

Ulrich E. Klotz, Tiziana Drago e Dario Tiberto

fem - Research Institute for Precious Metals & Metals Chemistry

Il Dr. Ulrich E. Klotz è a capo del Dipartimento di Metallurgia Fisica presso l'Istituto di Ricerca sui Metalli Preziosi e la Chimica dei Metalli (FEM) di Schwaebisch Gmuend, Germania. Laureato in Ingegneria della Metallurgia Fisica (Università di Stoccarda, Germania) consegue un dottorato di ricerca in Scienza dei materiali presso l'ETH di Zurigo, Svizzera.

La Dr. Tiziana Drago è laureata in ingegneria dei materiali e specializzata in trattamenti superficiali (Politecnico di Milano, Italia). Ha inoltre conseguito un master in materiali e tecniche diagnostiche nel settore dei beni culturali (Università di Pisa, Italia). Collabora con il Dipartimento di Metallurgia Fisica presso l'Istituto di Ricerca sui Metalli Preziosi e la Chimica dei Metalli (FEM) di Schwaebisch Gmuend, Germania.

Dario Tiberto ha conseguito una laurea di primo livello (Bachelor) in Scienze di Ingegneria Meccanica (Politecnico di Torino). Lavora presso il Dipartimento di Metallurgia Fisica dell'Istituto di Ricerca sui Metalli Preziosi e la Chimica dei Metalli (FEM) di Schwaebisch Gmuend, Germania.

Il presente documento riassume i risultati di un lavoro di ricerca condotto in collaborazione sulla fusione delle leghe di platino di ampio utilizzo (Pt-5Ru e Pt-5Co) nel settore della gioielleria. Per consentire la simulazione del processo di fusione, in una prima fase è stato creato un database dei materiali. Per l'ottimizzazione e un'approfondita conoscenza del ruolo dei parametri del processo di colata sono stati utilizzati strumenti di simulazione della colata basati sulla fluidodinamica computazionale. Prove di colata selezionate sono state condotte con un attento monitoraggio del processo di colata, utilizzando macchine industriali di colata mediante centrifugazione e ribaltamento. La predisposizione di stampi dedicati per i diversi macchinari è stata ottimizzata attraverso l'ausilio di strumenti di simulazione della colata. Il riempimento dell'impronta, la qualità della superficie e la microstruttura e la porosità degli elementi fusi sono stati analizzati per studiare il ruolo dei diversi parametri di colata e le condizioni geometriche nelle diverse predisposizioni di colata. I risultati della simulazione della colata sono stati impiegati per conoscere in modo più approfondito i risultati sperimentali della colata.

Fusione a cera persa delle leghe di platino: proprietà dei materiali, simulazione del processo di colata e parametri per un processo ottimale

Ulrich E. Klotz*, Tiziana Heiss and Dario Tiberto

Research Institute Precious Metals & Metals Chemistry (fem)

INTRODUZIONE

La colata a cera persa delle leghe di platino è stata, negli scorsi anni, oggetto di studi empirici. Lo scopo di queste ricerche è stato comprendere meglio il processo di colata e la relativa ottimizzazione. Gli studi variano in termini di metodi di colata applicati, composizioni delle leghe e predisposizione delle forme in uso (1, 2, 3, 4). Tuttavia, a causa dei costi elevati dei materiali e della limitata distribuzione dei gioielli di platino, pochi sono gli studi comparativi condotti su leghe di argento e oro. La simulazione del processo di colata mediante fluidodinamica (di seguito più brevemente indicata come "simulazione della colata") si è dimostrata uno strumento valido nella colata a cera persa di oro e argento [7, 8]. La simulazione della colata si è dimostrata vantaggiosa come strumento complementare per gli studi empirici convenzionali sulla colata. La combinazione tra simulazione della colata, esperimenti di colata e caratterizzazione dei pezzi fusi risultanti ha permesso una migliore comprensione del processo di colata e quindi un miglior controllo (della qualità). Fino ad ora, la simulazione della colata delle leghe di platino non è stata oggetto di pubblicazioni nella letteratura accessibile al pubblico, sebbene se ne preveda un enorme potenziale per l'ottimizzazione dei parametri di processo e quindi per la riduzione dei costi. Le correlazioni sistematiche tra parametri di processo e qualità della colata non sono state ancora oggetto di descrizioni quantitative. Alcune conoscenze generali possono essere adattate a partire dalla colata di oro e argento, tuttavia è necessario tener conto di alcuni parametri di materiali ampiamente diversi. Scopo del presente lavoro è porre rimedio a questo deficit. Nello specifico, esso si adopera per comprendere e ottimizzare le influenze dei parametri di processo sulla qualità delle colate di Pt-5Ru e Pt-5Co con l'ausilio della simulazione della colata. Questo documento registra i risultati di un progetto di ricerca svolto in collaborazione e sostenuto dal Ministero Federale dell'Economia e della Tecnologia della Germania (progetto n. AiF-IGF 16413N). Il fine di questo progetto è stato sviluppare un database di materiali che potesse permettere la simulazione della colata (riempimento delle impronte e solidificazione) delle leghe di platino. Per validare i risultati della simulazione sono state condotte prove di colata selezionate comprensive di un attento monitoraggio del processo. Il lavoro si è concentrato sul controllo della temperatura di fusione durante la colata e sull'osservazione del raffreddamento del metallo all'interno della muffola. La simulazione è stata calibrata ed è stata impiegata per replicare il processo di colata per comprendere il ruolo dei parametri sulla qualità della stessa. Le prove di colata selezionate sono state condotte con una variazione dei parametri di processo, impiegando due diverse leghe e vari crogioli e materiali da rivestimento. La presente pubblicazione costituisce la prima parte di due documenti sulla colata a cera persa delle leghe di platino. Il secondo documento riguarda l'ottimizzazione della composizione delle leghe facendo ricorso a simulazioni termodinamiche [5]. I risultati descritti in questi due documenti sono stati presentati durante una presentazione tenutasi in occasione del 28° Simposio di Santa Fe® sulla Tecnologia di Produzione della Gioielleria nel 2014 [6].

