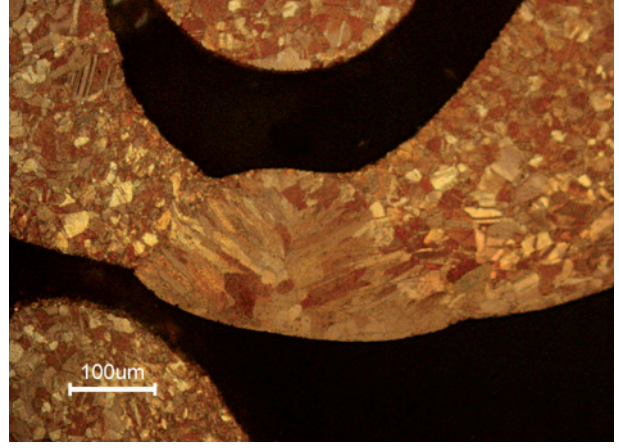


Figura 14 - Micrografia Campione 6

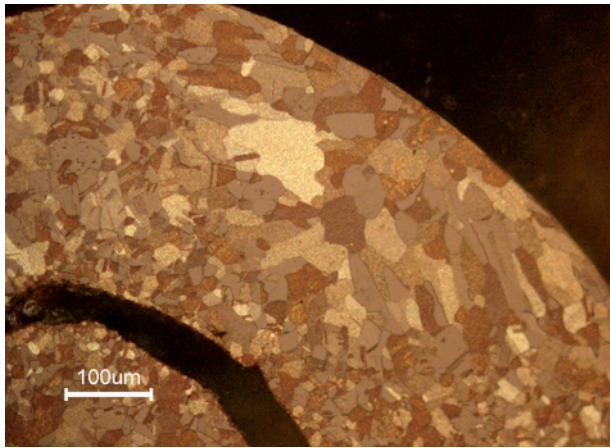


Figura 11 - Micrografia Campione 3

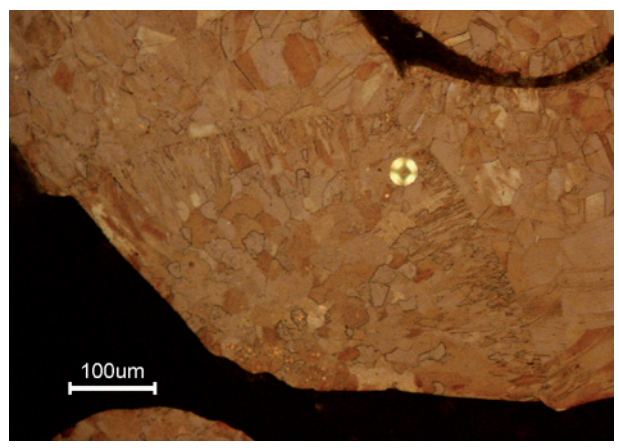


Figura 15 - Micrografia Campione 7

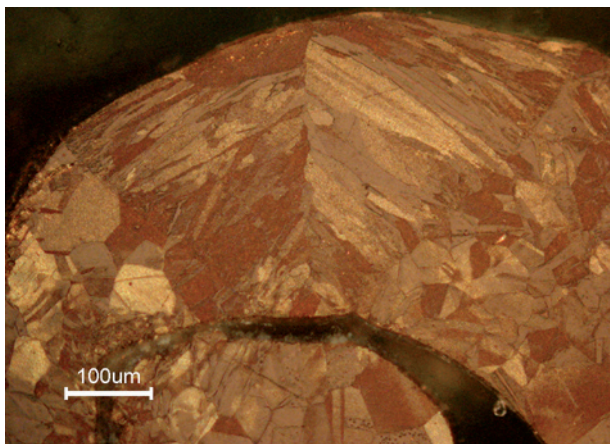


Figura 12 - Micrografia Campione 4

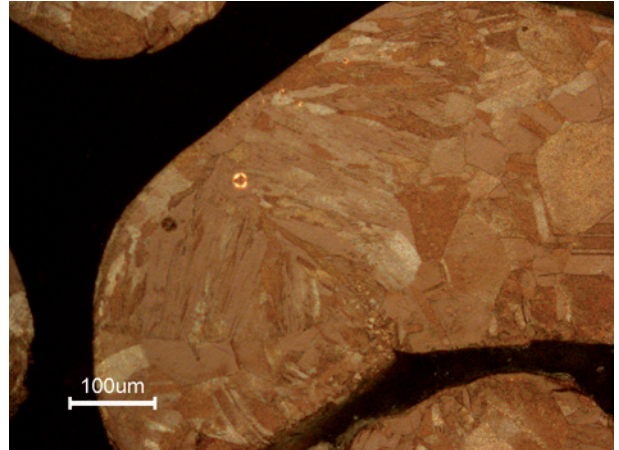


Fig.16 - Micrografia Campione 8

Dall'esame microstrutturale della sezione possono essere fatte le seguenti considerazioni.

Nel campione 1 il grano cristallino nella zona di fusione risulta quasi regolare e più piccolo di quello della maglia. La zona fusa copre completamente la sezione della maglia.

Il campione 2 non presenta una saldatura completa in sezione. Il grano cristallino nella zona di fusione risulta avere circa la stessa dimensione di quello della maglia.

Il grano cristallino del campione 3 nella zona di fusione risulta essere regolare ma molto più grande rispetto al resto della maglia. La zona fusa copre completamente la sezione della maglia.

Nel campione 4 il grano cristallino nella zona di fusione risulta essere colonnare e più grande rispetto di quello della maglia. La zona fusa copre completamente la sezione della maglia.

Il campione 5 non presenta una saldatura completa in sezione, probabilmente per un'insufficiente potenza o/e tempo in relazione alla maggior quantità di rame (vedi considerazioni precedenti). Il grano cristallino nella zona di fusione risulta essere regolare ma molto più piccolo rispetto al resto della maglia.

