

Dai reperti in metallo la **radiografia** dell'incendio

Uno dei metodi principalmente utilizzati per identificare le cause che portano all'innesco all'evoluzione di un incendio è l'analisi visiva [1]. Le fiamme ed il calore prodotto durante l'incendio provocano il danneggiamento degli oggetti coinvolti nell'incidente e la formazione di tracce di forma particolare, causate dal decadimento delle proprietà del componente, o dall'alterazione della sua superficie (ad esempio tracce a V, fire trials, intensity o movement patterns). Sempre più spesso, però, nel caso di contenziosi legali, viene richiesto di affiancare all'analisi visiva una serie di prove rigorose ottenute tramite metodologie di tipo scientifico. Ciò implica che i reperti ricavati dalla zona dell'incendio siano correttamente analizzati e che i dati vengano correttamente interpretati [2]. A tale proposito l'analisi delle modificazioni strutturali che intercorrono all'interno dei materiali metallici sottoposti a riscaldamento, (ossidazione, ricristallizzazione e ingrossamento del grano cristallino, precipitazione di seconde fasi, ecc.) si rivela particolarmente utile.

Le caratteristiche metallurgiche e microstrutturali dei metalli e delle loro leghe, infatti, sono dipendenti dalla temperatura a cui vengono sottoposti e possono quindi essere sfruttate per ottenere informazioni sulle tempera-

■ Marco Boniardi
■ Andrea Casaroli

L'analisi metallurgica di questi materiali rappresenta un utile metodo di indagine per individuare le temperature sviluppate durante un incidente. Le potenzialità del modello

ture raggiunte dall'incendio. Inoltre, le trasformazioni microstrutturali avvenute all'interno del metallo sono particolarmente stabili e quindi non possono essere alterate dai vigili del fuoco durante le operazioni di spegnimento.

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 acciaio, in acciaio inossidabile o in 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.

A partire da tali risultati è possibile definire un intervallo di temperatura a cui il componente è stato sottoposto e quindi comprendere l'evoluzione dell'incendio. Per l'esecuzione delle prove sono stati considerati tre differenti componenti metallici:

- canna fumaria in acciaio
- cucchiaio da cucina in acciaio inossidabile
- moneta da 20 €_{cent} in lega di rame

Gli oggetti utilizzati per le simulazioni d'in-

condio sono stati scelti in base ai seguenti criteri:

- essere comunemente utilizzati in abitazioni o in complessi industriali
- essere standard: le loro proprietà fisiche, chimiche o meccaniche devono cioè essere stabilite da norme (monete da 20 €_{cent})
- nel caso di componenti non standard: presentare proprietà fisiche, chimiche o meccaniche non molto variabili fra i vari prodotti disponibili sul mercato (canna fumaria e cucchiaio).

Tutti i componenti sono stati sottoposti ad un incendio simulato tramite il riscaldamento in un forno a resistenza. Il riscaldamento ha previsto tre fasi:

- aumento progressivo della temperatura fino al livello desiderato
- mantenimento della temperatura raggiunta per un'ora
- raffreddamento in aria.

Al termine della fase di riscaldamento (effettuata per 10 temperature differenti), su ogni componente sono state eseguite analisi visi-

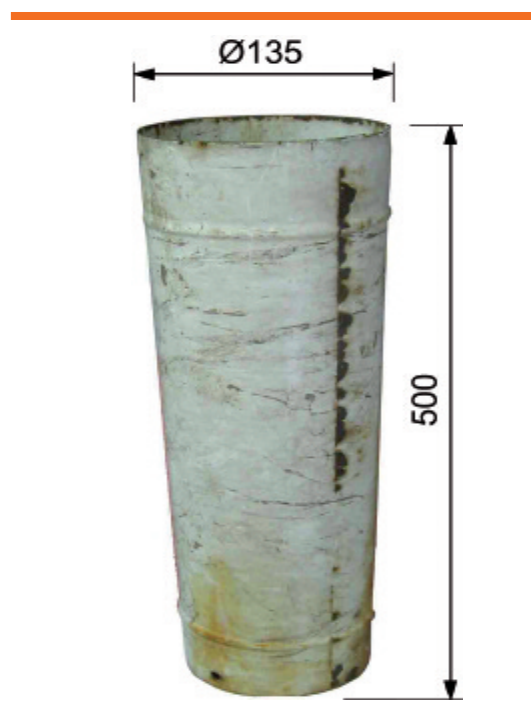


Figura 1 - Canna fumaria realizzata in acciaio S235 (misure in mm)

ve, analisi in microscopia ottica ed analisi in microscopia elettronica a scansione.

Canna fumaria - Gli ingombri dello spezzone di canna fumaria preso in esame sono riportati in *figura 1*. La canna fumaria, realizzata con una lamiera dello spessore di 0,4 mm, riporta sulla superficie esterna uno strato di smalto di colore bianco.

Le analisi chimiche eseguite sul componente indicano che la lamiera è realizzata in acciaio S235, la cui composizione chimica secondo normativa è riportata in *tabella 1* [3]. La procedura sperimentale seguita per l'analisi della canna fumaria ha previsto:

- esame visivo iniziale ed analisi prelimina-

Tabella 1 - Composizione chimica nominale (% peso) della lamiera con cui è realizzata la canna fumaria

C	Mn	Si	Fe
0,05	0,64	0,33	bal.

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 cedimenti 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.

Tabella 2 - Composizione chimica (% peso) del cucchiaino da cucina

C	Cr	Ni	Mn	Si	Ti + Nb	S	P	Fe
≤ 0,08	16 ÷ 19	≤ 0,60	≤ 1	≤ 1	0,10 ÷ 1	≤ 0,03	≤ 0,04	Bal.



