

Thermisches Spritzen im Triebwerksbau

S. Schneiderbanger und T. Cosack, München

1. Einleitung

Die Beschichtungen allgemein und thermisch gespritzte Schichten im besonderen nehmen im Triebwerksbau einen breiten Raum ein und spielen dort eine Schlüsselrolle. In Gasturbinen und hier besonders im Flugtriebwerk werden thermisch gespritzte Schichten mit so unterschiedlichen Funktionen zum Einsatz gebracht wie in keinem anderen Aggregat des allgemeinen Maschinenbaus. *Bild 1* zeigt die vielfältigen Funktionen von thermisch gespritzten Schichten im Triebwerk. Thermisch gespritzte Schichten sind in neuen Triebwerken enthalten und werden bei späteren Triebwerksüberholungen bzw. -reparaturen erneuert, so daß thermische Spritzverfahren bei der Triebwerksneuproduktion und bei der Triebwerksreparatur zum Einsatz kommen.

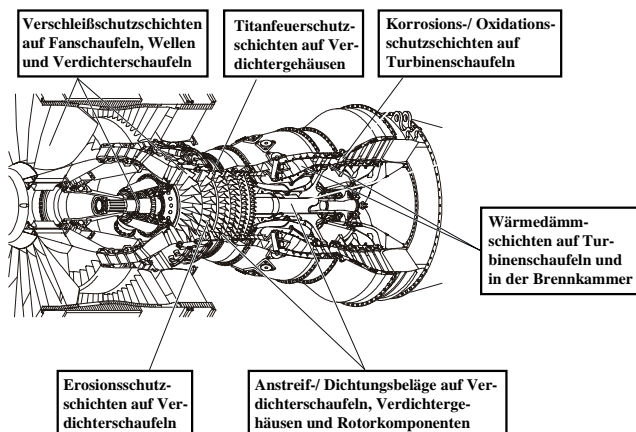


Bild 1. Triebwerksschnitt mit typischen Anwendungen thermisch gespritzter Schichten

Thermisch gespritzte Schichten übernehmen hier vielfältige Aufgaben. Einerseits werden durch thermisch gespritzte Schichten Verbesserungen bei der Effektivität bzw. beim Wirkungsgrad von Flugtriebwerken erreicht, andererseits haben sie wesentlichen Einfluß auf die Lebensdauer von Triebwerkskomponenten. So können die verschiedenen Spritzschichten nach ihrer lebensdauerverbessernden und wirkungsgradverbessernden Funktion im Triebwerk zugeordnet werden.

Lebensdauerverbessernd:

- Korrosions-/ Oxidationsschutzschichten
- Erosionsschutzschichten
- Verschleißschutzschichten
- Titanfeuerschutzschichten

Wirkungsgradverbessernd:

- Anstreif-/ Dichtungsbeläge
- Wärmedämmschichten

Darüber hinaus werden thermisch gespritzte Schichten für Masskorrekturzwecke eingesetzt. Im allgemeinen sind Triebwerksteile sehr kostenintensiv und können auf diese Weise nach Fertigungsfehlern oder bei Triebwerksüberholungen repariert werden. Dabei wird ein Qualitätsstandard erreicht, wie bei einem fehlerfrei gefertigten Bauteil [1, 2].

2. Thermische Spritzverfahren

Beim thermischen Spritzen werden Schichtwerkstoffe in schmelzflüssigem, teilerschmolzenem oder teigigem Zustand und mit relativ hoher kinetischer Energie auf zu beschichtende Oberflächen aufgebracht. Dabei werden die Oberflächen nicht aufgeschmolzen. Schichtwerkstoffe liegen in Pulver-, Draht- oder Stabform vor, die beim Durchgang durch ein erhitztes Gas in den thermisch und kinetisch höheren Energiezustand versetzt werden.

