

G. Marina La Vecchia¹, Piero Maestrelli²

Le nuove tecniche di saldatura e rischi per la salute

¹ Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale - Università di Brescia, Via Branze, 38, 25123 Brescia, Italy

² Dipartimento di Medicina Ambientale e Sanità Pubblica - Università di Padova, Via Giustiniani, 2, 35128 Padova, Italy

RIASSUNTO. In questo lavoro sono richiamati i vantaggi derivanti dagli interventi sulla regolazione elettrica dell'arco con corrente pulsata e viene descritta la tecnica di saldatura per frizione che garantisce la continuità del giunto grazie alla formazione di una zona plasticizzata per attrito. La saldatura per frizione non produce zona fusa e non genera fumi, radiazioni o rumore, non richiede gas di protezione e ha inoltre il vantaggio di essere una tecnica a basso consumo di energia. Le nuove tecniche di saldatura trovano un'applicazione ancora limitata e non vi sono studi specifici sui lavoratori esposti. Gli effetti sulla salute del lavoro di saldatura tradizionale possono essere acuti e cronici. I principali effetti respiratori acuti sono la febbre da fumi metallici e il decremento della funzione respiratoria durante il turno di lavoro. Il calore, l'elettricità e le radiazioni UV possono provocare lesioni cutanee e oculari. Gli effetti cronici sull'apparato respiratorio comprendono la bronchite cronica, la pneumoconiosi benigna o siderosi, l'asma ed un possibile incremento dell'incidenza di cancro polmonare. I saldatori presentano maggior frequenza, durata e gravità della infezioni respiratorie.

Parole chiave: saldatura, radiazioni, apparato respiratorio.

ABSTRACT. *NEW WELDING PROCESSES AND HEALTH EFFECTS OF WELDING. This paper describes some of the recent developments in the control technology to enhance capability of Pulse Gas Metal Arc Welding. Friction Stir Welding (FSW) processing has been also considered. FSW is a new solid-state joining technique. Heat generated by friction at the rotating tool softens the material being welded. FSW can be considered a green and energy-efficient technique without deleterious fumes, gas, radiation, and noise. Application of new welding processes is limited and studies on health effects in exposed workers are lacking.*

Acute and chronic health effects of conventional welding have been described. Metal fume fever and cross-shift decline of lung function are the main acute respiratory effects. Skin and eyes may be affected by heat, electricity and UV radiations. Chronic effects on respiratory system include chronic bronchitis, a benign pneumoconiosis (siderosis), asthma, and a possible increase in the incidence of lung cancer. Pulmonary infections are increased in terms of severity, duration, and frequency among welders.

Key words: welding, radiations, respiratory system.

La saldatura per fusione e per frizione

Nel settore della saldatura la ricerca è da sempre un tema di estrema importanza e dalla quale derivano spunti per produrre giunti saldati con proprietà meccaniche ottimizzate, per incrementare il numero dei materiali saldabili, per ridurre i costi di produzione e per aumentare la produttività.

In particolare, per quanto riguarda le saldature per fusione (Figura 1) è possibile affermare che, indipendentemente dalla tecnica prescelta, le fonti di calore utilizzate (fiamma, arco elettrico, laser, fascio di elettroni, plasma), sono in grado di trasferire al giunto energia termica sufficiente per portare a fusione un certo volume di metallo base e, se utilizzato, di metallo d'apporto. Viene in tal modo realizzata una continuità metallica contraddistinta da una zona fusa posta in mezzeria del giunto e da due zone termicamente alterate ad essa adiacenti la cui estensione dipende sia dalla tecnica sia dai parametri di saldatura.

Diversi sono i fattori che influenzano la scelta della tecnologia di saldatura, tra questi lo spessore ed il tipo di metallo base da saldare, le proprietà meccaniche che devono essere garantite dal giunto, la velocità di saldatura, la posizione di saldatura ed i costi. Il tipo di tecnologia di saldatura ha ricadute dirette sulla composizione chimica e sul quantitativo di fumi che si formano durante la saldatura a seguito della condensazione del metallo vaporizzato e della decomposizione dei materiali non metallici coinvolti nella saldatura (es. rivestimento degli elettrodi). A tal riguardo è bene precisare che anche i parametri di saldatura hanno effetto sul quantitativo dei fumi prodotti; considerando a titolo di esempio la saldatura ad arco è possibile affermare che più elevata è l'intensità di corrente maggiore è il quantitativo di fumi che si forma nell'unità di tempo. In letteratura vengono proposte numerose soluzioni per migliorare le condizioni di lavoro in prossimità delle postazioni di saldatura attraverso l'adozione di sistemi di aspirazione dedicati (1). Fondamentali in questo ambito sono gli interventi finalizzati a sensibilizzare i saldatori sui rischi connessi all'inalazione dei fumi per assicurare un corretto uso dei sistemi di protezione. Per quanto riguarda l'ambiente di lavoro, miglioramenti derivano dall'automazione dei sistemi di aspirazione fumi e di ventilazione delle postazioni di lavoro.

