STUDIO DELLA FLUIDITÀ DI LEGHE A BASE RAME

P. Piccardo, R. Amendola, A. Adobati, C. Faletti

Le leghe di rame sono spesso utilizzate nella produzione di getti o semilavorati con svariate composizioni per la versatilità del processo di colata, che permette di utilizzare diverse tecniche e svariati materiali al fine di ottenere le caratteristiche desiderate. Tuttavia, nonostante questa tecnologia di produzione sia largamente utilizzata, non esiste ad oggi un test normato atto a determinarne i parametri ottimali e a prevenire eventuali difetti.
Questo lavoro nasce dall'esigenza di mettere a punto un sistema di misura affidabile, che possa ambire a diventare uno standard di uso comune per la valutazione di un parametro fondamentale, come la col abilità, e che contribuisca allo studio dell'influenza sia di fattori produttivi che di fattori chimici, come la presenza di elementi in lega in concentrazioni macro o micro (< 1%).
La ricerca si focalizza sulla standardizzazione di un test di fluidità che risponda alle esigenze scientifiche di precisione, sensibilità e riproducibilità, mantenendo l'aspetto pratico di semplicità di realizzazione poiché possa essere di interesse per prove di fonderia.

PAROLE CHIAVE: rame e leghe, solidificazione, fonderia, metallurgia fisica, proprietà

INTRODUZIONE

Le leghe di rame sono spesso utilizzate per la produzione di getti o semilavorati con svariate composizioni; si passa infatti dai classici bronzi allo stagno alle più moderne leghe di rame-magnesio per impieghi speciali. Il motivo di tale scelta risiede nel fatto che le leghe del rame, hanno l'enorme vantaggio di poter essere immediatamente utilizzate dopo la colata, soprattutto nei casi in cui sono richieste: resistenza a sforzi di trazione e/o compressione, resistenza all'usura da contatto, lavorabilità a freddo, conducibilità termica e/o elettrica, aspetto estetico e resistenza alla corrosione.
La Tab. 1 di seguito ne riporta alcuni esempi [1]:
La grande versatilità del processo di colata, permette di utilizzare diverse tecniche e svariati materiali per ottenere, nel prodotto metallico finale, le caratteristiche desiderate; tuttavia, nonostante questa tecnologia di produzione sia largamente utilizzata, non esiste ad oggi, relativamente alle leghe di rame, un test normato atto a determinarne i parametri ottimali e a prevenire eventuali difetti.
Caratteristiche quali la conducibilità elettrica e la resistenza meccanica, sono oggetto di misura secondo normativa, mentre la colabilità resta un dato pratico testato empiricamente con tecniche proprie del produttore (es. fonderia) a causa della necessità di valutazioni rapide e di facile realizzazione infatti, le fonderie hanno elaborato test artigianali di colabilità spesso standardizzati a livello interno, ma incapaci di fornire dati utilizzabili come valori assoluti. I lavori scientifici che si sono focalizzati su questa problematica sono, spesso, molto datati [3, 7] o riferiti più in dettaglio ad altre tipologie di lega [5, 10-12, 14, 15].
Questo lavoro nasce proprio dall'esigenza, da parte delle fonderie, di mettere a punto un sistema di misura affidabile, che possa ambire a diventare uno standard di uso comune, per la valutazione di un parametro fondamentale come la colabilità e che contribuisca allo studio dell'influenza sia di fattori produttivi (come temperatura del fuso, temperatura dello stampo, velocità di colata) sia di fattori chimici come la presenza di elementi in lega in concentrazioni macro o micro (< 1%) .
Quest'ultima possibilità non è da trascurare se si parla di piombo, elemento storicamente molto importante per il rame e le sue leghe ma attualmente molto discusso a causa dell'inasprirsi di regole inerenti la salute pubblica e l'impatto ambientale. Il piombo viene normalmente utilizzato, anche in bassa concentrazione, per conferire alle leghe di rame un'incrementata lavorabilità all'utensile, quando serva un'elevata resistenza all'usura (grazie all'effetto di lubrificante naturale) e, secondo la tradizione, per migliorare la colabilità. La peculiarità di questo parametro è che in ambito artigianale e industriale, tale concetto è accettato senza che vi siano prove specifiche che permet-

P. Piccardo, R. Amendola
Università degli studi di Genova - DCCI, Via Dodecaneso 31 (GE) 16146, pol@chimica.unige.it
A. Adobati
Fonderia Metalleghe s.r.l, Via Moie 705 b 24059 Urgnano (BG)
C. Faletti
Metal SilCar s.n.c, Metal SilCar, Via Badia 48/50 Cellatica (BS)

