

# La Metallurgia Italiana

N. 2  
Febbraio 2012



Organo ufficiale  
dell'Associazione Italiana di Metallurgia  
Rivista fondata nel 1909

Poste Italiane SpA - Speciezione in Abbonamento Postale - DL 353/2003 (conv. in L. 27/02/04 n. 46) art. 1, comma 1 DCB UD.  
Anno 104, n. 2 - Febbraio 2012 - Periodico mensile



CONSEDT - Viale Europa Unita, 29 - 34073 Grado (GO) - Tel. 0431 876070 - Fax 0431 886507 - [www.consedt.com](http://www.consedt.com) - [info@consedt.com](mailto:info@consedt.com)

# La Metallurgia Italiana

mensile dell'Associazione Italiana di Metallurgia  
fondata nel 1946



**Direttore Responsabile:**  
Gianangelo Camona

**Comitato scientifico - Editorial Panel:**

Emma Angelini, Franco Bonollo, Riccardo Carli,  
Luciano Fassina, Giovanna Gabetta,  
Carla Gambaro, Gian Luca Garagnani, Juan Carlos Gonzales,  
Bevis Hutchinson, Marina La Vecchia, Chong Soo Lee,  
Carlo Mapelli, Gunther Merckling, Alberto Molinari,  
Roberto Montanari, Elena Pereloma, Claudia Rinaldi,  
Mario Rosso, Hans J. Roven, Peter Schiller, Dieter Senk,  
Piotr R. Scheller, Pierre Soullignac, Jean-Marc Steller,  
George F. Vander Voort

**Segreteria di redazione:**  
Antonella Donzelli

**Comitato di redazione:**  
Federica Bassani, Gianangelo Camona,  
Antonella Donzelli

**Direzione e redazione:**  
AIM - P.le R. Morandi 2 - 20121 Milano  
tel. 02 76 02 11 32 - fax 02 76 02 05 51  
met.aim@aimnet.it - www.aimnet.it



**Gestione editoriale, pubblicità e abbonamenti:**  
CONSEDT sas

Viale Europa Unita, 29 - 34073 Grado (GO)  
Tel. 0431 87 60 70 - fax 0431 88 65 07  
info@consedit.com - www.consedit.com

**Abbonamento annuale (10 numeri):**

Italia: 83,00 € - Estero: 124,00 €

Per sottoscrivere l'abbonamento è sufficiente effettuare un bonifico bancario intestandolo a CONSEDT sas e utilizzando il seguente codice IBAN (Credito Cooperativo Friuli):

IT 19 1 07085 64590 015210014135

Si prega quindi di darne avviso tramite mail, indicando nome, cognome, azienda, indirizzo e telefono, a: abbonamenti@consedit.com. L'abbonamento decorrerà dal primo numero raggiungibile a pagamento avvenuto.

**Garanzia di riservatezza per gli abbonati:**

Le informazioni custodite nell'archivio elettronico dell'Editore verranno utilizzate ai sensi del D.Lgs. 196/03. L'Editore garantisce la massima riservatezza dei dati forniti dagli abbonati e la possibilità di richiederne gratuitamente la rettifica o la cancellazione scrivendo a:

CONSEDT sas - Responsabile Dati  
Viale Europa Unita, 29 - 34073 Grado (GO)  
abbonamenti@consedit.com

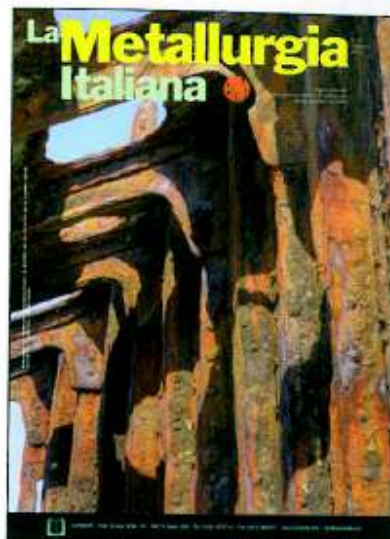
La riproduzione degli articoli e delle illustrazioni è permessa solo citando la fonte e previa autorizzazione della Direzione della rivista.

Reg. Trib. Milano n. 499 del 18/9/1948.

Sped. in abb. Post. - D.L.353/2003 (conv. L. 27/02/2004 n. 46)  
art. 1, comma 1, DCB UD

Consedit sas è iscritta al Roc con il num. 4109

Stampa: Poligrafiche San Marco sas - Cormons (GO)