Figura 2 - Cucchiaino da cucina realizzato in acciaio inossidabile AISI 430

- ri mediante microscopia elettronica (SEM+EDS)
- riscaldamento in forno di varie porzioni di lamiera prelevate dalla canna fumaria 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 di campioni metallografici e successivo attacco chimico mediante soluzione di acido nitrico (2ml) ed etanolo (100ml) (attacco Nital 2%) [4]
- analisi in microscopia ottica.
- analisi preliminari mediante microscopia elettronica (SEM + EDS)
- riscaldamento in forno di vari spezzoni del cucchiaino 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 di campioni metallografici e successivo attacco chimico mediante soluzione di acido cloridrico (30ml), acido nitrico (10ml) e acqua distillata (30ml) [4]
- analisi in microscopia ottica.

Cucchiaino da cucina - Gli ingombri del cucchiaino da cucina preso in esame sono riportati in *figura 2*.

Le analisi chimiche eseguite sul componente indicano che il cucchiaino da cucina è realizzato in acciaio inossidabile AISI 430, la cui composizione chimica, secondo normativa, è riportata in *tabella 2* [5].

La procedura sperimentale seguita per l'analisi del cucchiaino da cucina ha previsto:

Monete da 20 €_{cent} - Il campione preso in considerazione è la moneta da 20 €_{cent} (*figura 3*), realizzata con il cosiddetto Nordic Gold, nome commerciale attribuito ad un ottone α , tipo CuZn5Al5Sn1, la cui composizione chimica, secondo normativa, è specificata in *tabella 3* [5].

La procedura sperimentale seguita per l'analisi delle monete ha previsto:

Tabella 3 - Composizione chimica nominale (% peso) delle monete da 20 €cent

Al	Zn	Sn	Cu	Impurezze
5±0,5	5±0,75	1±0,4	Bal.	<0,5

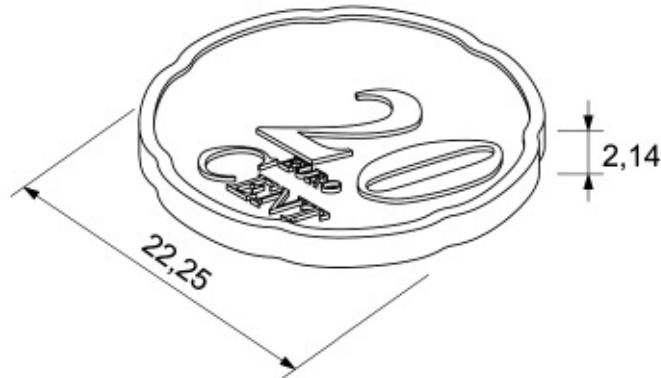


Figura 3 - Moneta 20 €cent in ottone CuZn5Al5Sn1

- esame visivo iniziale ed analisi preliminari mediante microscopia elettronica (SEM+EDS)
- riscaldamento in un forno di ogni moneta (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 ed analisi in microscopia elettronica a scansione (SEM+EDS)
- preparazione e lucidatura di campioni metallografici e successivo attacco chimico mediante soluzione di persolfato di ammonio (20g) e acqua distillata (100ml) (attacco ASTM 82) [4]
- analisi in microscopia ottica.

Risultati e discussione

Analisi visiva della canna fumaria - Una volta estratta dal forno e raffreddata in aria, ogni porzione di lamiera prelevata dalla canna fumaria



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



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



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

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 ricoperta dallo smalto è di colore bianco e presenta delle macchie dovute allo sporco; i bordi del lamierino sono privi di smalto (che si è distaccato durante il taglio) e sono caratterizzati dal color grigio chiaro tipico dell'acciaio
- 150 °C: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- 225 °C: i lembi non ricoperti dallo smalto sviluppano un sottile strato di ossido grigio scuro
- 300 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 225 °C
- 375 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 225 °C
- 450 °C: a causa dell'azione del calore la superficie smaltata risulta priva di macchie
- 525 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 450 °C
- 600 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 450 °C
- 750 °C: si assiste al rammollimento dello smalto. La zona smaltata presenta bordi arrotondati e non più frastagliati
- 900 °C: lo smalto cambia colore diventando verde, i bordi della zona smaltata risultano arrotondati e presentano i primi segni di bruciatura. Lo strato non ricoperto dallo smalto è fortemente ossidato
- 1050 °C: il metallo è completamente ossidato. Non vi è più alcuna traccia di smalto.

Dall'analisi visiva si nota che:

- la superficie smaltata si pulisce completamente a partire dai 450 °C. Oltre i 750

°C lo smalto sembra rammollirsi e superati i 900 °C assume il colore verde iniziando a presentare i primi segni di bruciatura. A 1050 °C non è più presente alcuna traccia di smalto.

- la lamiera presenta uno strato di ossido sempre più spesso. A 1050 °C l'ossido interessa l'intero spessore della lamiera.

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 7 a 9.

- 20 °C: a causa del forte incrudimento subito dal materiale durante la laminazione i grani presentano una forma allungata (asse maggiore: $80\mu\text{m} \div 100\mu\text{m}$ circa, asse minore: $20\mu\text{m} \div 35\mu\text{m}$ 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
- 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
- 450 °C: si assiste alla rigenerazione del grano che ora è equiassico e ha dimensioni comprese fra $40\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$ circa
- 525 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 450 °C
- 600 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 450 °C
- 750 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 450 °C
- 900 °C: si assiste ad un aumento delle dimensioni del grano, ora comprese fra $80\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$ circa
- 1050 °C: si nota come i bordi di grano siano difficilmente distinguibili e come il metallo si sia totalmente tramutato in ossido.