ANALISI SPERIMENTALE

La fluidodinamica computazionale (CFD) può essere applicata per simulare il flusso complesso della fusione durante la colata e la distribuzione della temperatura in funzione del tempo. Le metodologie impiegate in questo lavoro sono descritte in [7, 8]. La simulazione è stata condotta in due fasi. Il riempimento dell'impronta durante la colata è stato simulato con il software FLOW3D (Versione 10.0.3, Flow Science, USA). La distribuzione della temperatura dopo aver concluso il riempimento dell'impronta è stata trasferita sul software POLIGON (Versione 12.1, Polygonsoft, Russia) per simulare il ritiro da solidificazione e il riscaldamento della colata in cera persa. Il posizionamento ottimale delle parti, l'inclinazione dei colaticci e il diametro del colaticcio principale sono stati determinati in base alla simulazione del riempimento dell'impronta. Sono stati testati cinque diversi disegni a forma di alberi proposti su [9] per

verificarne l'idoneità. Una forma ottimizzata è stata selezionata per esperimenti di colata mediante, rispettivamente, centrifuga e ribaltamento (Figura 1).

Per predisporre la simulazione del processo di colata sono necessari i dati dei materiali da rivestimento e dei metalli. I relativi dati dei materiali sono l'intervallo di fusione, la frazione di solido, la conduttività termica, la densità e la capacità termica delle leghe in funzione della temperatura. Le informazioni sperimentali di tali dati sono molto limitate per le leghe di platino [10, 11, 12]. Pertanto, alcuni dati sono stati determinati mediante simulazioni termodinamiche e negli allestimenti sperimentali presso il FEM [5, 6]. I dati dei materiali da rivestimento sono addirittura più difficili da determinare. L'espansione termica, l'intervallo di fusione e la permeabilità dei gas sono stati determinati per i tre materiali da rivestimento selezionati [6].

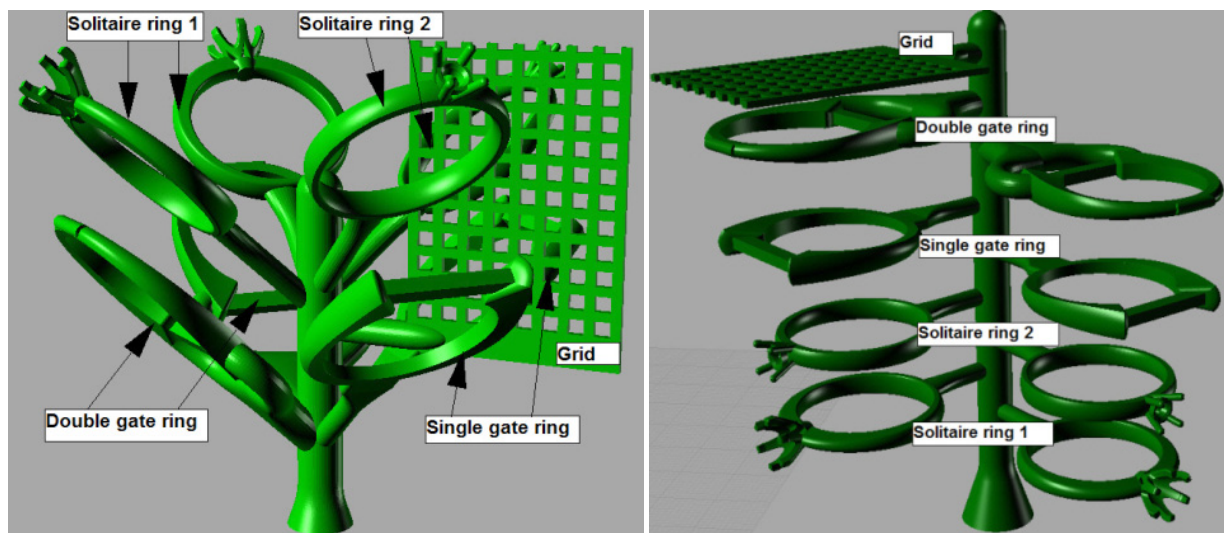
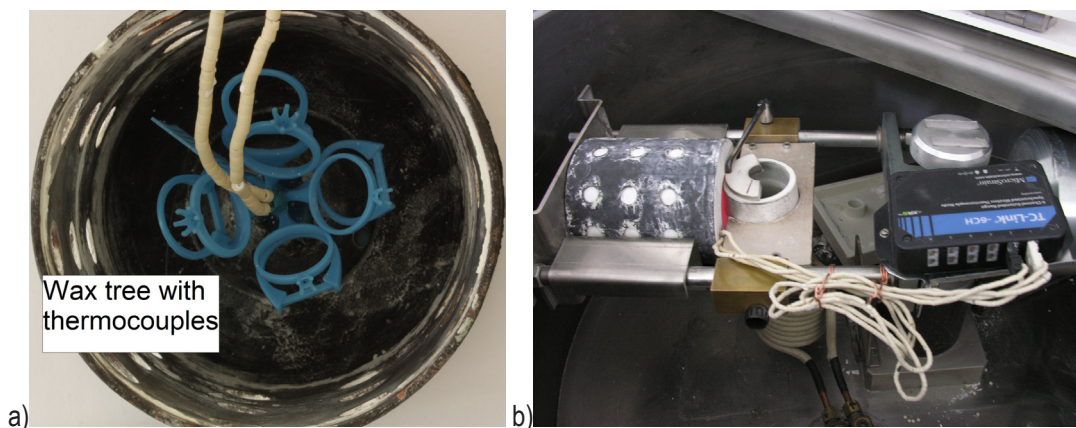
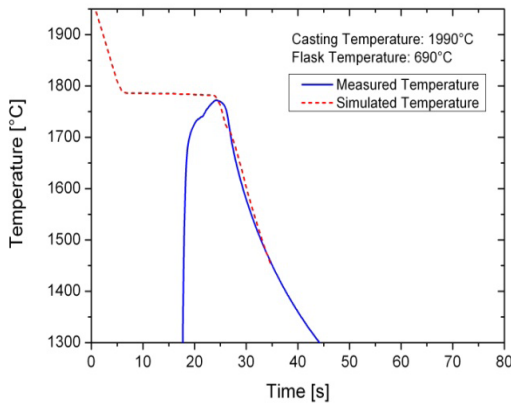


Figura 1: Predisposizione della forma di fusione per colata mediante ribaltamento (a sinistra) e per colata mediante centrifuga (a destra). La lunghezza del colaticcio principale corrisponde a circa 60 mm.

