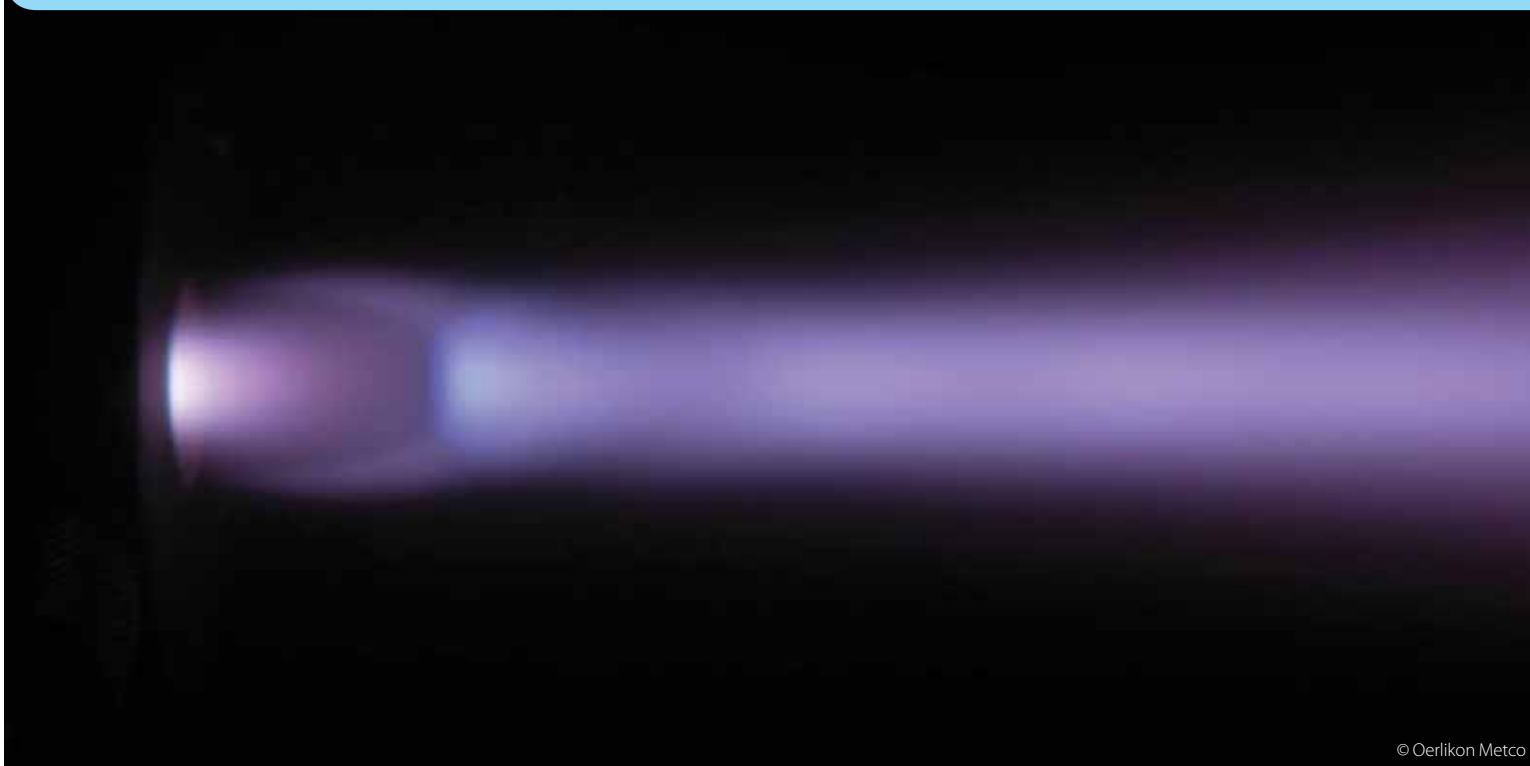


AN INTRODUCTION TO THERMAL SPRAY - PART 3

Introduzione alla termospruzzatura - Parte 3



© Oerlikon Metco

*This is the Part 3 of a four-part article. The first two parts were published in *ipcm®\_Protective Coatings* n. 15 (October 2015) and *ipcm®\_Protective Coatings* n. 16 (December 2015). The final part will be published in *ipcm®\_Protective Coatings* n. 18 (June 2016).*

