

Eliche in bronzo o in acciaio?

Sempre aperta la disputa sulla scelta del materiale

Giulio Gennaro*

Tra le avarie navali riscontrate in questi ultimi tempi particolare interesse hanno destato quelle occorse alle pale di alcune eliche, costruite in acciaio inossidabile, avarie non causate da urti delle pale ma dovute alla risposta dell'acciaio inossidabile alle sollecitazioni dinamiche indotte sulle pale dal dominio fluido in cui operano. Si tratta in particolare di lesioni e fratture a fatica occorse alla radice delle pale dopo alcune migliaia di ore di esercizio.

Si è pertanto riaperta la disputa sulla scelta del materiale per la costruzione delle eliche: se è preferibile l'acciaio inossidabile oppure il bronzo. Alle iterate richieste rivolte ad alcuni costruttori di eliche e ad alcune società armatoriali, tese a capire i motivi per cui essi propongono eliche costruite in acciaio inossidabile rispetto a quelle costruite in bronzo non si sono mai avute, almeno per quanto riguarda l'estensore delle presenti note, risposte convincenti dal punto di vista ingegneristico e talvolta si sono avute risposte non conformi alla normativa dei registri di classificazione.

I materiali impiegati a tutt'oggi nella costruzione delle eliche sono: Bronzo al Manganese, Bronzo al Nichel Alluminio, Acciaio inossidabile al Cromo Nichel, Acciaio inossidabile Duplex, le cui caratteristiche meccaniche possono essere generalizzate come segue:

		Cu Mn	Cu Ni Al	SS Cr Ni	Duplex
R _m	MPa	650	650	700	590
R _{p0.2}	MPa	270	270	500	370
A ₅	%	16	19	15	20
ChV (-10 °C)	J	22	22	24	21
R a fatica (10 ⁶ cicli)	MPa	80	100-130	70	140

A prima vista gli acciai inossidabili sembrerebbero preferibili ai bronzi grazie al più alto snervamento. In realtà si deve tenere presente che gli acciai inossidabili sono soggetti a problematiche peculiari: difficoltà di fusione; difficoltà di trattamento termico; sensibilità all'infragilimento a 480 °C; sensibilità all'infragilimento da idrogeno; sensibilità alle sollecitazioni a fatica.

Difficoltà di fusione

Come per tutti gli acciai ad elevata resistenza, non fucinati, le fusioni delle pale in acciaio presentano difettologia distribuita nella loro matrice cristallina dovuta a soffiature ed a imperfezioni varie. Questi difetti, quando rilevati sulle superfici delle fusioni delle eliche o delle pale, vengono riparati, dopo aver consultato gli enti di classificazione, mediante riporto di saldatura effettuato con procedura riconosciuta ed accettata.

Il bronzo è una lega di buona fondibilità e che soffre in modo contenuto i problemi relativi a soffiature ed imperfezioni.

Difficoltà di trattamento termico

Per questo acciaio l'ottenimento di buone caratteristiche tecnologiche e di resilienza avviene sottoponendo il manufatto a procedura di trattamento termico articolato su due fasi (fase di hardening, tempra a 1030 °C e fase di tempering, rinvenimen-

In the past years failures occurred to propellers due to fatigue phenomena have caused some concerns among ship owners, re-igniting the debate about which material is preferable for the construction of marine propellers: bronze or stainless steel? Inquires to manufacturers, classification societies and ship owners have revealed that confusion reigns; it is therefore appropriate to give some guidelines. Nowadays the materials employed for marine propellers are: Manganese bronze; Nickel Aluminium bronze; Chrome Nickel stainless steel; Duplex stainless steel.

By examining their mechanical properties it would appear that stainless steels are preferable to bronzes due to their higher yield point. As a matter of fact stainless steels are subject to peculiar problems, such as: Difficulties in casting; Difficulties in heat treatment; 480°C embrittlement (in the course of heat treatment); Hydrogen embrittlement (during casting, welding and service).

Bronzes, on the contrary, are notoriously easy to be cast, do not need to be heat treated and do not suffer from embrittlement.

The above mentioned phenomena result in a sharp increase in stress concentration factors for stainless steel propellers, in respect with bronze ones, with a severe negative impact on the acceptable fatigue stress values.

Furthermore stainless steel is more difficult to weld than bronze (which might cause problems in case of repairs) and much more expensive.

It can be therefore concluded that bronze (in particular Nickel Aluminium bronze) is the material of choice for marine propellers, allowing for once to obtain both higher quality and lower cost.

