



Christopher W. Corti
CORGOLD Technology Consultancy,
Reading, Berks, U.K.

Chris si è ritirato nel 2004 dal World Gold Council, dove rivestiva il ruolo di Direttore della tecnologia, Responsabile della tecnologia orafa e delle relative applicazioni industriali. Attualmente è Direttore Generale presso CORGOLD Technology Consultancy e offre consulenze sia a World Gold Council, sia a Worshipful Company of Goldsmiths di Londra.

Chris vanta più di 28 anni di esperienza nell'industria dei metalli preziosi, insieme a Johnson Matthey e al World Gold Council. È editore della rivista Gold Bulletin e del Technical Bulletin della Goldsmiths' Company. Ha partecipato come relatore a numerose edizioni del Santa Fe Symposium ed è inoltre autore di varie pubblicazioni sulle tecnologie orafe. È stato inoltre curatore del periodico Gold Technology e ha contribuito alla produzione del manuale tecnico WGC sulle tecnologie di produzione.

Ha ottenuto il Dottorato di Ricerca in Metallurgia presso l'università di Surrey (U.K.), è membro dell'Istituto Metals, Minerals and Mining ed è uno scienziato ed ingegnere di fama riconosciuta in tutto il Regno Unito.

Come sanno per esperienza i gioiellieri e gli orefici, purtroppo la fessurazione nella gioielleria con metalli preziosi può verificarsi in qualsiasi fase della lavorazione. Può verificarsi anche molto più tardi, dopo la vendita del gioiello al cliente o persino durante la riparazione. Una fessurazione di questo tipo rappresenta un inconveniente e un costo indesiderato e può avere un'influenza negativa sulla reputazione dell'azienda produttrice. In molti casi, il fenomeno può essere evitato; il problema consiste proprio nel capire quale sia la causa, tra le tante possibili, responsabile di una determinata fessurazione.

Questa presentazione esamina le cause più comuni dei difetti che provocano la fessurazione e le misure che possono essere adottate per ridurre al minimo tale evento. Tra le altre:

- Scarsa qualità dei materiali di partenza, causa di contaminazioni e fragilimento.
- Modalità di fusione inadeguata, con conseguenti difetti di colata, porosità e bolle.
- Modalità di lavorazione del lingotto o del materiale inadeguata
- Modalità di ricottura sbagliata, compresa la fessurazione da tempratura e quella da fuoco
- Fessurazione da tensocorrosione

Cause della fessurazione nella lavorazione e nelle fasi successive

Introduzione

Come sapranno per esperienza molti gioiellieri ed orefici, la fessurazione in gioielleria può verificarsi in qualsiasi fase della lavorazione e anche molto più tardi, persino dopo la vendita del gioiello. Può inoltre rappresentare un problema durante la conseguente riparazione del gioiello fessurato. Le cause della fessurazione possono essere ricondotte alla lavorazione dei materiali di partenza (grano di colata e profilati da cui verranno poi creati i gioielli), ma spesso possono essere individuate solo ad uno stadio avanzato della lavorazione della gioielleria. Nella Figura 1 è riportato un esempio di fessurazione imprevista in un profilato.



A prescindere dal momento in cui si verifica, una fessurazione di questo tipo rappresenta, come minimo, un inconveniente e un costo indesiderato, e comporta generalmente lo scarto dell'oggetto o dell'intero lotto di oggetti, con conseguente ritardo dell'ordine ed influenza negativa sulla reputazione dell'azienda. In molti casi, la fessurazione può essere evitata, sempreché venga prestata la dovuta attenzione ad ogni singola

Figura 1 Fessurazione da fuoco in tubo di oro bianco a 18 carati [da riferimento (14)]

fase della lavorazione. Uno dei problemi che si pongono per gioiellieri e riparatori è capire quale sia la causa, tra le tante possibili, responsabile di una determinata fessurazione. Senza individuare tale causa, risulta difficile impedire che si verifichi nuovamente il problema.

Un'elevata percentuale di gioielli viene lavorata mediante fusione a cera persa, con l'impiego di grani da colata, o da profilati (lamiere, nastri, fili metallici, barre e tubi) che, a loro volta, derivano da lingotti sottoposti a colata statica o da materiali sottoposti a fusione in colata continua. Uno dei principali obiettivi di fornitori e produttori consiste nel massimizzare la resa del materiale di buona qualità e della gioielleria che ne deriva.

Al raggiungimento di tale obiettivo concorre, tra l'altro, l'attenzione dedicata alla scelta e alla manutenzione dell'apparecchiatura in uso. Forse, però, deve essere prestata anche maggiore attenzione ai materiali da impiegare e ai processi di lavorazione da seguire. Tuttavia, all'atto pratico, ogni tanto si creano dei difetti, si generano degli scarti, materiali e prodotti si fessurano e si rompono.

In questa presentazione, esamineremo le cause più comuni della fessurazione in gioielleria, in fase di lavorazione e in quella successiva di riparazione; forniremo inoltre alcuni consigli pratici su come evitare o ridurre al minimo tale evento. Il lavoro verte principalmente sull'oro, ma quanto riportato è spesso applicabile a tutti e quattro i metalli preziosi (oro, argento, platino e palladio).

Cause della fessurazione

Le origini della fessurazione nelle leghe impiegate in gioielleria sono molteplici. Fra quelle principali citiamo le seguenti:

1. Eccessiva lavorazione meccanica
2. Infragilimento dovuto ad impurità, compresi i gas
3. Difetti ed inclusioni di colata e lavorazione
4. Fessurazione da tensocorrosione
5. Fessurazione da tempra in pezzi colati
6. Fessurazione da fuoco

I difetti originati da tensioni provocate da fatica e creep, che si riscontrano generalmente nei componenti tecnici sottoposti a tensione, sono rari in gioielleria e non vengono pertanto trattati in questa presentazione.