**2.4.6 Infrastruttura (System Requirements)**

*Besides the principal item of a coating system, that of the spray gun, there are numerous other items necessary to apply coatings in an industrial environment. **Figure 9** shows a coating system. The spray cabin serves as a shield for the sound and dust produced by the spray gun during spraying. The cabin has inlet ports for the power, gas supply and the process monitoring and control equipment. Usually, the gun is mounted on a robot, with movement programmed for the specific components to be coated. The component to be sprayed is usually mounted on a manipulation unit, such as a turntable. Therefore, it is possible to apply coatings to very complex geometries. The ventilation system with its filtering unit is*

*Questa è la terza parte di un articolo suddiviso in quattro capitoli. Le prime due parti sono state pubblicate rispettivamente in *ipcm®\_Protective Coatings* n. 15 (ottobre 2015) e *ipcm®\_Protective Coatings* n. 16 (dicembre 2015). La parte finale sarà pubblicata in *ipcm®\_Protective Coatings* n. 18 (giugno 2016).*

**2.4.6 Infrastruttura (requisiti dell'impianto)**

Oltre al componente principale di un impianto di rivestimento - la pistola di spruzzatura - vi sono molti altri componenti necessari per l'applicazione dei rivestimenti in un ambiente industriale. La **figura 9** illustra un impianto di rivestimento. La cabina di lavoro serve da schermo per il rumore, la polvere e le radiazioni (nel caso del processo al plasma e ad arco elettrico) prodotte dalla pistola di spruzzatura durante il funzionamento. La cabina è dotata di passaggi di ingresso per l'alimentazione di energia elettrica, gas e delle attrezzature di monitoraggio e controllo del processo. La pistola è generalmente montata su un robot, il cui movimento programmato consente di rivestire il componente specifico in lavorazione. Il componente da rivestire è generalmente montato su un dispositivo di manipolazione, come una tavola rotante. Il movimento com-



not to be forgotten, as the so-called “overspray”, i.e. the powder material that does not stick to the component surface, can be exhausted and trapped in the filtering unit. The spray dust produced by some spray materials can ignite; hence, in these situations, the entire system must be fire and explosion proof. **Figure 10** shows a modern, automated, high productivity coating facility.

## 2.5 Coating Structure

Thermal sprayed coatings exhibit a certain amount of process-dependent porosity. The highest porosity values develop for flame and electric arc spray. HVOF coatings, however, produce very dense layers with porosity under 0.5%. Typical plasma coatings have approximately one to two percent porosity.

The sprayed coating develops as the spray gun traverses repeatedly over the surface and applies the coating in layers, bit by bit, with a typical layer thickness of 10 to 20  $\mu\text{m}$  (400 to 800  $\mu\text{in}$ ). Oxides can form during the time between passes on the outer surface of the layer. This oxidation can be minimized by spraying in a vacuum or inert atmosphere.

Fine dust from overspray and unmelted particles can become trapped in the coating. The dust is the result of coating material that does not adhere to the workpiece during spraying. Subsequent spray passes drag these particles towards the coating surface where they become trapped in the coating layer.

**Figure 11** shows a photomicrograph of an arc sprayed coating of X40 CR 13. One recognizes the laminated structure and existing porosity (the black regions). The circular particles are those that did not melt completely before re-solidifying.

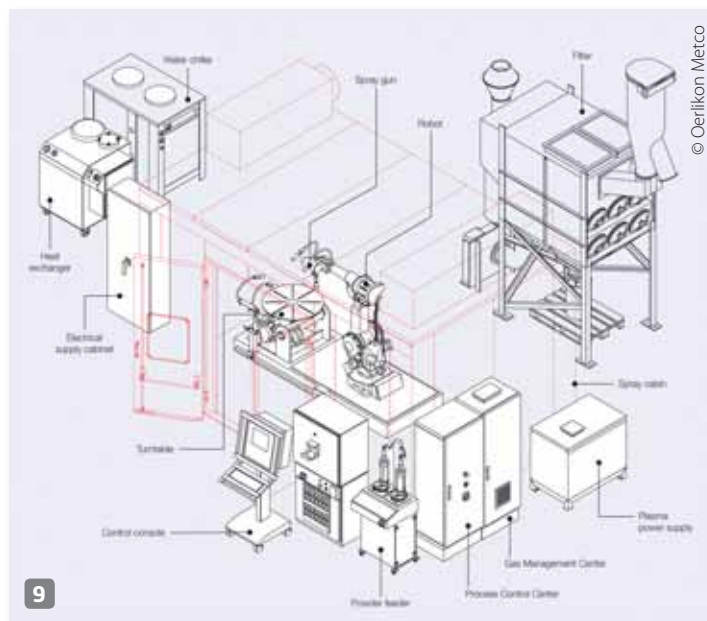
binato pistola-pezzo permette quindi di applicare i rivestimenti a geometrie molto complesse. Da non dimenticare il sistema di ventilazione con la relativa unità filtro, che consente di aspirare e abbattere la “polvere in eccesso”, ovvero quella che non aderisce alla superficie del pezzo. Il filtrato di alcuni tipi di materiale può incendiarsi. In queste situazioni l'intero impianto deve essere pertanto ignifugo e a prova di esplosione. La **figura 10** illustra un moderno impianto di rivestimento automatizzato ad alta produttività.

