

Lavorazione meccanica: Punti critici!

Qualche spunto di riflessione sulla base di casi pratici

Andrea Friso, Legor Group S.p.A.

Vantaggi di un processo di deformazione plastica

Superficie compatta, grano cristallino ricostruito

Resistenza meccanica elevata

Automatizzazione di operazioni ripetitive, alta produttività

Spessori sottili



Complessità dell'argomento

Semilavorati simili, ma prodotti finali molto diversi

- Prestazioni differenti in funzione del prodotto da ottenere
- Sistemi produttivi diversi, anche per lo stesso prodotto
- Esigenze di produzione divergenti dalle migliori pratiche



Problemi frequenti: durante la produzione

Fragilità, insufficiente deformabilità

Proprietà meccaniche insoddisfacenti

Problemi con macchine utensili

Tensioni residue, mancato rispetto tolleranze

Saldatura

Vuotatura

Problemi frequenti: prodotto finale

Fragilità nel tempo (tenso-corrosione)

Perdita di elasticità (mancato «effetto molla»)

Usura superficiale

Caso 1: Fragilità su barra oro rosso 750‰

Semilavorato 80x10mm

Lega colore rosso intenso

Riscaldamento passivo della filiera

Raffreddamento in aria

Problema: Fragilità dal secondo passaggio di laminazione

Azioni correttive:

Usato filiera più sottile → 7 mm

Accelerata la discesa della barra

Inserito raffreddamento ad acqua in uscita

Stesso accorgimento per colata statica

Punto critico:
Fase fusoria e
solidificazione

Fusione e solidificazione: punti critici

Sistema fusorio → Protezione del bagno, tempi di colata, pre-fusione, tipologia dei crogioli

Quantitativo colato → efficacia della dissipazione di calore

Colata in lingottiera → Pre-riscaldamento a 250-300°C

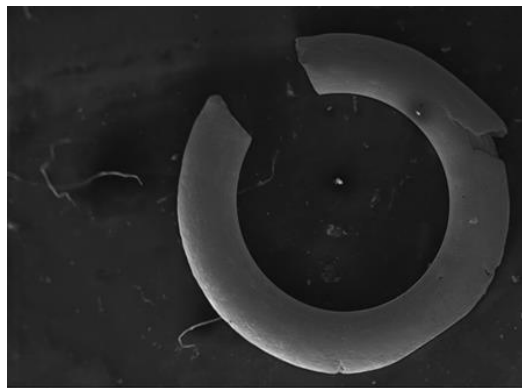
Sezione del semilavorato → Effettuare almeno 2 cicli completi di riduzione e ricottura

(Es. lastra 0.2 mm ← 0.67 mm ← 2.2 mm ← 7.5 mm)

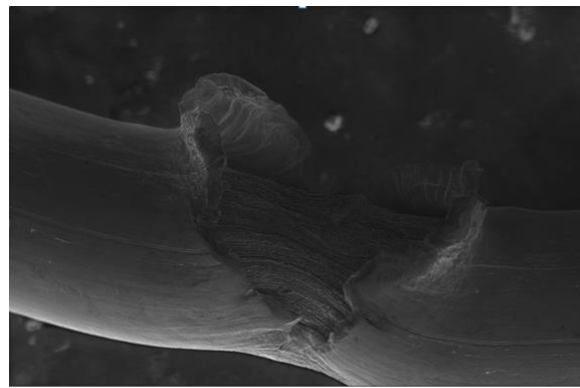
Caso 2: fragilità su catena aggraffata (oro giallo 750 ‰)

Produzione lastra e aggraffatura con ferro eseguite senza problemi

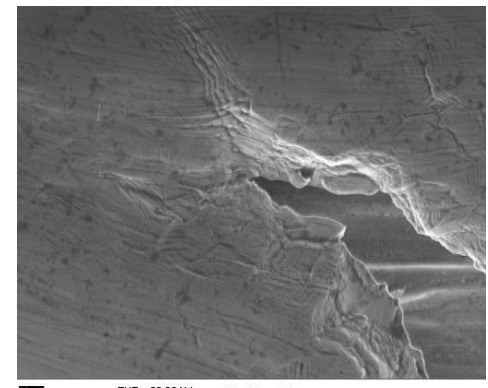
Problema: Rotture della catena durante lavorazioni successive alla formatura, o insufficiente resistenza meccanica ai banchi prova



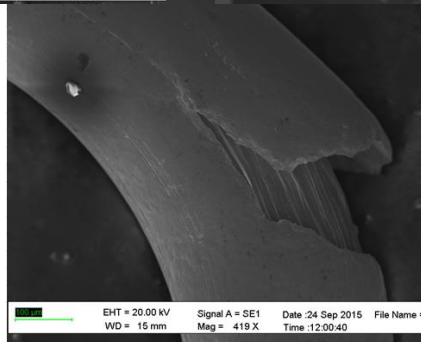
EHT = 20.00 kV
WD = 15 mm
Signal A = SE1
Mag = 87 X
Date :24 Sep 2015
Time :12:02:11



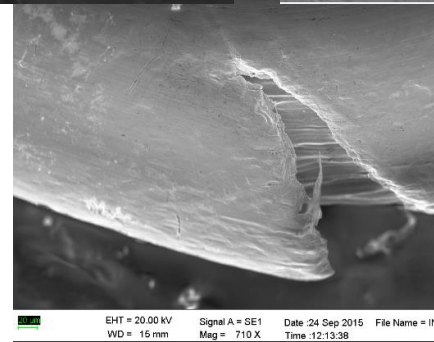
EHT = 20.00 kV
WD = 15 mm
Signal A = SE1
Mag = 341 X
Date :24 Sep 2015
Time :12:17:14



EHT = 20.00 kV
WD = 15 mm
Signal A = SE1
Mag = 2.72 K X
Date :24 Sep 2015
Time :12:14:19



EHT = 20.00 kV
WD = 15 mm
Signal A = SE1
Mag = 419 X
Date :24 Sep 2015
Time :12:00:40



EHT = 20.00 kV
WD = 15 mm
Signal A = SE1
Mag = 710 X
Date :24 Sep 2015
Time :12:13:38

Caso 2: fragilità su catena aggraffata (oro giallo 750 ‰)

Processo iniziale (riduzione lastra)			Processo modificato (riduzione lastra)		
1	Fusione	Lastra 22,0x5,2 mm	1	Fusione	Lastra 22,0x5,2 mm
2	Laminazione	Rid. 50% → 2,5 mm	2	Laminazione	Rid. 65% → 1,8 mm
3	Ricottura	660°C, 45 minuti, stat.	3	Ricottura	660°C, 45 minuti, stat.
4	Laminazione	Rid. 70% → 0,8 mm	4	Laminazione	Rid. 80% → 0,38 mm
5	Ricottura	660°C, 45 minuti, stat.	5	Ricottura	660°C, 45 minuti, stat.
6	Laminazione	Rid. 37% → 0,5 mm	6	Formatura aggraffato (ferro)	∅ = 5,80 mm
7	Ricottura	660°C, 45 minuti, stat.			
8	Laminazione	Rid. 24% → 0,38 mm			
9	Ricottura	660°C, 45 minuti, stat.			
10	Formatura aggraffato (ferro)	∅ = 5,80 mm			

Caso 2: fragilità su catena aggraffata (oro giallo 750 ‰)

Causa del problema: disomogeneità nei gradi di riduzione della lastra

Azioni correttive: Numero inferiore di cicli deformazione, con l'obiettivo di rendere più omogenea la microstruttura

Vantaggio ulteriore: riduzione della durata del ciclo produttivo

Punto critico:
Grado di riduzione
prima della ricottura

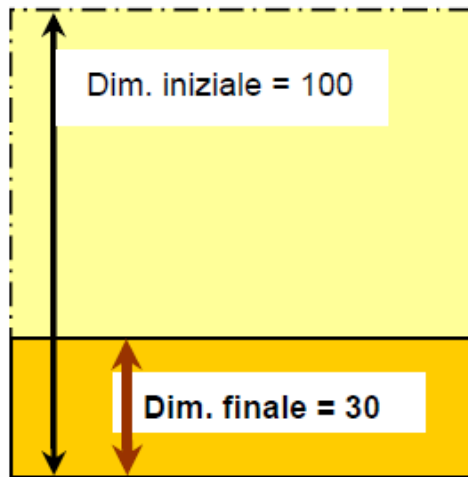
Riduzione: punti critici

- Tipologia di semilavorato (filo, lastra, tubo): quanto incide lavorare su una o più dimensioni?
- Calcolo del grado di deformazione, da definire partendo dal prodotto finale da ottenere
- Macchine: dimensioni, potenza, e condizione

Va preferita una buona microstruttura, piuttosto che una semplice valutazione della durezza della lega

