# La ricostruzione dello scenario di incendio parte

# dall'analisi dei reperti in metallo

a normativa NFPA 921 (Guide for Fire and Explosion Investigations) è considerata a livello internazionale un documento di fondamentale importanza per l'esecuzione di indagini in caso di incendio. L'analisi visiva è fra le tecniche più importanti indicate dalla NFPA 921 per l'individuazione delle cause che portano all'innesco e all'evoluzione di un incendio [1]. La modalità di propagazione della fiamma, infatti, può essere identificata tramite l'osservazione delle alterazioni prodotte dal calore sugli oggetti coinvolti nell'incidente. Fra gli oggetti comunemente utilizzati in ambito domestico o industriale, quelli metallici sono facilmente rinvenibili sul luogo del sinistro, i metalli, infatti, non possono essere distrutti dalle fiamme, o dal calore sprigionato in un

normale incendio. Per oggetti metallici l'NFPA 921 individua solo due parametri utili per la stima della temperatura: la temperatura di fusione del materiale e la sua ossidazione superficiale.

L'analisi visiva dell'ossidazione superficiale però può fornire solo indicazioni di tipo qualitativo, mentre le temperature di fusio-

■ Marco Boniardi

■ Andrea Casaroli

Le potenzialità dell'analisi metallurgica e metallografica dei reperti provenienti dalle zone coinvolte in un incendio. Dalle simulazioni d'incendio su componenti, realizzati in lega d'alluminio, in rame o lega di rame. sono stati ottenuti dei campioni. poi esaminati in laboratorio tramite microscopia ottica e microscopia elettronica a scansione (SEM) con microsonda a dispersione d'energia (EDS)

ne sono spesso troppo elevate per essere raggiunte durante un normale incendio. A ciò si deve aggiungere il fatto che sempre più spesso, nel caso di contenziosi legali, vengono richieste prove rigorose basate su metodologie scientifiche [2].

Per riuscire a superare questi limiti è possibile indagare le alterazioni delle caratteristiche metallurgiche e microstrutturali dei metalli e delle loro leghe, che possono essere sfruttate per ottenere informazioni sulle temperature raggiunte nel corso dell'incendio.

Il presente lavoro ha lo scopo di chiarire le potenzialità dell'analisi metallurgica e metallografica dei reperti provenienti dalle zone coinvolte in un incendio; a tale scopo sono state condotte delle simulazioni d'incendio su componenti, realizzati in lega d'alluminio, in

rame o lega di rame.

I campioni così ottenuti sono stati esaminati in laboratorio tramite microscopia ottica e microscopia elettronica a scansione (SEM) con microsonda a dispersione d'energia (EDS). Per ogni campione sono state osservate le caratteristiche morfologiche e alcuni parametri metallurgici che sono strettamente

legati all'azione termica esercitata dal fuoco (ossia dalla temperatura), quali lo stato di ossidazione, le dimensioni del grano cristallino o la degradazione del bordo di grano.

Sfruttando tali risultati e considerando che l'esposizione a differenti temperature provoca differenti modificazioni metallurgiche, è possibile definire un intervallo di temperatura a cui il componente è stato sottoposto; ciò può essere sfruttato per comprendere l'evoluzione di un incendio. Nel presente lavoro sono stati considerati tre differenti componenti metallici:

- condotto di aereazione in lega d'alluminio
- rubinetto in ottone
- tubo in rame per l'adduzione del gas.

Gli oggetti utilizzati sono contenuti nella maggior parte delle abitazioni o delle industrie e quindi sono facilmente rinvenibili in caso di incendio. Ove possibile si è cercato di individuare componenti le cui proprietà fisiche, chimiche o meccaniche fossero stabilite da norme (tubo per l'adduzione del gas), in caso contrario sono stati scelti oggetti le

## Prof. Ing. Marco Virginio Boniardi

Professore ordinario di metallurgia presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano, opera da circa venti anni nel settore della Failure Analysis & Forensic Engineering, www.fa-fe.com (l'analisi dei cedimento in esercizio di macchine/impianti/componenti). Nel corso degli anni il Prof. Boniardi si è occupato di numerosi casi di scoppi ed esplosioni su impianti e componenti industriali e ha partecipato ad indagini riguardanti incendi o sinistri. Autore di più di 100 pubblicazioni scientifiche, collabora abitualmente con studi legali ed imprese nazionali ed internazionali nei settori dei trattamenti termici, degli acciai inossidabili, della resistenza a fatica dei materiali metallici, della corrosione e della fucinatura, dello stampaggio e della laminazione delle leghe ferrose.

