

# Neues Schweißmaterial zur Reparatur von Turbinen



Dampfturbinen sind rund um die Welt als Kraftquelle für verschiedene Industrien im Einsatz. Dabei lassen sich auch mit den besten präventiven Wartungsverfahren nicht alle Probleme ausschliessen. Einem schwerwiegenden Problem, der Spannungsrisskorrosion, kann häufig durch genaue Analyse der Ursachen mit gezielten Abhilfemassnahmen begegnet werden. Das neue Schweißreparaturverfahren von Sulzer mit 12%igem Chromstahl kann zudem die Lebensdauer überholter Rotoren gegenüber dem ursprünglichen Material verlängern.

Spannungsrisskorrosion tritt bei älteren Dampfturbinen häufig an den Turbinenschaufeln, den Rotorscheiben und anderen Komponenten auf. Das Wissen um die Ursachen und mögliche Lösungen kann dabei helfen, Ausfallzeiten zu minimieren und die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Die „Forensiker“ von Sulzer untersuchen nicht nur die Beschaffenheit der Risse, sondern berechnen auch die Belastung der beschädigten Teile mithilfe der Finite-Elemente-Analyse (FEA). In einigen Fällen nutzte Sulzer darüber hinaus ein neues Schweißreparaturverfahren, um die Lebensdauer der überholten Turbinen deutlich zu verlängern.

## Methoden zur Untersuchung von Rissen

Bei einem Kunden in Indien wies die Rotorscheibe der sechsten Stufe einer Dampfturbine mit Vollrotor im Bereich der Schaufelfüsse Risse auf. Die Betriebsdrehzahl der Turbine betrug  $9'000 \text{ min}^{-1}$  und die Dampfeintrittstemperatur  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Maschine war gut gewartet worden, und die Servicehistorie stand den Wartungsingenieuren zur Verfügung.

Normalerweise sind die Rotorscheiben und Schaufeln von Dampfturbinen im Bereich der Schaufelfüße besonders hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt. In dem betreffenden Fall wurden durch eine Magnetpulverprüfung an insgesamt sieben Füßen Risse festgestellt. Im nächsten Schritt ging es darum, die genaue Ursache der Risse zu bestimmen. Dazu wurden zunächst vier Risse mechanisch geöffnet und die Bruchflächen mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) untersucht, wobei Hinweise auf eine interkristalline Rissbildung festgestellt wurden.



Abb. 1 Untersuchungsmethoden zur Analyse der Ursachen für die Rissbildung.



Darüber hinaus untersuchten die Ingenieure (Abb. 2) einen Teil des beschädigten Bereichs mittels optischer Metallografie, wobei verzweigte Risse unmittelbar unterhalb der Bruchfläche festgestellt wurden. In Verbindung mit den Ergebnissen der REM-Untersuchungen liess dies darauf schließen, dass die Risse durch Spannungsrisskorrosion verursacht worden waren. Hinweise darauf, dass andere Bruchmechanismen wie Ermüdung eine Rolle gespielt hatten, gab es nicht.

Abb. 2 Das Labor von Sulzer für metallurgische Untersuchungen in Houston, Texas.

### Analyse der Materialzusammensetzung

Eine chemische Analyse und Prüfung der mechanischen Eigenschaften der betroffenen Komponenten ist äusserst wichtig. Durch optische Emissionsspektroskopie wurde festgestellt, dass der Rotor aus der niedrig legierten Stahlsorte ASTM A470 Grade C gefertigt worden war. Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften ergab, dass lediglich die Zugfestigkeit nicht der Spezifikation entsprach. Tatsächlich lag die Zugfestigkeit über dem spezifizierten Höchstwert, was zu einer erhöhten Korrosionsanfälligkeit führen kann.

Durch energiedisperse Spektroskopie (EDS) wurde die chemische Zusammensetzung der Ablagerungen an den Bruchflächen bestimmt (Abb. 3). Neben den in der Grundlegung zu erwartenden Elementen wurden Natrium, Magnesium, Zinn und Chlor festgestellt, die wahrscheinlich aus dem in der Turbine verwendeten Dampf stammen.



Abb. 3 Materialanalyse der beschädigten Bauteile.

## Strukturanalyse

Die Spannungen an den Rissstellen wurden mithilfe der Finite-Elemente-Analyse (FEA) berechnet. Dazu wurde ein 3-D-Modell der Rotorscheibe mit den montierten Schaufeln erstellt (Abb. 4 a). Die FEA (Abb. 4 b) zeigt, welche Spannungen bei Betriebsdrehzahl der Turbine in der Rotorscheibe und den Schaufeln auftreten (Abb. 5). In diesem Fall erreichen die Spannungen in der Scheibe am kurzen Schaufelfuss über 689 MPa. Der maximale Spannungswert liegt mit 786 MPa jedoch unter der gemessenen Streckgrenze des Materials von 862 MPa. Dies spricht ebenfalls dafür, dass die Risse nicht durch Strecken aufgrund der Spannungen verursacht wurden, sondern das Versagen primär auf Spannungsrisskorrosion zurückzuführen ist.

