

Caratterizzazione della resistenza meccanica e della resistenza a corrosione di funi ibride acciaio inossidabile/fibra di carbonio

A. Meleddu, J. Ferino, S. Hecht, W. Frick, M.N. Amin, M. Meleddu, E. Kraemer, L. Pezzato, M. Ricotta, M. Dabalà, K. Brunelli

Lo sviluppo di materiali ad alta resistenza e basso peso risulta essere di sempre maggiore rilevanza in svariati settori industriali tra cui quello delle funi. Il presente lavoro ha come obiettivo quello di presentare alcuni dei risultati ottenuti nell'ambito del progetto europeo FIRST-WIRE, finanziato dal Research Fund for Coal and Steel – RFCS 2019. Obiettivo del progetto era quello di sviluppare e caratterizzare funi ibride con un guscio in acciaio inossidabile (acciaio super austenitico X1NiCrMoCuN25-20-7) e un cuore di fibra di carbonio (trefoli di fibre pre-impregnate). Oggetto del presente lavoro è la caratterizzazione della resistenza meccanica e della resistenza a corrosione dei singoli fili costituenti la fune. Nel dettaglio, sono state eseguite analisi della resistenza a trazione statica e a fatica del materiale ibrido e prove di pull out ottenendo risultati soddisfacenti in termini di resistenza e di allungamento e ottimi in termini della resistenza dell'interfaccia fibra-guscio. Per quanto concerne la resistenza alla corrosione sono state ottenute ottime caratteristiche di resistenza al pitting e non si sono riscontrate problematiche di corrosione per contatto galvanico mentre sono stati individuate possibili problematiche relative alla corrosione sotto sforzo.

PAROLE CHIAVE: FILI, MATERIALE IBRIDO, ACCIAIO INOSSIDABILE, FIBRA DI CARBONIO, CORROSIONE, PROPRIETÀ MECCANICHE

INTRODUZIONE

Nel mercato delle funi metalliche, l'elevato rapporto prestazioni/peso delle funi d'acciaio presenta sfide significative per le applicazioni onshore/offshore come linee di ormeggio per piattaforme offshore, attrezzature di sollevamento per operazioni minerarie in acque profonde o ponti strallati/strutture strallate su larga scala. In questi scenari vengono adottate con successo le funi convenzionali in acciaio. Nelle linee di ormeggio (es.: per piattaforme galleggianti) le funi d'acciaio dimostrano robuste proprietà di resistenza e rigidità elastica superiore, mentre estensione e isteresi non pongono problemi significativi. Tuttavia, sono soggette a corrosione e la loro massa intrinseca presenta vincoli per campate estese nelle applicazioni in acque profonde. Attualmente il peso proprio delle funi convenzionali in acciaio ad alte prestazioni rappresenta una limitazione nel raggiungimento di grandi profondità marine per il sollevamento di applicazioni offshore. Per la maggior parte degli operatori leader a livello

A. Meleddu, J. Ferino

Astarte Strategies Srl, Italy

S. Hecht, W. Frick

University of Stuttgart, Germany

M. N. Amin, M. Meleddu

Teufelberger-Redaelli, Italy

E. Kraemer

Cunova GmbH, Germany

**L. Pezzato, M. Ricotta, M. Dabalà,
K. Brunelli**

University of Padua, Department of Industrial Engineering, Italy

mondiale, questo limite è di circa 2.000 m.

Attualmente gli studi per ridurre il peso proprio delle funi metalliche ad alte prestazioni hanno recentemente proposto l'utilizzo di materiali compositi ibridi acciaio/CFRP [1,2] che prevedono l'impiego di fili di acciaio e fili di CFRP per formare funi più leggere.

Nell'ambito del programma di finanziamento EU RFCS, il progetto FIRST-WIRE [3] mira a sviluppare un filo ibrido in acciaio e fibra di carbonio per corde e cavi con prestazioni migliorate e peso ridotto. Nel presente lavoro viene brevemente descritto il concetto di filo ibrido sviluppato e i risultati sperimentali ottenuti nella caratterizzazione del prodotto. I risultati ottenuti hanno dimostrato che è possibile ottenere fili e funi leggeri ad alte prestazioni, convalidando pienamente il concetto di materiale ibrido proposto.

