

Gestione delle conchiglie nella colata in gravità e possibili vie per migliorarne prestazioni e durata

S. Lombardo, E. Fracchia, F.S. Gobber, M. Rosso

La colata in gravità è una tecnologia di largo impiego nelle fonderie di alluminio: seppur ben nota è ancora attuale. Nonostante molte ricerche negli ultimi anni si siano focalizzate sullo studio di processi ad elevata produttività come la pressocolata, vi è ancora una larga serie di prodotti che viene ottenuta tramite colata in gravità, grazie a cui è possibile ottenere getti con difettosità ridotta e proprietà meccaniche superiori.

Nonostante la colata in gravità sia una tecnologia che non è possibile definire innovativa, l'evoluzione subita dai componenti in termini di geometria, dimensioni e volumi, ha imposto un aumento della produttività a fronte di una riduzione delle tolleranze accettabili. Questi cambiamenti hanno inficiato sulla vita delle conchiglie in acciaio, utensili che si usurano sempre più facilmente.

Per ottimizzare il processo produttivo è necessario introdurre su questa tecnologia già conosciuta degli elementi innovativi. In questo studio è presentato lo stato dell'arte dei metodi per aumentare la vita delle conchiglie nella colata in gravità con particolare attenzione all'effetto della rugosità superficiale della conchiglia e del metodo di verniciatura sulla resistenza ad usura ed alla metallizzazione dell'acciaio. L'alluminio fuso infatti, durante il processo di colata, interagisce con l'acciaio di cui è costituita la conchiglia, producendo usura da erosione e metallizzazione delle superfici con cui entra in contatto.

Per limitare il danneggiamento della conchiglia si utilizzano comunemente delle vernici, al fine di creare una barriera tra i due materiali. Tuttavia il processo di verniciatura spesso viene effettuato basandosi su principi qualitativi e troppo spesso semi-quantitativi. Questo studio vuole investigare in modo più approfondito le fasi da seguire per l'ottenimento di una verniciatura ottimale, andando a utilizzare differenti vernici commerciali e valutandone la loro resistenza sia dal punto di vista sia della finitura superficiale della conchiglia che della resistenza alle alte temperature, simulando le condizioni d'uso reali della conchiglia, attraverso prove di usura e prove di immersione in alluminio fuso.

INTRODUZIONE

La fonderia di alluminio nel corso degli anni si è evoluta notevolmente, raggiungendo traguardi di qualità e prestazioni impensabili fino a poco tempo addietro: infatti il settore fondario per il comparto non ferroso in Italia è in continua evoluzione, con un incremento della produzione attestato al 7% rispetto al 2016, secondo i dati esposti nel corso della 70esima Assemblea Generale Assofond [1]. In particolare, nel panorama dei processi di colata in conchiglia permanente, nonostante la pressocolata ad alta pressione (HPDC) si sia imposta notevolmente a causa della elevata produttività, rimane attuale la tecnologia della colata per gravità in conchiglia [2]. Grazie alle prestazioni meccaniche superiori che i getti colati in conchiglia possono raggiungere rispetto a quelli pressocolati, questa tecnologia continua ad occupare una buona parte del mercato di getti non ferrosi (il 24 % secondo [3]), Tuttavia, nonostante il notevole valore aggiunto che si può ottenere in un getto colato in gravità in conchiglia (difettosità contenuta, resistenza meccanica elevata) le aziende sembrano maggiormente focalizzate sullo sviluppo della HPDC, tralasciando a volte alcuni aspetti di questa tecnologia.