In EN657 sind die thermischen Spritzverfahren nach verwendeten Energieträgern zusammengefasst. Nachfolgend sind die Verfahren teilweise mit ihren Ausprägungen dargestellt:

- Flamspritzen
 - Pulverflamspritzen
 - Drahtflamspritzen
- Hochgeschwindigkeitsflamspritzen
- Detonationsspritzen
- Plasmaspritzen
 - Atmosphärisches Plasmaspritzen (APS)
 - Plasmaspritzen in Kammern (u.a. Vakuumplasmaspritzen)
 - Flüssigkeitsstabilisiertes Plasmaspritzen
- Lichtbogenspritzen
- Laserspritzen
- Schmelzbadspritzen

Das Flamspritzen und das Plasmaspritzen sind am weitesten im Triebwerksbau verbreitet. Das Hochgeschwindigkeitsflamspritzen nimmt an Bedeutung zu.

Exemplarisch wird nachfolgend nur das Plasmaspritzen dargestellt. In *Bild 2* ist der Querschnitt eines Plasmabrenners gezeigt. Durch das Zünden eines Lichtbogens zwischen Kathode und Anode wird ein Gas – zumeist Gemische aus Edelgas oder Stickstoff und Wasserstoff – in den Plasmazustand gebracht. Bei der Rekombination wird soviel Energie frei, dass beim Plasmaspritzen Temperaturen bis ca. 6500°C erreicht werden können. Die Schichtwerkstoffe, es können metallische und keramische Werkstoffe verwendet werden, werden pulverförmig dem Plasma-

strahl in der Düse oder auch ausserhalb der Düse zugegeben, dort erschmolzen und anschliessend mit hoher kinetischer Energie auf die Bauteiloberfläche aufgebracht.

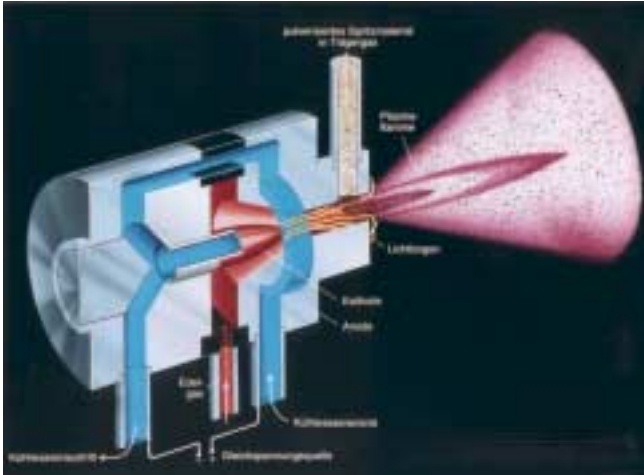


Bild 2. Plasmabrenner in Schnittdarstellung

3. Thermisch gespritzte Schichten

3.1 Korrosions-/ Oxidationsschutzschichten

Korrosions- und Oxidationsschutzschichten sind besonders im Heißteil eines Triebwerks gefordert. Hier sind es vor allen Dingen Brennkammern und Turbinenteile, die gegen Korrosions- und Oxidationsangriff geschützt werden müssen. Zu Beginn waren Co,NiCrAl-haltige Legierungen ausreichend. Heute jedoch werden MCrAlY-Legierungen (M=Ni und/ oder Co) zum Einsatz gebracht, wobei in zahlreichen Legierungsentwicklungen die Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit durch Zugabe weiterer Elemente wie Si, Re, Hf, Ta weiter verbessert werden konnte.

Die Korrosions- und Oxidationsschutzwirkung einer MCrAlY-Schicht ist durch die Bildung einer dünnen und dichten Al₂O₃-Auflage sichergestellt. Im Laufe der Zeit können die Al₂O₃-Auflagen allerdings abplatzen. MCrAlY-Schichten besitzen aber die Fähigkeit, sich durch Bildung einer neuen Al₂O₃-Auflage zu regenerieren. MCrAlY-Werkstoffe verlieren ab ca. 600°C Einsatztemperatur ihre Sprödigkeit und werden duktil. MCrAlY-Legierungen werden in Flugtriebwerken bis zu Temperaturen von ca. 1150°C erfolgreich eingesetzt.

