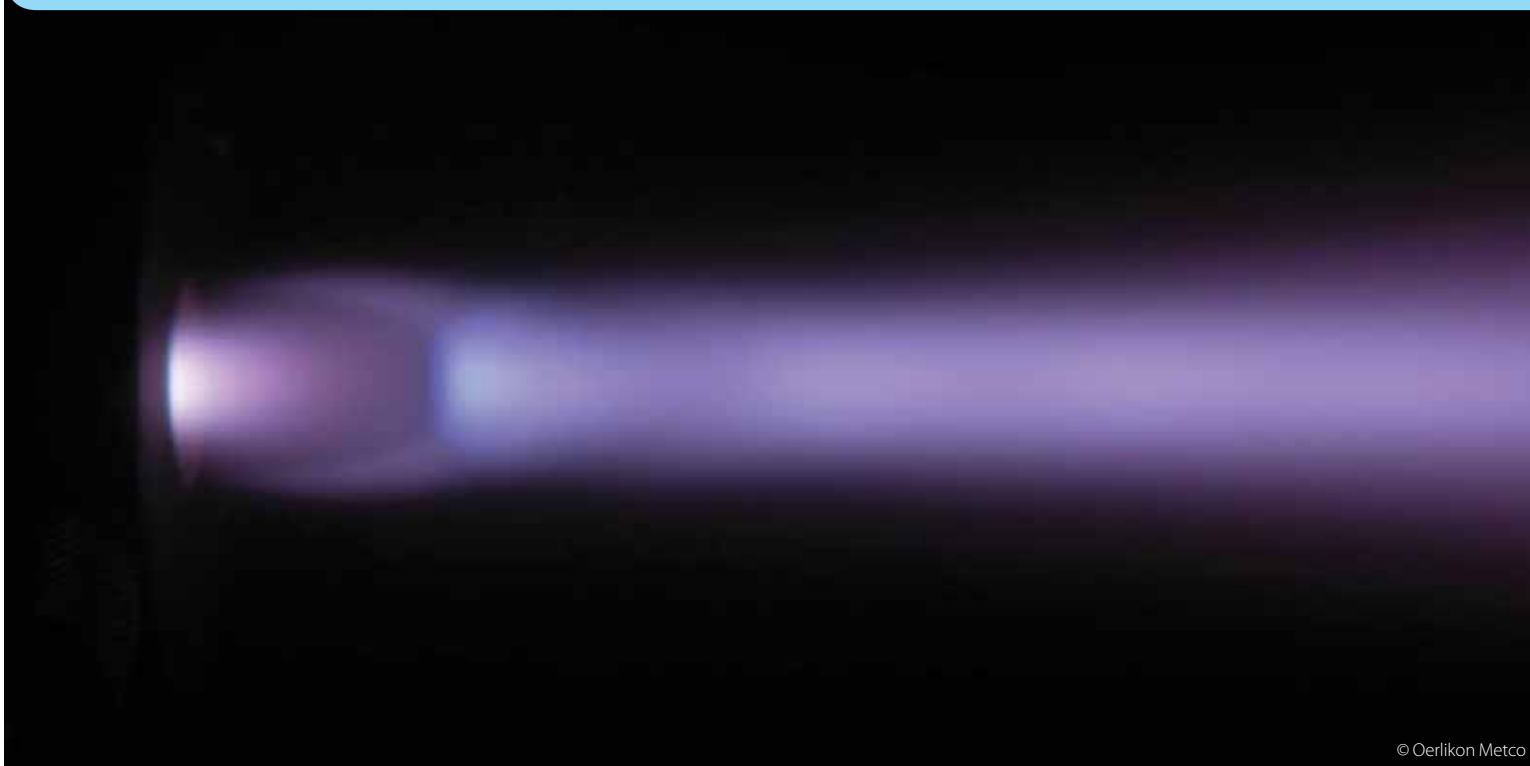


AN INTRODUCTION TO THERMAL SPRAY - PART 2

Introduzione alla termospruzzatura - Parte 2



© Oerlikon Metco

This is the Part 2 of a four-part article. The first part was published in *ipcm® Protective Coatings* n. 15 (October 2015). The two parts remaining will be published respectively in *ipcm® Protective Coatings* n. 17 (April 2016) and *ipcm® Protective Coatings* n. 18 (June 2016).