Il mercato globale, trainato soprattutto dal settore automotive, ha portato allo sviluppo di componenti dalle geometrie sempre

più complesse aventi tolleranze e richieste di qualità estetiche più rigide; i volumi di produzione aumentano e i campi di applicazione sono decisamente più ampi [4]. A fronte di questa evoluzione, una delle problematiche principali riscontrate oggi in fonderia è la durata della vita delle conchiglie. L'utensile deve essere adeguatamente isolato per garantire una termica del getto ottimale [5] in modo da ridurre la difettosità di quest'ultimo, inoltre dev'essere protetto dall'aggressione dovuta all'interazione con l'alluminio fuso: termica e protezione della conchiglia possono essere massimizzate mediante un'adeguata ricopertura delle superfici della stessa con apposite vernici. Nel caso di verniciatura inefficace si corre il rischio di

S. Lombardo

F.O.M.T. S.p.A., Grugliasco (TO)

E. Fracchia, F.S. Gobber, M. Rosso

Politecnico di Torino – DISAT

produrre uno scarto di produzione elevato, rendendo necessari interventi manutentivi durante la produzione che aumentano tempi e costi di processo.

In questo studio sono state studiate le interazioni tra substrati metallici in acciaio 39NiCrMo3 e due vernici isolanti per colata in gravità di leghe in alluminio. Tali interazioni saranno legate alle proprietà intrinseche delle vernici nonché alle buone norme di processo da adottarsi in fase di verniciatura, ormai facenti parte del background culturale legato alla tecnologia di colata in gravità.

Usura delle conchiglie e protezione

Le principali problematiche che si possono riscontrare nell'interazione tra la conchiglia in acciaio e la lega fusa sono l'erosione dell'utensile (che si danneggia generando sottosquadri) e l'adesione del getto alla conchiglia stessa (che rende impossibile l'estrazione del componente dalla forma) [5]–[14]. Inoltre, se non è presente una barriera termica tra il fuso e la conchiglia, lo scambio termico non sarà ottimizzato. In questa situazione si verificheranno quasi certamente scorrette solidificazioni dei getti con conseguenti mancati riempimenti delle zone critiche delle figure. L'utilizzo di un rivestimento refrattario può risolvere questi problemi. In particolare, a questo scopo i classici rivestimenti a base di nitruri e carburi sono tutt'ora molto studiati dal mondo scientifico [7], [15]–[18], ma per quanto concerne invece il mercato delle vernici la letteratura risulta piuttosto scarna [19], [20]. Le vernici possono essere di vario tipo, a seconda delle applicazioni di interesse, ed oltre all'azione protettiva nei confronti della conchiglia con conseguente aumento della sua vita operativa, influenzano positivamente la qualità superficiale del prodotto finale e facilitano l'estrazione dei getti a fine ciclo. Tuttavia l'esecuzione di una verniciatura ottimale è ancora molto legata alla capacità pratica dell'operatore: è pertanto necessario caratterizzare la vernice in modo più approfondito, valutando i fattori al contorno coinvolti che possano influenzarne il tempo di vita. In particolare, i fattori chiave alla base di una buona verniciatura risiedono nella rugosità di base della conchiglia, nella temperatura a cui si trova la conchiglia in fase di verniciatura ed infine nella tipologia di prodotto impiegato.

La rugosità superficiale della conchiglia influenza sia la bagnabilità della vernice che il flusso del metallo liquido sulla conchiglia durante la fase di riempimento. Un'elevata rugosità produce un ridotto scambio di calore tra alluminio e acciaio, ma una maggiore fluidità e scorrevolezza della lega fusa. Questo parametro tuttavia se eccessivamente alto va ad inficiare la finitura superficiale del getto, pertanto è necessario trovare un giusto compromesso tra l'isolamento termico e l'omogeneità della finitura del getto finale.

Il secondo parametro chiave è la temperatura utilizzata durante la fase di verniciatura e di preriscaldamento della conchiglia. La giusta temperatura permette l'aggrappaggio ottimale della vernice: temperature basse causano il trattenimento di una quantità eccessiva di umidità nella vernice, con successivo distacco durante colata a causa dall'evaporazione improvvisa dell'acqua; al

contrario, temperature troppo alte portano a un'evaporazione istantanea dell'acqua che non permette alle particelle di vernice di formare uno strato compatto. Anche durante il preriscaldamento della conchiglia si deve rimanere entro determinati range di temperatura per evitare problemi simili.