MATERIALI E METODI

Produzione dei fili ibridi

Il concetto di filo ibrido sviluppato nel presente lavoro prevede un guscio in acciaio inossidabile (con un diametro compreso tra 3 e 5 mm e uno spessore di 0,3-1,0 mm) che racchiude un nucleo costituito da fibre di carbonio ad alte prestazioni. Uno schema che illustra questo nuovo concetto di filo ibrido si trova in Fig.1. Questa innovazione è in fase di brevetto da Redaelli [4]. Le prestazioni finali del filo sono determinate sia dal guscio in acciaio inossidabile che dal nucleo in fibra di carbonio. In particolare le prestazioni sia dal punto di vista della resistenza meccanica che da quello della resistenza a corrosione dipendono dalla scelta del materiale costituente il guscio ed il nucleo.



Fig.1 - Concetto di filo ibrido (a sinistra) e campione realmente prodotto (a destra) / Design of the hybrid wire (left) and produced wire (right).

I fili ibridi sono stati prodotti dall'azienda Cunova mediante processo di laminazione, per formare il tubo esterno con una saldatura continua longitudinale mediante tecnica TIG. Le anime in fibra di carbonio sono state introdotte all'interno del tubo durante la laminazione prima della chiusura finale e della saldatura. Per il tubo in acciaio inox costituente il guscio esterno protettivo attorno al nucleo in fibra di carbonio è stato scelto un nastro di acciaio inossidabile super austenitico AISI F44/6Mo (X1NiCrMoCuN25-20-7). Matasse di fibra di carbonio ad alta resistenza pre-impregnate (Hyosung carbon fiber tows /7/ H2550 (12k/24k)) sono state scelte per andare a costituire il nucleo.

Caratterizzazione della resistenza meccanica e della resistenza a corrosione dei fili

La resistenza meccanica e a corrosione dei fili è stata valutata su fili ibridi di diametro 5.16 mm. La resistenza

meccanica dei fili ibridi è stata valutata mediante prove di trazione statica, prove di fatica e prove di pull-out. Tutte le prove di resistenza meccanica sono state eseguite con una macchina 100 PSA Schenk Hydropulse con cella di carico fino a 100 kN. Le prove sono state eseguite utilizzando un sistema di afferraggio dedicato (Fig.2) che blocca il filo in due piastre di acciaio con una scanalatura appositamente progettata della stessa dimensione dei fili. Le viti sono state chiuse con una chiave dinamometrica con un carico di 35 Nm. Per evitare scivolamenti tra il tubo e le fibre, i campioni sono stati testati con la parte finale opportunamente deformata per bloccare le fibre nei tubi. Le prove di fatica sono state realizzate in modalità trazione/trazione con $R=0.1$. La resistenza alla corrosione per pitting è stata valutata mediante un test potenziodinamico (ASTMG61 in soluzione 3.5%NaCl), utilizzando il campione come elettrodo di lavoro, un elettrodo al calomelano come elettrodo di riferimento e un elettrodo di platino

come contro elettrodo. La corrosione per contatto galvanico (ASTM G71 in soluzione 3.5% NaCl e 9% NaCl) è stata valutata misurando la corrente passante tra un campione costituito dalla fibra di carbonio e un campione costituito dall'acciaio inossidabile in un rapporto di area 1

a 1. La corrosione sotto sforzo (ASTM G123/G36) è stata valutata mediante immersione dei campioni di filo (dritti oppure piegati a 90° per indurre uno stato di tensione) in soluzione di $MgCl_2$ bollente e successiva osservazione dei campioni per individuare la possibile presenza di cricche.



Fig.2 - Geometria dei campioni utilizzati nella valutazione della resistenza meccanica e afferraggi sviluppati / Geometry of the samples and of the clamping systems employed for the mechanical characterization of the wires.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Caratterizzazione della resistenza meccanica dei fili

I risultati delle prove di trazione statiche, eseguite su fili ibridi di diametro $\varnothing 5,16$ mm, sono riportati in Fig.3 a sinistra. La lunghezza iniziale dei campioni era di 250 mm. I test sono stati eseguiti alla velocità di 1 mm/min. Dai risultati riportati la combinazione del nucleo in fibra di carbonio e del guscio in acciaio inossidabile consente di ottenere un filo ibrido caratterizzato da elevata resistenza a trazione e buon allungamento. La resistenza alla trazione calcolata sulla zona esterna del filo è di circa 1200-1400MPa. È stata eseguita anche un'analisi frattografica SEM dei campioni dopo le prove di trazione e dai risultati (Fig.3 a destra) si può osservare la presenza di superficie di frattura duttile, tipica degli acciai inossidabili a temperatura ambiente.