Materiale	composizione	Esempi di applicazione
Bronzi allo stagno	CuSn10-C (ex UNI7013-1)	Lega generalmente destinata alla costruzione di supporti e boccole per alberi. Impiegata pure per getti destinati all'industria petrolchimica e navale (pompe,valvole, ecc.) e applicazioni meccaniche generali (ruote dentate)
	CuSn12-C (ex UNI7013-2)	Lega adatta alla costruzione di supporti e boccole per alberi di acciaio indurito o cromato. Per l'elevata colabilità può essere vantaggiosamente impiegata nella costruzione di getti complicati per applicazioni idrauliche (corpi e giranti di pompe centrifughe). Impiegata per ruote dentate in accoppiamento a viti senza fine di acciaio.
Bronzi al piombo	CuSn10Pb10 (ex UNI7013-3)	Lega per supporti e bussole fortemente caricati (laminati a freddo, ecc)
	CuSn7Pb15 (ex UNI7013-4)	Lega per supporti a medio carico specifico e per tenute per apparecchiature oleodinamiche.
	CuSn5Pb20 (ex UNI 7013-5)	Lega generalmente impiegata per supporti e boccole a carico limitato in apparecchiature oleodinamiche e per riporti su gusci di acciaio.
Bronzi allo zinco	CuSn10Zn2 (ex UNI 7013-6)	Lega generalmente impiegata per corpi e giranti di pompe per applicazioni idrauliche e navali e per valvole per acqua calda e per vapore fino a 200° C.
	CuSn7Zn4Pb7C (ex UNI 7013-7)	Lega generalmente impiegata per rubinetteria, valvole per acqua fredda e calda, raccordi, bussole e supporti antiusura.
	CuSn5Zn5Pb5C (ex UNI 7013-8)	Lega per impieghi generali
	CuSn3Zn8Pb5C (ex UNI 7013-9)	Lega di impiego generale unificata alle norme UNI 7013 - 9 e BS 1400 - LG1. Trova un buon impiego nella produzione di flange e giunti ad espansione, oltre che di valvole idrauliche. Utilizzata anche per rubinetterie e raccorderie di impianti sanitari.
	CuSn10Zn2Ni2 (ex UNI701310)	Getti per costruzioni meccaniche ed apparecchiature elettriche in generale. Corpi e giranti di pompe, flange, raccordi, tubazioni, valvole per Kerosene, valvole per vapore saturo (fino a 225° C) in costruzioni navali.
Bronzi all'alluminio	CuAl10Fe2-C (ex UNI 5273)	Lega adatta specialmente per impianti chimici. Nella meccanica generale si raccomanda per applicazioni dove si richiedono elevate caratteristiche plastiche. Esempi di applicazione: pompe per acqua di miniera, giranti centrifughe, eliche navali poco sollecitate, cuscinetti, sedi e guide di valvole, ingranaggi elicoidali, ecc
	CuAl10Fe5Ni5C (ex UNI 5275)	Lega adatta per pezzi fortemente sollecitati a freddo ed a caldo e possiede un'ottima resistenza alla corrosione, anche marina. Notevoli sono anche le sue doti di resistenza al logoramento ed alla cavitazione. Esempi di applicazione: giunti per turbine, boccagli e spine di ruote Pelton, cuscinetti fortemente sollecitati, pezzi di bocche da fuoco, guide e sedi di valvole per motori.

▲ Tab. 1

Esempi di leghe da colata e relativi utilizzi.

Some casting alloys example and relative using.

tano di giustificarlo. La sua sostituzione, in questi anni è di grande attualità, tanto in America dove è stata promulgata la normativa USA-Canada standard ANSI/NSF61 [2] quanto in Europa dove, con la direttiva del Dicembre 2003 (DWD98/93 CE) [2], si rende necessario limitare e, ove possibile, eliminare il piombo in tutte quelle leghe normalmente utilizzate per la produzione di dispositivi destinati al contatto con l'acqua potabile (es. rubinetteria, valvole, raccord) inoltre, il limite tollerato di tale metallo disciolto in soluzione dovrà scendere dall'attuale 0,025 mg/l a 0,01 mg/l (valore fissato dall'OMS Organizzazione Mondiale della Sanità) a partire dal Dicembre 2013. Lo sviluppo di una ricerca che contribuisca a comprendere l'influenza di ogni legante singolarmente e associato con altri è il primo passo per la formulazione di leghe da getto innovative che, non solo risolvano il problema del piombo, ma permettano un miglioramento delle caratteristiche a parità di tecnologia produttiva. I risultati di una tale ricerca sono quindi di forte impatto sull'attività di aziende e piccole medie imprese coinvolte nella metallurgia del rame.
La ricerca, di cui si espongono in questo articolo i primi risultati, si focalizza sulla standardizzazione di un test di fluidità che risponda alle esigenze scientifiche di precisione, sensibilità e riproducibilità, mantenendo l'aspetto pratico di semplicità di realizzazione poiché possa essere di interesse per prove di fonderia.

STATO DELL'ARTE

Anche se altri termini, tra i quali "colabilità", sono stati usati per descrivere il comportamento di un metallo liquido, "fluidità" [3-8] è quello maggiormente utilizzato dalla comunità scientifica internazionale. Una fluidità inadeguata può essere causa di bassa profondità di colata o impedire una corretta riproduzione dei particolari superficiali. Secondo i fonditori, la fluidità si può definire come "la misura empirica della distanza che un metallo liquido