MCrAlY-Schichten werden besonders erfolgreich mit dem Vakuumplasmaspritzen und in zunehmendem Maße mit dem Hochgeschwindigkeitsflamspritzen aufgebracht. Üblicherweise wird die Schichtanbindung durch eine Diffusionsglühbehandlung verbessert und das Schichtgefüge homogenisiert. Bild 3 zeigt das typische, zweiphasige MCrAlY-Gefüge nach dem Vakuumplasmaspritzen und nach dem Glühen. Die Schichtporosität liegt unter 2% und erfüllt u.a. damit

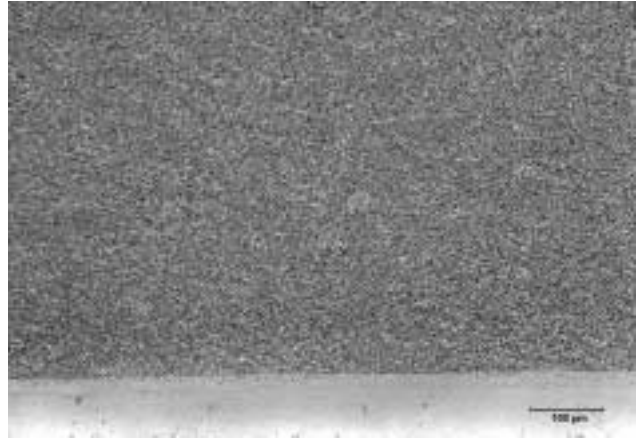


Bild 3. Gefüge einer vakuumplasmaspritzten MCrAlY-Schicht als Oxidations-/ Heißgaskorrosionsschutzschicht

die Voraussetzungen für den Oxidations- und Heißgaskorrosionsschutz.

In Einzelfällen werden MCrAlY-Schichten auch mit dem atmosphärischen Plasmaspritzverfahren aufgetragen. Mit anschließend aufgebracht Al-Diffusionsschichten kann dann die Schichtbeständigkeit verbessert werden.

In Brennkammern und Turbinen übernehmen MCrAlY-Schichten eine Doppelrolle als oxidations- und korrosionsbeständige Haftsichten für Zirkonoxid-Wärmedämmschichten. Zirkonoxidschichten sind bekanntermaßen nicht sauerstoffdicht, so daß das Bauteil selbst durch eine MCrAlY-Haftsicht vor Heißgaskorrosions- und Oxidationsangriff geschützt werden muß [3].

3.2 Erosionsschutzschichten

Erosionsschutzschichten sind dann notwendig, wenn erodierende Fremdpartikel einen Materialabtrag bewirken können. So müssen insbesondere Schaufelblattkonturen geschützt werden, wenn, z.B. angesaugte Fremdpartikel im Verdichter des Triebwerkes Erosionsschäden verursachen können.

Am gebräuchlichsten sind hier Hartmetallschichten (WC/Co) auf Verdichterschaufeln, die mit dem Detonationsspritzen (D-Gun) auf Ti-Basis-Schaufeln aufgebracht wurden. Andere thermisch gespritzte Erosionsschutzschichten waren nicht so erfolgreich.

3.3 Verschleisschutzschichten

Thermisch gespritzte Verschleisschutzschichten haben auch im Triebwerksbau und bei der Triebwerkstandsetzung ein breites Anwendungsspektrum. Verschleisschutz ist immer dann notwendig, wenn eine Relativbewegung zwischen zwei Komponenten stattfindet, so z. B. zwischen Rotor- und Statorteilen, bei schwingender Reibbewegung oder schlagend und stossender Beanspruchung.