# Ing. Andrea Casaroli

Svolge attività di ricerca nel settore della metallurgia e dei materiali metallici presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano; si occupa di indagini in caso di sinistri industriali dovuti a incendi, scoppi ed esplosioni. La sua attività di ricerca verte nel settore della Failure Analysis & Forensic Engineering, www.fa-fe.com, che consiste nell'analisi delle cause di cedimento in esercizio di macchine o componenti meccanici. Nel corso degli anni ha collaborato con numerose imprese nazionali ed internazionali alla risoluzione di problemi di corrosione e malfunzionamento di componenti meccanici.



Figura 1 - Condotto di aereazione realizzato in lega d'alluminio 1050

cui proprietà non fossero molto variabili fra i prodotti disponibili sul mercato (rubinetto e condotto di aereazione).

Tutti i componenti sono stati sottoposti ad un incendio simulato tramite il riscaldamento in un forno a camera a resistenza. Più precisamente è stato effettuato un riscaldamento progressivo fino alla temperatura desiderata, il mantenimento a tale temperatura per un'ora ed un successivo raffreddamento in aria. Ogni componente è stato sottoposto a differenti temperature d'incendio (temperature di mantenimento) come meglio descritto in seguito.

Al termine delle prove su ogni componente sono state eseguite sia analisi visive che analisi in microscopia ottica ed elettronica a scansione.

Condotto di aereazione - Gli ingombri del condotto d'aereazione preso in esame sono riportati in *Figura 1*. Il condotto di aereazione è realizzato con una lamiera dello spessore di 0,2 mm.

Tabella 1 - Composizione chimica nominale (% peso) della lamiera con cui è realizzato il condotto di aereazione

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Impurità Max	Al
≤ 0,25	≤ 0,40	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,07	0,15	Bal.

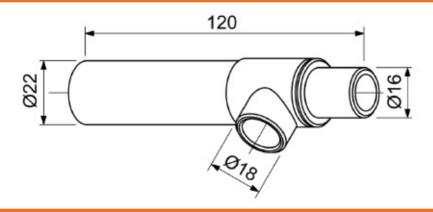


Figura - 2 Corpo del rubinetto realizzato in ottone CuZn40Pb2

Le analisi chimiche eseguite sul componente indicano che la lamiera è realizzata in lega di alluminio 1050, la cui composizione chimica, secondo normativa, è riportata in *Tabella 1* [3]. La procedura sperimentale seguita per l'analisi del condotto di aereazione ha previsto:

- esame visivo iniziale ed analisi preliminari mediante microscopia elettronica (SEM+EDS)
- riscaldamento in forno di varie porzioni di lamiera prelevate dal condotto di aereazione (incendio simulato) alle temperature di seguito indicate: 150°C, 225°C, 300°C, 375°C, 450°C, 525°C, 600°C, 750°C, 900°C, 1050°C
- raffreddamento in aria fino a temperatura ambiente

- analisi visiva
- preparazione e lucidatura dei campioni metallografici e successivo attacco elettrochimico mediante soluzione di acido fluoborico (5ml) e acqua distillata (200ml) [4]
- analisi in microscopia ottica.

Rubinetto - Gli ingombri del corpo del rubinetto preso in esame sono riportati in Figura 2. Le analisi chimiche eseguite sul componente indicano che il corpo del rubinetto è realizzato in un ottone  $\alpha+\beta$ , tipo CuZn40Pb2, la cui composizione chimica, secondo normativa, è specificata in Tabella 2 [3].

La procedura sperimentale seguita per l'analisi del corpo del rubinetto ha previsto:

Tabella 2 - Composizione chimica nominale (% peso) del corpo del rubinetto

Cu	Pb	Fe	Al	Sn	Si	Mn	Ni	Impurità Max	Zn
57÷60	1÷3	≤0,60	≤0,15	≤0,90	≤0,20	≤0,20	≤0,50	1,60	Bal.

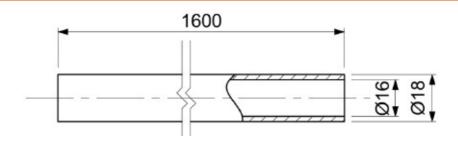


Figura 3 - Tubo di adduzione del gas in rame Cu-DHP

- analisi preliminari mediante microscopia elettronica (SEM+EDS)
- riscaldamento in forno di vari spezzoni del corpo del rubinetto alle temperature di seguito indicate: 150°C, 225°C, 300°C, 375°C, 450°C, 525°C, 600°C,750°C, 900°C, 1050°C
- raffreddamento in aria fino a temperatura ambiente
- preparazione e lucidatura dei campioni metallografici e successivo attacco chimico mediante persolfato di ammonio (20g) e acqua distillata (100ml) [4]
- analisi in microscopia ottica.