N. 2 Febbraio 2012 Anno 104  
ISSN 0026-0843

## MEMORIE

### Corrosione

#### Rivestimenti anticorrosivi

che consentono il risparmio energetico  
e riducono l'impatto ambientale

*P. Donelli, B. Picoltrini, L. Donelli* ..... 3

#### Integration of intrusive and non-intrusive methods for corrosion and sand/erosion monitoring

*K. Wold, R. Stoen, M. Rapone* ..... 13

#### Attività di laboratorio collegate a casi di corrosione in ambito nautico: ricerca delle cause di danneggiamento

*L. Rolla, V. De Luise, C. Dellabiancia* ..... 19

#### Studio dell'ossidazione a caldo di materiali altolegati per caldaie industriali

*M. Rizzi, E. Guerrini, S. P. Trasatti* ..... 29

### Impianti e attrezzature

#### Un impianto innovativo nella filiera del recupero della scoria da forno elettrico

*M. Svanera, S. Panza, F. Uberto, R. Roberti* ..... 37

#### Strip Annealing Furnaces for New Galvanizing Lines

*D. Astesiano, D. Ghira, C. Leoncini* ..... 45

# Rivestimenti anticorrosivi che consentono il risparmio energetico e riducono l'impatto ambientale

P. Donelli, B. Picoltrini, L. Donelli

*Il risparmio energetico e la tutela dell'ambiente sono sempre più considerati una priorità. I rivestimenti protettivi, se è stato specificato il ciclo idoneo e lo stesso è stato correttamente applicato, possono giocare un ruolo rilevante nel raggiungimento degli obiettivi citati. Il presente documento espone una serie di tecnologie e soluzioni specificatamente sviluppate per la protezione di scambiatori di calore liquido/liquido ed aria/liquido ed approfondisce come l'utilizzo di rivestimenti dotati di elevate resistenze alla corrosione aumenti anche l'efficienza degli apparecchi riducendo significativamente i costi di gestione, come risultato assolutamente non trascurabile connesso alla corretta protezione anticorrosiva.*

## Parole chiave:

corrosione, rivestimenti, ambiente

### INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi decenni lo stimolo verso la conservazione dell'energia e la salvaguardia dell'ambiente è continuamente cresciuto. Scopo di questa presentazione è di illustrare casi specifici dove l'utilizzo di trattamenti anticorrosivi raggiunge con efficacia ambedue i risultati.

Il modo più immediato di preservare energia e materie prime è di impedire che le strutture (sia metalliche che in calcestruzzo) si degradino quando esposte all'atmosfera od immerse in un fluido. Infatti, il processo di fabbricazione di una tonnellata di acciaio è energivoro; richiede l'equivalente di due barili di petrolio. La tecnologia dei rivestimenti si è costantemente sviluppata. Oggi una vita attesa di un ciclo protettivo (durabilità come definita nel paragrafo 4.4 della ISO 12944&1) di 15 anni per esposizione in atmosfera aggressiva non è più da considerarsi un'eccezione.

Il rivestimento interno delle tubazioni, ad esempio, è da tempo utilizzato quale mezzo per aumentare il flusso di fluido a parità di consumo energetico.

Questa relazione si concentra su alcuni esempi specifici correlati all'efficienza del processo di trasmissione di calore ed alla riduzione del coefficiente di attrito.

Specificatamente saranno mostrate applicazioni sulle due più diffuse tipologie di scambiatori di calore:

1. Scambiatori liquido/aria a pacchi alettati ed air coolers.
2. Scambiatori liquido/liquido a fascio tubiero (lato mantello e lato tubi) 2011.

### SCAMBIATORI LIQUIDO-ARIA ED AIR COOLERS

Questo tipo di scambiatori è diffusamente utilizzato nel settore del condizionamento/riscaldamento dell'aria ed ha elevata efficienza di scambio termico.

La grande maggioranza degli scambiatori liquidi/aria standard sono costruiti con tubi in rame e alette in alluminio, anche se sono state nel tempo soluzioni alternative sia in termini di materiale (es. rame&rame) che di design (es. il cosiddetto multi-channel).

Punto critico degli scambiatori rame&alluminio è proprio la connessione tra rame ed alluminio. Finché le alette sono saldamente connesse ai tubi, senza interstizi od interposizione di incrostazioni di natura organica o di prodotti di corrosione, lo scambio termico risulta ottimale. Il deposito di polveri, pollini ed altri inquinanti sulle alette, riduce però il flusso d'aria e la superficie di scambio con un impatto negativo sul coefficiente di scambio termico.

### La corrosione

La connessione tra i tubi in rame e le alette in alluminio è uno dei punti più critici, per quanto concerne la corrosione di un'unità di condizionamento.

L'alluminio ed il rame formano una coppia galvanica con una differenza di potenziale rilevante (valori rilevati in acqua dolce: Al - 0.8 [V]; Cu - 0.2 [V]). Nel momento in cui i due materiali sono a contatto ed in presenza di un elettrolita, si genera un

P. Donelli  
Impresa Donelli, Legnano

B. Picoltrini  
Donelli Alexo, Cuggiono

L. Donelli  
New technologies and solutions  
Donelli Group, Legnano

FIG. 1  
Corrosione di  
coil Cu-Al.  
Cu-Al coil  
corrosion.



flusso di elettroni con conseguente ossidazione.

Il processo di dissoluzione anodica dell'alluminio genera prodotti di reazione, così che la connessione tra rame ed alluminio è sostituita da un contatto tra rame ed ossidi di alluminio. La conducibilità termica dell'ossido di alluminio è nettamente inferiore a quella dell'alluminio e, conseguentemente, la trasmissione di calore diminuisce in modo sensibile.

Il comportamento dei materiali in ambiente aggressivo può essere riprodotto da test accelerati quali ad esempio l'ASTM B117 (camera in nebbia salina), frequentemente utilizzato per riprodurre l'aggressione di un'atmosfera marina.

## L'inquinamento atmosferico

Quando lo sporco dovuto all'inquinamento che si deposita sulle alette (sotto forma di microrganismi, polvere, ecc...) limita la portata d'aria che attraversa lo scambiatore, la temperatura dell'aria che fluisce sopra le alette in alluminio aumenta, determinando un quantitativo di aria inferiore a parità di potenza assorbita.

