



Rolls-Royce

CO₂ Einsparung durch Faserkeramik-Einsatz im Flugtriebwerk

Miklós Gerendás

Faserkeramik-Kolloquium 2009
3. November 2009, Köln

© 2009 Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

The information in this document is the property of Rolls-Royce and may not be copied or communicated to a third party, or used for any purpose other than that for which it is supplied without the express written consent of Rolls-Royce.
This information is given in good faith based upon the latest information available to Rolls-Royce, no warranty or representation is given concerning such information, which must not be taken as establishing any contractual or other commitment binding upon Rolls-Royce or any of its subsidiary or associated companies.

Gliederung

2

- Wie kann man CO₂ im Flugtriebwerk einsparen?
- Vorteile der Faserkeramik
- Schutzschichten

- Triebwerk im Längsschnitt

- Faserkeramik
 - In der Brennkammer
 - In der Turbine
 - Im Abgastrakt

- Schlussfolgerungen

DLR Faserkeramik-Kolloquium



Wie kann man CO₂ einsparen?

3

- Bedeutet direkt Kraftstoffeinsparung:
Aus einem Kilogramm Kerosin entstehen 3,16kg CO₂ und 1,29kg H₂O!
- Effizientere Prozesse:
 - Größeres Nebenstrom-Verhältnis -> besserer Vortriebswirkungsgrad
 - Effizienteres Kerntriebwerk
 - Durch Steigerung der Komponentenwirkungsgrade
 - Durch höheres Gesamtdruckverhältnis, dadurch höhere Verdichteraustrittstemperatur als Kühlluftniveau für Brennkammer und Turbine.
- Weniger Gesamtgewicht (Flugzeug mit Triebwerk):
 - Benötigt weniger Auftrieb
 - Entsprechender Flügel erzeugt weniger induzierten Widerstand
 - Also weniger Schub erforderlich
 - Führt zu weniger Verbrauch.

DLR Faserkeramik-Kolloquium

Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

Vorteile der Faserkeramik

4

Matereialeigenschaften

SiC/SiC CMC mit EBC:

- Erlaubte Temperaturen:
SiC/SiC heute 1200°C, zukünftig 1315°C
EBC heute 1350°C, zukünftig 1550°C
- Dichte 3 g/cc (5 g/cc)
- WAK 4,5 ppm/K (7 ppm/K)
- WLF 11 W/mK (1 W/mK)

Oxid/oxid CMC mit HASSMAP plus EBC:

- Erlaubte Temperaturen:
Ox/Ox CMC: 1100-1200°C
HASSMAP 1300°C, modifiziert 1550°C
EBC heute 1400°C, zukünftig 1600°C
- Dichte 2,5 g/cc (1,8 bzw. 5 g/cc)
- WAK 6,5 ppm/K (6,5 bzw. 7 ppm/K)
- WLF 2,5 W/mK (1,5 bzw. 1 W/mK)

Metal mit keramischer WDS:

- Erlaubte Temperaturen:
Polykristallin 900°C-1050°C
Einkristall-Bauteile bis 1175°C
TBC: heute 1200°C, bald >1450°C
- Dichte 8 g/cc (5 g/cc)
- WAK 16 ppm/K (7 ppm/K)
- WLF 15-20 W/mK (1 W/mK)

Wert für Beschichtungen in Klammern
HASSMAP Isolatorschicht aus keramischen Hohlkugeln
EBC Korrosionsschutzschicht
WAK Wärmeausdehnungskoeffizient
WDS Wärmedämmschicht
WLF Wärmeleitfähigkeit

Weitere Daten finden sich in
ASME GT2007-27532 und GT2008-51379

DLR Faserkeramik-Kolloquium

Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

Vorteile der Faserkeramik

5

Materialeigenschaften

SiC/SiC CMC mit EBC:

- Erlaubte Temperaturen:
 - SiC/SiC heute 1200°C, zukünftig 1315°C
 - EBC heute 1350°C, zukünftig 1550°C
- Dichte 3 g/cc (5 g/cc)
- WAK 4,5 ppm/K (7 ppm/K)
- WLF 11 W/mK (1 W/mK)