Infine la tipologia di prodotto usato è determinante per aumentare il tempo vita della vernice, che dipende sia dalla miscela refrattaria (strato più esterno) che dall'agente legante (strato aggrappante), che devono resistere a sbalzi termici ed a temperature elevate.

Le modalità di verniciatura seguono gli stessi principi di base al variare della tipologia di vernice, tuttavia diversi parametri possono variare a seconda della tipologia di conchiglia da verniciare ed in base alla personale esperienza dell'operatore. Si può pertanto intuire che ogni conchiglia non sarà verniciata in modo esattamente identico alla precedente, nonostante si utilizzi sempre la stessa procedura di base, ovvero:

1. Sabbatura della conchiglia,
2. Temperatura della conchiglia durante verniciatura (180-220°C),
3. Diluizione della vernice con acqua distillata,
4. Riscaldamento e spruzzatura della vernice aggrappante seguita da riscaldamento e posa della vernice refrattaria seguita ancora da riscaldamento e pulizia delle zone di accoppiamento della conchiglia.

Tali modalità di preparazione sono state utilizzate anche per la produzione dei campioni per i test di usura effettuati in laboratorio.

Materiali e metodi

La caratterizzazione dei substrati è stata eseguita impiegando due vernici commerciali isolanti (di seguito chiamate vernice 1 e vernice 2) applicate su dischetti in acciaio 39NiCrMo3 aventi dimensioni 100 mm di diametro 4 mm di spessore e dotati di un foro centrale di diametro 10 mm necessario per il serraggio dei campioni durante le prove di usura abrasiva.

Il rivestimento vede la presenza di due differenti strati, ovvero un aggrappante (vernice di fondo o di base, di colore rosso) ed il rivestimento isolante (vernice di colore bianco). Per quanto concerne le composizioni, la vernice 1 è a base acido silicico, sale di sodio, ossido di alluminio e mica, mentre la vernice 2 è a base acido silicico e sale di sodio.

In totale sono stati realizzati 4 campioni per ogni tipologia di vernice, di cui 3 campioni destinati ad i test di usura, ed 1 campione destinato alle prove di immersione in bagno di alluminio fuso, impiegando la lega EN AC 46400, anche nota come Al-Si9Cu1.

Particolare attenzione è stata posta alla rugosità del substrato. Infatti, come mostrato in [21], la rugosità della superficie da verniciare influenza notevolmente la tenuta della vernice. In particolare in questo lavoro è stato studiato l'effetto dell'impiego di tre differenti finiture superficiali sull'adesione e sulla resistenza ad usura abrasiva della vernice. La verniciatura è

Colata in gravità dell'alluminio

stata eseguita sulla superficie della conchiglia con tre diverse finiture: allo stato di fornitura (Ra 0.8 μm), dopo sabbiatura con sferette di vetro di granulometria 70-110 μm (Ra 0.8 μm) ed infine dopo sabbiatura con sferette di vetro di granulometria 425-850 μm (Ra 1.95 μm). In seguito a queste prove di usura la finitura ottenuta con sabbiatura con sferette di granulometria 425-850 μm era stata valutata come la più adatta ai fini della preparazione superficiale dei campioni, ed è quindi stata impiegata per questo lavoro.

Le valutazioni effettuate in questo studio si sono focalizzate su:

- Resistenza ad usura in accoppiamento con mole in lega di alluminio;
- Resistenza ad usura abrasiva in accoppiamento con mole ceramiche;
- L'interazione continuativa con alluminio fuso in seguito a diversi tipi di condizionamento delle vernici.