## 2.5 Struttura del riporto

I rivestimenti termospruzzati presentano un certo livello di porosità che dipende dal processo. Le porosità maggiori si presentano con i processi a fiamma convenzionale e ad arco elettrico. I rivestimenti HVOF, tuttavia, producono riporti molto densi con porosità inferiori allo 0,5%. I tipici rivestimenti al plasma presentano una porosità di circa 1-2%.

La spruzzatura in camera a bassa pressione e atmosfera controllata può produrre riporti con densità quasi totale. Il rivestimento termospruzzato si genera con il passaggio ripetuto della pistola di spruzzatura sulla superficie, con l'applicazione di piccoli spessori per ogni passata, tipicamente 10-20  $\mu\text{m}$  (400-800  $\mu\text{in}$ ). Nel tempo che intercorre tra i diversi passaggi possono crearsi ossidi sulla superficie esterna dello strato appena appli-

cato. Tale ossidazione può minimizzarsi effettuando la spruzzatura in camera a bassa pressione o in presenza di un'atmosfera inerte. Il pulviscolo fine e le particelle non fuse possono rimanere intrappolate nel rivestimento. Il pulviscolo è generato da quella porzione del materiale d'apporto che non aderisce al substrato. Passaggi di spruzzatura successivi trascinano queste particelle verso la superficie del rivestimento, dove restano intrappolate all'interno. La **figura 11** è una fotomicrografia di un rivestimento X40 CR 13 applicato ad arco elettrico. Si riconosce la struttura a strati laminari e la porosità (aree nere).



9

**A typical coating facility.**

**Tipico impianto di termospruzzatura.**

10

**A modern LPPS high-volume production system for coating gas turbine blades.**

**Un moderno impianto LPPS (Low Pressure Plasma Spray) ad alta produzione per il rivestimento di pale di turbine a gas.**



© Oerlikon Metco

*The thickness of this coating can be up to several millimeters.*

*One can produce much denser coatings with the HVOF spray process. In **Figure 12**, a coating of WC (CoCr) is represented. There is hardly any porosity visible. The bright regions consist of WC hard phase, which is embedded in a ductile matrix of cobalt and chrome. Here the typical coating thickness is with 0.2 to 0.3 mm (0.008 to 0.012 inches).*

*Thermal sprayed coatings generally exhibit high internal stresses, which are attributable to the process of solidification and cooling. The hot particle contracts as it cools, which gives rise to the internal coating stress. If the ratio of the thermal expansion coefficients for the substrate material and the coating material are taken into account, these stresses can be compensated for by producing compressive stresses. Temperature control during the coating process, therefore, plays an important role to determine if the substrate must be cooled or warmed. Sometimes, the adhesion of a ceramic coating on*

Le particelle circolari sono quelle che non si sono fuse completamente prima di risolidificarsi. Lo spessore di questo rivestimento può arrivare fino a diversi millimetri. Con il processo di spruzzatura HVOF è possibile produrre rivestimenti molto più densi. Nella **figura 12** è illustrato un riporto di WC (CoCr). Praticamente non vi è porosità visibile. Le aree chiare costituiscono la fase dura di WC, incorporato in una matrice duttile di cobalto e cromo. Qui lo spessore tipico del rivestimento è compreso tra 0,2 e 0,3 mm (0,008-0,012 in).