Perché i materiali da gioielleria si fessurano? La risposta è semplice: le tensioni esercitate superano la resistenza meccanica del materiale, che può essere ridotta rispetto al valore previsto per svariate ragioni. In questo senso, il materiale, che non può deformarsi per attenuare la tensione, finisce semplicemente per fessurarsi e rompersi. Per capire questo punto, osserviamo un semplice test di trazione. Se prendiamo un campione da test del metallo in questione, come un'asta o un nastro, e lo sottoponiamo ad un carico

di trazione, esso si stirerà e si allungherà. Possiamo misurare l'allungamento rispetto al carico applicato ed ottenere così una curva carico-allungamento come mostrato in Figura 2. Generalmente convertiamo il carico in tensione (ossia carico per unità di sezione trasversale) e l'allungamento in usura (ossia allungamento per unità di lunghezza).



Figura 2
Tipica curva di test di trazione

Un esame della Figura 2 mostra come inizialmente l'allungamento (usura) aumenti linearmente con il carico fino a raggiungere un determinato punto di tensione, che chiameremo Limite Elastico (o Tensione). Se allentiamo la tensione in un qualsiasi punto su questa sezione, l'usura si ridurrà a zero, ossia il campione tornerà alla sua lunghezza originale. Questo fenomeno viene definito deformazione elastica. Se invece continuiamo ad applicare la tensione oltre il Limite Elastico, la curva si piega e si verifica la deformazione plastica. Questo significa che il metallo si è allungato in modo permanente. Se allentiamo la tensione, si verificherà un certo recupero elastico, ma rimarrà anche una certa deformazione permanente (il campione si sarà allungato). Durante la fase di deformazione plastica, notiamo che la tensione continua ad aumentare, ovvero diventa sempre più forte e più resistente; questo fenomeno viene chiamato incrudimento e viene spesso impiegato nella lavorazione dei gioielli per indurire il pezzo al fine di conferirgli maggiore durabilità e stabilità di forma.

Ad un certo punto della deformazione plastica, raggiungiamo una tensione massima (carico di rottura a trazione) e quindi notiamo che la tensione inizia a calare; questo è dovuto alla strizione, che si presenta quando la sezione trasversale inizia a ridursi localmente; se continuiamo, il campione testato inizia a fessurarsi per finire poi con il rompersi. La rottura avviene quando il campione si fessura così tanto che il metallo rimanente non è in grado di sostenere il carico e le fessurazioni si propagano fino al deterioramento del campione.

Nella lavorazione dei gioielli, le sollecitazioni applicate possono essere più complesse rispetto alla semplice tensione, ma l'effetto rete rimane lo stesso. Va inoltre notato che alcuni tipi di fessurazione sono dovuti a tensioni interne o residue all'interno del materiale, piuttosto che a tensioni applicate dall'esterno, come vedremo in seguito.

È opportuno ricordare che tutti i metalli e le leghe (con rare eccezioni) sono composti

da molti cristalli, in cui gli atomi occupano una disposizione regolare chiamata reticolo cristallino. Essi sono "policristallini" e, durante la deformazione, ogni cristallo deve mutare la propria forma per adattarsi al cambiamento generale della forma (1, 2). Questo avviene mediante un processo di slittamento durante il quale i piani di cristallo scorrono l'uno sull'altro secondo uno schema complesso attraverso dei difetti del reticolo chiamati dislocazioni. In superficie, il movimento dei piani di cristallo può portare, a livello microscopico, ad intrusioni e protuberanze che possono anche fungere da siti di nucleazione per l'inizio della fessurazione superficiale.

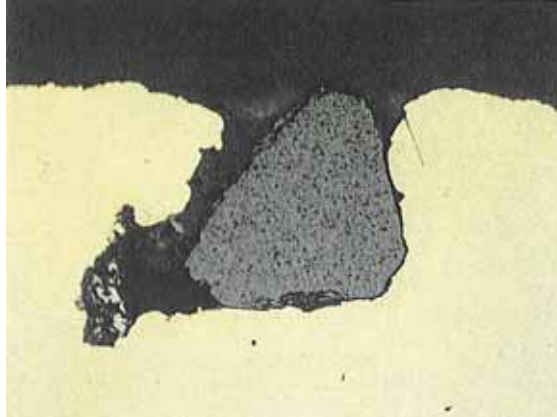


Figura 3

Inclusione superficiale in oro giallo a 18 carati da fusione a cera persa [da riferimento (8)]

Va inoltre notato che le particelle dure quali inclusioni o seconde fasi, in superficie (Figura 3) o all'interno della lega, possono fungere da inviti a rottura, ossia amplificare le tensioni locali nel metallo adiacente; questo significa che le fessurazioni possono partire e svilupparsi più facilmente nelle aree circostanti, anche quando le tensioni applicate sono inferiori a quelle che normalmente portano alla formazione di fessurazioni.

Le varie cause dei difetti, molti dei quali si manifestano sotto forma di fessurazione durante le operazioni di lavorazione e produzione, possono essere attribuite ai seguenti fattori:

- Scarsa qualità dei materiali di partenza, compresi scarti riciclati, che causano contaminazioni e possibile infragilimento.
- Modalità di fusione inadeguata, con conseguenti difetti del pezzo colato quali coni di ritiro e/o bolle e porosità da gas, inglobamento di inclusioni, eccessiva porosità da ritiro e segregazione chimica.
- Modalità di lavorazione del lingotto o del materiale inadeguata, che può essere dovuta a una modifica della composizione della lega non seguita da una modifica nella procedura di lavorazione. Può anche causare difetti della superficie, come grinze che possono in seguito diventare fessurazioni.
- Modalità di ricottura sbagliata, spesso dovuta ad un'insufficiente conoscenza della metallurgia dei metalli preziosi e delle relative leghe.
- Tensione residua (interna), probabilmente legata ad un ambiente corrosivo. Questa manifestazione può avere un'origine meccanica o termica e portare a fenomeni quali fessurazione da tensocorrosione, fessurazione da tempra e fessurazione da fuoco.