Le prove di usura si sono svolte con l'abrasimetro lineare Taber, secondo normativa ASTM D4060-10, impiegando sia una coppia di mole abrasive tipo H22 che delle mole di alluminio appositamente realizzate, in lega EN AC 46400, con parametri di prova: 500 o 1000 g di carico, 90 rpm di velocità di rotazione. Dopo 500 giri la prova è stata interrotta. Per ogni campione è stata monitorata l'evoluzione delle superfici prendendo a riferimento 4 tratti lungo la traccia di usura. Ogni 100 giri di prova sono state registrate la rugosità superficiale ed il profilo di usura impiegando il profilometro HOMMEL WERKE T1000, valutando un profilo massimo di 15 μm (il profilo abraso risulta inferiore a 15 μm) con lunghezza di cut off (ovvero lunghezza

del profilo misurato non conteggiata ai fini del calcolo della rugosità) di 2.5 mm. L'aspetto superficiale della vernice in seguito ai cicli di Taber test è stato documentato con immagini allo stereomicroscopio LEICA MS5. L'interazione delle vernici con l'alluminio fuso è stata simulata effettuando prove di immersione in bagno di lega di alluminio (EN AC 46400) su campioni verniciati tal quali e su campioni verniciati e precedentemente condizionati a 250°C per 2 e 4 ore. In seguito all'immersione nel bagno, della durata di 1h, è stata eseguita una valutazione qualitativa dello stato superficiale del campione. L'analisi microscopica dei campioni è stata condotta impiegando lo stereomicroscopio Leica MS5.

Analisi sperimentale della vernice Comportamento ad usura con Taber test

Le prove di usura effettuate con il Taber test hanno evidenziato una tendenza all'esposizione della vernice aggrappante, con abrasione della sola vernice isolante, per entrambe le vernici. In particolare, in Fig.1 è riportato il dettaglio di una porzione di campione abraso dopo 300 giri a 90 rpm con mole di alluminio, allo scopo di mostrare l'effetto dell'usura con esposizione dello strato di aggrappante. Nel dettaglio "b" in Fig.1 è mostrato inoltre un tipico difetto di tenuta che è stato riscontrato in alcune zone dei campioni: al contrario del caso nell'immagine "a", non si è avuto solo un assottigliamento del rivestimento ma anche una sua totale rimozione, a causa di una non perfetta adesione iniziale del rivestimento sull'acciaio.

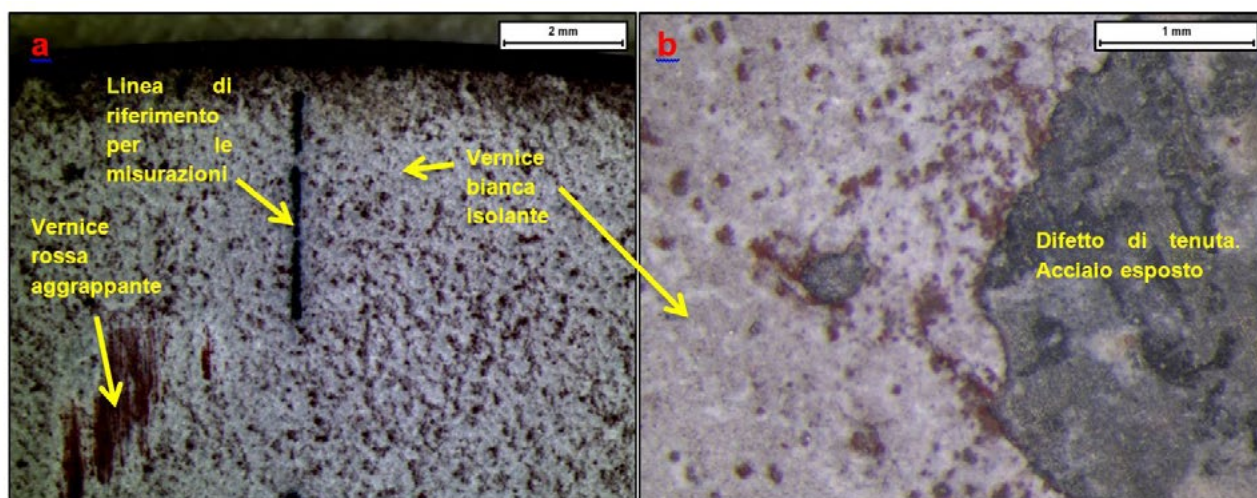


Fig. 1 – Immagini via stereomicroscopia ottica. a: Esempio di usura del substrato verniciato con conseguente esposizione della vernice aggrappante (ingrandimento 0.63x). b: dettaglio su un difetto di verniciatura.

