

Turbinenschaufeln aus einkristallinen Werkstoffen länger nutzen

# Reparatur statt Austausch

**MARK HENDRIKS**  
**SULZER TURBO SERVICES**

Sulzer Elbar, ein Unternehmen der Sulzer Turbo Services, hat ein Reparaturverfahren für Turbinenschaufeln aus einkristallinen Werkstoffen (single crystal, SX) entwickelt, die im Heißbereich von Gasturbinen eingesetzt werden. Die Reparatur hat keinerlei nachteiligen Einfluss auf das Gefüge des Grundwerkstoffs, was eine unabdingbare Voraussetzung für die weitere einwandfreie Laufleistung der Turbinenschaufeln ist. Ihre Gefügeausbildung, mechanischen Eigenschaften und Abmessungen werden so wiederhergestellt, dass sie «wie neu» sind. Die von Sulzer Elbar instand gesetzten Turbinenschaufeln können anschließend für mindestens ein weiteres Betriebsintervall eingesetzt werden. Außerdem bietet diese Reparaturoption den Betreibern von Gasturbinen mit SX-Turbinenschaufeln erhebliche Kosteneinsparungen, denn im Normalfall werden die teuren Turbinenschaufeln bereits nach einem Betriebsintervall als Schrott ausgemustert.

► Bemühungen um eine Steigerung der Abgabeleistung durch Einlasstemperaturen von über 1300 °C führten zum Einsatz einkristalliner Werkstoffe bei Turbinenschaufeln. In den vergangenen Jahren wurden in fast allen modernen und mit hohen Einlasstemperaturen betriebenen Industriegasturbinen die herkömmlichen, kriechfesten polykristallinen Nickelbasis-Superlegierungen

für Gusskomponenten im Heißgasbereich durch SX-Legierungen ersetzt.

## **Werkstoff mit überragenden Eigenschaften**

SX-Legierungen besitzen überragende Eigenschaften, enthalten jedoch keine Elemente zur Stabilisierung der Korngrenzen. Somit muss mit allen Mitteln die Ausbildung einer ungeordneten Korn-

struktur bzw. eine Rekristallisation vermieden werden, denn die in SX-Legierungen durch Rekristallisation entstehenden Korngrenzen sind extrem schwach und daher eine mögliche Ursache von Rissen.

Normalerweise senkt während des Betriebs ein aufwändiges Kühlsystem die Metalltemperatur der SX-Komponenten (Bild 1). Mit der Kühlung wird eine homogene Temperaturverteilung auf der Turbinenschaufel erreicht und das Bauteil weniger anfällig für thermische Ermüdung.

### Werkstoffdegeneration in SX-Komponenten

Trotz der Verwendung hochmoderner Werkstoffe treten im Betrieb immer wieder verschiedene Schadensmechanismen auf (Bild 2). Meist ist die Beschichtung der Übergangszone vom Schaufelblatt zur Plattform auf der konkaven Seite der Schaufel betroffen, in der sich bei niedriger Last Ermüdungsrisse bilden. Darüber hinaus ist auch ein Abplatzen der Beschichtung zu beobachten. Vor allem die Plattform und die Schaufelspitze nahe der Austrittskante sind von Korrosion betroffen. Die hohen Betriebstemperaturen führen zu einer Werkstoffdegeneration im Mikrogefüge. Die  $\gamma'$ -Partikel-Ausscheidungen im Mikrogefüge des Grundwerkstoffs, die zusammen mit anderen Faktoren für die Festigkeit des Werkstoffs verantwortlich sind – bilden grobkörnige und nadelförmige Phasen, die sich nachteilig auf das Gesamtgefüge auswirken. Diese Gefügeveränderungen beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften und verkürzen damit die verbleibende Nutzungsdauer der Komponenten.



**1** Turbinenschaufeln aus einkristallinen (SX) Werkstoffen sind häufig in Hochleistungsgasturbinen anzutreffen. Hier eine Röntgenaufnahme der Kühlluftkanäle einer Schaufel in der ersten Stufe. Ein neues Verfahren von Sulzer Elbar, einem Unternehmen der Sulzer Turbo Services, verlängert die Nutzungsdauer dieser extrem teuren Komponenten.