È opportuno esaminare queste cause legate alla fessurazione, e le misure da adottare per ridurne al minimo la manifestazione. Come affermato in precedenza, ci riferiamo all'oro ad alta caratura, ma molto di quanto riportato può essere applicato anche alla gioielleria in argento, platino e palladio.

Materiali di partenza

È essenziale disporre di metalli di buona qualità, puliti e privi di ossido per realizzare le leghe, siano essi metalli puri o preleghe (leghe madri). È quindi buona norma analizzare tutti questi materiali o acquistare quelli che dispongono di certificati di analisi. La purezza del metallo prezioso, sia esso oro, argento, platino o palladio, deve essere del 99,9% minimo e determinate impurità quali piombo, stagno, bismuto, antimonio, selenio e tellurio, in quantità indicate a meno dello 0,01%, possono essere presenti e possono portare all'infragilimento della lega (3,4). Anche il contenuto di gas, in particolare ossigeno nel caso dell'argento e idrogeno nel caso del palladio, deve essere basso. Il carbonio può infragilire le leghe di palladio (5), che devono pertanto essere fuse in crogioli di ceramica. L'infragilimento della lega si traduce in una tendenza alla fessurazione anche in caso di applicazione di un carico modesto, come avviene durante la lavorazione del materiale stesso.

I problemi da infragilimento possono sorgere pure dall'uso di ottone per lavorazione meccanica (che contiene piombo) come mezzo per l'aggiunta di zinco prelega (per ottenere leghe, usare esclusivamente ottone senza piombo) e dall'uso di leghe madri contenenti silicio, in particolare per l'oro ad alta caratura. Piombo e silicio possono infragilire tutti i metalli preziosi. Tuttavia i problemi principali ruotano spesso intorno all'uso di scarti, che sono tendenzialmente una fonte continua di contaminazione. Questo si verifica in particolare con scarti forniti da terzi – in certi paesi una fonte comune di materiale di partenza – ma anche gli scarti generati internamente possono essere problematici, specialmente se riciclati in seguito ad errori verificatisi in processi precedenti. L'uso di scarti per creare nuovi prodotti dovrebbe essere controllato meticolosamente e detti scarti sottoposti, preferibilmente, a fusione ed analisi prima di utilizzarli per la realizzazione di lingotti di nuova lega o riciclarli nella fusione a cera persa.

I contaminanti tipici derivanti dagli scarti comprendono materiale refrattario, come le particelle provenienti dalla fusione a cera persa depositatesi su materozze pulite male, ossidi da superfici sporche, silicio da leghe di colata e saldature di piombo-stagno da gioielleria riparata; tutti questi contaminanti provocano inclusioni o infragilimento della lega. In effetti, tutti gli scarti da gioielleria che contengono giunzioni saldate generano verosimilmente una qualche contaminazione, specialmente se sono stati usati alcuni dei più recenti saldanti che contengono indio, germanio o stagno. L'unico modo sicuro e senza rischi per utilizzare gli scarti consiste nell'affinarli preventivamente.

L'infragilimento dovuto a metalli a basso punto di fusione (così come zolfo e silicio) deriva normalmente dalla formazione di seconde fasi metalliche o eutettici con punto di fusione basso: il metallo contaminante stesso, che ha una solubilità estremamente bassa nella

lega, oppure un prodotto di reazione del contaminante con oro, argento o rame nel caso di oro ad alta caratura, o con platino o palladio, spesso fasi intermetalliche che solitamente sono di per sé fragili La tabella 1 illustra il punto di fusione basso di certi sistemi eutettici di possibile formazione.

Contaminante	Fase formata	Punto di fusione	Commenti
Si - in Ag	Eutettica	835°C	al 3,1% Si
Si - in Au	Eutettica	363°C	al 3,2% Si
Si - in Pt	Eutettica	~830°C	al ~5% Si
Si - in Pd	Eutettica	824°C	al ~5% Si
Pb - in Au	Eutettica	212°C	al 84,1% Pb
Sb - in Au	Eutettica	360°C	al ~27% Sb
Sn - in Au	Eutettica	278°C	al 20% Sn
Ge - in Au	Eutettica	361°C	al 12% Ge
Lega saldante Au-Ge-Si (22 carati)	Eutettica	~370°C	Si veda riferimento (6)

Tabella 1 Temperature di fusione di alcuni contaminanti nei metalli preziosi

La maggior parte dei contaminanti con punto di fusione basso, come silicio e piombo, può causare l'infragilimento di leghe di oro, argento, platino e palladio in concentrazioni molto basse. Normandeau ha quantificato l'infragilimento dell'oro ad alta caratura causato da silicio (Figura 4 (7)). L'effetto è amplificato se la dimensione del grano della lega è grande, perché queste seconde fasi tendono a disperdersi sotto forma di pellicole finissime attorno ai bordi del grano (cristallo). Le leghe a grano fine tenderanno ad avere una minor concentrazione di fasi d'infragilimento per superficie di bordo grano. Spesso questi contaminanti si manifestano con fessurazioni durante le operazioni di lavorazione del metallo; ciononostante, come vedremo, esistono altre ragioni alla base del deterioramento di oro ad alta caratura ed altre leghe di metalli preziosi durante la fabbricazione.



Figura 4

Effetto del contenuto di silicio sull'infragilimento dell'oro ad alta caratura [da riferimento (7)]

Modalità di fusione e colata

La colata continua di leghe di oro ad alta caratura ed argento impiega quasi sempre grafite a grani fini ad alta densità per il materiale degli stampi, al fine di garantire un prodotto di buona qualità. La colata continua offre migliore qualità e maggiore rendimento del prodotto, grazie all'assenza dei coni di ritiro, presenti, invece, nei lingotti derivati da colata statica. L'erosione dello stampo può però portare ad inclusioni di grafite nella colata. I difetti superficiali possono apparire anche in caso di una qualche usura o attaccatura accidentale dello stampo ma, tutto sommato, i materiali derivanti da fusione in colata continua raramente comportano difetti meccanici. Nella Figura 5 vediamo un raro esempio di fessurazione dopo la lavorazione, sulla superficie di un anello realizzato da tubo a 14 carati ottenuto con fusione in colata continua, fenomeno attribuibile a condizioni di colata inadeguate (8).