Tubo adduzione gas - II tubo di adduzione del gas preso in esame (Figura 3) è realizzato in rame Cu-DHP (Deoxidised High Phosphorous - ai sensi dell'ASTM C 12200 o EN CW 024A). Per tale tipo di materiale le norme prevedono la composizione chimica riportata in Tabella 3 [3].

La procedura sperimentale seguita per l'analisi del tubo di adduzione del gas ha previsto:

- esame visivo iniziale ed analisi preliminari mediante microscopia elettronica (SEM+EDS)
- riscaldamento in forno di vari spezzoni del tubo di adduzione del gas alle tempe-

- rature di seguito indicate: 150°C, 225°C, 300°C, 375°C, 450°C, 525°C, 600°C, 750°C, 900°C
- raffreddamento in aria fino alla temperatura ambiente
- analisi visiva ed analisi in microscopia elettronica a scansione (SEM+EDS)
- preparazione e lucidatura dei campioni metallografici e successivo attacco chimico mediante una soluzione di persolfato di ammonio (20g) e acqua distillata (100ml) (attacco ASTM 82)[4]
- analisi in microscopia ottica.

### I risultati

Analisi visiva del condotto di aereazione -Una volta estratta dal forno e raffreddata in aria, ogni porzione di lamiera prelevata dal condotto di aereazione è stata fotografata ed è stata condotta l'analisi visiva della sua superficie (Figure da 4 a 6).

I risultati ottenuti sono riportati di seguito:

- 20°C: la superficie è di color grigio chiaro, e riflette la luce
- 150°C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- 225°C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- 300°C: non è stata riscontrata alcuna al-

Tabella 3 - Composizione chimica nominale (% peso) del tubo di adduzione del gas

Cu	P
≥ 99,90	0,015% ÷ 0,040%
	C,C 1070 1 C,C 1070



Figura 4 - Analisi visiva dei campioni del condotto di aereazione riscaldati a 20°C, 150°C, 225°C, 300°C, (da sinistra a destra)



Figura 5 - Analisi visiva dei campioni del condotto di aereazione riscaldati a 375°C, 450°C, 525°C, 600°C (da sinistra a destra)



Figura 6 - Analisi visiva dei campioni del condotto di aereazione riscaldati a 750°C, 900°C, 1050°C (da sinistra a destra)

terazione superficiale

- 375°C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- 450°C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- 525°C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- 600°C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- 750°C: il lamierino si è assottigliato e si spezza se si tenta di spostarlo. La superficie non riflette più la luce
- 900°C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 750°C
- 1050°C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 750°C.

Dall'analisi visiva si nota che:

• fino a 600°C la lamiera non presenta al-

- cuna alterazione superficiale
- a partire da 750°C la lamiera si assottiglia, smette di riflettere la luce e si sgretola se viene spostata.

Analisi in microscopia ottica del condotto di aereazione - Una volta inglobato, lucidato ed attaccato ogni campione è stato analizzato al microscopio ottico.

I risultati più significativi sono riportati nelle *Figure da 7 a 10.* 

Le caratteristiche metallografiche, osservate alle varie temperature di prova, sono di seguito descritte:

- 20°C: a causa del forte incrudimento subito durante la laminazione i grani presentano una forma particolarmente allungata (asse maggiore: 50μm ÷ 100μm circa, asse minore: 5μm ÷ 10μm circa)
- 150°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C
- 225°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C
- 50um

Figura 7 - Micrografia del campione di condotto di aereazione a 20°C (200x)

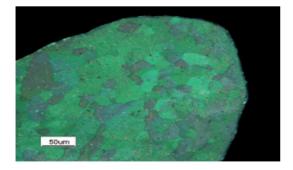


Figura 8 - Micrografia del campione di condotto di aereazione a 300°C (200x)

- 300°C: a causa dei fenomeni di recovery e ricristallizzazione si assiste alla rigenerazione del grano che ora è equiassico e ha dimensioni comprese fra 20μm e 50μm circa
- 375°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 300°C
- 450°C: si assiste ad un aumento delle dimensioni del grano, ora comprese fra 50μm e 100μm circa
- 525°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 450°C
- 600°C: si assiste all'aumento delle dimensioni del grano, ora comprese fra 100μm e 200μm circa
- 750°C: si nota come la lamiera sia giunta a fusione, il rapido raffreddamento ha poi favorito lo sviluppo delle strutture dendritiche
- 900°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 750°C
- 1050°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 750°C.

