



Università degli Studi di Napoli "*Parthenope*"

Dipartimento di Scienze e Tecnologie

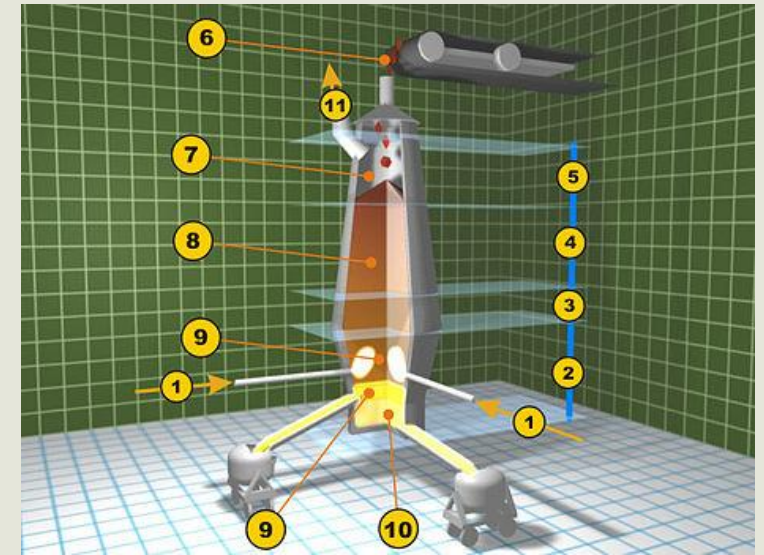
Tecnologia delle costruzioni ed allestimento navale
Vincenzo Piscopo

Acciai e leghe leggere di interesse navale
Lezione 6 (12/48)

1.1 Acciai da scafo: processo di lavorazione

Si definisce **acciaio** una lega ferro-carbonio (Fe-C) con un tenore di carbonio minore del 2%, oltre ulteriori elementi con ridotti tenori. Si definisce **ghisa** una lega ferro-carbonio con un tenore di carbonio superiore al 2%.

L'acciaio è il materiale metallico di più vasto impiego nel settore navale dal momento che unisce al basso costo buone proprietà meccaniche. Si ottiene dal processo di affinazione della ghisa che, a sua volta, viene prodotta negli altoforni, dove avviene ad elevate temperature dell'ordine di 1800-2000°C il processo di carburazione dei minerali di ferro (magnetite, ematite, limonite, siderite), misti a carbon coke e ad elementi fondenti (materiali rocciosi di tipo calcareo con una bassa temperatura di fusione dell'ordine di 1200°C). In uscita dall'altoforno si genera prevalentemente ghisa, unitamente a gas poveri (riutilizzati per il riscaldamento dei forni) e loppe (prodotti a base di silice e calce riutilizzati per la produzione di cemento Portland che, a sua volta, viene impiegato per la produzione del calcestruzzo).



Minerale	Composizione	% Fe	Densità (t/m ³)
Magnetite	Fe ₃ O ₄	72.4	5.0
Ematite	Fe ₂ O ₃	69.9	5.2
Limonite	2Fe ₂ O ₃ *2H ₂ O	59.8	3.7
Siderite	FeCO ₃	48.2	3.8

1.2 Acciai da scafo: classificazione

Gli acciai da scafo di interesse navale sono suddivisi in due famiglie:

1. **Acciai ordinari (*Normal Strength Steel o NSS*)**: sono caratterizzati da una tensione di snervamento R_{eH} pari a 235 MPa e sono ampiamente utilizzati per la realizzazione di tutti quegli elementi strutturali della trave-nave non particolarmente sollecitati;
2. **Acciai ad elevata resistenza (*High Strength Steel o HSS*)**: sono caratterizzati da elevate tensioni di snervamento, normalmente pari a 315, 355 o 390 MPa, e sono normalmente adoperati per tutti quegli elementi strutturali particolarmente sollecitati, in particolare per le strutture del ponte e del fondo delle navi.