I test di pull out sono stati eseguiti su fili ibridi con diametro 5,16 mm. Un provino da 50 mm è stato inciso circonferenzialmente per l'intera profondità del guscio in acciaio in modo che i due semitubi vengano separati scorrendo sul nucleo in fibra di carbonio. Il test è stato eseguito staticamente ad una velocità di 1 mm/min. La parte vuota del tubo è stata afferrata per una lunghezza di 12 mm. La lunghezza del tubo contenente la fibra era quindi pari a $50-12=38$ mm. I risultati riportati in Fig.4 a sinistra permettono di evidenziare come, dopo una prima rampa, lo

sforzo si avvicini ad un plateau di circa 4MPa. Il risultato è molto interessante perché mostra che, sebbene non sia stato applicato alcun trattamento specifico all'interfaccia fibra-tubo, la forza di attrito richiesta per estrarre le fibre è sufficientemente elevata da garantire una buona sinergia di entrambi i componenti all'interno del filo ibrido. I risultati sono confermati dall'analisi SEM dei campioni dopo il test di pull out (Fig.4 a destra), che mostra come le fibre si staccino e si rompano parzialmente durante l'estrazione, ciò indica una forte forza di attrito tra le fibre e il tubo durante i test.

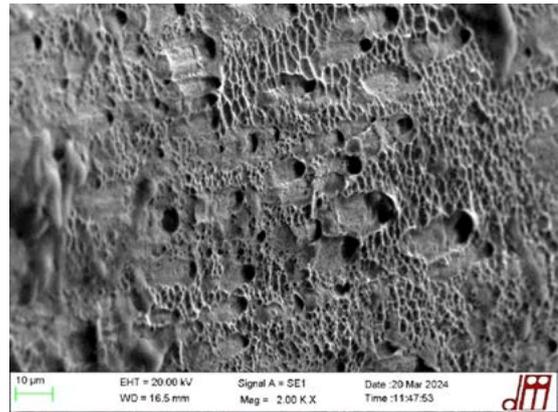
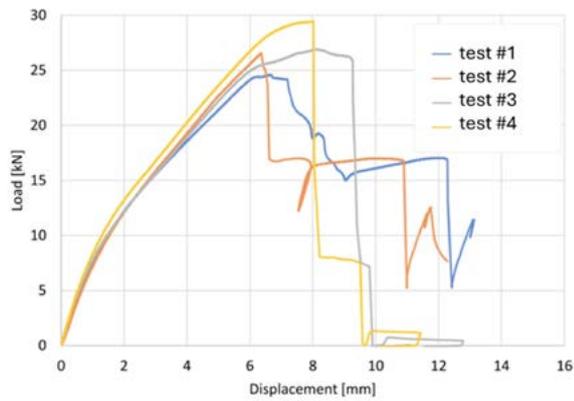


Fig.3 - Risultati delle prove di trazione statiche (a sinistra) e analisi della superficie di frattura dopo il test (a destra) / Results of the static tensile tests (left) and fracture surface (right) after the tests.