Figura 5 Fessurazione superficiale di un anello ottenuto con fusione in colata continua oro 14 carati [da riferimento (8)]

La colata statica dei lingotti è generalmente un'operazione molto più semplice; essa è, infatti, caratterizzata da fusione con riscaldamento a gas, forni ad olio combustibile, riscaldamento mediante resistenza elettrica o, preferibilmente, riscaldamento per induzione, che assicura il massimo rimescolamento dei costituenti della lega, sebbene il rimescolamento fisico della colata con aste refrattarie o di grafite sia prassi normale. Per oro ed argento, i crogioli sono normalmente di piombaggine o grafite (argilla refrattaria per l'oro bianco con nichel, visto che il nichel reagisce con la grafite) e la colata avviene normalmente in stampi di ferro lavorato o in stampi di rame raffreddati ad acqua. Per platino e palladio, si usano crogioli di zirconia o di silice con zirconia. La colata statica può essere all'origine di diversi problemi:

Ritiro e coni di ritiro

Quando un lingotto colato si solidifica, esso si ritira creando un evidente cono di ritiro centrale sulla sommità del lingotto stesso (Figura 6). È necessario tagliare questo cono di ritiro prima d'iniziare la lavorazione del lingotto; in caso contrario, si verrà a creare un difetto centrale che si allungherà durante la lavorazione e comporterà verosimilmente una successiva fessurazione longitudinale. L'entità del cono di ritiro all'interno della massa del lingotto aumenta se la temperatura della colata è troppo elevata; pertanto solitamente si limita tale temperatura a non oltre 95°C/200°F al di sopra della temperatura del liquidus della lega. Le temperature di colata elevate favoriscono inoltre la formazione di grossi grani che riducono la duttilità della lega (2) e, allo stesso tempo,

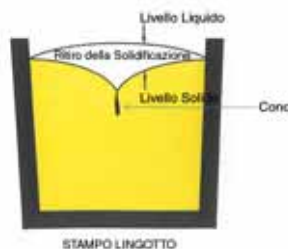


Figura 6 Rappresentazione schematica: formazione di un cono di ritiro su lingotto derivato da colata statica [per gentile concessione di E. Bell]

amplificano l'effetto di eventuali impurità a basso punto di fusione che potrebbero essere presenti.

Blistering e porosità

Il blistering (vescicatura) superficiale o la porosità da gas interno possono manifestarsi nelle fasi successive della fabbricazione sotto forma di difetti o fessurazioni superficiali. Il gas presente nel materiale di partenza (gas dissolto o materiali umidi) o il gas dissolto durante la fusione (aggravato da temperatura di fusione troppo alta, mancanza di atmosfera protettiva o di fondente e dalla fusione a gas) si sviluppa in porosità durante la solidificazione. L'argento è particolarmente soggetto a questo problema, originato dalla scarsa disossidazione. La lavorazione iniziale può appiattire i pori e causare piccole stratificazioni e fessurazioni o può chiudere la porosità solo per le operazioni di ricottura, così da consentire al gas di espandersi e apparire in seguito sotto forma di bollicine superficiali (blistering). Inoltre, la ricottura di argento che contiene ossigeno dissolto o inclusioni di ossido di rame in atmosfere contenenti idrogeno può portare all'assorbimento di idrogeno e alla formazione di pori dovuta alla "reazione del vapore" tra idrogeno ed ossigeno (9). Questo fenomeno può verificarsi anche nell'oro ad alta caratura. Nella Figura 7 troviamo un esempio di porosità in oro a 18 carati 3N, preso dal riferimento (8), dovuta alla reazione del vapore in fase di ricottura. (Un altro problema ben noto che riguarda l'argento ed è dovuto all'ingresso del gas è la formazione di macchie da fuoco (firestain) date dall'ossidazione interna durante la ricottura).

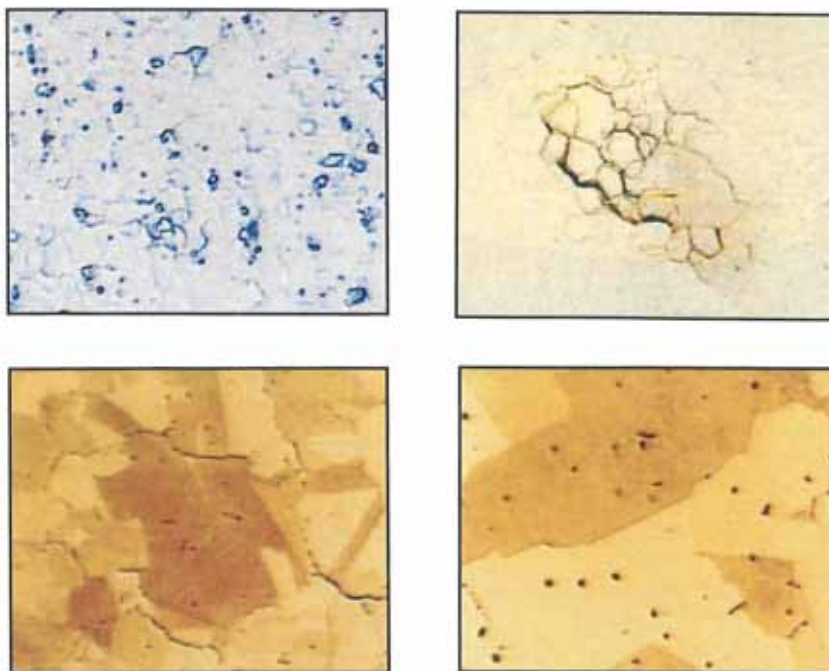


Figura 7 Formazione di porosità dovuta alla "reazione del vapore" nell'oro a 18 carati: in alto - superficie ricotta; in basso - sezioni trasversali 200x [da riferimento (8)]

Inclusioni

Le inclusioni di ossidi ed altre particelle refrattarie, grafite e persino particelle metalliche possono essere incorporate nella fusione da svariate fonti, come erosione del crogiolo stesso, isolamento o rivestimento della fornace, aste per rimescolamento rotte, reazione tra l'atmosfera e l'elemento legante (ad esempio, ossigeno e rame formano l'ossido di rame) o uso di affinatori del grano, in particolare iridio per l'oro ad alta caratura, che non si sono dispersi correttamente. Tali inclusioni possono fungere da inviti a rottura ed originare fessurazioni o guasti durante le fasi di lavorazione successive.