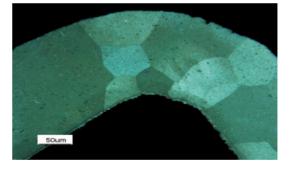


Figura 9 - Micrografia del campione di condotto di aereazione a 600°C (200x)

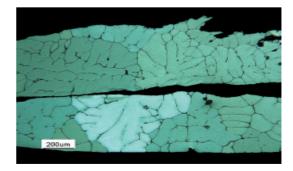


Figura 10 - Micrografia del campione di condotto di aereazione a 750°C (200x)

In sintesi dall'analisi al microscopio ottico si nota che:

- da 20°C a 225°C il grano ha forma allungata (asse maggiore: 50μm ÷ 100μm circa, asse minore: 5μm ÷ 10μm circa)
- da 300°C a 375°C il grano è equiassico e ha dimensioni comprese fra 20μm e 50μm circa
- da 450°C a 525°C il grano è equiassico e ha dimensioni comprese fra 50μm e 100μm circa
- a 600°C il grano è equiassico e ha dimensioni comprese fra 100μm e 200μm circa
- da 750°C a 1050°C la lamiera giunge a fusione ed il rapido raffreddamento favorisce lo sviluppo delle strutture dendritiche.

Analisi in microscopia ottica del rubinetto - A causa della ridotta superficie dei campioni sottoposti alla simulazione d'incendio non è stato possibile condurre l'analisi visiva, è stata perciò effettuata la sola analisi in microscopia ottica.

Una volta inglobato, lucidato ed attaccato ogni campione è stato analizzato al microscopio ottico; i risultati più significativi sono riportati nelle *Figure da 11 a 17.* 

Le caratteristiche metallografiche, osservate alle varie temperature di prova, sono di seguito descritte:

- 20°C: i grani sono equiassici ed hanno dimensioni comprese fra 10μm ÷ 30μm circa
- 150°C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 20°C
- 225°C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 20°C
- 300°C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 20°C
- 375°C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 20°C;
- 450°C: in corrispondenza del diametro esterno dell'anello si assiste alla dezincificazione della fase β, lo spessore dello strato dezincificato è pari a circa 25μm. Le dimensioni del grano sono simili a quelle rilevate a 20°C

### LA VALUTAZIONE DEI RISCHI DI INCENDIO

Fiorentini Luca, Marmo Luca libro con software

Ed.: aprile 2011- Pag.: 720 - F.to: 170x240 mm

ISBN: 978-88-6310-321-2

Acquisto Online: € 51,30 anziché 57,00

Norme e standard internazionali di riferimento, metodi e tecniche di analisi, definizione della strategia antincendio, gestione del rischio nel tempo, casi studio ed esempi applicativi

Nel cd rom allegato il software F.R.A.M.E. (Fire Risk Assessment Method for Engineering) tradotto in italiano e corredato da 76 esempi completi



L'opera si prefigge la diffusione delle tecniche di analisi per stimare il rischio di incendio connesso con le attività produttive, industriali e civili oppure, anche nell'ambito di un approccio prestazionale della sicurezza antincendio ('FSE') per individuare gli scenari di incendio da assoggettare ad un approfondimento di tipo deterministico. Previa illustrazione del corpo normativo italiano di riferimento vengono forniti:

- una panoramica delle definizioni, degli standard e delle metodologie di analisi, valutazione, gestione del rischio di incendio maggiormente diffuse a livello internazionale:
- i concetti chiave del fenomeno di incendio e della trasmissione del calore che l'analista è chiamato a conoscere per meglio individuare le sequenze incidentali associate ai pericoli di incendio;
- una serie di casi studio sviluppati secondo metodologie di analisi differenti riconosciute ed attuali.

