

## Notes techniques

# PROJECTION THERMIQUE: ÉTAT DES LIEUX EN 2012

Afin de modifier les propriétés de certains matériaux, de nombreux secteurs d'activité ont recours à des procédés de projection thermique. Lors de l'application, les matériaux des revêtements, dont certains sont toxiques, émettent des nanoparticules qui peuvent être inhalées par les salariés. Pour mieux cibler les actions de prévention, une cartographie des utilisations de la projection thermique (type de procédé utilisé, matériaux, secteur d'activité) a été réalisée.

GAUTIER  
MATER,  
BARBARA  
SAVARY  
INRS,  
département  
Métrologie  
des polluants

La projection thermique fait partie de la famille des traitements de surface. Le principe consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau d'apport chauffé à haute température sur un support pour en modifier ses propriétés. Les différents procédés de projection thermique sont présentés dans le Tableau 1.

Pour chaque procédé, il existe plusieurs types d'installations: les appareils portatifs, les cabines automatisées ouvertes ou fermées non confinées (les salariés peuvent accéder aux installations pendant la projection), les cabines automatisées fermées confinées (les salariés ne peuvent pas accéder aux installations pendant la projection).

Le choix du matériau projeté dépend de l'utilisation de celui-ci (anti-corrosion, anti-usure, rechargement, réduction des frottements, isolation thermique ou

électrique..) et du procédé mis en œuvre. Les matériaux se classent en différentes familles:

- les métaux (zinc, aluminium, nickel, chrome, cobalt, molybdène...);
- les alliages métalliques (ZnAl, NiCrAl, acier inoxydable...);
- les carbures (WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>...);
- les cermets ou carbures dans une matrice céramique (WC-Co, WC-CoCr, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr...);
- les abradables (Al Si Polyester, Al Si Graphite...);
- les céramiques ou oxydes (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>...);
- les composites (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>+PTFE...);
- les polymères (PTFE, Rilsan...).

La projection thermique est utilisée dans des domaines très variés: travail des métaux, aéronautique, automobile, maritime, textile, imprimerie, agro-alimentaire, industrie du verre, biomédical...

### RÉSUMÉ

La projection thermique génère des particules métalliques, le plus souvent oxydées et parfois de taille nanoparticulaire. Des études ont mis en évidence que les excréments urinaires des salariés concernés

dépendaient du procédé utilisé mais peu de données d'exposition sont disponibles sur ce sujet. Bien qu'utilisées dans de nombreux secteurs industriels, les installations de projection thermique sont peu nombreuses. Une cartographie

des activités utilisant un ou plusieurs procédés de projection thermique a été réalisée par le biais d'une étude de filières. Ces résultats permettront de mieux cibler les actions de prévention futures.

### *Thermal spraying: state of the art in 2012*

*Thermal spraying generates metal particles, which are often oxidised and of nanoparticle size. Studies have shown that urinary excretions of exposed employees are dependent on the process used,*

*but available exposure data on this subject are scarce. There are few thermal spraying installations, although the technology is used in many industrial sectors. Activities implementing one or more*

*thermal spraying processes have been mapped based on a study of different sectors. These results will enable future prevention actions to be better targeted.*

PROJECTION						
Caractéristiques	Flamme-poudre	Flamme-fil	Arc électrique	Plasma	High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)	Canon à détonation
Source de chaleur	Flamme oxyacétylénique	Flamme oxyacétylénique	Arc électrique	Plasma	Flamme oxyacétylénique	Flamme oxyacétylénique
Température de flamme (°C)	3000	3000	6000	12000	3000	3000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Gaz flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	250	200	700	950
Rendement moyen (%)	50	70	80	70	70	70
Produit d'apport	Poudre	Fil-cordon	Fil	Poudre	Poudre	Poudre
Matériaux d'apports	Métaux, céramiques, carbures dans une matrice métallique	Métaux, céramiques, carbures dans une matrice métallique	Métaux	Métaux, céramiques, carbures	Métaux, carbures	Carbures, céramiques

### Exposition des salariés

Le rendement moyen de projection est compris entre 50% et 80% en fonction du procédé. Il y a donc génération de particules métalliques le plus souvent oxydées auxquelles sont exposés les salariés si les moyens de protection sont déficients. Cependant, peu de données d'exposition sont disponibles.