Alluminum gravity casting

In Tab.1 sono riportate le condizioni iniziali (post-verniciatura) e finali (dopo 500 giri di Taber test) dei substrati verniciati per entrambe le tipologie di vernice a seconda della tipologia di mola impiegata.



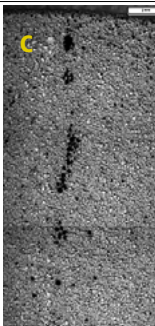

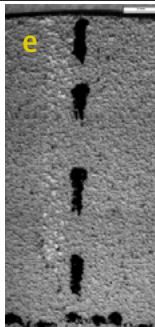

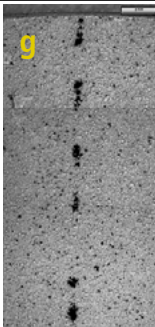
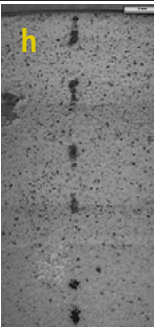
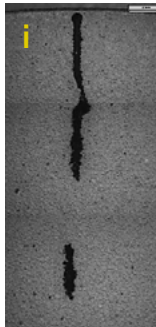
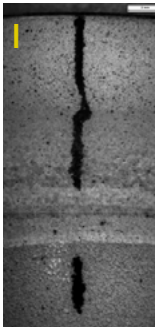
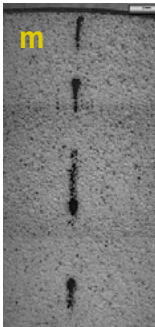
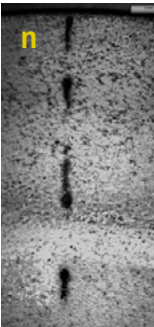
Dalla Tab.1, si nota come le mole H22 abbiano agito abrando in modo più evidente le superfici verniciate, esponendo lo strato di aggrappante (immagini a, c per le condizioni iniziali, b, d per le condizioni finali).

L'esposizione della vernice aggrappante è totale, nella zona usurata, in caso di impiego di mole H22 (Tab.1 b, d), mentre è parziale per l'impiego di mole in alluminio, a parità di condizioni di prova (Tab.1 e, g per le condizioni iniziali, f, h per le condizioni finali).

Allo scopo di valutare la possibilità di ottenere un'abrasione più incisiva con le mole di alluminio, si è scelto di aumentare

il carico applicato in fase di prova da 500 g a 1 kg. I risultati ottenuti, esposti nelle immagini i, l, m, n di Tab.1, mostrano che, nonostante il carico applicato sia raddoppiato, l'effetto visivo finale non comporta variazioni importanti rispetto al caso con carico ridotto. Per questa ragione si è resa necessaria una comparazione della rugosità superficiale per i vari campioni, mostrata in Fig.1. Valutando l'evoluzione della rugosità superficiale da 0 a 500 giri si osserva per entrambe le vernici che il maggior effetto di usura è provocato dalle mole H22, seguito dalle mole di alluminio a carico di 1 kg e dalle mole di alluminio a carico 500 g. Per la vernice 1 si ha una diminuzione totale della rugosità del 74.7% con mole di Al e carico di 1 kg, del 69.3% con mole di Al e carico 500 g e del 84.9% con mole H22 mentre per la vernice 2 i valori osservati sono 75.7%, 65.8% e 84.6%.

Tab. 1 – Immagini via stereomicroscopia ottica a 0.63x. Superfici prima e dopo l'usura con abrasimetro lineare Taber.