Oxid/oxid CMC mit HASSMAP plus EBC:

- Erlaubte Temperaturen:
 - Ox/Ox CMC: 1100-1200°C
 - HASSMAP 1300°C, modifiziert 1550°C
 - EBC heute 1400°C, zukünftig 1600°C
- Dichte 2,5 g/cc (1,8 bzw. 5 g/cc)
- WAK 6,5 ppm/K (6,7 bzw. 7 ppm/K)
- WLF 2,5 W/mK (1,5 bzw. 1 W/mK)

Metal mit keramischer WDS:

- Erlaubte Temperaturen:
 - Polykristallin 900°C-1050°C
 - Einkristall-Bauteile bis 1175°C
 - TBC: heute 1200°C, bald >1450°C
- Dichte 8 g/cc (5 g/cc)
- WAK 16 ppm/K (7 ppm/K)
- WLF 15-20 W/mK (1 W/mK)

Wert für Beschichtungen in Klammern
 HASSMAP Isolatorschicht aus keramischen Hohlkugeln
 EBC Korrosionsschutzschicht
 WAK Wärmeausdehnungskoeffizient
 WDS Wärmedämmschicht
 WLF Wärmeleitfähigkeit

Vorteil Nachteil Gleichstand Je nach dem
 Weitere Daten finden sich in
 ASME GT2007-27532 und GT2008-51379

DLR Faserkeramik-Kolloquium

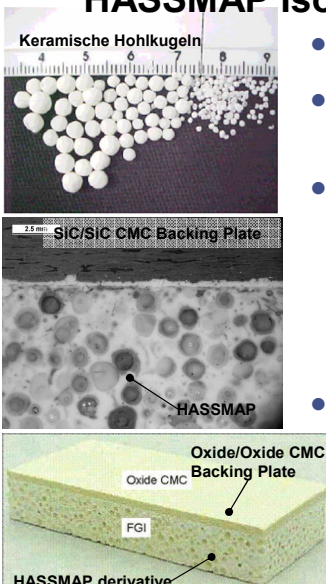
Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

HASSMAP Isolator Schicht (EP0751104, US5780146)

6



- Hollow Alumina Silicate Spheres in a Matrix of Aluminium Phosphate.
- HASSMAP kann in Dicken von ca. 1,0 mm bis über 10,0 mm hergestellt werden.
- Materialien:
 - Matrix:
 - Bevorzugt: Aluminiumoxid oder Mullit
 - Phosphate bzw. Silikate gehen im Betrieb verloren.
 - Hohlkugeln:
 - Bevorzugt: Aluminiumoxid, Mullit oder Zirkonoxid
- Eigenschaften:
 - Gute Einlaufeigenschaften (Sulzer Innotec Prüfstand)
 - Kontrollierte Porosität 50-60 Vol.%
 - Kontrollierter Wärmeausdehnungskoeffizient 6.7ppm/K @ 1000 °C
 - Kontrollierte Wärmeleitfähigkeit 1.22 W/mK
 - Thermisch stabil bis zu 1600°C

DLR Faserkeramik-Kolloquium

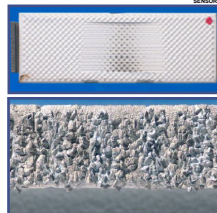
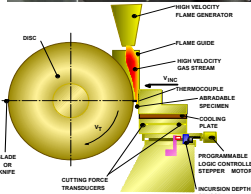
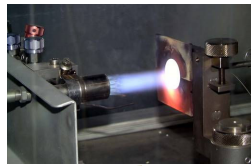
Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

Validierung von Schutzschichten

7



- Beide Systeme (SiC und Oxid) benötigen Schutzschichten (EBCs) gegen Wasserdampfkorrosion (7% Partialdruck im Arbeitsmedium).
- Oxidische CMC scheint eine Strömungsgeschwindigkeit zum Materialabtrag zu benötigen, bei SiC/SiC scheint eine ruhende Atmosphäre zu genügen.
- Auf den Turbinendichtsegmenten muss die oberste dieser Schichten auch als Anstreifbelag dienen.
- Brennkammer-WDS und Turbinen-Anstreifbeläge werde meist per Plasmaspritzen aufgetragen.
- Validierung:
 - Zyklischer Brenner Test, siehe Bild (FZ Jülich)
 - Anstreif-Prüfstand bei Sulzer Innotech (siehe Bilder).
- Der Korrosionsschutz muss nach 0,5mm Abrieb noch gegeben sein.
- Eine Wasserdampfkorrosion von 0,1mm wirkt sich bei einem Dichtsystem schon merklich auf den Wirkungsgrad & CO₂ Ausstoß aus.