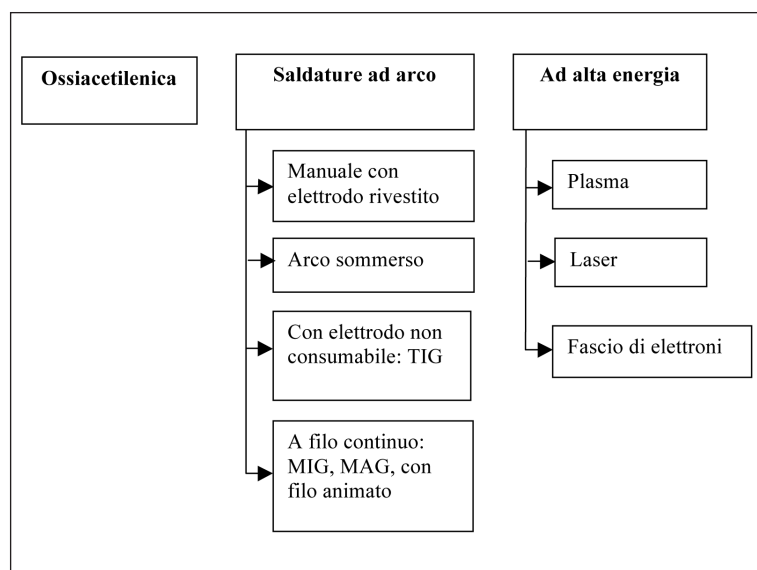


Figura 1. Classificazione delle saldature per fusione

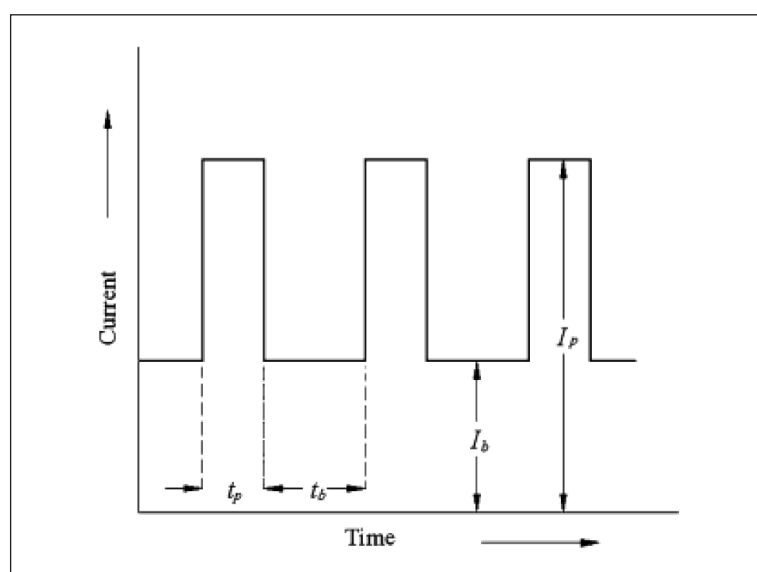


Figura 2. Schema dell'andamento intensità di corrente in funzione del tempo per una saldatura ad arco pulsata (I_p = corrente di picco, I_b = corrente di base)

