

Die wirtschaftliche Bedeutung des Kaltgasspritzens in der nordamerikanischen Luftfahrtindustrie: Eine Fallstudie

Cold Spray Economical Impact in North American Aerospace Industry: A case Study

Julio Villafuerte, Ph.D., P.Eng., CenterLine (Windsor) Ltd., Windsor, Ontario, Canada; Linh Tran, Engineering Mgr./FAA-DMIR, L. J. Walch Co., Inc., Livermore, California, USA

aus dem IndustrieForum
from the Industrial Forum

Kurzfassung

Das Kaltgasspritzen wird in Nordamerika in großem Umfang zur Reparatur und Instandhaltung von hochwertigen IDG- bzw. Integrated-Drive-Generator-Gehäusen verwendet, die in Verkehrsflugzeugen verbaut werden. Einer der wichtigsten Gründe für die Verwendung der Kaltgasspritztechnik ist die Möglichkeit, teure oder nicht austauschbare Komponenten eines Flugzeugs zu einem Bruchteil der Kosten wiederherstellen zu können.

1. Hintergründe

Das Kaltgasspritzen ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem Pulverpartikel in festem Zustand mit einem Hochgeschwindigkeitsgasstrahl auf ein Substrat beschleunigt werden, wo sich die Metallpartikel beim Aufprall plastisch verformen und verfestigen. Der Begriff „Kaltgasspritzen“ kommt von der relativ niedrigen Temperatur dieses Verfahrens, welche typischerweise weit unter der Schmelztemperatur der Spritz- und Substratwerkstoffe liegt. Obwohl das Konzept des „Kaltgasspritzens“ metallischer Werkstoffe auf Substrate bereits in den frühen 1900er-Jahren begann, wurde die Anwendbarkeit dieser Technologie erst in den 1980er-Jahren vom Institut für Theoretische und Angewandte Mechanik der Akademie der Wissenschaften in Novosibirsk (Hochdruck-Kaltgasspritzen) [1] und dann durch das „Obninsk Center for Powder Spraying“ (OCPS) [2] (Niederdruck-Kaltgasspritzen) in der ehemaligen Sowjetunion demonstriert und wirtschaftlich nutzbar gemacht.

In Anlagen für das Kaltgasspritzen werden Luft, Stickstoff oder Helium bei definierten Drücken und Temperaturen in konvergent-divergent geformte (DeLaval)Düsen injiziert, um einen Überschallgasstrahl zu erhalten. Der Spritzwerkstoff wird in Pulverform entweder vor der Verjüngung der Düse (Hochdruck-Kaltgasspritzen) oder danach (Niederdruck-Kaltgasspritzen), Bild 1, in den Gasstrahl geleitet und dadurch gegen das Substrat beschleunigt. Der Aufprall erzeugt eine schnell ablaufende Verformung des Materials, welche zu einer Mischung aus mechanischer und metallurgischer Bin-



Julio Villafuerte, Ph.D., P.Eng.

Autorenprofil: [Author profile:](#)

www.thermal-spray-bulletin.info/?id=205258
JVillafuerte@cntrline.com



Linh Tran, Engineering Mgr./FAA-DMIR

Autorenprofil: [Author profile:](#)

www.thermal-spray-bulletin.info/?id=307401
ltran@ljwalch.com

dung führt. Jeder Spritzwerkstoff erfordert eine bestimmte minimale kinetische Energie, oberhalb dieser kann eine ausreichende Bindung an das Substrat stattfinden. Die Art des Gases, der Gasdruck, die Gastemperatur und die Form der Düse bestimmen die Menge an kinetischer Energie, die zur Beschleunigung der Partikel zur Verfügung steht. Die Eigenschaften der Spritzpulver, wie Partikelgröße, Form, chemische Zusammensetzung und Gestalt sowie die Präparation der Oberfläche, bestimmen wie gut die gewünschten

Abstract

Today, the cold spray process is widely used in North America for the repair and restoration of high value IDG (Integrated-Drive-Generator) housings used in commercial aircrafts. One of the strongest drivers for the use of cold spray technology relates to the ability of successful recovery of high value and/or irreplaceable aircraft components at a fraction of their replacement cost.

was not until the 1980's that the applicability of this technology was demonstrated and commercialized by the Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences in Novosibirsk [1] (high pressure cold spray) and then by the Obninsk Center for Powder Spraying (OCPS) [2] (low pressure cold spray) in the former Soviet Union.