### Reparaturen sind möglich

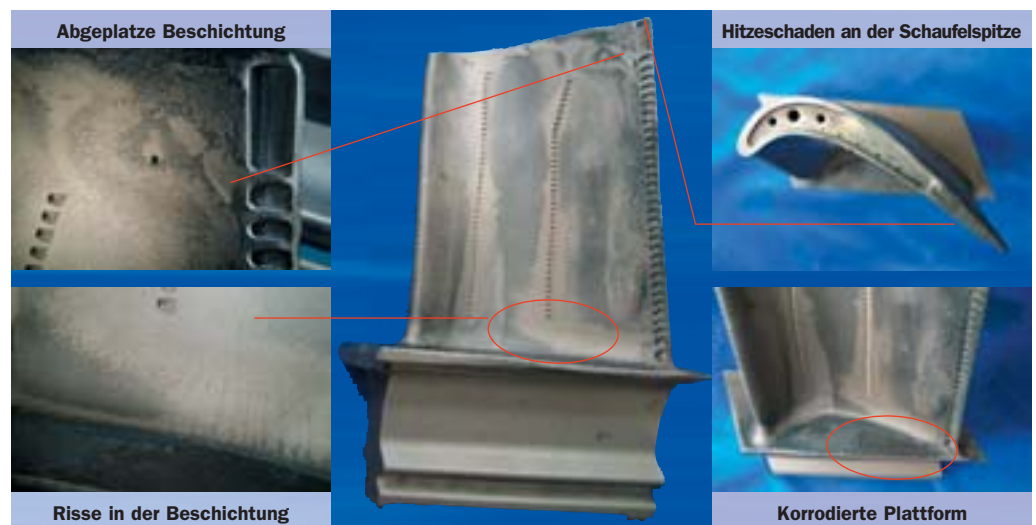
Normalerweise wirken sich Reparaturen auf das Mikro- und Makrogefüge des Grundwerkstoffs und somit auch auf seine mechanischen Eigenschaften aus. Bei der Reparatur von SX-Komponenten ist es von entscheidender Bedeutung, dass das Makrogefüge des Grundwerkstoffs durch die Reparaturen nicht gestört wird, um eine Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften zu vermeiden. Dabei kommt es jedoch nicht darauf an, das SX-Gefüge des Grundwerkstoffs in den reparierten Bereich hinein fortzusetzen. In der chemischen Zusammensetzung der für die Reparatur verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe sind korngrenzenstabilisierende Elemente vorhanden. Unter bestimmten Bedingungen können daher Korngrenzen nur in den reparaturgeschweißten

Bereichen einer Komponente zugelassen werden. Die mechanischen Eigenschaften des Schweißzusatzwerkstoffs müssen den in dem betreffenden Bereich der Komponente erforderlichen mechanischen Eigenschaften entsprechen. Zudem sollten während der Reparatur keine Änderungen am Kühlsystem der Turbinenschaufeln vorgenommen werden, um die einwandfreie Wärmeabfuhr sicherzustellen.

### Verfahren entwickelt

Bis vor kurzem gab es noch kein bewährtes Verfahren, mit dem Turbinenschaufeln aus SX-Werkstoff wieder instand gesetzt werden konnten. Sulzer Elbar entwickelte neue Verfahren, mit denen es nun möglich ist, typische Schäden an Turbinenschaufeln aus SX-Werkstoffen der ersten Stufe zu reparieren. Umfangreiche Forschungsarbeiten haben nachgewiesen, dass das Reparaturverfahren den Grundwerkstoff nicht

**2** Typische Schäden an einer Turbinenschaufel der ersten Stufe nach dem ersten Betriebsintervall.





**3** Mikrogefüge im Übergangsbereich zwischen dem SX-Grundwerkstoff und dem Schweißzusatzwerkstoff, der mittels Laser-Pulverschweißen aufgetragen wurde.

**4** Einfluss der Regenerationswärmebehandlung auf das Mikrogefüge im Grundwerkstoff. Die Aufnahmen links zeigen die nadelförmigen Partikel und die grobkörnige  $\gamma'$ -Verteilung vor der Wärmebehandlung. Auf dem rechten Bild ist das ursprüngliche Mikrogefüge wiederhergestellt.

beeinträchtigt, was von entscheidender Bedeutung für den Erhalt der Festigkeit des Grundwerkstoffs ist.

Zur Wiederherstellung der wärmebedingten Schäden an der Schaufelspitze wird Laser-Pulverauftragsschweißen eingesetzt, ohne dass dabei das Mikro- und Makrogefüge des Grundwerkstoffs verändert werden (Bild 3). Der korrodierte Fußteil der Turbinenschaufel wird mittels einer Pulvertechnik repariert, wobei der Schweißzusatzwerkstoff gezielt daraufhin ausgesucht wird, dass er eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen wärmebedingte Korrosion aufweist. Im Anschluss an die Reparatur erhalten die Bauteile durch Sulzer Elbar noch eine der

hochmodernen Beschichtungen von Sulzer Metco.