Per calibrare la simulazione, le curve di raffreddamento del metallo all'interno della muffola sono state misurate utilizzando termocoppie di Tipo B (Pt30%Rh-Pt6%Rh). La Figura 2a mostra le termocoppie montate sulla forma di cera. Le termocoppie sono state inserite nei tubi in ceramica e sono state collegate al server di processo dei dati all'interno della macchina di colata (Figura 2b). Ancora, la predisposizione è stata adattata alle possibilità offerte dalla specifica macchina di colata. L'esatta posizione delle termocoppie è stata controllata con esame radiografico delle muffole a seguito di colata al fine di determinare la distanza delle termocoppie dalla forma. Questa distanza è stata presa in considerazione nel raffronto delle curve di raffreddamento calcolate e misurate (Figura 2c). Le curve di raffreddamento sperimentale hanno permesso la calibrazione della simulazione della colata per i diversi tipi di macchina. Ulteriori dettagli sulla predisposizione della fase sperimentale sono forniti in [13].





c)

Figura 2: Misurazioni della temperatura con termocoppie sulla forma di colata (a). Muffola con termocoppie e server di processo dei dati in macchina di colata centrifuga (b), Comparazione profilo tempo-temperatura misurato e simulato (c).

È stato condotto un certo numero di esperimenti di colata per valutare l'influenza dei parametri di colata sulle parti colate. La selezione del disegno della forma di colata per ribaltamento e centrifuga è avvenuta in base alla simulazione del riempimento dell'impronta con le tre diverse varianti di disegno della forma. La Figura 1 mostra i due disegni di forma selezionati per colata mediante ribaltamento e centrifuga. Ciascuna forma contiene 8 pezzi tipici di gioielleria e una griglia per la determinazione del riempimento dell'impronta. Nella forma sono stati utilizzati due pezzi di quattro anelli differenti, in particolare "Anello Solitario 1" per una pietra più grande, "Anello Solitario 2" per una pietra più piccola, un anello "ad attacco singolo" con colaticcio sullo stelo dell'anello e un anello "a doppio attacco" con due colaticci sulle sezioni pesanti. Le due forme selezionate hanno riportato un peso di colata di circa 100 g e 125 g rispettivamente per colata mediante ribaltamento e colata centrifuga. Le prove di colata sono state condotte in aria sintetica purificata. Il modello di macchina con colata mediante ribaltamento è stato il VTC100VTi (Indutherm, Germania). I modelli di macchina con colata mediante centrifuga sono stati la TCE10 (TopCast, Italia) e la Platincast600 (Linn, Germania). La temperatura del metallo durante il riscaldamento e la fusione è stata monitorata attraverso il pirometro e una telecamera ad immagini termiche. La predisposizione dell'esperimento è risultata leggermente differente durante la colata centrifuga e la colata mediante ribaltamento in funzione della configurazione della macchine. La predisposizione sperimentale è descritta nel dettaglio in [13]. Il profilo temperatura/tempo nelle aree selezionate è stato registrato per ogni singola prova di colata. La "temperatura di colata" è stata la temperatura della fusione al momento dell'uscita dal crogiolo. Le temperature di fusione sono state 1850°C e 2040°C a seconda della lega e della macchina di colata. La temperatura della muffola ha riportato una variazione compresa tra 550°C e 950°C. Le leghe impiegate sono state la Pt-5Co e la Pt-5Ru. Nella seconda parte del lavoro sono state analizzate le composizioni delle leghe modificate [5]. Sono stati testati otto diversi materiali da rivestimento e alla fine per le prove di colata ne sono stati selezionati tre. Il Pro-HT (Goldstarpowders, Regno Unito), indicato come "EBM7", è un materiale da rivestimento per gioielli a corpo unico per leghe di platino. Il Platino R&R (Dentsply, USA), indicato come "EBM8", è un materiale da rivestimento per gioielli a corpo doppio per leghe di platino. Sherafina 2000 (Shera Werkstofftechnologie, Germania), indicato come "EBM5", è un materiale da rivestimento per il settore odontoiatrico.

Successivamente alla colata, la forma è stata sottoposta a getto d'acqua. Per valutare la qualità della superficie, quest'ultima è stata analizzata mediante microscopio ottico e microscopio elettronico a scansione (SEM). Il riempimento dell'impronta è stato valutato attraverso il riempimento dell'impronta di una griglia. Per identificare la porosità di ritiro e altri difetti di colata sono state condotte analisi metallografiche e per tomografia computerizzata e raggi X.