2.4 Thermal Spray Coating Processes

There are several different processes used to apply a thermal sprayed coating [2]. They are:

- Conventional flame spray
- Electric arc wire spray
- Plasma spray
- High velocity oxy-fuel spray (HVOF).

2.4.1 Conventional Flame Spray Process

2.4.1.1 Wire Flame Spray

With the wire flame spray process (**Fig. 4a**), the wire spray material is melted in a gaseous oxygen-fuel flame. The fuel gas can be acetylene, propane, hydrogen or MAPP. The wire is fed

Questa è la seconda parte di un articolo suddiviso in quattro capitoli. La prima parte è stata pubblicata su *ipcm® Protective Coatings* n. 15 (ottobre 2015). Le restanti due parti saranno pubblicate rispettivamente in *ipcm® Protective Coatings* n. 17 (aprile 2016) e *ipcm® Protective Coatings* n. 18 (giugno 2016).

2.4 Processi di rivestimento mediante termospruzzatura (Thermal Spray)

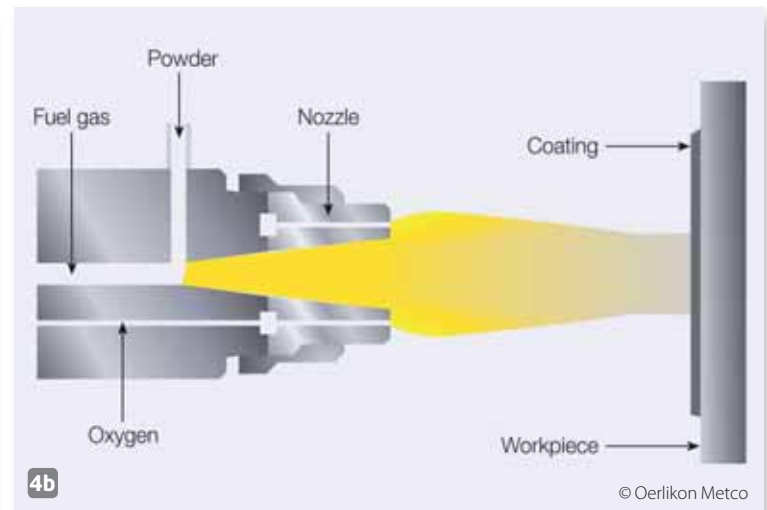
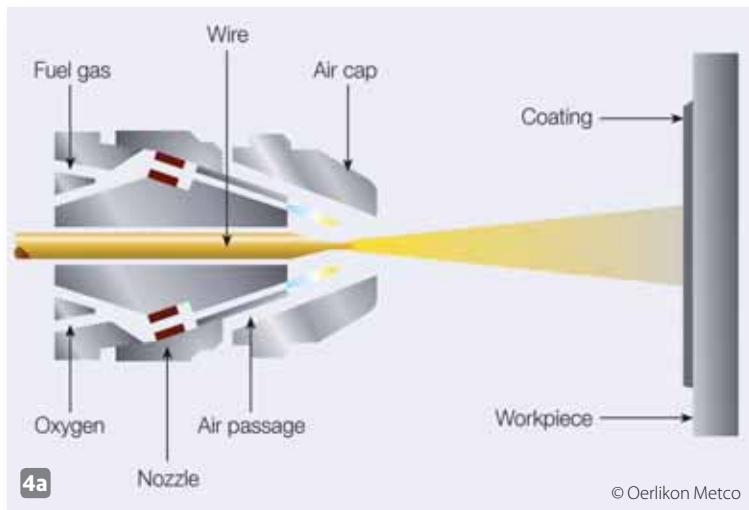
Esistono diversi processi per applicare un rivestimento termospruzzato [2]. Questi sono:

- spruzzatura convenzionale alla fiamma;
- spruzzatura tramite arco elettrico a filo;
- spruzzatura al plasma;
- spruzzatura a fiamma ad alta velocità (HVOF).

2.4.1 Processo di spruzzatura convenzionale alla fiamma

2.4.1.1 Spruzzatura a combustione con apporto di filo

Con il processo di combustione alimentato a filo (**fig. 4a**), il materiale da spruzzare è fuso in una fiamma ossi-combu-



concentrically into the flame, where it is melted and atomized by the addition of compressed air and directed towards the coating surface.

