



ENERGIE

## KORROSIONSSCHUTZSCHICHTEN FÜR KERAMISCHE FASERVERBUNDWERKSTOFFE (CMC)

Dr. Hagen Klemm, Willy Kunz, Dipl.-Ing. (FH) Bernd Gronde, Dipl.-Ing. Katrin Schönfeld

Durch intensive FuE-Aktivitäten in den zurückliegenden Jahren stehen eine Reihe hochtemperaturstabiler keramischer Faserverbundwerkstoffe (Ceramic Matrix Composite, CMC) zur Verfügung, die ein großes Potenzial zur Anwendung in Gasturbinen besitzen. Neben einem hohen Niveau in den mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Schadenstoleranz) verfügen sie über eine gute Oxidationsstabilität, die auf die Bildung einer  $\text{SiO}_2$ -Schicht an der Oberfläche zurückzuführen ist. Im Heißgaspfad einer Gasturbine kommt es jedoch zu Korrosionsprozessen, die diese als Sauerstoffdiffusionsbarriere fungierende Schicht zerstören. Durch den freien Zutritt von Wasserdampf und Sauerstoff wurden Oxidationsprozesse im Inneren des CMC beobachtet, die letztlich zu Materialdegradationen führten. Mithilfe von Korrosionsschutzschichten (Environmental Barrier Coatings, EBC) können diese Prozesse stark verlangsamt werden. Typische EBC-Systeme mit guter Funktionalität bestehen aus einer Haftschiicht (Bondcoat) aus Silicium und korrosionsstabilen Oberflächenschichten (Topcoat), wie BSAS, Seltenerdensilikaten, YAG,  $\text{ZrO}_2$ - oder  $\text{HfO}_2$ -Verbindungen. Si-Bondcoats eignen sich besonders gut aufgrund ihres an das CMC angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Darüber hinaus ist die Si-Schicht eine effektive Diffusionsbarriere gegen eindringenden Sauerstoff und Wasser in den keramischen Faserverbundwerkstoff. Bei Langzeitanwendungen sind diese Diffusionsprozesse in das CMC bis zum Si-Bondcoat jedoch eine wesentliche Versagensursache. Es wurden Oxidationsprozesse an der Grenzfläche zwischen Topcoat und Si-Bondcoat unter Bildung einer  $\text{SiO}_2$ -Schicht (Thermal Grown Oxide, TGO) beobachtet, die unter Heißgasbedingungen korrodiert. Der damit verbundene Materialverlust führt zur Bildung eines Spalts, der mit fortdauernder Anwendung ein Abplatzen des Schichtsystems verursacht.

Um die Bildung der TGO-Schicht zu verhindern und dadurch die Standzeit des EBC-Systems zu verbessern, wurde der Schichtaufbau modifiziert. Anstelle der Si-Schicht wurde ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Bondcoat verwendet. Die Diffusionsprozesse erfolgten hier bis zur CMC-Oberfläche. Ein Teil des an der Grenzfläche zwischen CMC und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  durch Oxidation gebildeten  $\text{SiO}_2$  reagierte mit dem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  im Volumen des Bondcoats zu Mullit-ähnlichen Phasen ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ). Im Ergebnis stand dieses als Mullit gebundene  $\text{SiO}_2$  nicht mehr für die TGO-Bildung zur Verfügung. Eine vollständige Verlagerung der Oxidation in das  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Volumen und damit die Unterdrückung der TGO-Bildung gelang durch die zusätzliche Einlagerung nichtoxidischer Partikel in die Bondcoat-Schicht. Im Falle eingelagerter Si- und SiC-Partikel wurden jedoch im Heißgas Korrosionsprozesse beobachtet. Um die Si- und SiC-Partikel herum bildete sich durch Oxidation ein  $\text{SiO}_2$ -Saum, der im Heißgas korrodierte und den Bondcoat an diesen Stellen porös machte. Demgegenüber erwiesen sich eingelagerte TiCN-Partikel bzw. deren Oxidationsprodukte  $\text{TiO}_2$  und SE-Titanate als deutlich heißgasstabiler. Im Ergebnis der beschriebenen Schichtmodifikationen war es möglich, die im Heißgas ablaufenden Degradationsprozesse gezielt zu beeinflussen und somit das Standzeitverhalten des gesamten EBC-Systems deutlich zu verbessern. Wir danken dem BMBF für die Förderung des Projekts »NewAccess« (Förderkennzeichen 03EK3544C).

- 1 *Typischer Versagensmechanismus einer EBC im Heißgas mit Spaltbildung.*
- 2 *Schichtaufbau eines  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Bondcoats mit TiCN-Partikeln nach Oxidation (1200 °C, 100 h).*

