

Elektrische und magnetische Eigenschaften von thermisch gespritzten Schichten

Electrical and Magnetic Properties of Thermally Sprayed Coatings

Dr. Klaus Nassenstein
GTV Verschleißschutz GmbH
Luckenbach, Germany

Elektrische und magnetische Eigenschaften von thermisch gespritzten Schichten

Electrical and Magnetic Properties of Thermally Sprayed Coatings

Dr. Klaus Nassenstein, GTV Verschleißschutz GmbH, Luckenbach, Germany

Zu den vielfältigen Anwendungsbereichen des Thermischen Spritzens zählen Beschichtungen mit besonderen elektrischen und magnetischen Eigenschaften. Durch die Auswahl geeigneter Werkstoffe – von Oxidkeramiken über Nickel- und Eisenbasislegierungen bis hin zu Kupfer – lassen sich elektrische Leitfähigkeit, Isolationsverhalten, Temperaturabhängigkeit und magnetische Eigenschaften für anspruchsvolle technische Anwendungen gezielt einstellen.

Der folgende Überblick stellt Isolations-, Widerstands-, Leiter-, Sensor- sowie magnetisch wirksame Schichten vor. Zum Einsatz kommen dabei insbesondere das Atmosphärische Plasmaspritzen (APS), das Lichtbogenspritzen (AS) sowie das Kaltgasspritzen (CGS).

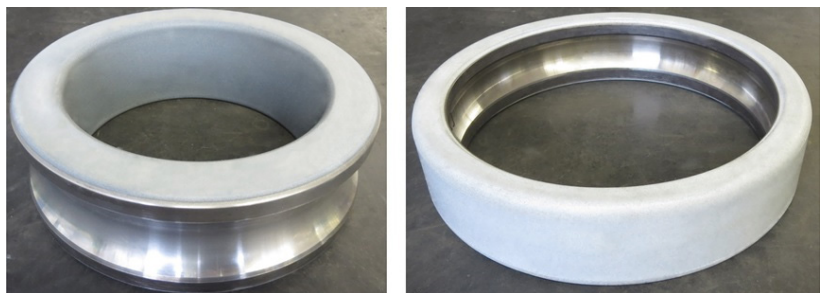
Isolationsschichten aus Oxidkeramik durch Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS)

Isolationsschichten werden im Allgemeinen durch atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) hergestellt. Dabei kommt es auf eine möglichst hohe Reinheit (> 99 %) des Pulverwerkstoffes aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) an. Im Wesentlichen sind einerseits der Isolationswiderstandswert sowie die Durchschlagfestigkeitswerte von der Schichtdicke abhängig. Andererseits ist Al_2O_3 stark hygroskopisch (Aufnahme von Feuchtigkeit), so dass die ursprünglichen, direkt nach dem Spritzen erzielten Werte für Isolation und Durchschlagfestigkeit relativ rasch abnehmen. Daher sollten die thermisch gespritzten Isolationsschichten nach dem Spritzen versiegelt werden. Hierfür steht eine Vielzahl von entsprechenden Siegeln zur Verfügung.

Typische, sehr stark streuende Werte liegen dabei für eine $300\ \mu\text{m}$ dicke bzw. relativ dünne Schicht und 95 % Luftfeuchte im Bereich von einmal 104 Ohm (unversiegelt) bis zweimal 1011 Ohm (versiegelt). Die Durchschlagfestigkeiten der gleichen Schichten liegen im Bereich von 2 kV unversiegelt bis 7 kV im versiegelten Zustand ebenfalls bei 95 % Luftfeuchte.

Derartige Beschichtungen finden großflächige Anwendung bei fast allen Kugellagerherstellern. Diese werden beispielsweise in allen Elektromotoren eingesetzt.