2.4.1.2 Powder Flame Spray

This coating process (**Fig. 4b**) is based on the same operational principle as the wire flame spray process, with the difference that the coating material is a spray powder. Thus, a larger selection of spray materials is available, as not all spray materials can be manufactured in wire form.

2.4.2 Electric Arc Wire Spray

With electric arc wire spray (**Fig. 5**), an arc is formed by contact of two oppositely charged metallic wires, usually of the same composition. This leads to melting at the tip of the wire material.

Air atomizes the melted spray material and accelerates onto the substrate. The rate of spray is adjusted by appropriate regulation of the wire feed as it is melted, so a constant arc can be maintained.

2.4.3 Plasma Spray

The principle of plasma spraying is shown schematically in **Figure 6a**. A high frequency arc is ignited between an anode and a tungsten cathode. The gas flowing through between the electrodes (i.e., Ar, He, H₂, N₂ or mixtures) is ionized such that

stabile. Il gas combustibile può essere acetilene, propano, idrogeno o MAPP. Il filo è alimentato assialmente dentro la pistola di spruzzatura, dove viene fuso dalla fiamma. Un getto di aria compressa di opportuna pressione provvede ad atomizzare, accelerare e dirigere le particelle fuse sulla superficie da rivestire.

2.4.1.2 Spruzzatura a combustione con apporto di polvere

Questo processo di rivestimento (**fig. 4b**) si basa sullo stesso principio operativo del processo di combustione alimentato a filo, con la differenza che il materiale di apporto è una polvere. È pertanto disponibile una più ampia scelta di materiali, in quanto non tutti quelli richiesti dalla termospruzzatura possono essere fabbricati in forma di filo.

2.4.2 Termospruzzatura (Thermal Spray) ad arco elettrico alimentato a filo

Nel processo ad arco elettrico (**fig. 5**), il contatto di due fili metallici (normalmente della stessa composizione) collegati a polarità distinte, genera una scarica nel punto di contatto. Si determina in tal modo la fusione della punta del materiale di ciascun filo.

L'aria compressa atomizza il materiale fuso, lo accelera e lo proietta sul substrato. La quantità di materiale spruzzato è regolata agendo sulla velocità di avanzamento del filo, in modo da mantenere un arco costante durante il progredire della fusione.

2.4.3 Spruzzatura al plasma

Il principio della spruzzatura al plasma è illustrato schematicamente nella **figura 6a**. Tra un anodo e un catodo al tungsteno si innesca un arco ad alta frequenza. Il gas che fluisce attraverso gli elettrodi (ovvero, Ar, He, H₂, N₂ o

4a

Schematic diagram of the wire flame spray process.

Schema del processo di spruzzatura a combustione alimentato a filo.

4b

Schematic diagram of the powder flame spray process.

Schema del processo di spruzzatura a combustione alimentato a polvere.

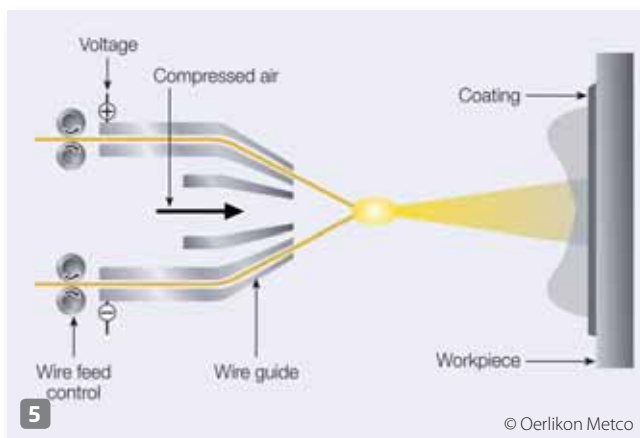
a plasma plume several centimeters in length develops. The temperature within the plume can reach as high as 16000 °K. The spray material is injected as a powder outside of the gun nozzle into the plasma plume, where it is melted, and hurled by the gas onto the substrate surface.

For specialized applications, a variant of the process is to plasma spray in a controlled, low pressure atmosphere. In contrast to coating in air (atmospheric plasma spraying, or APS), the melted particles oxidize far less with vacuum plasma spraying (VPS, **Fig. 6b**), resulting in coatings of considerably higher quality [3].

5

Schematic diagram of the electric arc wire spray process.