In cold spray equipment, air, nitrogen, or helium at prescribed pressures and temperatures are injected into converging-diverging (DeLaval) nozzles to obtain a supersonic gas jet. The spray material, in powder form, is introduced upstream the nozzle throat (high pressure cold spray), or downstream into the diverging section of the nozzle (low pressure cold spray) (Fig. 1) to accelerate and collide against the substrate. Collisions create rapid material deformation that promotes a mixture of mechanical and metallurgical bonds. Each type of spray material requires a minimum level of kinetic energy above which acceptable bonding to the substrate may occur. The type of gas, gas pressure, gas temperature, and nozzle design determine the amount of kinetic energy available to accelerate particulate. The characteristics of the spray powders, such as particle size, shape, chemistry, and diversity as well as the degree of surface preparation, influence the easiness to attain desired bond strengths. Many common engineering materials, particularly blends of materials, can be successfully cold sprayed at relatively low pressures (less than 40 bars), low gas temperatures (below 600°C), and using nitrogen or air. Since adhesion of the metal powder to the substrate and deposited material is

1. Background

Cold spray is a solid-state coating process that uses a high-speed gas jet to accelerate powder particles towards a substrate where metal particles plastically deform and consolidate upon impact. The term "Cold Spray" refers to the relatively low temperature involved in the process which is typically much lower than the melting point of both the spray and substrate materials. Although the concept of "cold spraying" metallic materials onto substrates goes back to the early 1900's, it



Bild 1:
Kommerzielle Kaltgasspritzanlage (Quelle: CenterLine Windsor Ltd.)

Fig. 1:
Commercial down-stream injection cold spray system (Source: CenterLine Windsor Ltd.)



Bild 2: Boeing 747 „Integrated Drive Generator“ (Quelle: L.J. Walch)

Fig. 2: Boeing 747 Integrated Drive Generator (Source: L.J. Walch)

Bindungsstärken erreicht werden. Viele gebräuchliche technische Werkstoffe, besonders Werkstoffgemische, können sehr gut bei relativ niedrigen Drücken (weniger als 40 bar), niedrigen Gastemperaturen (unter 600°C) und unter Verwendung von Stickstoff oder Luft kaltgasgespritzt werden. Da die Adhäsion des Metallpulvers an das Substrat und an das abgeschiedene Material selbst im festen Zustand erreicht wird, sind die Eigenschaften von Kaltgasbeschichtungen sehr einzigartig. Das Kaltgasspritzen eignet sich somit zum Verarbeiten von gut haftenden, wenig porösen, oxidfreien Werkstoffen und/oder einer Kombination aus Werkstoffen auf einer Vielzahl von Substratmaterialien. Damit ist es auch möglich, eine große Bandbreite an Werkstoffen auf temperaturempfindlichen Substraten abzuscheiden, beispielsweise für die Reparatur und Instandsetzung hochwertiger Komponenten für die Luftfahrt.

2. Kaltgasspritzen für die Luftfahrt

Seit vielen Jahren sind Aluminium- und Magnesiumlegierungen die Werkstoffe der Wahl für strukturelle und nicht strukturelle Bauteile von Flugzeugen, zum Beispiel gegossene Metallgehäuse. Wohlbekannte Eigenschaften, etablierte Herstellungsverfahren und neueste technologische Fortschritte sind nur einige der Gründe für das anhaltende Vertrauen in genau diese Legierungen. Die Lebensdauer eines Flugzeugs übersteigt oft die kommerzielle Verfügbarkeit von Ersatzteilen. Eine Herausforderung für die Industrie ist daher das Obsoleszenzmanagement, was wiederum die Kosten für die Flugzeugwartung erhöht. Dadurch ist die Möglichkeit,

ausgerangte Komponenten wirtschaftlich und zuverlässig instand zu setzen, eine wichtige Notwendigkeit bei der Wartung von Flugzeugen. Thermische Spritzverfahren, beispielsweise Plasma- oder Lichtbogen Drahtspritzen, wurden in der Vergangenheit mit nur mäßigem Erfolg aufgrund der prozessbedingt sehr großen Hitze, Porosität, Verformung, Oxideinschlüssen und Anforderungen bei der Maskierung angewendet.