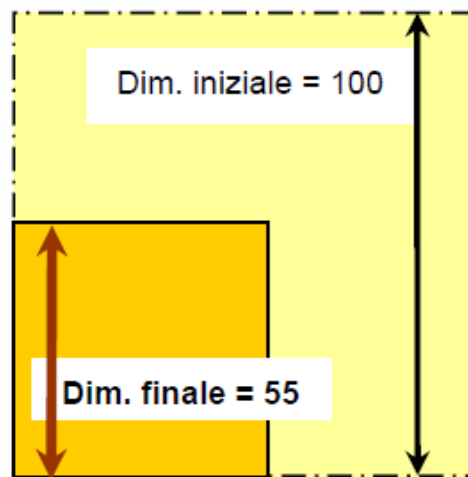
Calcolo riduzione d'area

Riduzione lastra



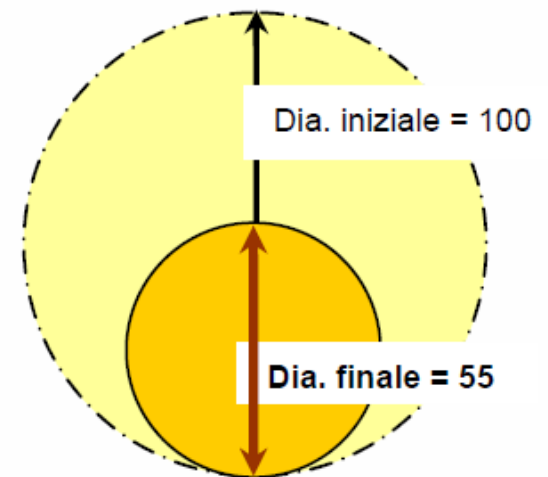
Area iniziale 100x100.
 Area finale 100x30.
Rapporto di riduzione = 70%

Riduzione filo quadro



Area iniziale 100x100.
 Area finale 55x55.
Rapporto di riduzione = 70%

Riduzione filo circolare

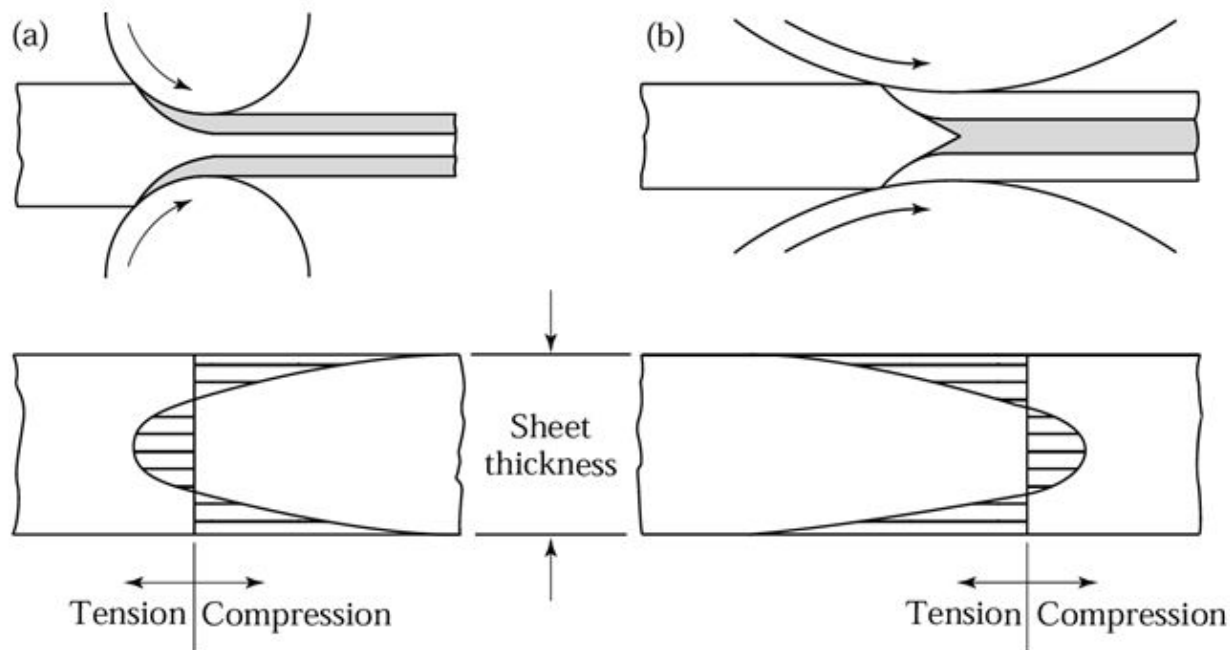


Area iniziale $50 \times 50 \times \pi$.
 Area finale $28 \times 28 \times \pi$.
Rapporto di riduzione = 70%

Riduzione: punti critici

Dimensione del rullo modifica stato tensionale

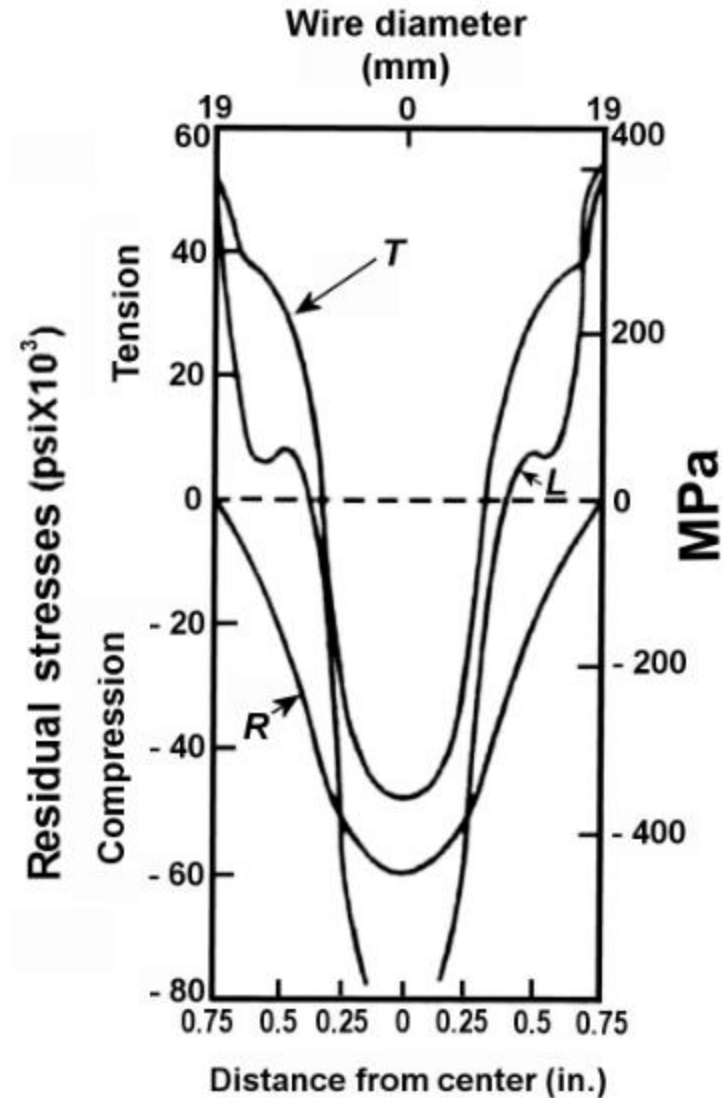
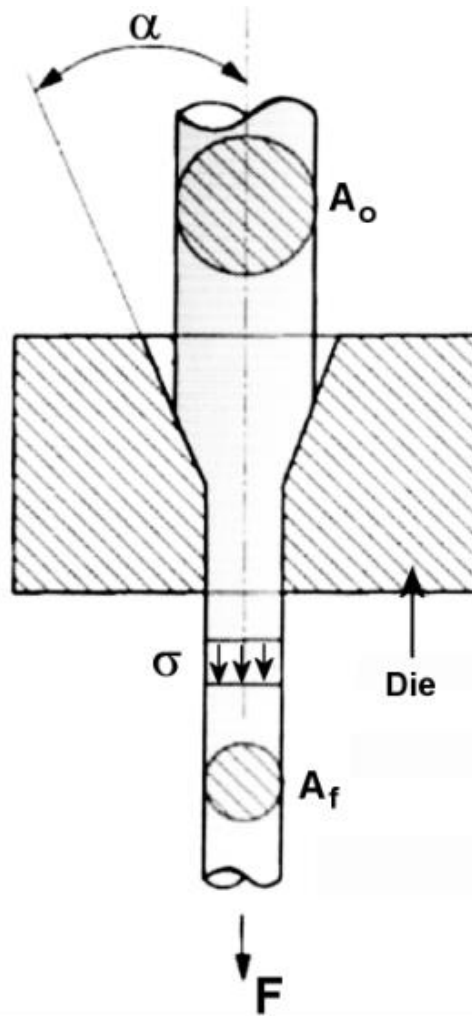
- Rulli di piccole dimensioni e/o piccole deformazioni tendono a deformare il metallo più in superficie che al cuore e inducono uno stato di compressione superficiale
- Rulli di grandi dimensioni tendono a deformare il metallo più al cuore ed inducono uno stato di trazione superficiale



Riduzione: punti critici

Uno stato tensionale all'interno del pezzo è inevitabile. Controllarne l'entità è ruolo dei passaggi di deformazione plastica, diminuirle è ruolo dei trattamenti termici

STATO TENSIONALE SUPERFICIALE, SPECIE IN PRESENZA DI GRANA GROSSOLANA: provoca apertura di cricche, e si collega ad inneschi di reazioni di corrosione



Caso 3: rugosità superficiale filo aggraffato oro giallo 750 ‰

Campione 1: lega affinata

Campione 2: lega senza affinatore

Campione 1

Campione 2

100 μ m

EHT = 20.00 kV

Signal A = SE1

WD = 15 mm

Mag = 107 X

300 μ m

EHT = 20.00 kV

Signal A = SE1

WD = 15 mm

Mag = 107 X

**Elemento critico:
Formulazione di lega**

Caso 3: qualità superficiale

A parità di condizioni alcune formulazioni permettono una migliore compattazione del grano cristallino

Azioni migliorative: Se l'aggiunta di affinato è necessaria e compatibile coi costi di produzione, procedere con un cambio di formulazione

Caso 4: microstrutture diverse leghe oro rosso 750 ‰

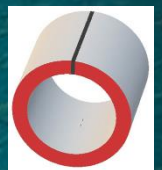
Fedi nuziali, stesso tipo e processo produttivo, formulazioni diverse.