Sia gli acciai ordinari che quelli ad elevata resistenza sono allora volta suddivisi in **gradi**, in funzione della temperatura di esecuzione della prova di resilienza con Pendolo Charpy. In particolare, gli acciai devono assorbire una assegnata quantità di energia a temperatura diversa. Pertanto, gli acciai più tenaci sono quelli che assumono la quantità di energia minima richiesta alle temperature più basse. In particolare, ogni famiglia di acciai è suddivisa in 4 diversi gradi in funzione della temperatura di esecuzione della prova di resilienza, che varia da +20°C a -40°C per gli acciai ordinari e da 0°C a -60°C per gli acciai da elevata resistenza. **Gli acciai da scafo sono tutti caratterizzati da una densità pari a circa 7.85 t/m³ e un modulo di Young pari a 206 GPa.** La tabella successiva riporta schematicamente la classificazione degli acciai da scafo di interesse navale.

1.2 Acciai da scafo: classificazione

Cat.	R_{eH}	R_m	ε_u	Temperatura della prova di resilienza (°C)				
	MPa	MPa	%	20	0	-20	-40	-60
NSS	235	400-520	22	A	B	D	E	---
	315	440-590	22	---	AH32	DH32	EH32	FH32
HSS	355	490-620	21	---	AH36	DH36	EH36	FH36
	390	510-650	20	---	AH40	DH40	EH40	FH40

- R_{eH} = tensione di snervamento
- R_m = tensione massima o di rottura
- ε_u = allungamento percentuale del provino in corrispondenza del carico ultimo.

Gli acciai da scafo sono classificati mediante un codice alfanumerico, dove la lettera indica il grado dell'acciaio ed è eventualmente accoppiata ad un numero rappresentativo della tensione di snervamento in kg_f/mm^2 . Dalla tabella in figura si evince che complessivamente esistono 16 diverse tipologie di acciai da scafo, in funzione di una assegnata combinazione di tensione di snervamento e di tenacità. Inoltre tanto più è elevato il grado dell'acciaio ovvero risulta bassa la temperatura di esecuzione della prova di resilienza, tanto più è tenace l'acciaio. Gli acciai di alto grado sono normalmente adoperati per la realizzazione di quelle parti strutturali della nave che sono esposte a basse temperature come i fasciami del fianco nella zona permanentemente al di sopra del piano di galleggiamento e quelli del ponte coperto.

1.3 Acciai da scafo: composizione chimica

Acciaio	NSS				HSS	
	A	B	D	E	A,D,E	F
C max %	0.21	0.21	0.21	0.18	0.18	0.16
Mn %	>2.5C	>0.80	>0.60	>0.70	0.90-1.60	
Si max %	0.50	0.35	0.35	0.35	0.50	
P max %		0.035			0.035	0.025
S max %		0.035			0.035	0.025
Al min %	---	---	0.015	0.015	0.015	
Nb %		---			0.02-0.05	
V %		---			0.05-0.10	
Ti max %		---			0.02	
Cu max %		---			0.35	
Cr max %		---			0.2	
Ni max %		---			0.40	0.80
Mo max %		---			0.08	

Si è detto in precedenza che gli acciai sono leghe Fe-C con un tenore di C minore del 2%. In particolare gli acciai si dicono:

- **Acciai al carbonio (C)** se il tenore di manganese è < 1.0%;
- **Acciaio al carbonio-manganese (C-Mn)** se il tenore di manganese è compreso tra l'1.0% e l'1.7%.

Dalla tabella in figura, rappresentativa della composizione chimica degli acciai da scafo di interesse navale, si deduce che gli acciai ordinari sono al carbonio, mentre quelli ad alta resistenza sono al carbonio-manganese. In entrambi i casi sono inoltre presenti tracce di silicio (Si), fosforo (P), zolfo (S) e alluminio (Al). Gli acciai ad elevata resistenza hanno inoltre ulteriori elementi di lega per migliorarne le caratteristiche meccaniche.