2.1 Fallstudie: Reparatur von IDG-Gehäusen

In den vergangenen zehn Jahren hat eine wachsende Anzahl von in Nordamerika zertifizierten thermischen Spritzbetrieben zahlreiche Spezifikationen zum Kaltgasspritzen übernommen und/oder selbst entwickelt, um hunderte von hochpreisigen Flugzeugbauteilen sowohl für die kommerzielle als auch für die militärische Luftfahrt auf die ursprünglichen OEM-Spezifikationen wiederherzustellen (englisch: Original Equipment Manufacturer, übersetzt: Originalausrüstungshersteller). Die Möglichkeit mittels Kaltgasspritzen, eine gut anhaftende, oxidationsfreie Reparaturbeschichtung mit niedriger Porosität bei niedrigen Temperaturen zu erzeugen, ist für die Instandsetzung von Gussbauteilen aus Magnesium und Aluminium, die keine Deformation tolerieren, sehr interessant.

Gegenwärtig sind Magnesium- oder Aluminiumgussgehäuse für sogenannte Integrated-Drive-Generators (IDG), Bild 2, gute Beispiele für besonders hochwertige Bauteile der Luftfahrt, welche regelmäßig mittels Kaltgasspritzen repariert werden. Diese Bauteile werden als unkritische Komponenten betrachtet, die je-

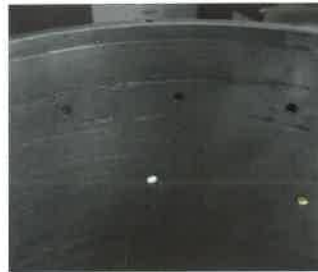


Bild 3: Schäden durch Lochfraß bei einem Boeing-747-APU-Generatorgehäuse (Quelle L.J. Walch)

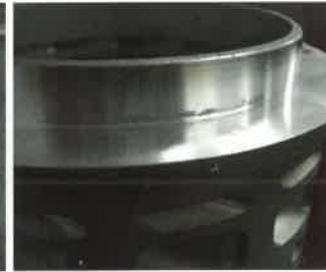


Fig. 3: Pitting corrosion damage in a Boeing 747 APU Generator housing (Source: L.J. Walch)

achieved in the solid state, the characteristics of cold spray deposits are quite unique, making cold spray suitable for consolidating well bonded, low porosity, oxide-free materials and/or combination of materials on a wide range of substrate materials. These attributes include the ability to deposit a wide range of materials on temperature-sensitive substrates, such as for the case of repair and restoration of high value components for aerospace.

2. Cold Spray in Aerospace

For many years, aluminum and magnesium alloys have been the materials of choice for aircraft structural and non-structural components, such as cast metal housings. Well known performance characteristics, established fabrication methods and recent technological advances are just a few of the reasons for the continued confidence in these alloys. The life span of an aircraft often surpasses the commercial availability of spare parts; thus, one challenge for the industry is ob-

solescence management, which increases the cost of aircraft maintenance. Subsequently, the ability to economically and reliably restore scrapped components becomes an important necessity in aircraft maintenance. Thermal spray processes, such as plasma or arc wire spray, have traditionally been used with limited success due to their inherent excessive heat, porosity, distortion, oxide inclusions, and masking requirements.

2.1 Case Study: Repair of IDG Housings

Over the last decade, an increasing number of aerospace certified thermal spray shops in North America have adopted and/or developed numerous cold spray repair specifications to bring back to original OEM (Original Equipment Manufacturer) specifications hundreds of high value aircraft components both for commercial and military aviation. The ability of cold spray technology to create well-bonded, low porosity, oxide-free metal repair at low temperatures became

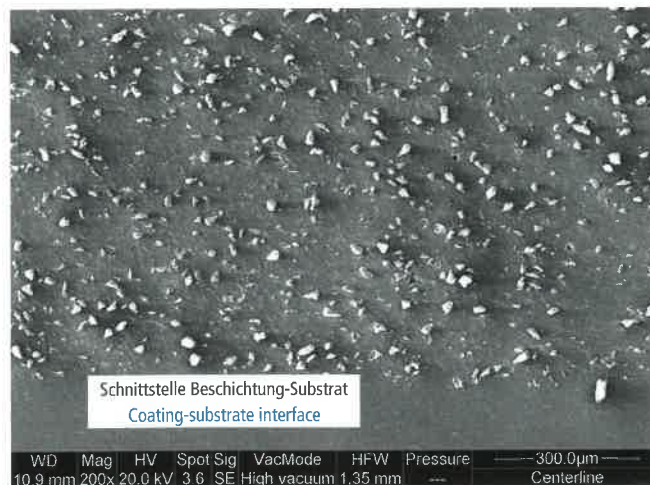


Bild 4: Mikrostruktur eines typischen, kaltgasgespritzten Aluminium-Aluminiumoxid-Verbunds (SST A0050), der für die Reparatur von Aluminium- und/oder Magnesiumguss verwendet wird. Das Substrat besteht aus Aluminium 6061. (Quelle: CenterLine Windsor Ltd.)

