

» Hoch hinaus mit innovativen Beschichtungen«

Bessere Wärmedämmung durch neue Werkstoffsysteme

Die Kunden von Oerlikon Metco profitieren seit Langem von robusten und zuverlässigen Wärmedämmschichten, die Gasturbinen und Flugzeugtriebwerke vor hohen Temperaturen schützen. Um den Wirkungsgrad von Turbinen weiter zu steigern, sind verbesserte Lösungen erforderlich, die noch höheren Temperaturen standhalten können. Mit einer Kombination aus neuen Werkstoffzusammensetzungen, Pulverherstellungsverfahren und fortschrittlicher Beschichtungstechnik meistert Oerlikon diese Herausforderung.

Um einen besseren Wirkungsgrad zu erzielen, werden Industriegas und Flugzeugturbinen heutzutage mit engeren Toleranzen, höheren Druckverhältnissen und höheren Eintrittstemperaturen betrieben (Bild 1a). Die steigende Nachfrage nach effizienteren Turbinen mit geringeren NO_x- und CO₂-Emissionen hat zur Entwicklung neuer Werkstoffe, Herstellungstechnologien und Oberflächenbehandlungsverfahren geführt. Während die Turbineneintrittstemperaturen in den letzten vierzig Jahren um 500°C gestiegen sind, haben sich die Temperaturgrenzen der für Turbinen verwendeten Legierungen nur um 220°C erhöht. Selbst bei gerichtet erstarrten und einkristallinen Legierungen sind die Auslegungsgrenzen mittlerweile erreicht. Angesichts von Temperaturen in heutigen Turbinen von über 1500°C sind die Konstrukteure auf der Suche nach neuen Beschichtungslösungen.

Isolierung mit Wärmedämmschichtsystemen

Wärmedämmschichtsysteme (*Thermal Barrier Coatings, TBCs*) bestehen aus einer wärmeisolierenden keramischen Beschichtung. Diese wird auf eine oxidationsbeständige, metallische Haftschiicht aufgebracht und verringert die Wärmeübertragung in den Grundwerkstoff. Die Vorteile sind bessere mechanische Eigenschaften und eine längere Lebensdauer. TBC-Beschichtungen werden sowohl in Industriemaschinen als auch in Flugzeugturbinen für Abgaskanäle, Brennkammern, Hitzeschilde, Nachbrenner, Leit- und Laufschaufeln eingesetzt. Zu den herkömmlichen TBC-Systemen gehören plasmaspritzte Produkte von Oerlikon Metco wie die keramischen Beschichtungen der Metco-204-Serie aus 7–8-Gew.-%-Yttriumoxid stabilisiertem Zirkonoxid auf Haftschiichten aus Amdry 995 (CoNiCr-AlY) oder Amdry 962 (NiCrAlY). Ein Beispiel für die Anwendung von

TBCs ist das F100-Triebwerk der Militärflugzeuge vom Typ F15 und F16. (Bild 1b) Bei diesem Triebwerk ist der Nachbrenner mit einer Wärmedämmschicht versehen. Dort werden die heißen Abgase erneut entzündet, um restlichen Kraftstoff zu verbrennen und dem Flugzeug bei Bedarf zusätzlichen Schub zu verleihen. Das TBC System sichert die Einsatzbereitschaft und die Lebensdauer des Nachbrenners, welche ohne die Beschichtung deutlich kürzer ausfallen würden.

Neue Werkstoffsysteme

Forschungsprojekte mit namhaften Instituten belegen, wie wichtig neue Beschichtungswerkstoffe für zukünftige Turbinendesigns sind. Aber die Mikrostruktur der Beschichtungen spielt eine ebenso wichtige, wenn nicht gar wichtigere Rolle. Typische keramische TBC-Mikrostrukturen weisen eine hohe globulare Porosität, eine feine interpartikuläre Porosität

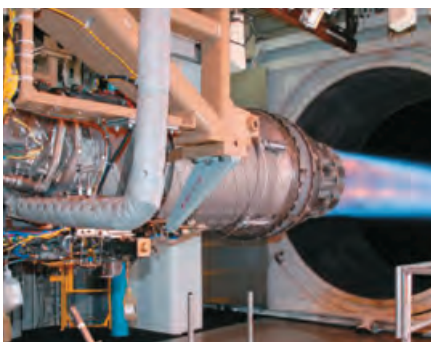


Bild 1a: Wärmedämmschichten (TBCs) schützen die Triebwerke von militärischen und zivilen Flugzeugen (im Bild ein F100-Triebwerk).