Nel campione 6 il grano cristallino nella zona di fusione risulta essere colonnare e più grande rispetto di quello della maglia. La zona fusa copre completamente la sezione della maglia.

Nel campione 7 è da rilevare un certo cedimento della zona fusa rispetto al resto del filo, spiegabile in parte con la minore temperatura necessaria per la fusione che può portare al collassamento della zona fusa rispetto alla maglia (abbassamento rispetto alla sezione circolare). La zona fusa copre parzialmente la sezione della maglia.

Il campione 8 è quasi completamente saldato in sezione. Il grano cristallino è colonnare e risulta avere circa la stessa dimensione di quello della maglia.

Mettendo in relazione le composizioni con le microstrutture appena descritte risulta evidente che le leghe senza affinatore (campioni 2, 6, 8) presentano un grano cristallino con dimensioni paragonabili o maggiori a quelli della maglia, tutti di forma colonnare. Il campione 4 (senza affinatore ma con silicio) presenta un grano cristallino con andamento paragonabile ai campioni 2, 6, 8 ma con la presenza di un'insolita demarcazione fra i due lembi della maglia come si fossero fusi separatamente per poi ricomporsi (infatti i grani colonnari sembra abbiano origine in corrispondenza dei lembi della maglia).

In tutti i campioni con la presenza di iridio come affinatore (campioni 1, 5, 7) si nota che la dimensione del grano della zona fusa risulta più piccola di quella della maglia (confermando il fatto che l'iridio si comporta da ottimo affinatore in fusione) e che ciò rende più agevole l'omogeneizzazione della dimensione del grano cristallino mantenendolo di piccole dimensioni (poco più

grandi di quelle della maglia) applicando un successivo ed opportuno trattamento termico.

Il campione 3 (dove oltre all'iridio è presente anche il silicio) ha un grano di dimensioni più grandi rispetto a quello della maglia confermando il fatto che il silicio tende a far aumentare la dimensione del grano in fusione, mentre l'iridio agisce da nucleante favorendone una forma regolare.

Dopo queste prove preliminari abbiamo ricavato delle indicazioni da approfondire.

Relativamente alla composizione della lega sono da indagare ulteriormente l'azione dello zinco, del silicio e dell'iridio.

Si è notato che all'aumentare del contenuto di zinco aumentavano anche le condizioni di criticità della saldatura della catena. L'ipotesi più probabile è che la vaporizzazione dello zinco dovuta alle altissime temperature raggiunte con il laser nella condizione di keyhole produca dei vapori di zinco che rimangono intrappolati nella massa fusa (che in condizioni estreme possono formare delle bolle). Inoltre esiste la contemporanea possibilità di formazione di ossido di zinco che sospinto all'interno della massa fusa ne comporta una minore fluidità.

Per quanto riguarda il silicio si è voluto indagare l'anomalo comportamento rilevato nel campione 3 per meglio verificare il suo comportamento come disossidante (quindi protettivo di fusione) e l'eventuale interazione con lo zinco (vedi micrografia del campione 4).

Si è notato che nei campioni con iridio lo stato superficiale delle maglie risulta con minor buccia di arancia ma soprattutto la zona fusa presenta una dimensione del grano cristallino minore di quella del resto della maglia (che dipende dalle condizioni di ricottura finali).

Da queste osservazioni sono stati preparati dieci nuovi campioni le cui composizioni sono riportate in tabella 4. Le prime due a completamento dell'esame di leghe d'oro giallo a 14 carati nella produzione di catene saldate con il laser. Le altre otto composizioni sono state formulate per relazionare la qualità del giunto saldato con il contenuto di zinco nella lega con e senza silicio. In tutti le leghe è presente l'iridio.

**Tabella 4-Composizione della nuove dieci leghe**

17Composizione [millesimi]18						
Campione	Au	Ag	Zn	Cu	Ir	Si
9	585	50	62,25	301,95	0,5	0,3
10	585	120	62,25	231,95	0,5	0,3
11	585	83	80	251,5	0,5	0
12	585	83	100	231,5	0,5	0
13	585	83	120	211,5	0,5	0
14	585	83	140	191,5	0,5	0
15	585	83	80	251,2	0,5	0,3
16	585	83	100	231,2	0,5	0,3
17	585	83	120	211,2	0,5	0,3
18	585	83	140	191,2	0,5	0,3

Si è operato come per i precedenti otto campioni, pertanto è stata determinata la dimensione media del grano sul filo e l'intervallo di fusione per tutte le leghe. Avendo notato dalle precedenti prove l'importanza di avere una superficie con la minore buccia di arancia possibile la ricottura finale è stata eseguita a 650°C per 15 minuti (minor tempo rispetto ai precedenti otto campioni). In tabella 5 sono riportati i valori rilevati.

**Tabella 5-Dimensione media del grano e intervallo di fusione per le nuove dieci leghe testate**

Campione	Dimensione Grano Filo Catena[ $\mu\text{m}$ ]	Dimensione Grano Laboratorio [ $\mu\text{m}$ ]	Intervallo di fusione [ $^{\circ}\text{C}$ ]
9	30	25	827-867
10	40	40	793-829
11	40	45	803-842
12	45	45	787-826
13	80	80	771-811
14	100	100	754-793
15	25	25	797-842
16	40	35	783-825
17	40	40	767-810
18	70	80	746-792

Le dimensioni del grano dei campioni prodotti da terzi confrontate con i valori di laboratorio presentano una buona corrispondenza ed inoltre riducendo i tempi di ricottura è stato possibile ottenere un grano cristallino più piccolo (si confronti il campione 12 con il campione 7 che hanno composizione molto simile).

Quanto osservato precedentemente con il campione 3 viene qui confermato. Infatti i campioni con silicio e iridio (15, 16, 17, 18) presentano un grano leggermente più piccolo rispetto ai campioni con la stessa composizione ma senza silicio (11, 12, 13, 14).