Considerando le innovazioni delle saldature ad arco con filo continuo sono da segnalare gli interventi dedicati alla regolazione ed al controllo della parte elettrica delle saldatrici. Infatti per poter superare i tradizionali limiti della fusione del filo e per poter estendere l'impiego di queste saldature alle leghe di alluminio si è introdotta l'alimentazione pulsata (Fig. 2) (2-3). La tecnica della corrente pulsata, pur essendo databile a metà degli anni '60, è stata solo da pochi anni utilizzata nell'industria grazie all'avvento dell'elettronica la quale attraverso microprocessori è in grado di attuare un controllo "intelligente" e mediante l'utilizzo degli inverter ha consentito la produzione di saldatrici di dimensioni più contenute e quindi più facilmente trasportabili. Tra i vantaggi delle saldatrici di ultima generazione che utilizzano l'alimentazione pulsata vi è poi una risposta più rapida ed una migliore stabilità dell'arco ottenuta attraverso il controllo della tensione che

garantisce l'ottenimento di giunti saldati di qualità migliorata a prezzi sostenibili (4).

Un cenno a parte merita infine la saldatura per frizione nota come Friction Stir Welding (FSW) in quanto consente di realizzare un giunto saldato di buona qualità senza sviluppo di fumi. Questa tecnica di saldatura è piuttosto recente essendo stata messa a punto da The Welding Institute (UK) nel 1991 (5-7) con lo scopo iniziale di superare le difficoltà di saldatura di alcune leghe di alluminio alto resistenziali destinate al settore aeronautico (leghe serie 2000 e 7000). Successivamente il suo uso è stato esteso a tutte le leghe di alluminio e di magnesio, ai compositi con matrice alluminio, alle leghe base rame e a quelle di titanio, ai giunti realizzati tra leghe dissimili (8) e, recentemente, anche se ancora con qualche problema non risolto, agli acciai (9). La tecnica FSW è prevalentemente destinata alla realizzazione di giunti tra lamiere, anche di grosso spessore, e garantisce l'ottenimento di ottime proprietà meccaniche, bassa distorsione in assenza di fusione della/e lega/e da saldare. Il giunto è infatti realizzato sfruttando il calore che per attrito viene ad essere trasmesso da un utensile non consumabile di geometria opportuna (pin) messo in rotazione a contatto con la zona da saldare (Fig. 3). L'utensile plasticizza la zona centrale del giunto realizzando la continuità metallica senza però creare la zona fusa tipica dei giunti ottenuti con le tecniche di saldatura per fusione.

La FSW non richiede l'utilizzo di metallo d'apporto, di flussi o di gas di protezione.

Dal punto di vista metallurgico l'ottimizzazione delle proprietà meccaniche del giunto ottenuto per frizione è da associare all'affinamento del grano, all'assenza di strutture dendritiche di solidificazione e, conseguentemente, di porosità. La tecnica è ancora in fase

di evoluzione ed è più che ragionevole pensare che in breve tempo porterà ad ulteriori ed interessanti sviluppi.

Rischi per la salute nei saldatori

In Italia, il numero di occupati in imprese che fabbricano prodotti in metallo, macchine e apparecchi meccanici, e quindi potenzialmente adibiti a mansioni di saldatura, arriva ad 1 milione (10). Il lavoro di saldatura è eterogeneo in termini di tecnologia, di materiali utilizzati, di posto di lavoro, di tipo ed intensità dell'esposizione professionale; quindi i rischi per la salute sono variabili. La Tabella I riassume i principali pericoli connessi al lavoro di saldatura tradizionale. Molti di questi componenti pericolosi sono stati eliminati o ridotti con le nuove tecniche di saldatura. Tuttavia queste tecniche trovano un'applica-