Selon une étude de Chadwick *et al.* [2], la projection de chrome, de nickel et de cobalt émet beaucoup plus de particules avec le procédé par plasma qu'avec le procédé par arc électrique. L'excrétion urinaire de nickel et de cobalt est plus importante chez les opérateurs utilisant un procédé par plasma, alors que celle de chrome est plus importante chez les opérateurs utilisant le procédé par arc électrique.

Heriaud-Kraemer *et al.* [3] ont mené une étude dans un établissement réalisant des opérations de projection thermique pour le secteur de l'aéronautique. L'établissement possédait des installations manuelles et automatiques pour les procédés à la flamme, à l'arc électrique et au plasma pour déposer des revêtements abrasables<sup>1</sup>, anticorrosifs ou des revêtements métalliques, céramiques ou organiques, réparties dans trois cabines de projection ventilées et manipulées par neuf opérateurs équipés de matériel de protection respiratoire travaillant en 2 x 8 heures. Les pièces traitées étaient de tailles très différentes allant de 2,5 mm à 1,2 m. Les analyses de capacité respiratoire par spirométrie ne mettent pas en évidence de troubles respiratoires chez les salariés entre le premier et le dernier jour de travail hebdomadaire.

Petsas *et al.* [4] ont réalisé une étude de caractérisation de la qualité de l'air dans un établissement grec. Les auteurs ne donnent pas de précision sur le procédé de projection thermique mis en œuvre. Ils soulignent juste le fait que cette projection se fait en cabine ventilée, à l'exception des pièces

trop volumineuses. Pendant un mois, trois salariés ont été équipés de systèmes de prélèvement de la fraction inhalable. L'absence de système de protection collectif lors des phases de maintenance et de projection hors de la cabine est mise en évidence par des niveaux d'exposition plus importants. Les auteurs préconisent l'utilisation d'un masque facial lors ces opérations.

Schaller *et al.* [5] ont suivi pendant un an un salarié exposé accidentellement pendant 6 heures lors de la mise en œuvre du procédé de projection par flamme-fil de nickel et d'aluminium dans un incinérateur de déchets alors que le système de ventilation était défectueux. L'opérateur présentait des taux élevés de nickel et d'aluminium dans le sang et dans l'urine. L'excrétion de ces métaux s'est faite lentement et des traces étaient encore mesurables un an après l'exposition.

Selon Bemer *et al.* [6], l'émission de particules est 1000 fois plus importante lors de la projection par arc électrique que pendant des opérations de soudage à l'arc électrique. Le procédé par arc électrique est beaucoup plus émissif qu'un procédé à la flamme. Les particules émises ont une fraction nanométrique.

L'étude de filières présentée ici a concerné cinq des six procédés cités dans le Tableau 1. Les procédés par canon à détonation et par *cold spray* n'ont pas été pris en compte dans cette étude car le nombre d'installations en France est très faible. L'étude bibliographique a permis de sélectionner 56 secteurs d'activité, regroupant 60987 établissements en 2012. Pour faciliter le traitement des données, ces secteurs ont été regroupés en 17 activités. Un plan de sondage a été réalisé pour aboutir un taux de sondage de 35% (Cf. Tableau 2).

Le questionnaire comportait quatre parties :

- une partie administrative: code d'activité selon la nomenclature des activités françaises (NAF) et nombre total de salariés dans l'établissement;

↑ **TABLEAU 1**  
Principales caractéristiques des différents procédés de projection thermique [1]



- une partie relative à la projection thermique: nombre de salariés dans les ateliers dans lesquels sont placées les installations de projection thermique, type d'installations et nombre de salariés travaillant sur les installations, type d'appareil de protection respiratoire utilisé, matériaux utilisés, ainsi que les objectifs recherchés;
- une partie portant sur les opérations de préparation des supports et de nettoyage des zones de travail;
- une dernière partie concernant les opérations de sous-traitance.

Le taux de retour est de 43%. Après redressement, entre 780 et 960 établissements appartenant aux secteurs interrogés utilisent au moins un procédé de projection thermique. Plus précisément, 74% des établissements ne possèdent qu'un seul procédé de projection thermique. A l'opposé, 2% des établissements possèdent les cinq procédés, il s'agit essentiellement d'établissements faisant du revêtement et du travail des métaux. De même, 14% des établissements utilisent deux procédés, 8% trois procédés et 2% quatre procédés.