Si osserva che tutti i campioni mantengono una dimensione del grano cristallino accettabile fino ad un contenuto dello zinco di circa 100 millesimi (ad eccezione del campione 17). Oltre tale valore il grano si ingrossa in modo esponenziale.

Le catene sono state saldate al laser da un operatore che ha determinato gli idonei parametri di potenza e tempo dopo alcune prove preliminari, come per i precedenti campioni. Di seguito sono riportati i valori di potenza e tempo che secondo l'operatore garantiscono una buona saldatura.

**Tabella 6-Valori di Potenza Tempo determinati dall'operatore per una buona saldatura**

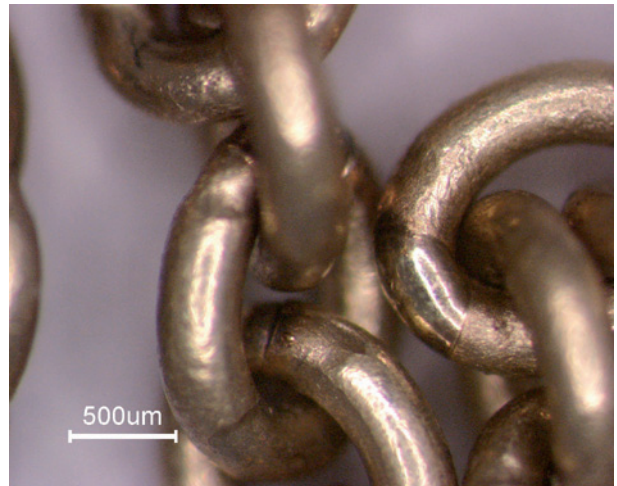
Campione	Potenza [W]	Tempo [ms]
9	1330	2,6
10	1163	2,4
11	1274	2,4
12	1274	2,6

13	1003	2,2
14	803	2,1
15	1330	2,6
16	1330	2,6
17	1163	2,4
18	1003	2,0

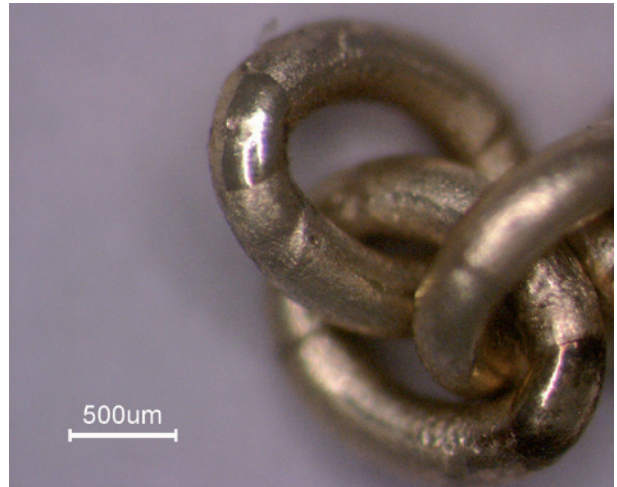
Confrontando tale tabella con la tabella 3 si nota subito che l'operatore in questo caso ha operato con potenze leggermente più alte ma con tempi molto minori.

Come per i campioni precedenti è stata seguita la stessa procedura di indagine pertanto sono stati fotografati i giunti di saldatura tal quali ed in sezione (micrografie).

Di seguito vengono riportate le foto dei punti di saldatura esterni delle maglie.