Il Cd-Rom allegato al libro contiene lo strumento F.R.A.M.E. Fire Risk Assessment Method for Engineering, del Prof. E. De Smet (Belgio), già utilizzato in più di 70 Paesi, tradotto in lingua italiana e corredato da 76 esempi completi. L'opera contiene la traduzione autorizzata ed inedita di standard e pubblicazioni internazionali NFPA, SFPE, ASTM, HSE, VTT, BSI, ELSEVIER. Sono inoltre presenti significativi contributi professionali dell'Ing. Salvatore Tafaro e dell'Ing. Vincenzo Puccia dei Vigili del Fuoco e le prefazioni di Raffaele Guariniello (magistrato), Morgan Hurley (direttore SFPE), David Yung (esperto internazionale), Stefano Converso (Università di Roma Tre).



Per maggiori informazioni contatta il Servizio Clienti al numero 06 33245277 oppure scrivi a libri@epclibri.it

- 525°C: lo strato dezincificato aumenta di spessore (circa 50μm); il grano si ingrossa e raggiunge una dimensione compresa fra 30μm ÷ 50μm circa
- 600°C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 525°C
- 750°C: a questa temperatura ci si trova al limite della zona α+β (Figura 18). In Figura 15 sono evidenti i cristalli omogenei di fase β (indicati con β) di colore giallo scuro e dimensione compresa fra 50μm e

100μm e di fase  $\alpha$  (indicati con  $\alpha$ ) di colore giallo chiaro, forma tondeggiante e dimensione compresa fra  $50\mu m$  e  $100\mu m$ . Al diminuire della temperatura la fase  $\alpha$  viene smiscelata dalla fase  $\beta$ ; i cristalli di nuova formazione sono indicati in *Figura 15* con  $\alpha_s$  e, rispetto ai cristalli di fase  $\alpha$  originari, hanno una forma estremamente allungata.

Lo strato dezincificato aumenta di spessore (80µm ÷ 100µm circa);

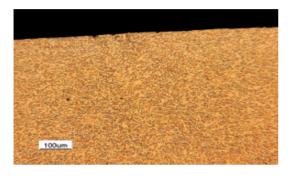


Figura 11 - Micrografia del campione di rubinetto a 20°C (100x)

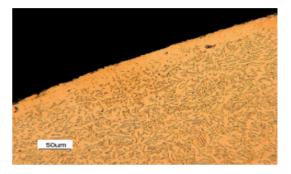


Figura 14 - Micrografia del campione di rubinetto a 450°C (200x)



Figura 12 - Micrografia del campione di rubinetto a 20°C (200x)

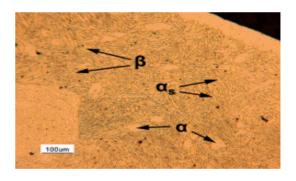


Figura 15 - Micrografia del campione di rubinetto a 750°C (100x)

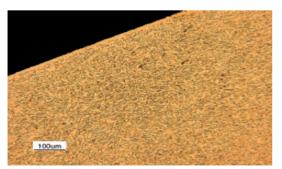


Figura 13 - Micrografia del campione di rubinetto a 450°C (100x)

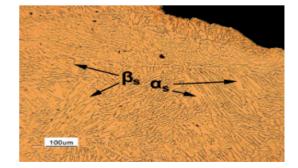


Figura 16 - Micrografia del campione di rubinetto a 900°C (100x)

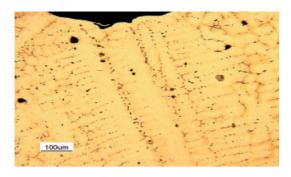


Figura 17 - Micrografia del campione di rubinetto a 1050°C (100x)

900°C: il campione entra nella zona del liquido (Figura 19); il tempo di riscaldamento non è però sufficiente a portare a fusione il campione che subisce solo un forte rammollimento. Aver riscaldato il campione fino alla zona del liquidus impedisce la dezincificazione; la struttura cristallina di Figura 16 è infatti totalmente formata da nuovi cristalli generati durante la fase di raffreddamento, che nulla hanno in comune con quelli originari.

Più precisamente si hanno nuovi cristalli omogenei di fase  $\alpha$  (indicati in *figura 16* con  $\alpha$ <sub>s</sub>) e nuovi cristalli omogenei di fase  $\beta$  (indi-

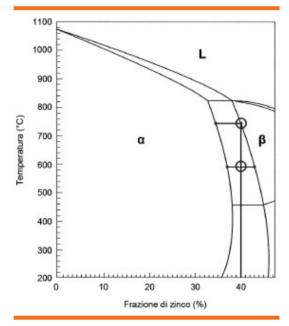


Figura 18 - Diagramma Cu-Zn. Raffreddamento della lega CuZn40Pb2 a partire dalla temperatura di 750°C.

cati in Figura 16 con  $\beta_s$ ). A causa della rapida velocità di raffreddamento i cristalli  $\alpha_s$  e  $\beta_s$  hanno forma estremamente allungata e presentano dimensioni, lungo l'asse maggiore, comprese fra  $80\mu m$  e  $160\mu m$  circa

• 1050°C: il campione liquefa completamente, il rapido raffreddamento favorisce lo sviluppo di strutture dendritiche.