I rivestimenti termospruzzati presentano generalmente elevate tensioni interne, attribuibili al processo di solidificazione e al raffreddamento. La particella calda si contrae al raffreddamento dando luogo alla tensione interna nel riporto. Se si considera il rapporto tra i coefficienti di espansione termica del materiale di cui è fatto il substrato e quello del materiale di riporto, queste tensioni possono essere compensate generando tensioni a compressione. Il controllo della temperatura durante il processo di rivestimento svolge, pertanto, un ruolo importante per determinare se il substrato deve essere raffreddato o riscaldato. Talvolta, l'adesione di un rivestimento ceramico su un substrato non soddisfa i requisiti



*a substrate does not meet the necessary requirement for bond strength. In order to increase the bond strength, a bond coat is applied, usually composed of a NiAl or NiCr alloy, which acts as an intermediate layer between the substrate and the ceramic coating. Such intermediate coatings can also perform another important function by providing additional corrosion protection.*

## 2.6 Coating Characteristics

*As previously stated, the porosity of a thermal spray coating is process-dependent, and exhibits an anisotropic, layered structure. These basic characteristics can be modified within a wide range to suit the specific application.*

### 2.6.1 Wear Protection

*One of the most important uses of thermal sprayed coatings is for wear protection [4]. In these applications, ceramics, and above all, carbide materials are used. The commonly used carbide*

necessari per un buon ancoraggio. Per aumentare l'adesione, viene quindi applicato uno strato ancorante, solitamente composto da una lega di NiAl o NiCr, che agisce da strato intermedio tra il substrato e il rivestimento ceramico. Tali rivestimenti intermedi possono anche svolgere un'altra importante funzione, offrendo un'ulteriore protezione anticorrosione.

## 2.6 Caratteristiche del rivestimento

Come citato in precedenza, la porosità di un rivestimento mediante termospruzzatura (*Thermal Spray*) dipende dal processo e presenta una struttura anisotropica, a strati. Queste caratteristiche di base possono essere modificate entro un'ampia gamma di valori per adeguarsi all'applicazione specifica.

### 2.6.1 Protezione antiusura

Uno dei più importanti utilizzi dei rivestimenti termospruzzati è la protezione antiusura [4]. Per queste applicazioni si utilizzano la ceramica e, soprattutto, carburi. I carburi comunemente utilizzati sono WC/Co o WC/Co-

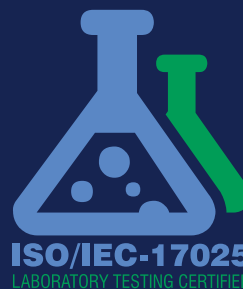
# World Leaders

## Have Responsibilities Too!

- Surface Preparation
- Water Based Coatings
- Concrete Reinforcement Protection
- Equipment Preservation



Cortec® provides environmentally safe corrosion protection solutions.



[www.CortecVCI.com](http://www.CortecVCI.com)

4119 White Bear Parkway

St. Paul, MN 55110

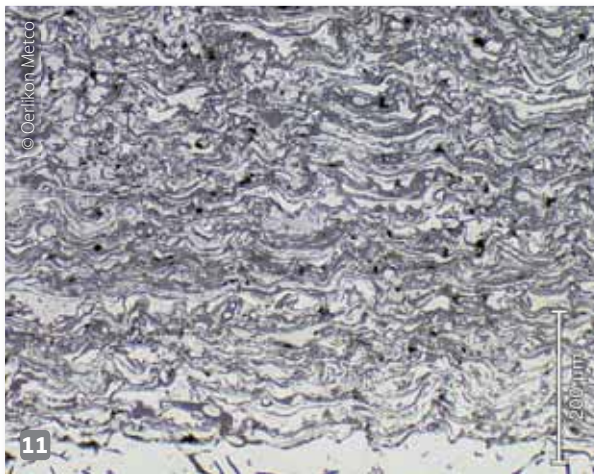
651-429-1100 • 800-426-7832

[info@cortecvci.com](mailto:info@cortecvci.com)

materials are WC/Co or WC/CoCr. Here, the carbide hard phases (WC) exhibit excellent resistance against abrasive and erosive wear, and are embedded in a ductile matrix of cobalt.

## 2.6.2 Corrosion Protection

Low carbon, unalloyed steel and cast iron materials are susceptible to rust and therefore often need constant surface protection. This can be produced by flame sprayed coatings of aluminum or zinc. The main areas of application are offshore structures, electro welded pipes manufactured starting from galvanized sheet metal, petrochemical plants, metal structures exposed to marine and industrial environments, LPG cylinders, etc. For high temperature applications, protective coatings of MCrAlY materials can be used. These are usually applied using controlled atmosphere plasma spray.