RISULTATI DI COLATA

RIEMPIMENTO DELL'IMPRONTA

La capacità di riempimento dell'impronta è stata valutata mediante determinazione della percentuale delle parti di griglia completamente intatte (Figura 1) e dipende fortemente dalla composizione della lega. Nei precedenti studi con impronta del "tipo a diavolo", la lega Pt-5Co ha mostrato un riempimento dell'impronta superiore rispetto alla Pt-5Ru [1]. Ciò è stato confermato per le forme più convenzionali utilizzate nel corso del presente studio (Tabella I). La colata centrifuga della Pt-5Co ha permesso di completare il riempimento dell'impronta a temperature di fusione e di muffola superiori, rispettivamente a 1850°C e 550°C. La temperatura di colata della Pt-5Ru ha dovuto essere di circa 100 K più alta. La colata mediante ribaltamento ha richiesto in genere temperature di colata superiori per un completo riempimento dell'impronta rispetto alla colata centrifuga. Nel caso della Pt-5Co, è stato sufficiente aumentare la temperatura di colata di circa 100 K. Per la Pt-5Ru è stato necessario aumentare non solo la temperatura di colata, ma anche la temperatura della muffola, rispettivamente di 100 K. Le ragioni di una più scarsa capacità di riempimento dell'impronta della Pt-5Ru sono spiegate in dettaglio in [5].

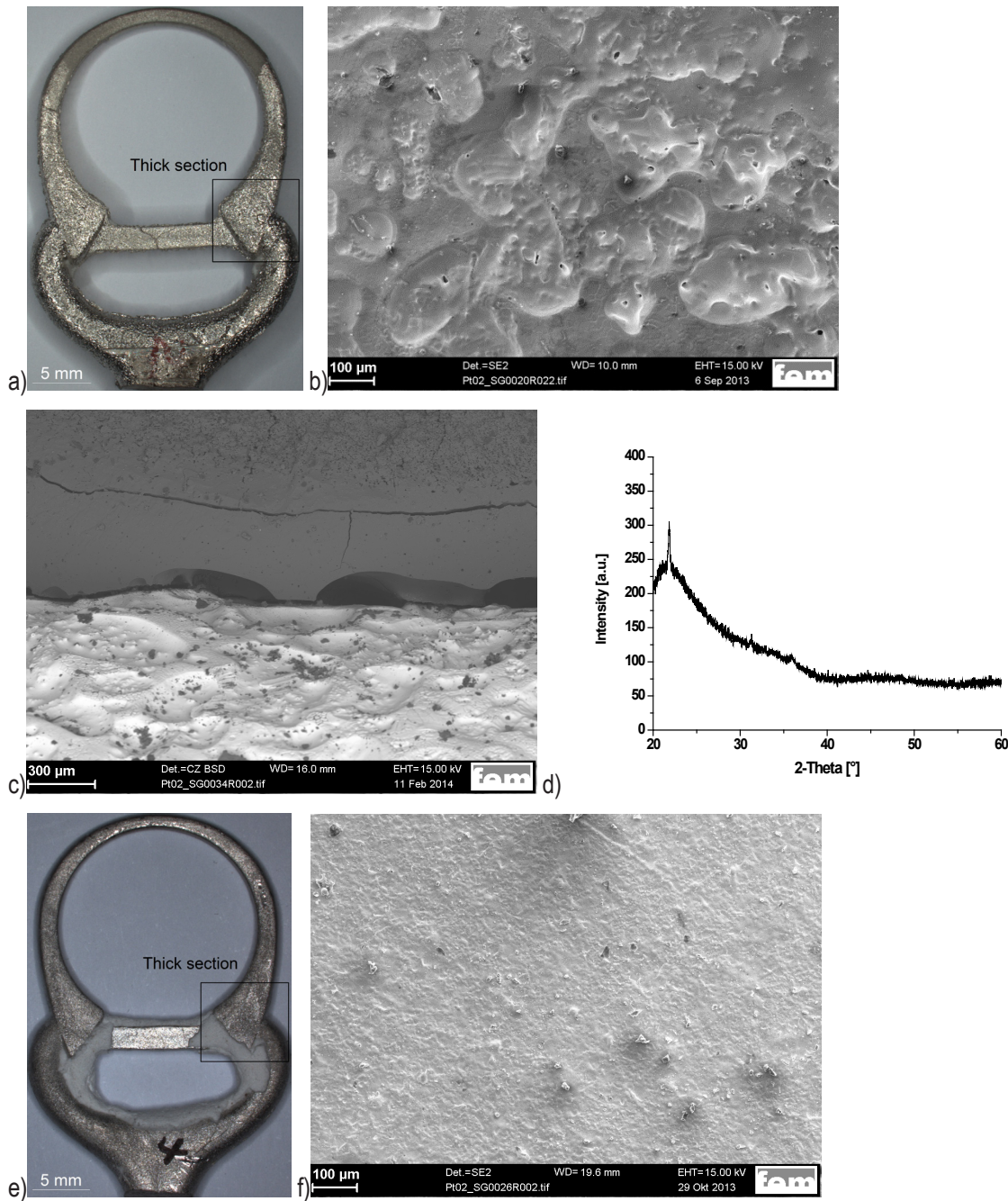
Tabella I: Riempimento di griglia in funzione delle temperature di colata e della muffola per la colata mediante centrifuga e rovesciamento di Pt-5Ru e Pt-5Co.

Colata centrifuga		
Temperatura di colata °C/ Temperatura muffola °C	Lega	Riempimento griglia in %
1850/850	Pt-5Ru	28
1950/850	Pt-5Ru	100
1850/850	Pt-5Co	100
1850/550	Pt-5Co	100
Colata mediante ribaltamento		
1950/850	Pt-5Ru	6
1950/950	Pt-5Ru	62
2040/950	Pt-5Ru	100
1825/850	Pt-5Co	20
1950/850	Pt-5Co	100

