



Doctoral Thesis

## New high temperature abrasives for gas turbines

**Author(s):**

Schmid, Richard Karl

**Publication Date:**

1997

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001809249> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**Diss. ETH ex. B**  
Diss. ETH No. 12223

**NEW HIGH TEMPERATURE ABRADABLES FOR GAS  
TURBINES**

A dissertation submitted to the  
**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH**

for the degree of  
**Doctor of Technical Sciences**

Presented by  
**Richard Karl Schmid**  
Bachelor of Science in Engineering in the Branch of Metallurgy  
born 2 May 1962  
citizen of Adliswil, Zurich

Accepted on the recommendation of  
Prof. Ludwig J. Gauckler, examiner  
Prof. Eduard H. Freitag, co-examiner (supervisor)

1997



CatE



## NEW HIGH TEMPERATURE ABRADABLES FOR GAS TURBINES

### SUMMARY

Increasing the efficiency of aero and land based gas turbines is a high priority of engine manufacturers, because fuel costs and environmental pollution are reduced whilst aircraft can carry higher payloads. In the competitive power generating and airline business a fuel saving of 1 % can substantially increase profits.

Reducing the gap between the blade tip and shroud is one of the few design measures left whereby the efficiency of gas turbines can be increased. The efficiency gain due to tip gap clearance reduction generally is in the order of 1 to 5% as compared with general praxis. The gap cannot be reduced to zero by mechanical design alone, due to general manufacturing tolerances, and because of casing distortion and shroud movement relative to the rotor in service. A means of achieving the smallest possible clearance is to allow the blade to machine a path into the shroud either as a running in procedure or during unpredictable in flight casing to rotor movement. The shroud inner lining is specially designed to accommodate this incursion and is termed an abradable. The tip shroud system is referred to as an abradable seal.

Abradable materials are applied already throughout the gas turbine thereby covering a large temperature and blade tip velocity range. The most successful materials are to be found in low and intermediate pressure compressors, where temperatures are relatively low. As the gas temperature increases, ever fewer materials are capable of surviving the environment thereby strongly reducing the range of materials available for selection. Today, for temperatures above 500°C, abrasive tipping of blade tips is required if no blade wear is to take place.

The aim of this work was to increase the knowledge of the mechanisms responsible for the wear in abradable seals of engines, and to use the insight gained for improving the abradability of gas path seals operated at temperatures above 450°C. For this purpose a testing facility capable of reproducing seal wear mechanisms observed in engines was constructed, and a complete range of conventional and new abradable seals were examined. Wear maps were used to interpret the results. Based on this investigation, a model for abradability at temperatures above 450°C was devised and verified.

The abradable testing apparatus was capable of controlling the following parameters:

blade tip velocity: 150 to 500 m/s  
incursion rate: 2 to 3000  $\mu\text{m/s}$   
shroud surface temperature: ambient to 1200°C

Thermal spraying processes were exclusively used for the manufacture of abradable specimens. Blade tipping techniques ranging from thermal spraying to laser cladding and electro plating particle entrapment were applied.

It was observed that if continuous sliding of the blade tip over the shroud specimen was allowed to take place, melting wear of the tip immediately became the predominant mechanism. Only against selected aluminium and polymer based materials did blade tips suffer no wear. For higher temperatures (above 450°C), other mechanisms had to be looked for. It was found that brittle fracture of the shroud surface zone resulted in the lowest increase in blade tip temperature and thus was the best means of attaining high temperature abradability.

The suggested abrasible model is based on the use of a release agent encapsulating the individual particles making up the matrix. The release agent is to function as a dislocator reducing the forces required for the expulsion of particles. A polymer phase is co-deposited with the dual purpose of reducing coating stresses and, when burnt out, providing crack sources for particle release. The matrix material must be oxidation and corrosion resistant enough for the hottest engine stage in which it will be utilised. In the event of an incursion, the matrix material must break-out and not deform plastically. The tip must be stiff and designed in a manner conducive to the release of wear debris.

New materials, based on the model, were manufactured. These covered the entire engine range with matrices composed of aluminium, MCrAlY and yttrium stabilised zirconia. Their behaviour verified the model in that they abraded in a manner superior to conventional materials. The results also showed that blade tipping was essential when using ceramic thermal barriers as abrasibles.

Tests indicated that the majority of abrasible debris was released to the rear of the blade. Hence, the tip should be thinner than 0,7 mm, or contain particles standing proud with valleys to take up debris. The break-out of spray particles was found to be strongly dependent on blade-tip velocity and tip stiffness. For brittle systems, the abrasibility increased strongly with increasing velocity. This phenomenon has a lot in common with erosion although the velocity effect is more pronounced than in erosion. The reason for this is thought to lie in the fault structure of thermal spray coatings.