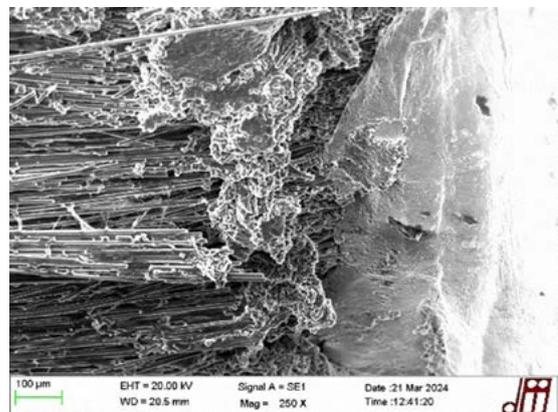
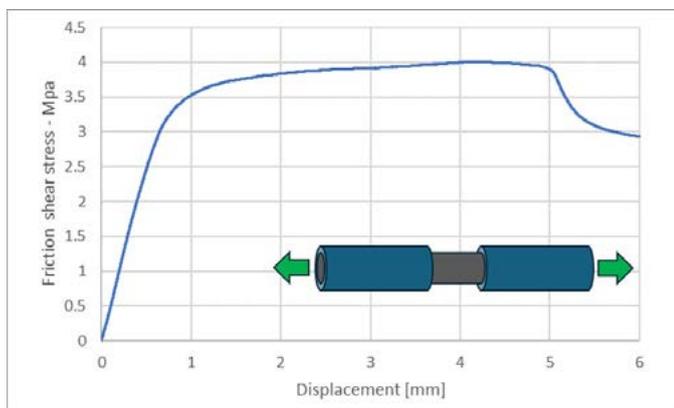


Fig.4 - Risultati delle prove di pull out (a sinistra) e analisi SEM del campione dopo il test (a destra) / Results of the pull-out tests (left) and SEM analysis of the samples after the test (right).

Considerando i test di resistenza a fatica la Fig. 5 mostra i risultati dell'analisi statistica nell'ipotesi di distribuzione log-normale del numero di cicli a rottura N_f e dispersione costante rispetto al livello massimo di carico applicato raggiunto nel ciclo di fatica. Considerando i dati spe-

rimentali disponibili, la resistenza a fatica di riferimento valutata a 200'000 cicli è risultata pari a $F_{max}=3,86$ kN per P. S.=50%, pari a 3,55 kN per P. S.=90% e pari a 4,19 per P. S.=10%, come riportato nella Tab.1

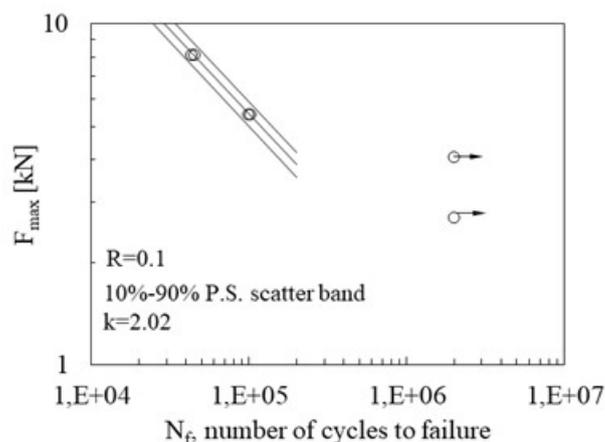


Fig.5 - Risultati delle prove di fatica / Results of the fatigue tests .

Tab.1 - Risultati delle prove di fatica / Results of the fatigue tests.

N [cycles]	Fmax,90% P.S. [kN]	Fmax,50% P.S. [kN]	Fmax,10% P.S. [kN]
25000	9.92	10.78	11.70
200000	3.55	3.86	4.19

Caratterizzazione della resistenza a corrosione dei fili

Per quanto concerne la resistenza alla corrosione sono state innanzi tutto effettuati test di contatto galvanico tra il tubo in acciaio superaustenitico e le fibre di carbonio in modo da comprendere se il concetto stesso di filo ibrido fosse compatibile con un utilizzo in ambiente marino. I risultati dei test, effettuati sia in soluzione 3.5% che 9%

NaCl, sono riportati in Tab.2. Come si può osservare in entrambi i casi le correnti galvaniche che fluiscono tra i campioni sono estremamente basse, fatto che permettere di escludere l'insorgenza di corrosione per contatto galvanico tra il nucleo in fibra di carbonio e il guscio in acciaio inossidabile.

Tab.2 - Risultati delle prove di contatto galvanico in soluzione 3.5% e 9% NaCl / Results of the galvanic corrosion tests in solution 3.5% and 9% of NaCl

	Current density [A/cm ²]	
	3,5% NaCl	9% NaCl
Stainless steel Tube/Carbon Fibers	-4,26 10 ⁻⁷	-8,94 10 ⁻⁷

È stata valutata anche la resistenza alla corrosione per pitting del filo ibrido ed in particolare del guscio in acciaio inossidabile che viene a contatto con l'ambiente esterno. A tale scopo sono state effettuate analisi potenziodinamiche e i risultati sono riportati in Fig.6 e in Tab.3. Dall'analisi

dei risultati e in accordo con l'elevato PREN del materiale si può riscontrare una notevole resistenza alla corrosione per pitting del materiale costituente il guscio esterno del filo ibrido.