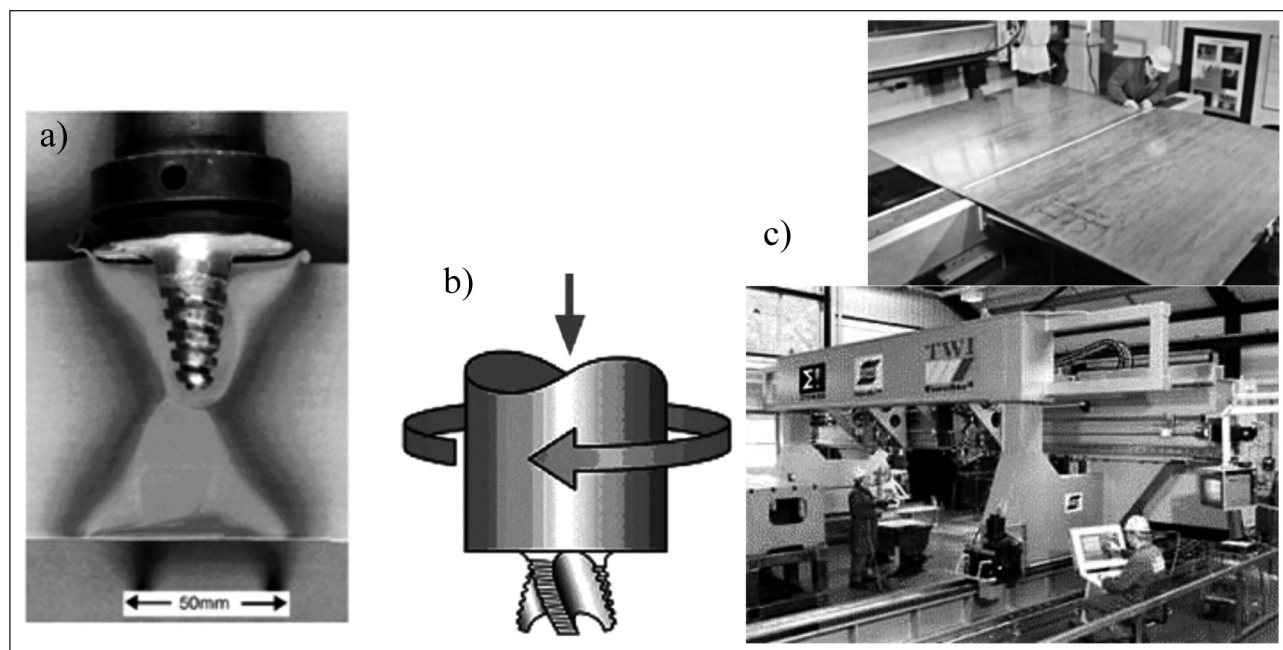


Figura 3. FSW: a) pin posizionato nella zona plasticizzata, b) esempio di pin e c) postazione per saldature lamiera

Tabella I. Principali componenti pericolosi nella saldatura

Fumi	Gas	Radiazioni	Altri pericoli
Ferro (ossido)	Ozono	Ultraviolette	Calore
Cromo (Cr ⁶⁺ , Cr ³⁺)	Ossidi di azoto	Visibili	Rumore
Nickel	Monossido di carbonio	Infrarosse	Elettricità
Manganese	Anidride carbonica		Vibrazioni
Silice amorfa/silicati			Posture
Fluoruri			
Cadmio			
Alluminio			
Zinco			
Rame			

zione ancora limitata e non vi sono studi specifici sui lavoratori esposti. È stato osservato, ad esempio, che la saldatura dell'alluminio per frizione libera aerosol di particelle submicroniche e ultrafini di zinco, alluminio e ferro per cui i rischi per la salute potrebbero essere diversi da quelli tradizionali (11).

Gli effetti dell'esposizione ai fumi di saldatura possono essere distinti in acuti e cronici, respiratori e non respiratori (12).

Effetti acuti

Respiratori

Gli effetti respiratori acuti sono stati descritti in lavoratori esposti a concentrazioni elevate di fumi di saldatura.

– Febbre da fumi metallici

Rappresenta il più frequente disturbo respiratorio acuto nei saldatori (12). È caratterizzata da sintomi simil-

influenzali (febbre, brividi, malessere generale, mialgie, cefalea, tosse secca, dispnea), che iniziano dopo 4-8 ore dall'esposizione e si risolvono spontaneamente in 24-48 ore. È in genere dovuta all'inhalazione di fumi contenenti ossidi di zinco nella saldatura di acciaio zincato, ma può essere causata da altri ossidi metallici (rame, magnesio, stagno o cadmio). Studi sull'uomo hanno suggerito che vi sia un reclutamento intrapolmonare di polimorfonucleati neutrofilici con liberazione di TNF- α , nelle fasi iniziali (3

ore), e più tardivamente di IL-6 e IL-8 (8-22 ore). Una caratteristica della febbre da metalli è lo sviluppo di tolleranza per 1-2 giorni dopo un episodio, per cui i lavoratori restano asintomatici in occasione di esposizioni ripetute e i sintomi si manifestano più spesso il lunedì.