Dall'analisi al microscopio ottico si nota che:

- da 20 °C a 375 °C il grano ha forma allungata (asse maggiore: $80\mu\text{m} \div 100\mu\text{m}$ circa, asse minore: $20\mu\text{m} \div 35\mu\text{m}$ circa)

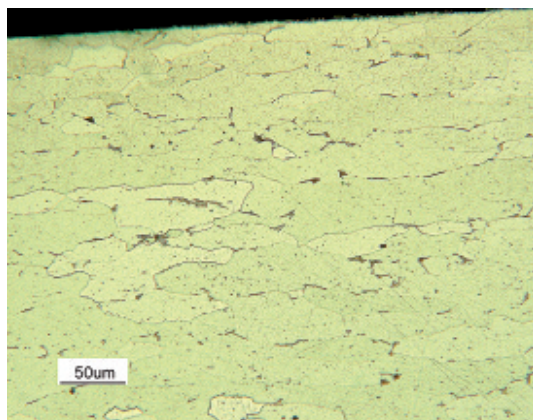


Figura 7 - Micrografia del campione di canna fumaria a 20 °C (200x)

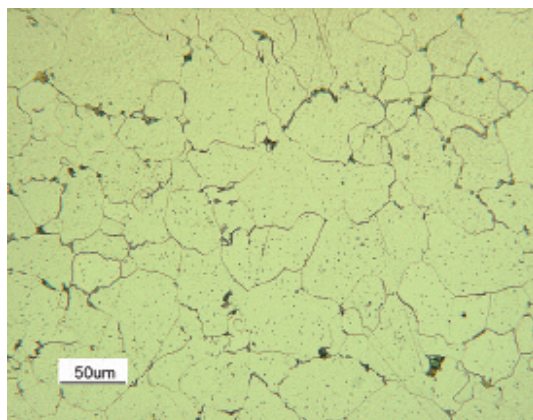


Figura 8 - Micrografia del campione di canna fumaria a 450 °C (200x)

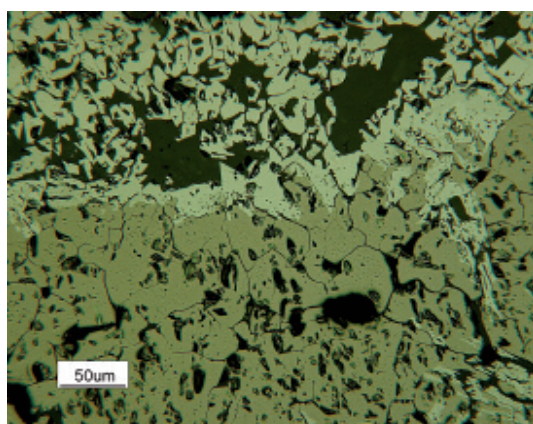


Figura 9 - Micrografia del campione di canna fumaria a 1050 °C (200x). Le caratteristiche metallografiche, osservate alle varie temperature di prova, sono di seguito descritte

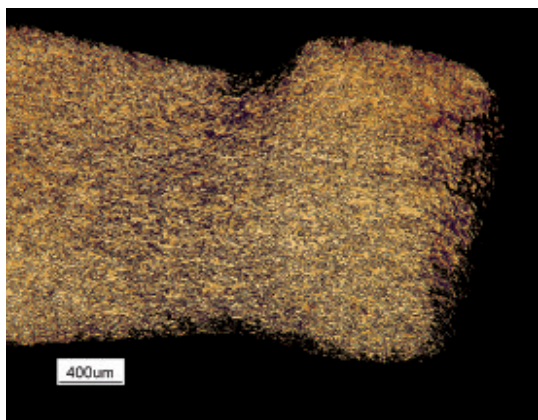


Figura 10 - Micrografia del campione di cucchiaio da cucina a 20 °C (25x)

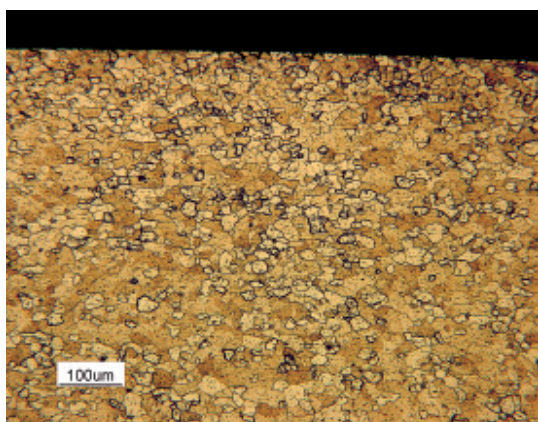


Figura 11 - Micrografia del campione di cucchiaio da cucina a 20 °C (100x)

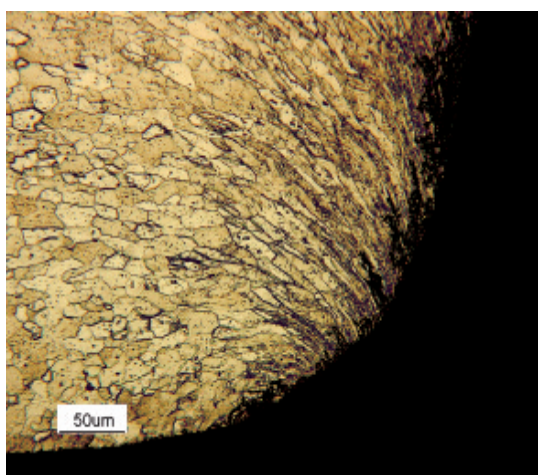


Figura 12 - Micrografia del campione di cucchiaio da cucina a 20 °C (200x)

- da 400 °C a 750 °C il grano è equiassico e ha dimensioni comprese fra 40µm e 100µm circa
- a 900 °C il grano è equiassico e ha dimensioni comprese fra 80µm e 150µm circa
- a 1050 °C i bordi di grano sono difficilmente distinguibili e il metallo risulta totalmente ossidato.

