

## Schaufelsalat inbegriffen?

Neue Gasturbinen-Technologien mit einigen Risiken behaftet – Problem hohe Eintrittstemperaturen

Von Dipl.-Ing. (FH) Richard Grunke, München\*

Die derzeitige Situation auf dem Gasturbinen(GT)-Markt läßt sich mit wenigen Stichworten beschreiben: verschärfter Wettbewerb, Preisverfall, Personalabbau, enormer Zeit- und Kostendruck. Unter diesen Voraussetzungen, die in ihrer Kombination für eine fundierte Forschungs- und Entwicklungsarbeit nicht gerade günstig sind, liefern sich die GT-Hersteller einen Technologie-Wettlauf um höhere Wirkungsgrade, bei dem die 60%-Marke im Kombiprozess die aktuelle Ziellinie ist. Die Reise ins Land der hohen Wirkungsgrade führt letztlich bei allen Herstellern über den – nicht unproblematischen – Weg erhöhter Turbineneintrittstemperaturen, und eines ihrer Vehikel dafür ist die Technologie der Fluggasturbinen. Aus dieser Konstellation wirtschaftlicher und technischer Faktoren ergeben sich für die GT-Betreiber Konsequenzen, von denen einige näher betrachtet werden sollten.

Da wären zunächst die Turbineneintrittstemperaturen (TIT): Die Schmelztemperaturen der im Heißteil verwendeten Superlegierungen liegen zwischen 1200 und 1400 °C. Entgegen landläufiger Meinung gilt dies auch für gerichtet erstarrte Legierungen und Einkristalle, deren höhere Warmfestigkeit nicht aus einem höheren Schmelzpunkt resultiert, sondern aus der Orientierung bzw. Abwesenheit von Korngrenzen im Metallgefüge. Durch die ständige Erhöhung der TIT liegen diese mittler-

weile im Bereich der Schmelztemperaturen der Werkstoffe – mit anderen Worten: Die vorderen Turbinenstufen „leben“ nur noch von der Kühlluft oder neuerdings vom eingespritzten Dampf (ZfK 2/95, 17).

Parallel dazu werden die Werkstoffe immer näher an der Grenze ihrer Belastbarkeit eingesetzt. Beide Tendenzen addieren sich mit der Folge, daß z. B. die gleiche Fehlfunktion einer GT, die früher nur eine tolerierbare Gefügeveränderung bewirkt hätte, in modernen Maschinen zu Anschmelzungen und schweren Schäden an den Heißteilen führt.

Ein Problem bei der Einführung von Flugturbinen-Technologien in Maschinen schwerer Bauweise ist, daß damit die für Flugzeugmaschinen-typischen TBO (Times between overhaul = Zeiten zwischen den Wartungen – bei zivilen Flugtriebwerken 2000 bis 20 000 h) in den stationären Bereich importiert werden. Jedenfalls gibt es Hinweise dafür, daß bezüglich Brennkammern und Hochdruckturbinen von früheren Revisionszeiten im 50 000-h-Bereich nur noch geträumt werden darf.

Die Fluggasturbinen-Technologien haben auch im einzelnen ihre Schattenseiten. Dazu ein paar Beispiele: Das wohl ehrgeizigste Konzept ist die Beschichtung konvexer (nach außen gewölbter) Strukturen mit Wärmedämmschichten (WDS). Die Beschichtung konkaver (nach innen gewölbter) Strukturen, z. B. der Innenseite von Brennkammern und Überleitstücken, ist unproblematisch, weil die keramische Deckschicht der WDS die dabei auftretenden Druckspannungen gut verträgt. Genau der umgekehrte Fall liegt bei der Außenbeschichtung konvexer Formen, etwa Leitschaufelsegmenten, vor. Dabei kommt es zu Zugspannungen, auf die alle Keramiken sehr empfindlich reagieren, im schlimmsten Fall mit örtlichen Abplatzungen.

Zur Lösung des Problems wurde in den letzten Jahren viel Aufwand getrieben, aber einige Schwierigkeiten sind geblieben. Lebensdauer-Vorhersagen sind jedenfalls mit Vorsicht zu genießen; die Qualitätssicherung ist problematisch, spontane Schichtabplatzungen können nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Ausschlaggebend für die Bewertung von WDS ist, ob sie lediglich die Lebensdauer bzw. die Sicherheit zusätzlich verbessern sollen, oder ob die Bauteile auf Gedeih und Verderb von der Schutzfunktion der WDS abhängig sind.