DLR Faserkeramik-Kolloquium

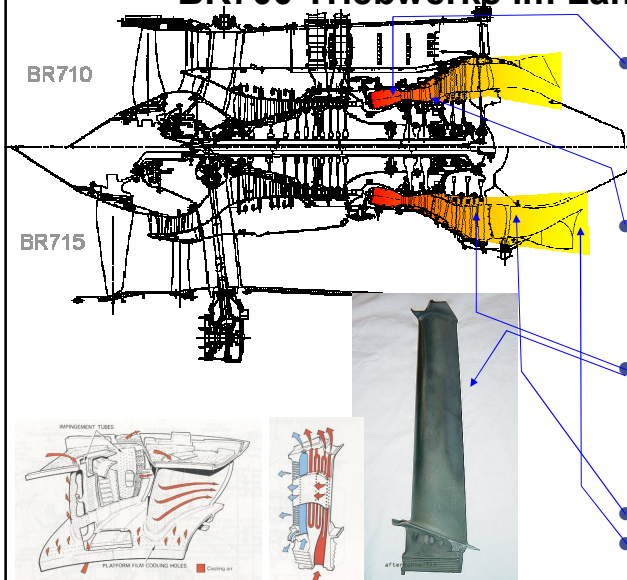
Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

BR700 Triebwerke im Längsschnitt

8



- Brennkammer:
 - Vollring, selbsttragend
 - Vollring, Metalltragstruktur
 - Schindeln auf Metalltragstruktur
- Hochdruckturbine:
 - Leitschaufeln
 - Laufschaufeln
 - Dichtsegmente
- Niederdruckturbine:
 - Leitschaufeln
 - Laufschaufeln
 - Dichtsegmente
- Tragstrukturen, Gehäuse
- Abgasführung

DLR Faserkeramik-Kolloquium

Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

Faserkeramik in der Brennkammer

9



HTDU5 Brennkammerwand
Dupont-Lanxide SiC/Al₂O₃



LuFo Brennkammer Schindeln
MAN Tech. & DLR C/SiC

- Reduzierung des Kühlluftbedarfs:
 - Drastische Reduktion beim Übergang von einer Blech-Konstruktion mit einwandiger Effusionskühlung auf eine SiC/SiC Brennkammerwand.
 - Signifikante Reduktion beim Übergang von einer beschindelten Brennkammer auf eine ox/ox Faserkeramik.
 - Die bei der Kühlung eingesparte Luft steht nun zur Emissionminderung zur Verfügung. Fokus auf NOx, CO & UHC (nicht CO₂)
- Drastische Reduzierung des Gewichtes durch die niedrigere Dichte der Faserkeramik gegenüber den verwendeten Nickelbasis-Legierungen.
- Wärmeausdehnungskoeffizient von Faserkeramik näher an dem der vorgesehenen Schutzschichten (WDS, EBC, HASSMAP), dies erlaubt die Schutzschichten aufzudicken und mehr Temperaturabfall über die Beschichtung zu erzeugen.
- Verminderter Wärmestrom durch die Brennkammerwand in die Turbinenkühlluft und aus dem Kreisprozess heraus.