Cucchiaio da cucina. Analisi in microscopia ottica - 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.

Per una analisi completa dell'aspetto e delle colorazioni assunte dalla superficie di oggetti in acciaio inossidabile si rimanda a [6].

Una volta inglobato, lucidato ed attaccato ogni campione è stato analizzato al microscopio ottico; i risultati più significativi sono riportati nelle *figure da 10 a 15*.

- 20 °C: a causa del forte incrudimento subito dal materiale durante la laminazione i grani hanno dimensioni ridotte comprese fra 15µm ÷ 60µm circa. In corrispondenza del perimetro del cucchiaio, la tranciatura ha deformato i grani che prima di lacerarsi hanno subito una forte deformazione plastica adattandosi alla direzione di taglio (*figura 12*)
- 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
- 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
- 450 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20 °C
- 525 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20 °C
- 600 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 20 °C
- 750 °C: in alcune zone si nota un notevole

le ingrossamento del grano cristallino che raggiunge dimensioni comprese fra $100\mu\text{m}$ e $180\mu\text{m}$ circa. La rigenerazione della struttura cristallina è evidenziata anche dalla scomparsa dei grani deformati dalla tranciatura (figura 15)

- $900\text{ }^\circ\text{C}$: in alcune zone si assiste ad un ulteriore aumento delle dimensioni del grano che in tali aree raggiunge dimensioni comprese fra $200\mu\text{m}$ e $400\mu\text{m}$ circa
- $1050\text{ }^\circ\text{C}$: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a $900\text{ }^\circ\text{C}$.

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

- da $20\text{ }^\circ\text{C}$ a $600\text{ }^\circ\text{C}$ il grano ha dimensioni comprese fra $15\mu\text{m}$ ÷ $60\mu\text{m}$ circa, inoltre in corrispondenza del bordo di taglio i grani risultano deformati dall'operazione di tranciatura
- a $750\text{ }^\circ\text{C}$ in alcune zone il grano assume una dimensione compresa fra $100\mu\text{m}$ e $180\mu\text{m}$ circa.

La completa rigenerazione dei grani cristallini comporta la scomparsa delle zone deformate dal processo di tranciatura

- da $900\text{ }^\circ\text{C}$ a $1050\text{ }^\circ\text{C}$ in alcune zone il grano assume una dimensione compresa fra $200\mu\text{m}$ e $400\mu\text{m}$ circa

Analisi visiva della moneta da 20€_{cent} - Una volta estratta dal forno e raffreddata in aria, ogni moneta è stata fotografata ed è stata condotta l'analisi visiva della sua superficie (figure da 16 a 18):

I risultati ottenuti sono riportati di seguito:

- $20\text{ }^\circ\text{C}$: la superficie è di color giallo oro, tipico della lega Nordic Gold
- $150\text{ }^\circ\text{C}$: non è stata riscontrata alcuna alterazione superficiale
- $225\text{ }^\circ\text{C}$: le zone in rilievo si sono leggermente scurite
- $300\text{ }^\circ\text{C}$: la moneta si è ricoperta di uno strato di ossido di color marrone chiaro ben adeso alla superficie
- $375\text{ }^\circ\text{C}$: lo strato di ossido ha assunto il colore marrone scuro e risulta ancora ben adeso alla superficie

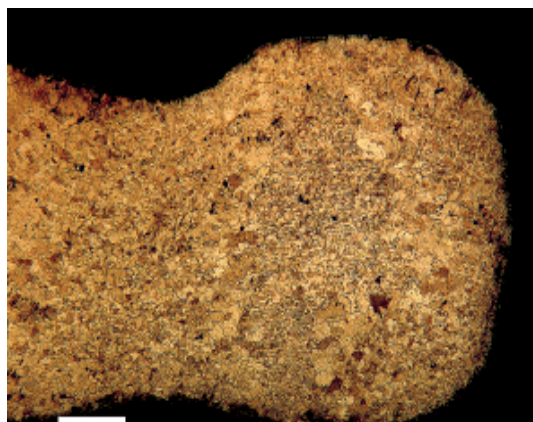


Figura 13 - Micrografia del campione di cucchiaino da cucina a $750\text{ }^\circ\text{C}$ (25x)

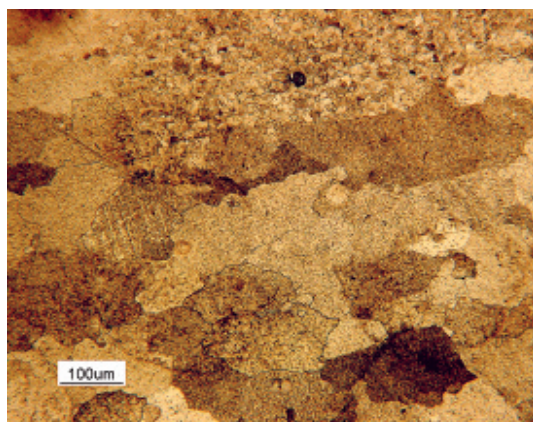


Figura 14 - Micrografia del campione di cucchiaino da cucina a $750\text{ }^\circ\text{C}$ (100x)