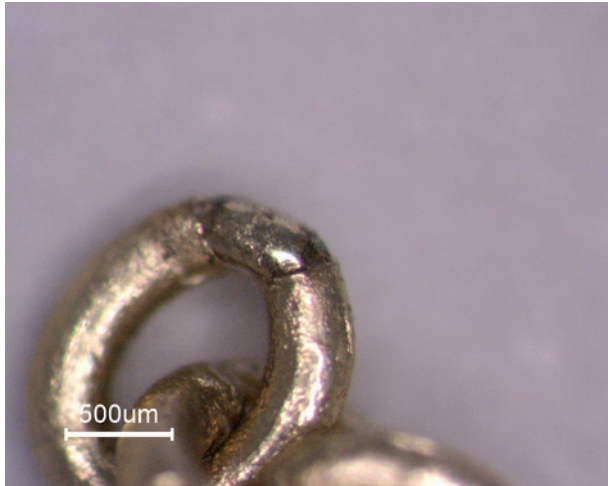


**Fig.17- Campione 9 1330 W 2,6 ms - Buccia di arancia poco evidente**

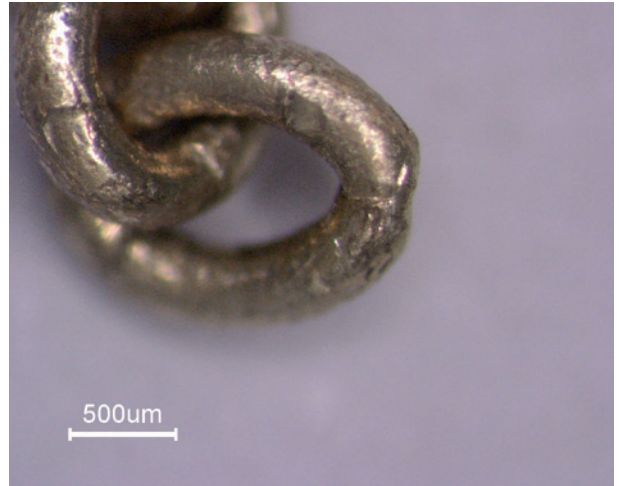


**Fig.18- Campione 10 1163 W 2,4 ms - Buccia di arancia poco evidente**

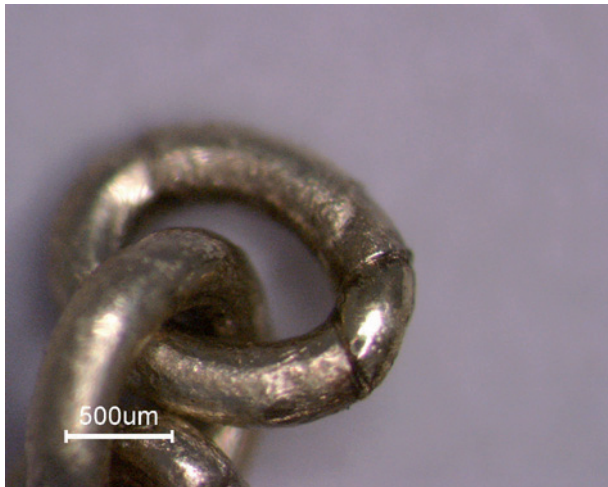




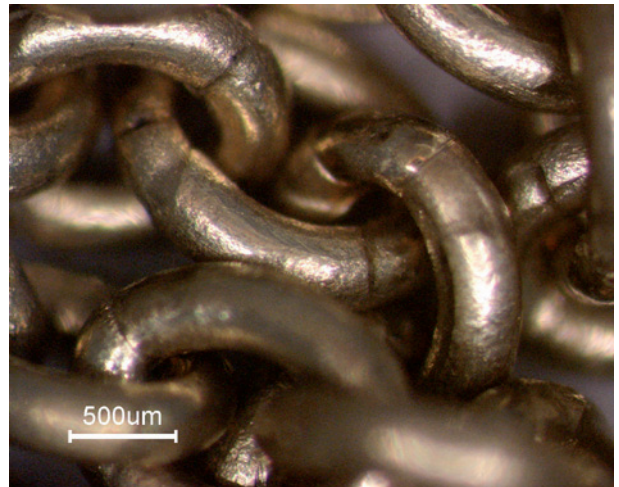
**Fig.19- Campione 11 1274 W 2,4 ms - Buccia di arancia evidente**



**Fig.22- Campione 14 803 W 2,1 ms - Buccia di arancia molto evidente**



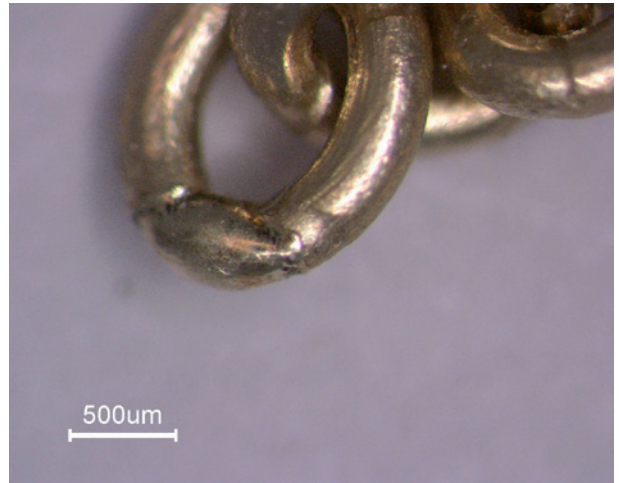
**Fig.20- Campione 12 1274 W 2,6 ms - Buccia di arancia evidente**



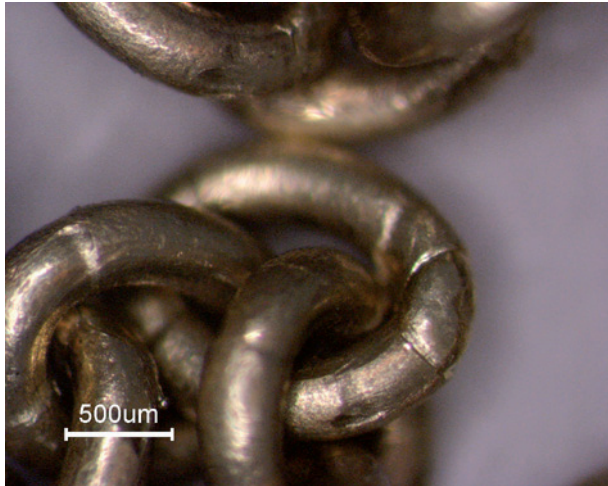
**Fig.23- Campione 15 1330 W 2,6 ms - Buccia di arancia poco evidente**



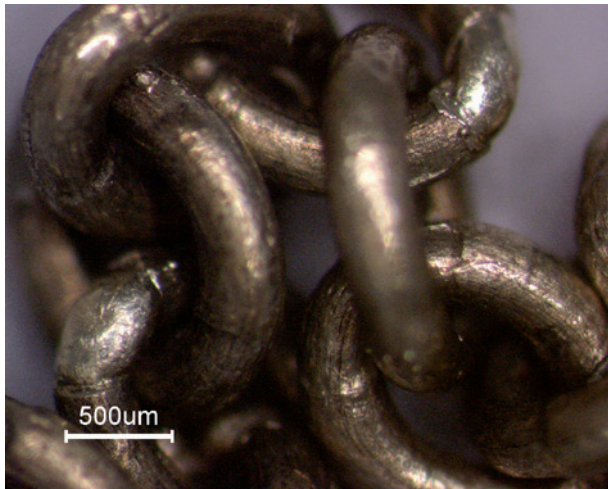
**Fig.21- Campione 13 1003 W 2,2 ms - Buccia di arancia molto evidente**



