

# Effetto dell'aggiunta di Cr e Ni sulla microstruttura e la resistenza a usura della lega riciclata $AlSi9Cu3(Fe)$

E. Fracchia, M. Actis Grande

Recentemente, nei vari scenari della produzione dei componenti per mezzo di colata, si è iniziato a valutare l'utilizzo di leghe provenienti da prodotti a fine vita e comunemente destinati allo smaltimento, senza che essi siano ulteriormente processati. Questo metodo di produzione può coinvolgere quindi la rifusione di parti di scarto anche per più di una volta. Tuttavia, la possibilità di formazione di fasi intermetalliche deleterie o grossolane dovute alla rifusione può essere un disincentivo. In questo lavoro, si è considerato l'effetto dell'aggiunta di Cr e/o Ni alla lega  $AlSi9Cu3(Fe)$  proveniente da scarti di fonderia, realizzando 6 tipologie di lega, contenenti lo 0,5 wt% o l'1% di cromo; contenenti lo 0,5 wt% o l'1% di nichel e infine contenenti lo 0,5 wt% di Ni e 0,5% di Cr oppure l'1wt% di Ni e l'1% di Cr. Queste leghe sono state valutate dal punto di vista microstrutturale e della resistenza a usura. Tali misure hanno evidenziato un maggiore incremento della durezza dell'eutettico se vi è aggiunta di nichel in lega; tuttavia, ciò risulta accompagnato da una minore resistenza all'usura.

**PAROLE CHIAVE:**  $AlSi9Cu3(Fe)$ , MICROSTRUTTURE, PIN-ON-DISK, CROMO, NICHEL;

## INTRODUZIONE

Le leghe di alluminio da diversi anni rappresentano uno dei materiali maggiormente impiegati per la produzione di componenti per il settore dell'autoveicolo, specialmente per la produzione di parti *powertrain* [1]. L'interesse per tali leghe è dovuto alle buone proprietà meccaniche specifiche raggiungibili, nonché alla loro totale riciclabilità. Tale riciclabilità permette di riutilizzarne gli scarti di produzione, ovvero i getti difettosi, nella loro totalità, con reinserimento nel ciclo produttivo, ma apre anche alla possibilità di riciclare getti a fine vita [2-4].

Dal punto di vista della produzione di componenti *powertrain*, essi sono tipicamente realizzati tramite colata, tipicamente con colata in gravità, in alta o in bassa pressione. La colata in alta pressione (High Pressure Die Casting, HPDC) è una delle tecnologie produttive maggiormente usate, grazie agli ottimi risultati raggiungibili dai getti in termini di performance meccaniche, riduzione dei difetti e tempi di produzione notevolmente minori per la produzione su larga scala rispetto ad altre tecnologie produttive [5]. Inoltre, la possibilità di produrre getti a parete molto sottile permette una ulteriore riduzione del peso complessivo dei getti.

**Elisa Fracchia**

Università degli studi di Genova, Genova

**Marco Actis Grande**

Dipartimento Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT),  
Politecnico di Torino, Torino

Tipicamente, per le colate in pressione di getti per automotive si utilizza la lega EN AC 46000 (AlSi9Cu3(Fe)) [6]. Questa lega trova vasta applicazione grazie all'elevato tenore di Si che le conferisce ottima colabilità ed elevato tenore di Cu che ne aumenta le caratteristiche meccaniche in condizioni as-cast, grazie alla presenza delle fasi intermetalliche tipo  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu e la fase Q- Al<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub> [7]. In particolare, la riciclabilità delle leghe di alluminio assume particolare interesse nel caso di una lega come la AlSi9Cu3(Fe), considerato il suo vasto impiego. Alcuni studi e progetti europei, infatti, si stanno recentemente concentrando sull'utilizzo della lega riciclata e proveniente da scarti di produzione o prodotti a fine vita, senza l'aggiunta di lega proveniente da lingotti, per ridurre l'impatto energetico del processo [8]. Questi studi hanno evidenziato ottimi risultati in termini di proprietà dei getti ottenuti, a patto che il numero di rifusioni della lega di scarto non siano eccessivamente elevate, pena l'ingrossamento delle fasi intermetalliche del Fe e l'ingrossamento del Si eutettico, con notevoli effetti infragilenti [9]. In letteratura, sono oggetto di studio anche le alligazioni con elementi di transizione quali Mn, Cr o Ni [10,11]. L'aggiunta