Cr. Qui, le fasi dure del carburo (WC) presentano un'eccellente resistenza contro l'usura da abrasione ed erosione e sono integrate in una matrice duttile di cobalto.

## 2.6.2 Protezione anticorrosione

Acciaio non legato a basso tenore di carbonio e ghisa sono materiali soggetti alla ruggine e pertanto necessitano di costante protezione superficiale. Tale protezione può essere ottenuta con rivestimenti termospruzzati a fiamma o arco elettrico di alluminio, zinco o loro leghe. Le principali applicazioni sono le piattaforme offshore, i tubi elettrosaldati costruiti a partire da lamiera zincata, gli impianti petrolchimici, le carpenterie metalliche esposte ad ambiente marino e industriale, le bombole di gas GPL, ecc. Per applicazioni a temperature elevate possono utilizzarsi riporti protettivi di leghe MCrAlY (dove M individua uno o più metalli).

Questi vengono normalmente applicati con spruzzatura al plasma in camera a bassa pressione ad atmosfera controllata.

## 2.6.3 Insulating Coatings (Thermal/Electrical)

Ceramic materials are excellent thermal and electrical insulators. They also possess good oxidation and wear resistance. These characteristics are quite useful on engine and turbine components as thermal barrier coatings. The thermal barrier coating lowers the skin temperature of the substrate, thereby extending the useable service life. On the other hand, efficiency is improved as a result of reduced heat loss at the same operating temperature. These coating systems consist of a bond coat, which is usually an oxidation resistant MCrAlY material (M = Fe, Ni or Co) and a ceramic top coat. An yttrium-stabilized zirconium oxide material is often used for the top coat because of its good thermal shock characteristics.

## 2.6.3 Rivestimenti isolanti (termici/elettrici)

I materiali ceramici sono eccellenti isolanti termici ed elettrici. Possiedono anche ottima resistenza all'ossidazione e all'usura. Queste caratteristiche sono particolarmente utili come barriera termica su componenti di motori endotermici e di turbine. I riporti che agiscono da barriera termica abbassano la temperatura superficiale del substrato, aumentando quindi la vita in servizio del pezzo. Dall'altro lato, la ridotta perdita di calore alla stessa temperatura di funzionamento migliora l'efficienza. Questi sistemi di rivestimento sono costituiti da uno strato intermedio, solitamente una lega resistente all'ossidazione MCrAlY (M = Fe, Ni o Co), e uno strato ceramico superiore. L'ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio è spesso utilizzato come strato superiore, grazie alle ottime caratteristiche di resistenza allo shock termico.

## 2.7 Post Processing

Because many sprayed coatings have an inherently rough surface finish and porosity, it is frequently necessary to post process the surface. In addition,

## 2.7 Post-trattamento

Poiché molti rivestimenti termospruzzati hanno una finitura superficiale intrinsecamente ruvida e porosa, spesso è necessario sottoporre la superficie a post-trattamento.

11

Arc wire spray coating of X40 CR 13.

Rivestimento di acciaio X40 CR 13 mediante spruzzatura ad arco elettrico.



specified procedures can call for other methods, such as post-coating diffusion, nitrating, hot isostatic pressing or shot peening, as required.

### 2.7.1 Mechanical Post Processing

Thermal sprayed coatings exhibit a rough surface that is between 5 and 20  $\mu\text{m}$  (see **Table A2** in the Appendix). Therefore, it will often be necessary to machine the components to get the final dimension and surface finish.

Depending on the coating applied, the surface can be worked by conventional machining or can be ground and lapped to the final dimension.

### 2.7.2 Sealing

Sealing sprayed coatings serves primarily to fill the pores and microcracks in the coating, which provides additional protection against corrosive media that would otherwise penetrate to the base material.

When resin or wax sealants are used, those in a liquid condition penetrate into the pores and then harden (usually with heating). If the sealant is sprayed or painted on, the procedure may have to be repeated several times to insure complete coverage.

Sealants can also be used to provide surfaces with non-adhesive characteristics (PTFE based sealers).

### 2.7.3 Post-Coating Heat Treatment

With thermal post treatments, one differentiates between diffusion to increase the bond between the base material and the coating and fusing of "self-fluxing" alloys.