Weit verbreitet ist die Verwendung von Hartmetallschichten (WC/Co), die mit dem Detonationsspritzen, Hochgeschwindigkeitsflammspritzen und atmosphärischen Plasmaspritzen aufgebracht werden können, besonders bei Verschleissproblemen an Ti-Basis-Bauteilen im Verdichter. Klassisches Beispiel war über lange Zeit die Beschichtung auf den Abstütznocken der Fanschaufeln, inzwischen werden die Fanschaufeln ohne Abstütznocken eingesetzt. WC/Co-Schichten werden ansonsten auf Wellen aufgespritzt, wenn ein harter Verschleisschutz auf der Welle mit einem weichen Gegenbelag auf dem Statorteil kombiniert wird. *Bild 4* zeigt das Gefüge eines WC/Co-Belages, der im atmosphärischen Plasmaspritzverfahren aufgebracht wurde. Bei Temperaturen über 600°C kommen Cr₂C₃- oder NiCr-Schichten als plasmagespritzte Verschleißschutzvarianten zum Einsatz.

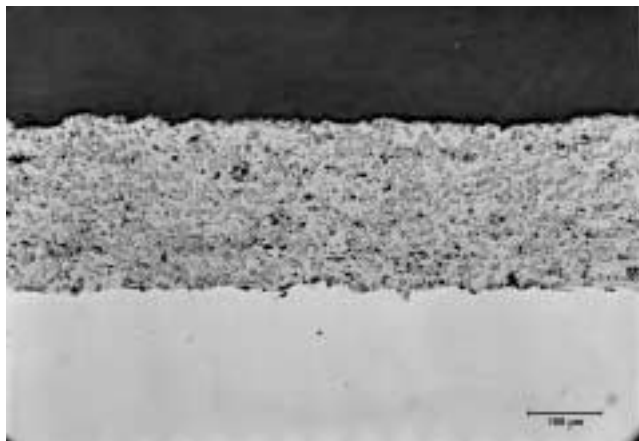


Bild 4. Gefüge einer plasmagespritzten Hartmetallschicht (WC/Co) als Verschleißschutzschicht

Verschleißprobleme am Übergang Verdichterschauelfuss/ Verdichterscheibe müssen mit weichen Belägen auf CuNiIn-Basis bewältigt werden. Bei Verwendung von Ti-Basis-Werkstoffen kommt es zu typischen Verschleisserscheinungen mit Materialabtrag und Materialermüdung. Mit plasmagespritzten CuNiIn-Schichten auf Schauelfüssen findet eine "weiche" Trennung statt, so dass ein Verkippen und damit eine Relativbewegung zwischen Schauelfuss und Scheibennut ohne Verschleisserscheinungen ermöglicht wird. *Bild 5* zeigt den beschichteten Bereich am Schauelfuss einer Ti-Basis-Verdichterschaufel [4].

3.4 Titanfeuerschutzschichten

Verdichter in modernen Triebwerken werden aus Gewichtsgründen aus Titan-Basis-Werkstoffen gefertigt und gleichzeitig werden die Betriebsdrücke und -temperaturen im Verdichter erhöht. Ab einem bestimmten Druck und einer bestimmten Temperatur besteht die Gefahr des Titanfeuers, was im Einzelfall den Totalverlust des Triebwerkes bedeuten kann. Durch den Einsatz von plasmagespritzten Keramikschichten kann entstandenes Titanfeuer, was insbesondere durch Anstreichvorgänge zwischen Schauelfspitze und Gehäuse entstehen kann, eingegrenzt wer-

den. Inerte Keramikschichten haben sich hier am besten bewährt [5].

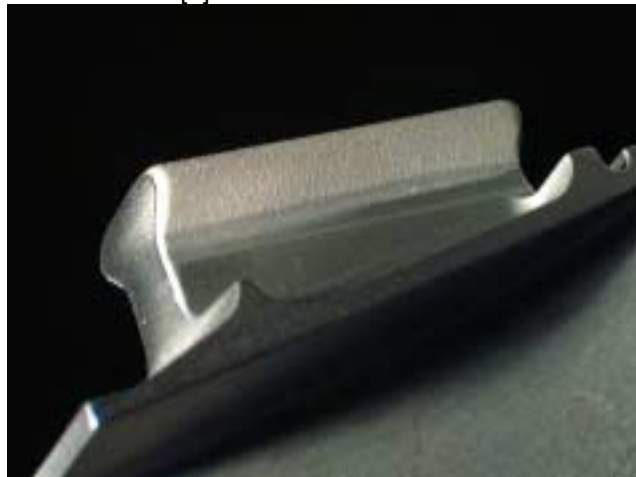


Bild 5. Plasmagespritzte CuNiIn-Schicht als verschleißmindernde Schicht auf dem Fuss einer Verdichterschaufel