Il numero di grani cristallini è superiore, per unità di area nella lega con affinatore (campione 3)

Campione 3



Campione 4



Elemento critico:
Formulazione di lega

Caso 5: Consumi/rotture anomali su utensili CNC

Semilavorato tubo colata continua, casi in oro rosso 750‰
Deformazione fino a misura eseguita senza particolari problemi

Problema:

Vita inferiore all'atteso per le frese della macchina CNC, nel caso di riutilizzo di materiale (fino al 100%)

Causa: irrigidimento della microstruttura dovuto alla presenza di ossidi

Azioni correttive:

Minore frazione di materiale di scarto
Per il rosso, lega con tenore in argento più alto

Elemento critico:
Formulazione di lega

Formulazione: punti critici

In «formulazione» vanno considerati anche:

- Impurezze provenienti dal metallo fino o dal processo
- Materiale di riutilizzo
- Affinatori di grano o altri additivi

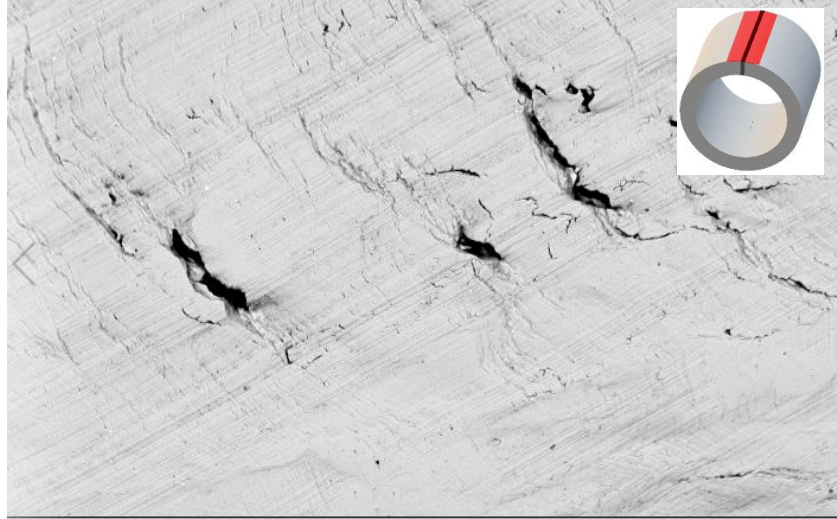
Informazioni generali

CODICE PRODOTTO: LAMINA IN ORO
 DESCRIZIONE: —
 MOTIVAZIONE: ANALISI IMPUREZZE

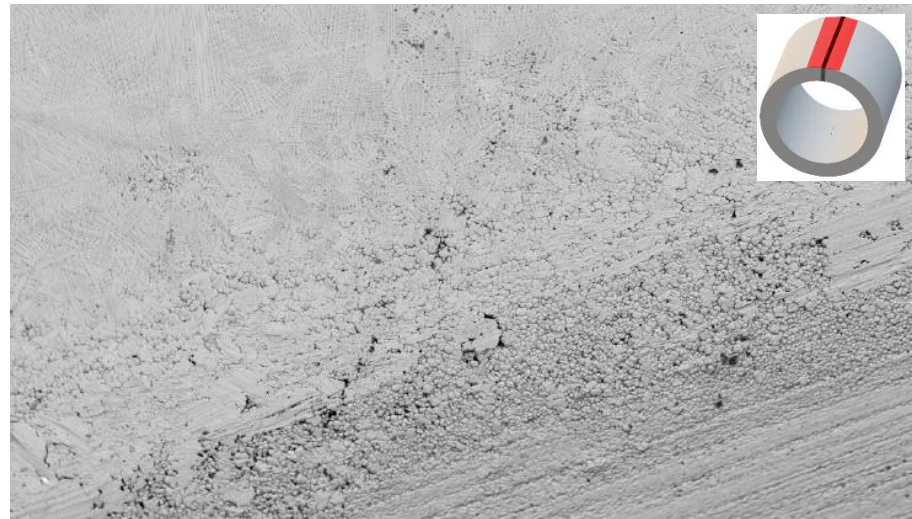
Risultati analitici

INT4870	SAMPLE_A	INT4871	SAMPLE_B
Al	30 ppm	Al	27 ppm
Cd	0 ppm	Cd	0 ppm
Cr	10 ppm	Cr	8 ppm
Fe	297 ppm	Fe	258 ppm
Mn	11 ppm	Mn	9 ppm
Pb	0 ppm	Pb	0 ppm
Nb	74 ppm	Nb	77 ppm
Mo	39 ppm	Mo	55 ppm

Caso 6: cordone di saldatura, Tubo TIG Argento 925 % Striature, distacchi, rotture lungo il cordone dopo trafilatura Trafilatura eseguita con spina flottante



30 μ m Mag = 757 X Signal A = HDBSD Date :15 Mar 2017
EHT = 15.00 kV WD = 8.5 mm Time :14:42:58

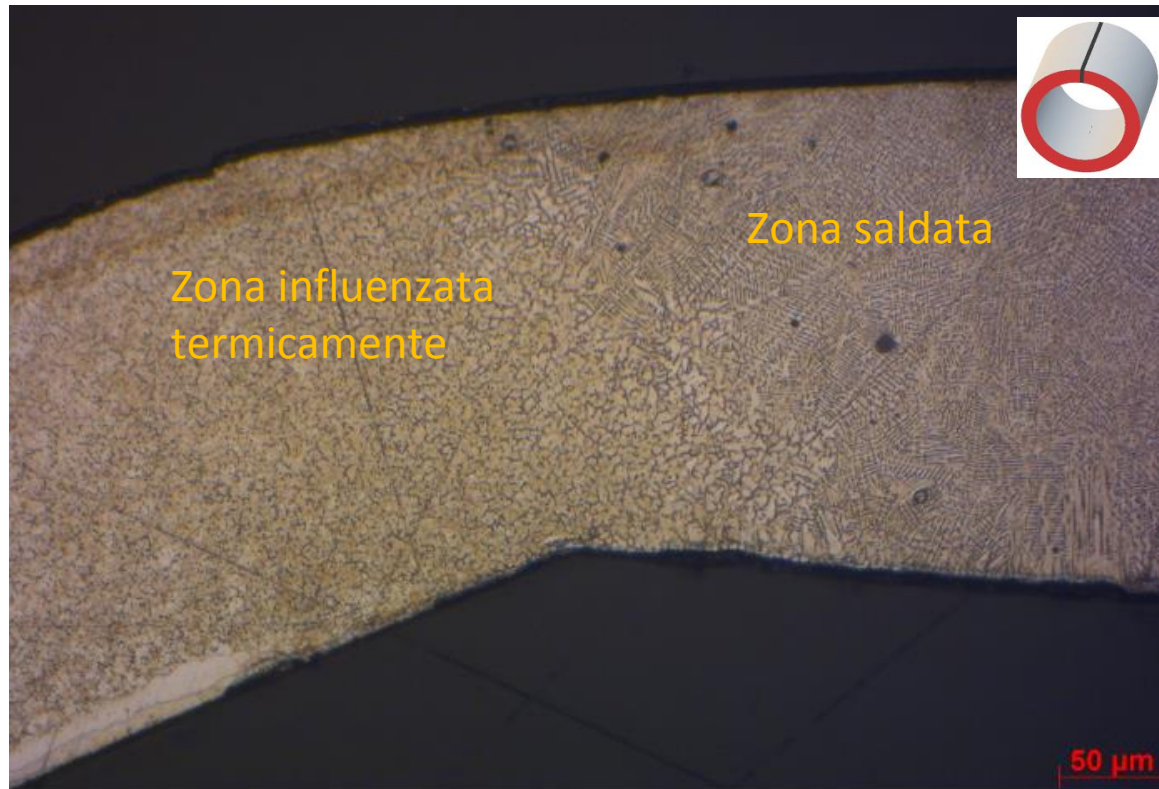


10 μ m Mag = 530 X Signal A = HDBSD Date :15 Mar 2017
EHT = 15.00 kV WD = 8.5 mm Time :14:30:42