**Fig.24- Campione 16 1330 W 2,6 ms - Buccia di arancia poco evidente**



**Figura 25 - Campione 17 1163 W 2,4 ms - Buccia di arancia poco evidente**

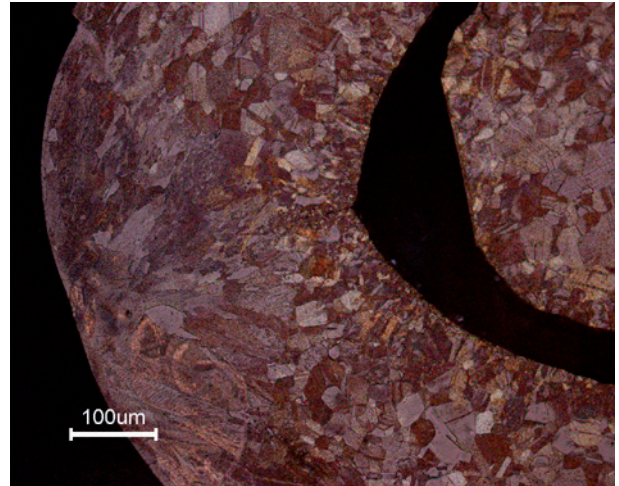


**Figura 26 - Campione 18 1003 W 2,0 ms - Buccia di arancia evidente**

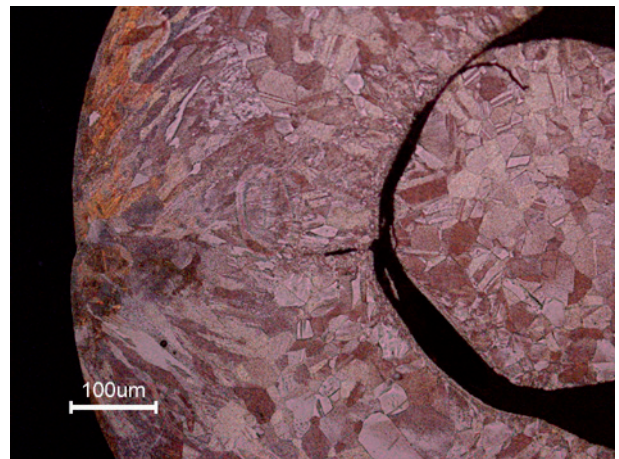
Da un esame visivo si può osservare che solo i campioni 9 e 10 presentano un cordolo di saldatura lucido che ricopre l'intera maglia. In tutti gli altri ed in particolare nei campioni con un contenuto di zinco uguale e superiore a 100 millesimi sul cordolo di saldatura è visibile sia un ringofamento e un principio di cedimento della zona fusa. Si osserva inoltre come nei campioni con contenuto di zinco oltre i 100 millesimi si ha una superficie con buccia di arancia molto evidente, ad eccezione del campione 17 (rispecchiando quanto rilevato dalla dimensione del grano cristallino).

Si è inoltre notato che in tutti i campioni con un contenuto di zinco superiore a 100 millesimi si è ottenuto un filo non omogeneo in quanto si alternavano parti lucide con parti opache. Questo comporta dei grossi problemi di saldatura con il laser in quanto molto sensibile allo stato superficiale (diversa riflettività da punto a punto).

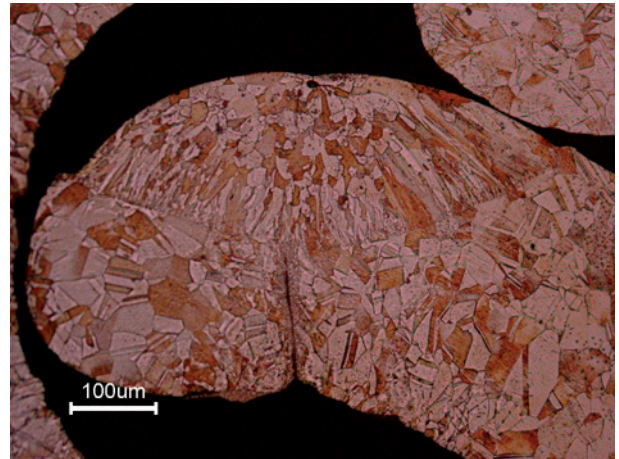
Di seguito sono riportate le microstrutture dei punti di fusione delle maglie in sezione.