Fig. 4: Microstructure of a typical cold spray grade aluminum-alumina composite (SST A0050) used in the repair of aluminum and/or magnesium castings. The substrate is aluminum 6061 (Source: CenterLine Windsor Ltd.)

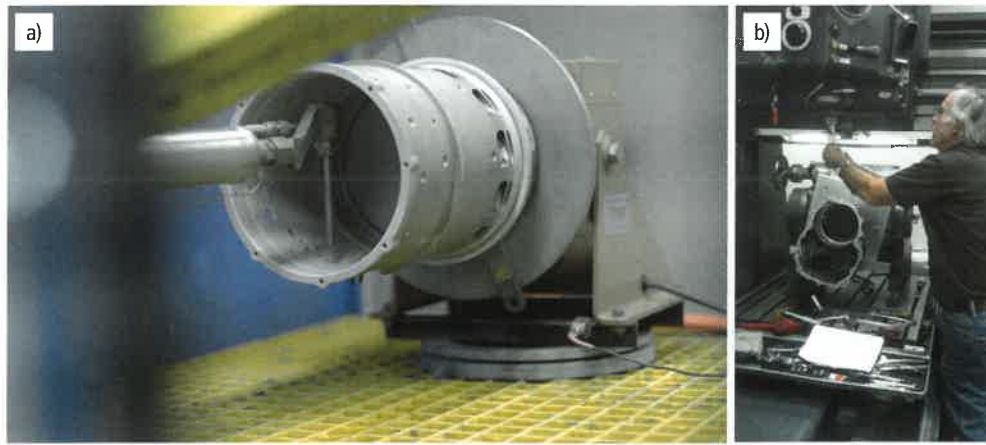


Bild 5: a) Kaltgasspritzen mit einem Roboter und b) Nachbearbeiten der Kaltgasbeschichtung

Fig. 5: a) Robotic cold spraying and b) post-machining operation with the cold spray process

doch ziemlich teuer zu ersetzen sind; nicht zu vergessen ist die lange Transportdauer. Ein IDG ist ein Gerät zur Erzeugung elektrischer Energie an Bord. Es wandelt die variable Drehzahl eines Flugzeugtriebwerks in eine konstante Drehzahl um, um einen eingebauten Wechselstromgenerator anzutreiben. Typischerweise verursachen Lochfraß, Verschleiß und Risse am Gehäuse Probleme, welche die Leistung über die normale Reparatur hinaus beeinträchtigen. Die meisten Fehler befinden sich in eng tolerierten und hitzeempfindlichen Bereichen wie Statorbohrungen, Erregerbohrungen, Steuereinheiten, Montageflächen und Passflächen (Bild 3). Diese Bereiche sind mit herkömmlichen thermischen Spritzverfahren sehr schwer wirtschaftlich instand zu setzen. Folglich ist das Kaltgasspritzen zu einer wirtschaftlich rentablen Alternative geworden. Durch Kaltgasspritzen reparierte Bauteile befinden sich in vielen Verkehrsflugzeugen wie Boeing 737NG, 747, 777; Airbus A320, A330 und A340.

3. Verfahren zur Qualifizierung des Kaltgasspritzens

Das Qualifizierungsverfahren für das Kaltgasspritzen, das von den meisten FAA-zertifizierten Spritzwerkstätten (FAA: Federal Aviation Administration, die Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten) befolgt wird, umfasst zum einen die Auswahl eines geeigneten Pulverwerkstoffs und zum anderen die Entwicklung und Optimierung von Spritzparametern, um Beschichtungen innerhalb der geforderten Spezifikationen herstellen zu können. Die Validierung der Eigenschaften erfolgt häufig durch ASTM C633 zur Haftzugfestigkeit, durch metallografische Untersuchungen (Bild 4) und durch 90°-Biegeversuche gemäß den Reparaturvalidierungsspezifikationen des OEM (zum Beispiel Hamilton Sundstrand SPR52). Für diesen speziellen Fall verlangen die Spezifikationen eine Haftzug-/Kohäsionsfestigkeit von mindestens 3000 psi (20 MPa), eine Porosität von weniger als 2%, keine Risse, keine Fehler in der Anhaftung und

quite attractive for restoring tight tolerance aircraft castings made of Magnesium and Aluminum which do not tolerate distortion.