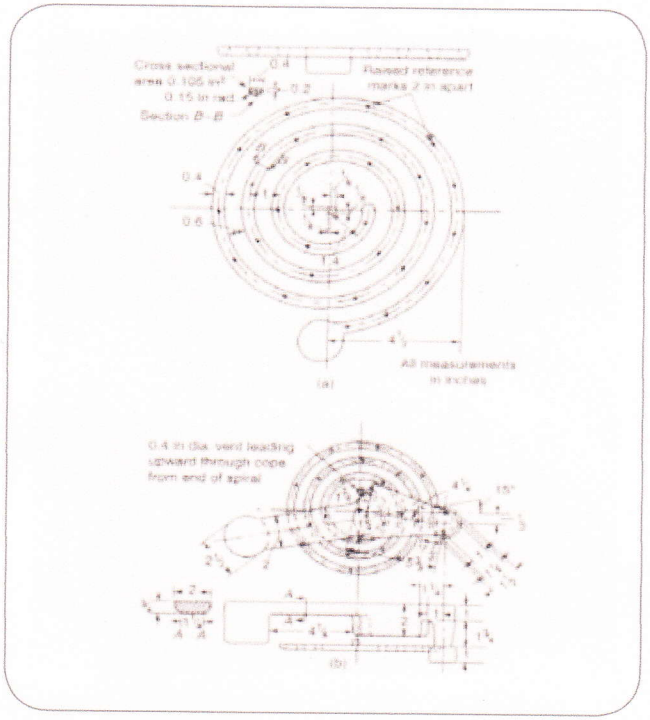

Fig. 1

[9]: test per la determinazione della fluidità (a) spirale standard (b) adeguamento di un alimentatore dal basso e bacino di versamento.

[9]: fluidity test (a) standard fluidity spiral (b) arrangement of down-gate and pouring basin for standard fluidity spiral.

può percorrere, in uno stampo di forma opportuna, prima che intervenga il processo di solidificazione". Poiché la fluidità non può essere valutata dalle diverse proprietà fisiche (es: viscosità, temperatura di fusione, densità), sono state predisposte delle prove empiriche per misurare le sue caratteristiche generali ed il suo valore è normalmente fornito in centimetri corrispondenti alla distanza percorsa all'interno di un canale con particolare sezione trasversale. T.D. West, nel 1898 fu il primo a tentare un test di fluidità [3] usando uno stampo in sabbia e colando il metallo in un cuneo orizzontale, nel 1936 Ruff [3] propose una nuova versione consistente in un lungo canale cilindrico, ma problemi legati al livellamento del metallo all'interno dello stesso vanificarono la riproducibilità della prova. Tutti i test evidenziarono come, per ottenere una valida valutazione dei risultati e una buona ripetibilità, fosse necessario concepire una geometria che permettesse al metallo di fluire per una distanza sufficientemente lunga in assenza di spigoli vivi pertanto, agli inizi degli anni '50, Saeger, Krynitsky e Taylor [3, 7] svilupparono per primi il modello a spirale, successivamente modificato in modo da ottenere condizioni di flusso standard con diversi progetti di serbatoio atti a regolare la pressione nella testa d'alimentazione e dispositivi di colata a velocità costante. In Fig. 1 [9] è illustrata la spirale tipica per la valutazione della fluidità; attualmente tale test è usato negli Stati Uniti come standard per ghise e leghe ferrose, mentre la colata in sabbia è la tecnica più utilizzata nel momento in cui il test diviene prova da fonderia [3, 8, 10].

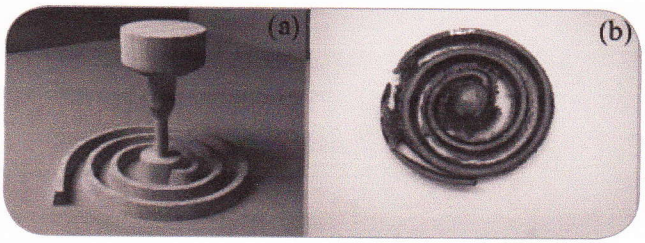

Fig. 2

(a) modellizzazione CAD 3D della spirale, (b) spirale risultante da un test di colata.

(a) CAD 3D spiral modelling (b) spiral ensue from a casting test.

FATTORI INFLUENZANTI LA FLUIDITÀ [3, 4, 6, 7, 10, 11]

Usando gli stampi per la valutazione della fluidità illustrati al paragrafo precedente e altre tecniche, sono state stabilite le proprietà fondamentali della fluidità, in particolare sono state evidenziate le variabili che più sensibilmente influenzano il risultato del test.

- Temperatura: la temperatura iniziale del metallo è il fattore predominante, numerosi autori hanno constatato che la fluidità di alcune leghe è direttamente collegata con la temperatura di sovrafusione. Questo fatto è probabilmente legato all'effetto fondamentale della solidificazione nel controllo della durata del flusso, poiché il surriscaldamento determina la quantità di calore da dissipare prima dell'inizio della solidificazione;
- Composizione: i confronti fra fusi di varie leghe possono essere fatti soltanto a partire da una temperatura di sovra fusione costante, in queste circostanze emerge una relazione fra la costituzione della lega e la fluidità. Differenze nel comportamento tra i vari tipi di leghe dipendono soprattutto dai loro caratteristici parametri termodinamici e cinetici, potenzialmente diversi da lega a lega;
- Sistema di alimentazione: è la parte dello stampo attraverso cui il metallo viene versato per riempire l'impronta del pezzo fuso; il suo progetto è il modo principale con cui controllare la velocità e la direzione del flusso del metallo che deve essere quanto più possibile regolare, uniforme e con turbolenza minima.