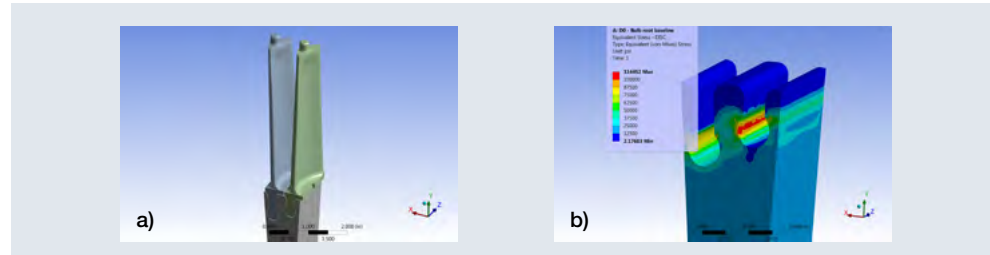


Abb. 4 Die Finite-Elemente-Analyse einer Schaufel zeigt die maximalen Spannungen bei Betriebsdrehzahl.



Abb. 5 Konstruktive Analyse der Schaufeln.

## Ursachenbestimmung

Damit Spannungsrisskorrosion auftritt, müssen drei Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Legierung muss anfällig für Spannungsrisskorrosion sein. (1)
- Der Spannungsintensitätsfaktor muss über dem Schwellenwert liegen. (2)
- Es muss eine korrosive Umgebung vorliegen. (3)

In dem betreffenden Fall wies die Rotorscheibe aufgrund ihrer höheren Zugfestigkeit eine erhöhte Korrosionsanfälligkeit auf (1). Ausserdem treten die hohen Spannungen (2) in der Scheibe genau dort auf, wo die Rissbildung und -ausbreitung gemäss der Magnetpulverprüfung begann. Und schliesslich deutet der Nachweis von Chlor an der Bruchfläche auf eine korrosive Umgebung (3) hin, was die Spannungsrisskorrosion als Ausfallursache bestätigt.

## Bekämpfung von Spannungsrisskorrosion

Um Spannungsrisskorrosion zu verhindern, muss mindestens eine der genannten Voraussetzungen beseitigt werden. In modernen Dampfturbinenkomponenten kommen neueste Legierungen und verbesserte Schaufelkonstruktionen zum Einsatz. In diesem Fall war eine Überarbeitung des Schaufelfusses zur Senkung der Spannungshöchstwerte nicht machbar, da das derzeitige runde Design sehr kompakt ist und kaum eine Verbesserung des Spannungsprofils zulässt. Hier können Schutzbeschichtungen, die auf die Oberfläche der Rotorscheibe aufgebracht werden, einen Schutz gegen korrosive Elemente bieten, die das Rotorgrundmaterial angreifen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die korrosiven Bestandteile im Dampf zu reduzieren. Durch eine vollständige Analyse des in dieser Turbine verwendeten Dampfes könnten die betreffenden Chemikalien identifiziert und entsprechende Massnahmen zur Verbesserung der Wasseraufbereitung in der Anlage bestimmt werden.

## Das Ermittlungsteam bei der Arbeit

Bei einem Kunden in den USA kam es zu einem ähnlichen Ausfall an einer Dampfturbine. Die Risse in der Rotorscheibe der sechsten Stufe wurden mit ähnlichen Verfahren wie den oben beschriebenen untersucht. Auch hier führte das „Ausfallermittlungsteam“ von Sulzer die chemischen, mechanischen, fraktografischen und konstruktiven Analysen durch. Neben einigen geringfügigen Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung des Rotors entsprach die gemessene Schlagzähigkeit (Charpy-Schlagzähigkeit) nicht den Anforderungen für die Legierung und lag deutlich unter den zulässigen Grenzen für Turbinenrotoranwendungen.

Bei der Untersuchung mit einem REM zeigte sich, dass die gesamte Bruchfläche eine interkristalline Struktur aufwies. Dies wurde durch die Prüfung eines polierten Abschnitts mit einem optischen Mikroskop bestätigt, bei der zudem eine verzweigte Rissbildung festgestellt wurde. Ausserdem wurde bei der EDS-Analyse eine starke Oxidschicht an der Bruchfläche festgestellt. All diese Erkenntnisse sprachen dafür, dass der Ausfall durch Spannungsrisskorrosion verursacht wurde.