In sintesi dall'analisi al microscopio ottico si nota che:

- tra 525°C e 600°C il grano aumenta di dimensione
- tra 450°C e 750°C la zona in prossimità della superficie esterna del rubinetto è sottoposta a dezincificazione della fase β; lo spessore della zona dezincificata aumenta al crescere della temperatura secondo l'andamento rappresentato in Figura 20
- a 750°C il campione raggiunge il limite della zona α+β. La morfologia della struttura cristallina è totalmente diversa da quella originaria.

Al termine del raffreddamento la struttura cristallina risulta costituita dai cristalli omogenei di fase  $\alpha$  e di fase  $\beta$  originari (indicati in *Figura 13* con  $\alpha$  e  $\beta$ ) a cui si ag-

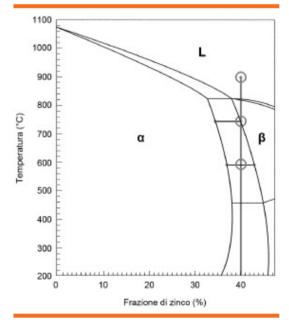


Figura 19 - Diagramma Cu-Zn. Raffreddamento della lega CuZn40Pb2 a partire dalla temperatura di 900°C

- giungono nuovi cristalli omogenei di fase  $\alpha$  (indicati in *figura 13* con  $\alpha$ s)
- a 900°C il campione entra nel campo del liquidus e subisce un forte rammollimento.
  La morfologia della struttura cristallina è totalmente diversa da quella originaria e da quella a 750°C. Al termine del raffreddamento la struttura cristallina risulta costituita da nuovi cristalli omogenei di fase α e di fase β (indicati in Figura 15 con αs e β<sub>s</sub>)
- a 1050°C il campione liquefa completamente, il rapido raffreddamento favorisce lo sviluppo di strutture dendritiche.

Analisi visiva del tubo di adduzione gas - Una volta estratto dal forno e raffreddato in aria, ogni spezzone di tubo di adduzione del gas è stato fotografato ed è stata condotta una analisi visiva della sua superficie (Figure 21 e 22). I risultati ottenuti sono riportati di seguito:

- 20°C: la superficie presenta il colore rosso scuro tipico del rame leggermente ossidato
- 150°C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- 225°C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale

- 300°C: si sviluppa un sottile strato di ossido di colore grigio scuro ben adeso alla superficie
- 375°C: lo strato di ossido superficiale diventa più spesso ed assume un comportamento fragile
- 450°C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 375°C
- 525°C: l'ossido aumenta di spessore e si fessura staccandosi dal tubo quando questo viene estratto dal forno. Al di sotto dell'ossido la superficie del tubo assume il colore rosso scuro
- 600°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 525°C
- 750°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 525°C
- 900°C: l'ossido aumenta ulteriormente di spessore (circa 0,1mm) e si fessura staccandosi dal tubo quando questo viene estratto dal forno.
  - La dimensione delle scaglie di ossido è maggiore rispetto a quella riscontrata a 525°C. Al di sotto dell'ossido la superficie del tubo assume il colore rosso chiaro.

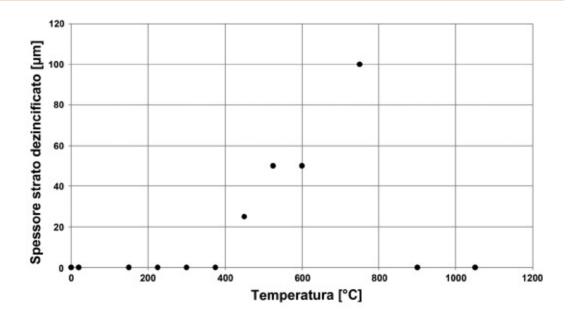


Figura 20 - Andamento dello spessore dello strato dezincificato in funzione della temperatura



Figura 21 - Analisi visiva degli spezzoni di tubo di adduzione del gas riscaldati a 20°C, 150°C, 225°C, 300°C, 375°C (da sinistra a destra)