Today, magnesium or aluminum cast housings for integrated drive generators (IDG) (Fig. 2) represent one good example of a particular high value aerospace component that is regularly repaired by cold spray. These are considered non-critical components, yet quite expensive to replace, not to mention the long haul turnaround. An IDG is an in-flight power generation device that converts the variable rotational speed of an aircraft engine into constant speed to drive a built-in AC generator. Typically pitting corrosion, wear, and tear of the housing produce dimensional issues that affect performance beyond normal repair. Many of the failures are located at tight tolerance heat-sensitive areas such as stator bores, exciter bores, pilots, mounting pads and mating faces (Fig. 3). These areas are challenging to be dimensionally restored using trad-

itional thermal spray. Consequently, cold spray has become an economically viable alternative. Cold spray repaired devices are currently accumulating flight hours in many commercial aircraft including Boeing 737NG, 747, 777; Airbus A320, A330, and A340.

3. Cold Spray Qualification Procedure

The qualification procedure followed by most FAA (Federal Aviation Administration) certified spray shops include, first, the selection of an appropriate cold spray grade powder material; then, the development and optimization of cold spray process parameters to produce coatings within the required specifications. Property validation is often conducted following ASTM C633 bond strength testing, metallographic examinations (Figure 4) and 90° bend testing per the OEM's repair validation specifications (e.g. Hamilton Sundstrand SPR52). For this particular case, specifications call for a minimum of 3,000 psi (20MPa) adhesive/cohesive strength, less than 2% porosity, no cracks, no lack of bonding, and 90° tensile bends around a 6 mm radius, without any chipping or spalling.

4. IDGs Repair Procedure and Quality Assurance

General guidelines for the commercial repair of IDGs include:

- Removal of existing corroded and/or damaged surfaces
- Pre-machining as necessary to facilitate cold spray deposition
- Surface preparation including grit-blasting or other methods for increasing surface roughness
- Cold spraying using manual or robotic guns (Figure 5a)

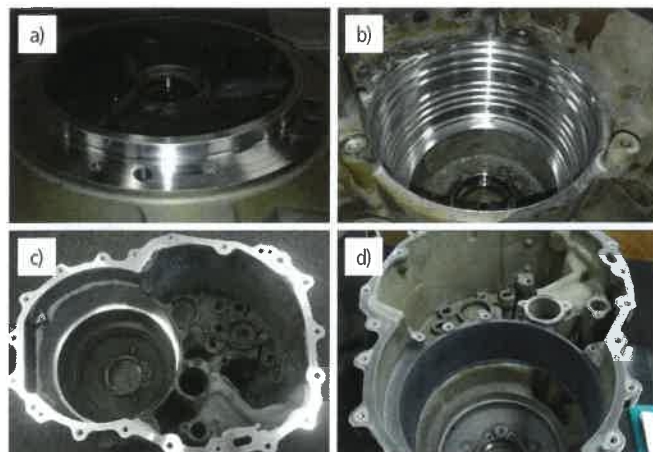


Bild 6: Reparierte und bearbeitete Komponenten: a) Pilot-OD, b) Statorbohrung-ID, c) Gehäusepassfläche und d) Gehäusebohrung (Quelle: L.J. Walch)

Fig. 6: Repaired and Finished components: a) Pilot OD, b) Stator bore ID, c) Housing mating surface, and d) Housing bore (Source: L.J. Walch)

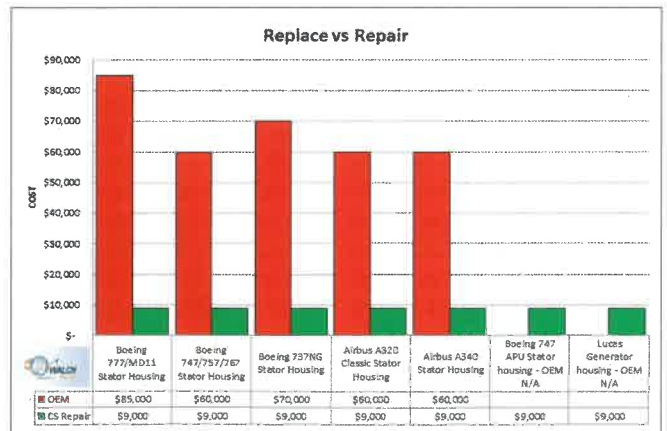


Bild 7: Vergleich der Kosten von Reparatur mittels Kaltgasspritzens (grün) und den Wiederbeschaffungskosten (rot) verschiedener IDGs (Integrated Drive Generators) (Quelle: LJ Walch)

Fig. 7: Cost of cold spray repair versus replacement for various IDGs (Source: LJ Walch)

eine 90°-Biegung um einen Radius von 6 mm ohne Abspalten oder Abplatzen.