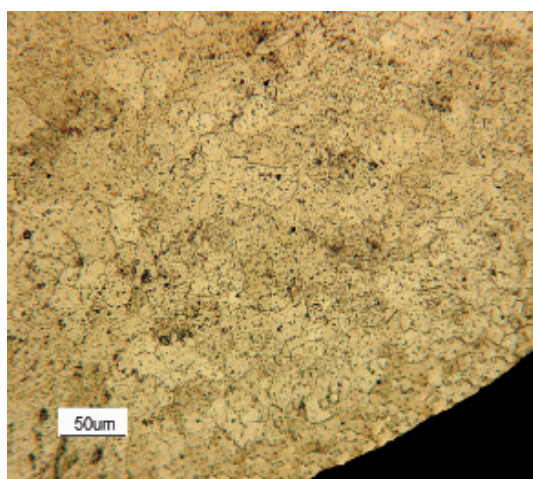


Figura 15 - Micrografia del campione di cucchiaino da cucina a $750\text{ }^\circ\text{C}$ (200x)



Figura 16 - Analisi visiva delle monete riscaldate a 20 °C, 150 °C, 225 °C, 300 °C (da sinistra a destra)



Figura 17 - Analisi visiva delle monete riscaldate a 375 °C, 450 °C, 525 °C, 600 °C (da sinistra a destra)



Figura 18 - Analisi visiva delle monete riscaldate a 750 °C, 900 °C, 1050 °C (da sinistra a destra)

- 450 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 375 °C
- 525 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 375 °C
- 600 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 375 °C
- 750 °C: non si rilevano sostanziali differenze rispetto al caso a 375 °C
- 900b °C: lo strato di ossido è ora di colore grigio e a differenza dei casi precedenti è fragile e può essere facilmente rimosso con le dita
- 1050b °C: la moneta si è deformata e gli unici rilievi riconoscibili sono quelli dell'Europa e della scritta 20€_{cent.} La superficie ha assunto una colorazione dorata più brillante rispetto a quella riscontrata a 20 °C.

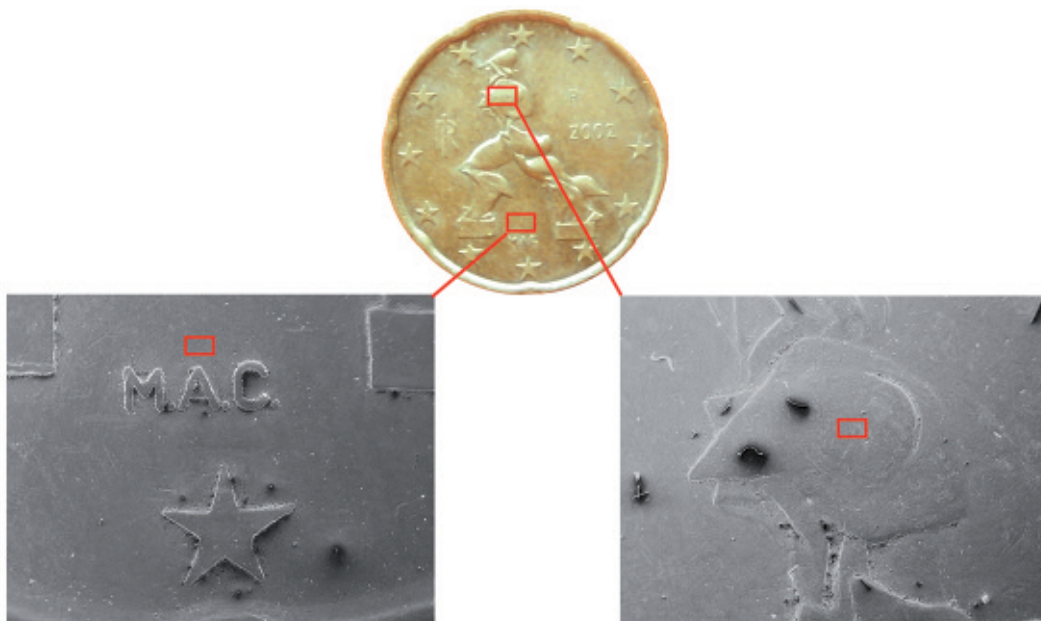


Figura 19 - Zone analizzate della moneta mediante microscopia elettronica

Dall'analisi visiva si nota come all'aumentare della temperatura la moneta si ricopre di uno strato di ossido che cambia progressivamente di colore (si scurisce); tale strato d'ossido diviene fragile raggiunti i 900 °C. A 1050 °C la moneta si deforma per effetto dell'incipiente fusione, perde quasi del tutto i rilievi stampati ed assume nuovamente una colorazione dorata.

Analisi in microscopia elettronica - L'analisi in microscopia elettronica è stata effettuata su due zone del dritto della moneta ed ha

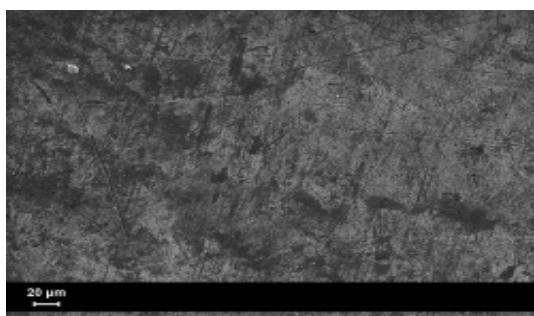


Figura 20, Zona 1 - Morfologia della superficie della moneta riscaldata a 150 °C (1000x)

previsto sia l'analisi morfologica che l'analisi chimica (mediante sonda EDS) degli ossidi superficiali.

Le zone prese in considerazione sono indicate in figura 19 e rappresentano l'area sopra la lettera "A" della sigla M.A.C. (Zona 1) e l'area situata al centro del busto della sagoma (Zona 2).