The self-fluxing alloys form a special class of spray materials in that after the spray coating is applied, the additional step of melting the coating is employed. The spray powders of these alloys are generally blends of chrome, iron and nickel that contain a substantial amount of temperature suppressants, such as boron and silicon.

During the spray process there is some partial

Le procedure prescritte possono richiedere anche altri metodi quali: diffusione post-rivestimento, nitrurazione, pressatura isostatica a caldo o pallinatura, secondo le esigenze.

### 2.7.1 Post-trattamento meccanico

I rivestimenti termospruzzati possiedono una superficie irregolare compresa tra 5 e 20  $\mu\text{m}$  (vedere la **tabella A2** nell'Appendice). Pertanto, sarà spesso necessario lavorare a macchina molti componenti per ottenere una dimensione e una finitura superficiale finale. In base al rivestimento applicato, la superficie può essere lavorata mediante lavorazione convenzionale a macchina oppure rettificata e lappata alle dimensioni definitive.

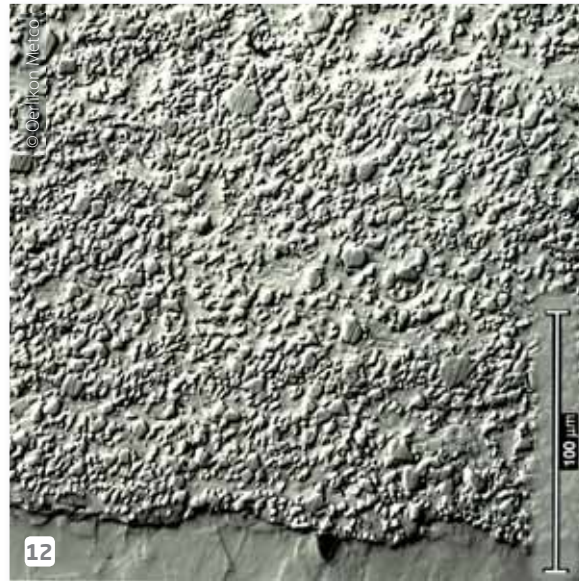
### 2.7.2 Sigillatura

I sigillanti applicati a spruzzo o a pennello, servono principalmente per riempire i pori e le microfessure del rivestimento, tale da offrire ulteriore protezione dagli agenti

corrosivi che altrimenti penetrerebbero nel materiale di base. Quando si utilizzano sigillanti a base di resine o cere, quelle liquide penetrano nei pori e successivamente induriscono (in genere con il riscaldamento). Se il sigillante è spruzzato o applicato a pennello, può essere necessario ripetere più volte l'operazione per garantire una copertura completa. I sigillanti possono anche essere usati per creare superfici antiaderenti (sigillanti a base di PTFE).

### 2.7.3 Trattamento termico post-rivestimento

I trattamenti termici post-rivestimento si differenziano tra quelli in cui il riporto è diffuso nel materiale di base per aumentare l'adesione e quelli in cui si portano a fusione le leghe "con fondente" (in inglese "self-fluxing"). Le leghe con fondente (*self-fluxing*) formano una classe speciale di materiali per la spruzzatura. Dopo la loro applicazione a spruzzo, si esegue una fase supplementare di fusione del rivestimento. I materiali sono generalmente leghe di cromo, ferro e nichel che contengono una quantità considerevole di soppressori di temperatura, come il boro e il silicio. Durante il processo di spruzzatura si verifica una formazione parziale



12

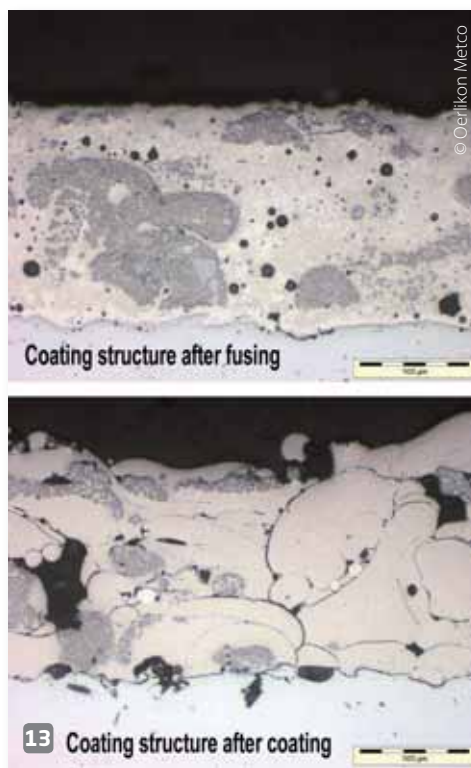
**HVOF spray coating of WC-(Co,Cr) 12.**