**Figura 27 - Micrografia Campione 9**



**Figura 28 - Micrografia Campione 10**



**Figura 29 - Micrografia Campione 11**

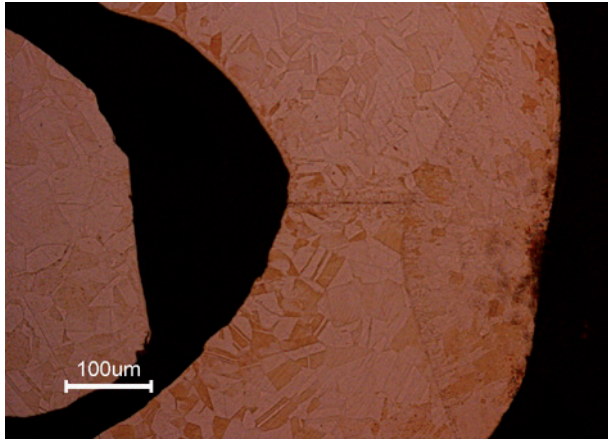


Figura 30 - Micrografia Campione 12

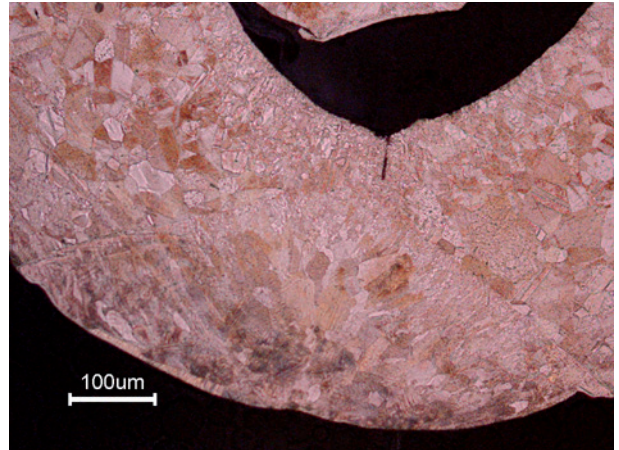


Figura 34 - Micrografia Campione 16

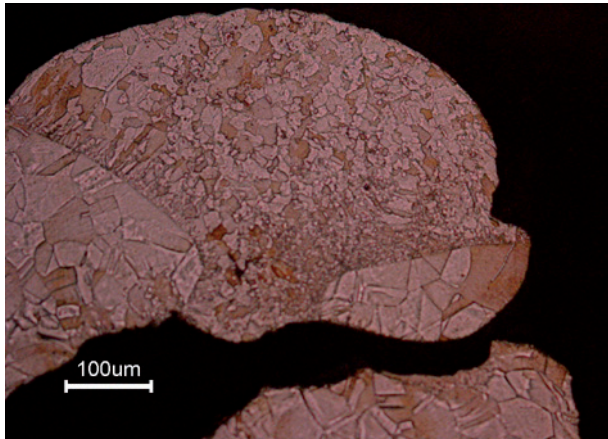


Figura 31 - Micrografia Campione 13

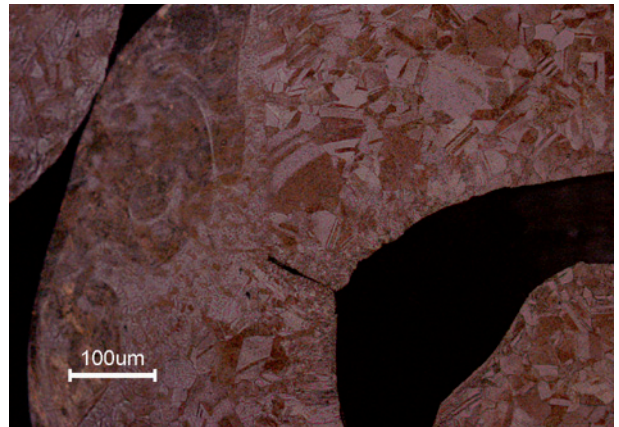


Figura 35 - Micrografia Campione 17

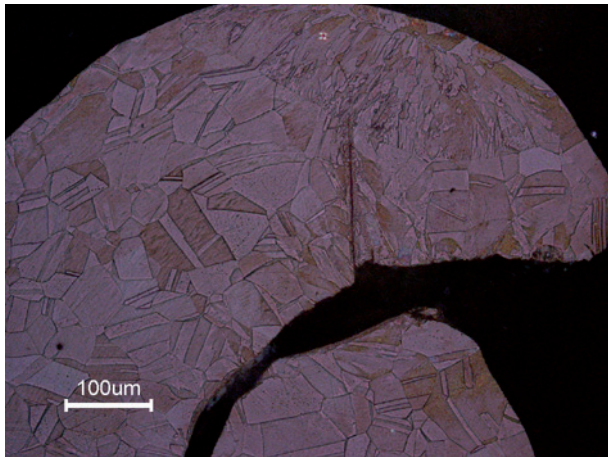


Figura 32 - Micrografia Campione 14

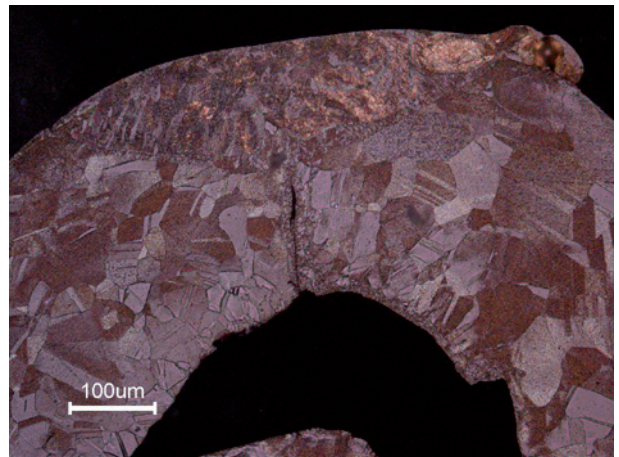


Figura 36 - Micrografia Campione 18

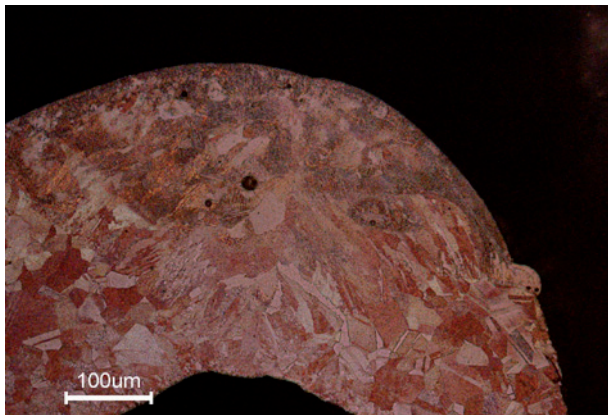


Figura 33 - Micrografia Campione 15

Si nota che ad eccezione del campione 13 in tutti gli altri campioni la zona fusa non copre completamente la sezione della maglia. Questo ci ha fatto supporre che il tempo impostato (per la specifica potenza) sia stato insufficiente per avere una completa saldatura dei lembi (come già osservato confrontando le tabelle 6 e 3). A tal proposito si è accertato che questi campioni non sono stati saldati dallo stesso operatore che ha eseguite le prove sui primi 8 campioni. Ciò ci ha portato alla conclusione che un'osservazione visiva non è sufficiente a stabilire la completa fusione dei lembi in sezione e risulta essere soggettiva. Il giunto di saldatura può essere valutato correttamente solo

esaminandolo in sezione.