Schema del processo di termospruzzatura ad arco elettrico alimentato a filo.



miscela) viene ionizzato in modo da sviluppare un dardo plasma lungo alcuni centimetri. La temperatura del dardo può raggiungere i 16.000° K nel punto più caldo. Il materiale d'apporto è iniettato in forma di polvere all'esterno dell'ugello della pistola, penetrando nel dardo plasma per essere fuso, accelerato e proiettato violentemente dal gas sulla superficie del substrato.

Per applicazioni specialistiche, una variante del processo prevede la spruzzatura al plasma in atmosfera controllata a bassa pressione. Al contrario del rivestimento in aria (spruzzatura al plasma in ambiente atmosferico o APS), con la spruzzatura al plasma in camera a bassa pressione (VPS, **fig. 6b**) le particelle fuse si ossidano molto meno e producono

rivestimenti di qualità notevolmente superiore [3].

2.4.4 High Velocity Oxy Fuel Spray (HVOF)

The high velocity oxy-fuel spray (HVOF) process is a relatively recent addition to the family of thermal spray processes. As it uses a supersonic jet, setting it apart from conventional flame spray, the speed of particle impact on the substrate is much higher, resulting in improved coating characteristics. The mechanism differs from flame spraying by an expansion of the jet at the exit of the gun (**Fig. 7**). Fuel gases of propane, propylene, acetylene, hydrogen and natural gas can be used, as well as liquid fuels such as kerosene.

2.4.4 Spruzzatura a fiamma supersonica (HVOF)

Il processo di spruzzatura a fiamma supersonica (HVOF) è una tecnica relativamente recente che si aggiunge agli altri processi di termospruzzatura (*Thermal Spray*). Poiché utilizza un getto supersonico del gas, differentemente dalla spruzzatura a fiamma convenzionale, la velocità d'impatto delle particelle sul substrato è notevolmente superiore e consente di ottenere caratteristiche del rivestimento decisamente migliori. Il meccanismo differisce dalla spruzzatura a fiamma convenzionale per l'espansione che subisce il getto del gas all'uscita della pistola (**figura 7**). Come combustibile è possibile utilizzare propano, propilene, acetilene, idrogeno e gas naturale (metano), nonché combustibili liquidi come il cherosene.

6a

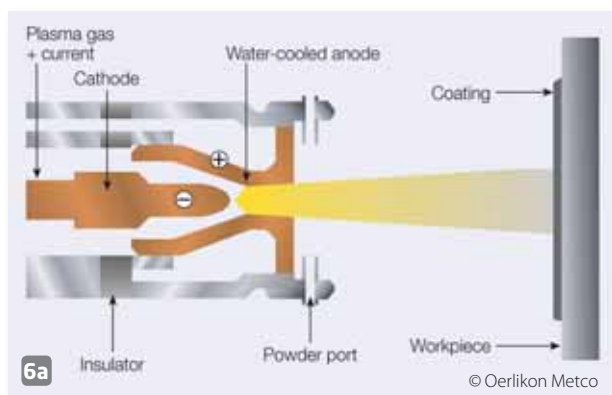
Schematic diagram of the plasma spray process.

Schema del processo di spruzzatura al plasma.

6b

VPS plasma spraying.

Spruzzatura al plasma in camera ad atmosfera controllata.





2.4.5 Process Comparison

The processes previously discussed differ fundamentally by the thermal and kinetic energy imparted to the spray particles by each process. The thermal energy is determined by the attainable flame temperature and the kinetic energy of the spray particle is a function of gas velocity. An energy comparison of the spray processes is represented in **Figure 8**. The high temperature of plasma spraying is particularly suitable for materials with a high melting point, such as ceramics.

The HVOF process, having high kinetic energy and comparatively low thermal energy, results in a positive effect on the coating characteristics and is favorable for spray materials such as tungsten carbide coatings. The comparison of the processes is largely of interest in relation to the coatings that result. **Table 3** lists some important coating characteristics, organized by material class.