di tali elementi va a modificare la composizione chimica delle fasi intermetalliche nucleate, nonché modifica più o meno profondamente il comportamento del materiale a determinate sollecitazioni o condizioni ambientali. In questo lavoro, visto l'interesse per l'utilizzo di leghe provenienti da scarti, delle porzioni di getti di scarto provenienti da scarti di fonderia (comunemente definiti come *new scraps*, ovvero 'scarti nuovi') sono stati rifusi e alligati con Cr, Ni o una combinazione dei due elementi, al fine di valutare la resistenza a usura delle leghe ottenute. I campioni così colati (tramite colata in gravità in scala di laboratorio) sono stati testati tramite prove al pin-on-disk.

### MATERIALI E METODI

La lega AlSi9Cu3(Fe), proveniente da scarti di fonderia, è stata ri-processata tramite colata in gravità, eseguendo la fusione della stessa in un forno elettrico a crogiolo, additivando la lega con quantità variabili di Cr e/o Ni. La composizione del materiale come pervenuto è riportata in tabella 1.

**Tab. 1** - Composizione chimica della lega come pervenuta / *Chemical composition of the alloy as delivered.*

Composizione chimica - AlSi9Cu3(Fe)								
Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Zn	Al
w.t.%	10.10	1.10	3.21	0.27	0.04	0.33	1.15	Balance

In totale sono stati colati sei (6) campioni, identificabili rispettivamente come: Alloy #1 (0.5 wt% Cr e 0.5 wt% Ni); Alloy #2 (wt% Cr e 1 wt% Ni); Alloy #3 (0.5 wt% Cr); Alloy #4 (1 wt% Cr); Alloy #5 (1 wt% Ni); Alloy #6 (0.5 wt% Ni). I campioni, successivamente alla colata, sono stati sezionati rivelando la presenza di microporosità diffusa, che appare uniforme in tutte le composizioni chimiche colate.

I getti colati sono stati sezionati al fine di ricavarne dei dischi diametro Ø 25 mm per 10 mm di spessore, su cui eseguire le prove di usura pin-on-disk (standard ASTM G 99). I parametri di prova sono riportati in tabella 2. Per ogni composizione sono state eseguite due prove.

**Tab. 2** - Parametri di prova pin-on-disk / *Working parameters pin-on-disk.*

Pin-on-disk					
Velocità (rpm)	Carico (N)	Distanza complessiva di strisciamento (m)	Diametro di lavoro campione (mm)	Materiale pin	Diametro pin (mm)
60	5	100	16	WC	3

In seguito alle prove di usura, si calcola il *wear rate*, in funzione del coefficiente di usura ottenuto dalle prove e in

funzione della densità del campione e del peso del campione, utilizzando la formula (1).

$$\text{Tasso di usura} \left( \frac{\text{mm}^3}{\text{m} \cdot \text{N}} \right) = \frac{\text{peso perso (g)}}{\text{densità} \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \cdot \text{carico (N)} \cdot \text{distanza (m)}} \quad (1)$$