Elektrisch isolierende Oxidbeschichtung im bzw. auf Lagerring
Electrically insulating oxide coating in or on bearing ring
(Quelle/Source: obz innovations gmbh, Bad Krozingen)



Stromleiterschichten bzw. Widerstandsschichten

NiCr und FeCrAl (Konstantan) lassen sich mittels APS zu stromleitenden Schichten mit einstellbarem spezifischem Widerstand verarbeiten. Dabei beeinflussen Porosität und Oxidationsgrad den Leitungswiderstand. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Widerstands- oder Heizleiterschichten. Typische erzielbare spezifische Widerstände je nach Spritzparameter für NiCr und FeCrAl liegen bei 2–4 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Die stromleitenden Bahnen können einerseits durch Maskierungen – sprich Abdecken

The wide range of applications for thermal spraying includes coatings with specific electrical and magnetic properties. By selecting suitable materials – from oxide ceramics and nickel- and iron-based alloys to copper – electrical conductivity, insulation properties, temperature dependence and magnetic properties can be precisely tailored for demanding technical applications.

The following overview presents insulating, resistive, conductive, sensor and magnetically active coatings. The processes used in particular are atmospheric plasma spraying (APS), arc spraying (AS) and cold gas spraying (CGS).

Insulation layers made of oxide ceramics by atmospheric plasma spraying (APS)

Insulation layers are usually produced by atmospheric plasma spraying (APS). The purity of the aluminium oxide (Al_2O_3) powder material must be as high as possible (> 99 %). On the one hand, the insulation resistance value and the dielectric strength values are essentially dependent on the layer thickness. On the other hand, Al_2O_3 is strongly hygroscopic (absorption of moisture), so that the original insulation and dielectric strength values achieved directly after spraying decrease relatively quickly. Therefore, the thermally sprayed insulation layers should be sealed after spraying. A variety of appropriate sealers are available for this purpose.

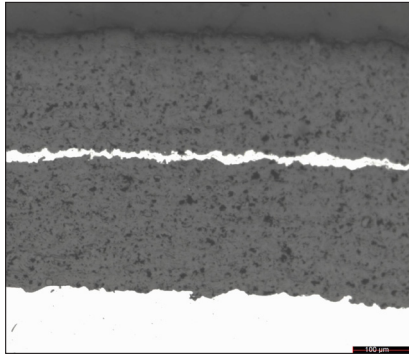
Typical, highly scattering values for a $300\ \mu\text{m}$ thick or relatively thin layer and 95 % humidity range from once 104 Ohm (unsealed) to twice 1011 Ohm (sealed). The dielectric strength of the same coatings is in the range of 2 kV unsealed to 7 kV sealed, also at 95 % humidity.

Such coatings are used on a large scale by almost all ball bearing manufacturers. They are used, for example, in all electric motors.

Current conducting layers or resistance layers

NiCr and FeCrAl (constantan) can be processed into current conducting layers with adjustable resistivity by means of APS. The porosity and degree of oxidation influence the conductive resistance. In this context, one also speaks of resistive or heating conductor layers. Typical resistivity values that can be achieved for NiCr and FeCrAl are 2–4 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, depending on the spraying parameters. The current-conducting paths can be produced on the one hand by masking – i.e. covering the sur-

der nicht zu beschichtenden Fläche – und andererseits mittels Laserablation hergestellt werden. Üblicherweise wird vorher eine Isolationsschicht aus Al_2O_3 (siehe Abschnitt "Isolationsschichten ...") aufgebracht.



Typischer Schichtaufbau: Dünne Leiterbahn (hell) zwischen zwei Aluminiumoxidschichten (dunkel), die als Isolationsschichten dienen.

Typical layer structure: Thin conductor track (light) between two aluminium oxide layers (dark), which serve as insulation layers.

(Quelle/Source: Watlow Inc., Kuchl, Austria)

face not to be coated – and on the other hand by laser ablation. Usually, an insulation layer of Al_2O_3 (see section "Insulation layers ...") is applied beforehand.



Aufbau elektrisch leitfähige Kupferschichten auf elektrisch isolierender Keramikschicht für den Bereich E-Mobilität.

Construction of electrically conductive copper layers on an electrically insulating ceramic layer for the field of e-mobility.