2.4.5 Confronto dei processi

I processi sopra descritti si differenziano l'un l'altro principalmente per l'energia termica e cinetica impartita alle particelle. L'energia termica è determinata dalla temperatura di fiamma ottenibile; l'energia cinetica della particella è funzione della velocità del gas. Un confronto tra le energie dei processi di spruzzatura è rappresentato nella **figura 8**. L'elevata temperatura raggiungibile all'interno del dardo plasma è particolarmente adatta per i materiali con un elevato punto di fusione, come la ceramica e i refrattari. Il processo HVOF, avendo un'elevata energia cinetica e una relativamente bassa energia termica, determina un effetto positivo sulle caratteristiche del rivestimento ed è particolarmente adatto, ad esempio, per quei materiali sensibili alle temperature come i carburi. L'elevata energia cinetica consente inoltre di ottenere un riporto molto denso e compatto, con notevole adesione al substrato. Il confronto dei processi è particolarmente interessante in relazione ai rivestimenti che ne risultano. La **tabella 3** elenca alcune importanti caratteristiche dei rivestimenti, organizzate per classi di materiale.

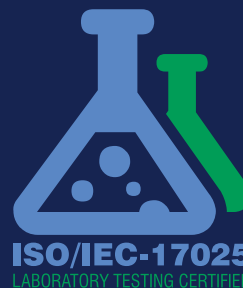
World Leaders

Have Responsibilities Too!

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



Cortec[®] provides environmentally safe corrosion protection solutions.



www.CortecVCI.com

4119 White Bear Parkway

St. Paul, MN 55110

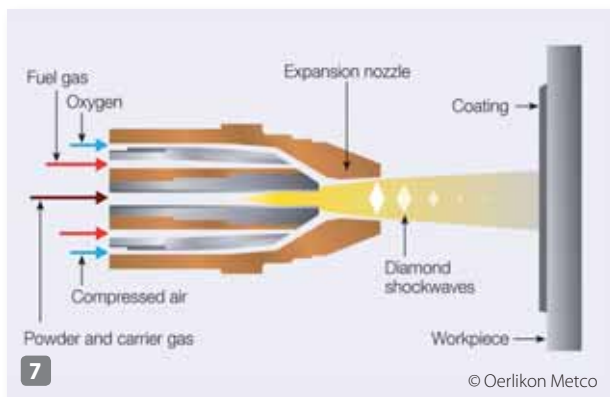
651-429-1100 • 800-426-7832

info@cortecvci.com

7

Schematic diagram of the high velocity oxy-fuel spray process (HVOF).

Schema del processo di spruzzatura a fiamma supersonica (HVOF).



8

Energy comparison of thermal spray processes.

Confronto energetico dei processi di termospruzzatura (Thermal Spray).

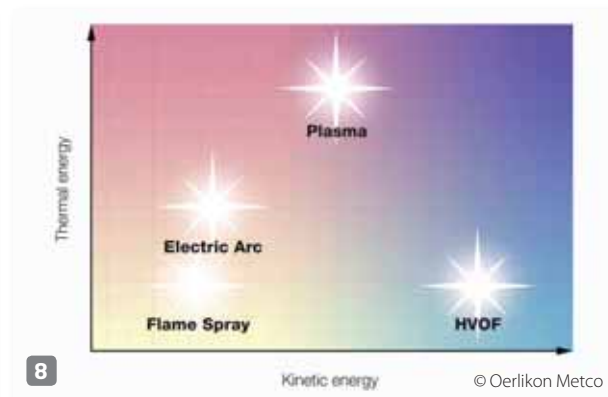


Table 3: Comparison of thermal spray process coating characteristics (approximate values).

Tabella 3: confronto delle caratteristiche del rivestimento termospruzzato (valori approssimativi).