PARTE SPERIMENTALE: ELABORAZIONE DEL MODELLO

Allo scopo di creare una banca dati adeguata relativamente alla fluidità delle leghe di rame, si è sviluppato un test in grado di valutare, a parità di parametri di colata e indistintamente dalla lega da testare, la fluidità, fissando come fattore discriminante, in accordo con la letteratura [3, 5, 8, 10, 12, 15], la lunghezza del cammino percorso all'interno dello stampo. La tecnologia scelta è, nella prima fase di elaborazione, la colata in sabbia che rappresenta un metodo standard per molti autori [3, 8, 10] e che, per questo lavoro, è giustificata dalla necessaria versatilità di un metodo con cui fosse semplice apportare modifiche al modello in tempi rapidi. In questo modo è stato possibile introdurre nel modello varianti che rispondessero alle problematiche

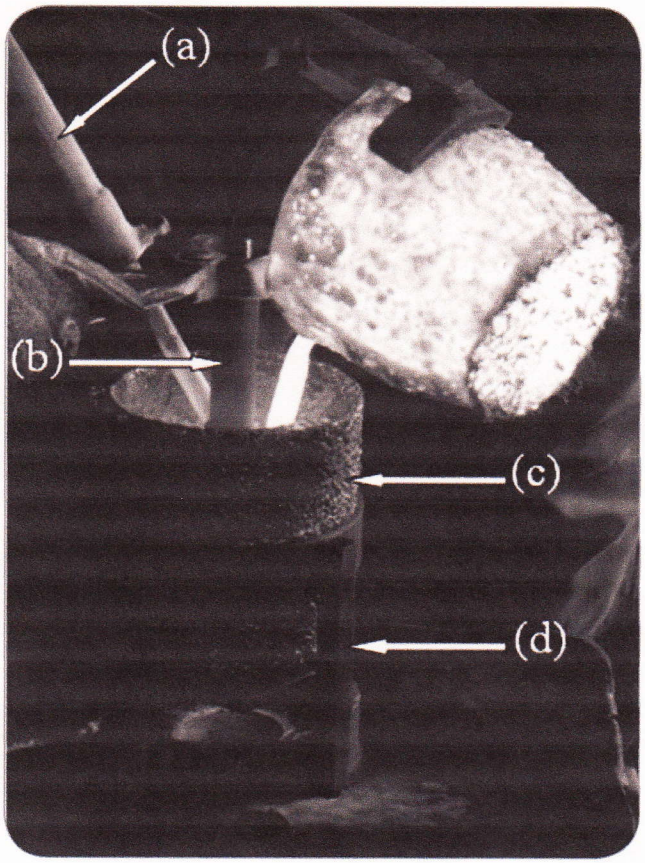

Fig. 3

Dispositivo di colata: (a) termocoppia ad immersione (b) asta in grafite (c) siviera in grafite (d) sostegno in acciaio.

Casting device: (a) immersion thermocouple (b) graphite bar (c) graphite ladle.

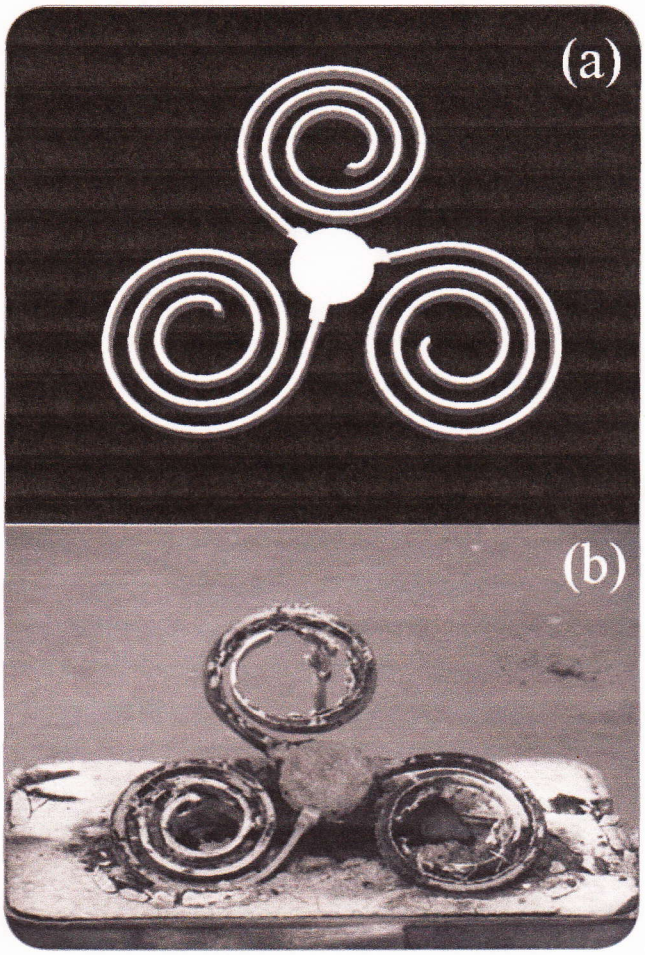

Fig. 4

(a) modellizzazione 3D del modello triplo, (b) spirali risultanti da un test di colata.