Nach dem chemischen Ätzen einer polierten Probe der Bruchfläche wurde deutlich, dass es sich bei dem Gefüge um nicht vollständig vergütetes Martensit handelte. Dies und die geringe Schlagzähigkeit liessen darauf schliessen, dass das Schmiedeteil nicht richtig wärmebehandelt wurde und alle Faktoren zusammen die Rissausbreitung in der Rotorscheibe beschleunigt haben könnten (Abb. 6).



Abb. 6 Fallspezifische Analyse und Ergebnisse zur Rissbildung im Schaufelfussbereich der Rotorscheibe.

## Ein neues Schweissreparaturverfahren

Die Ursache für den Ausfall einer Dampfturbinenkomponente festzustellen, kann sehr aufwendig sein und eine ganze Reihe von technischen Prüfungen erfordern. Doch der Zeitaufwand macht sich durch die anschliessende Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Turbine mehr als bezahlt. Darüber hinaus können die Ergebnisse einer Ausfallanalyse für andere Fälle nützlich sein und auf ähnliche Komponenten von anderen Turbinen übertragen werden.

Im Folgenden wird ein neues Schweissreparaturverfahren beschrieben, das dabei helfen kann, Spannungsrisskorrosion in Turbinenrotoren zu mindern. Auch wenn das Verfahren bei den beiden genannten Fällen nicht eingesetzt wurde, wäre es auch für diese beiden Rotoren geeignet.

## Dampf aus dem Erdinneren

Geothermische Dampfturbinen arbeiten mit Dampf aus dem Erdinneren, der äusserst korrosive Bestandteile enthalten kann. Diese unterliegen wiederum naturbedingt unvorhersehbaren Schwankungen. In der Praxis kann dies im Laufe der Zeit zu erheblichen Schäden durch Korrosion und Erosion führen, wobei die dem Dampf ausgesetzten Bereiche regelrecht „weggewaschen“ werden.

“ Die Idee, Chrom beim Schweißen einzusetzen, entstand im Jahr 2013, als Sulzer in Indonesien den Auftrag bekam, den Rotor einer geothermischen Dampfturbine für einen philippinischen Kunden zu reparieren. Die Dampfturbine wies Risse und Spannungskorrosion auf, und unser Kunde wünschte sich Verbesserungen, um ein zukünftiges Wiederauftreten zu verhindern. Die Implementierung des neuen Materials für Reparaturen wurde 2018 mit dem Sulzer Innovation Award ausgezeichnet.

**Hepy Hanipa**, Head Turbo Services SEA, Purwakarta, Indonesien



Abb. 7 Schweissschleifung einer Dampfturbine mit 12Cr bei Sulzer Turbo Services in Indonesien.

### Neuer Reparaturservice von Sulzer

Originalhersteller bieten häufig den Austausch von Rotoren an. Hier sah das Team von Rotating Equipment Services eine Chance, sich durch die Reparatur von Rotoren mithilfe von Schweissverfahren auf dem Markt abzuheben. Schweissreparaturen sind kostengünstiger und können die Wartezeit für den Kunden verkürzen. Bei dem neuen Verfahren wird zunächst das beschädigte Material entfernt und dann eine grössere Menge Schweissmaterial aufgetragen. Anschliessend wird das Bauteil maschinell bearbeitet, um die ursprüngliche Geometrie des Rotors wiederherzustellen. Eine solche Reparatur kann sehr viel schneller vonstattengehen als die Bestellung eines Austauschteils, da die langen Vorlaufzeiten für neue Schmiedeteile entfallen. So profitieren sowohl der Kunde als auch Sulzer von einer Schweissreparatur.



**Eesan Vamadevan**,  
Houston, Texas, USA

### Längere Turbinenlebensdauer durch Chrom

Innerhalb des Sulzer-Teams gab es einige Bedenken hinsichtlich des bis dato verwendeten Schweissmaterials – ein Schweissdraht aus einem niedrig legierten Material für Turbinenrotoren, das beim Einsatz in einer aggressiven Umgebung zur Korrosionsrissobildung neigt. Schliesslich kam das Team auf die Idee, einen Schweissdraht aus Edelstahl mit 12% Chrom (12Cr) einzusetzen, der in vielen Fällen eine noch bessere Korrosionsbeständigkeit bietet als das ursprüngliche Rotormaterial.



**Kirill Grebinnyk**,  
Houston, Texas, USA

Da das 12Cr-Material korrosionsbeständiger ist als typische niedrig legierte Rotorstähle, kann durch eine Schweissreparatur mit 12Cr in einigen Fällen die Lebensdauer des überarbeiteten Rotors gegenüber dem ursprünglichen Material verlängert werden.

Das Aufbringen einer Schweisschicht aus 12%igem Chromstahl auf die verschiedenen niedrig legierten Rotorstähle ist keine leichte Aufgabe. Dennoch ist es dem Team von Sulzer gelungen, ein Schweissverfahren zu entwickeln, das bereits erfolgreich zur Reparatur von Kundenrotoren eingesetzt wird (Abb. 7).