ACTIVITÉ	SECTEURS D'ACTIVITÉ NAF	TAUX DE SONDAGE	TAUX DE RETOUR
Total		35%	42%
Aéronautique	30.30Z 33.16Z 26.51Z	100%	49%
Automobile	29.10Z 29.20Z 29.32Z 33.17Z	52%	50%
BTP	43.32B 43.34Z 43.99B	11%	30%
Énergie	05.10Z 06.10Z 19.20Z 35.11Z 35.21Z 35.22Z 35.30Z	100%	37%
Fabrication d'équipements électriques	27.11Z 27.90Z	100%	50%
Fabrication de machines et équipements	28.11Z 28.12Z 28.13Z 28.14Z 28.15Z 28.22Z 28.29Z 28.30Z 28.41Z 28.49Z	100%	46%
Fabrication de produits métalliques	25.11Z 25.12Z 25.29Z-25.73A 25.73B 25.99A 25.99B	49%	49%
Ferroviaire	30.20Z 49.10Z 49.20Z	28%	52%
Industrie chimique	20.59Z	100%	68%
Installation d'équipements	33.20A 33.20C	36%	30%
Militaire	30.40Z	100%	86%
Motocycles	30.91Z	100%	38%
Naval	30.11Z 33.15Z	100%	42%
Réparation d'ouvrages	33.11Z 33.12Z 33.14Z 33.19Z	38%	41%
Revêtement des métaux	25.61Z	100%	50%
Transports urbains	49.31Z	100%	55%
Travail des métaux	25.50B 25.62B	26%	22%
Verre	23.11Z 23.12Z 23.13Z 23.14Z 23.19Z	100%	45%

↑ **TABLEAU 2**  
Regroupement des secteurs d'activité, taux de sondage et taux de retour

Avant d'être envoyé aux établissements interrogés, ce questionnaire a été validé auprès d'établissements tests.

Le redressement des réponses à l'ensemble des établissements des 56 secteurs a été réalisé après avoir vérifié par contacts téléphoniques que les non-répondants se comportaient comme les établissements répondants. Les résultats présentés dans le Tableau 2 ont été calculés par rapport à l'activité et non par rapport aux secteurs d'activité.

### DÉFINITIONS

#### Taille des établissements:

- **Micro-entreprises (µE):** moins de 10 salariés
- **Très petites entreprises (TPE):** 10 à 19 salariés
- **Petites et moyennes entreprises (PME):** 20 à 249 salariés
- **Entreprises de taille intermédiaire (ETI):** 250 à 499 salariés
- **Grandes entreprises (GE):** 500 salariés et plus

#### Appareils de protection respiratoire:

- **Ventilation libre:** demi-masque filtrant, masque ou demi-masque à cartouche
- **Ventilation assistée ou motorisée:** masque, demi-masque, cagoule, casque ou écran facial
- **Apport d'air non pollué en bouteille ou pris à l'extérieur de la cabine:** masque, casque ou cagoule

Mise à part l'activité militaire, peu représentative avec seulement sept établissements et n'apparaissant pas sur la Figure 1, le secteur du revêtement de surface présente, logiquement, le ratio le plus important entre les établissements faisant de la projection thermique et le nombre total d'établissements de cette activité. Aucune réponse positive n'a été collectée dans les activités de la chimie et de la fabrication des motocycles. Ces deux activités n'apparaissent plus dans les traitements suivants. Les établissements se trouvent majoritairement dans les régions Rhône-Alpes, Centre, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Nord-Pas de Calais et Ile-de-France.

La projection thermique est essentiellement réalisée dans des établissements employant moins de 20 salariés (67%) (Cf. Figure 2). La plupart des ateliers dans lesquels sont placées les installations de projection thermique sont également de très petite taille puisque le nombre de salariés par atelier est, dans 63% des cas, inférieur à 5. Entre 4 100 et 4 900 salariés conduisent les installations de projection thermique ou travaillent à proximité de celles-ci.