1.3 Acciai da scafo: composizione chimica

Tutti gli elementi di lega producono, in funzione della loro concentrazione, effetti sulle caratteristiche meccaniche degli acciai e sulla loro saldabilità:

- **Carbonio (C):** aumenta la durezza e la resistenza del materiale, ma allo stesso tempo lo infragolisce e ne riduce la saldabilità. Pertanto gli acciai adoperati per impieghi strutturali che, in quanto tali, sono normalmente saldati, hanno tenori di carbonio non superiori allo 0.25%. Tenori maggiori sono utilizzati per la costruzione di organi meccanici non soggetti a saldatura;
- **Manganese (Mn):** produce effetti differenziati in funzione del suo tenore. In concentrazioni modeste migliora la resistenza e la tenacità del materiale. In concentrazioni elevate migliora la resistenza a rottura e all'usura;
- **Silicio (Si):** se presente in basse concentrazioni riduce l'effervescenza dell'acciaio, ovvero la formazione di ossidi di carbonio durante il processo di lavorazione. In elevate concentrazioni, invece, riduce la resilienza del materiale;
- **Fosforo (P) e zolfo (S):** sono impurità normalmente dannose in quanto riducono la resilienza del materiale;
- **Alluminio (Al), niobio (Nb) e vanadio (V):** riducono l'effervescenza e migliorano la resilienza del materiale;
- **Titanio (Ti), rame (Cu), cromo (Cr), nichel (Ni) e molibdeno (Mo):** migliorano le caratteristiche meccaniche del materiale, ma ne riducono leggermente la saldabilità. Tali elementi di lega sono presenti esclusivamente negli acciai HSS dove sono richieste caratteristiche meccaniche superiori.

1.4 Acciai da scafo: saldabilità

La **saldabilità** dell'acciaio dipende prevalentemente dal tenore di carbonio e diminuisce all'aumentare di tale parametro. Questo è il motivo per cui il tenore di carbonio negli acciai da scafo è particolarmente basso. Gli altri elementi di lega producono in taluni casi un peggioramento delle caratteristiche di saldabilità del materiale, che può essere stimato mediante l'introduzione del **tenore di carbonio equivalente**:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

Da tale relazione si evince che cromo, molibdeno e vanadio sono elementi che incidono particolarmente sulla saldabilità essendo caratterizzati da un fattore di riduzione pari a 1/5, al contrario nichel e rame producono effetti meno evidenti essendo caratterizzati da un fattore di riduzione pari a 1/15. In funzione del tenore di carbonio equivalente si definiscono i tre seguenti campi di saldabilità:

C_{eq} (%)	Saldabilità
≤ 0.4	Non sono richiesti trattamenti
0.4-0.6	Sono richiesti trattamenti di pre-riscaldamento
≥ 0.6	Sono richiesti trattamenti di pre e post-riscaldamento

2.1 Leghe leggere: generalità

Si definiscono **leghe leggere** quelle leghe formate prevalentemente da alluminio con ulteriori elementi quali il rame, il magnesio, il silicio, il manganese e lo zinco. L'interesse per tali leghe è determinato dai seguenti fattori:

1. **basso peso specifico:** è possibile realizzare strutture più leggere rispetto a quelle in acciaio, dal momento che il peso specifico delle leghe leggere è pari a 2.75 t/m^3 rispetto a 7.85 t/m^3 degli acciai da scafo;
2. **buone proprietà criogeniche:** la resilienza di tali materiali è scarsamente dipendente dalla temperatura;
3. **buona resistenza alla corrosione:** tali materiali sono normalmente meno sensibili ai processi di corrosione in umido che interessano le strutture navali;
4. **ottima disponibilità:** l'alluminio è, dopo l'ossigeno e il silicio, l'elemento più diffuso in natura.