Bild 1b: In der Luftfahrtindustrie sorgen Beschichtungen für geringere Betriebskosten, längere Komponentenlebensdauer, höhere Triebwerkswirkungsgrade, Kraftstoffeinsparungen und geringere Emissionen. Das Bild zeigt eine F15 Eagle.

und intrapartikuläre Mikrorisse auf (Bild 2). Um zu verhindern, dass Zeit und Temperatur die Beschichtung nachteilig verändern, ist es wichtig, die Menge der kombinierten Porositäten und die Auswirkung ihrer Größe und Verteilung auf die thermische Leitfähigkeit der Beschichtung zu kennen. Die Schüttdichte, Porosität und Mikrostruktur eines TBC-Systems hängen nicht nur von den Anwendungsparametern, sondern auch von dem Pulverherstellungsverfahren und den Pulvereigenschaften ab. Die Auswahl der Rohstoffe erfolgt nach Größe, Reinheit, chemischer Homogenität und Phasenstabilität. Herstellungsdetails wie Wärmebehandlungsprofil, Teilchengröße und -form bestimmen die Stabilität und Zuverlässigkeit der Beschichtung. Oerlikon Metco kennt diese kritischen Faktoren und kombiniert diese auf synergetische Weise, um die Anforderungen von Kunden zu erfüllen. Da es keinen Beschichtungswerkstoff gibt, der die konstruktiven Anforderungen aller Turbinen erfüllt, bietet Oerlikon Metco eine ganze Palette von Werkstoffen in Standard-, hochreinen und Low-k-Zusammensetzungen (d.h. mit exzellenten isolierenden Eigenschaften) an (siehe Infobox). In Zusammenarbeit mit Kunden und Instituten entwickelt Oerlikon Metco neue Werkstoffzusammensetzungen wie:

- Pyrochlor-Oxide (Metco 6041)
- Metastabile Zirkonoxid-Strukturen, co-dotiert mit Oxiden der Seltenen Erden zum Erzeugen von Oxid-Defektclustern (Metco 206A)
- Perowskit-Strukturen für fortschrittliche Low-k-Alternativen

Für eine erfolgreiche Beschichtung sind bei vielen dieser neuen Zusammensetzungen keramische Zwischenschichten und verbesserte Haftsichten erforderlich. Hier haben sich die Produkte der Amdry-386-Serie (NiCoCrAlSiHFY) von Oerlikon Metco als Haftsichten für TBCs hervorragend bewährt. Die Werkstoffe können durch atmosphärisches Plasmaspritzen (APS), Plasmaspritzen in kontrollierter Atmosphäre oder Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF) aufgebracht werden.

TBC Pulver von Oerlikon

TBC-Pulver werden aus dem keramischen Werkstoff Zirkonoxid hergestellt und mit Yttrium stabilisiert (YSZ). Oerlikon nutzt zwei Verfahren zum Vermischen und Verschmelzen der Bestandteile von TBC-Pulvern:

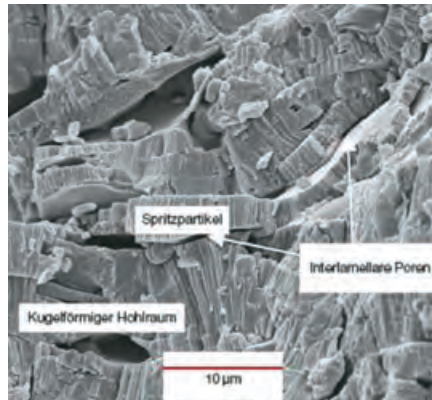
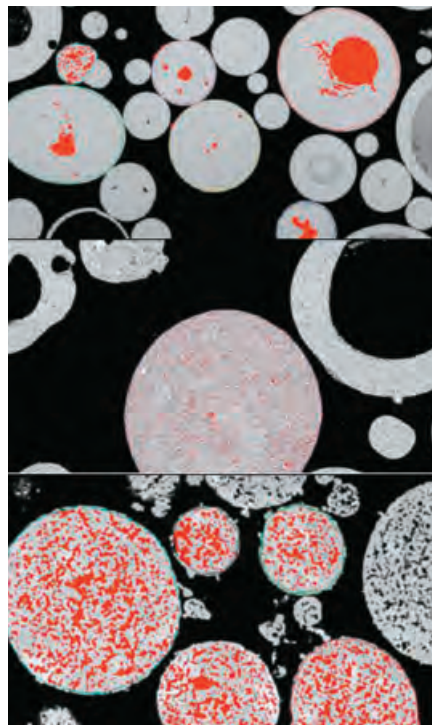


Bild 2: Die REM-Aufnahme einer typischen TBC-Mikrostruktur im Querschnitt zeigt verschiedene Poren und Risse.



a) Die Metco-204-Produktreihe umfasst plasmaverdichtete Pulver mit 7-8 Gew.-% YSZ, die im HOSP™-Verfahren (Hollow-Oven Spherical Powders) hergestellt wurden.

b) Die hochreinen, auf Zirkonoxid basierenden Pulver wurden im Hinblick auf neue Kundenanforderungen entwickelt und zeichnen sich durch ihre Sinterbeständigkeit bei hohen Temperaturen aufgrund geringer Aluminiumoxid- und Siliziumoxidanteile aus. Metco 222A ist ein hochreines, agglomeriertes und gesintertes Pulver mit 7-8 Gew.-% YSZ.

c) low-k-Werkstoffe sind bessere Isolatoren als herkömmliche keramische Pulver mit 7-8 Gew.-% YSZ. Sie sind auf eine höhere Phasenstabilität und für Betriebstemperaturen von über 1200 °C ausgelegt. Metco 206A ist ein agglomeriertes und gesintertes low-k-Pulver.

- Agglomerieren und Plasmaverdichten – diese Pulver eignen sich am besten für Anwendungen mit normaler Porosität und einem hohen Auftragswirkungsgrad
- Agglomerieren und Sintern – diese Pulver sind besonders für dicke Wärmedämmschichten mit hoher Porosität geeignet.

Die Abbildungen zeigen Querschnitte durch verschiedene, von Oerlikon entwickelte TBC-Pulver. Die rote Einfärbung kennzeichnet Porosität (b und c), die schwarzen Kreise sind kugelförmige Löcher (a und b).

Fortschritte in der Beschichtungstechnik

Die kaskadierte Steuerung des Lichtbogens von Plasmaspritzbrennern (Cascading-Arc-Technologie) ist mittlerweile eine bewährte Methode zur Reduzierung der Beschichtungskosten von TBC-Systemen. Der Plasmabrenner TriplexPro™-210 von Oerlikon Metco ermöglicht eine um bis zu 300% höhere Auftrags-effizienz als herkömmliche Plasmaspritzbrenner und spart so Zeit und Kosten. Außerdem reduziert die anlagenbedingte Prozessstabilität des Brenners TriplexPro-210 Schwankungen zwischen einzelnen Serien und Unregelmäßigkeiten in der Beschichtung einzelner Komponenten. Das Ergebnis sind zuverlässige TBC-Beschichtungen und eine besser prognostizierbare Lebensdauer. Zu den Plasmasystemen mit Cascading-Arc-Technologie gehören auch die Plasmabrenner vom Typ SinplexPro™. Nachbrenner sind große Komponenten mit einer Länge von ca. 2m und einem Durchmesser von etwa 1m. Das Aufbringen einer TBC mit einem herkömmlichen Plasmabrenner dauert etwa 4,5 Stunden. Dabei muss der Brenner nach 15 Stunden Spritzdauer gewartet werden, was eine Unterbrechung der Arbeiten nach jeweils drei Komponenten bedeutet. Mit dem TriplexPro-210 kann die gleiche Beschichtung in nur 1,5 Stunden aufgebracht werden, und eine Wartung ist erst nach etwa 150 bis 200 Stunden erforderlich.