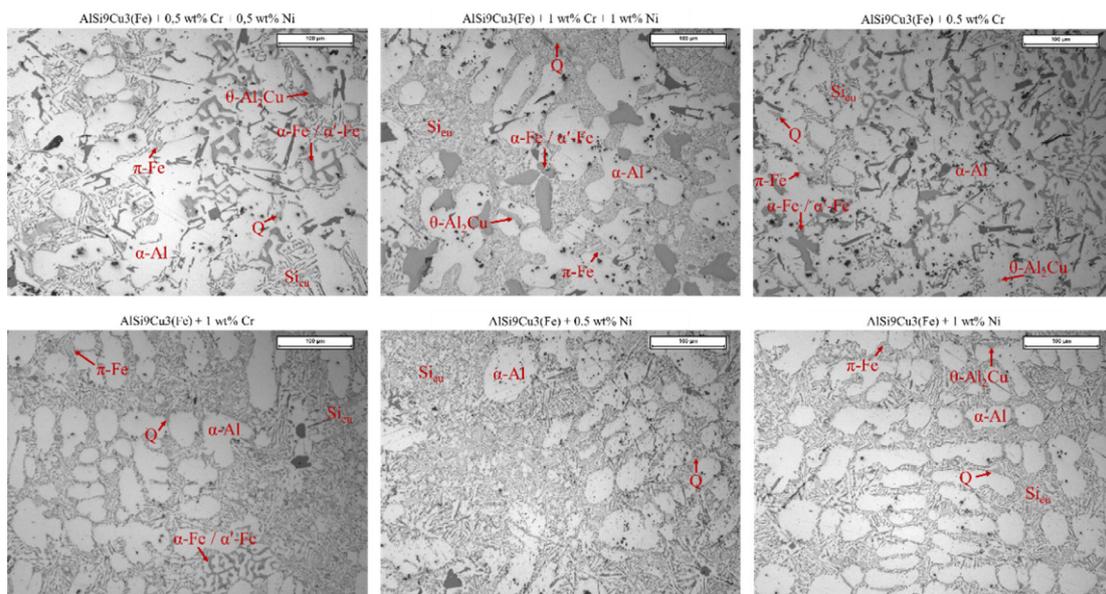
Un disco per ciascuna composizione chimica è stato utilizzato per effettuare osservazioni microstrutturali. I campioni sono stati lucidati con carta abrasiva SiC e successivamente lappati con silice colloidale (0.04  $\mu\text{m}$ ) per ottenere una superficie lucidata a specchio. Le osservazioni microstrutturali sono state eseguite tramite microscopia ottica, al fine di identificare le fasi intermetalliche presenti. Sui campioni lucidati sono state effettuate misure di microdurezza, effettuando 5 misure sull'eutettico e 5 misure su  $\alpha$ -alluminio, impiegando come parametri: 50 gf, 15 s. Inoltre, le misure di microdurezza sull'eutettico sono state effettuate principalmente sul Si eutettico, coinvolgendo al più solo fasi intermetalliche molto fini o non discernibili in microscopia ottica per bassi ingrandimenti, mentre le fasi intermetalliche  $\alpha$ -Fe, grossolane, non sono state indentate, per non fornire indicazioni falsate in merito alla durezza media dell'eutettico.

**RISULTATI**

**Microstrutture**

La microstruttura delle leghe è mostrata in figura 1. Alcune fasi possono essere facilmente osservabili tramite microscopia ottica, come riportato in figura 1, mentre altre possono essere evidenziate solo tramite microscopia elettronica.

L'aggiunta di Cr dà luogo alla formazione della fase intermetallica Al(Fe,Mn,Cr)Si, mentre in seguito all'aggiunta di Ni avviene la nucleazione di Al-Cu-Ni. Altre fasi intermetalliche normalmente presenti nella lega sono: Q-Al<sub>3</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>,  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>, Al<sub>15</sub>(Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu e  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si. La fase Al<sub>15</sub>(Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> si osserva nelle leghe con aggiunta di solo Ni; al contrario, l'aggiunta di Cr porta alla nucleazione della fase Al<sub>15</sub>(Fe, Mn, Cr)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, la cui forma varia in funzione del tenore di Cr aggiunto. La nucleazione delle fasi Al-Cu-Ni è attesa nelle leghe con aggiunta di Ni, ma tali fasi sono difficilmente discernibili tramite microscopia ottica. La fase Q-Al<sub>3</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>6</sub> si contraddistingue grazie alla colorazione grigio chiaro, simile a quella della fase  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu. Tale fase ha una conformazione poligonale. Spesso si è osservata la nucleazione di  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu nei pressi della fase Q. La fase  $\pi$ -Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>, invece, ha una conformazione di tipologia denominata scrittura cinese, e appare grigio chiaro in microscopia ottica. Infine, il silicio eutettico ha forma generalmente aciculare nelle leghe as-cast; tuttavia, la conformazione dell'eutettico può anche essere molto fine, in funzione della velocità di raffreddamento del getto e della posizione del punto di osservazione.