– Decremento della funzione respiratoria

È stata osservata una lieve e transitoria riduzione di indici funzionali respiratori durante il turno (volumi polmonari, flussi massimi espiratori, transfer del CO), specie nei saldatori esposti ad elevate concentrazioni di fumi, che può essere associata a sintomi respiratori come tosse, espettorato, sibili e senso di oppressione toracica. Le alterazioni funzionali e i sintomi respiratori sono reversibili e non sono correlati allo sviluppo di asma o BPCO (12).

Non respiratori

- Ustioni ed elettrocuzioni dovute al calore e all'elettricità.
- Foto-dermatiti da UV nelle zone cutanee scoperte.

- Foto-cheratocongiuntivite causata dalle radiazioni ultraviolette sviluppate dall'arco elettrico.
- Infiammazione sistemica.

Recenti studi hanno dimostrato che l'esposizione a fumi di saldatura induce infiammazione sistemica (neutrofilia e aumento della proteina C reattiva) e alterazioni del sistema nervoso autonomo (riduzione delle variazioni del ritmo cardiaco) (13-14). Il significato clinico di tali variazioni resta da determinare.

Effetti cronici

Respiratori

- *Bronchite cronica/Broncopneumopatia cronica ostruttiva (BPCO)*

La tosse e l'espettorato cronici sono i sintomi più frequentemente associati al lavoro di saldatura (10). Numerosi studi hanno indicato che i fumi di saldatura possono indurre bronchite cronica indipendentemente dall'abitudine al fumo (15). Tuttavia, la prevalenza di bronchite cronica particolarmente elevata nei saldatori che fumano ha suggerito che vi sia un'interazione tra fumo di sigaretta e saldatura (12).

Vi è limitata evidenza che l'esclusiva esposizione a fumi di saldatura, in assenza di episodi acuti di inalazione massiva di fumi o di altre esposizioni concomitanti o di abitudine al fumo di sigaretta, determini BPCO (12).

- *Pneumoconiosi/fibrosi polmonare*

La comparsa di piccole opacità nodulari alla radiografia del torace di esposti a fumi di saldatura per almeno 15 anni, dovute ad accumulo di ossidi di ferro nei macrofagi alveolari, senza evidenza di fibrosi polmonare evolutiva è stata definita "siderosi". Questa pneumoconiosi benigna è in genere asintomatica e senza alterazioni della funzione respiratoria. Sono stati tuttavia descritti dei casi di fibrosi polmonare interstiziale in saldatori con esposizione più lunga (>25 anni) ed ad elevate concentrazioni di fumi, in cui i depositi di ferro erano contigui ad aree di fibrosi. In questi casi, i soggetti potevano avere sintomi respiratori, come dispnea e bronchite cronica, e alterazioni della funzione respiratoria (quadro restrittivo o misto, riduzione del transfer del CO, ipossiemia da sforzo) (12).

- *Asma*

L'esposizione a fumi di saldatura è frequentemente associata con asma correlata al lavoro, che comprende l'asma professionale, l'asma da irritanti e l'asma preesistente esacerbata dal lavoro (16). L'agente causale nei casi di asma professionale in genere non è stato determinato. Negli studi che hanno eseguito test di provocazione bronchiale specifico, l'asma era indotta da fumi di saldatura di acciai inossidabili ed è stato quindi ipotizzato che gli agenti causali fossero cromo e nickel (17).

- *Infezioni respiratorie*

La frequenza e la gravità di infezioni delle vie aeree superiori e inferiori è maggiore nei saldatori (12). L'inala-

zione di fumi metallici aggrava la prognosi di polmonite e comporta un eccesso di mortalità per questa causa (18-19). Il fenomeno è stato attribuito ad una ridotta capacità citotossica delle cellule immunocompetenti dei saldatori (12).

- *Cancro polmonare*

I fumi di saldatura sono stati classificati dalla International Agency for Research on Cancer (IARC) come 2B, "possibili cancerogeni" (20). È stato ipotizzato che il rischio cancerogeno fosse circoscritto alla saldatura di acciaio inossidabile per il contenuto in cromo e nickel, noti cancerogeni polmonari. Tuttavia studi successivi alla valutazione IARC non hanno confermato questa ipotesi e la questione se il processo di saldatura di ferro dolce costituisca di per se un rischio di cancro polmonare rimane controversa. La più recente meta-analisi della letteratura 1954-2004 ha evidenziato un rischio relativo di cancro polmonare nella categoria dei saldatori di 1.26 (95% CI 1.20-1.32) (21).