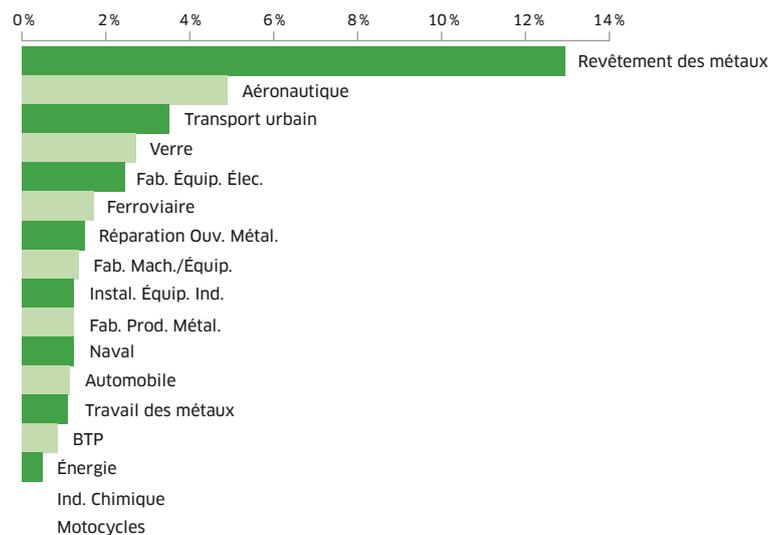
Parmi les établissements faisant de la projection thermique, 60% sont des sous-traitants. Ils appartiennent majoritairement aux secteurs du revêtement des métaux (33%), du BTP (15%), du travail des métaux (12%), de la réparation d'ouvrages métalliques (10%) et de l'installation d'équipement industriel (8%). Ces établissements travaillent pour les secteurs de la sidérurgie (24%), de l'automobile (13%), de la pétrochimie (9%) et de l'énergie (8%).

Le procédé par arc électrique est le plus utilisé avec 57% des établissements détenant au moins une installation. Le procédé par flamme-fil est présent dans 42% des établissements, le procédé par flamme-poudre dans 24% des établissements. Le procédé par plasma n'est mis en œuvre que dans 12% des établissements. Le procédé par HVOF est le moins représenté avec seulement 6% des établissements, sachant qu'un établissement peut posséder plusieurs procédés (Cf. Figure 3).

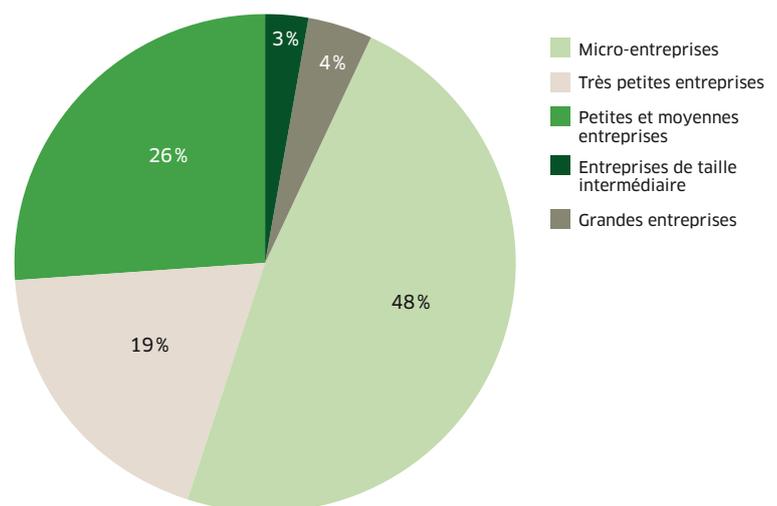
Le type d'installations dépend du procédé mis en œuvre (Cf. Figure 4). Pour des procédés très exothermiques comme par plasma ou HVOF, leur mise en œuvre se fera préférentiellement en cabine confinée. Les quelques appareils portatifs déclarés sont utilisés hors cabine, lorsque la pièce à revêtir est trop volumineuse. Dans ce cas, l'installation est moins exothermique. *A contrario*, les procédés nécessitant une source de chaleur moindre (arc électrique et flamme) sont utilisés préférentiellement en appareils portatifs.