Tipologia di prova	Vernice 1		Vernice 2	
	Condizione iniziale	Condizione finale	Condizione iniziale	Condizione finale
Mole H22 carico: 500g durata prova: 500 giri velocità: 90 rpm				
Mole Alluminio EN AC 46400 carico: 500g durata prova: 500 giri velocità: 90 rpm				
Mole Alluminio EN AC 46400 carico: 1Kg durata prova: 500 giri velocità: 90 rpm				

Colata in gravità dell'alluminio

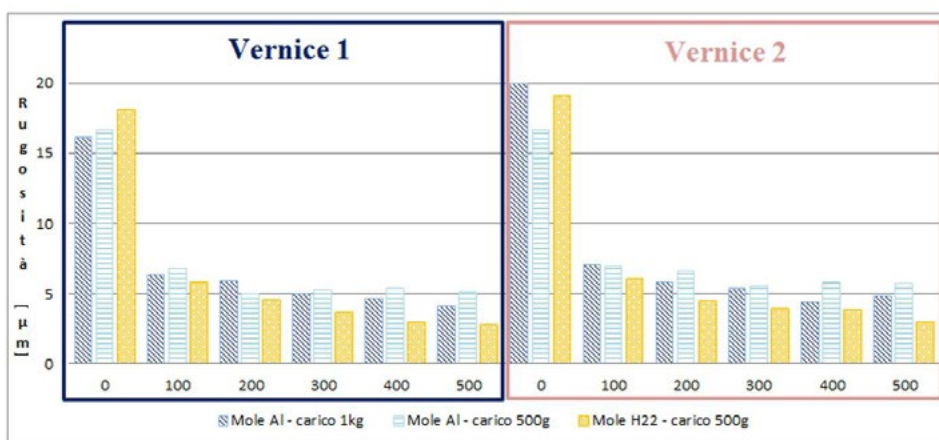


Fig. 2 – Evoluzione della rugosità superficiale per le due vernici nelle 3 configurazioni di prova effettuate.

Appare quindi evidente come con mole più abrasive (H22) o con carichi maggiori (mole in Al con 1 kg) il comportamento delle due vernici appaia del tutto simile tra loro, mentre si osserva una differenza, seppur lieve, con le mole di alluminio a basso carico. In questa circostanza la vernice 2 mostra maggiore resistenza all'usura, perdendo circa il 4% in meno di rugosità superficiale rispetto alla vernice 1. Appare altresì evidente che l'effetto di usura complessivo porta ad un livellamento delle vernici con una riduzione progressiva della rugosità, ovvero ad un'asportazione della vernice accoppiata ad un effetto di spalmamento della stessa sulla superficie.

Prove di immersione in bagno di alluminio

In Fig. 3 sono riportati i campioni di entrambe le vernici in seguito alla prova di immersione in Al fuso (bagno di lega EN AC 46400), secondo le condizioni di prova precedentemente illustrate. In particolare, si osserva che in seguito alla rimozione dell'alluminio fuso i campioni verniciati con la vernice 2 risultano più resistenti, sia per la prova con campione non condizionato che per i campioni condizionati in forno a 250°C. La vernice 2 risulta meno intaccata dall'alluminio fuso, e questa evidenza sperimentale è altresì evidenziata dal trend di evoluzione della rugosità. Se per la vernice 1 la rugosità aumenta in seguito alla permanenza nel bagno fuso, per la vernice 2 invece diminuisce, esattamente come osservato dalle prove Taber. Al contrario, per i campioni di vernice 1 si osserva un danneggiamento superficiale più esteso (vedi Fig. 3).