Zona 1 - Dall'analisi emerge che (figure da 20 a 24):

- a partire da 375 °C lo strato di ossido assume uno spessore tale da ricoprire tutti i

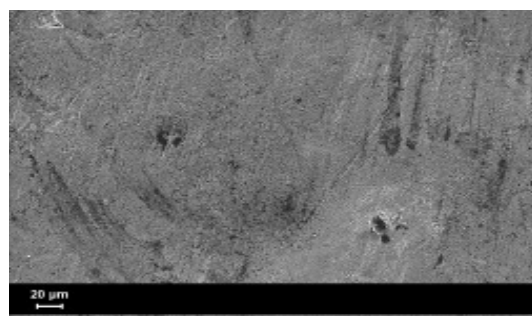


Figura 21, Zona 1 - Morfologia della superficie della moneta riscaldata a 375 °C (1000x)

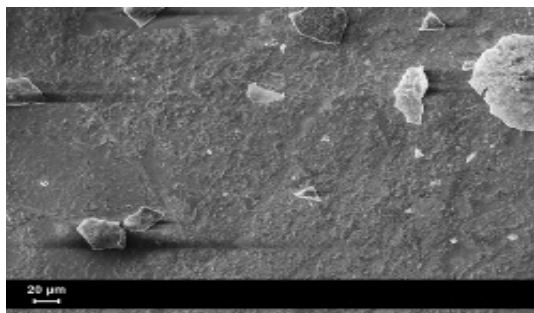


Figura 22, Zona 1 - Morfologia della superficie della moneta riscaldata a 900 °C (1000x)

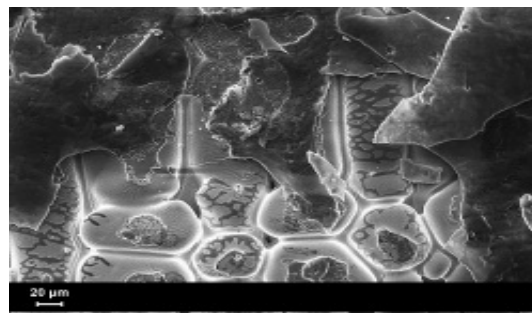


Figura 23, Zona 1 - Morfologia della superficie della moneta riscaldata a 1050 °C (1000x)

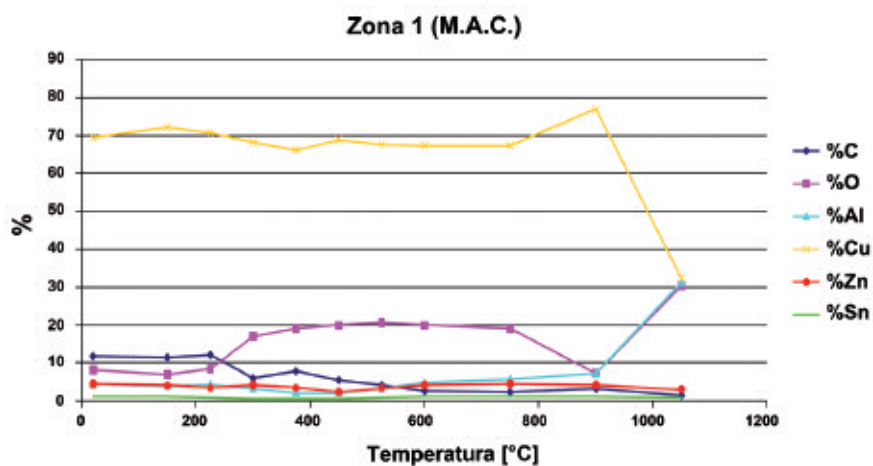


Figura 24 - Analisi chimica, mediante spettroscopia EDS, della superficie della moneta (Zona 1)

graffi visibili a 1000x. Tra i 300 °C e i 750 °C, l'ossido è ben adeso alla moneta e quindi una volta formatosi, i graffi non possono più essere rilevati

- gli ossidi che si creano sulla superficie

della moneta sono di due tipi differenti (vedi figura 24).

Dall'analisi chimica, effettuata localmente mediante sonda EDS, si nota infatti che:

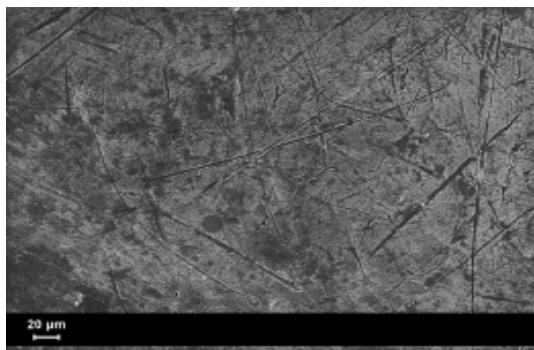


Figura 25, Zona 2 - Morfologia della superficie della moneta riscaldata a 150 °C (1000x)

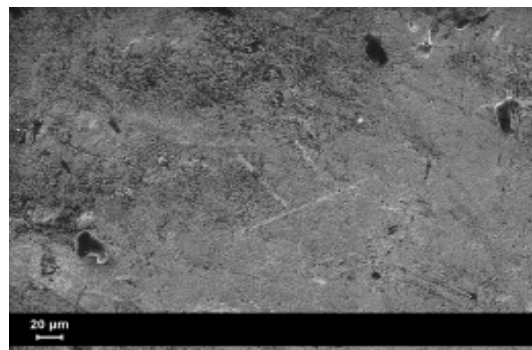


Figura 26, Zona 2 - Morfologia della superficie della moneta riscaldata a 375 °C (1000x)