Difetti superficiali

I difetti superficiali, che possono portare a fessurazioni, possono essere dovuti a modalità di fusione e colata inadeguate. Tali difetti si originano da sbavature solidificate durante la colata che si attaccano alla parete dello stampo, inclusioni superficiali, ossidazione e danni meccanici. La regola d'oro sarebbe quella d'ispezionare la superficie di tutti i lingotti e rimuovere (con lima, mola o lavorazione all'utensile) e generalmente pulire tutte le tracce di difetti prima d'intraprendere ulteriori lavorazioni. Se necessario, si dovrà laminare la superficie per assicurarsi che sia pulita e piana.

Fusione a cera persa

Anche le colate da fusione a cera persa sono soggette ad infragilimento, in particolare se vengono usate leghe e scarti che contengono silicio (nelle colate di oro ed argento), ad inclusioni da crogioli, stampi per colata a cera persa poco resistenti e scarti non puliti, a fessurazione da tempra (si veda sotto) e a ritiro e porosità da gas. Una porosità estesa, porosità di ritiro in particolare, può causare fessurazioni durante la lavorazione successiva.

Modalità di lavorazione

Lavorazione eccessiva

Tutte le forme di lavorazione del metallo (laminazione di lamiere e barre, imbutitura di fili e tubi, tranciatura, stampaggio, coniatura, repussaggio e piegatura, fresatura, tornitura e curvatura meccanica o semplicemente manuale) hanno come risultato che il materiale s'indurisce e diventa meno duttile. Il grado d'indurimento e di perdita di duttilità dipende dall'entità della deformazione applicata. Se il materiale viene lavorato eccessivamente, la duttilità si riduce a zero e quindi esso si fessura e si rompe (1). I materiali induriti per invecchiamento presentano di conseguenza una duttilità inferiore e tenderanno a fessurarsi man mano che si procede con la lavorazione.

Pertanto, in fasi specifiche del processo di lavorazione, il materiale deve essere ricotto per ripristinarne la duttilità (attraverso il processo di ricristallizzazione). La misura

in cui le leghe s'incrudiscono e in cui possono essere lavorate varia da lega a lega. Generalmente, le leghe dei metalli più preziosi possono essere lavorate fino a circa il 70% di riduzione di sezione (usura) prima di necessitare della ricottura. Esistono, tuttavia, considerevoli variazioni: l'oro bianco con nichel s'indurisce rapidamente e richiede riduzioni relativamente basse per ogni fase di lavorazione; la ricottura potrebbe diventare necessaria dopo appena il 35 o 40% di riduzione. D'altro lato, l'oro fine ed alcuni tipi di oro ad alta caratura possono essere lavorati ben oltre il 90% di riduzione di sezione prima che si renda necessaria la ricottura.

Laminazione

La laminazione di materiale in lastre può portare alla fessurazione del bordo; questo problema è dovuto all'eccessiva lavorazione tra ricotture. È allora importante sbavare i bordi, perché l'ulteriore laminazione dopo la ricottura aumenterà il rischio di fessurazioni che procedono verso il centro della lamiera (Figura 8). Durante la laminazione delle aste, possono crearsi bave e grinze che possono produrre fessurazioni in fasi successive. La formazione di bave è dovuta alla spinta di una quantità eccessiva di materiale nella scanalatura di laminazione, cosicché i cilindri vengono separati a forza ed il metallo in eccesso fuoriesce lateralmente (Figura 9). Queste bave vengono quindi laminate nell'asta per poi diventare grinze. La loro formazione può essere impedita, evitando riduzioni troppo ampie e ruotando l'asta di 90° tra calibrature successive.



Figura 8
Rappresentazione schematica: Fessurazione del bordo in nastro laminato [da riferimento (10)]



Figura 9
Rappresentazione schematica: Formazione di grinze nella laminazione di un'asta [da riferimento (10)]

Formatura di lamiera

Anche le operazioni di formatura di lamiera di metallo, come stampaggio o imbutitura profonda, possono provocare fessurazione dovuta a lavorazione eccessiva localizzata (Figura 10). La rottura si presenterà nella parte più fragile o più sottile ed è più probabile nel punto in cui la lamiera è piegata attorno ad un angolo sotto tensione, visto che in quel punto tenderà a verificarsi un ulteriore assottigliamento. Potrebbe essere necessario sagomare in parte il componente in uno stampo e quindi formarlo ulteriormente in un altro stampo. Questa è la base dello



Figura 10
Fessurazione dovuta a lavorazione eccessiva durante lo stampaggio [da riferimento (11)]

stampaggio in cui nastri o lamiere vengono lavorati in una serie di stampi, così da ottenere la forma finale desiderata. La scelta di materiale e condizioni di lavorazione adatti è importante, se si desidera evitare la fessurazione.

Infragilimento da impurità

Come abbiamo visto in precedenza, determinate impurità metalliche (compreso il silicio) infragiliscono le leghe di metalli preziosi. Battaini propone un esempio per una lega di palladio 950 (12). Qualsiasi tentativo di lavorare un materiale infragilito darà come risultato la fessurazione. La Figura 11 illustra la fessurazione nell'oro giallo a 18 carati dovuta ad infragilimento da silicio.