L'alliage zinc-aluminium est le matériau le plus fréquemment projeté tous procédés confondus (Cf. Figure 5). Toutefois, la distribution sera différente en fonction des procédés: l'alliage zinc aluminium sera projeté par les procédés par arc électrique et par flamme-fil, les alliages base nickel, nickel-chrome seront projetés par le procédé flamme-poudre. Les céramiques seront projetées par le procédé plasma et les carbures seront plutôt projetés par le procédé HVOF. Le nickel-chrome et les alliages à base de nickel et de chrome, essentiellement projetés par le procédé flamme-poudre sont également projetés par les quatre autres procédés. La projection thermique nécessite, dans certaines situations, d'utiliser des matériaux dangereux pour la santé (chrome, nickel, aluminium, cobalt, cadmium...). Les particules émises sont de taille nanométrique [6]. Il est nécessaire de mettre en place des moyens de prévention adaptés (port d'appareils isolants à adduction d'air ou autonomes, par exemple), surtout lors de l'utilisation d'appareils portatifs. Or, d'après les résultats de l'enquête, 23% des établissements n'utilisent pas d'appareils de protection respiratoire (APR) lors de l'utilisation d'appareils portatifs et 10% des établissements utilisent des appareils à ventilation libre, insuffisants s'il s'agit de masques jetables.

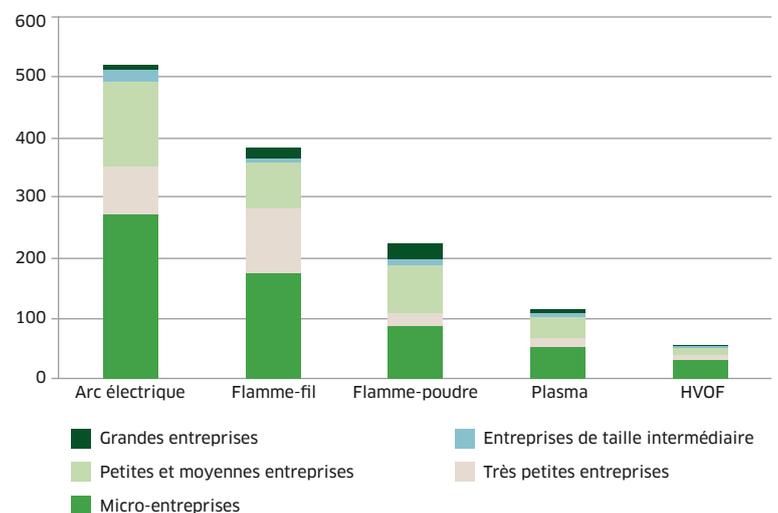
Les procédés par arc électrique, flamme-fil et flamme-poudre sont utilisés dans les traitements



↑ FIGURE 1 Pourcentage d'établissements faisant de la projection thermique par rapport à l'ensemble des établissements pour chaque activité

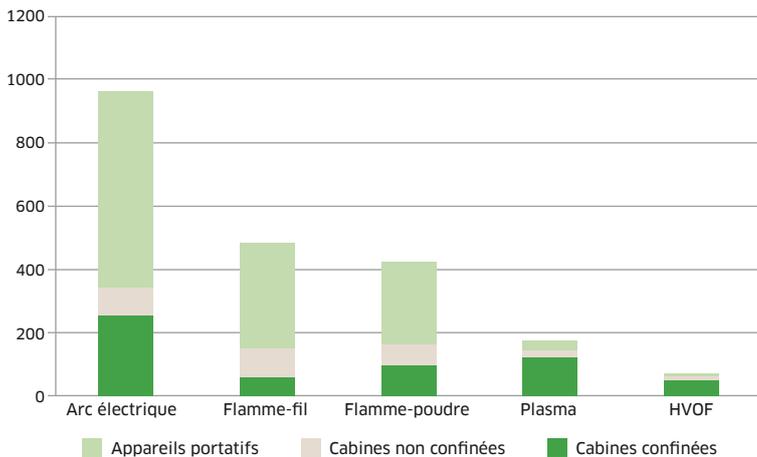


↑ FIGURE 2 Répartition des établissements faisant de la projection thermique en fonction de l'effectif