Dalle micrografie viene confermato che nei campioni con solo iridio la zona fusa presenta un grano cristallino regolare e di dimensioni più piccole rispetto al resto della maglia. Le altre con iridio e silicio presentano un grano tendenzialmente colonnare e di dimensioni più grandi rispetto a quelle della maglia. Un fenomeno che si è osservato in particolare con i campioni con alti contenuti di zinco è stato quello di rigonfiamenti in prossimità nel punto di saldatura. Si ipotizza che tali rigonfiamenti siano bolle di gas, infatti sono vuote all'interno. Nella figura 37 viene riportato un esempio di queste bolle.



Figura 37 - Maglie con bolle

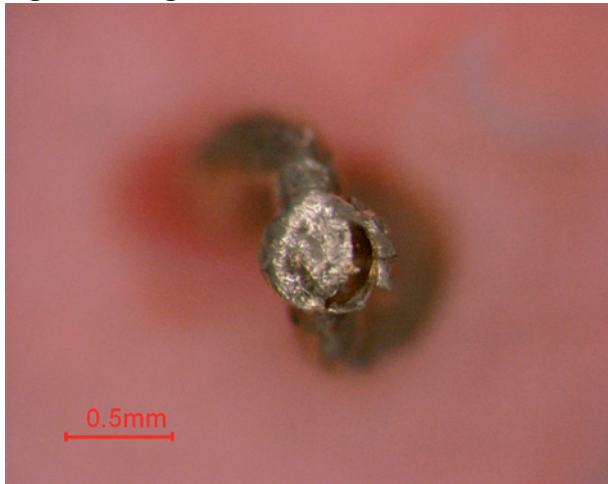


Figura 38 - Bolla aperta

La bolla di figura 38 è stata aperta con una pinza per mostrare che è vuota.

Sono state formulate varie ipotesi sulla natura di queste bolle che vengono di seguito riportate, tali ipotesi sono comunque tutte da verificare:

- vaporizzazione dello zinco per l'alta temperatura raggiunta in condizioni di keyhole
- le maglie sono lubrificate con olio (per motivi meccanici di produzione) che in presenza dell'ossigeno dell'aria potrebbe portare alla formazione di composti di combustione (potrebbe trattarsi di anidride carbonica CO<sub>2</sub> e se presente zolfo di anidride solforosa SO<sub>2</sub> e solforica SO<sub>3</sub>) che poi rimango-

no imprigionati nel metallo fuso formando delle bolle.

Discutendo con i tecnici della SISMA su tale fenomeno si è giunti alla conclusione che l'ipotesi delle bolle dovute ai prodotti di combustione dell'olio sembra poco attendibile, mentre si è portati a pensare che tali bolle siano prodotte proprio dalla vaporazione dello zinco che rimane intrappolato all'interno della massa fusa.

Per verificare se le bolle derivano dal prodotto di reazione tra l'ossigeno e l'olio è stato deciso di provare ad effettuare delle saldature in atmosfera protetta e quindi è stato installato sul laser un sistema che permetta di ottenere un'atmosfera inerte (con Argon).

Con l'atmosfera ad argon effettivamente l'operatore è riuscito a ridurre la formazione delle bolle formate sui lembi, anche se all'interno della zona fusa si nota sempre la presenza di piccole bolle da gas. Probabilmente è da scartare l'ipotesi che le bolle siano un prodotto di combustione olio utilizzato in macchina, in quanto non si spiega come rimangono intrappolati all'interno del punto saldato. Non sono state condotte ulteriori indagini per una serie di considerazioni di carattere pratico: il costo dell'apparecchiatura risulta essere troppo oneroso rispetto ai vantaggi ottenuti per questo tipo di articolo; in secondo luogo normalmente tali macchine sono tenute in gran numero in ambienti piccoli e pertanto potrebbe esserci un problema di saturazione dell'atmosfera. Pertanto è stata scartata l'ipotesi di saldare in atmosfera protetta.

## 6. Conclusioni

Da un punto di vista operativo la saldatura delle catene mediante laser è influenzata da una serie di parametri:

1 - Accostamento dei lembi dell'anello: è molto importante che i lembi degli anelli siano il più possibile vicini tra loro (l'ideale sarebbe a contatto per tutta la sezione).

2 - Il titolo di oro del filo saldato assume importanza pratica (messa a punto dei parametri operativi potenza tempo) in quanto insieme al rame, l'oro è l'elemento che presenta la maggiore riflettività per cui sarà più critica la saldatura di una lega ad alta caratura rispetto ad una a bassa caratura.

3 - Il metodo di esame visivo del cordolo di saldatura si è rivelato soggettivo e non sempre corrispondente con la completa saldatura lungo la sezione. Da osservare però che rispetto ad una saldatura con polveri o liquidi dove si ha una saldatura fra le 2 sezioni dei lembi, con il laser si ottiene invece una saldatura con maggior area fusa interessata all'unione della maglia.

L'influenza dell'omogeneità dello strato superficiale del filo di partenza è in assoluto l'aspetto che

riveste la massima importanza nella saldatura al laser:

- 1- Stessa lucentezza (od opacità) di tutta la matassa del filo. Se su un filo lucido sono presenti delle zone opache, in tali zone cambia l'iterazione tra l'onda elettromagnetica e il filo stesso. Quindi i parametri potenza tempo impostati per il filo lucido non sono idonei per la zona opaca, di conseguenza si ottengono maglie saldate in modo differente (o anche non saldate).
- 2- Stessa conformazione morfologica superficiale, in particolare in riferimento alla buccia di arancia è opportuno che se presente lo sia allo stesso modo in tutta la matassa del filo (per le stesse considerazioni del punto 1 di cui sopra). Si è osservato che in generale una superficie con minore buccia di arancia garantisce una saldatura migliore. E' preferibile disporre di un filo leggermente più duro ma con una superficie senza buccia di arancia piuttosto che uno più tenero ma che presenta una superficie a buccia di arancia, pertanto è consigliabile eseguire la ricottura finale con il solo scopo di ottenere delle caratteristiche meccaniche sufficienti per la formatura dell'anello della maglia.