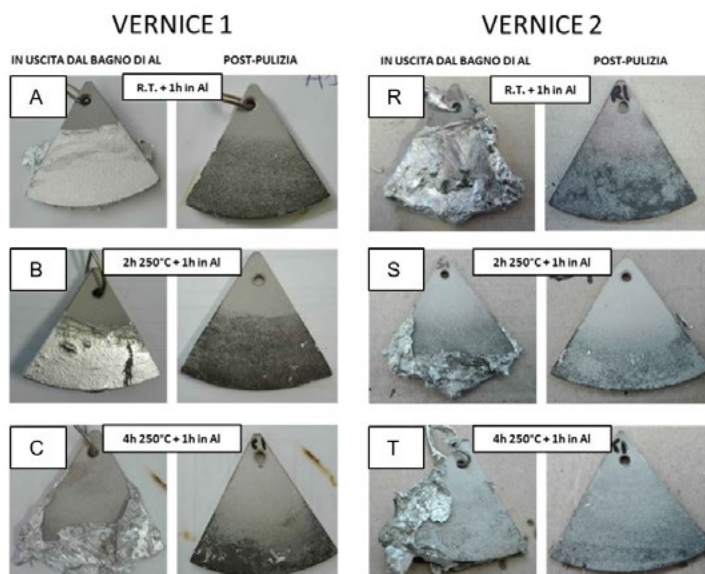


Fig. 3 – Campioni post immersione in bagno di alluminio fuso con e senza i residui di alluminio.

Tab. 2 – Variazione della rugosità superficiale dei campioni analizzati per entrambe le vernici, secondo le tre modalità di condizionamento applicate.

Tipologia di prova	Vernice 1		Vernice 2	
	Post-verniciatura	Post-immersione	Post-verniciatura	Post-immersione
A/R	10.33 μm	71.06 μm	12.91 μm	11.25 μm
B/S	9.59 μm	89.84 μm	9.58 μm	8.44 μm
C/T	8.34 μm	71.3 μm	9.61 μm	9.12 μm

In Tab.2 sono riportate le variazioni di rugosità per i campioni verniciati con le due vernici, in seguito alle prove di immersione. Lo stato di rugosità post-immersione è riferito ai campioni precedentemente assoggettati a trattamento di condizionamento ed in seguito ad immersione (come in Fig.3). Dalle misure riportate in Tab.2 si evince come la rugosità per la vernice 1 abbia una forte tendenza all'aumentare mentre per la vernice 2 essa tende a diminuire in modo graduale.

Conclusioni

Con l'obiettivo di analizzare le performance di due vernici per stampi per colata in gravità di alluminio, si sono effettuate delle prove per valutarne la resistenza all'usura e la resistenza al contatto con lega di alluminio fusa, simulando delle condizioni di servizio. In particolare, i campioni testati ad usura sono stati sottoposti a cicli di Taber test, impiegando mole di alluminio e mole H22. Per questi campioni si è osservata la tendenza

ad una diminuzione della rugosità superficiale, conseguente ad un'azione di livellamento attuata dalle mole sulla superficie dei campioni testati. L'azione levigante delle mole ha condotto all'esposizione della vernice aggrappante, di fatto abradendo soltanto lo strato più superficiale di vernice isolante, per entrambe le vernici.

Le prove in immersione in bagno di alluminio hanno evidenziato invece due tendenze opposte per le due vernici: per i campioni verniciati con la vernice 1 infatti la rugosità superficiale aumenta in modo rilevante, mentre per la vernice 2 diminuisce, a parità di condizionamenti e permanenze in bagno di alluminio. Evidentemente vi è una maggiore interazione tra la lega di alluminio e la vernice 1, che si rivela meno resistente all'azione del fuso e viene intaccata ed asportata in modo marcato. Complessivamente, in termini di prestazioni, la vernice 2 appare più resistente, sia a livello di evoluzione della rugosità che a livello visivo (vedi Fig.3 e Tab.2).

REFERENCES

- [1] R. Guccione, 'Italian Foundries Focus on sustainability', A&L, vol. 4, pp. 30–35, 2018.
- [2] F. Robles-Hernandez, J. M. Herrera Ramirez, and R. Mackay, Al-Si Alloys. Springer International Publishing AG 2017, 2017.
- [3] M. Brancia, 'Report congiunturale: primo trimestre 2017 comparto ferrosi e non ferrosi', Ind. Fusoria, vol. 3, p. 10, 2017.
- [4] D. Apelian, 'Looking beyond the last 50 years: The future of materials science and engineering', Jom, vol. 59, no. 2, pp. 65–73, 2007.
- [5] M. Muhič, J. Tušek, F. Kosel, D. Klobčar, and M. Pleterski, 'Thermal Fatigue Cracking of Die-Casting Dies', Metalurgija, vol. 49, no. 1, pp. 9–12, 2010.
- [6] A. Mohammed, M. B. Marshall, and R. Lewis, 'Development of a method for assessing erosive wear damage on dies used in aluminium casting', Wear, vol. 332–333, pp. 1215–1224, 2015.
- [7] P. Terek et al., 'Effects of die core treatments and surface finishes on the sticking and galling tendency of Al-Si alloy casting during ejection', Wear, vol. 356–357, pp. 122–134, 2016.