(a) triple model 3D modelling (b) spirals ensue from a casting test.

sorte nel corso della prova, ottimizzando così la forma per minimizzare i difetti e massimizzare la riproducibilità del test. La forma del modello è stata elaborata partendo dalla già esistente spirale [3, 5, 7, 8, 12], ha sezione trapezoidale ed è stata modificata aggiungendo una zona emisferica in corrispondenza dell'arrivo del dardo di colata in modo da evitare turbolenze, schizzi o altre variabili incontrollabili nel corso della prima fase della colata. La scelta della lega da usare come standard è ricaduta sulla binaria di Cu90-Sn10 (wt%) largamente utilizzata nei processi di fonderia fin dall'antichità [13]. In Fig. 2 è mostrato il modello tridimensionale e una spirale risultante da una prova di colata. La prima sessione di prove effettuate ha fatto uso di uno stampo a spirale singola che ha permesso di valutare la fattibilità del test e di iniziare il processo di miglioramento della riproducibilità e dell' affidabilità. I principali errori di progettazione (es. dimensione della materozza, scelta della sabbia, geometria della zona di raccolta) sono stati eliminati per cui sono divenuti determinanti i parametri necessari al controllo delle variabili di processo (temperatura, composizione e velocità di colata).

Al fine di ottenere una buona ripetibilità del test eliminando l'errore legato al fattore umano si è progettato un dispositivo, da sovrapporre alla staffa, che consta di una siviera in grafite tappata con un'asta anch'essa in grafite e sorretta da un apposito sostegno in acciaio, il fuso viene versato da un crogiolo proveniente dal forno ad una temperatura superiore di almeno 100°C a quella di colata (Fig. 3). Tale sistema permette il controllo delle variabili fondamentali del processo di colata come segue:

- massa: la quantità di lega si fissa a 5 Kg;
- temperatura: si controlla con termocoppia ad immersione direttamente nella siviera, e si fissa così l'esatta temperatura di colata nel momento in cui si procede alla rimozione del tappo, in questo modo, entro certi limiti tecnici, è possibile uniformare la temperatura di colata per valutare la riproducibilità del test [8, 15] e, in ogni caso,indagare sulla relazione esistente tra temperatura di colata e fluidità;
- velocità di colata: è costante poiché collegata semplicemente con la distanza di caduta del fuso dal punto iniziale di riposo che corrisponde al fondo della siviera (caso particolare del teorema di Bernoulli, velocità di efflusso torricelliana).

Un'ulteriore e particolarmente importante modifica al progetto iniziale è stata la decisione di passare da uno stampo a spirale singola ad uno a spirale tripla (Fig. 4a). Il modello multiplo è ispirato a test analoghi e con geometrie diverse utilizzati da altri autori [8, 14] in grado di fornire, in alcuni

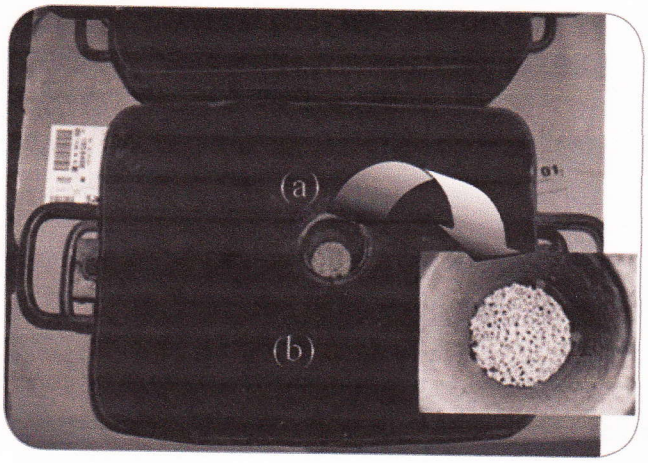

Fig. 5

staffa assemblata pronta per la colata, (a) manicotto refrattario con filtro ceramico (b) sfiati per i gas.

assembled mould ready for casting, (a) refractory manifold with ceramic filter (b) venting channels.

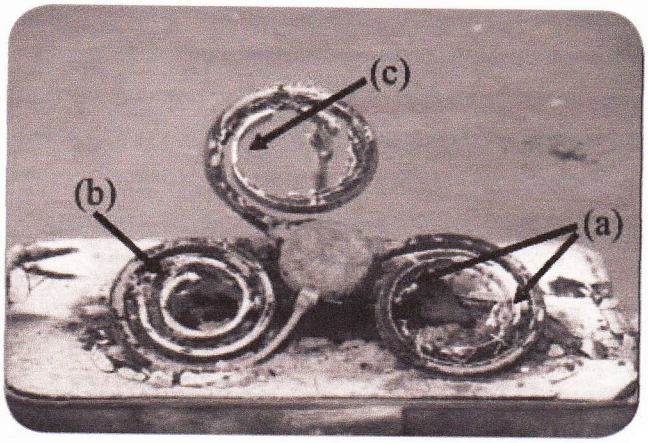

Fig. 6

errori di colata: (a) sbavature, (b) errore di riempimento (c) assottigliamento della parte finale.

casting faults: (a) fettle, (b) filling fault, (c) thinning of the ending part.