Da un punto di vista della composizione della lega sulla base degli elementi esaminati possono essere tratte le seguenti conclusioni:

#### **-Zinco**

Le leghe che presentano la maggiore criticità nella saldatura con laser sono quelle con alti contenuti di zinco (maggiori di 100 millesimi).

Lo zinco fra i vari elementi della lega è quello che vaporizza più facilmente. Si è associato pertanto che nelle leghe ad alto contenuto di zinco si abbia un'elevata produzione di vapori e che questi comportino la formazione di bolle all'interno della massa fusa. In generale le leghe ad alto contenuto di zinco presentano un cordolo di saldatura meno lucido e con un evidente cedimento della massa fusa nel punto di saldatura. Inoltre in riferimento a quanto determinato nei punti precedenti si ottengono più facilmente fili con evidente buccia di arancia e con macchie superficiali.

#### **-Silicio**

Si era ipotizzato in un primo momento che le capacità disossidanti del silicio potessero influenzare in modo positivo la fusione. Si è invece rilevato che tale e pur certa capacità è ininfluenza nella saldatura con il laser (probabilmente per il fatto che comunque si tratta di una fusione puntuale con tempi estremamente ridotti, e per la stessa natura del keyhole).

E' comunque da verificare ed approfondire il fatto che il filo con silicio e iridio presenta un grano cristallino di dimensioni minori rispetto a quello con iridio e senza silicio (a parità di composizione).

#### **-Iridio**

Nel nostro caso è stato utilizzato iridio come affinatore del grano cristallino, ma le considerazioni a seguire possono valere anche per altri elementi aventi la stessa funzione (quali Rutenio, Renio, etc...).

L'iridio è l'elemento che ha comportato i maggiori benefici sia nella preparazione del filo di partenza (filo lucido e contenuta buccia di arancia) e nella saldatura con il laser. Infatti come già riportato la zona fusa presenta una dimensione del grano cristallino minore rispetto a quello della maglia e con conformazione regolare. Ciò risulta essere un vantaggio immediato in quanto garantisce un punto di saldatura con caratteristiche meccaniche migliori rispetto a quello con grano grosso e non omogeneo. In secondo luogo consente di ottenere mediante trattamento termico una buona omogeneizzazione (eliminando sia le tensioni termiche da fusione che quelle meccaniche da lavorazione a freddo per la formazione della maglia) ed una microstruttura regolare con limitata crescita del grano in tutta la maglia. Come verifica è stato eseguito un trattamento termico a 650°C per 60 minuti di cui di seguito viene riportata una micrografia di esempio (i parametri sono comunque da ottimizzare).

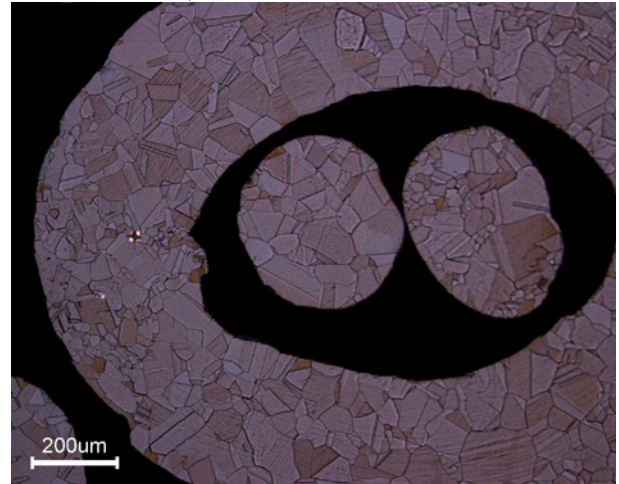


Figura 39 - Campione 13 dopo trattamento termico

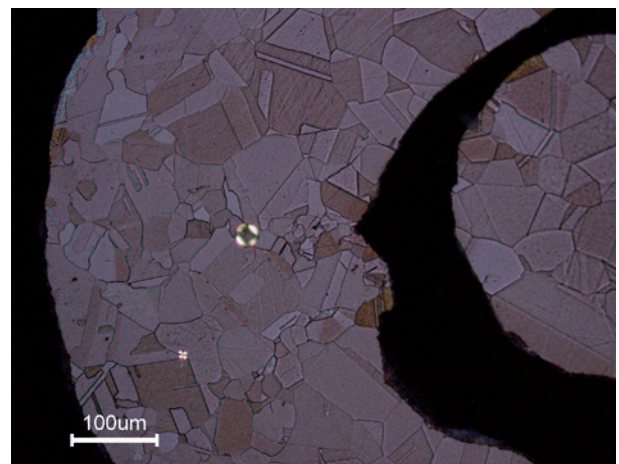


Figura 40 - Campione 13 con maggiori ingrandimenti

E' evidente il beneficio ottenuto con il trattamento termico, infatti è stato ottenuto un grano regolare ed omogeneo in tutta la struttura e si nota come non ci siano sostanziali differenze tra la zona fusa e il resto della maglia. Tale trattamento risulta utile in tutte quelle catene che richiedono un'ulteriore lavorazione meccanica quale battitura, compattatura, etc.

Dalle analisi effettuate si conclude che la produzione di catene a macchina con la saldatura al laser è possibile con quasi tutte le leghe esaminate, con maggiori criticità per quelle ad alto contenuto di zinco e con migliore qualità con quelle a grano fine.

## 7. Bibliografia

“Utilization of lasers in the joining of gold and platinum for jewelry”, Costantino Volpe, Richard D.Lanam, Proceedings of the twelfth Santa Fe Symposium, 1998.

“Laser-Welding platinum jewellery”, Jhon C. Wright, Proceedings of the fifteenth Santa Fe Symposium, 2001

The Photonics design & application Handbook, vol 3, n°44, Ed. Laurin Publication, 1998.

Canaglia, Arfeo (Sisma spa), comunicazioni private, 2004