Nach den Reparaturen durchgeführte zerstörende Prüfungen zeigten, dass das beeinträchtigte Mikrogefüge vollständig wiederhergestellt war (Bild 4). Die nachteiligen nadelförmigen Partikel verschwinden nach einer Lösungsglüh- und einer Regenerationswärmebehandlung, mit der die ursprüngliche  $\gamma'$ -Verteilung wiederhergestellt wird. Die dabei erzielten mechanischen Eigenschaften entsprechen denen des ursprünglichen Grundwerkstoffs.

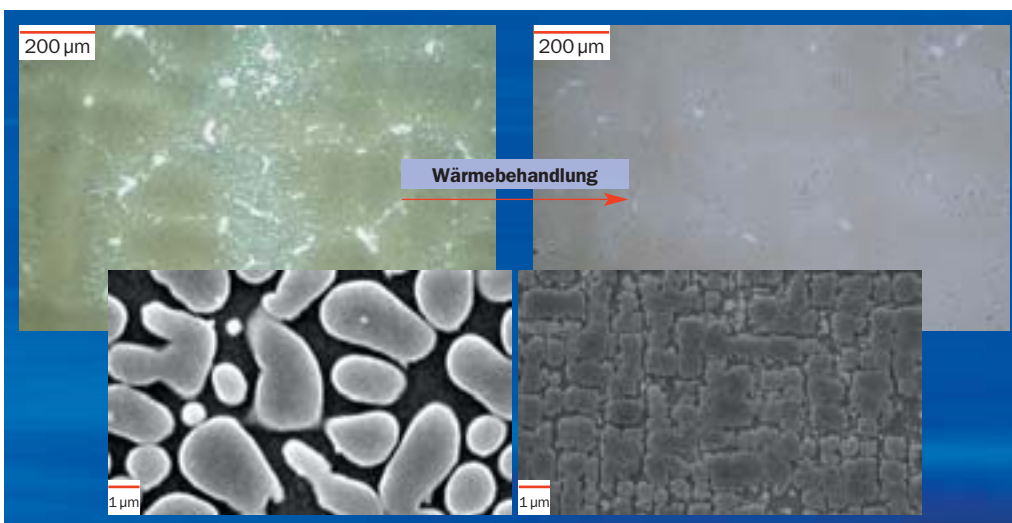
### Erhebliche Kosteneinsparungen

Ohne ein geeignetes Reparaturverfahren müssten die Turbinenschaufeln bei jeder Generalüberholung nach etwa 24 000 Betriebsstunden durch neue ersetzt werden. Bisher mussten die Betreiber für den Austausch der Turbinenschaufeln aus SX-Werkstoffen erhebliche Mittel bereitstellen, denn der Wert einer Turbinenschaufel aus SX-Werkstoff entspricht fast dem ihres Gewichts in Gold. Beschädigungen oder Fehler, die bei herkömmlich gegossenen oder gerichtet erstarrten Turbinenschaufeln vergleichsweise harmlos sind,

sind für SX-Schaufeln ernst zu nehmende Gefahren. Daher ist eine gründliche Untersuchung der Turbinenschaufeln aus einkristallinem Werkstoff der entscheidende Faktor für eine längere Lebensdauer. Abgesehen von den regelmäßig stattfindenden Inspektionen bietet Sulzer Elbar den Betreibern von Anlagen mit SX-Turbinenschaufeln Reparaturen, mit denen folgende Vorteile erzielt werden können:

- ▶ eine maximale Nutzungsdauer der extrem teuren Schaufeln
- ▶ ein zuverlässiger Betrieb mit reparierten Komponenten zu einem Bruchteil der Kosten für neue Turbinenschaufeln
- ▶ die Weiternutzung der Turbinenschaufeln nach Instandsetzung für mindestens weitere 24 000 oder sogar 32 000 Betriebsstunden bis zur nächsten Generalüberholung

Auf Grundlage der Forschungsarbeiten und der von Sulzer Elbar entwickelten modernen Reparaturmethoden kann bei Turbinenschaufeln aus SX-Werkstoff eine Instandsetzung in einen quasi neuwertigen Zustand erzielt werden. Modernste Reparaturverfahren und das Know-how von Sulzer Elbar ermöglichen Anlagen mit Turbinenschaufeln aus SX-Werkstoffen so ein zweites Leben bei gleichzeitig erheblichen Kosteneinsparungen.



### Kontakt

Sulzer Elbar B.V.  
 Mark Hendriks  
 P.O. Box 4339  
 5944 ZG Arcen  
 Niederlande  
 Telefon +31 (0)77 473 86 14  
 Telefax +31 (0)77 473 27 85  
 mark.hendriks@sulzer.com