casi, informazioni relative all'attitudine del metallo fuso di riempire sottili sezioni, circolari e non, di forma più o meno complessa [15]. Questa tipologia di modello permette, inoltre, di avere una valutazione qualitativa della riproducibilità del test e, avendo cura di mantenere in bolla lo stampo, di ottenere una valida consistenza statistica dei dati. Il nuovo modello è, quindi, un'evoluzione del primo con tre spirali a canale di alimentazione comune posto nella parte che in origine era la terminazione esterna della spirale stessa. La parte centrale di ciascuna singola spirale diviene, così, parte terminale e l'originario canale di colata (per spirale singola) diviene canale di sfiato. Le tre spirali colate necessitano di un diverso canale di alimentazione che permetta un flusso costante e privo di turbolenze. La parte che costituiva la zona di arrivo del dardo di colata non fa più parte del modello, ma è stata sostituita con un manicotto refrattario dotato di filtro ceramico all'interno dello stampo atto a creare un flusso a bassa turbolenza oltre che a trattenere eventuali impurità (Fig. 5). In Fig. 5 sono evidenziati i canali di sfiato per i gas posti in corrispondenza della fine di ogni spirale che, nel caso di leghe ad elevata fluidità, fungono anche da "prolungamento" del modello. quando la spirale viene completamente riempita.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Come illustrato nella parte iniziale di questo lavoro, il valore della fluidità si esprime in centimetri poiché corrisponde al cammino percorso all'interno dello stampo prima che intervenga il processo di solidificazione. Precedenti studi riportati in letteratura [8] propongono una relazione lineare tra la fluidità (L in cm) e la temperatura di colata (Tc in °C) del tipo

$$(1) \qquad L = aT_c + b$$

Dove a e b sono parametri di proporzionalità definibili come "indici di fluidità", caratteristici per una data composizione di lega con dimensioni a = cm/°C e b = cm

Le prove sperimentali condotte hanno chiaramente mostrato che, misurare la distanza percorsa nello stampo non è immediato poiché tale lunghezza risulta inficiata da variazioni nell'omogeneità della sezione della spirale colata causate da difetti legati all'operatività del test quali sbavature, errori di riempimento e assottigliamenti della parte finale di ciascuna spirale (Fig. 6). Effettuando una misura di lunghezza, si perdono, quindi, le caratteristiche di affidabilità e ripetibilità del test. L'errore di valutazione appena esposto diviene trascurabile nel caso in cui si prenda in esame la massa delle spirali: in tal caso si pesano le tre spirali (escludendo materozza e canale di alimentazione) e la massa risultante corrisponde alla quantità di lega che ha effettivamente partecipato alla produzione del getto. I test svolti hanno mostrato una certa riproducibilità del risultato con variazioni che dipendono solo dalla temperatura di colata (Tab. 2). Utilizzando la quantità di lega che effettivamente ha preso parte alla creazione di ciascuna spirale, senza tener conto della sua effettiva distribuzione all'interno del modello che, come sopra esposto, può dipendere da fattori estranei alla fluidità della lega, si riducono i parametri non controllabili, incrementando il valore statico del risultato ottenuto. Per riportare questa misura nell'equa-

Tipo di modello	Temperatura di colata (°C)	Lunghezza equivalente (cm)
Spirale singola	1150	65
Spirale tripla	1150	71
Spirale tripla	1150	73
Spirale tripla	1066	88

Tab. 2

Valori sperimentali della lunghezza equivalente in funzione della temperatura di colata.

Experimental values of equivalent lenght depending on the casting temperatureConfigurazione dell'impianto di colata Corus Ymuiden BOS no. 2.

zione (1) si deve semplicemente considerare che il volume altro non è che la distribuzione spaziale della massa. Detto questo si è deciso di non misurare la lunghezza effettiva ma di formulare il concetto di "lunghezza equivalente" (Leq) che corrisponde alla lunghezza che la spirale avrebbe se il fronte di avanzamento del fuso occupasse in modo omogeneo tutta la sezione a disposizione. Essendo la lunghezza equivalente una lunghezza ideale per la massa effettivamente colata, ne quantifica l'effettiva fluidità, come di seguito esplicitato:

$$\left.\begin{array}{l} P(g) / V(cm^3) = d\,(g/cm^3) \\ V(cm^3) = L_{eq}\,(cm)\,A(cm^2) \end{array}\right\} \rightarrow L_{eq}\,(cm) = \frac{P(g) / d\,(g/cm^3)}{A\,(cm^2)}$$

Dove: P = peso della spirale colata (g)
V = volume di lega che ha formato la spirale (cm^3)
d = densità misurata della lega testata (g/cm^3)
A = area sezione trapezioidale della spirale (cm^2)
L_{eq} = lunghezza equivalente (cm)

Il valore di densità della lega è spesso incognito e quando noto, può essere inficiato dall'eventuale presenza di porosità e di difetti. Il valore di Leq assume quindi un grado di precisione maggiore se, con il semplice ed intuitivo metodo di Archimede, si procede alla valutazione esatta di "d" per ciascuna lega. L'introduzione del concetto di lunghezza equivalente è del tutto innovativo soprattutto se correlato ai già citati "indici di fluidità" e alla temperatura di colata che risulta essere la principale variabile che influenza la misura della fluidità a parità di composizione:
L'equazione (1) diventa quindi:

$$L_{eq} = f(Tc) \rightarrow L_{eq} = a_{lega}\,T_c + b_{lega} \qquad (2)$$

Risulta importante sottolineare che gli indici di fluidità sono caratteristici di una ed una sola lega. I primi risultati ottenuti con il bronzo Cu90Sn10 sono particolarmente incoraggianti. La misura di densità (d=8,19 g/cm^3) ha permesso di valutare la lunghezza equivalente per ciascuna colata e di verificarne la proporzionalità lineare con la temperatura di colata. Diventa quindi importante definire come i parametri di proporzionalità dell'equazione (2) dipendano dalla composizione della lega. Escludendo la temperatura dello stampo, fattore importante ma controllabile, è infatti ragionevole ipotizzare che gli indici di fluidità siano funzione degli elementi presenti in lega e delle loro concentrazioni relative secondo una relazione generica del tipo:
a_{el} = f (% elemento), b_{el} = f (% elemento)
inoltre, tenuto conto che si è spesso in presenza di leghe ternarie, quaternarie o più complesse, si deve anche tener conto degli eventuali effetti combinati di due o più elementi presenti in lega. Per cui gli indici di fluidità divengono funzioni che uniscono l'apporto degli indici relativi ai singoli elementi secondo un'equazione generica tipo (3), dove a^0 e b^0 corrispondono agli indici relativi al metallo solvente (es. rame non legato), mentre a_{el} e b_{el} corrispondono ad un generico el_n in lega. L'equazione (2), con l'introduzione dell'equazione (3) può essere scritta come in (4)