4. Reparaturverfahren und Qualitätssicherung von IDGs

Die allgemeinen Richtlinien für die kommerzielle Reparatur von IDGs umfassen:

- a) Entfernen von korrodierten und/oder beschädigten Oberflächen
- b) Vorbearbeitung sofern erforderlich, um die Kaltgasbeschichtung auftragen zu können
- c) Oberflächenvorbereitung einschließlich Sandstrahlen oder andere Methoden zur Erhöhung der Oberflächenrauheit
- d) Kaltspritzen mit Hand- oder Roboterpistolen (Bild 5a)
- e) Nachbearbeitung der Reparatur gemäß OEM-Spezifikationen (Bild 5b)
- f) Sichtprüfung
- g) Maßkontrolle
- h) zerstörungsfreie Prüfung

- i) Nachbearbeitung wo notwendig (Lackieren und/oder Anodisieren) zur Verbesserung des Korrosionsschutzes (Bild 6)

5. Wirtschaftlichkeit des Kaltgas-spritzens

Der Hauptgrund für die Verwendung von Kaltgas-spritzen bei der Instandsetzung dieser Komponenten ist, sie zu einem Bruchteil ihrer Wiederbeschaffungskosten beim OEM zu reparieren – vorausgesetzt, das Bauteil ist kommerziell erhältlich. In vielen Fällen sind die Bauteile hingegen nicht mehr lieferbar. Bild 7 vergleicht die durchschnittlichen Kosten eines Ersatzteils mit den Kosten der Regeneration durch Kaltgas-spritzen für einige IDGs.

Danksagung

Die Autoren danken für die wertvollen Beiträge von CenterLine (Windsor) Ltd. und L. J. Walch.

- e) Post machining of the repair per OEM engineering specifications (Figure 5b)
- f) Visual Inspection
- g) Dimensional inspection
- h) Non destructive examination
- i) Finishing where required (painting and/or anodizing) to improve corrosion protection (Figure 6)

5. Cold Spray Economic Viability

The main justification for the use of cold spray in the restoration of these types of components is the ability to recover them

at a fraction of their OEM replacement cost – this is assuming that the part is commercially available. In many instances the component is simply no longer available. Figure 7 compares of the average cost of replacement against the cost of cold spray restoration for a number of IDGs.

Acknowledgments

The authors acknowledge the valuable contributions made by CenterLine (Windsor) Ltd. and L. J. Walch.

Literatur References

[1] Alkhimov A. P.; Papyrin A. N., Kosarev V. E.; Nesterovich N. I.; Shushpanov M. M.: Gas-dynamic spraying method for applying a coating, US Patent 5,302,414, April 12, 1994.

[2] Kashirin A. I., Klyuev O. F., Buzdygar T. V.: Apparatus for gas-dynamic coating, US Patent 6,402,050, June 11, 2002.

**Inserentenverzeichnis Thermal Spray Bulletin
Advertiser listing Thermal Spray Bulletin**

Amt AG	CH-Döttingen	53
Berolina Metallspritztechnik Wesnigk GmbH	D-Hennickendorf	8
Cremer Beschichtungstechnologie GmbH	D-Lüdenscheid	21
Diamant Metallplastic GmbH	D-Mönchengladbach	45
DeWAL Industries	USA-Saunderstown	5
DVS Media GmbH	D-Düsseldorf	56
GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH	D-München	13
GTV Verschleißschutz GmbH	D-Luckenbach	U4/BC
H.C. Starck GmbH	D-Goslar	17
Mogul Metallizing GmbH	D-Halle	37
Obz Innovation GmbH	D-Bad Krozingen	title
Oerlikon Metco AG	CH-Wohlen	U2/IFC, U3/IBC
Praxair Surface Technologies GmbH	D-Wiggensbach	51
SAINT-GOBAIN COATING SOLUTIONS	F-Avignon Cedex	31
Treibacher Industrie AG	A-Althofen	55



Flammspritzen - HVOF - Verschleisschutz - Korrosionsschutz

www.cremer-beschichtungen.de

info@cremer-beschichtungen.de