3.5 Anstreich-/ Dichtungsbeläge

Unterschiedliche Druckniveaus im Triebwerk erfordern besondere Abdichtungsmaßnahmen zwischen rotierenden und stehenden Triebwerksteilen. Hier bieten sich mit thermisch gespritzte Schichten einige Lösungsmöglichkeiten an, um wirkungsgradverschlechternde Leckagen zu reduzieren.

Anstreichbeläge stellen eine besondere Form zur Lösung von Dichtungsproblemen zwischen rotierender und stehender Beschauelung bzw. stehendem Gehäuse dar. In *Bild 6* ist die Wirkungsweise von Anstreichbelägen dargestellt. Im Triebwerksgehäuse befinden sich weiche Einlaufbeläge, die bei Kontakt mit rotierenden Elementen abgerieben werden können. Plasma- und flammgespritzte Nickel-Graphit-Einlaufbeläge haben sich im Verdichter besonders bewährt (*Bild 7*). Die Schauelfspitze darf dabei keinen

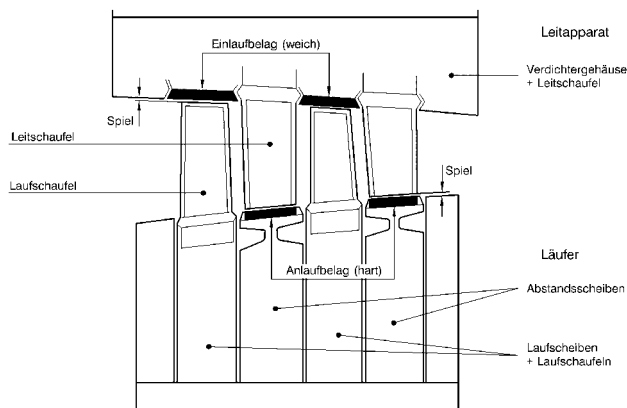


Bild 6. Einlaufbeläge (weich) im Gehäuse und Anlaufbeläge (hart) auf dem Läufer/ Rotor

Materialabtrag erfahren und wird oft mit einem harten Anlaufbelag gegen Materialabtrag und damit gegen Verschleiss geschützt. Aber auch der Rotor, der gegen die Leitschaufelinnendeckbänder anlaufen kann, wird oft mit Aluminiumoxid als Anlaufbelag geschützt (*Bild 8*).

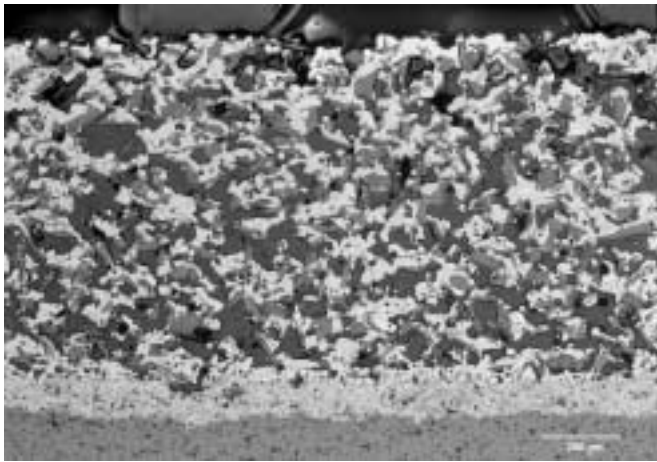


Bild 7. Gefüge eines plasmagespritzten Nickel-Graphit-Einlaufbelages (weich!)