DLR Faserkeramik-Kolloquium

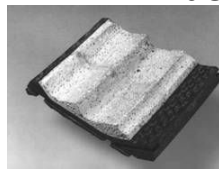
Rolls-Royce data-unclassified



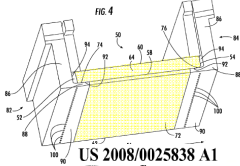
Rolls-Royce

Faserkeramik in der Turbine 1

10



Trent 800 IP Dichtsegment
Dupont-Lanxide
SiC/Al₂O₃ + HASSMAP Einlaufschicht



CMC Vane



CMC Blade

- Drastische Reduzierung des Kühlluftbedarfs beim Übergang von einer komplexen innen-gekühlten Einkristallstruktur des Dichtsegmentes bzw. der Schaufeln auf eine ungekühlte ox/ox Faserkeramik oder schwachgekühltes SiC/SiC. Guter Hebel zur Verbesserung des Wirkungsgrades.
- Drastische Reduzierung des Gewichtes durch die niedrigere Dichte der Faserkeramik gegenüber den verwendeten Legierungen. Insbesondere bei Laufschaufeln ergibt sich ein Multiplikator wegen reduzierter rotierender Massen und folglich leichteren Turbinenscheiben.
- Wärmeausdehnungskoeffizient von Faserkeramik näher an dem der vorgesehenen Schutzschichten (WDS, EBC, HASSMAP). Dies erlaubt die Schutzschichten aufzudicken und mehr Temperaturabfall über die Beschichtung zu erzeugen.
- Auf dem Dichtsegmenten muss die Korrosionsschutzschicht auch als Anstreifbelag dienen. Oder der Anstreifbelag wird zusätzlich auf die Korrosionsschutzschicht aufgetragen.

DLR Faserkeramik-Kolloquium

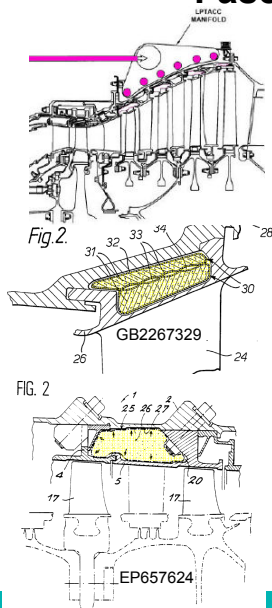
Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

Faserkeramik in der Turbine 2

11



- Zur Kontrolle des Spaltmaßes zwischen Laufschaufeln und Dichtsegment in der Niederdruckturbine wird häufig Gehäusekühlung eingesetzt. Die Absenkung der Gehäusetemperatur wird durch einen künstlich erhöhten Temperaturgradienten (also Wärmeabfluß) aus dem Arbeitsmedium erzeugt. Dies bewirkt eine Erhöhung der thermodynamischen Verluste.
- Industriegasturbinen werden standardmäßig von außen dick isoliert, um die Wärmeverluste zu minimieren.
- Durch Isolierung der Gehäuse von innen mit Faserkeramik in Kombination mit oxidischen Filzmatten lässt sich der Wärmeverlust mit und ohne Gehäusekühlung drastisch reduzieren, siehe Patentskizzen.
- Die geringe Dichte von Filzmatten und oxidischer Faserkeramik ermöglicht es, das zusätzliche Gewicht gering zu halten.
- Konstruktions- und Fertigungserfahrung aus Thermalschutzsystem der Raumfahrt lassen sich hier direkt anwenden. Aber geforderte Lebensdauer beträgt über 10.000 Flüge.

DLR Faserkeramik-Kolloquium

Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

Faserkeramik in der Abgasführung

12



- Reduzierung der aero-elastischen Effekte:
 - Bauteil muß unter Druck- und Temperaturlast die optimale Form einnehmen.
 - Transformation der berechneten belasteten Form des Blechbauteils auf die zu bauende Geometrie ist schwierig.
 - Durch die deutlich höhere Steifigkeit der Faserkeramik und den kleineren Wärmeausdehnungskoeffizienten sind die Fehler bei der Transformation drastisch reduziert.
 - Effektive Fläche der Düse bleibt im Betrieb nahezu konstant, daher wird die vorgesehene Arbeitslinie der Frontgebläses besser angenähert.
 - Verlustreduzierte Mischung von Kern- und Nebenstrom der realen Geometrie
 - Bessere Geräuschdämpfung.
- Drastische Reduzierung des Gewichtes durch die niedrigere Dichte der Faserkeramik gegenüber den verwendeten Nickelbasislegierungen.
- In Verbindung mit höherer Steifigkeit der Keramik, deutlich erhöhte Frequenzen der Eigenmoden.
- Verbesserte Haltbarkeit von faserkeramischen Komponenten führt zu einem längeren Austauschintervallen verglichen mit Metallkomponenten.