200 μ m

Caso 6: cordone di saldatura, Tubo TIG Argento 925 ‰



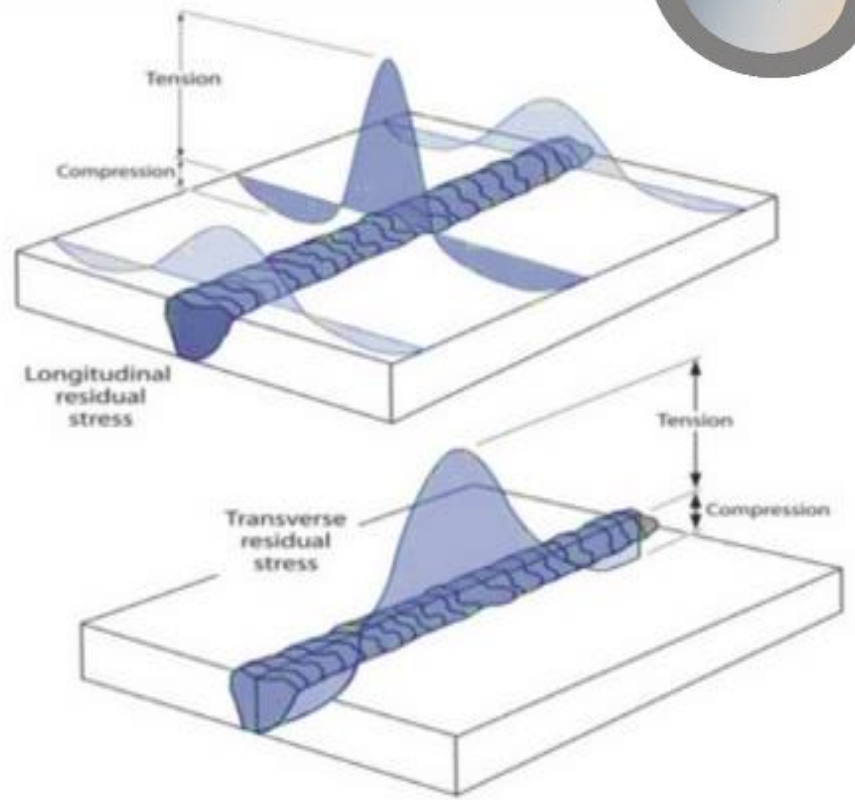
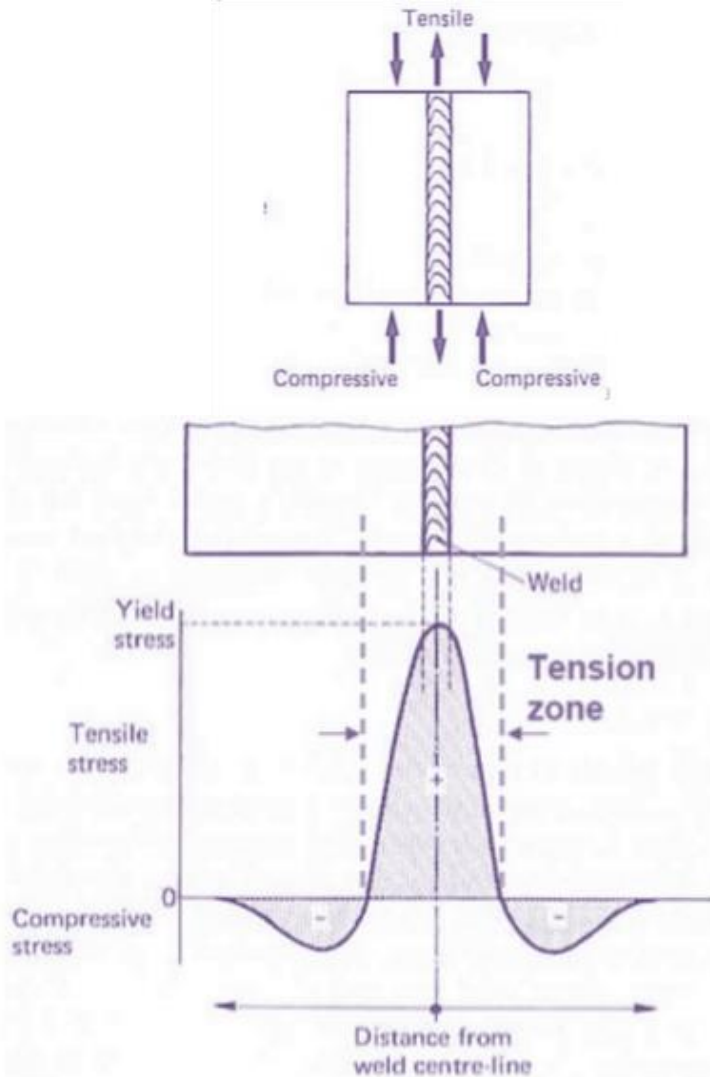
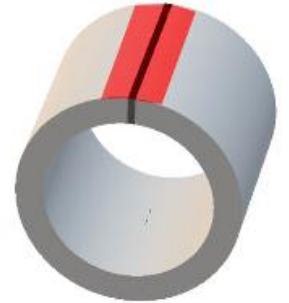
Problema: zona saldata con dendriti da solidificazione, meno resistente meccanicamente

Azioni correttive: Utilizzo di una lega con meno impurezze

Elemento critico:
Processo di saldatura

Saldatura: fattori critici

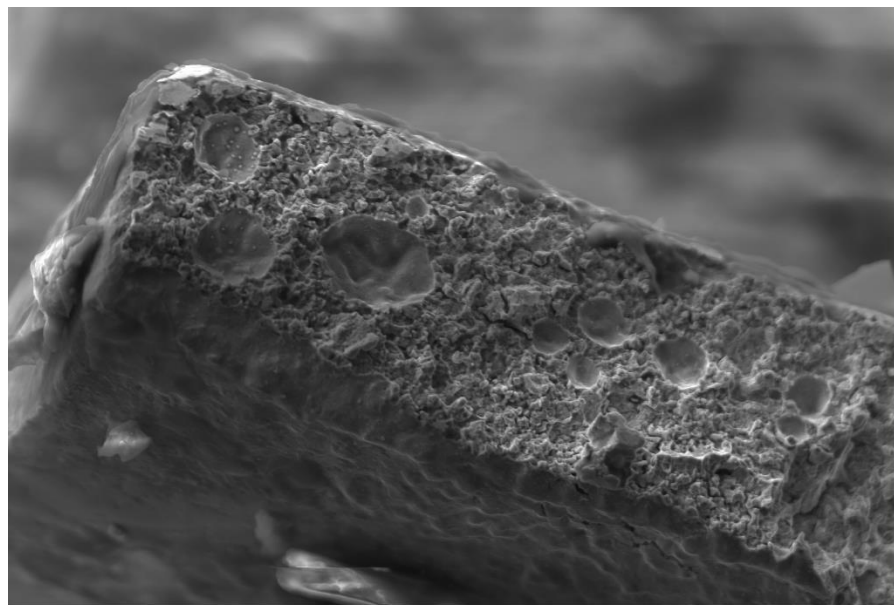
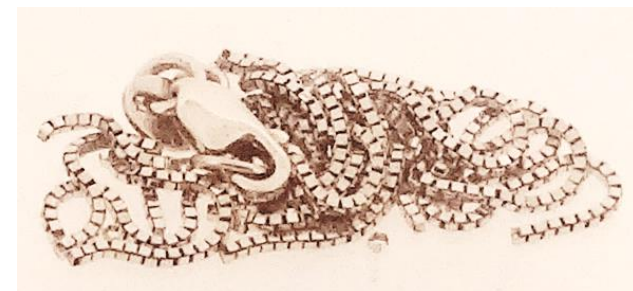
Stato tensionale indotto da saldatura TIG



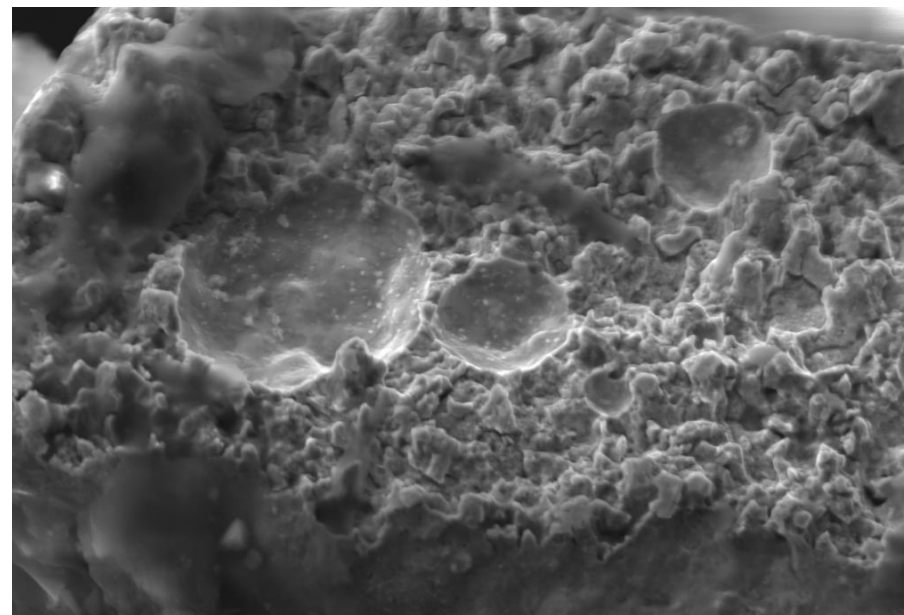
Caso 7: rotture sulla saldatura, catena veneziana oro giallo 375‰

Problema: Catena con resistenza meccanica molto bassa

Posizione preferenziale delle fratture:
Zona di saldatura (senza apporto di materiale)