Bild 8. Plasmagespritztes Aluminiumoxid als Anlaufbelag auf einem Verdichterrotor

Labyrinthdichtungen mit Dichtungsstegen an rotierenden Wellenteilen sind im Triebwerksbau sehr verbreitet. Ähnlich wie bei Anstreifbelägen ist einer harten Schicht auf rotierenden Dichtungsstegen ein weicher Gegenpart gegenübergestellt. Besonders geeignet ist Aluminiumoxid, das auf Wellendichtlippen, wie in *Bild 9* dargestellt, aufgespritzt wird, während das Gehäuse mit aufgelöteten Honigwabenstrukturen die Gegenfunktion übernimmt [6, 7].

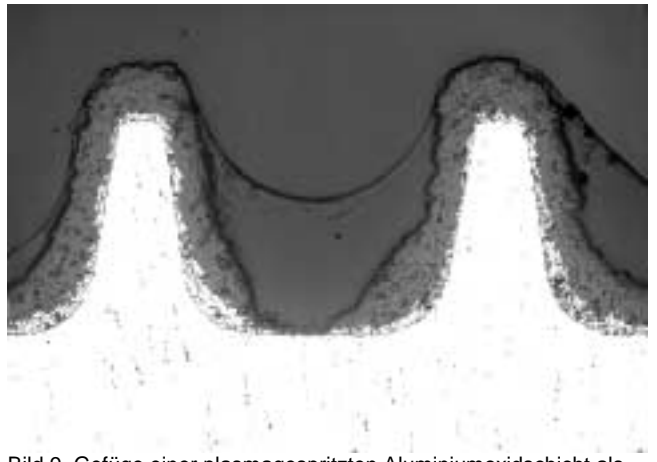


Bild 9. Gefüge einer plasmagespritzten Aluminiumoxidschicht als Dichtungsbelag auf Rotordichtlippen

3.6 Wärmedämmschichten

Moderne Flugtriebwerkskonstruktionen enthalten fast immer Wärmedämmschichten im Heisteil wie Brennkammer und Turbine. So wird plasmagespritztes Zirkonoxid mit Yttriumoxidteilstabilisierung als Wärmedämmschicht hauptsächlich auf Hochdruckturbinenschaufeln und auf Brennkammerteilen eingesetzt. Wärmedämmschichten werden unter nachfolgend genannten wirtschaftlich-technologischen Aspekten zum Einsatz gebracht:

- Höhere Turbineneintrittstemperaturen bewirken einen höheren thermischen Wirkungsgrad
- Ein verringerter Turbinenkühlluftbedarf bedeutet einen höheren Verdichterwirkungsgrad
- Niedrige Temperaturen an den metallischen Turbinenteilen führen zu längeren Lebensdauern von Turbinenteilen

Üblicherweise wird auf eine oxidations-/ korrosionsbeständige MCrAlY-Haftschrift, die im Vakuumplasmaspritzverfahren aufgebracht wird, eine Zirkonoxid-schicht aufgespritzt. In *Bild 10* ist das typische Gefüge

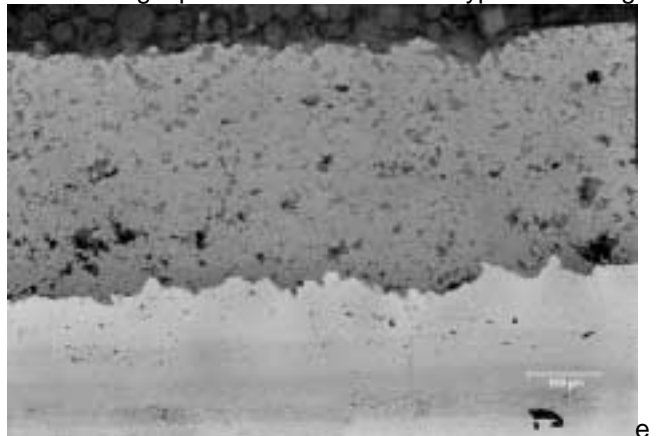


Bild 10. Gefüge eines plasmagespritzten Wärmedämmschichtverbundes mit Grundwerkstoff, Haftschrift und Zirkonoxid-deckschicht, Yttriumoxid-teilstabilisiert

ines plasmagespritzten Wärmedämmschichtverbundes mit Grundwerkstoff, Haftschrift und Zirkonoxid-deckschicht dargestellt. *Bild 11* zeigt ein Turbinenleit-

segment mit einer Wärmedämmschicht auf dem Deckband [8, 9, 10].