For systems with potentially ductile matrices, the appearance of the wear surface was influenced by a range of competing wear mechanisms. Microrupture was favoured by high incursion rates. Under different conditions, heating of the shroud can result in melting wear, which is thought to occur through a combination of adiabatic heating due to plastic deformation and heat released due to sliding. The heating of the coating due to sliding was also a function of the rubbing frequency and the bite per blade. Situations arose where the molten layer produced by a blade was removed by the following blade thereby maintaining low shroud temperatures.

Due to the large number of tests conducted, on a very wide range of material combinations, a wealth of observations and knowledge is presented. This is consolidated in the model which serves as a basis for the design of future abrasible seals.

## NEUE HOCHTEMPERATUR- ANSTREIFSCHICHTEN FÜR GASTURBINEN

### ZUSAMMENFASSUNG

Triebwerkhersteller haben allergrösstes Interesse daran, den Wirkungsgrad von Flug- und stationären Gasturbinen zu steigern, weil so einerseits Treibstoffverbrauch und Luftverschmutzung reduziert werden können und andererseits die Fracht erhöht werden kann. Im harten Wettbewerb im Energiegewinnungs- und Luftfahrtssektor bedeutet bereits eine Treibstoffeinsparung von 1% eine substantielle Verbesserung.

Das Potential, das in erhöhten Betriebstemperaturen, aerodynamischem Design und leichteren Werkstoffen lag, wurde hierbei nahezu ausgeschöpft. Durch kleinere Dichtspalte zwischen den Turbinenschaufeln und dem Triebwerkgehäuse lässt sich der Wirkungsgrad nochmals um bis zu 5% erhöhen. Aufgrund von Herstellungstoleranzen, Verformungen und Relativbewegungen zwischen Gehäuse und dem laufenden Rotor kann der Dichtspalt nicht allein durch Konstruktionsänderungen auf Null reduziert werden. Ein möglicher Weg, dies zu erreichen, liegt in der Verwendung abreibbarer Dichtungsbeläge, die den rotierenden Schaufelspitzen erlauben, präzise eine Spur ins Gehäuse einzugraben. Das Gehäuseinnere wird zu diesem Zweck mit sogenannten Anstreifschichten - englisch "Abradables" - ausgekleidet. Das ganze Anstreifsystem ist im Englischen bekannt als "abradable seal".

Anstreifbeläge werden bereits in Gasturbinen eingesetzt, wo sie über einen grossen Bereich verschiedener Temperaturen und Schaufelspitzen-Geschwindigkeiten beständig sein müssen. Am besten funktionieren sie in Nieder- und Mitteldruckkompressoren, da in diesen die Temperaturen verhältnismässig niedrig sind. Je höher die Temperatur ist, umso geringer wird die Auswahl der Materialien, die diesen Bedingungen standhalten. Deshalb wird heute bei Temperaturen über 500°C zur Vermeidung von Schaufelverschleiss die Schaufelspitze gepanzert.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, die Kenntnisse der für den Verschleiss in Anstreifsystemen verantwortlichen Mechanismen zu verbessern. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfstand gebaut, der die an den Triebwerken beobachteten Verschleissvorgänge verlässlich zu reproduzieren vermag. Dadurch gelang es, Hochtemperatur-Anstreifvorgänge zu untersuchen und diese Erkenntnisse in einem zweiten Schritt dazu zu nutzen, neue Hochtemperatur-Anstreifschichten zu entwickeln. Es wurde eine umfassende Zusammenstellung von herkömmlichen und neuen Anstreifsystemen untersucht. Zur Interpretation der Resultate wurden Verschleisskarten - englisch "wear maps" - eingesetzt. Anhand der Ergebnisse wurde ein Modell für Anstreifbeläge über 450°C erarbeitet und verifiziert.

Mit dem Anstreif-Prüfstand konnten folgende Parameter kontrolliert beziehungsweise variiert werden:

|  |                              |
|--|------------------------------|
| Geschwindigkeit der Schaufelspitze:        | 150 - 500 m/s                |
| Radiale Zustellung:                        | 2 - 3000 $\mu$ m/s           |
| Oberflächentemperatur der Anstreifschicht: | Umgebungstemperatur - 1200°C |

Zur Auftragung der Anstreifschichten wurden ausschliesslich thermische Spritzprozesse verwendet. Der Schutz der Schaufelspitzen erfolgte sowohl mittels thermischer und Laser-Spritzverfahren als auch durch galvanisches Einbetten von Abrasivpartikeln.