QUALITÀ SUPERFICIALE

La qualità della superficie dipende principalmente dalla lega e dal materiale da rivestimento. Nel caso della Pt-5Ru sono state anche osservate differenze significative tra la sezione spessa e sottile della stessa parte colata (Figura 3). Con i materiali EBM5 e EBM7, la qualità superficiale della Pt-5Ru è risultata molto scarsa nelle sezioni spesse. Si deteriora con l'aumentare della temperatura di colata e della muffola con ciascun materiale di precisione; tuttavia, l'entità di questo effetto è diversa per ogni materiale di precisione. Il materiale EBM8 mostra soltanto un leggero deterioramento della superficie sebbene a temperature di colata e della muffola elevate (Figura 3e). Eseguendo un paragone, la qualità della superficie dell'EBM7 è risultata molto scarsa nelle sezioni spesse ed ha mostrato uno strato vetroso sotto ingrandimento, presentando invece una qualità accettabile della superficie nelle sezioni sottili (Figura 3a). L'immagine SEM (Figura 3b) mostra avvallamenti superficiali formati da bollicine di gas nell'interfaccia metallo-materiale da rivestimento (Figura 3c). Il materiale da rivestimento è stato fuso a contatto con il metallo durante la colata, e le bollicine di gas si presume si formino per coagulazione della porosità del materiale da rivestimento. L'area fusa sembra coperta da uno strato superficiale trasparente e brillante dall'aspetto simile al vetro di silicio. Lo strato vetroso è spesso circa 500 µm. La misurazione XRD del materiale da rivestimento fuso sull'interfaccia (Figura 3d) ne indica la struttura amorfa, osservabile come prova della relativa natura vetrosa. Prima dell'esperimento di colata, il materiale da rivestimento consisteva in quarzo alfa esagonale, β -cristobalite tetragonale,

Tridimite ortogonale e $Mg_3(PO_4)_2$. Il punto di fusione dell'EBM7 sembra essere troppo basso per resistere alle alte temperature del Pt-5Ru fuso. Dall'altro lato, l'EBM8 mostra un'interfaccia uniforme per l'anello completo a doppio attacco (Figure 3e, f). Non sono stati rilevati pori sull'interfaccia e il materiale da rivestimento non è stato fuso durante la colata (Figura 3g). Non sono stati osservati strati superficiali fusi, solo uno strato sinterizzato di circa 30 μm . Pertanto, il materiale da rivestimento mostra ancora la propria struttura cristallina del quarzo alfa esagonale (Figura 3h).



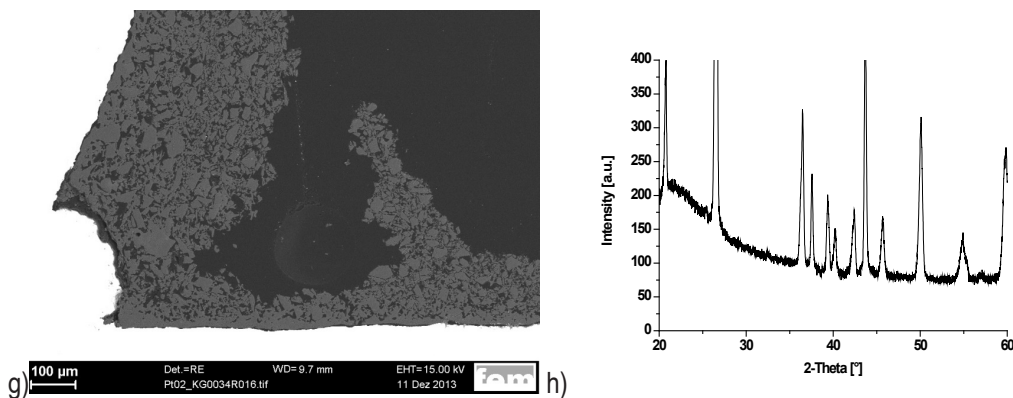


Figura 3: Influenza del materiale da rivestimento sulla qualità della superficie del Pt-5Ru. $T_{\text{fusione}} = 1850^{\circ}\text{C}$ / $T_{\text{muffola}} = 850^{\circ}\text{C}$. EBM7 (a-d) e EBM 8 (e-h). Immagine al microscopio ottico (a, e). Immagine della superficie della sezione spessa vista al SEM (b, f). Immagine dell'interfaccia metallo-materiale da rivestimento nella sezione spessa vista al SEM (c, g). Misurazione con XRD del materiale da rivestimento all'interfaccia (d, h).

Il materiale da rivestimento odontoiatrico EBM5 ha mostrato simili caratteristiche all'EBM7 ma con una qualità superficiale leggermente migliore. Nell'analisi di fusione esotermica (10 min) nessuno dei materiali da rivestimento si è fuso a 1675°C (temperatura di solidificazione del Pt-5Co). A 1725°C l'EBM5 e il 7 si sono fusi parzialmente, mentre l'EBM8 non si è fuso. A 1775°C (temperatura di solidificazione del Pt-5Ru) tutti i materiali da rivestimento si sono fusi. Sembra che l'EBM8 mostri stabilità alle più alte temperature e che resista alla fusione con un riscaldamento a breve termine durante la colata. Nel caso del Pt-5Co, le temperature di colata e della muffola influiscono limitatamente sulla qualità superficiale. Con tutti e tre i materiali da rivestimento viene a prodursi uno strato blu di silicato di cobalto, ma la superficie resta generalmente liscia.

POROSITÀ

La simulazione di colata prevede la porosità di ritiro con l'aumentare della temperatura di colata e della muffola. Gli studi metallografici confermano questa previsione per entrambe le macchine di colata in accordo a studi successivi [1]. In generale, la porosità di ritiro di grandi dimensioni deve essere evitata da opportuni colaticci come nel caso dell'anello a doppio attacco. In quel caso è possibile ottenere colate prive di difetto con il materiale Pt-5Co. Sono state riscontrate inclusioni di ossido e pori di gas diffusi e piccoli ($<1\ \mu\text{m}$) che non hanno deteriorato la qualità della colata. Dall'altro lato il Pt-5Ru mostra una tendenza pronunciata a formare micro porosità di ritiro, anche per adeguati colaticci. Una spiegazione di questo effetto è fornita in [5]. Un rimedio per chiudere i pori da micro ritiro è la pressione isostatica a caldo come descritto in [14]. Nella colata mediante ribaltamento la tendenza alla porosità di micro ritiro è meno pronunciata rispetto alla colata centrifuga (Figure 4a e b). Tuttavia, per il riempimento completo dell'impronta di elementi in filigrana sono necessarie temperature di colata (2040°C) e della muffola (950°C) molto elevate. Come descritto sopra, per una buona qualità superficiale si ha bisogno di materiali da rivestimento molto resistenti alle temperature. In genere, il materiale da rivestimento esercita un'influenza piuttosto ridotta sulla formazione delle porosità, sebbene l'EBM8 mostri risultati leggermente migliori rispetto all'EBM5 e all'EBM7.