Non respiratori

- *Sistema nervoso centrale*

È stato dimostrato che il manganese è neurotossico se inalato in elevate concentrazioni sul posto di lavoro. Tuttavia, la questione se il manganese contenuto nei fumi di saldatura possa causare problemi neurologici non è ancora risolta, ad eccezione di casi isolati che avevano lavorato in particolari condizioni espositive e presentavano chiara intossicazione da manganese (12). Alcuni costituenti dei fumi di saldatura (manganese, piombo, alluminio) sono sospettati di causare sintomi psichiatrici in lavoratori esposti (12).

Bibliografia

- 1) Ventilation guide for weld fume. Miami, American Welding Society Ed.2001.
- 2) Pal K, Pal SK. Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2011; 20: 918-931.
- 3) Palani PK, Murugan N. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology* 2006; 172: 1-10.
- 4) Praveen P, Yarlagadda PKDV, Kang MJ. Advancements in pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology* 2005; 164-165: 1113-1119.
- 5) Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering* 2005; 50: 1-78.
- 6) Nandan R, TDeb-Roy T, Bhadeshia HKDH. Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science* 2008; 53: 980-1023.
- 7) MA ZY. Friction Stir Processing Technology: a review. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2008; 39A: 642-658.
- 8) Murr LE. A review of FSW research on dissimilar metal and alloy systems. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2010; 19: 1071-1089.
- 9) Fujii H, Cui L, Tsuji N, Maeda M, Nakata K, Nogi K. Friction stir welding of carbon steels. *Materials Science and Engineering A* 2006; 429: 50-57.
- 10) ISTAT. 8° Censimento generale dell'industria e dei servizi 2001. <http://dwcis.istat.it/cis/docs/fascicoli/ITALIA.pdf>.
- 11) Pfefferkorn FE, Bello D, Haddad G, Park JY, Powell M, McCarthy J, Bunker KL, Fehrenbacher A, Jeon Y, Virji MA, Gruetzmacher G,

- Hoover MD. Characterization of exposures to airborne nanoscale particles during friction stir welding of aluminum. *Ann Occup Hyg*. 2010; 54: 486-503.
- 12) Antonini JM. Health Effects of Welding. *Crit Rev Tox* 2003; 33: 61-103.
 - 13) Fang SC, Cavallari JM, Eisen EA, Chen J-C, Mittleman MA, Christiani DC. Vascular Function, Inflammation, and Variations in Cardiac Autonomic Responses to Particulate Matter Among Welders. *Am J Epidemiol* 2009; 169: 848-856.
 - 14) Kim JY, Chen J-C, Christiani DC. Exposure to welding fumes is associated with acute systemic inflammatory response. *Occup Environ Med* 2005; 62: 157-63.
 - 15) Lillienberg L, Zoch J-P, Kromhout H, Plana E, Jarvis D, Toren K, Kogevinas M. A population-based study on welding exposures at work and respiratory symptoms. *Ann Occup Hyg* 2008; 52: 107-15.
 - 16) Banga A, Reilly MJ, Rosenman KD. A Study of Characteristics of Michigan Workers With Work-Related Asthma Exposed to Welding. *JOEM* 2011; 53: 415-19.
 - 17) Hannu T, Piipari R, Tuppurainen M, Nordman H, Tuomi T. Occupational asthma caused by stainless steel welding fumes: a clinical study. *Eur Respir J* 2007; 29: 85-90.
 - 18) Wong A, Marrie TJ, Garg S, Kellner JD, Tyrrell GJ and the SPAT Group. Welders are at increased risk for invasive pneumococcal disease. *Int J Inf Dis* 2010; 14: 796-799.
 - 19) Palmer KT, Cullinan P, Rice S, Brown T, Coggon D. Mortality from infectious pneumonia in metalworkers: a comparison with deaths from asthma in occupations exposed to respiratory sensitizers. *Thorax* 2009; 64: 983-986.
 - 20) International Agency for Research on Cancer. Chromium, nickel and welding fumes. *IARC* 1990; vol 49.
 - 21) Ambroise D, Wild P, Moulin J-J. Update of a meta-analysis on lung cancer and welding. *Scand J Work Environ Health* 2006; 32: 22-31.

Richiesta estratti: *G. Marina La Vecchia, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale - Università di Brescia, Via Branze, 38, 25123 Brescia, Italy*