Die Untersuchungen zeigten, dass bei kontinuierlichem Gleiten der Schaufelspitze über die Anstreifprobe Schmelzverschleiss der Schaufelspitze als vorherrschender Verschleissmechanismus auftritt. Nur bei ausgewählten, mit Kunststoff versetzten

Aluminiumschichten erlitten die Schaufelspitzen beim Kontakt mit der Anstreifprobe keinen Verschleiss. Bei höheren Temperaturen (ab 450°C) musste nach anderen Mechanismen geforscht werden. Es stellte sich heraus, dass ein sprödes Auseinanderbrechen der Oberflächenzone mit dem kleinsten Anstieg der Schaufelspitzen-Temperatur einhergeht und deshalb die geeignetste Methode zur Realisierung einer guten Einlauffähigkeit bei hohen Temperaturen darstellt.

Das vorgeschlagene "Abradable"-Modell basiert auf der Verwendung eines Trennmittels, welches die einzelnen Partikel der Matrix umhüllt. Das Trennmittel agiert dabei als Sollbruchstelle und vermindert damit die für den Ausbruch der Partikel benötigte Energie. Gleichzeitig wird ein Polymerzusatz appliziert, der einerseits die Spannung der Beschichtung senkt und andererseits, nachdem er ausgebrannt ist, eine grössere freie Fläche um die Metallpartikel herum hinterlässt, die sich damit ebenfalls mit weniger Energie aus der Schicht herauslösen lassen. Das Matrixmaterial muss genügend oxidations- und korrosionsbeständig sein, um bei den Betriebstemperaturen der heissesten Motorenstufe eingesetzt werden zu können. Beim Anstreifen muss das Matrixmaterial ausbrechen und darf sich nicht plastisch verformen. Die Schaufelspitze muss steif und in einer Weise konstruiert sein, welche die Freisetzung von Verschleisspartikeln ermöglicht.

Basierend auf den Erkenntnissen dieses Modells wurden neue Schichten entwickelt. Diese decken den gesamten Motorenbereich ab und wurden aus Aluminium-, MCrAlY- und Yttrium-stabilisierten Zirkonoxid-Matrizen hergestellt. Ihr Anstreifverhalten, welches wesentlich besser war als das herkömmlicher Materialien, bestätigte das Modell. Die Ergebnisse zeigten ebenfalls, dass eine Panzerung der Schaufelspitzen notwendig ist, sobald keramische thermische Dämmschichten als Anstreifschichten verwendet werden.

Die Untersuchungen ergaben, dass die grösste Menge an abgeriebenem Material hinter der Schaufel freigesetzt wird. Deshalb muss die Schaufelspitze dünner als 0,7mm sein, oder sie muss Vertiefungen aufweisen, welche die Verschleisspartikel aufnehmen können. Das Ausbrechen von einzelnen Spritzpartikeln wurde in grossem Masse durch die Schaufelspitzen-Geschwindigkeit und -Steifigkeit beeinflusst. Die Anstreifbarkeit der Sprödsysteme verbesserte sich mit Zunahme der Geschwindigkeit. Dieses Phänomen zeigt viele Gemeinsamkeiten mit Erosionsvorgängen, obwohl bei Anstreifschichten der Einfluss der Geschwindigkeit noch ausgeprägter ist. Der Grund hierfür scheint im Aufbau von thermischen Spritzschichten zu liegen.

In Systemen mit verformbaren Matrizes wird das Erscheinungsbild der Verschleissoberfläche durch sich konkurrenzierende Verschleissmechanismen geprägt. Das Ausbrechen von kleineren Schichtteilen wurde durch hohe Eindringgeschwindigkeiten begünstigt. Das Erhitzen der Anstreifschicht kann zum Schmelzverschleiss führen; die daran beteiligten Mechanismen scheinen eine Kombination aus adiabatischer Erwärmung aufgrund plastischer Verformung und Reibwärme zu sein. Die Reibwärme ihrerseits ist eine Funktion des Schaufelvorschubes und der Schaufelfrequenz. Es gibt Situationen, in denen die durch eine Schaufel erzeugte geschmolzene Oberflächenschicht durch die folgende Schaufel entfernt wird. Dadurch bleibt eine tiefe Schichttemperatur bestehen.

Aufgrund von zahlreichen Anstreifversuchen, die mit einer breiten Palette von unterschiedlichen Werkstoffkombinationen durchgeführt wurden, können in der vorliegenden Arbeit umfangreiche Beobachtungen und daraus gewonnene Erkenntnisse präsentiert werden. Darauf basierend wurde ein Modell erarbeitet, welches als Grundlage für das zukünftige Design von Anstreifschichten dient.