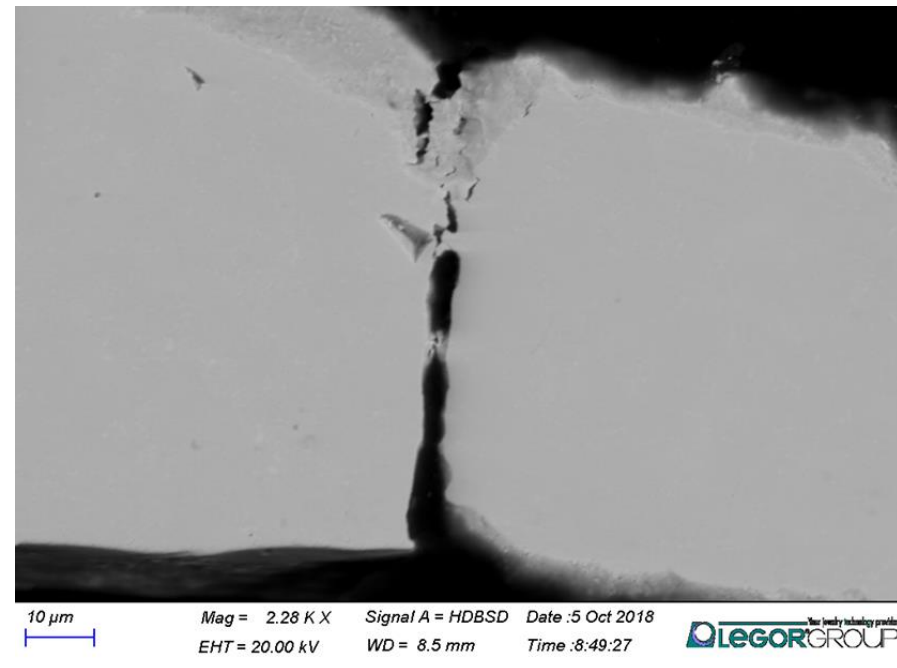
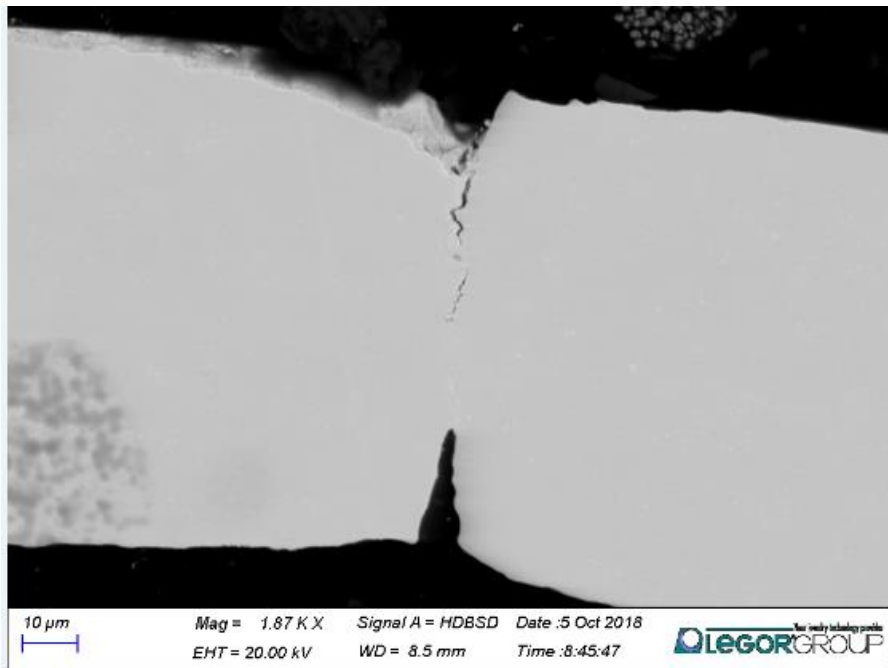


10 μ m
Mag = 1.26 K X
Signal A = SE1
Date : 4 Oct 2018
EHT = 20.00 kV
WD = 8.5 mm
Time : 16:48:48



10 μ m
Mag = 2.86 K X
Signal A = SE1
Date : 4 Oct 2018
EHT = 20.00 kV
WD = 8.5 mm
Time : 16:38:16

Caso 7: rotture sulla saldatura, catena veneziana oro giallo 375



«Soffiature» dovute a energia di processo (tempo + temperatura) insufficiente per ottenere fusione omogenea della zona da giuntare.

Cavità che possono restare con residui di acido che agiscono negli interstizi

Azioni correttive: permanenza più lunga nel forno a nastro

Utilizzo polvere saldante con argento (migliori proprietà meccaniche del giunto)

Polvere saldante di granulometria adatta alla dimensione

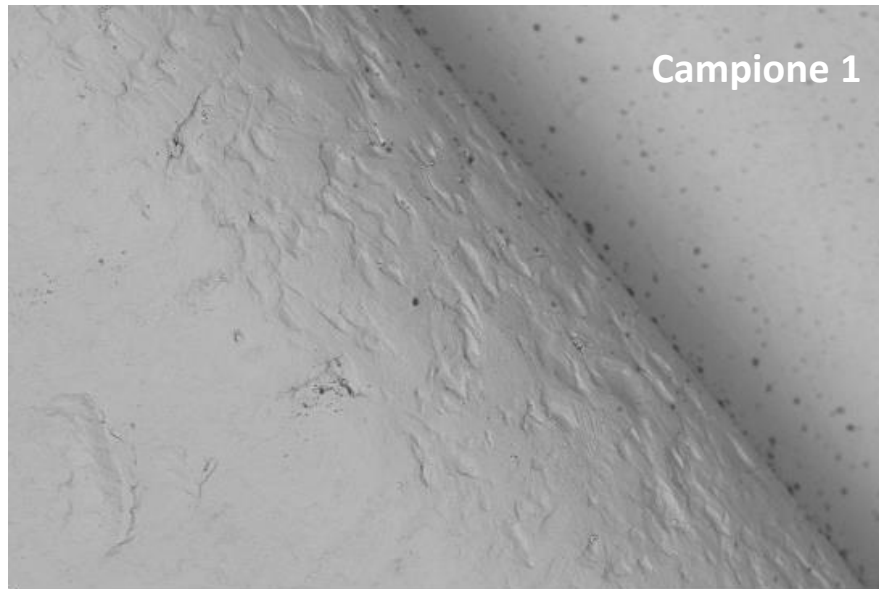
Elemento critico:

Processo di saldatura

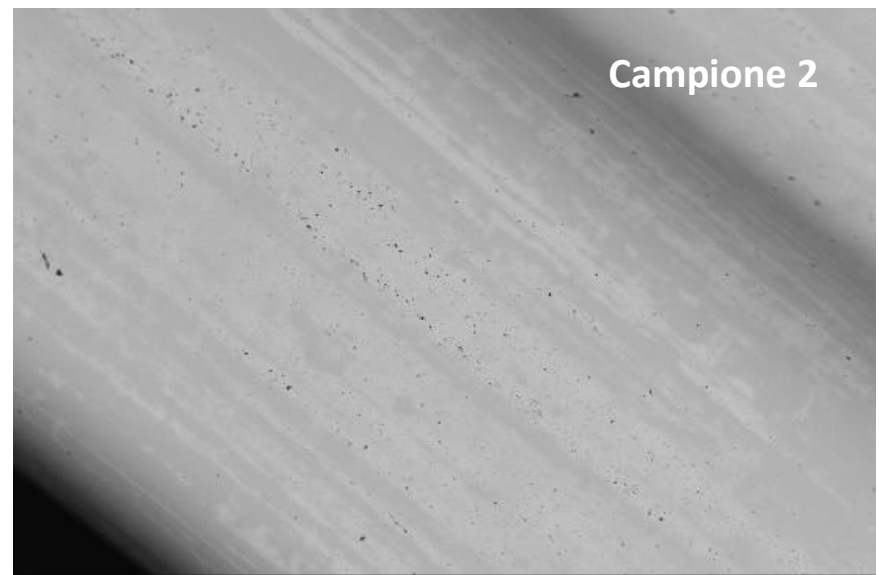
Caso 8: bassa qualità superficiale

Oro bianco 14K, dopo vuotatura

Problema: superficie spenta dopo vuotatura e buratti



Campione 1



Campione 2

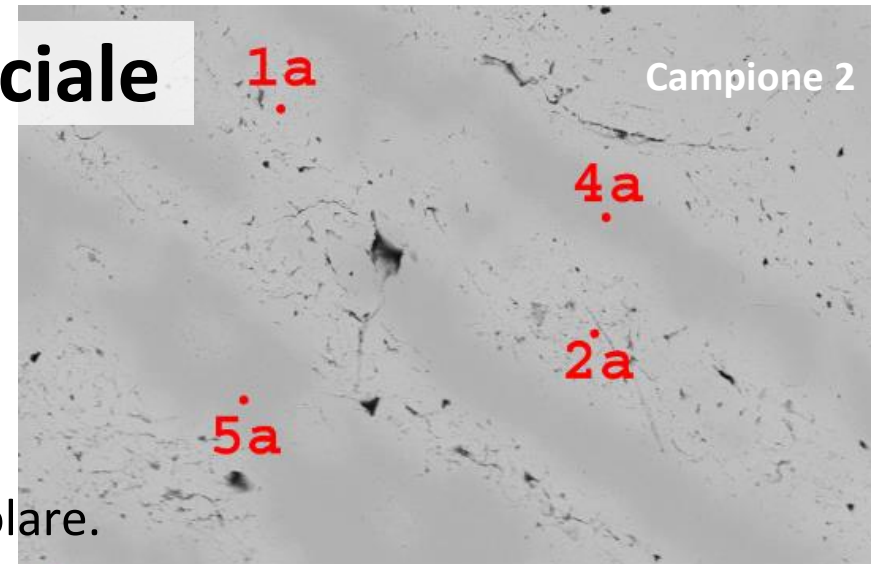
Caso 8: bassa qualità superficiale

Analisi chimica campione 2:

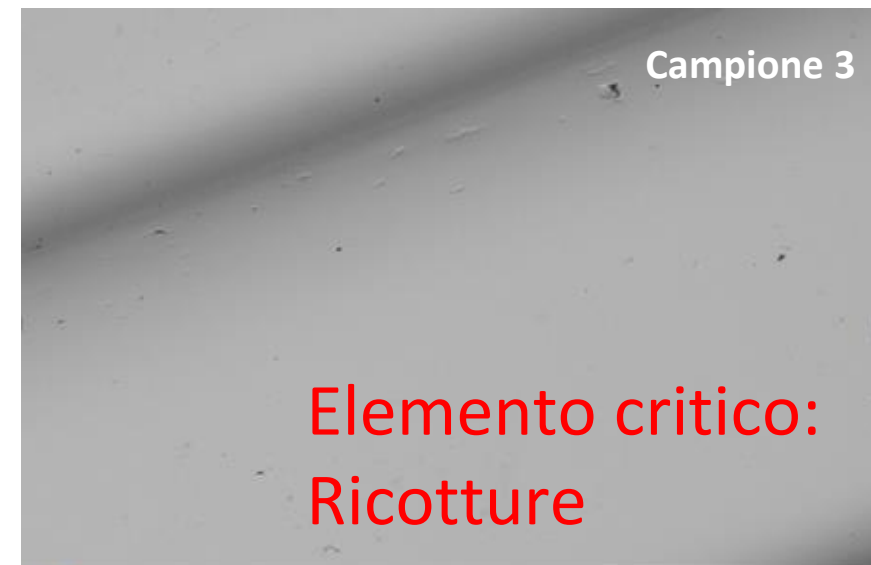
Zona arricchita in oro e povera in Ag
(zone 1a, 2a): aggregata

Zona povera in Ag e a titolo (zone 4a, 5a): regolare.

Evidenziata una parziale separazione di fase
Risolta con una omogeneizzazione intermedia
prima della vuotatura (730°C x 40 minuti)



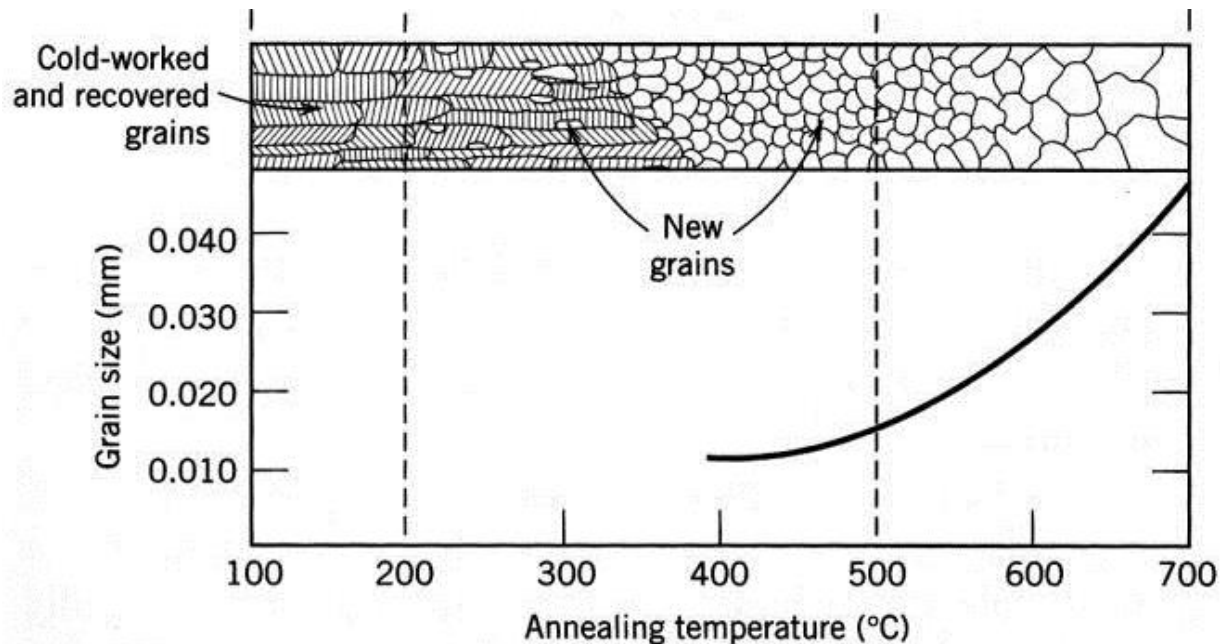
50 µm EHT = 20.00 kV Signal A = QBSD Date :16 Dec 2014 File Name = INT2742_02.tif
WD = 15 mm Mag = 1.51 K X Time :15:36:35



50 µm EHT = 20.00 kV Signal A = QBSD Date :16 Dec 2014 File Name = INT2743_02.tif
WD = 15 mm Mag = 208 X Time :15:55:33

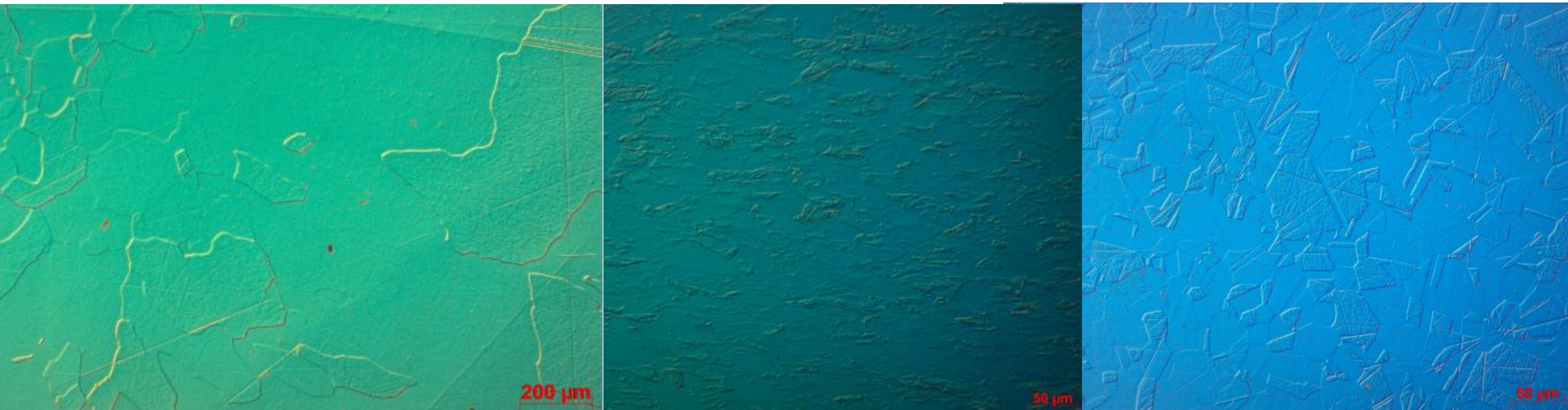
Ricotture: a cosa servono?

- Eliminazione delle tensioni residue
- Riassorbimento delle dislocazioni all'interno della m.s.
- Ripristino di una grana cristallina uniforme, equiassica
- Da fermare prima dell'ingrossamento del grano!



Ricotture: a cosa porre attenzione?

- Tempi e temperature (taratura, tempi, tipologia di tempra)
- Atmosfera utilizzata (gas inerte, miscela disossidante)
- Quantitativi introdotti nel forno (inerzia termica)

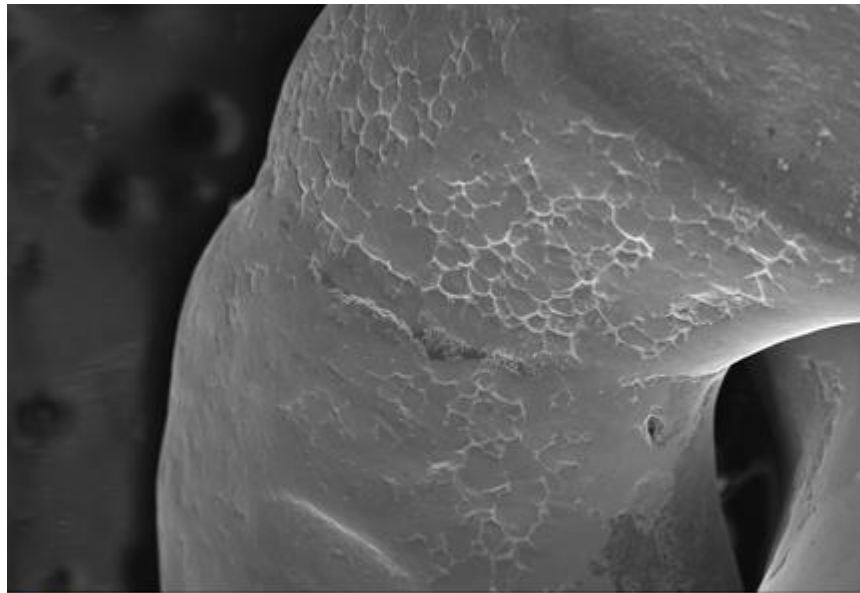


Caso 9: fragilità dopo vuotatura (oro giallo 585 ‰ e 750‰)