**Rivestimento di WC-12(CoCr) mediante spruzzatura HVOF.**

formation of intermetallic phases. Fusing the coating afterward causes a complete transformation of the materials and the formation of hard silicide and boride phases. Diffusion into the substrate also occurs, improving bonding while the porosity is nearly eliminated, with no interconnecting pores. These coatings exhibit extremely good corrosion resistance as well as very high hardness. The common manual method used to melt the coating is through the use of an acetylene torch. Fusing in a furnace, with laser, electron beam or with induction heating is also possible. The temperature required to effect diffusion is in the range of 1000 to 1200 °C (1800 to 2200 °F).

In **Figure 13**, a coating of NiCrBSi alloy is shown before and after fusing.

The homogenization of the coating structure is clearly recognizable, as is the reduced porosity and dense nature of the fused coating.



di fasi intermetalliche. La successiva fusione del rivestimento causa una trasformazione completa dei materiali e la formazione di fasi dure di siliciuro e boruro. Si verifica anche diffusione nel substrato, migliorando l'adesione. La porosità è pressoché eliminata e senza interconnessioni tra gli eventuali pori. Questi rivestimenti presentano un'ottima resistenza alla corrosione nonché una durezza molto elevata. Il metodo manuale più comunemente utilizzato per fondere il rivestimento prevede l'uso di una torcia ossiacetilenica. È anche possibile la fusione in forno, con laser, con fascio di elettroni o con riscaldamento a induzione. La temperatura richiesta per la diffusione è compresa tra 1000 e 1200°C (1800-2200°F). Nella **figura 13** è illustrato il rivestimento di una lega NiCrBSi prima e dopo la fusione. L'omogeneizzazione della struttura del rivestimento è chiaramente riconoscibile, come pure la ridotta porosità e la natura compatta del rivestimento fuso.

13

## Self-fluxing coating.

Rivestimento "self-fluxing".

## 2.8 Coating Characterization

Apart from the coating characteristics that are important with respect to the application, there are some characteristics that can be determined with relatively little effort and can be accomplished in terms of standardized quality control measurements. These are:

- Visual inspection.
  - Coating thickness measurement.
  - Surface finish measurement.
- If necessary, test pieces sprayed at the same time and under the same conditions as the coating can be examined to determine additional characteristics about coating quality:
- Cross-sectioning for the determination of precise coating thickness, porosity and structure, as well as examination of the microstructure for unmelted particles and oxide inclusion.
  - Microhardness measurement.
  - Bond strength determination, using a special adhesive and test equipment.
  - Bend tests.

## 2.8 Caratterizzazione del rivestimento

Oltre alle caratteristiche del rivestimento, importanti per l'applicazione, ci sono alcune caratteristiche che possono essere determinate alquanto facilmente e possono essere ottenute come controlli di qualità standardizzati. Tali controlli sono:

- ispezione visiva;
  - misurazione dello spessore del rivestimento;
  - misurazione della finitura superficiale.
- Se necessario, è possibile determinare ulteriori caratteristiche del rivestimento esaminando provini sottoposti a spruzzatura contemporaneamente e nelle stesse condizioni del rivestimento:
- sezionamento trasversale per la precisa determinazione degli spessori del riporto, porosità, microstruttura, presenza di eventuali particelle non fuse e inclusioni di ossido;
  - microdurezza e/o macrodurezza;
  - misura della forza di ancoraggio;
  - prove di piegatura.



The test measurements use standardized sample geometries. Exact execution and interpretation is in accordance with various standards [6]. Beyond that, there are many other possibilities. The characterization of coatings in practice is quite complex, and there are many different procedures that are not common. In addition, the various methods for element analysis can be included, as well as scratch testing, tribological investigations, stress analysis, corrosion and abrasion behavioral investigations. Since these are all destructive examinations, they are not especially suitable for production and are rarely employed on test pieces. Many end users have developed their own specifications and test methods to characterize and judge the quality of their coatings. In particular, the aerospace and space industries have very strict guidelines.