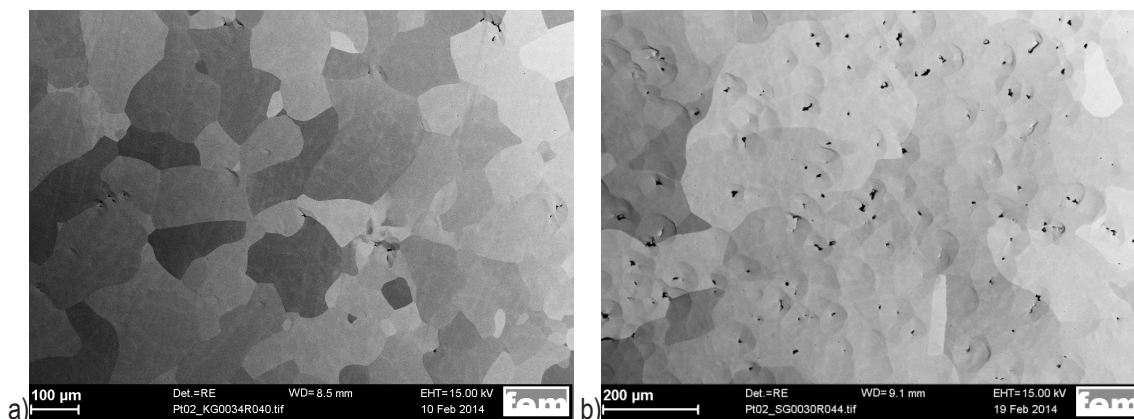


Figura 4: Microstruttura e porosità del Pt-5Ru nella colata mediante ribaltamento (a) e nella colata mediante centrifuga (b).

DISCUSSIONE

La simulazione della colata è uno strumento potente per prevedere e comprendere i difetti in colata. La colata può essere intesa come un processo in due fasi. La prima fase della colata è costituita dal processo di riempimento dell'impronta. Durante questa fase, le forze agenti sulla fusione ne controllano il flusso nella muffola. Nella colata mediante ribaltamento la forza di gravità è la maggiore forza agente. Pertanto, la velocità di flusso della fusione risulta relativamente bassa, determinando un tempo di riempimento dell'impronta comparativamente più lungo, favorendo un raffreddamento significativo durante il riempimento dell'impronta. Per la forma selezionata, la temperatura dell'elemento fuso devia significativamente lungo l'asse determinando il gradiente di temperatura dal colaticcio principale alla punta della forma. La differenza di temperatura dell'elemento fuso che entra nel colaticcio nel primo e nel secondo strato delle parti è risultata di circa 40 K (Figura 5a). Il riempimento completo della forma richiede circa 0,6 s. Il tempo di riempimento è circa il 50% più breve nella colata centrifuga che nella colata mediante ribaltamento sebbene la forma sia un 25% più pesante. Un tempo di riempimento più breve determina una temperatura di fusione residua più alta, il che spiega la migliore capacità di riempimento della colata centrifuga a una bassa temperatura di colata e della muffola. In base alla simulazione del riempimento, è stata ottimizzata la geometria della forma. Il diametro del crogiolo principale nella colata mediante ribaltamento potrebbe essere ridotto da 10 mm a 5 mm perché la velocità di riempimento aumenta nel colaticcio principale più piccolo. Inoltre, questo permette di risparmiare circa il 50% del peso della forma - una quantità importante di metallo prezioso altrimenti utilizzato in modo inefficiente.

Nella colata centrifuga, la principale forza agente è la forza centrifuga. Il modo in cui la forma è riempita dipende fortemente dal montaggio dei pezzi sul colaticcio principale. Se le parti sono montate sul lato principale della rotazione, l'inerzia causa un'accelerazione della fusione sul lato di traino del colaticcio principale. Le parti montate al di sotto di un angolo di 90° rispetto al colaticcio sono riempite in successione dalla punta del colaticcio principale verso l'attacco di colata. Questa situazione è illustrata nella Figura 5b per la fila superiore di parti. Se le parti sono montate sul lato di traino della forma, il momento d'inerzia della massa fusa fa riempire contemporaneamente tutte le parti. La simulazione indica che tale riempimento simultaneo può causare giunti a freddo. Tuttavia, questo effetto è sostanzialmente più ridotto perché le forze agenti sono più piccole.

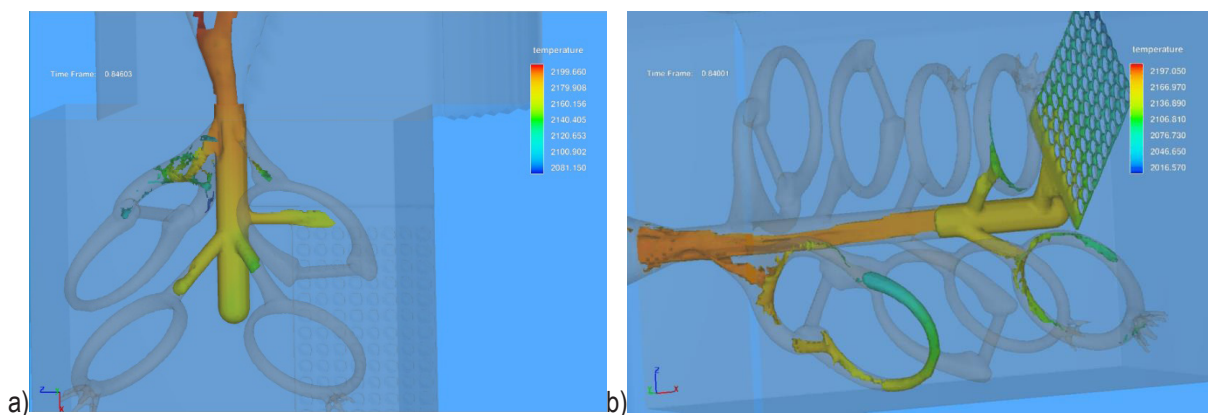


Figura 5: Simulazione del riempimento dell'impronta per colata mediante ribaltamento (a) e colata mediante centrifuga (b).