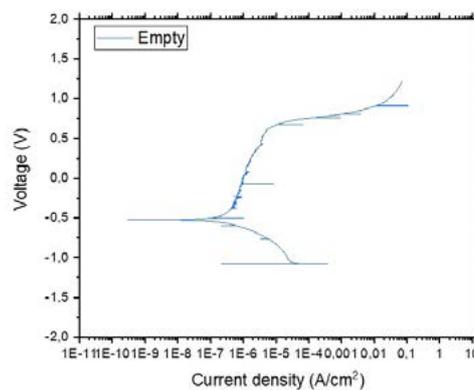


Fig.6 - Risultati delle prove potenziodinamiche in soluzione 3.5%NaCl / Results of the potentiodynamic polarization tests in 3.5%NaCl.

Tab.3 - Valori della corrente e del potenziale di corrosione e del potenziale di pitting, estrapolati graficamente dalle prove potenziodinamiche / Values of the corrosion potential and corrosion current and of the pitting potential extrapolated from the potentiodynamic polarization tests

	E _{corr} [V]	I _{corr} [A/cm ²]	E _{pitt} [V]
Stainless steel Tube	-0,524	1,12 10 ⁻⁷	0,609

Sono state effettuate prove di corrosione sotto sforzo secondo la norma ASTM G36 – 94. Sono stati preparati sei campioni piegandone la metà a 90° per produrre uno stato di tensione. Successivamente, i campioni sono stati immersi in cloruro di magnesio bollente per 1 ora e poi osservati al SEM al fine di identificare la possibile presenza di cricche che risultano indice di suscettibilità a corrosione sotto sforzo. I risultati dell'osservazione al SEM sono riportati in Fig.7 per il campione non piegato e in Fig.8 per il campione piegato a 90°. I risultati delle osservazioni al SEM hanno dimostrato la notevole

suscettibilità del filo ibrido alla tensocorrosione (SCC). Sia i campioni piegati (Fig.8) che quelli non piegati (Fig.7) presentano un numero significativo di cricche lunghe e profonde in particolare nelle immediate vicinanze delle zone saldate. La presenza di cricche anche nei campioni non piegati risulta indicativa del fatto che la suscettibilità alla corrosione sotto sforzo risulta legata non solo alla presenza di una sollecitazione esterna ma anche alla presenza di tensioni residue all'interno del filo (come successivamente dimostrato mediante analisi XRD).

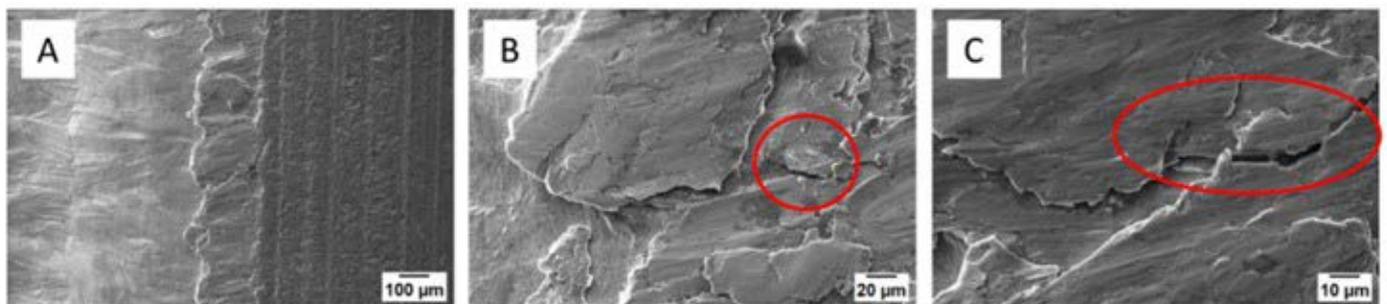


Fig.7 - Risultati delle osservazioni al SEM dei campioni non piegati dopo test di corrosione sotto sforzo (a) 200X; (b) 1000X; (c) 2000X / Results of the SEM observation of the unstressed samples after SCC tests (a) 200X; (b) 1000X; (c) 2000X.