Quanto sopra causa una diminuzione della differenza di temperatura tra il liquido (o gas) che passa attraverso i tubi in rame e l'aria che fluisce sopra le alette. Ad un minor HT corrisponde naturalmente uno scambio termico inferiore.

Come già detto precedentemente la corrosione ed i depositi di inquinanti determinano una bassa conducibilità all'interfaccia rame/alluminio, risultando in una minore differenza di temperatura tra il liquido/gas e l'aria esterna, rendendo insufficiente lo scambio termico per ottenere il condizionamento richiesto. Per compensare questo problema è necessario innalzare la temperatura di condensazione, così da creare nuovamente il HT di progetto tra il liquido/gas nei tubi e l'aria che fluisce sopra le alette.

L'aumento di temperatura riporta la capacità di scambio termico al valore iniziale ma, per aumentare la temperatura di condensazione occorre aumentare la pressione di condensazione (pressione di scarico del compressore) e pertanto il consumo energetico.

Il nuovo ciclo di refrigerazione seguirà pertanto le linee rosse nel diagramma sottoriportato, ove è evidenziata la potenza aggiuntiva richiesta dal compressore.

## Perdita di efficienza di uno scambiatore di calore in atmosfera tropicale

I grafici delle Figg. 3, 4 e 5 mostrano la perdita di efficienza di differenti tipologie di scambiatori quando ubicati a circa 25 metri dal mare in atmosfera tropicale.

Dopo 6 mesi:

- Lo scambiatore con 17 FPI (alette per pollice) ha perso più del 40% della propria capacità di scambio iniziale;
- Lo scambiatore con 22 FPI (alette per pollice) ha perso più del 70% della propria capacità di scambio iniziale.

Quanto sopra evidenzia come la densità delle alette (e pertanto un'infiorata sezione di passaggio ed una maggiore superficie di deposito) sia un fattore importante che determina la perdita di capacità di scambio in ambiente corrosivo.

Il grafico di Fig. 4 mostra come risulti determinante l'effetto della quantità del flusso d'aria. Ambedue gli scambiatori hanno le stesse dimensioni e ad alette piane. La perdita di capacità con una velocità di flusso di 400 [fpm] (~2 [m/s]) è più del 40%, mentre con una velocità di 600 [fpm] (~3 [m/s]) la perdita è maggiore del 60%.

La velocità dell'aria, e conseguentemente la portata, è un parametro determinante; maggior quantità di aria significa maggior quantità di contaminanti ed aggressivi per le superfici metalliche e pertanto più depositi e più corrosione.

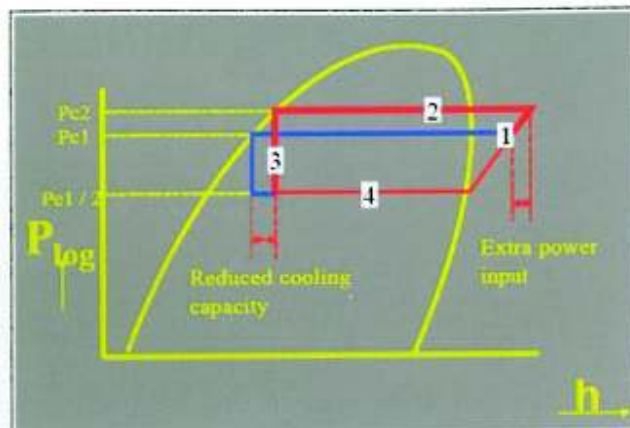


FIG. 2 Effetto della corrosione su consumo energetico.

Corrosion influence on power consumption.

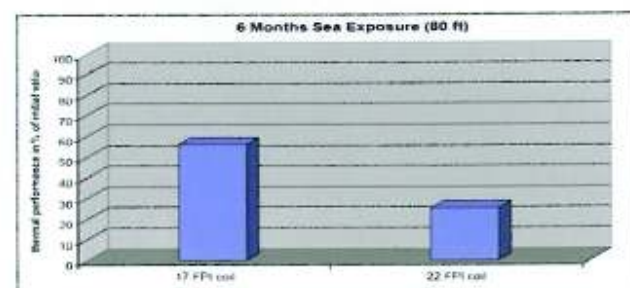


FIG. 3 Esposizione per 6 mesi a ca. 25 metri dal mare.

6 months exposure at 25 meters from the shore line.

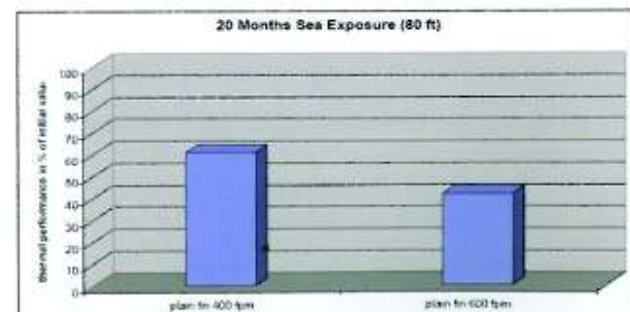


FIG. 4 Esposizione per 20 mesi a ca. 25 metri dal mare.

20 months at 25 meters from the shore line.



FIG. 5 Confronto tra alette non verniciate e pre-verniciate.

Comparison between pre-coated and uncoated fins.