### Schutzschichten als Kompensation

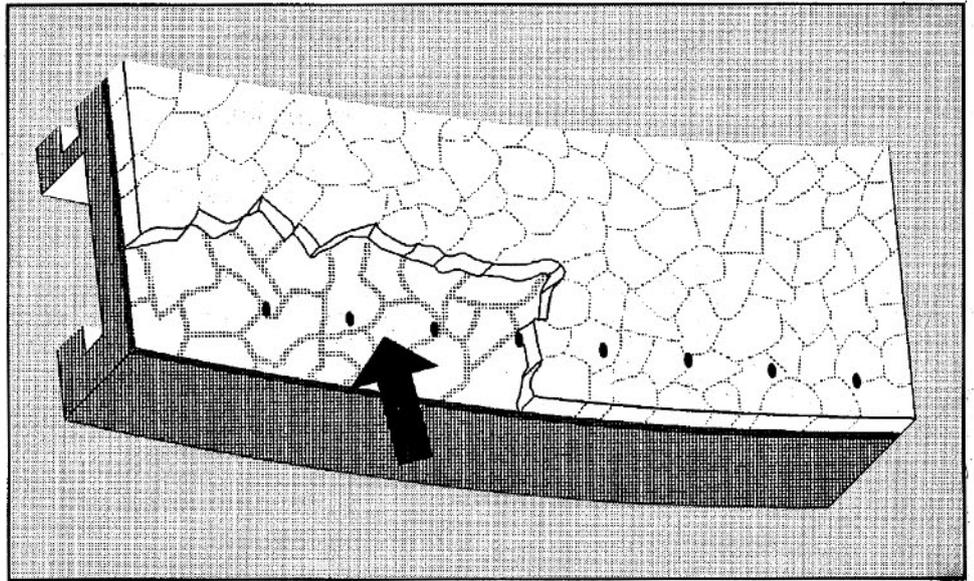
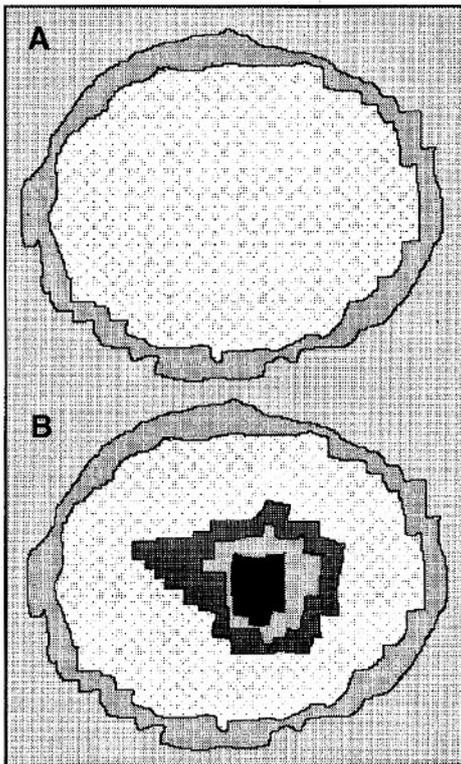
Das Belastungsspektrum für Turbinenwerkstoffe ist breiter und das Lastniveau höher geworden. Als Konsequenz können nicht mehr alle Anforderungen, die an ein Bauteil gestellt werden, durch nur einen Werkstoff erfüllt werden. Aus diesem Dilemma heraus wurden Schutzschichten geboren. Die Optimierung von Schaufelwerkstoffen auf Warmfestigkeit muß nämlich durch Einbußen an Oxidations- bzw. Korrosionsbeständigkeit erkauft werden, was durch Beschichtung kompensierbar ist.

Das Konzept geht so lange auf, wie die Integrität des Systems gewährleistet ist. Ein Schadensereignis wie z. B. eine örtliche Überhitzung kann jedoch an einer beschichteten Schaufel viel dramatischer verlaufen als an einer monolithischen (aus einem Werkstoff bestehenden). An ersterer wird nach Schichtdurchbruch der wenig beständige Grundwerkstoff rasch zerstört, letztere zeigt in jeder Angriffstiefe gleich hohe Beständigkeit wie an der Oberfläche.

Ein Sonderfall dieses Problems sind die Spitzen von beschichteten Turbinenlaufschaukeln, wenn sie an der Gehäusewand anstreifen. Dadurch wird die Schutzschicht häufig abgeschliffen, der freigelegte Grundwerkstoff korrodiert, bei ungünstiger Anordnung der Kühlbohrungsausstritte werden sie durch Korrosionsprodukte blockiert, die Kühlwirkung der Schaufel wird vermindert, was im schlimmsten Fall zum Schaufelbruch führt.