$$a_{lega} = f(a^0, a^{el\,1}, a^{el\,2} \ldots a^{el\,n}) \quad (3) \rightarrow \begin{cases} L_{eqCu} = a^0\,T_c + b^0 \\ L_{eqlega} = a_{lega}\,T_c + b_{lega} \end{cases} \quad (4)$$

I lavori attualmente in fase di sviluppo, prevedono la realizzazione di uno stampo permanente sul modello messo a punto tramite stampo in sabbia. Questo permetterà la realizzazione di un'indagine sistematica che permetta di fissare il valore degli indici di fluidità e di verificare la correlazione tra il contributo di ciascun legante e la fluidità risultante di una lega esattamente definita dalla sua composizione.

CONCLUSIONI

Il lavoro di ricerca, attualmente in corso, sulla definizione della fluidità di leghe di rame da getto ha portato a progettare e testare un nuovo modello che prevede:
- realizzazione di tre spirali per ogni singola colata ;
- controllo dei parametri: velocità di colata, volume (massa di lega);
- misurazione della temperatura di colata.

La lunghezza della spirale colata, tipicamente utilizzata come misura di fluidità, è stata sostituita con il calcolo della lunghezza equivalente, ottenuto da una semplice funzione che correla il peso della spirale con il suo volume attraverso la densità della lega stessa.
Si rende così possibile ottenere un valore di lunghezza equivalente per ogni temperatura di colata e, verificatane la proporzionalità lineare, fissare il valore degli indici di fluidità, definiti per una determinata lega e, introdotti nelle relazioni come costanti di proporzionalità tra lunghezza equivalente e temperatura.
I passi successivi della ricerca saranno volti a valutare la costanza di tali indici nei seguenti casi:
- a parità di lega quanto incide il materiale dello stampo poiché diversa capacità di dissipazione del calore corrisponde a diversa comparsa del processo di solidicazione;
- a parità di stampo la dipendenza dalla composizione;
- l'eventuale azione sinergica di più elementi di lega una volta fissate le precedenti condizioni.

BIBLIOGRAFIA

1] www.fonderiametalleghe.it
2] A. Bonomi, A Riu - Il problema della contaminazione dell'acqua potabile con piombo e le soluzioni possibili - Atti dei Seminari di ECOMONDO 2004, Rimini 3-6 Novembre 2004, Vol. 2, pp. 103-113
3] D.V. Ragone, C.M. Adams, H.F. Taylor - Some factors affecting fluidity of metals - Institute for heat transfer and fluid mechanics, Los Angeles June 1955, May 1955- IP 116
4] K. Ravindran, R.W. Lewis - Finite Elements in Analysis and Design 31 (1998) 99-116
5] Qingyou Han ,Hanbing Xu - Scripta Materialia 53 (2005) 7–10
6] S. Ahuja, H. M. Domanus, R. C. Schmitt, L. Chuzhoy and J. V. Grabel - Solidification Modeling of a Spiral Casting to determine material fluidity – Argonne National Laboratory, Energy research (UC- 1400) February 1994
7] Analysis of fluidity of metals – J. E. Niesse – Thesis for the degree of Doctor of science at Massachussets Institute of technology – September 1958
8] M. Di Sabatino, L. Arnberg , S. Rørvik , A. Prestmo - Materials Science and Engineering A 413–414 (2005) 272–276
9] P. Beeley, Foundry Technology, Chapter 1 pg.15-23 – Butterworth-Heinemann 2001 ISBN 07506455679
10] Young-Dong Kwon , Zin-Hyoung Lee - Materials Scien-

ce and Engineering A360 (2003) 372-376
11] K.R. Ravi , R.M. Pillai , K.R. Amaranathan , B.C. Pai , M. Chakraborty - Journal of Alloys and Compounds 456 (2008) 201–210
12] Qin Hua, Deming Gao, Hongjun Zhang , Yuhui Zhang , Qijie Zhai - Materials Science and Engineering A 444 (2007) 69–74
13] J. Bayley, D. Crossley, M. Ponting, Metals and Metalworking a research framework for archaeometallurgy, The Historical Metallurgy Society, Occasional Pubblication n°6-2008 ISBN 9780956022509
14] Wang Qudong , Lu Yizhen, Zeng Xiaoqin, Ding Wenjiang, Zhu Yanping, Li Qinghua, Lan Jie - Materials Science and Engineering A271 (1999) 109–115
15] M. Di Sabatino, F. Syvertsen, L. Arnberg, A. Nordmark – International journal of Cast Metal Research, 18 (1) (2005) 59-62

ABSTRACT

STUDY OF THE FLUIDITY OF COPPER-BASE ALLOYS

Keywords: copper-base alloys, solidification, foundry, physical metallurgy, materials properties