Al fine di contenere la corrosione sono stati utilizzati alette ricavate da fogli di alluminio preverniciato. Il metallo è rivestito con uno strato molto sottile (dell'ordine di 3 & 5 [Lm]) di resina vinilica ed epossidica, prima di essere tagliato e piegato. Proprio il processo di taglio e piegatura però, rimuove dai bordi la protezione, compromettendo fortemente l'efficacia del rivestimento applicato. -

La figura 5 mostra come l'efficacia dello scambio termico degli scambiatori preverniciati sia migliore rispetto a quello di quelli con alette non verniciate, ma comunque sconti una rilevante perdita di efficienza.

Il grafico consente anche di evidenziare come la tipologia di alette giochi un ruolo importante, le alette turbolenziate sono molto più esposte a corrosione ed incrostazione rispetto a quelle piane.

### Rivestimenti protettivi applicati dopo la costruzione

Le considerazioni precedenti hanno portato allo sviluppo di cicli protettivi applicabili a batteria assemblata [1]. Sono utilizzati rivestimenti fenolici termoindurenti, che offrono rilevanti proprietà anticorrosive quando esposti ad atmosfere chimicamente aggressive, ma hanno una limitata resistenza ai raggi ultravioletti. Risultati estremamente positivi sono stati invece ottenuti con l'utilizzo di specifici sistemi poliuretanic applicati a spruzzo.

### Ciclo applicativo tipico su batteria completa

Il ciclo tipico di applicazione su batterie rame/alluminio, che dispone di positivi risultati con permanenza fino a 4.000 ore in nebbia salina può così essere riassunto:

#### a) Preparazione superficiale

- Pulizia delle superfici con acqua ad elevata temperatura ed una pressione di ca. 10 [MPa], additivata con sgrassante ecocompatibile;
- Successivo risciacquo con acqua a basso contenuto di cloruri;
- Essiccazione a mezzo flussaggio con aria compressa disidratata;
- Pettinatura delle alette così da ottimizzare la penetrazione della pittura.

#### b) Rivestimento anticorrosivo per il pacco alettato

- Applicazione di un primo strato di pittura poliuretanica con cariche di alluminio, così da minimizzare la perdita di conducibilità termica allo 0,5&3,0%, per uno spessore di 25 [µm];
- L'applicazione avviene con una specifica attrezzatura ed una tecnica sviluppata ad hoc in grado di raggiungere la copertura completa delle alette per una profondità massima di 250&300 [mm] in batterie con passo di 2,0&2,5 [mm].

#### c) Rivestimento anticorrosivo per il casing

- Applicazione di un primo strato di primer;
- Applicazione di uno strato di finitura poliuretanica.

E' importante evidenziare come la procedura sopradescritta possa essere attuata anche in cantiere per interventi di manutenzione, fatta salva un'adeguata preparazione superficiale e le precauzioni del caso, quale compartimentazione ecc...

### Controlli ed ispezioni

L'efficacia del rivestimento protettivo è subordinata ad una corretta preparazione superficiale ed applicazione, che è verificata con i seguenti principali controlli:

- Controllo delle condizioni ambientali durante le diverse fasi;
- Controllo di grado di pulizia con apposita soluzione;
- Controllo visivo a mezzo microendoscopio di derivazione medica (testa di 1,7 [mm]);

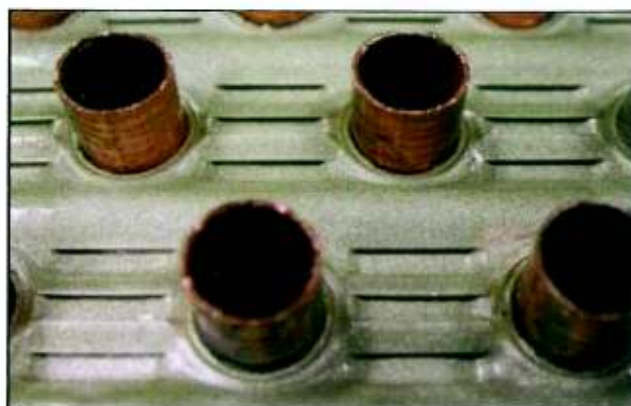


FIG. 6 Aletta turbolenzata rivestita.

Coated louvered fin.



FIG. 7-8 Applicazione in stabilimento su scambiatore alettato.

Shop application on finned pack heat exchangers.



FIG. 9-10 Applicazione in cantiere su tubi alettati.

Site application on finned tubes

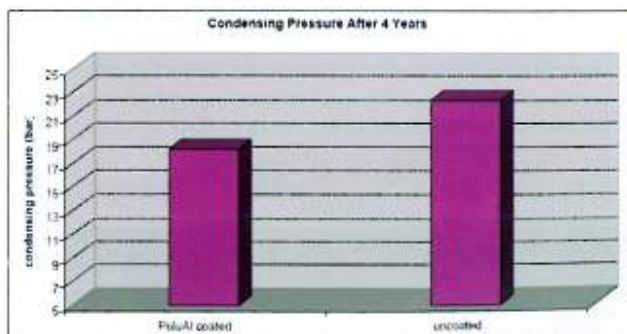


FIG. 11 Pressione di condensazione dopo 4 anni.

Condensation pressure after 4 years.

## Caso reale

Il grafico sottostante riporta le risultanze di due batterie che hanno lavorato in parallelo per 4 anni in Honk Kong:

La differenza della pressione di scarico tra l'unità con e senza rivestimento protettivo è di 4.1 [bar] che, per il liquido refrigerante, si traduce in una differenza di ben 9°C.