Darüber hinaus sind Beschichtungen mit dem TriplexPro-210 gleichmäßiger. Oerlikon Metco hat ein Verfahren zum Aufbringen von TBCs durch Plasmaspritzen unter Niederdruck-Bedingungen (ca. 1mbar) entwickelt, um neue mikrostrukturierte Beschichtungen mit verbesserter Konformität zu ermöglichen. Dieses spezielle Plasma-Spray-PVD-Verfahren (genannt LPPS-Hybrid PS-PVD) erzeugt Mikro-

strukturen, die den säulenförmigen Strukturen von herkömmlichen Elektronenstrahl-PVD-Verfahren ähneln, aber eine höhere Auftragsrate und bessere Eigenschaften aufweisen. Erstmals ermöglicht diese Technologie das Aufbringen von thermischen Spritzbeschichtungen auf Bereiche, die außerhalb der Sichtlinie liegen, und macht somit die Verarbeitung von komplexen Bauteilen praktikabel. Metco 6700 ist ein hochreiner Werkstoff mit 7-8 Gew.-% YSZ, der speziell für das PS-PVD-Verfahren entwickelt und bereits zur Beschichtung von Leitschaufeln eingesetzt wurde. Das PS-PVD-Verfahren hat außerdem das Potenzial, zur Herstellung mehrlagiger Schichtstrukturen zum Schutz gegen Hochtemperatur-Erosion und CMAS-Infiltration eingesetzt zu werden. CMAS (Ca-Mg-Al-Si-Oxid) ist ein Fremdstoff aus Sand und Vulkanasche, der sich ablagert und bei Temperaturen über 1250 °C in die Poren herkömmlicher TBC-Systeme eindringt und zu Destabilisierung und Versagen führt.

Vielversprechende Ergebnisse und Wirtschaftlichkeit

Neue Pulver und Anlagentechnik ermöglichen veränderte Beschichtungsmikrostrukturen, die zu einer niedrigeren Wärmeleitfähigkeit und höherer Robustheit führen. TBC-Beschichtungen mit einer typischen Porosität von 5 Vol.-% sind weniger wärmedämmend und neigen eher zum Sintern und Abplatzen als neue, hochreine Systeme mit einer Porosität von 10-15 Vol.-%. Versuche haben gezeigt, dass diese hochreinen Systeme bessere Sintereigenschaften aufweisen, weniger anfällig für strukturelle Veränderungen sind und eine höhere Temperaturwechselfestigkeit haben. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Beschichtung müssen folgende Kosten berücksichtigt werden:

- Beschichtungswerkstoffe
- Beschichtungssystem (Spritzbrenner)
- Wartung
- Personal
- Verbrauchskosten (Gas, Strom usw.)

Zwar sind neue TBC-Werkstoffe mit alternativen Oxiden der Seltenen Erden teurer als herkömmliche Werkstoffe, doch ein Großteil dieser Kosten wird durch verbesserte Beschichtungstechnologien kompensiert. Die Gesamtkosten der Beschichtung müssen gegen den zu erwartenden Nutzen in Form eines höheren

Turbinenwirkungsgrads, einer längeren Komponentenlebensdauer und geringerer Abgasemission abgewogen werden. Im Allgemeinen ist dieser Nutzen wesentlich größer als die zu erwartenden höheren Kosten.

Die Zukunft der TBC-Entwicklung bei Oerlikon Metco

Zu den neuen keramischen Werkstoffen gehören:

- Hochreine, auf Zirkonoxid basierende Werkstoffe für eine bessere Sinterbeständigkeit bei hohen Temperaturen
- low-k-Zusammensetzungen mit Pyrochloren, Perowskiten bzw. innovativen keramischen Zusammensetzungen mit oxid-Defektclustern
- für eine bessere Hochtemperatur-Wärmedämmung, Phasenstabilität und/oder CMAS-Beständigkeit
- EBC-Zusammensetzungen für den optimalen Schutz von CMC Strukturen