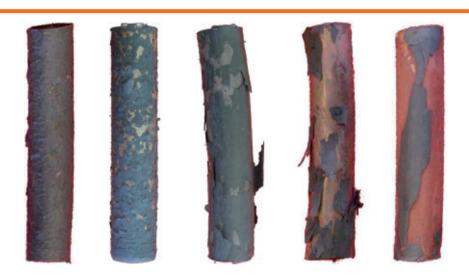


Figura 22 - Analisi visiva degli spezzoni di tubo di adduzione del gas riscaldati a 450°C, 525°C, 600°C, 750°C, 900°C (da sinistra a destra)

Dall'analisi visiva si nota che all'aumentare della temperatura:

- la superficie del tubo si ricopre di uno strato di ossido di colore grigio scuro
- lo spessore dell'ossido aumenta progressivamente fino a raggiungere 0,1 mm a 900°C
- l'ossido inizialmente ben adeso alla superficie assume comportamento fragile e
- si distacca in modo autonomo da quest'ultima quando il campione viene estratto dal forno
- la dimensione delle scaglie di ossido che si distaccano dalla superficie aumenta progressivamente
- il colore della superficie del tubo al di sotto dell'ossido vira dal rosso scuro al rosso chiaro.

I singoli campioni dopo essere stati inglobati, lucidati ed attaccati sono stati analizzati attraverso il microscopio ottico, con lo scopo di osservare le differenti strutture metallografiche emerse durante le varie temperature di prova

Analisi in microscopia elettronica del tubo di adduzione del gas- L'analisi in microscopia elettronica è stata effettuata sulla superficie di ogni spezzone di tubo allo scopo di indagarne la morfologia. Dall'analisi emerge che (Figure da 23 a 26):

 a partire da 450°C l'ossido assume uno spessore tale da nascondere i graffi e le righe prodotte dal processo di trafilatura con il quale viene fabbricato il tubo. L'in-

46 µm

Figura 23 - Superficie del tubo di adduzione del gas a 20°C (500x)

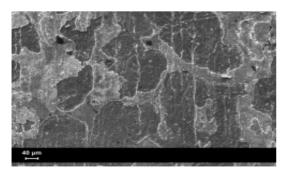


Figura 24 - Superficie del tubo di adduzione del gas riscaldato a 450°C (500x)

- grandimento a 500x permette di apprezzare il comportamento fragile dell'ossido che non è ben adeso alla superficie e si distacca sottoforma di scaglie
- a 900°C la superficie al di sotto dello strato di ossido rammollisce, inglobando alcune scaglie di ossido di piccola dimensione (3µm ÷ 8µm circa).

Analisi in microscopia ottica del tubo di adduzione del gas - Una volta inglobato, lucidato ed attaccato ogni campione è stato analizzato al microscopio ottico; i risultati ottenuti sono riportati nelle *Figure da 27 a 29*. Le caratteristiche metallografiche, osservate alle varie temperature di prova, sono di seguito descritte:

- 20°C: a causa del forte incrudimento subito dal materiale durante la trafilatura, i grani hanno dimensioni ridotte (12 mμ÷ 30μm circa)
- 150°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C

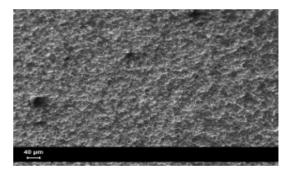


Figura 25 - Superficie del tubo di adduzione del gas riscaldato a 900°C (500x)

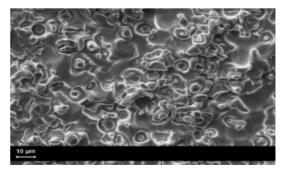


Figura 26 - Superficie del tubo di adduzione del gas riscaldato a 900°C (2500x)



Figura 27 - Micrografia del campione di tubo di adduzione del gas a 20°C (100x)

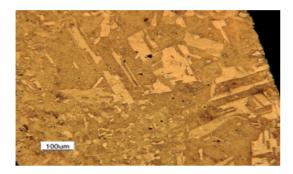


Figura 28 - Micrografia del campione di tubo di adduzione del gas a 525°C (100x)

- 225°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C
- 300°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C
- 375°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C

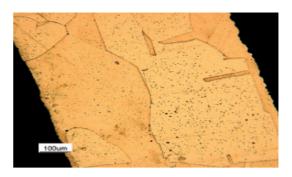


Figura 29 - Micrografia del campione di tubo di adduzione del gas a 900°C (100x)

- 450°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20°C
- 525°C: si nota un notevole ingrossamento del grano cristallino che ora ha dimensioni comprese fra 50μm e 200μm circa, tale circostanza è attribuibile ai fenomeni di recovery e ricristallizzazione [5]
- 600°C: si assiste all'aumento delle dimensioni del grano, ora comprese fra 100μm e 300μm circa
- 750°C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 600°C
- 900°C: si assiste all'aumento delle dimensioni del grano, ora comprese fra 200μm e 500μm circa.