Bild 11. Turbinenleitsegment mit plasmagespritzter Wärmedämmschicht auf dem Deckband

4. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe des thermischen Spritzens Funktionsschichten vielfältiger Art auf Flugtriebwerkskomponenten aufgebracht werden können. Effizienzsteigerungen und Lebensdauerverbesserungen in Triebwerken sind ohne Beschichtungen und hier besonders durch thermisch gespritzte Schichten undenkbar. Darin liegt begründet, dass das thermische Spritzen im Triebwerksbau einen breiten Raum einnimmt und dort besonders zur Anwendung kommt. Aus Umwelt- und Kostengründen werden zunehmend bisher galvanisch aufgebraute Verschleißschutz- und Maßkorrekturschichten durch thermische Spritzschichten ersetzt.

Kostendruck, auch bei den Spritzverfahren, führt dazu, dass anstelle teurerer Spritztechniken, wie Niederdruckplasmaspritzen billigere Verfahren wie Hochgeschwindigkeitsflammspritzen oder atmosphärisches Plasmaspritzen mit anschließender Alitierung verwendet werden. Voraussetzung hierfür sind gleichwertige Schichteigenschaften.

5. Verwendete Literatur

- [1] Simon, H. und M. Thoma: Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe, Carl Hanser Verlag, 1985
- [2] Adam, P.: Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken, Birkhäuser Verlag, 1998
- [3] Peichl, L. und D.F. Bettridge: Overlay and Diffusion Coatings for Aero Gas Turbines, proceedings of the conference Materials for Advanced Power Engineering, Liege 1994, S. 717 - 740 (Part I)
- [4] Heinzlmaier, C. und K.K. Schweitzer: WCCO-Schutzschichten zur Anwendung bei Hammer Schlagverschleiß im Triebwerksbau, TS90, DVS-Berichte 130, Essen 1990, S. 51 – 54
- [5] Uihlein, T. und H. Schlegel: Titanium Fire in Jet Engines, 88th symp. of the propulsion and energetics panel on aircraft fire safety (AGARD-CP), Dresden 1996, S. 25/ 1 – 12
- [6] Söhngen, J.: Wärmestromverteilung beim Anstreifen von Turbinenschaufeln und deren Einfluß auf das Verschleißverhalten hochtemperaturbeständiger Dichtungssysteme für Fluggasturbinen, Dissertation TH Darmstadt, 1987
- [7] Schweitzer, K.K. und T. Uihlein: Beschichtungen für abrasive Belastungen im Verdichter von Flugasturbinen, Symp. Leistungssteigerung von Wehrmaterial durch Beschichten von Werkstoffen, Erding 1998
- [8] Cosack, T. und W. Hinreiner: Volumenverminderung an plasmagespritzten Wärmedämmschichten aufgrund von Sintervorgängen in teilstabilisiertem Zirkonoxid, TS93, DVS-Berichte 152, Aachen 1993, S. 123 – 126
- [9] Adam, P. und T. Cosack: Thermal Barrier Coatings - Their Functional Benefits, Problems and Improvements in Manufacturing and Quality, European Propulsion Forum, London 1993, S. 13/ 1 – 8
- [10] Cosack, T. und E. Bayer: Weiterentwickelte Gebrauchseigenschaften an Wärmedämmschichten, UTSC 99, Tagungsband ISBN 3-87155-653-X, Düsseldorf 1999, S. 542 – 545