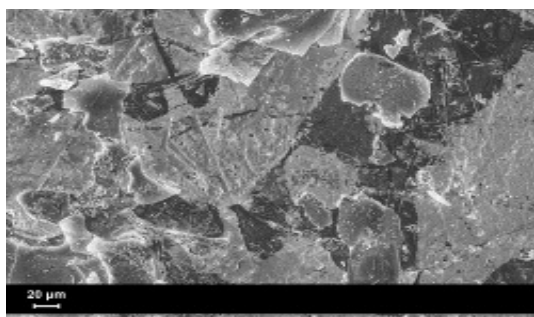


Figura 27, Zona 2 - Morfologia della superficie della moneta riscaldata a 900 °C (1000x)

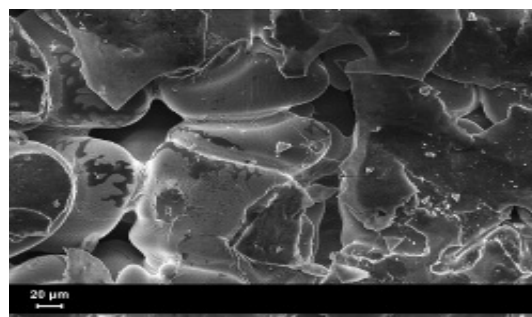


Figura 28, Zona 2 - Morfologia della superficie della moneta riscaldata a 1050°C (1000x)

- fino a 225 °C, la composizione rilevata è quella della lega
- da 300 °C a 750 °C la moneta si ricopre di ossidi, prevalentemente ossidi di rame
- a 900 °C l'ossido presente tende a diventare fragile; l'analisi ha quindi inte-

ressato la superficie della moneta rimasta scoperta e ciò spiega perché la composizione ritorna ad essere simile a quella iniziale

- a 1050 °C prevale la presenza di ossido d'alluminio.

Il fenomeno descritto trova vari riscontri.

Da oggi puoi installare





Saldatura certificata



facile
veloce
comodo

www.spkprefabb.it





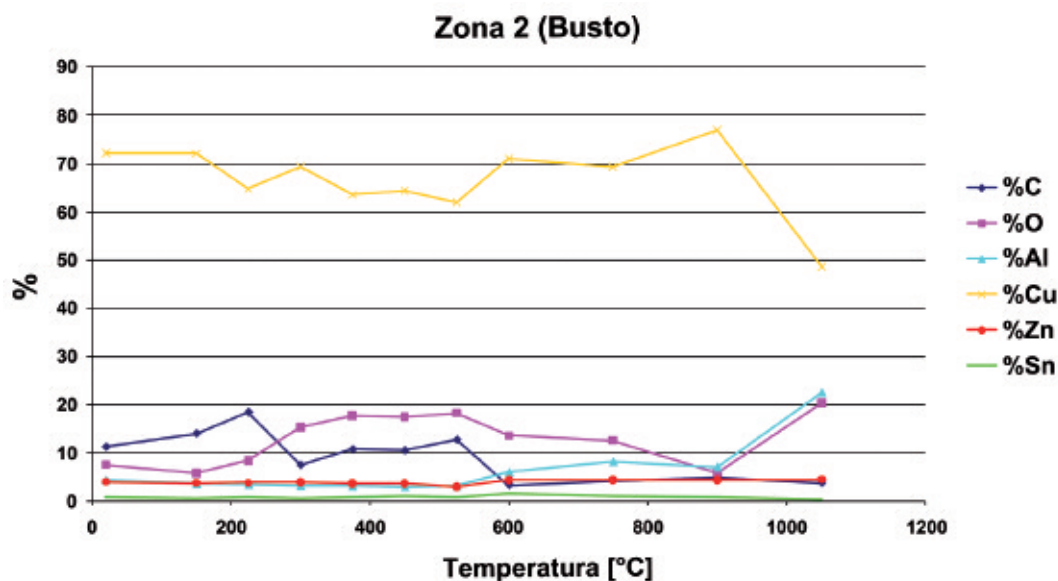


Figura 29 - Analisi chimica, mediante spettroscopia EDS, della superficie della moneta (Zona 2).

Da un lato l'analisi morfologica evidenzia come, a 1050 °C, la superficie della moneta non abbia più una colorazione marrone scuro ma assuma una colorazione giallo brillante; dall'altro l'analisi in microscopia elettronica permette di osservare la differente morfologia dell'ossido di rame (scaglie piccole e arrotondate) rispetto a quella dell'ossido di alluminio (scaglie grandi e spigolose).

Dall'analisi chimica si nota anche come lo stagno e lo zinco non partecipino alla formazione degli ossidi.

Zona 2 - Dall'analisi della zona 2 emergono sostanzialmente risultati analoghi a quanto ottenuto per la zona 1 (figure da 25 a 29).

Tale area, essendo in rilievo nella moneta, è maggiormente rigata e, quindi, permette di apprezzare meglio la scomparsa dei graffi all'aumentare della temperatura.

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 30 a 32.

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

- 20 °C: i grani hanno dimensioni comprese fra 80µm ÷ 120µm 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: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 20 °C
- 525 °C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 20 °C
- 600 °C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 20 °C
- 750 °C: non si rilevano differenze sostanziali rispetto al caso a 20 °C
- 900 °C: si nota un notevole ingrossamento del grano cristallino che ora ha dimensioni comprese fra 350µm e 900µm circa, tale circostanza è attribuibile ai fenomeni di recovery e ricristallizzazione [7]
- 1050 °C: si nota come alcune zone della