*Figura 11
Fessurazione nell'oro a 18 carati dovuta ad infragilimento da silicio [da riferimento (8)]*

La lavorazione manuale, come il repussaggio e le operazioni di riparazione, implica spesso la lavorazione a mano su uno stampo morbido, il più delle volte in piombo, per evitare danni alla superficie. Nell'esempio d'infragilimento fornito da Grice (13), l'operazione di formatura ha permesso la contaminazione da piombo della superficie dell'oro, con conseguente diffusione del piombo nell'oro durante la fase successiva di ricottura o saldatura portando così ad infragilimento e rottura del gioiello. L'uso di piombo metallico a contatto con oro e platino è sempre rischioso; pertanto, se indispensabile, è necessario separare il pezzo dal piombo interfogliando carta robusta.

Inclusioni non metalliche

Le inclusioni refrattarie dure resistono alla deformazione durante la lavorazione e fungono da inviti a rottura, ovvero da creatori di fessurazione nella lega di metalli preziosi. Se presenti sulla superficie, possono rompersi, lasciando un'ampia porosità superficiale (8) che si stira per poi diventare una fessurazione superficiale longitudinale nelle successive fasi di lavorazione.

Tensioni residue

Le tensioni residue o interne possono essere presenti in un pezzo lavorato e sono spesso dovute ad una deformazione plastica non uniforme avvenuta durante la lavorazione (12), ad esempio nell'imbutitura di aste, fili e tubi in cui le forze di trazione possono svilupparsi in superficie e le tensioni di compressione nell'area centrale. Tali tensioni possono essere circonferenziali, longitudinali o radiali. Vengono spesso localizzate e possono comportare fessurazione spontanea, ad esempio durante i trattamenti termici. Questo problema colpisce particolarmente l'oro bianco con nichel, dove è conosciuto con il nome di fessurazione da fuoco (12, 14); questo argomento verrà approfondito in seguito.

Modalità di ricottura inadeguata

Una scelta errata delle condizioni di raffreddamento post-ricottura può, paradossalmente, causare indurimento, anziché rammollimento, in determinati tipi di oro ad alta caratura, a causa di instabilità metallurgiche, in particolare la formazione di seconde fasi. Durante la lavorazione successiva, il materiale si fessura. L'oro giallo-rosso della gamma 8-18 carati dovrebbe essere raffreddato rapidamente dopo la ricottura temprandolo direttamente nell'acqua; questo accorgimento consente di mantenere una buona duttilità, mentre un raffreddamento lento provoca la formazione di seconde fasi e indurimento. Per questa ragione, anche i riparatori dovrebbero ricuocere e temprare in acqua questo tipo di gioiello prima del ridimensionamento o della riparazione.

Una ricottura eccessiva (ovvero una ricottura a temperature troppo elevate e/o troppo prolungata) può portare un ingrossamento del grano e la conseguente deformazione può dare fessurazione e rottura premature (nonché superficie a "buccia d'arancia"). Questo problema è particolarmente sentito nella ricottura al cannello, in cui la capacità di controllare la temperatura è limitata.

Fessurazione da tensocorrosione

La fessurazione da tensocorrosione può verificarsi in alcune leghe di oro a caratura inferiore per l'effetto combinato di tensioni applicate o residue ed agenti corrosivi, principalmente vapori di sostanze chimiche presenti nell'ambiente circostante. Non sono rari gli esempi nell'oro a 8, 9 e 10 carati e, meno di frequente, in quello a 14 carati, in particolare nell'oro bianco con nichel. La fessurazione o, come avviene talvolta, la rottura spontanea, si verifica solo in presenza di entrambe le influenze e può manifestarsi durante la lavorazione; ad esempio, una bobina di filo lasciata esposta ai fumi di un laboratorio di decapaggio può disintegrarsi completamente. Più preoccupante è il fatto che questo fenomeno può verificarsi molto tempo dopo negli articoli di gioielleria di proprietà del cliente, persino dopo anni passati in ottime condizioni. Il meccanismo della fessurazione da tensocorrosione è complesso ed è stato trattato da Rapson, Normandeau et alii (15-18).

La tensione residua può essere introdotta dal fabbricante, durante la produzione; pertanto, tutte le leghe potenzialmente soggette dovrebbero essere ricotte completamente o, per lo meno, sottoposte a ricottura per il rilassamento delle tensioni. Quest'ultima è una ricottura a 250-350°C/480-650°F, che dura generalmente 30 minuti. L'effetto su durezza e struttura del grano è minimo: serve semplicemente a rilassare le tensioni interne. Le tensioni possono però essere introdotte anche ad opera del cliente (ad esempio, nel caso di catenine tirate e quindi allungate dai bambini) o dal gioielliere, in occasione del ridimensionamento di anelli senza un successivo trattamento di ricottura. Il



Figura 12
Esempio di fessurazione da tensocorrosione nell'oro a 14 carati [da riferimento (18)]

Jewelry Technology Forum

principio di una fessurazione si trova di solito in corrispondenza di un qualche invito a rottura, graffio o difetto o persino il punzone o il marchio del produttore.

Per quanto riguarda la parte corrosiva dell'equazione, gli agenti principali sono cloro o cloruro; presso il produttore, le fonti più diffuse sono acidi e soluzioni per decapaggio; ma è dal cliente che troviamo l'elenco più lungo: detergenti e detersivi per le pulizie domestiche, inchiostri, acqua di piscina, acqua marina e clima costiero, alcuni alimenti, profumi, deodoranti e sudore umano fungono tutti da fonte di agenti corrosivi.