Dall'analisi al microscopio ottico si nota che a partire da 525°C il grano aumenta di dimensione. A tale temperatura i grani assumono una dimensione compresa fra 50µm e

Analisi Visiva													
Mat.	20	150	225			perat		_	750	900 1	1050		
Al	Condotto di aereazione	La lamiera si assotiglia e si rompe se viene toccata											
		Ossido ben adeso alla superficie											X
Cu	Tubo adduzione Gas	Ossido fragile											$\overline{\times}$
		Scomparsa dei graffi e dei testimoni di lavorazione											Z

Indica che il fenomeno si manifesta alla temperatura considerata

Indica che la simulazione d'incendio non è stata eseguita alla temperatura considerata

Figura 30 - Correlazione tra temperatura e modificazioni morfologiche osservate sui tre componenti oggetto dello studio

	Analisi Metallografica												
Mat.	Componente	Temperatura [°C] 20 150 225 300 375 450 525 600 750 900 1050											
		Fenomeno Recovery \ Ricristallizzazione	20	150	225	300 37	450	525 60	0 750	900	1050		
Al	Condotto di aereazione	Presenza strutture dendritiche					T	П	ī	Ħ			
		Recovery \ Ricristallizzazione					Ī						
Cu-Zn	Rubinetto	Dezincificazione											
6 49		Presenza stutture dendritiche							T				
Cu	Tubo adduzione Gas	Recovery \ Ricristallizzazione									$\times$		

Indica che il fenomeno si manifesta alla temperatura considerata

Indica che la simulazione d'incendio non è stata eseguita alla temperatura considerata

Figura 31 - Correlazione tra temperatura e modificazioni metallurgiche osservate sui tre componenti oggetto dello studio

200μm (la dimensione originale è compresa fra 12μm  $\div$  30μm). L'ingrossamento del grano aumenta all'aumentare della temperatura, tanto che a 900°C si ottengono grani di dimensione compresa fra 200μm e 500μm circa.

### Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati studiati tre componenti comuni (condotto di aereazione, rubinetto e tubo per l'adduzione del gas), facilmente rinvenibili sul luogo di un incendio. Su ogni componente è stata simulata l'alterazione termica indotta dall'incendio (l'analisi è stata eseguita per 10 livelli di temperatura). I tre componenti sono stati analizzati mediante comuni esami metallurgici (osservazione morfologica, analisi in microscopia ottica, analisi in microscopia elettronica a scansione) per associare ad ogni temperatura d'incendio le alterazioni morfologiche microstrutturali corrispondenti.

I risultati ottenuti hanno permesso di mettere in luce come alcune specifiche alterazioni morfologiche o microstrutturali (ossidazione, recovery, ricristallizzazione, ingrossamento del grano, ecc...) possano essere impiegate per la determinazione delle temperature massime raggiunte dai componenti, al pari di quanto già viene effettuato su materiali non metallici [6]. Utilizzando i risultati ottenuti è stato possibile realizzare delle tabelle che per ciascun componente riassumono le alterazioni morfologiche e microstrutturali di interesse associando la loro comparsa ad una data temperatura (Figure 30 e 31).

In questo modo, il rinvenimento di detti componenti sul luogo di un incendio può essere di ausilio per la determinazione delle temperature massime raggiunte.

### **Bibliografia**

- [1] AA.VV., NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, Massachusetts, 2008
- [2] J.J. Lentini, Scientific Protocols for Fire Investigation, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2006.
- [3] AA.VV., ASM Handbook, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, Materials Park, Ohio, 2004
- [4] AA.VV., ASM Handbook, Volume 9, Metallography and microstructure, ASM International, Materials Park, Ohio, 2004
- [5] D. R. Askeland, The Science and Engineering of Materials, fifth ed., Thomson, Cheltenham, UK, 2007
- [6] V. Babrauskas, Charring rate of wood as a tool for fire investigations, Fire safety Journal 40, (2005) 528-554