La seconda fase di colata, la solidificazione, è stata simulata con l'ausilio del software Polygon che permette di replicare il ritiro per solidificazione e pertanto la porosità di ritiro locale nelle parti (Figura 6). Le aree rosse indicano un'alta porosità di ritiro. Sulla punta della forma, nessuna porosità dovrebbe essere osservata nelle parti fuse secondo la simulazione. Il singolo attacco appare essere più predisposto alla porosità di ritiro, soprattutto nella sezione più spessa che è probabilmente isolata dalla massa fusa nel colaticcio principale durante la solidificazione a causa di una solidificazione prematura nelle parti più stagne del colaticcio. In questo caso si interrompe l'alimentazione con massa fusa fresca. Il gradiente di pressione all'interno della parte forza la massa fusa restante verso la punta della forma.

Con il Polygon è stato anche simulato il riscaldamento del materiale da rivestimento. La Figura 7 mostra la distribuzione della temperatura nel materiale da rivestimento per il doppio attacco. Lungo lo stelo dell'anello sottile le temperature sono relativamente basse. Le posizioni critiche sono rappresentate dalle sezioni spesse dell'anello. Nel punto dove i colaticci pesanti si collegano all'anello si trova un punto di sorgente. Aumentando la temperatura di colata e della muffola, il sovrariscaldamento locale aumenta in modo significativo. Le Figure 3c e g mostrano le reazioni del materiale da rivestimento nelle sezioni spesse. La temperatura localmente molto alta causa la rottura di alcuni materiali da rivestimento meno stabili, determinando una scarsa qualità della superficie. La rottura dei materiali da rivestimento è favorita dalle alte quantità di fosfato di magnesio utilizzato come additivo sinterizzante che riduce l'intervallo di fusione del materiale da rivestimento (15). Tali additivi possono costituire una limitazione significativa per i materiali da rivestimento. Per evitare la rottura del materiale da rivestimento devono essere utilizzati materiali da rivestimento più stabili o la lega potrebbe essere modificata nelle temperature di solidificazione descritte in [5].

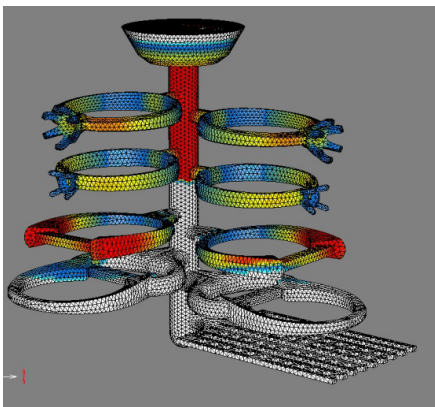


Figura 6: Porosità di ritiro in una colata centrifuga ottenuta mediante Polygon. Le aree rosse indicano un'alta probabilità di porosità, mentre le aree grigie dovrebbero risultare prive di pori.

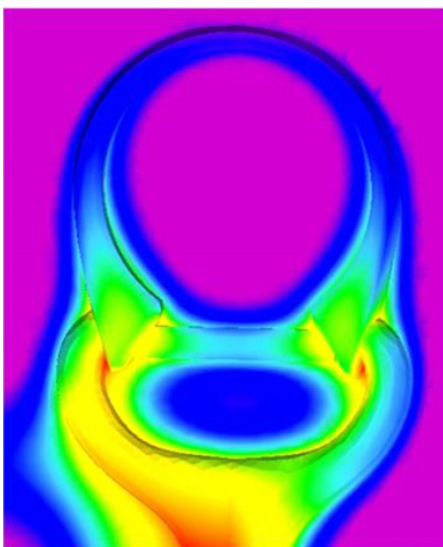


Figura 7: Distribuzione della temperatura del materiale da rivestimento dopo la colata centrifuga del PtCo5 ottenuta mediante Polygon ($T_{\text{muffola}} = 850^{\circ}\text{C}$).

RIEPILOGO

Il Pt-5Co mostra un buon riempimento dell'impronta rispetto al Pt-5Ru indipendentemente dalla temperatura di fusione e muffola. Per le macchine utilizzate nel corso di questo studio, il riempimento dell'impronta è risultato migliore nella colata centrifuga rispetto alla colata per ribaltamento perché le forze agenti risultano 4 volte superiori. Quindi, nella colata centrifuga il riempimento è stato più rapido e la temperatura di fusione è rimasta più alta durante il riempimento. Di conseguenza, per ottenere il medesimo riempimento nella colata mediante ribaltamento si è reso necessario un sovrariscaldamento superiore.