The pictures A and B are relevant to a fatigue failure of a stainless steel propeller blade and they are courtesy of Istituto Italiano della Saldatura, with whom we cooperate for laboratory examinations.

to a 610 – 630 °C) secondo le curve TTT (curve tempi, temperatura e trasformazioni).

La varietà degli spessori di una pala di elica, piccoli all'apice e elevati alla radice, rende difficoltoso l'uniforme ottenimento delle previste caratteristiche tecnologiche dell'acciaio, a motivo dei diversi gradienti termici che si realizzano nel corso delle varie fasi del trattamento termico, per le varie zone delle pale.

Dopo il primo trattamento di tempra (hardening) possono residuare strutture dendritiche, strutture martensitico/ferritiche non completamente sviluppate in martensite e, dopo il successivo trattamento di rinvenimento (tempering) può residuare martensite, non completamente trasformata in martensite, riducendo pertanto il miglioramento delle caratteristiche di resilienza dell'acciaio martensitico, diversamente da quanto previsto in sede di progetto.

L'eccessiva durata del soggiorno dell'acciaio, nel corso delle fasi transitorie di trattamento termico, nell'intorno della temperatura di 480 °C, e precisamente nell'intervallo di temperatura da 380 a 580 °C, può dare luogo alla formazione o alla precipitazione di un composto complesso di ferro/cromo che determina infragilimento. Si tratta di un infragilimento tipico degli acciai legati con contenuto di cromo dal 12 al 15%.

Il bronzo non necessita di alcun trattamento termico, per cui è esente da entrambe queste problematiche.

Sensibilità all'infragilimento da idrogeno

L'infragilimento da idrogeno è dovuto all'assorbimento di atomi di idrogeno che si vanno a posizionare all'interno del reticolo cristallino, distorcendolo. Questo fenomeno ha assunto particolare rilevanza a partire dagli anni '80, rivelandosi una vera e propria "piaga" per le bullonature degli impianti off-shore.

Detto infragilimento dipende dall'assorbimento di idrogeno da parte dell'acciaio e può avvenire per tre motivi:

- Assorbimento di idrogeno all'atto della fusione dell'acciaio dovuto ad un eventuale difetto nella procedura di fusione condotta in forno elettrico a induzione e sotto vuoto. Frequentemente nella specifica di produzione delle eliche e delle pale non sono indicate le procedure atte a minimizzare la presenza di idrogeno nella fusione, né quelle atte a rilevare la presenza di idrogeno nella matrice dell'acciaio ed idonee a conseguire il rilascio dell'idrogeno qualora rilevato nel manufatto. Inoltre frequentemente non è indicato il valore massimo ammissibile (in weight part per million, wppm) della presenza di idrogeno.
- Assorbimento di idrogeno all'atto dell'effettuazione dei riporti di saldatura (operazione abbastanza frequente per le pale in acciaio inossidabile data la non buona fondibilità del materiale).
- Assorbimento di idrogeno dovuto al non corretto esercizio dell'impianto di correnti impresse installato sulla nave a protezione della carena dalla corrosione marina.

È bene inoltre sottolineare che l'elica vive in condizioni ambientali comunque ricche di idrogeno, anche nascente (idrogeno atomico e ionico; ambiente idrogenogenico), e pertanto particolarmente penetrante nella matrice cristallina dell'acciaio.

La presenza di idrogeno può essere dovuta anche alla incipiente o effettiva cavitazione con conseguenti situazioni di instabilità fisico-chimica e quindi presenza di componenti non stabili quali ad esempio idrogeno atomico, idrogeno ionico e ossigeno atomico.

Il bronzo, soprattutto quello al Cromo Nichel, è esente da infragilimento da idrogeno.

Sensibilità alle sollecitazioni a fatica

L'acciaio inossidabile al Cromo Nichel è qualificato da ottime proprietà di resistenza a rottura e di limite elastico e da discrete caratteristiche di resilienza, ma è pur sempre un acciaio martensitico e quindi caratterizzato da una intrinseca fragilità a sollecitazione dinamica. In effetti la sua tensione tabellare di resistenza a fatica (in condizioni teoriche di assenza di difetti e di conseguenti elevati valori dei fattori di concentrazione delle tensioni di ogni genere: geometrici, difettologici, matriciali e termici) è pari a circa 70 MPa per 10^8 cicli di sollecitazione alterna.