Tuttavia, a tali fattori positivi si associano alcune caratteristiche che ne limitano almeno in parte la diffusione:

1. **proprietà meccaniche ad elevate temperature:** l'alluminio puro ha un punto di fusione di 660°C , inferiore rispetto a quello dell'acciaio pari a circa 1400°C . In particolare le caratteristiche meccaniche iniziano a degradarsi già a partire da 200°C e questo fattore rappresenta una criticità in caso di incendio;
2. **basse caratteristiche meccaniche:** le leghe leggere hanno caratteristiche meccaniche inferiori rispetto all'acciaio e, pertanto, la riduzione in peso dovuta al minor peso specifico è in parte controbilanciata da un sovradimensionamento delle strutture rispetto a quelle in acciaio;
3. **ridotta saldabilità:** le leghe leggere presentano maggiori criticità nel processo di saldatura con alterazione delle caratteristiche meccaniche nelle zone interessate dal processo termico.

2.2 Leghe leggere: classificazione

Le **leghe leggere** sono classificate in 9 **serie**, caratterizzate da un codice numerico a quattro cifre in cui la prima cifra è quella indicativa della serie:

- **Serie 1000:** sono in alluminio puro al 99%. Presentano una modesta resistenza meccanica con un carico al limite di proporzionalità di circa 28 MPa e non sono pertanto usate per impieghi strutturali ma solo come rivestimenti protettivi in forma di placcatura;
- **Serie 2000:** sono leghe alluminio-rame-magnesio caratterizzate da buone caratteristiche meccaniche e sono diffuse soprattutto in ambito aeronautico;
- **Serie 3000:** sono leghe alluminio-manganese con bassa resistenza meccanica e buona resistenza alla corrosione. Non sono normalmente adoperate per impieghi strutturali;
- **Serie 4000:** sono leghe alluminio-silicio simili alle precedenti e normalmente non adoperate per impieghi strutturali;
- **Serie 5000:** sono leghe alluminio-magnesio, presentano buone caratteristiche meccaniche e buona resistenza alla corrosione anche in ambito marino e sono, pertanto, tra le più diffuse in ambito navale;
- **Serie 6000:** sono leghe alluminio-silicio-magnesio: sono simili alle precedenti, presentano una minore resistenza alla corrosione ma una migliore saldabilità. Anche queste sono molto diffuse in ambito navale;
- **Serie 7000:** sono leghe alluminio-zinco normalmente adoperate per applicazioni aerospaziali;
- **Serie 8000:** sono tutte le altre leghe non rientranti nelle categorie precedenti;
- **Serie 9000:** sono leghe di tipo sperimentale.

2.3 Leghe leggere: caratteristiche meccaniche

Le **leghe leggere** di più vasto impiego nelle applicazioni navali sono quelle alluminio-magnesio (Al-Mg) della serie 5000. In particolare, le leghe 5083 e 5086 presentano le migliori caratteristiche meccaniche e di resistenza alla corrosione. In particolare, la tensione al limite di proporzionalità è fortemente dipendente dalla condizione di tempra (temper condition) della lega. La condizione di tempra rappresenta l'insieme dei trattamenti termici eseguiti a valle del processo di formazione della lega. La tensione di snervamento varia normalmente tra 125 e 215 MPa ed è, pertanto, inferiore rispetto a quella degli acciai da scafo ordinari.

Lega	Condizione di tempra	Tensione di snervamento (MPa)
5083	O/H111	125
5083	H112	125
5083	H116	215
5083	H32/H321	215
5383	O/H111	145
5383	H116/H321	220
5383	H34	270
5086	O/H111	100
5086	H112	125
5086	H116	195
5086	H32/H321	185
5754	O/H111	85

- **O=ricottura** (dopo il processo di raffreddamento si riscalda il materiale a temperature comprese tra 350 e 380 °C per un tempo variabile tra 30 min e 4 ore e lo si raffredda ad aria;
- **H1=incrudimento** (il materiale viene deformato plasticamente a freddo per incrementarne la tensione di snervamento. I numeri successivi rappresentano il grado di indurimento per deformazione);
- **H2=incrudimento e parziale ricottura**;
- **H3=incrudimento ed invecchiamento ad alta temperatura** (il materiale viene sottoposto ad un ulteriore trattamento termico che ne aumenta la resilienza).