La rottura generalmente si manifesta attraverso una caratteristica frattura intergranulare, di cui forniamo un esempio in Figura 12. La predisposizione delle leghe alla tensocorrosione è determinata in particolare dalla composizione e dalla struttura metallurgica; l'argomento è comunque molto complesso: l'attacco iniziale, infatti, è determinato da differenze locali nella composizione e parte da un difetto o da un invito a rottura. Nonostante la vulnerabilità dell'oro a bassa caratura a questo fenomeno, quest'ultimo oggi non è più molto diffuso; probabilmente i produttori sono perlomeno consapevoli del problema potenziale e adottano delle misure per minimizzarne la manifestazione.

Fessurazione da tempra e da fuoco

L'oro bianco con nichel, come sa qualsiasi produttore, può essere estremamente difficile da fabbricare. Questo tipo di oro tende ad avere un alto tasso d'incrudimento che, in concreto, genera la necessità di ricotture più frequenti; inoltre si separa in due fasi immiscibili durante il raffreddamento lento post-ricottura, fenomeno che normalmente richiede una tempra da temperatura di ricottura.

Alcuni tipi di oro bianco con nichel ed altre leghe di oro ad alta caratura, in particolare quelle contenenti aggiunte di silicio, sono comunque soggetti alla fessurazione da tempra che viene normalmente attribuita alla generazione di tensioni residue o interne tra gli strati esterni, che si sono raffreddati più rapidamente, e l'interno del materiale, che in fase di tempra si è raffreddato più lentamente; tale fenomeno è sufficiente a generare fessurazioni in quella che è una lega di per sé fragile. Per evitare gli effetti della fessurazione da tempra, nonché l'effetto indurente indotto dal raffreddamento lento nell'oro bianco con nichel, vengono impiegate svariate tecniche per ottenere una percentuale di raffreddamento intermedio post-ricottura. Queste comprendono raffreddamento forzato ad aria, raffreddamento mediante collocazione su una piastra di ferro, tempra in acqua calda, o raffreddamento lento fino ad avvicinarsi alla temperatura critica quando si verifica la precipitazione della seconda fase e quindi la tempra. I vari produttori avranno le proprie tecniche per tipi di leghe e dimensioni di componenti particolari, ma dovranno comunque affrontare delle difficoltà.



Figura 13 Fessurazione da tempra nell'oro a 9 carati contenente silicio da fusione a cera persa [da riferimento (19)]

Nel caso di oro ad alta caratura contenente silicio e proveniente da fusione a cera persa, la fessurazione da tempra viene attribuita alla fragilità a caldo, in cui la tempra della staffa (stampo) dopo la colata da una temperatura troppo alta provoca cricche di ritiro e fessurazione, dovute a fasi ricche di silicio con punto di fusione basso a bordo grano. La Figura 13 illustra un esempio di fessurazione da tempra in oro a 9 carati (19). McCloskey l'ha rinvenuta in oro a 14 carati (20).

Il secondo problema che il produttore può dover affrontare è la fessurazione da fuoco, in particolare nell'oro bianco con nichel (14); essa si verifica durante il riscaldamento associato alla ricottura o alla saldatura. Normalmente la causa è da attribuirsi alla presenza di tensioni residue da operazioni di lavorazione, essendo queste sufficienti a rompere il componente con l'aumentare della temperatura (e la conseguente diminuzione della resistenza). Il rimedio consiste nello scaldare fino a 300°C/575°F lentamente, cercando possibilmente di mantenere questa temperatura per un po' di tempo, così da rilassare le tensioni prima di procedere ed arrivare alla temperatura di ricottura o saldatura. Un esempio di questo tipo di rottura è illustrato in Fig. 1.



Figura 1

Note conclusive

Il problema della fessurazione che si presenta durante la fabbricazione di gioielleria in metallo prezioso, o successivamente durante l'uso o la riparazione, può essere complesso perché, sebbene esistano cause ben definite, la comparsa della fessurazione non è associata solamente ad una causa particolare. Stabilire la ragione precisa del danno può richiedere apparecchiature e conoscenze specializzate e la situazione può essere più complicata di quanto previsto, poiché i difetti nascono spesso da più cause.

Tuttavia esistono verosimilmente due aspetti della produzione che contribuiscono in misura maggiore a ridurre l'eventualità di produrre gioielleria difettosa o scarti:

- una buona comprensione della metallurgia dei metalli preziosi e delle relative leghe e
- la definizione di buone pratiche di produzione per materiali e prodotti e il meticoloso rispetto di tali pratiche.

Troppo spesso gli operatori in officina apportano i loro personali "miglioramenti" alle procedure, oppure la dimensione o la composizione della lega viene modificata senza considerare la necessità di modificare, allo stesso tempo, la procedura. Se le leghe di metalli preziosi sono per la maggior parte tolleranti ed estremamente lavorabili, ve ne sono di molto più difficili da fabbricare; ma certamente tutte le leghe traggono vantaggio dalla definizione di procedure corrette di produzione e dalla costante osservanza delle stesse.

Ringraziamenti

Questa dissertazione è basata su un'altra dissertazione originariamente pubblicata nell'AJM Magazine nel 2003, il cui coautore era Peter Raw. L'autore ringrazia quanti gli hanno concesso l'uso dei diagrammi e delle fotografie per illustrare questa presentazione, in particolare, Dieter Ott, in passato al FEM, Germania, Stewart Grice e Fred Klotz, Hoover and Strong Inc, USA, Greg Normandeau, in passato all'Imperial Smelting, Toronto, Canada, Eddie Bell, Neutec, USA e Mark Grimwade, Consulente, U.K.