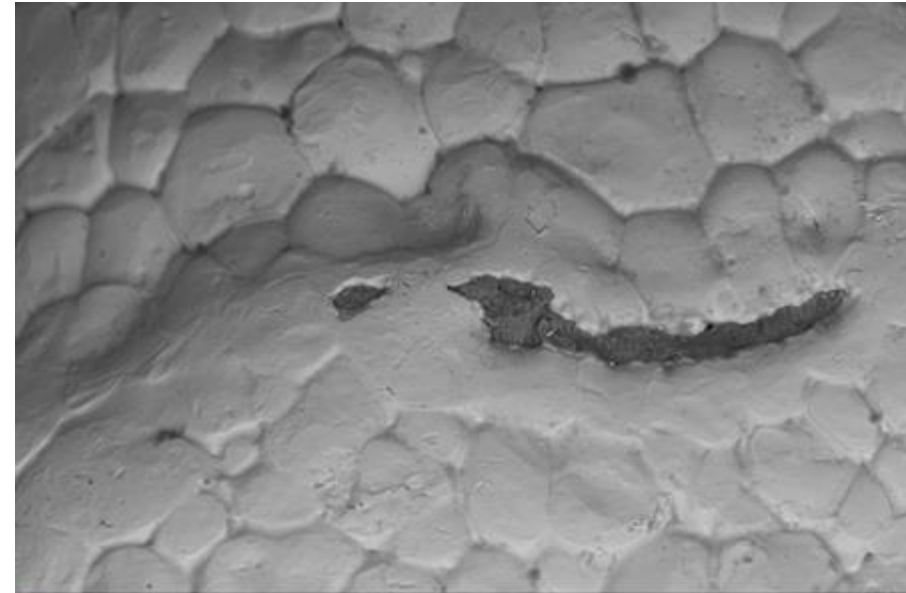
Catene 14K e 18k giallo
Immagini prima della vuotatura



Struttura cristallina già sotto sforzo
prima della vuotatura



500.0µm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Date :20 Apr 2015 File Name = INT2944_02.tif
WD = 15 mm Mag = 434 X Time :9:51:46

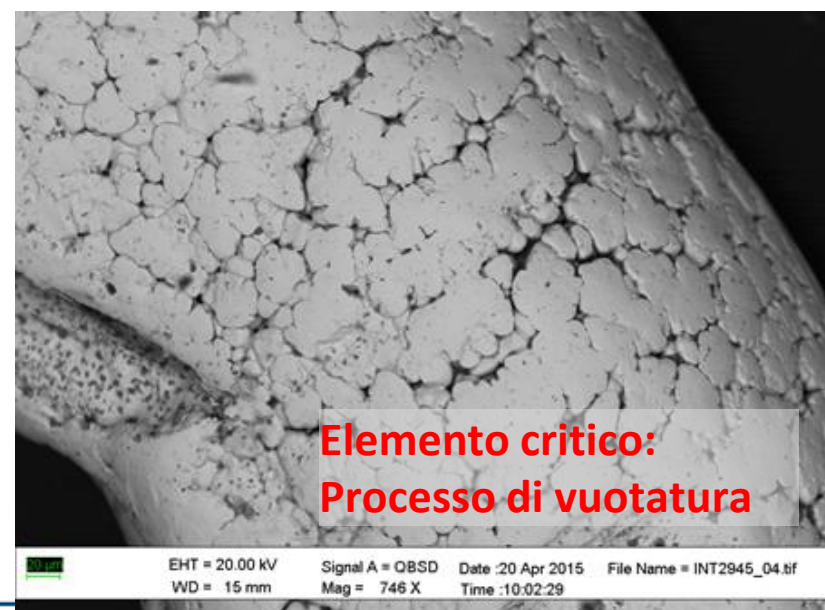
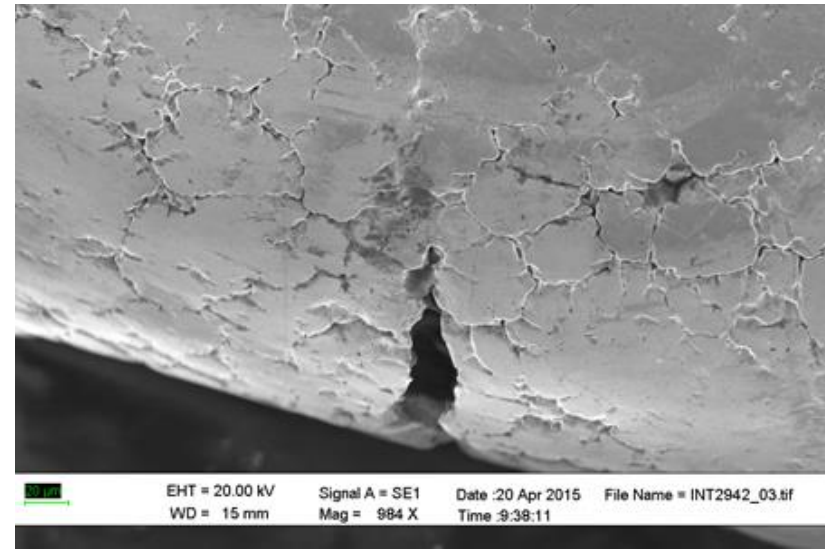
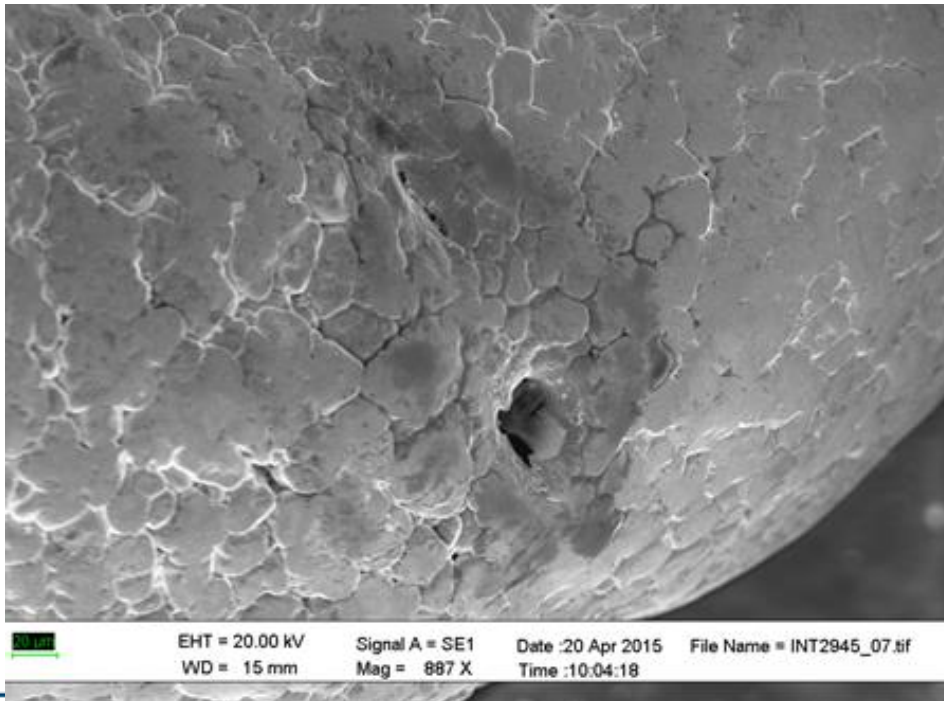


50.0µm EHT = 20.00 kV Signal A = QBSD Date :20 Apr 2015 File Name = INT2943_02.tif
WD = 15 mm Mag = 1.96 K X Time :9:48:28

Caso 9: fragilità dopo vuotatura (oro giallo 585 ‰ e 750‰)