Copper alloys are often used to produce castings or semi-finished products with several compositions, from classic tin bronzes to the most advanced copper- magnesium alloy for special uses. The reason for this choice is that copper alloys, have the huge advantage of being able to be used immediately after casting, especially in cases where are required: resistance to tensile and/or compression strength, contact wear resistance, cold workability, thermal and/or electrical conductibility, appearance and corrosion resistance. Table (1) reports some examples [1] of copper alloys and the relatives applications. This work wants to answer to the need of the foundries, to develop a reliable evaluation system, which can aspire to become a standard, commonly used to measure a basic parameter as the alloys fluidity and contribute to the study of the influence of production factors (melt temperature, mold temperature, casting speed) and chemical factors such as the presence of alloying elements at macro or micro (<1%) concentrations. The latter possibility can not be neglected when lead is the alloying element because it is historically very important for copper and its alloys, but currently much discussed relating to public health and environmental impact; America has promulgated the USA-Canada standard ANSI/ NSF61 [2] legislation and Europe the December 2003 (DWD98/93 EC) directive [2], so it is necessary to limit and, where possible, eliminate lead in all the copper alloys normally used for the production of devices intended for contact with drinking water (eg, taps, valves, fittings) in addition, the allowed limit of lead in drinking water will decrease from the actual 0,025 mg/l to 0,01 mg/l (value set by the World Health Organization) starting from December 2013. A research which will help to understand the influence of each alloying element alone or combined with others elements is the first step towards the formulation of innovative casting alloys, not only solving the problem of lead, but also improving the general alloy characteristics maintaining the same production technology. Other

terms, including "castability" have been used to describe the behavior of a liquid metal, but "fluidity" [3-8] is the most used one by the international scientific community. An inadequate fluidity may lead to low casting depth or prevent the reproduction of surface detail. According to the foundrymen, the fluidity can be defined as "the empirical measure of the distance that a liquid metal can run in a mold of an appropriate form prior to the solidification process." Figure 1 [9] shows the typical spiral test for the evaluation of alloys fluidity, currently in the United States this test is the standard to evaluate cast iron and ferrous alloys fluidity, while sand casting is the most utilized technique when the test becomes a foundry trial [3, 8, 10]. The model shape was developed from the existing spiral [3, 5, 7, 8, 12], it has a trapezoidal section and it was arranged by adding a hemispherical zone in order to avoid turbulence or other uncontrollable variables in the first phase of the casting. Cu90-Sn10 (wt%) was choice as standard alloy because it is widely used in foundry processes since antiquity [13]. Figure 2 shows a three-dimensional model and a spiral ensue from a casting test. The checked variables during process are:

- Mass: the amount of the alloy is set to 5 Kg;
- Temperature: it is checked by an immersion thermocouple directly into the ladle;
- Casting speed: it is constant because its value is simply connected to the height of the melt starting position which correspond to the height of the ladle bottom (Bernoulli Theorem)

A further and very important arrangement to the initial design was the decision to move from a single spiral model to a triple spiral model (Figure 4). The model is based on similar multiple tests with the same or with different geometries used by other authors [8, 14] able to provide, in some cases, information about the molten metal attitude to fill thin circular or otherwise sections, with more or less complex shape [15]. Figure 5 shows the venting channels located at the end of each spiral that, in the case of high fluidity alloys, when the spiral is completely filled act as model "extension". Previous studies reported in the literature [8] proposed a linear relationship between fluidity (L cm) and the casting temperature (Tc ° C) of the type:

$$L = aT_c + b \qquad (1)$$

Where a and b are proportionality parameters defined as "fluidity index", which have dimensions
a = cm/°C and b = cm and which are characteristic for a given alloy composition. To evaluate the test results, the total cast spiral mass was considered because this corresponds to the whole amount of material producing the as cast component. It was introduced the "equivalent length" Leq which corresponds to "the length of the spiral if the molten metal run occupying the whole mold cross section in a uniform manner" and it is so calculated:

$$\left.\begin{array}{l} P(g) / V(cm^3) = d\,(g/cm^3) \\ V(cm^3) = L_{eq}\,(cm)\,A(cm^2) \end{array}\right\} \rightarrow \quad L_{eq}\,(cm) = \frac{P\,(g) / d\,(g/cm^3)}{A\,(cm^2)}$$

Where: P = cast spiral mass (g)
V = alloy volume which has created the spiral (cm3)
d = measured alloy density (g/cm3)
A = trapezoidal cross section area (cm2)
Leq = equivalent length (cm)

So:

$$L_{eq} = a_{alloy}\,T_c + b_{alloy} \quad \text{and} \quad a_{el} = f(\%\ \text{elemento}),\ b_{el} = f(\%\ \text{elemento})$$

$$A_{alloy} = f(\ a^0,\ a^{el\,1},\ a^{el\,2} \ldots\ a^{el\,n}) \rightarrow \begin{cases} L_{eqCu} = a^0\,T_c + b^0 \\ L_{eqlega} = a_{lega}\,T_c + b_{lega} \end{cases}$$

The next steps of this study will be aimed at assessing the constancy of the "fluidity index" in the following cases:

- same alloy/different mold material : because differences in the heat dissipation ability correspond to different solidification way;
- same mold/different alloy composition;
- possible synergic action of several alloying elements once set the above conditions.