Colata in gravità dell'alluminio

- [8] Z. W. U. Chen and M. Z. Jahedi, 'Die erosion and its effect on soldering formation in high pressure die casting of aluminium alloys', *Mater. Des.*, vol. 20, no. 6, pp. 303–309, 1999.
- [9] F. S. Gobber, D. Ugues, A. Pisa, M. Pellizzari, and F. Derimina, 'Influenza della finitura superficiale sulla resistenza alla metallizzazione di un acciaio da stampi per pressocolata delle leghe di alluminio', in *36° Convegno Nazionale AIM*, 2016, pp. 18–21.
- [10] F. Gobber, A. Pisa, D. Ugues, S. Lombardo, E. Fracchia, and M. Rosso, 'Study of the Effect of Surface—Roughness of Dies and Tooling for HPDC on Soldering', in *Light Metals 2018*, 2018, pp. 977–981.
- [11] B. Kosec, 'Failures of dies for die-casting of aluminium alloys', *Metalurgija*, vol. 47, no. 1, pp. 51–55, 2008.
- [12] B. Kosec, L. Kosec, and J. Kopac, 'Analysis of casting die failures', *Eng. Fail. Anal.*, vol. 8, pp. 1–5, 2001.
- [13] S. Mascetti, R. Pirovano, and G. Timelli, 'Molten Metal/die interaction: die soldering', in *La Metallurgia Italiana*, 2018, no. 37° Convegno Nazionale AIM.
- [14] M. Rosso, I. Peter, F. Gobber, and A. Montedoro, 'Correlazione tra la finitura superficiale e il meccanismo di danneggiamento per acciai da stampo', in *35° Convegno Nazionale AIM*, 2014, p. 10.
- [15] J. R. Laguna-Camacho, L. A. Cruz-Mendoza, J. C. Anzelmetti-Zaragoza, A. Marquina-Chávez, M. Vite-Torres, and J. Martínez-Trinidad, 'Solid particle erosion on coatings employed to protect die casting molds', *Prog. Org. Coatings*, vol. 74, no. 4, pp. 750–757, 2012.
- [16] J. M. Paiva et al., 'Tribological and wear performance of nanocomposite PVD hard coatings deposited on aluminum die casting tool', *Materials*, vol. 11, no. 3, 2018.
- [17] C. Mitterer, F. Holler, F. Üstel, and D. Heim, 'Application of hard coatings in aluminium die casting - soldering, erosion and thermal fatigue behaviour', *Surf. Coatings Technol.*, vol. 125, no. 1–3, pp. 233–239, 2000.
- [18] A. Hamasaiid et al., 'Effect of mold coating materials and thickness on heat transfer in permanent mold casting of aluminum alloys', *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 6, pp. 1303–1316, 2007.
- [19] U. C. Nwaogu and N. S. Tiedje, 'Foundry Coating Technology: A Review', *Mater. Sci. Appl.*, vol. 02, no. 08, pp. 1143–1160, 2011.
- [20] K. Bobzin, T. Brögelmann, U. Hartmann, and N. C. Kruppe, 'Analysis of CrN/AlN/Al₂O₃ and two industrially used coatings deposited on die casting cores after application in an aluminum die casting machine', *Surf. Coatings Technol.*, vol. 308, pp. 374–382, 2016.
- [21] E. Fracchia, S. Lombardo, F. Gobber, and M. Rosso, 'Paint characterization to improve the mould durability in the aluminum gravity casting technology', in *Aluminum 2000*, 2018, p. 8.