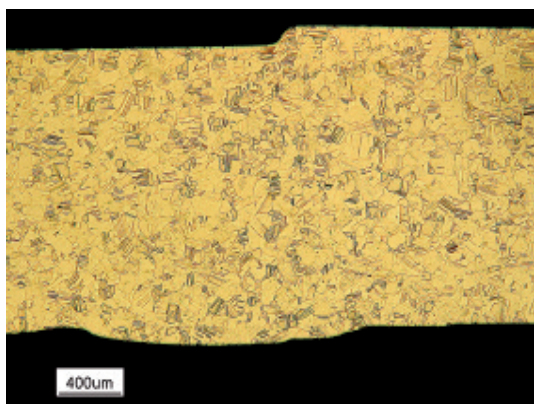


Figura 30 - Micrografia della moneta a 20 °C (25x)

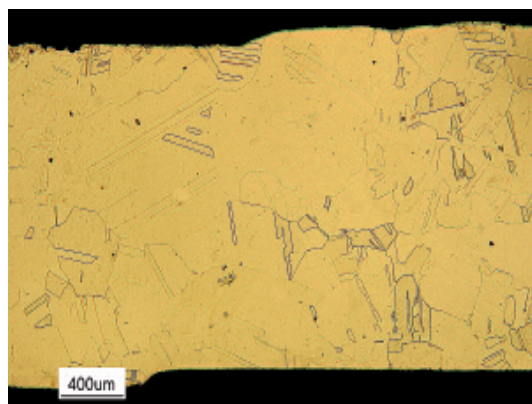


Figura 31 - Micrografia della moneta a 900 °C (25x)

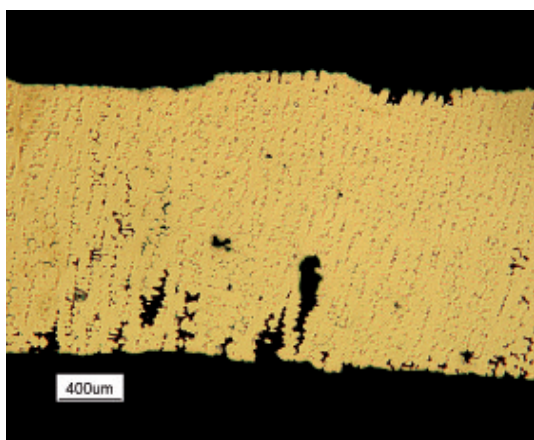


Figura 32 - Micrografia della moneta a 1050 °C (25x)

moneta siano giunte a fusione, il rapido raffreddamento ha poi favorito lo sviluppo delle strutture dendritiche.

Dall'analisi al microscopio ottico si osserva come il grano cristallino cresca di dimensione solo dopo i 900 °C e come a 1050 °C alcune zone della moneta giungano ad incipiente fusione.

Conclusioni

Nel presente lavoro sono state studiate tre componenti comuni (canna fumaria, cucchiaio da cucina e monete da 20 €_{cent}), facilmente rinvenibili nel luogo di un incendio domestico o industriale.

Analisi Visiva																		
Mat.	Componente	Fenomeno	Temperatura [°C]															
			20	150	225	300	375	450	525	800	750	900	1050					
Fe-C	Canna fumaria	Pulizia della superficie smaltata																
		Ossidazione totale lamiera																
Cu-Zn	Monete 20 € _{cent}	Ossido di rame (scuro) ben adeso alla superficie																
		Ossido di rame fragile																
		Deformazione moneta \ Ossido di alluminio (brillante)																
		Scomparsa dei graffi																

■ Indica che il fenomeno si manifesta alla temperatura considerata
 ☒ Indica che la simulazione d'incendio non è stata eseguita alla temperatura considerata

Figura 33 - Correlazione tra temperatura e modificazioni morfologiche osservate sui tre componenti oggetto dello studio

Analisi Metallografica														
Mat.	Componente	Fenomeno	Temperatura [°C]											
			20	150	225	300	375	450	525	600	750	900	1050	
Fe-C	Canna fumaria	Recovery \ Ricristallizzazione												
		Ossidazione totale lamiera												
Fe-Cr	Cucchiaio	Recovery \ Ricristallizzazione												
Cu-Zn	Monete 20 € _{cart}	Recovery \ Ricristallizzazione												
		Presenza delle stutture dendritiche												

■ Indica che il fenomeno si manifesta alla temperatura considerata

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

Figura 34 - Correlazione tra temperatura e modificazioni metallurgiche osservate sui tre componenti oggetto dello studio.

Su ogni componente è stata simulata l'alterazione termica indotta da un incendio e sono stati eseguiti i seguenti esami metallogurici:

- osservazione morfologica
- analisi in microscopia ottica
- analisi in microscopia elettronica a scansione

Questo tipo di analisi ha permesso di associare ad ogni temperatura d'incendio una o più alterazioni morfologiche/microstrutturali del componente analizzato.

I risultati ottenuti hanno:

- messo in luce come alcune alterazioni morfologiche o microstrutturali possano essere impiegate per la determinazione delle temperature massime raggiunte in un incendio;
- permesso di realizzare delle tabelle attraverso cui è possibile correlare le alterazioni morfologiche e microstrutturali alla temperatura (figure 33 e 34).

L'utilizzo di queste tabelle è da ritenere un valido ausilio per la determinazione delle temperature massime raggiunte nel corso di un incendio.

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) W. D. Callister, *Material Science and Engineering: An Introduction*, fifth ed., Wiley, New York, 2000.
- 4) AA.VV., ASM Handbook, Volume 9, *Metallography and microstructure*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2004.
- 5) AA.VV., ASM Handbook, Volume 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2004.
- 6) A. Costa, M. Boniardi, A. Casaroli, PHD thesis: *Fire investigation di lamiera in AISI 316L per tubolari di canne fumarie. Studio dell'alterazione termica e degli ossidi superficiali*. Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2011.
- 7) D. R. Askeland, *The Science and Engineering of Materials*, fifth ed., Thomson, Cheltenham, UK, 2007.