The fourth and final part of this article will be published in the next issue (*ipcm®\_Protective Coatings* n. 18, June 2016).

## APPENDIX

**Table A2 - Surface finish (approximate cross-reference values)**

Surface Finish	Ra [µm]	Ra [µin]	Rz [µm]
N0	0.0125	0.5	---
N1	0.025	0.1	0.29
N2	0.05	2	0.55
N3	0.1	4	0.91
N4	0.2	8	1.74
N5	0.4	16	2.6
N6	0.8	32	4.65
N7	1.6	64	7.87
N8	3.2	128	15.6
N9	6.3	250	40
N10	12.5	500	63
N11	25	1000	100
N12	50	2000	160

### Literature references

- [1] DIN EN 657; Thermal Spray – Begriffe, Einteilung; Beuth-Verlag, Berlin (1994)
- [2] H.D. Steffens, J. Wilden: "Moderne Beschichtungsverfahren", DGM-Verlag, ISBN 3-88355-223-2, (1996)
- [3] P. Huber: "Vakuumplasmaspritzen", Oberfläche surface, 10 (1992), 8
- [4] H. Simon, M. Thoma: "Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe", Hanser-Verlag, München (1985)
- [5] E. Lugscheider, H. Reymann: "Hochgeschwindigkeitsflamngespritzte Chromschichten zum Verschleiss-und Korrosionsschutz", Schweißen und Schneiden, 50 (1998), 44
- [6] DIN 50600; Metallographische Gefügebilder, Beuth-Verlag, Berlin  
DIN EN 582 Ermittlung der Haftzugfestigkeit, Beuth-Verlag, Berlin (1994)  
DIN EN 10109 Teil 1; Härteprüfung, Beuth-Verlag, Berlin (1995)  
DVS 2310 Teil 2; Anleitung zur Schliffherstellung, DVS, Düsseldorf, (1989)

Le misurazioni di prova utilizzano geometrie campione standardizzate. L'esecuzione e l'interpretazione esatta sono conformi a varie norme [6]. Oltre a ciò esistono molte altre possibilità di verifica. La caratterizzazione dei rivestimenti nella pratica è piuttosto complessa ed esistono molte diverse procedure poco comuni. Possono essere inoltre inclusi altri test come, ad esempio: metodi vari per l'analisi elementare, prove di scalfittura, indagini tribologiche, analisi delle sollecitazioni, caratterizzazione della corrosione e indagini di comportamento all'abrasione. Poiché si tratta di esami tutti distruttivi, non sono particolarmente utilizzabili per la produzione e vengono raramente eseguiti sui provini. Molti utilizzatori hanno sviluppato proprie specifiche e propri metodi di prova per caratterizzare e valutare la qualità dei loro rivestimenti. In particolare, l'industria aerospaziale e automobilistica ha linee guida molto rigorose.

La quarta e ultima parte di questo articolo sarà pubblicata sul prossimo numero della rivista (*ipcm®\_Protective Coatings* n. 18, giugno 2016).

## APPENDICE

**Tabella A2 – Finitura superficiale (valori di riferimento incrociati approssimativi)**

### Riferimenti bibliografici

- [1] DIN EN 657; Thermal Spray – Begriffe, Einteilung; Beuth-Verlag, Berlin (1994)
- [2] H.D. Steffens, J. Wilden: "Moderne Beschichtungsverfahren", DGM-Verlag, ISBN 3-88355-223-2, (1996)
- [3] P. Huber: "Vakuumplasmaspritzen", Oberfläche surface, 10 (1992), 8
- [4] H. Simon, M. Thoma: "Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe", Hanser-Verlag, München (1985)
- [5] E. Lugscheider, H. Reymann: "Hochgeschwindigkeitsflamngespritzte Chromschichten zum Verschleiss-und Korrosionsschutz", Schweißen und Schneiden, 50 (1998), 44
- [6] DIN 50600; Metallographische Gefügebilder, Beuth-Verlag, Berlin  
DIN EN 582 Ermittlung der Haftzugfestigkeit, Beuth-Verlag, Berlin (1994)  
DIN EN 10109 Teil 1; Härteprüfung, Beuth-Verlag, Berlin (1995)  
DVS 2310 Teil 2; Anleitung zur Schliffherstellung, DVS, Düsseldorf, (1989)