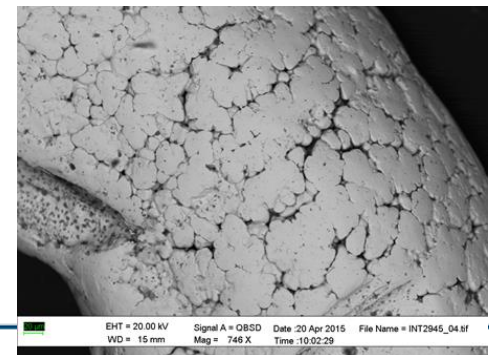
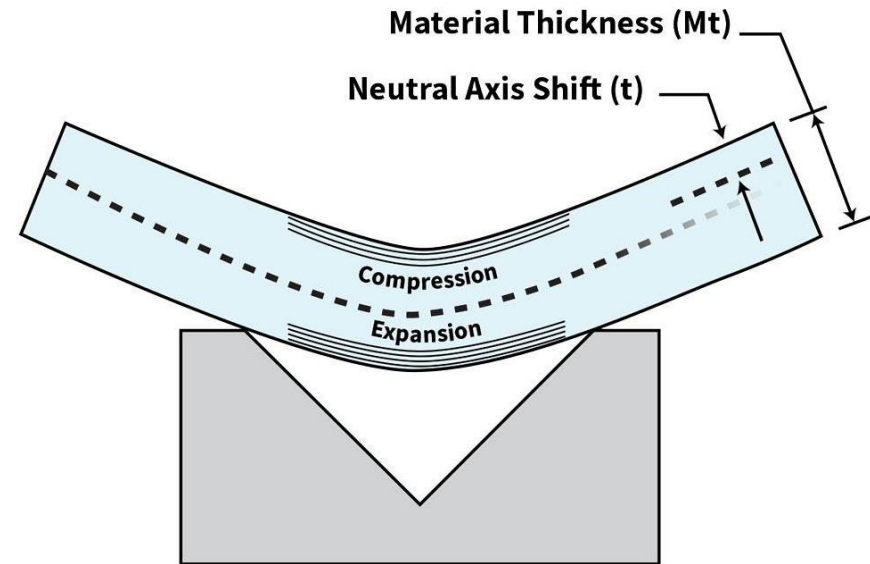
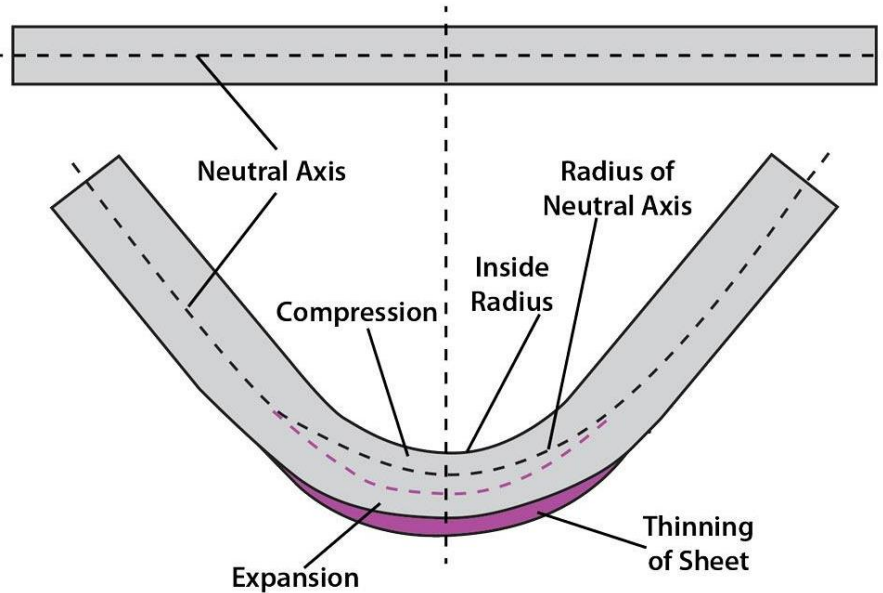
Catene 14K e 18k giallo
Immagini dopo vuotatura

Acido ha aggredito i bordi grano, rendendo
possibili fratture intergranulari



Fattori critici: tensioni residue

Stato tensionale indotto da deformazione plastica



Caso 10: Fragilità da corrosione su filo oro giallo 375‰

Deformazione plastica, saldature e finitura galvanica senza problemi

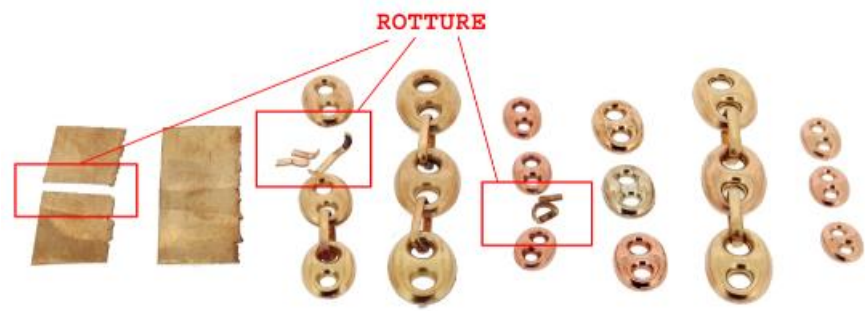
Problema: Pezzi ritornati dal mercato con fratture sulle maglie di giunzione

Analisi: test di corrosione accelerata per evidenziare fragilità su oggetti

Prima del test:



Dopo 24h sudore artificiale:

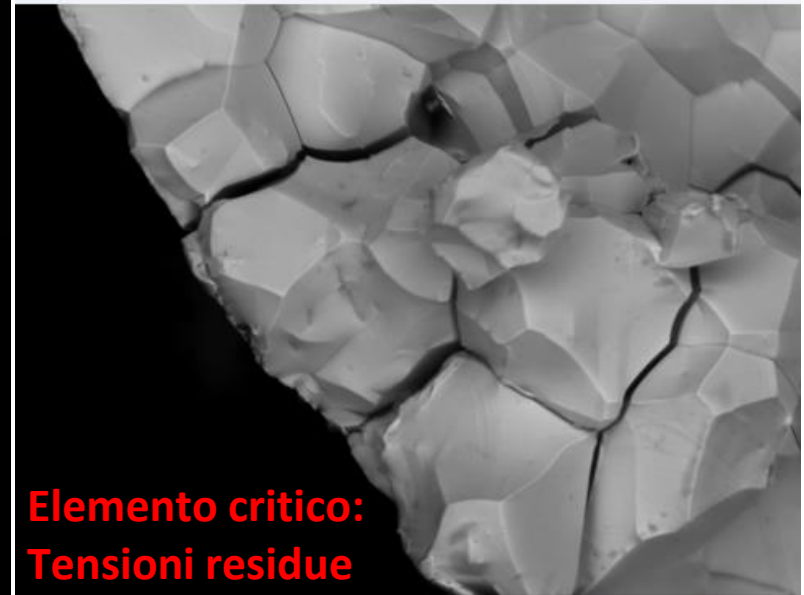
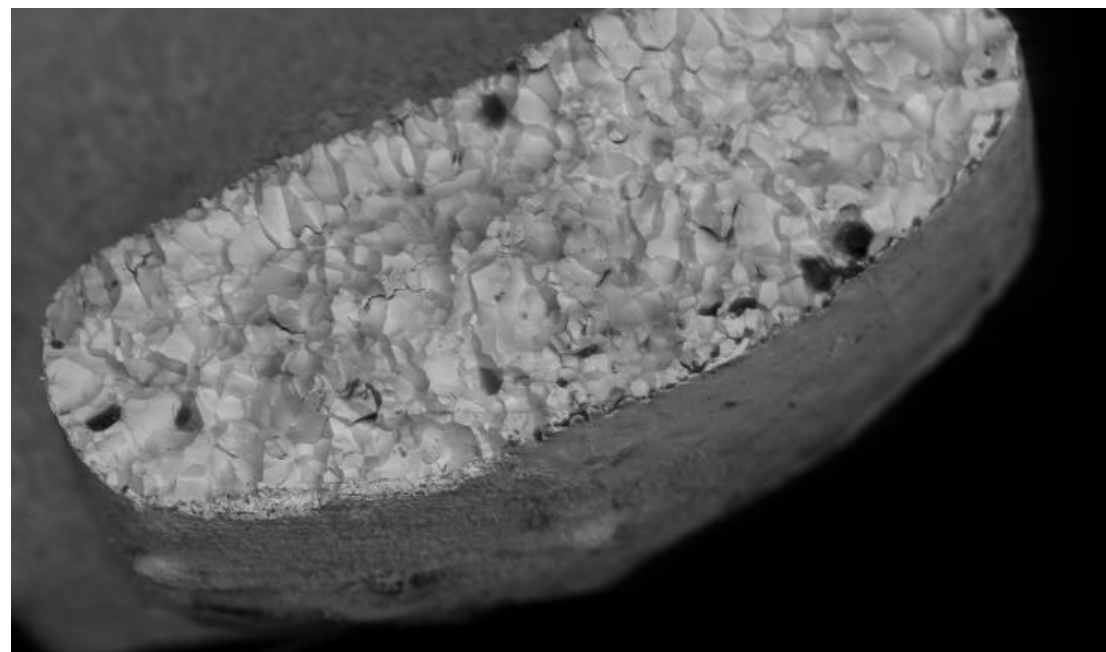


Caso 10: Fragilità da corrosione oro giallo 375‰

La corrosione accelerata ha evidenziato l'esistenza di tensioni residue, che si sono liberate deformando il campione localmente

Azioni correttive:

- Distensione prima della messa in esercizio del pezzo
- Revisione dei parametri di processo di produzione del filo



**Elemento critico:
Tensioni residue**

Tensioni residue: quali effetti?

- Facilitano l'innesco di corrosione sotto sforzo (il bordo grano è già di per sé punto debole, lo stato tensionale acuisce questa tendenza)
- Possono modificare tolleranze in elementi come gli anelli di catena dopo la formatura, rendendo difficile la saldatura

Conclusioni

Fondamentale avere chiaro il tipo di processo che si ha

Capire in cosa non soddisfa o dove non è chiaro

Ragionare in termini di «rispetto» della microstruttura della lega, anche se a scapito dei tempi di produzione

Valutare fin dai passaggi «consolidati» se ci siano possibilità di miglioramento

Ringraziamenti

Fabio Bottelli (Legor ITA)

Michele Toso e Francesco Maurizi (Legor ITA)