Eine Variante dieses Schadensszenarios liefert ein weiteres High-Tech-Produkt des Gasturbinenbaus: die Turbinenlaufschaukel aus gerichtet erstarrter Legierung. Die Korngrenzen, das sind Schwachstellen im Werkstoffgefüge, verlaufen bei diesen Schaufeln parallel zur Längsachse („Kolumner“). Sie werden deshalb nicht durch Fliehkräfte beansprucht und enden in der Regel in der Schaufelspitze. Allerdings bilden sie ideale Ausbreitungsbahnen für Oxidation/Korrosion, die in Richtung der kolumnaren Korngrenzen wirkt. Werden die Korngrenzen an der Schaufelspitze durch Anstreifen ihrer Schutzschicht beraubt und freigelegt, kann selektive Oxidation/Korrosion unter Reißbildung entlang der Korngrenzen so weit fortschreiten, daß Stücke aus der Schaufelspitze herausbrechen.

Die derzeitigen Technologiesprünge bei den Gasturbinen geschehen in einem Umfeld ungünstiger Bedingungen und Zwänge. Als Ergebnis kommen – vorsichtig ausgedrückt – Techniken mit kurzen Erprobungszeiten und wenig Betriebserfahrung zu den Betreibern, d. h. Entwicklungsrisiken verlagern sich von den Herstellern zu den Kunden. Weitere Umstände verschär-



Beispiel für eine Ultraschalluntersuchung einer Wärmedämmschichtprobe (links): A zeigt sie vor einer Thermowechselbelastung, B danach. Das Ultraschallbild B zeigt deutlich eine Schädigung. Sie ist mit bloßem Auge oder mit der normalen Fotokamera nicht zu erkennen. – Bild oben: Turbinen-Mantelringsegment mit teilweise abgeplatzter Wärmedämmschicht (Pfeil). Hauptursache für solche Schäden sind Oxidation der Haftschiicht, Thermoschock und Fertigungsfehler. Solche Abplatzungen können weitere gravierende Schäden nach sich ziehen (siehe Grafik weiter unten). Grafiken: Grunke/ZfK

fen die Situation: Die Käufer sind den Herstellern in Sachen Fachkompetenz klar unterlegen. Zudem sind die Turbinenbauunternehmen wegen des grassierenden Preisverfalls gezwungen, ihr Geld zunehmend im Ersatzteilgeschäft zu verdienen.

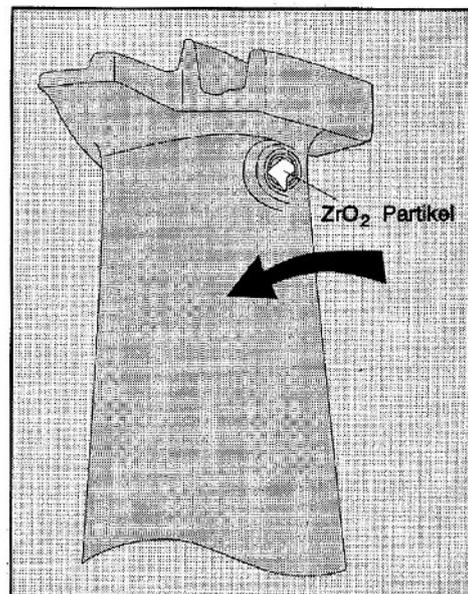
Was können die Betreiber tun, um daraus möglicherweise erwachsende wirtschaftliche Nachteile zu vermeiden?

- Die Betreiber müssen soviel Kompetenz auf ihre Seite bringen, daß sie Technologierisiken bei Neuanschaffungen und Instandsetzung erkennen, bewerten und mit den Herstellern diskutieren können.

- Technologierisiken müssen im Einzelfall zwischen Kunden und Herstellern transparent gemacht und vertraglich gerecht verteilt werden.

- Wirtschaftlichkeits-Betrachtungen der Art, wie viele Mio. DM an Brennstoffkosten durch eine Wirkungsgradsteigerung um x % eingespart werden können, bleiben Milchmädchen-Rechnungen, wenn der Preis dafür nicht berücksichtigt wird. Beispielsweise, daß Flammrohre und erste Turbinenlaufstufe jährlich anstatt alle fünf Jahre ausgetauscht werden müssen, daß der Schaufelsatz den dreifachen Preis konventioneller Schaufeln kostet oder daß die Schaufeln alle zwei Jahre neu beschichtet werden müssen. Fazit: Die neuen Technologien haben unbestreitbare Vorteile, aber es bedarf einigen Engagements der EVU, um sie voll nutzen zu können.

(\*Dipl.-Ing. R. Grunke ist von der Industrie- und Handelskammer für München und Oberbayern öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Schadensuntersuchungen an Flug- und stationären Gasturbinen.)



Ein Partikel einer Keramik aus Zirkonium-Dioxid ( $ZrO_2$  - chemisch resistent, hochhitzebeständig, Schmelzpunkt bei etwa  $2700^\circ C$ ) platzte aus einer Wärmedämmschicht, schlug in eine Turbinenlaufschaukel und blieb darin stecken.