**Fig.1** - Microstrutture (microscopio ottico) e fasi intermetalliche. Marker: 100  $\mu\text{m}$  / *Microstructures (optical microscope) and intermetallic phases. Marker: 100  $\mu\text{m}$ .*

### Microdurezza

Le misure di microdurezza sono state eseguite sia sull'eutettico sia sulla matrice di  $\alpha$ -alluminio. Complessivamente, la matrice di  $\alpha$ -Al appare rafforzata in seguito all'aggiunta dell'1 wt% di cromo, mentre l'aggiunta di Ni porta all'ottenimento di elevate microdurezze nell'eutettico. Ciò è dovuto all'aumentata durezza della fase  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu a cui il Ni si lega [12]. Viceversa, il Cr addizionato si lega principalmente alla fase intermetallica  $\alpha$ -Fe senza apparentemente conferire alla fase una maggiore durezza alla fase [10,13]. La fase  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu, finemente dispersa, viene indentata conferendo valori di microdurezza medi maggiori. Al contrario, le fasi intermetalliche  $\alpha$ -Fe (con o senza presenza di Cr), sono caratterizzate da dimensioni maggiori (50 - 100  $\mu$ m di lunghezza) e non sono state indentate durante le misure di microdurezza dell'eutettico.

In figura 2 sono mostrati i risultati delle misure di microdurezza nei campioni, con distinzione dei risultati delle misure a seconda che esse siano state effettuate nell'eutettico o su  $\alpha$ -Al.

I numeri da 1 a 6 indicano le sei differenti composizioni chimiche oggetto di studio, come precedentemente indicato.

Le deviazioni standard nei valori di microdurezza dell'eutettico risultano elevate a causa della possibile indentazione di fasi intermetalliche molto fini, non facilmente discriminabili tramite sola microscopia ottica ( $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu).

### Pin-on-disk

Le prove di usura eseguite al pin-on-disk hanno evidenziato un comportamento differente nelle varie leghe.

I risultati in termini di coefficiente di usura COF e tasso di usura (*wear rate*) sono presentati in figura 3.

I campioni contenenti Cr appaiono caratterizzati da una maggiore resistenza a usura, mentre i campioni contenenti Ni hanno mostrato una resistenza a usura inferiore ai campioni contenenti solo Cr.

I campioni contenenti sia Cr che Ni sono caratterizzati da una resistenza a usura avente un valore medio tra le due condizioni viste in precedenza. Tale comportamento è presumibilmente associabile alla microdurezza media misurata nelle sei leghe (valor medio delle misure di microdurezza effettuate su eutettico e su fase  $\alpha$ -Al). In figura 4 sono presentati i dati inerenti alle relazioni tra COF, tasso di usura e microdurezza.

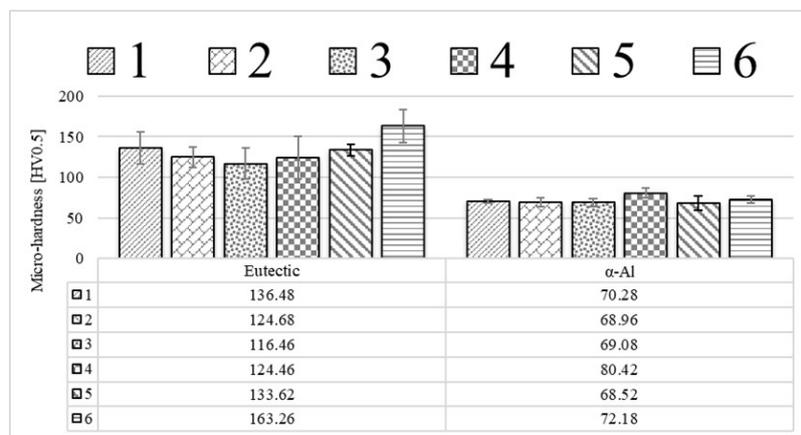


Fig.2 - Misure di microdurezza su eutettico e su  $\alpha$ -Al / *Microhardness measures on eutectic and on  $\alpha$ -Al.*