Ciò porta non solo ad una riduzione di circa il 9% nella capacità refrigerante, ma anche allo scadimento dell'efficienza. Il COP (coefficiente di prestazione) del refrigerante corrosivo è risultato di 3.0 contro 3.4. A fronte di ciò il consumo energetico dello scambiatore corrosivo è maggiore di circa 12% pur a fronte di una capacità refrigerante inferiore del 9%.

## INTERVENTO DI LAVAGGIO A SECCO SU BATTERIE

Come già precedentemente accennato il rivestimento può essere anche applicato su unità esercite, ed in tale caso la preparazione superficiale risulta un fattore chiave per l'efficacia dello stesso. Viene di seguito descritto un caso pratico ove è stato possibile verificare i benefici ottenuti anche già solo con tale attività propeudeutica all'applicazione del rivestimento protettivo.

### Antefatto

Due unità dotate di 4 serie di batterie a pacchi alettati, due montate in verticale e due a "V", installate in un grande complesso di uffici, anche se utilizzate in periodi non particolarmente caldi, non riescono a raggiungere le temperature richieste e vanno in blocco causa surriscaldamento. Si ritiene che, non avendo riscontrato problemi di sorta sul funzionamento dei motori, il problema sia legato ad un insufficiente scambio delle batterie, da qui la richiesta di ispezionarle.

### Programma di manutenzione delle unità precedentemente eseguito

Il protocollo di manutenzione attuato precedentemente dalla gestione è composto da:

- Sgrassaggio mensile di tutte le superfici di scambio con acqua calda addolcita ad alta pressione, con apposito agente sgrassante, spinta in senso opposto alla direzione del flusso d'aria e successivo risciacquo con acqua;
- Nel tentativo di risolvere il problema, nell'ultimo periodo è stato aggiunto un lavaggio settimanale con aceto di vino bianco (al 6% acidità) non diluito con acqua e senza successivo risciacquo;
- L'utilizzo dell'aceto, soprattutto senza risciacquo, ha avuto un'azione negativa non solo su contaminanti, ma anche sulle alette in alluminio, accelerando i processi di corrosione.

### Verifiche effettuate e condizioni riscontrate

- Ispezione visiva: alette turbolenziate passo 1,6 [mm] in disordine stato senza evidenti danneggiamenti meccanici e/o strutturali. Si evidenzia la presenza di zone in cui appaiono in corso dei processi di ossidazione;
- Ispezione visiva a campione del pacco alettato a mezzo micro-



Uncoated fouled and corroded units.

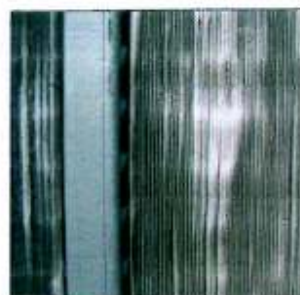


FIG. 12-13  
Le due unità con principali problemi di funzionamento.



Same units after proprietary abrasive cleaning.



FIG. 14-15  
Le due unità al termine del lavaggio a secco.

endoscopio: o Il passo ridotto delle alette e la "turbolenza" hanno permesso un'ispezione visiva all'interno dei primi 30&40 [mm] del pacco: o E' stato possibile riscontrare la frequente ostruzione completa o parziale degli interstizi tra le alette causata da accumuli di depositi derivanti da polveri sottili, particolato atmosferico e particelle organiche di colore grigio e giallastro (nella fattispecie strobili di un vicino cedro del Libano);

- Controllo pH.

### Intervento di pulizia effettuato

E' stata effettuato un lavaggio a secco svolto secondo un metodo brevettato, mediante apparecchiatura pneumatica che eietta, a bassa pressione (circa 2 bar) sodio bicarbonato di particolare granulometria o, in caso di concrezioni di particolare consistenza, carbonato di magnesio.

In questo modo si ottiene:

- Minimo effetto abrasivo sui fasci e sulle alette;
- Sicurezza ambientale (il prodotto è atossico);
- Velocità di esecuzione;
- Continuità di esercizio nel corso delle operazioni (fatto che inoltre agevola l'espulsione dei contaminanti rimossi dalle superfici).

Dato	Ore 9.00 (prima della pulizia)	Ore 16,45 (dopo la pulizia)
TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE (limite massimo oltre cui la macchina va in blocco)	27°C	22°C
TEMPERATURA LIQUIDO CONDENSATO	32°C	30°C
TEMPERATURA AMBIENTALE	5°C	8°C
CARICO DI LAVORO	45%	43%

TAB. 1  
Confronto prestazioni  
unità prima e dopo pulizia  
a secco.

Efficiency comparison of the  
2 units before and after  
cleaning.

Al termine dell'attività di pulizia il gruppo interessato dal trattamento risulta totalmente pulito e le diverse ostruzioni ed ossidazioni sono completamente rimosse.

## Efficacia ai fini del contenimento dei costi di esercizio

Il raffronto tra le condizioni operative prima e dopo la pulizia è facilmente riscontrabile dai dati sottoriportati, rilevati dai tecnici della società che gestisce l'impianto (Tab. 1).

La Temperatura di Condensazione è l'elemento che consente di stabilire la performance dell'impianto ed il relativo consumo di energia elettrica.

Nonostante la stagione fosse tale per cui il carico di lavoro delle batterie è limitato, dai dati di cui sopra si evince che, con il solo intervento di pulizia, la temperatura di condensazione è stata ridotta di ben 5°C.

Il corrispondente risparmio energetico è valutabile, in funzione del grado di sporco prima della pulizia, in un valore compreso tra il 15% e il 25%.