(Quelle/Source: obz innovations gmbh, Bad Krozingen)

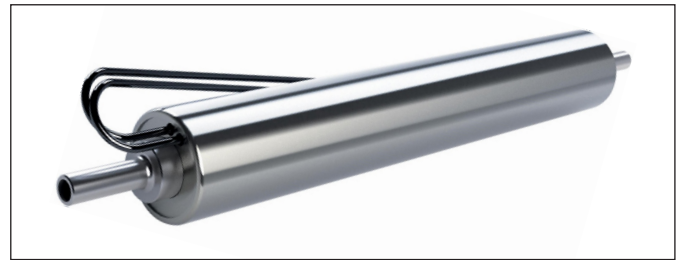
Bei der Herstellung durch Laserablation ist eine gleichmäßige Schichtdicke eine wesentliche Voraussetzung für eine funktionierende Leiterbahn. Da die Laserleistung immer konstant vorgewählt wird, kann es bei zu dünnen Metallschichten zum Durchbrennen der Bahn auf die Isolationsschicht oder bei zu dicker Schicht zum Ausbilden von Stegen zwischen den einzelnen Leiterbahnen kommen.

When manufacturing by laser ablation, a uniform layer thickness is an essential prerequisite for a functioning conductor track. Since the laser power is always pre-selected to be constant, if the metal layers are too thin, the track may burn through onto the insulation layer, or if the layer is too thick, ridges may form between the individual conductor tracks.

Mittels Lichtbogenspritzen können darüber hinaus erfolgreich Stromkontaktierungen im Anschluss aufgebracht werden. Dazu dienen im Allgemeinen Bronzeworkstoffe oder auch reines Kupfer. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch hervorragende Benetzbarkeit von Zinnloten aus.

Furthermore, current contacts can be successfully applied by means of an arc spraying process. Bronze materials or even pure copper are used for this purpose. These materials are characterised by excellent wettability of tin solders.

„Fluent“ der Fa. Watlow Inc.: Inline Durchlauf-Heizelement für flüssige und gasförmige Medien
"Fluent" by Watlow Inc.: Inline continuous flow heating element for liquid and gaseous media
(Quelle/Source: Watlow Inc., Kuchl, Austria)

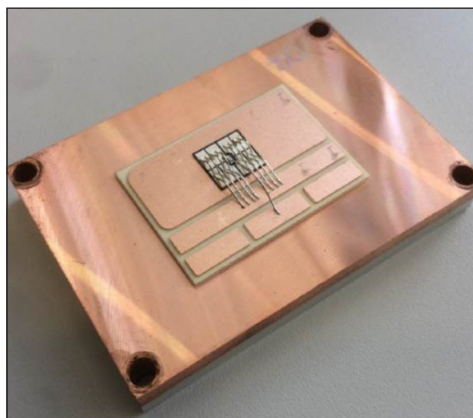


Kaltgas gespritzte Kupferschichten

Das Kaltgasspritzen (CGS) hat sich u.a. bewährt, um Kupfer zu hochleitenden, stromführenden Schichten zu verarbeiten. Aber auch entsprechende Kühlkörper aus Kupfer an Stromleitern bspw. aus Aluminium sind eine gängige Applikation. Der wesentliche Vorteil des Kaltgasspritzens gegenüber den anderen thermischen Spritzverfahren besteht in einer nahezu oxid- und porenfreien Metallbeschichtung. Das führt im Gegensatz zu den APS gespritzten Schichten zu niederohmigen Leitern. Aluminium und

Cold gas sprayed copper layers

Cold gas spraying (CGS) has proven itself, among other things, to process copper into highly conductive, current-carrying layers. But also corresponding copper heat sinks on current conductors, e.g. made of aluminium, is a common application. The main advantage of cold spraying compared to other thermal spraying processes is that the metal coating is almost free of oxides and pores. In contrast to APS sprayed coatings, this results in low-resistance conductors. Aluminium and copper can



Links: Kaltgassgespritzter Kühlkörper (Wärmeleitfähigkeit ca. 10 W/mm^2). Left: Cold gas sprayed heat sink (thermal conductivity approx. 10 W/mm^2).