Fig.8 - Risultati delle osservazioni al SEM dei campioni piegati dopo test di corrosione sotto sforzo (a) 200X; (b) 1000X; (c) 2000X / Results of the SEM observation of the stressed samples after SCC tests (a) 200X; (b) 1000X; (c) 2000X.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro riporta i risultati relativi allo sviluppo e alla caratterizzazione di un innovativo filo ibrido costituito da un guscio esterno in acciaio inossidabile e un nucleo interno in fibre di carbonio per la realizzazione di funi e cavi leggeri ad alte prestazioni. La produzione di fili ibridi basata sulla laminazione di nastri con saldatura continua (TIG), ha dimostrato la fattibilità del processo di produzione su larga scala. La caratterizzazione meccanica dei fili

ha permesso di evidenziare ottime caratteristiche di resistenza e allungamento in rapporto al peso del filo mentre il comportamento a fatica deve essere ulteriormente indagato al fine di indagare il reale contributo delle fibre. I test di pull out hanno permesso di evidenziare la formazione di una forte interfaccia fibra/guscio inox anche in assenza di trattamenti specifici. Per quanto concerne il comportamento a corrosione è stata esclusa la possibile insorgenza di fenomeni di corrosione per contatto galva-

nico tra guscio in acciaio e nucleo di fibre di carbonio ed è stata altresì verificata l'elevata resistenza al pitting garantita dalla presenza del guscio in acciaio inossidabile. È stata inoltre riscontrata una suscettibilità alla corrosione sotto tensione che dovrà essere opportunamente ridotta andando a modificare alcuni step del processo produttivo. In conclusione i risultati risultano essere estremamente promettenti per la realizzazione di funi ad alte prestazioni in filo ibrido acciaio inox/fibra di carbonio anche se alcuni aspetti del processo produttivo andranno modificati al

fine di aumentare la resistenza a fatica e ridurre la suscettibilità alla corrosione sotto sforzo.

FINANZIAMENTI

Questa ricerca è stata cofinanziata dall'Unione Europea nell'ambito del programma Fondo di ricerca per il carbone e l'acciaio – RFCS CALL 2019, Project: "Fiber Reinforced STEEL WIRES for high performance lightweight ropes and cables operating in demanding scenarios" N. Project 899299.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Xiong W, Cai CS, Xiao R, Deng L. Concept and analysis of stay cables with a CFRP and steel composite section. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2011; 16. 10.1007/s12205-012-1152-1.
- [2] Cai H, Aref AJ. On the design and optimization of hybrid carbon fiber reinforced polymer-steel cable system for cable-stayed bridges. *Composites Part B: Engineering*, 2015; 68: 146-152
- [3] <https://firstwire.eu/>
- [4] Redaelli Patent WO 2013/065074 A1: Composite Wire with Protective External Metallic Mantle and Internal Fiber

Characterization of the mechanical and corrosion properties of hybrid stainless steel/carbon fiber wires

The development of highly resistant and lightweight materials is becoming increasingly important in various industrial sectors including the ropes sector. The objective of this work is to present some of the results obtained in the European FIRST-WIRE project, financed by the Research Fund for Coal and Steel - RFCS. The objective of the project was to develop and characterize hybrid ropes with a stainless-steel shell (super austenitic steel X1NiCrMoCuN25-20-7) and a carbon fiber core (pre-impregnated fiber bundles). The object of this work is the characterization of the mechanical and corrosion resistance of the single wires constituting the rope. In detail, analyses of the static tensile and fatigue resistance of the hybrid material and pull out tests were carried out, obtaining satisfactory results in terms of resistance and elongation and excellent in terms of the resistance of the fibre-shell interface. As regards corrosion resistance, excellent resistance to pitting was obtained and no problems of corrosion due to galvanic contact were encountered while possible problems relating to stress corrosion cracking were identified.

KEYWORDS: WIRES, HYBRID MATERIAL, STAINLESS STEEL, CARBON FIBER, CORROSION, MECHANICAL PROPERTIES

TORNA ALL'INDICE >