DLR Faserkeramik-Kolloquium

Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

Nachrüstung gegenüber Neukonstruktion

13

- Beim Nachrüsten bleibt die grundlegende Architektur und Auslegung des Triebwerks erhalten.
- Durch CMC kann die lokal verwendete Kühlluft reduziert werden.
- Dadurch ergeben sich nur geringe Verbesserungen im Kraftstoffverbrauch und damit beim CO₂ Ausstoß, bis maximal 1% pro Komponente.
- Aber man kann
 - Fortschritte in der Lieferkette finanzieren,
 - mit sicheren Bauteilen Betriebserfahrung sammeln und
 - Ergebnisse der Festigkeits- und Lebensdauerberechnungen mit der Realität vergleichen.
- Test auf niedrigem TRL* Niveau ab 2010, Komponententest ab 2011.
- Bei der Neukonstruktion können auch alternative Konzepte mit erhöhtem Vortriebswirkungsgrad realisiert werden.
- Kreisprozeß wird für geringeren Kraftstoffverbrauch ausgelegt.
- Die einzelnen Komponenten werden auf die Temperaturgrenzen der vorgesehenen Werkstoffe, keramisch wie metallisch, zielgerichtet ausgelegt.
- Ein Rückrüsten auf metallische Bauteile ist hier nicht mehr möglich.
- Um das technische und finanzielle Risiko zu begrenzen, wäre Betriebserfahrung sehr hilfreich.
- Einführung von Faserkeramik im Serientriebwerk nicht vor 2018.

DLR Faserkeramik-Kolloquium

* Technology Readiness Level (TRL): <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/>

Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce

Schlussfolgerungen

14

- Hohe erlaubte Oberflächentemperaturen auf der Beschichtung erweisen sich als großer Vorteil zur Verminderung des CO₂ Ausstoßes.
- Das erklärte Ziel sind 1600°C Oberflächentemperatur auf der Beschichtung.
- Verwendung im Triebwerk oft mehr Thermalschutzsystem, denn Strukturkeramik.
- Reduktion des Triebwerkgewichtes ist häufig ein weiteres Ziel.
- Die Validierung der genannten Technologien unterstützt Rolls-Royce Deutschland als Triebwerkshersteller in der Erreichung der ACARE-Ziele (Advisory Council for Aeronautic Research in Europe), die
 - eine Reduktion der NOx-Emissionen im Jahr 2020 um 80% im Vergleich zum Jahr 2000 und
 - eine Reduktion der CO₂-Emissionen im Jahr 2020 um 50% im Vergleich zum Jahr 2000
 - mit einem Beitrag der Triebwerke im Bereich von 20% CO₂-Reduktion vorsehen.
- Konstruktions- und Fertigungserfahrung aus Thermalschutzsystem der Raumfahrt bieten eine sehr gute Ausgangsbasis für die Einführung im Flugtriebwerk.
- Ausnutzung der spezifischen Werkstoffeigenschaften zur Maximierung der Wirkung:
 - Oxid/Oxid CMC: Inhärente Oxidationsbeständigkeit und gute Wasserdampfkorrosionsbeständigkeit, aber geringere Festigkeit. Einsatz zum Beispiel als ungekühlte Brennkammer oder ungekühltes Turbinendichtsegment.
 - SiC/SiC: Höhere spezifische Festigkeit, zukünftig höhere Temperaturgrenze, höhere Wärmeleitfähigkeit (falls Kühlung benötigt wird). Einsatz bereits erfolgreich im Abgasbereich und jetzt als Niederdruckturbinenschaufel.

DLR Faserkeramik-Kolloquium

Rolls-Royce data-unclassified



Rolls-Royce