TBCs mit hoher Porosität und Schichtdicke erfordern neue Verfahren zur Herstellung agglomerierter und gesinterter Pulver. Zu den neuen Beschichtungsverfahren gehören:

- Cascading-Arc-Technologie für eine verkürzte Spritzdauer, gleichmäßigere Qualität und segmentierte, kolumnare Schichtstrukturen
- Modifizierte PVD-Verfahren für extrem dehnungstolerante Beschichtungen
- Eine weitere Maßnahme zur Optimierung der Leistungsfähigkeit ist die Entwicklung von mehrschichtigen TBC-Mikrostrukturen.

Zukünftige Entwicklungen

Oerlikon Metco wird weiterhin neue TBC-Systeme und Beschichtungstechnologien entwickeln. Zwei bedeutende Themen sind hierbei:

a) Durch APS aufgebrachte, segmentierte TBC-Beschichtungen

Neben der PS-PVD- und TriplexPro-210-Technologie will Oerlikon Metco dehnungstolerante, segmentierte Beschichtungsmikrostrukturen aus vorhandenen Produkten wie Metco 204F, Metco 204NSG, Metco 233B und neuen TBC-Zusammensetzungen entwickeln.

b) Barrierschichten für faserverstärkte Verbundkeramik

Eine neue Klasse von Hochtemperatur-Schutzschichten sind die sogenannten Environmental

Barrier Coatings (EBCs). Sie sollen zum Schutz leichter keramischer Faserverbundwerkstoffe (Ceramic Matrix Composites, CMCs) auf Siliziumbasis eingesetzt werden. Es ist davon auszugehen, dass CMCs Superlegierungen als Substratwerkstoffe ablösen werden, doch sie müssen gegen Wasserdampf geschützt werden. Die Fähigkeit von Oerlikon Metco, EBC-Zusammensetzungen mithilfe verschiedener Pulverherstellungsverfahren maßzuschneidern, ist entscheidend für den Erfolg dieser Anwendung. Das Ziel ist es, Turbinenherstellern genau jene Beschichtungseigenschaften zur Verfügung zu stellen, die sie benötigen.

Weitere Fortschritte in der Leistungsfähigkeit von Wärmedämmschichten werden durch neue keramische Werkstoffzusammensetzungen, neue mehrschichtige, funktionale Mikrostrukturen und neue Beschichtungsverfahren ermöglicht. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, setzt Oerlikon Metco auf ein starkes globales Lieferkettenmanagement und alternative Technologien zur Pulverherstellung. Mit einem Team aus erfahrenen Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern treibt Oerlikon Metco die Kommerzialisierung fortschrittlicher Werkstoffe und zukünftiger Beschichtungstechnologien voran.

Literaturhinweise

1. B. Lakshminarayana, Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery, (New York: John Wiley & Sons, 1995).
2. S. Paul, I.O. Golosnoy, A. Cipitria, T.W. Clyne, I. Xie, M.R. Dorfman: Effect of Heat treatment on Pore Architecture and associated Property Changes in Plasma Sprayed TBCs, Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, Hrsg. ASM International (2007): 411-416.

KONTAKT:

Oerlikon Metco AG, Wohlen

Rigackerstrasse 16, 5610 Wohlen
Switzerland

Tel.: +41 56 618 8161

Fax: +41 56 618 8101

www.oerlikon.com/metco

Our EBC coating systems maximize the performance of your CMC components.



The Simple Choice for a Perfect Surface

Get perfect EBCs with Oerlikon Metco's tailored materials and advanced application technology.

Maximize the benefits of gas turbine components manufactured from SiC-based CMCs (Ceramic Matrix Composites) with EBC (Environmental Barrier Coating) systems from Oerlikon Metco. Our materials are carefully tailored to ensure excellent thermal expansion matching to CMC substrates and optimized barrier protection against vapor and other environmental attack. Apply those materials using our very efficient cascading arc plasma spray technology for exceptionally repeatable and reliable results. It's an unbeatable combination.

With Oerlikon Metco, your choice is simple!



www.oerlikon.com/metco

oerlikon
metco