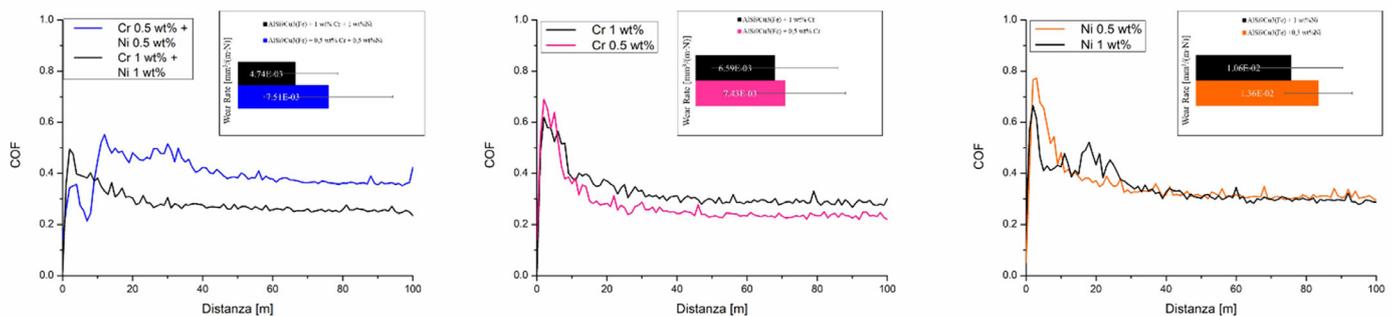
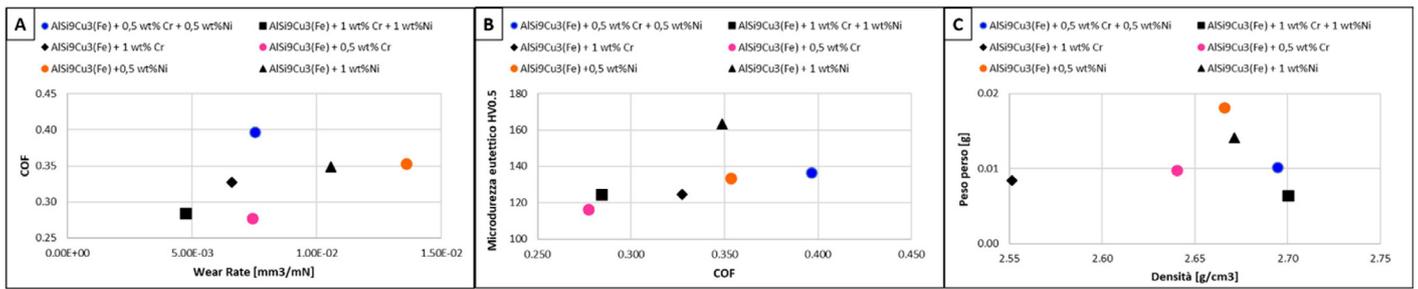


Fig.3 - Valori medi del COF e Tasso di usura / *Average values of COF and Wear Rate.*



**Fig.4** - A: Tasso di usura vs COF, B: COF vs microdurezza eutettico, C: densità vs peso perso / A: Wear rate vs COF, B: COF vs eutectic micro-hardness and C: specific weight vs lost weight.

In figura 4-A si osserva che i tassi di usura minori sono stati riscontrati per le leghe contenenti Cr, mentre il maggiore valore di tasso di usura è stato misurato per il campione contenente lo 0.5 wt% Ni.

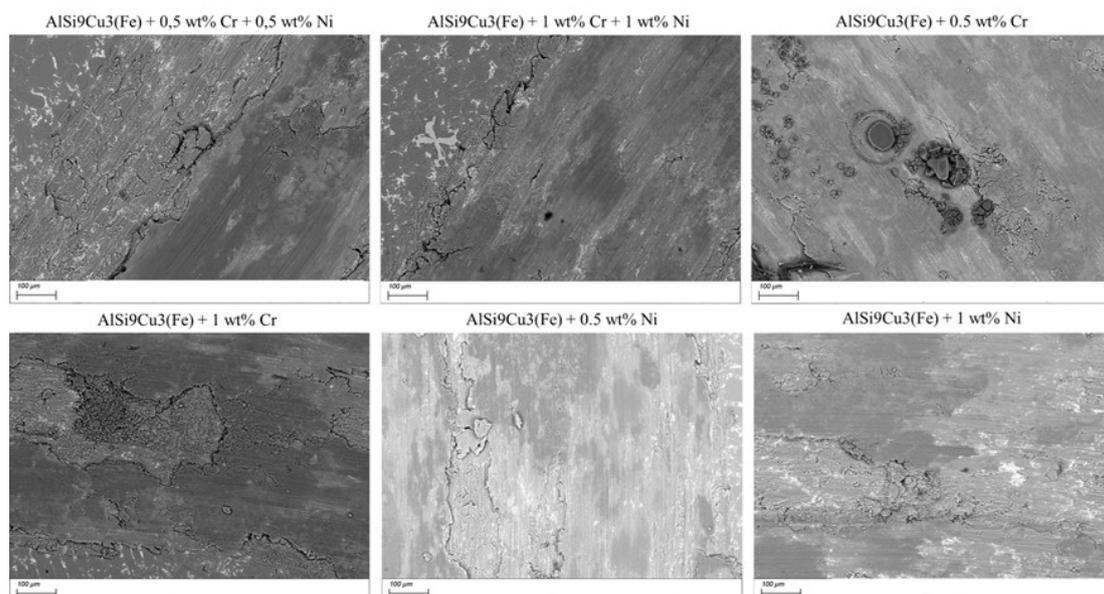
In figura 4-B è inoltre riportata la relazione tra microdurezza media dell'eutettico e il coefficiente di usura COF. L'aggiunta di solo Cr porta a una durezza media dell'eutettico di 116 HV0.5, che aumenta sensibilmente (circa 124 HV0.5) quando Cr raggiunge il tenore di 1 wt%. L'aumento di durezza è associato a un COF medio più elevato: da 0.28 a 0.33.