Characteristics		Coating Type	Powder Flame Spray	HVOF Spray	Electric Arc Wire Spray	Plasma Spray	
Gas temperature	[°C]		3000	2600 - 3000	4000 (Arc)	12000 - 16000	
	[°F]		5400	4700 - 5400	7200 (Arc)	21500 - 29000	
Spray rate	[kg/h]		2-6	1 - 9	10 - 25	2 - 10	
	[lb/h]		4.5 - 13	2 - 20	22 - 55	4.5 - 22	
Particle velocity	[m/s]		up to 50	up to 700	approx. 150	up to 450	
	[ft/s]		up to 160	up to 2300	approx. 500	up to 1500	
Bond strength	[MPa]	Ferrous alloys	14 - 21	48 - 62	28 - 41	21 - 34	
	[psi]		2000 - 3000	7000 - 9000	4000 - 6000	---	
	[MPa]	Non-ferrous alloys	7 - 34	48 - 62	14 - 48	14 - 48	
	[psi]		2000 - 5000	7000 - 9000	4000 - 7000	4000 - 7000	
	[MPa]	Self-fluxing alloys	83+ (fused)	70 - 80	15 - 50	---	
	[psi]		12000+ (fused)	10000 - 11500	2200 - 7200	---	
	[MPa]	Ceramics	14 - 34	---	---	21 - 41	
	[psi]		4000 - 5000	---	---	3000 - 6000	
	[MPa]	Carbides	34 - 48	83+	---	55 - 69	
	[psi]		5000 - 7000	12000+	---	8000 - 10000	
	Coating thickness	[mm]	Ferrous alloys	0.05 - 2.0	0.05 - 2.5	0.1 - 2.5	0.4 - 2.5
		[mil]		2 - 80	2 - 100	4 - 100	15 - 100
[mm]		Non-ferrous alloys	0.05 - 5.0	0.05 - 2.5	0.1 - 5.0	0.05 - 5.0	
[mil]			2 - 200	2 - 100	4 - 200	2 - 200	
[mm]		Self-fluxing alloys	0.15 - 2.5	0.05 - 2.5	---	---	
[mil]			6 - 100	2 - 100	---	---	
[mm]		Ceramics	0.25 - 2.0	---	---	0.1 - 2.0	
[mil]			10 - 75	---	---	4 - 80	
[mm]		Carbides	0.15 - 0.8	0.05 - 5.0	---	0.15 - 0.8	
[mil]			6 - 30	2 - 200	---	6 - 30	
Hardness (see Table A1 in the Appendix)		[HRc]	Ferrous alloys	35	45	40	40
			Non-ferrous alloys	20	55	35	50
	Self-fluxing alloys		30 - 60	30 - 60	---	30 - 60	
	Ceramics		40 - 65	---	---	45 - 65	
	Carbides		45 - 55	55 - 72	---	50 - 65	
Porosity	[%]	Ferrous alloys	3 - 10	< 2	3 - 10	2 - 5	
		Non-ferrous alloys	3 - 10	< 2	3 - 10	2 - 5	
		Self-fluxing alloys	< 2 (fused)	< 2	---	---	
		Ceramics	5 - 15	---	---	1 - 2	
		Carbides	5 - 15	< 1	---	2 - 3	



The third part of this article will be published in the next issue (ipcm®_Protective Coatings n. 17, April 2016). ◀

La terza parte di questo articolo sarà pubblicata nel prossimo numero (ipcm®_Protective Coatings n. 17, aprile 2016). ◀

APPENDIX

Table A1 – Hardness within the range HRC 80 to 20 (approximate cross-reference values).

Rockwell HRC	Vickers HV	Brinell HB	Tensile strength Rm [N/mm ²]
80	1865		
79	1787		
78	1710		
77	1633		
76	1556		
75	1478		
74	1400		
73	1323		
72	1245		
71	1160		
70	1076		
69	1004		
68	942		
67	894		
66	854		
65	820		
64	789		
63	763		
62	746		
61	720		
60	697		
59	674		
58	653	620	2180
57	633	599	2105
56	613	580	2030
55	595	570	1995
54	577	551	1920
53	560	532	1845
52	544	515	1780
51	528	495	1700
50	513	485	1665

APPENDICE

Tabella A1 - Durezza nell'intervallo HRC 80-20 (valori di riferimento incrociati approssimativi).

Rockwell HRC	Vickers HV	Brinell HB	Tensile strength Rm [N/mm ²]
49	498	475	1630
48	484	456	1555
47	471	447	1520
46	458	437	1485
45	446	423	1450
44	434	409	1385
43	423	399	1350
42	412	390	1320
41	402	380	1290
40	392	371	1255
39	382	361	1220
38	372	352	1190
37	363	340	1150
36	354	335	1140
35	345	330	1115
34	336	323	1095
33	327	314	1060
32	318	304	1030
31	310	295	995
30	302	285	965
29	294	280	950
28	286	271	915
27	279	266	900
26	272	257	865
25	266	252	850
24	260	247	835
23	254	242	820
22	248	238	800
21	243	233	785
20	238	228	770

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: "Vakuumpasmaspritzen", 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 Schliifferstellung, DVS, Düsseldorf, (1989)

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: "Vakuumpasmaspritzen", 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 Schliifferstellung, DVS, Düsseldorf, (1989)