Mitte: Schaltschränke (UV) mit kaltgassgespritzten Stromleitern. Middle: Switch cabinets (UV) with cold gas sprayed conductors.

Rechts: Mittels Kaltgas hergestellte Stromschiene. Right: Conductor rail produced using cold gas.

(Quelle/Source: Impact Innovation GmbH, Haun/Rattenkirchen)

Kupfer lassen sich andernfalls nur durch aufwändigere Lötprozesse fügen. Diese Metallhybrid-Kombination spart bei Leiterbahnen Gewicht und Kosten. Beim Aufspritzen von Kupfer auf Aluminium müssen die Grundkörper lediglich fettfrei sein, um durch das Kaltgasverfahren beschichtet zu werden. Die Schichten erreichen bis zu 98 % der elektrischen Leitfähigkeit von massivem Kupfer (IACS International Annealed Copper Standard).

otherwise only be joined by more complex soldering processes. This metal-hybrid combination saves weight and costs for conductors. When spraying copper onto aluminium, the base bodies only have to be free of grease in order to be coated by the cold gas process. The layers achieve up to 98 % of the electrical conductivity of solid copper (IACS International Annealed Copper Standard).

Querschliff durch ein Stromschienensegment.
Cross section through a conductor rail segment.
(Quelle/Source: Impact Innovation GmbH,
Haun/Rattenkirchen)



Sensorschichten und Hochtemperaturleiter

Verschiedene Oxidkeramische Schichten können einerseits als sogenannte Sensor- oder Sperrschicht eingesetzt werden. Beim Erreichen einer spezifischen Temperatur ändert sich schlagartig der Widerstand. Dieses Signal kann dann elektrotechnisch bspw. als Abschaltbefehl verwendet werden. Umgekehrt dient thermisch gespritztes Titandioxid (TiO_2) als Hochtemperaturleiter, sprich die Schicht wird ab einer spezifischen Temperatur stromleitend. Verantwortlich hierfür sind die sogenannten Magnéli-Phasen die während des atmosphärischen Plasmaspritzens in der Schicht entstehen.

Sensor coatings and high temperature conductors

Various oxide ceramic layers can be used on the one hand as so-called sensor or barrier layers. When a specific temperature is reached, the resistance changes abruptly. This signal can then be used electrotechnically, e.g. as a switch-off command. Conversely, thermally sprayed titanium dioxide (TiO_2) serves as a high-temperature conductor, i.e. the layer becomes conductive at a specific temperature. This is due to the so-called Magnéli phases that are formed in the layer during atmospheric plasma spraying.

Magnetische induktive Eigenschaften

Die neuere Generation von Kochherden arbeitet induktiv. Der klassische Edelstahlkochtopf, die leichte Aluminiumgusspfanne oder auch das edle Kupferkochgeschirr funktionieren jedoch nicht ohne einen entsprechend magnetischen bzw. magnetisierbaren Boden. Eine Möglichkeit besteht im Aufspritzen von hochlegiertem Chromstahl durch die Verfahren des thermischen Spritzens.

Magnetic inductive properties

The newer generation of cookers works inductively. However, the classic stainless steel saucepan, the light cast aluminium pan or even the noble copper cookware will not work without a correspondingly magnetic or magnetisable base. One possibility is to spray on high-alloy chromium steel using thermal spraying techniques.

Weiterhin lassen sich prinzipiell Neodympulver zu magnetischen Schichten durch thermisches Spritzen verarbeiten. Jedoch sind großflächige Anwendungen hierfür nicht bekannt.

Furthermore, in principle, neodymium powder can be processed into magnetic layers by thermal spraying. However, large-scale applications for this are not known.

Mittels Kaltgasspritzen erzeugte Beschichtungen auf Kochgeschirr.
Coatings on cookware produced by cold gas spraying.
(Quelle/Source: obz innovations gmbh, Bad Krozingen)