Riferimenti

1. C. W. Corti, "Metallurgia di base dei metalli preziosi: 1a Parte" ("Basic Metallurgy of the precious metals: Part I"). In Atti del 21° Simposio di Santa Fe, ed. E. Bell, 2007, 77-108. Met-Chem Research, Albuquerque, USA
2. C. W. Corti, "Metallurgia di base dei metalli preziosi: 2a Parte, Sviluppo della microstruttura della lega mediante solidificazione e lavorazione" ("Basic metallurgy of the precious metals: Part II Development of alloy microstructure through solidification and working"). In Atti del 22° Simposio di Santa Fe, ed. E. Bell, 2008, 81-101. Met-Chem Research, Albuquerque, USA
3. D. Kinnenberg, S. Williams, D. P. Agarwal, "Origine ed effetti delle impurità nell'oro iperpuro" ("Origin and effects of impurities in high purity gold"), In Atti del 11° Simposio di Santa Fe, ed. D. Schneller, 1997, 1-31. Met-Chem Research, Albuquerque, USA; anche Gold Bulletin, 32 (2), 1998, 58-67
4. D. Ott, "Influenza delle piccole aggiunte ed impurità su oro e leghe d'oro in gioielleria" ("Influence of small additions and impurities on gold and jewelry gold alloys"), In Atti del 11° Simposio di Santa Fe, ed. D. Schneller, 1997, 173-195. Met-Chem Research, Albuquerque, USA; anche Gold Technology, n° 22, Luglio 1997, 31-38
5. P. Battaini, "Comportamento in fusione a cera persa delle leghe a base di palladio" ("Investment casting behaviour of palladium-based alloys"). In Atti del 22° Simposio di Santa Fe, ed. E. Bell, 2008, 49-80. Met-Chem Research, Albuquerque, USA
6. S. P. S. Sangha, M. R. Harrison & D. M. Jacobson, "Nuove saldature a bassa temperatura per oro ad alta caratura e relative applicazioni" ("New low temperature high carat gold solders and their applications"), Gold Technology, n° 19, Luglio 1996, 7-10; anche Gold Bulletin, 29(1), 1996, 3-9
7. G. Normandeau & R. Roeterink, "L'ottimizzazione delle aggiunte leganti al silicio nelle leghe per colata dell'oro ad alta caratura" ("The optimisation of silicon alloying additions in carat gold casting alloys"), Gold Technology, n° 15, Aprile 1995, 4-15
8. D. Ott, "Guida ai difetti di colata e non solo nella lavorazione della gioielleria in oro" ("Handbook of Casting and Other Defects in Gold Jewellery Manufacture"), 1997. World Gold Council, Londra
9. C. Raub, "Uso dell'argento in gioielleria" ("Use of silver in jewelry"). In Atti del 3° Simposio di Santa Fe, ed. D. Schneller, 1989, 24-256. Met-Chem Research, Albuquerque, USA
10. M. F. Grimwade, "Cause e prevenzione dei difetti nelle leghe lavorate" ("Causes and

- prevention of defects in wrought alloys”), *Gold Technology*, n° 36, Inverno 2002, 12-15
11. F. Klotz e S. Grice, “Vivi e lascia stampare” (“Live and let die (struck)”), *Gold Technology*, n° 36, Inverno 2002, 16 -2
12. P. Battaini, “La metallografia nella fabbricazione della gioielleria: come evitare i problemi e migliorare la qualità” (“Metallography in Jewelry fabrication: How to avoid problems and improve quality”). In *Atti del 21° Simposio di Santa Fe*, ed. E. Bell, 2007, 31-66. Met-Chem Research, Albuquerque, USA. Anche *Atti del 4° Forum sulla Tecnologia del Gioiello*, Vicenza, Gennaio 2008, 320-355, Legor Srl, Italia
13. S. Grice, “Ma io ho sempre fatto così. L'assistenza tecnica fa la differenza” (“But I've always done it this way. Technical support – it makes a difference”), In *Atti del 12° Simposio di Santa Fe*, ed. D. Schneller, 1998, 143-178. Met-Chem Research, Albuquerque, USA; anche *Gold Technology*, n° 25, Aprile 1999, 4-10
14. G. Normandeau & D. Ueno, “La fessurazione da fuoco nei materiali per gioielleria in oro bianco” (“Fire cracking in white gold jewelry materials”). In *Atti del 16° Simposio di Santa Fe*, ed. E. Bell, 2002, 429-450. Met-Chem Research, Albuquerque, USA
15. W. S. Rapson, “Progressi nella conoscenza delle leghe d'oro e loro uso in gioielleria” (“Advances in Knowledge relating to gold alloys and their use in jewellery”), *Atti del 9° Simposio di Santa Fe*, ed. D. Schneller, 1995, 65-82. Met-Chem Research, Albuquerque, USA
16. G. Normandeau, “Valutazione della fessurazione da tensocorrosione in prodotti colati e stampati per incastonature a griffe” (“Stress corrosion cracking evaluation of cast products and stamped 4 clawsettings”) In *Atti del 5° Simposio di Santa Fe*, ed. D. Schneller, 1991, 323-352, Met-Chem Research, Albuquerque, USA
17. J.J.M. Dugmore e C.D. DesForges, “La Tensocorrosione nelle leghe d'oro” (“Stress Corrosion in Gold Alloys”), *Gold Bulletin*, 12(4), 1979, 140-144.
18. S. Grice, “Rotture d'incastonature Tiffany in oro bianco al nichel a 14 K” (“Failures in 14kt nickel-white gold Tiffany head settings”). In *Atti del 16° Simposio di Santa Fe*, ed. E. Bell, 2002, 189-230. Met-Chem Research, Albuquerque, USA
19. S. Grice, “Effetto del contenuto di silicio vs temperatura di tempra sulle leghe per colata di oro a bassa caratura” (“Effect of silicon content vs quench temperature on low carat gold casting alloys”), *Gold Technology*, n° 28, Primavera 2000, 18-26; anche In *Atti del 13° Simposio di Santa Fe*, ed. D. Schneller, 1999, 205-254. Met-Chem Research, Albuquerque, USA
20. J. McCloskey, P. R. Welch, S. Aithal, “Microsegregazione del silicio in leghe d'oro per gioielleria” (“Silicon microsegregation in karat gold jewelry alloys”). In *Atti del 14° Simposio di Santa Fe*, ed. E. Bell, 2000, 187-204. Met-Chem Research, Albuquerque, USA.