## Ciclo protettivo

Al fine di garantire il contenimento energetico evidenziato al punto precedente riducendo il fattore di sporco e, nel contempo, garantendo la protezione dalla corrosione, è possibile prevedere l'applicazione del ciclo poliuretano di protezione dettagliato precedentemente al paragrafo.

Il rivestimento riduce l'accumulo di sporco (essendo sensibilmente più liscio rispetto all'aletta in alluminio) allungando gli intervalli di pulizia e semplificandone notevolmente l'esecuzione, che può così avvenire come sotto descritta:

- Sgrassaggio con acqua calda ad alta pressione delle superfici da rivestire con apposito agente sgrassante;
- Risciacquo della batteria con acqua fredda fino alla totale rimozione degli agenti utilizzati;
- Rimozione con aria compressa dell'acqua depositata e successiva asciugatura;
- Allineamento delle alette.

## SCAMBIATORI LIQUIDO/LIQUIDO

Gli scambiatori di calore, apparecchiatura onnipresente sia negli impianti petrolchimici che di produzione energia, possono essere costruiti in acciaio al carbonio, inossidabile, titanio, rame, ottone od altre leghe.

Presupponendo che la scelta del materiale sia stata tale da prevenire corrosione ed erosione da parte del fluido trasportato, vi è un altro fattore che influenza fortemente il coefficiente di scambio termico e, conseguentemente, l'efficienza dello scambiatore, cioè lo sporco.

Lo sporco per effetto di incrostazione è un fattore critico per il fascio tubiero dello scambiatore, tanto che ove sia utilizzata l'acqua mare per il raffreddamento, il grado di sporco risulta a volte così elevato da richiedere la sostituzione del fascio in quanto non sono più efficaci né la pulizia ad alta pressione né quella meccanica [2].

## I rivestimenti polimerizzanti a forno

Sono da tempo stati sviluppati specifici rivestimenti polimerizzanti in forno utilizzabili per scambiatori in acciaio al carbonio, acciai inossidabili ed altre leghe [3].

I rivestimenti, principalmente a base di resine fenoliche ed epossifenoliche termoindurenti, oltre a possedere elevate proprietà anticorrosive, garantiscono una trasmissione di calore quasi costante, prevenendo lo sporco.

I rivestimenti devono agire come barriera per gli aggressivi quali  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $NO_2$  acqua e gas ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2S$ ), ed essere stabili in immersione a temperature elevate, fino a 220°C, per



FIG. 16-17 Scambiatori operanti in parallelo per due anni, uno dei quali rivestito.

Two heat exchangers, only the one on the right coated, operating in parallel for two years.

un lungo periodo.

Leghe in titanio, acciai inossidabili, leghe di rame ecc. sono utilizzate ampiamente sia per il lato tubi che per il lato mantello degli scambiatori, eliminando i problemi di corrosione, ma questi materiali non hanno caratteristiche anti sporco, ed hanno coefficienti di scambio termico inferiori a quello dell'acciaio al carbonio.

Inevitabilmente l'applicazione di uno strato di resina organica, sebbene a basso spessore (nell'ordine dei 200 micron), riduce nella fase iniziale il coefficiente di scambio termico, per quanto di un valore limitato ad un massimo del 7%.

Tuttavia in un tempo molto breve, per effetto dello sporco che riduce fortemente il coefficiente di scambio termico, la situazione è ribaltata e l'efficienza dello scambiatore rivestito (sia questo costruito in acciaio al carbonio che in altre leghe) risulta superiore e rimane pressoché costante per lungo tempo.

A ciò si aggiunga che il numero di fermate per la pulizia può essere ridotto, che l'operazione risulta molto più rapida, e che il fattore di sporco di progetto può essere ridotto.

## Caso pratico

L'esempio seguente dimostra il considerevole risparmio energetico ottenibile con il rivestimento, ipotizzando un valore di scambio termico di uno scambiatore nuovo non rivestito pari a 800 [kcal/m<sup>2</sup>h°C].

- Dopo circa due mesi di servizio con acqua mare lo scambio si riduce a circa 600 [kcal/m<sup>2</sup>h°C] per effetto dello sporco, e dopo circa 19 mesi, pur con pulizie con acqua in pressione, il valore decresce ulteriormente a circa 350 [kcal/m<sup>2</sup>h°C]; a questo punto lo scambiatore va posto in manutenzione per la pulizia;
- Uno scambiatore rivestito con una resina fenolica polimerizzante in forno, operante in parallelo nello stesso impianto, ha

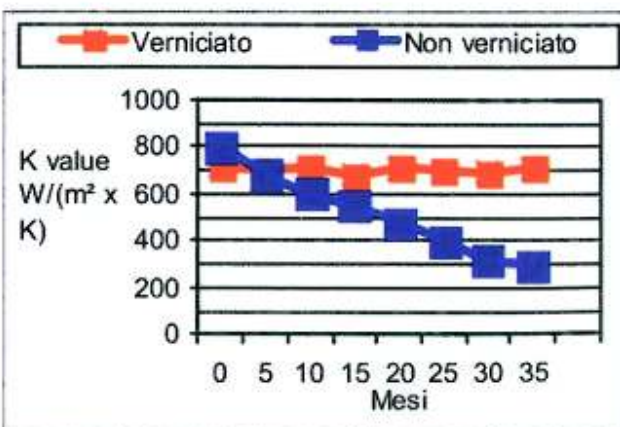
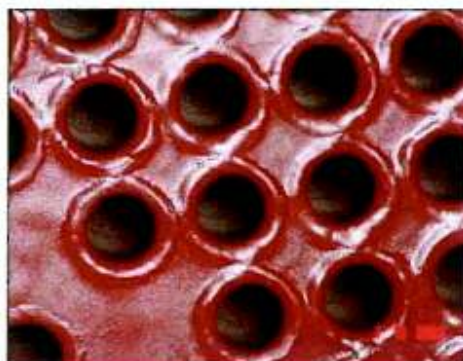


FIG. 18 Confronto tra scambiatore verniciato e non verniciato.