L'aggiunta di Ni porta all'ottenimento di valori di COF medio circa uguali nei due campioni (0.353 e 0.349), nonostante la durezza media dell'eutettico sia notevolmente differente nei due campioni: 133 HV0.5 (con 0.5 wt% Ni) e 163 HV0.5 (con 1 wt% Ni). Con l'aggiunta sia di Cr che di Ni, invece, si osserva un maggiore COF nella lega avente maggiore durezza.

Infine, la perdita di peso, che è associata al tasso di usura con un rapporto direttamente proporzionale (figura 4-C), evidenzia come non sia stata osservata una correlazione tra perdita di peso e densità, sottolineando come i campioni con porosità maggiormente diffuse, e quindi aventi minore densità, non sono stati maggiormente proni all'abrasione della superficie dovuta alla presenza di difetti (piccole porosità e ritiri dendritici).

La figura 5 mostra micrografie SEM delle superficie dei campioni post usura pin-on-disk. Nei campioni contenenti Cr sono chiaramente distinguibili le fasi intermetalliche  $\alpha$ -Fe, specialmente nel campione contenente sia 1 wt% di Cr che 1 wt% di Ni.

Sono evidenti fratture sulla superficie usurata, che appare disuniforme. A maggiori ingrandimenti, sono riscontrabili scanalature e solchi dovuti al processo di usura.



**Fig.5** - Immagini SEM. Superfici di usura post pin-on-disk / SEM images. Wear surfaces after pin-on-disk tests.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro, la lega AlSi9Cu3(Fe) proveniente da scarti di processo è stata rifiuta al fine da produrre getti alligati con Cr e/o Ni. Le microstrutture hanno evidenziato la formazione di fasi intermetalliche specifiche dovute all'aggiunta di tali elementi di lega. Inoltre, anche le misure di microdurezza hanno confermato un aumento della microdurezza della fase eutettica con l'aggiunta di Ni, grazie alla formazione di fasi intermetalliche con il Cu.