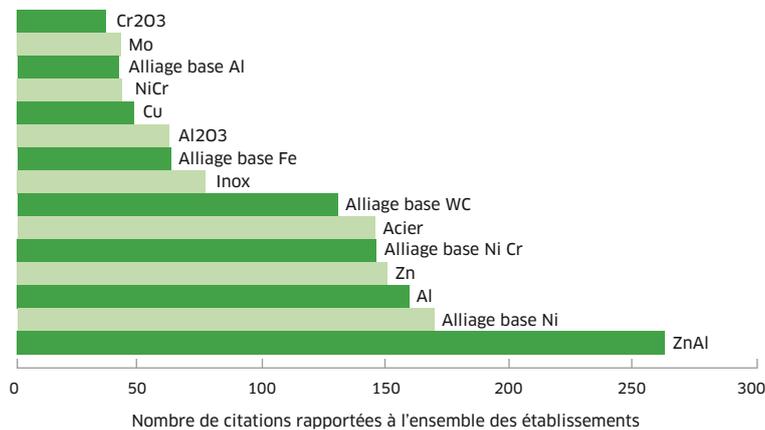


↑ FIGURE 3 Nombre d'établissements possédant au moins une installation de projection thermique en fonction du procédé (un établissement peut posséder plusieurs procédés)





↑ FIGURE 4 Répartition des procédés en fonction des types d'installations



↑ FIGURE 5 Classement des 15 matériaux utilisés les plus cités en France en projection thermique

anticorrosion et rechargement de pièces; les procédés par plasma et HVOF dans les traitements de réduction de frottements et anti-usure.

Les principaux modes de préparation de pièces à traiter sont le sablage et le grenailage (60%), ces

opérations sont émissives en poussières essentiellement métalliques, elles sont à réaliser avec un système d'aspiration collective permettant de capter le maximum de poussières. Près de 17% des établissements utilisent le balai ou la soufflette pour nettoyer les zones de travail. Il s'agit d'opérations extrêmement émissives en poussières, il est donc nécessaire de remplacer ces deux modes de nettoyage par des aspirations mécaniques.

### Conclusion

L'étude de filières, présentée dans cet article, a permis de mettre en évidence la rareté des installations de projection thermique dans les différentes activités interrogées (entre 780 et 960 établissements). Le revêtement des métaux est l'activité principale ayant le plus d'installations. La projection thermique par arc électrique est la plus fréquente, en utilisant des appareils portatifs pour effectuer un traitement anticorrosion par projection d'un alliage de zinc-aluminium. Entre 4 100 et 4 900 salariés sont potentiellement exposés.

Des métaux dangereux pour la santé sont utilisés en projection thermique (Cr, Ni, Al...) et il apparaît que certains salariés ne sont pas protégés convenablement lors de ces opérations. Une étude est en cours à l'INRS pour déterminer les expositions des salariés exposés aux particules émises lors des opérations de projection.

Dans l'attente des résultats, il est nécessaire de prendre toutes les précautions pour limiter les expositions des salariés. Le travail en cabine ventilée et le port d'appareils de protection respiratoire à adduction d'air ou à ventilation assistée semblent les mieux adaptés à cette activité. Lorsque la projection est automatisée en cabine confinée, il est nécessaire d'attendre la fin de la période de ventilation post-application avant de pénétrer à l'intérieur de celle-ci. ●

1. Revêtement qui s'utilise préférentiellement à un corps mobile, lorsqu'ils sont mis en contact

## BIBLIOGRAPHIE

[1] PRONER A. M 1645 - Revêtements par projection thermique. Paris, *Techniques de l'ingénieur*, 1999.

[2] CHADWICK J.K., WILSON H.K., WHITE M.A. An investigation of occupational metal exposure in thermal spraying processes. *The Science of the Total Environment* 199(1-2): 115-124, 1997.

[3] HERIAUD-KRAEMER H., MONTAVON G., HERTERT S., ROBIN H., CODDET C. Harmful risks for workers in thermal spraying: A review completed by a survey in a french company. *Journal of Thermal Spray Technology* 12(4): 542-554, 2003.

[4] PETSAS N., KOUZILOS G., VARDAVOULIAS M., MOUTSATSOU A. Worker exposure monitoring

of suspended particules in a thermal spray industry. *Journal of Thermal Spray Technology* 16(2): 214-219, 2007.

[5] SCHALLER K., CSANADY G., FILSER J., JÜNGERT B., DREXLER H. Elimination kinetics of metals after an accidental exposure to welding fumes. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 80(7): 635-641, 2007.

[6] BEMER D., R. REGNIER, I. SUBRA, B. SUTTER, M.T. LECLER, MORELE Y. Ultrafine particles emitted by flame and electric arc guns for thermal spraying of metals. *The Annals of Occupational Environment* 54(6): 607-614, 2010.