Comparison between coated and uncoated exchanger.



**FIG. 19-20**  
**Fase di sabbiatura dello scambiatore.**  
*Heat exchanger tube-bundle blasting.*



**Fig. 21-22**  
**Applicazione interno tubi.**  
*Application inside the tubes.*

lavorato per 3 anni senza necessità di pulizia e con uno scambio termico pressoché costante di circa 750 [kcal/m<sup>2</sup>h°C];

- Il grafico sottostante riproduce il confronto tra i due scambiatori.

### Applicazione dei rivestimenti polimerizzanti a caldo su fasci tubieri

#### a) Preparazione superficiale

Come per tutti i rivestimenti anticorrosivi, la preparazione superficiale risulta anche in questo caso il fattore determinante per il successo e la durata nel tempo della protezione.

Dopo aver proceduto ad un lavaggio sgrassante con acqua in temperatura ed in pressione, ciascuno dei tubi deve pertanto essere sabbiato con uno speciale ugello, utilizzando abrasivo di idonea granulometria e di composizione variabile in funzione del materiale di costruzione dei tubi (corindone, garnet, sfere di vetro ecc...).

Il grado di pulizia va spinto fino al Sa 3 ISO 8501&1/SSPC SP 5, con un profilo di 40 ÷ 60 [µm], necessario a garantire l'adesione del rivestimento.

Le prime decine di tubi sono ispezionate con il videoendoscopio così da verificare il grado di pulizia e determinare i parametri dell'operazione di sabbiatura (pressione, velocità di traslazione ecc...).

A sabbiatura completata, mantenendo sempre lo scambiatore in cabina con bassa umidità relativa (ed eventualmente riscaldata), viene effettuata una soffiatura accurata con aria disidratata.

#### b) Applicazione del rivestimento

I rivestimenti polimerizzanti in forno sono miscele complesse di resine termoindurenti e vengono applicate con una tecnica specifica di flow&coating in 4÷6 strati.

Per ciascun scambiatore, in funzione del disegno e delle dimensioni, vanno determinati i parametri applicativi, quali la viscosità della resina, l'inclinazione, la velocità di rotazione, che risultano fondamentali per assicurare la costanza dello spessore e la continuità del film su tutti i tubi e per tutta la lunghezza degli stessi.

E' opportuno evidenziare come differenze locali di spessori esporrebbero il rivestimento a sollecitazioni interne, dovute alla temperatura, tali da causarne la rottura.

Lo spessore complessivo del rivestimento varia, in funzione della tipologia di resina e del servizio, tra 180 [µm] e 220 [µm].

Dopo l'applicazione di ciascuno strato viene effettuata una prepolimerizzazione in uno specifico forno ventilato e con accurato controllo dell'uniformità di temperatura, mantenuta tra 160°C ÷ 180°C.

A controlli effettuati, viene poi eseguita la polimerizzazione finale a temperature maggiori, che variano in funzione del tipo di resina, ottenendo così un rivestimento duro ma flessibile, liscio, idrofobico e pertanto con proprietà di anti&sporramento.

#### c) Controllo qualità

Prima della polimerizzazione finale il 100% dei tubi è sottoposto ad un controllo della porosità secondo la norma NACE RP 0188 con il metodo a spugna bagnata, seguito da una videoispezione con endoscopio, così da rilevare ogni eventuale non con-



**FIG. 23** **Tubo esercito con blistering.**  
*Inner tube blistering after service.*



formità.

Lo spessore viene controllato con misuratore elettromagnetico non distruttivo.

Gli stessi test possono essere poi eseguiti quale controllo di rivestimenti su scambiatori eserciti.

#### IL RUOLO DELL'ISPETTORE

Quanto esposto rende evidente come le necessità di un elevato standard di qualità implichi la presenza di un ispettore di prodotti vernicianti qualificato che operi quale terza parte durante tutte le fasi di lavorazione con funzione di:

- Qualifica degli operatori;
- Definizione del Piano di Controllo Qualità;
- Predisposizione delle aree campione;
- Controlli e verifiche per l'accettazione a fine lavori;
- Verifiche periodiche delle condizioni del rivestimento;
- Verifica al termine del periodo di garanzia.

L'importanza di tale figura ha portato fin dai primi anni '80 la National Association of Corrosion Engineers a mettere a punto un programma in più fasi per la certificazione di ispettori di prodotti vernicianti "Coating Inspector Program", che è universalmente riconosciuto dai maggiori committenti internazionali, dalle agenzie governative e militari degli Stati Uniti, e recente-



FIG. 24  
Nace Coating  
Inspector Program.

mente dall'International Maritime Organization per la verifica periodica dei natanti.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Blygold International, Internal Knowledge and Research
- [2] Prevention of fouling and incrustation on heat&transfer surfaces, Hydrocarbon Processing, Luglio 2005
- [3] Saekaphen GmbH, Internal Knowledge and Research

### Abstract

## How coatings contribute to energy saving and environmental preservation while protecting from corrosion

Keywords: corrosion, coatings, environment

#### LIQUID-TO AIR HEAT EXCHANGERS AND AIR COOLERS

This type of exchangers is broadly used in the HVAC/R market and has high heat conductivity ratings.