La resistenza a usura è stata valutata su provini in seguito a prove al pin-on-disk, evidenziando una maggiore tendenza all'usura per i campioni contenenti solo Ni, mentre i campioni alligati solo con Cr hanno mostrato i risultati migliori. Da queste valutazioni è stato possibile confermare un aumento della resistenza a usura con l'aggiunta del Cr, mentre l'alligazione con il solo Ni, dai risultati preliminari qui mostrati, sembra condurre a elevati tassi di usura.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] T.A. Baser, E. Umay, V. Akinci, New trends in aluminum die casting alloys for automotive applications, in: Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics, 2022. <https://doi.org/10.55549/epstem.1227541>.
- [2] M. Bhaskar, G. Anand, T. Nalluswamy, M. Koilraj, P. Suresh, Recycling of Aluminum Chips in Die Casting Foundry, International Journal of Metalcasting (2021). <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00707-3>.
- [3] E. Velasco, J. Nino, Recycling of aluminium scrap for secondary Al-Si alloys, Waste Management and Research 29 (2011). <https://doi.org/10.1177/0734242X10381413>.
- [4] A.K. Prasada Rao, W.Q. Ain, M.K. Faisal, B.I. Mazni, Undiluted Recycling of Aluminum Scrap Alloy Using Hume-Rothery's Rule, Metallography, Microstructure, and Analysis 7 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13632-018-0431-8>.
- [5] M.T. Murray, M. Murray, High pressure die casting of aluminium and its alloys, in: Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications, 2010. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.1.217>.
- [6] L. Hurtalová, E. Tillová, M. Chalupová, The structure analysis of secondary (Recycled) AlSi9Cu3 cast alloy with and without heat treatment, Engineering Transactions 61 (2013).
- [7] L. Zuo, B. Ye, J. Feng, X. Kong, H. Jiang, W. Ding, Effect of Q-Al5Cu2Mg8Si6 phase on mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloy at elevated temperature, Materials Science and Engineering: A 693 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.087>.
- [8] E. Fracchia, C. Mus, Low carbon footprint aluminium components for E-Mobility, Acta Metallurgica Slovaca 30 (2024) 24–28. <https://doi.org/10.36547/ams.30.1.1997>.
- [9] J. Kasińska, D. Bolibruchová, M. Matejka, The influence of remelting on the properties of AlSi9Cu3 alloy with higher iron content, Materials 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13030575>.
- [10] M. Tocci, R. Donnini, G. Angella, A. Pola, Effect of Cr and Mn addition and heat treatment on AlSi3Mg casting alloy, Mater Charact 123 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.11.022>.
- [11] L. Ding, X. Zhang, C. Lu, C. Wang, Y. Weng, Q. Dong, S. Xu, L. Cao, Z. Jia, Influence of the combined additions Mn, Cr or Ni on the formation of dispersoids and mechanical properties of Al-Mg-Si-Cu alloys, Materials Science and Engineering: A 892 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145962>.
- [12] S. Jain, N. L. V. Kumar, S. Samal, Effect of Ni and Si alloying elements on the phase evolution, mechanical properties, tribological behaviour of Al-Cu alloys, Mater Chem Phys 297 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127421>.
- [13] E. de Rosso, C.A. dos Santos, A. Garcia, Microstructure, Hardness, Tensile Strength, and Sliding Wear of Hypoeutectic Al-Si Cast Alloys with Small Cr Additions and Fe-Impurity Content, Adv Eng Mater 24 (2022). <https://doi.org/10.1002/adem.202001552>.
- [15] Palmieri ME, Tricarico L. Physical simulation of laser surface treatment to study softening effect on age-hardened aluminium alloys. J Manuf Mater Process. 2022;6(3):64.
- [16] Palmieri ME, Lorusso VD, Tricarico L. Laser-induced softening analysis of a hardened aluminum alloy by physical simulation. Int J Adv Manuf Technol. 2020;111:1503-1515.
- [17] Ramachandran DC, Chandran D, et al. A comprehensive evaluation of tempering kinetics on 3rd generation advanced high strength steels. Materialia. 2022;26:101644.

# Effect of Cr and Ni addition on the microstructure and wear of scrap alloy $AlSi9Cu3(Fe)$

Recently, in various scenarios of component production through casting, the use of alloys from end-of-life products, commonly destined for disposal, has begun to be re-used without further processing. This production method can therefore involve the remelting of scrap parts, even more than once. However, the possibility of forming deleterious or coarse intermetallic phases due to remelting can be a deterrent. In this work, the effect of adding Cr and/or Ni to the  $AlSi9Cu3(Fe)$  alloy from foundry scraps was studied by casting 6 types of alloys containing 0.5 wt% or 1% Chromium; 0.5 wt% or 1% Nickel; and finally, containing 0.5 wt% Ni and 0.5% Cr or 1 wt% Ni and 1% Cr. These alloys were evaluated from a microstructural and wear resistance point of view. Such evaluations highlighted a greater increase in the hardness of the eutectic if Nickel is added to the alloy; conversely, this is accompanied by lower wear resistance.

**KEYWORDS:**  $AlSi9Cu3(Fe)$ , MICROSTRUCTURES, PIN-ON-DISK, CHROMIUM, NICKEL;

[TORNA ALL'INDICE >](#)