L'acciaio inossidabile di tipo Duplex presenta caratteristiche di rotture inferiori ai bronzi ma snervamento superiore, anche se minore di quello dell'acciaio inossidabile al Cromo Nichel, ma soprattutto la sua tensione tabellare di resistenza a fatica (sempre in condizioni teoriche di assenza di difetti e di conseguenti elevati valori dei fattori di concentrazione delle tensioni di ogni genere: geometrici, difettologici, matriciali e termici) è pari a circa 140 MPa per 10^8 cicli di sollecitazione alterna.

La caratteristica di resistenza a fatica del bronzo al Manganese è simile a quella dell'acciaio inossidabile al Cromo Nichel, mentre quella del bronzo al Nichel Alluminio ha una gamma ampia ma per alcune leghe può arrivare a valori simili a quelli dell'ac-

ciaio Duplex. Inoltre è bene notare che, data la minore presenza di difetti nella matrice cristallina del bronzo, i fattori di concentrazione delle sollecitazioni, propri dei manufatti in bronzo, sono inferiori a quelli dei manufatti in acciaio, con logiche positive conseguenze sul comportamento a fatica delle pale.

Caratteristiche di allungamento e di resilienza

Le caratteristiche di allungamento e resilienza sono misura indiretta dell'energia che il materiale riesce ad assorbire, deformandosi plasticamente, prima di arrivare a rottura. Queste caratteristiche sono prescritte dai registri di classifica per le navi con classe ghiacci, in effetti è richiesto che il mate-

riale impiegato per le pale di elica offra le seguenti caratteristiche minime:

- $A5 \geq 19\%$;
- $ChV (-10^\circ C) \geq 21 J$.

Da quanto sopra si rileva che il bronzo al Nichel Alluminio e l'acciaio inossidabile Duplex sono accettabili per eliche di navi avente classe ghiacci; al contrario il bronzo al Manganese e l'acciaio inossidabile a Cromo Nichel non rientrano facilmente nei limiti di accettabilità.

Riparabilità

L'elica navale è esposta ad urti conto il fondale o contro corpi sommersi e può inoltre essere soggetta ad erosione da cavitazione, per cui la riparabilità della stessa è una caratteristica piuttosto importante.

Le riparazioni avvengono generalmente per riporto di saldatura ed è universalmente noto come l'acciaio inossidabile sia difficile a saldarsi, contrariamente al bronzo.

Conclusioni

Da quanto sopra riportato si può concludere che, per la costruzione di eliche navali, il bronzo è, in generale, superiore all'acciaio.

L'impiego di acciaio inossidabile al

Cromo Nichel è sconsigliabile per i seguenti motivi: disomogeneità della sua fusione con residua difettologia diffusa nella sua matrice cristallina; elevata possibilità di dover rottamare la fusione per eccesso di difettologia; elevata probabilità di riparazioni della fusione, mediante riporto di saldatura; particolare sensibilità ai fattori di concentrazione delle tensioni; difficoltà di uniforme recepimento del trattamento termico; sensibilità all'infragilimento per soggiorno prolungato a temperature prossime a $480^\circ C$, nel corso del trattamento termico; sensibilità all'infragilimento per assorbimento di idrogeno; limitato valore della resistenza alle sollecitazioni a fatica; difficoltà di riparazioni per saldatura delle pale quando in esercizio. Per l'acciaio inossidabile di tipo Duplex il quadro migliora, ma non in modo sostanziale.

Il bronzo al Nichel Alluminio si rivela essere il materiale più indicato sotto tutti i punti di vista.

Il bronzo al Manganese, anche se inferiore al bronzo al Nichel Alluminio, è un ottimo materiale da impiegarsi per eliche non particolarmente sollecitate.

In conclusione si può affermare che non esistono pressanti ragioni tecniche che consiglino l'adozione dell'acciaio inossidabile quale materiale per la costruzione di eliche navali.

Infine, in un'epoca di stringente controllo dei costi (purtroppo spesso a rischio della qualità dei componenti) è bene sottolineare come il bronzo sia più economico dell'acciaio inossidabile, conciliando pertanto qualità ed economicità.

Le foto A e B si riferiscono all'avaria a fatica di una pala di elica, in acciaio inossidabile, e sono riprodotte per gentile concessione dell'Istituto Italiano di Saldatura, a cui ci rivolgiamo per l'esecuzione di esami di laboratorio. □



Foto A - A defect, probable starting point of a fatigue fracture



Foto B - The details of the fatigue crack elongation are shown