Standard liquid-to-air heat exchangers are made with copper tubes and aluminum fins; a weakness in this design is potentially the joint between the copper and aluminum making it the more corrosion sensitive parts of an air-conditioning unit.

As long as the fins are tightly joined to the copper tube, without gaps or interference of organic layers or corrosive products, the heat transfer is optimal; pollution on the fins will also impair the heat transfer of a heat exchanger. When corrosion occurs, the joint that existed between copper and aluminum is replaced by a copper aluminum oxide joint; since the heat conductivity of aluminum oxide is much lower than that of un-corroded aluminum significantly the heat transfer between copper tubes to aluminum fins is significantly decreased.

Corrosion and pollution result in a lower temperature difference between liquid/gas and outside air, causing the heat transfer to be insufficient for proper air-conditioning; to compensate for this problem the condensing temperature must be raised. An elevated condensing temperature will create a greater temperature difference between the liquid/gas in the tubes and the air passing over the fins, this increased temperature difference will return the heat transfer capacity back to normal. The elevated condensing temperature/pressure results in reduced cooling capacity and increased power demand (energy consumption) from the compressor.

Outstanding performances have been obtained by the post-fabrication use of a proprietary polyurethane-based spray applied ambient temperature curing system which withstands 4.000 hour salt-spray test.

The special spray application equipment is capable of achieving full coverage on most coil designs even the internal fin rows and a dry soft abrasive cleaning system has been developed for maintenance operations of already installed and corroded fan coils.

#### LIQUID/LIQUID HEAT EXCHANGERS

Heat exchangers and air coolers are ubiquitous equipment both in the petrochemical and in the power industry; they may be made of carbon steel, corrosion resistant alloys, titanium, copper-brass etc..

Assuming that the choice of the material has been such as to prevent the corrosion/erosion from the fluid, there is another major factor that influences the heat transfer coefficient and, consequently, the efficiency of the equipment: fouling.

Fouling by scale deposits is a critical issue for heat exchanger tubes, therefore a reduction of this phenomenon leads to a better heat transfer and, consequently, energy saving.

When seawater is used as cooling water, the degree of fouling is often so severe that re-tubing is required, because both cleaning with high pressure equipment and mechanical cleaning fail.

Specific heat cured coatings have been developed and used for the protection of carbon steel and stainless steel heat exchanger tubes.

The coatings, mainly heat cured phenolic or modified epoxy-phenolic, besides having outstanding corrosion resistance, give a constant heat transfer by preventing fouling.

Heat cured coating which protects carbon steel from corrosion must act as a barrier against corrosion reactions such as  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl$ ,  $SO_4$ ,  $NO_2$  water and gases ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2S$ ) and be stable at elevated temperatures up to  $220^\circ C$  for an extended time. Indeed the application of an organic layer, even at low thickness (in the range of 200 micron), lowers, in the initial stage, the heat transfer coefficient by up to 7%, a value which doesn't impair the capacity and the efficiency of the heat exchanger to be used. However, in a short time, due to the fouling that significantly lowers the heat transfer coefficient, the situation is overturned, and the efficiency of the coated units made of carbon steel, stainless steel and other alloys remains superior and constant over a long period of time. Furthermore, the number of the shutdowns can be reduced, the cleaning operation is much easier and significant lower fouling factor can be considered for the design of the heat exchanger.

#### CASE STUDIES

For both the above mentioned system, practical examples are reported where:

- A real life case study of liquid to air coated and uncoated exchangers exposed in Honk Kong has given a difference in unit with and without corrosion of 4.1 bar discharge pressure. For R22 refrigerant this equals  $9^\circ C$  difference. All this not only results into a difference in cooling capacity (9%) but also in reduction in efficiency. The COP (Coefficient of Performance) of the corroded chiller is 3.0 compared to 3.4 of the chiller without corrosion.

Energy consumption is approximately 12% higher for the corroded unit, even though it is generating 9% less cooling capacity.

- Two liquid to liquid heat exchangers have been operating in parallel for two years, with an heat transfer of the new uncoated of  $800 [kcal/m^2h^\circ C]$ .

After an operating time of approximately 2 months, the heat transfer of the uncoated one reduces to  $600 [kcal/m^2h^\circ C]$  as a result of increasing fouling. After approximately 19 months of operation and interim high pressure cleaning the heat transfer reduces down to  $350 [kcal/m^2h^\circ C]$ . The heat exchanger had than be decommissioned and cleaned.

The heat exchanger coated with baked phenolic system operating at the same location and under the same conditions has been operating for approximately 3 years without cleaning, and with a constant heat transfer of approximately  $750 [kcal/m^2h^\circ C]$ , corresponding to the heat transfer of an uncoated heat exchanger after approximately 2 months operation time.

#### CONCLUSIONS

The use of specific high resistance protective coatings in the heat exchangers, not only prevents corrosion and in some instances allows the use of a less expensive metal, but increases the energy efficiency of the equipment and significantly limits the operational costs by:

- Ensuring a more uniform heat transfer during time;
- Increasing the thermal performance;
- Allowing longer time between shut downs for the cleaning;
- Lowering the cost for the cleaning operations.