Un miglioramento del riempimento dello stampo con Pt-5Ru è ottenibile con una temperatura di colata e muffola aumentata. Tuttavia, per impedire la rottura del materiale da rivestimento devono essere utilizzati materiali da rivestimento molto stabili. Localmente, possono svilupparsi temperature del materiale da rivestimento molto alte come dimostrato nella simulazione. Materiali da rivestimento meno stabili possono fondersi o sinterizzarsi localmente, determinando una qualità della superficie scarsa. Il materiale da rivestimento più stabile in questo studio conteneva elevate quantità di quarzo alfa esagonale e basse quantità di additivi sinterizzanti. Come previsto nella simulazione della colata, la porosità di ritiro diminuisce con l'aumentare delle temperature di fusione e della muffola. Ciò è risultato particolarmente vero per il Pt-5Co, che ha mostrato soltanto pori di gas e inclusioni di ossido e condizioni ottimali. Il Pt-5Ru ha mostrato una tendenza pronunciata a formare un micro-ritiro difficilmente evitabile nella colata centrifuga. Nella colata mediante ribaltamento, il micro-ritiro è apparso meno pronunciato a causa di un raffreddamento più lento nella macchina specifica impiegata in questo lavoro. Il progetto ha mostrato i limiti delle leghe convenzionali utilizzate nel settore della gioielleria (Pt-5Ru e Pt-5Co). Appare essere necessaria un'ulteriore ottimizzazione della lega [5].

Dalla simulazione della colata è possibile dedurre importanti e utili indicazioni circa il disegno della forma, il posizionamento o l'inclinazione delle parti e della forma e la distribuzione della temperatura nel materiale da rivestimento. In particolare nel caso della colata centrifuga (dove le forze agenti sono molto complesse), la simulazione della colata aiuta a comprendere i difetti di colata e a identificare opportune soluzioni.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato finanziato dal Ministro dell'Economica e l'Energia tedesco (BMW) nell'ambito del programma IGF (progetto n. AiF-IGF 16413N). Ringraziamo i partner industriali (Indutherm Erwärmungsanlagen, C. Hafner, Linn HighTherm, Wieland Edelmetalle, Kalman Hafner Schmuckguss, Porzellanfabrik Hermsdorf e Shera Werkstofftechnologie) per il sostegno garantito al progetto. Gli autori sono grati ai collaboratori del dipartimento di metallurgia per la realizzazione del lavoro di ricerca.

RIFERIMENTI

- [1] U.E. Klotz and T. Drago, 'The role of process parameters in platinum casting', *Platinum Metals Rev.* 2011, 55, (1), 20-27.
- [2] D. Miller, T. Keraan, P. Park-Ross, V. Husemeyer and C. Lang, "Casting platinum jewellery alloys, The effects of composition on microstructure", *Platinum Metals Rev.*, 2005, 49, (3), 110–117
- [3] D. Miller, T. Keraan, P. Park-Ross, V. Husemeyer, A. Brey, I. Khan and C. Lang, "Casting platinum jewellery alloys, Part II: The effects of casting variables on fill and porosity", *Platinum Metals Rev.*, 2005, 49, (4), 174–182
- [4] T. Fryé and J. Fischer-Buehner, 'Platinum alloys in the 21st Century: a comparative study', in "The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2011", ed. E. Bell, Proceedings of the 25th Symposium in Albuquerque, New Mexico, USA, 15th-18th May 2011, Met-Chem Research Inc, Albuquerque, New Mexico, USA, 2011, pp. 201-230.
- [5] U.E. Klotz, T. Heiss and D. Tiberto, "Platinum investment casting, Part II: Alloy optimization by thermodynamic simulations and experimental verification", *Johnson Matthey Technology Rev.* submitted 2014
- [6] U.E. Klotz, T. Heiss, D. Tiberto, F. Held, "Platinum investment casting - Material properties, casting simulation and optimum process parameters", in "The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2015", ed. E. Bell and J. Haldeman, Proceedings of the 29th Symposium in Albuquerque, New Mexico, USA, 17th-20th May 2015, Met-Chem Research Inc, Albuquerque, New Mexico, USA, 2015, in press.
- [7] D. Tiberto and U. E. Klotz: 'Computer simulation applied to jewellery casting: challenges, results and future possibilities', MCWASP XIII: International conference on modelling of casting and advanced solidification processes, Schladming, Austria, 17-22 June 2012, 2012, IOP Publishing.
- [8] U. E. Klotz and D. Tiberto: 'Computer simulation in jewelry technology - meaningful use and limitations', The 26th Santa Fe Symposium of Jewelry technology, Albuquerque, NM, USA, 20-23 May 2012, 2012, Met-Chem Research, Albuquerque, NM, USA, 297-320.
- [9] J. Maerz, 'Platinum casting tree design', in "The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2007", ed. E. Bell, Proceedings of the 21st Symposium in Albuquerque, New Mexico, USA, 22nd-25th May, 2007, Met-Chem Research Inc, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007, pp. 305-322.
- [10] G. Beck, 'Edelmetall-Taschenbuch'; 1995, Degussa AG, Frankfurt und Hüthig GmbH, Heidelberg.
- [11] S. Mehmood, U. E. Klotz, and G. Pottlacher, *Met. Mat. Trans A*, 2012, 43(13), 5029-5037.
- [12] S. Mehmood, U.E. Klotz, G. Pottlacher, "Thermophysical properties of the platinum-copper system", EPD Congress 2011 TMS Annual Meeting, San Diego, USA 27th Feb – 3rd Mar 2011, Volume 1, 2011, 167-173
- [13] U.E. Klotz, T. Heiss and D. Tiberto, 'Entwicklung der Gießsimulation und experimentelle Untersuchungen von Platinlegierungen zur Optimierung des Feingussprozesses für Uhren- und Schmuckanwendungen' (in German), Final report of the research project AiF-IGF 16413N, 2014, available on request at www.fem-online.de
- [14] T. Fryé, J.T. Strauss, J. Fischer-Buehner, U.E. Klotz, 'The effects of hot isostatic pressing of platinum alloy castings on mechanical properties and microstructures', in "The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2014", ed. E. Bell and J. Haldeman, Proceedings of the 28th Symposium in Albuquerque, New Mexico, USA, 18th-21st May 2014, Met-Chem Research Inc, Albuquerque, New Mexico, USA, 2014, pp. 189-210.
- [15] H. Gamsjäger, 'Encyclopedia of Earth Science' Springer 1998, pp. 582-587