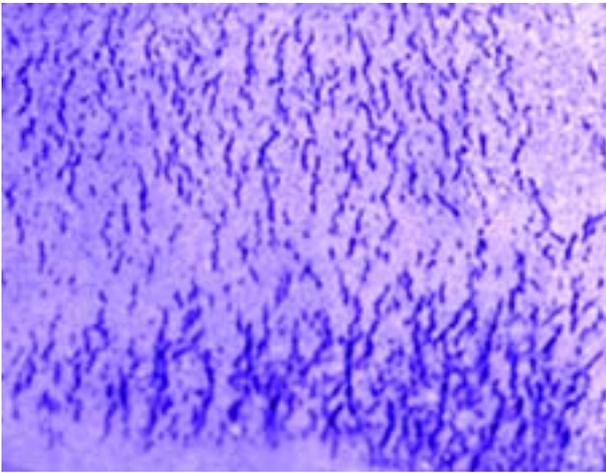


Kostengünstige Reparatur von Turbinenschaufeln durch Vakuum-Hartlöten

WAYNE GREAVES
SULZER TURBO SERVICES

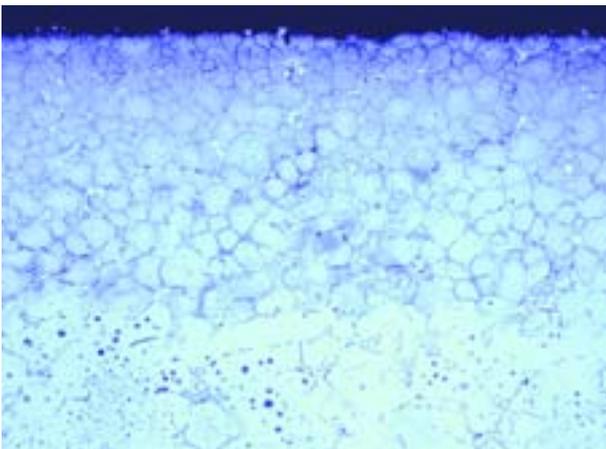
Gasturbinenkomponenten können eine Vielzahl von Beschädigungen aufweisen. Haarrisse (Bild 1), große thermisch-mechanische Ermüdungsbrüche, Erosion und Oxidation sind die häufigsten Schäden, die üblicherweise durch Schweißen repariert werden. Der Reparaturprozess durch Schweißen ist oft schwierig, erfordert hoch qualifizierte Techniker und kann zu zusätzlichen Rissen und Verformungen führen – Nachteile, die Reparaturen durch Schweißen teuer und zeitaufwändig machen. Für Fälle, bei denen große Materialmengen verwendet werden müssen, existiert eine einfachere und kostengünstigere Lösung: die Anwendung von Materialien mit niedrigerem Schmelzpunkt, Hartlöten genannt. Sulzer Hickham hat einen neuen Vakuum-Hartlöt-Prozess entwickelt, mit dem sich bei Bauteilen mit Superlegierungen auf Kobaltbasis in Industrie-Gasturbinen Risse reparieren und Oberflächen wiederherstellen lassen.



1 Haarrisse, ein typischer Schaden bei IGT-Schaufeln (40fach vergrößert).

▶ Hartlöten ist eine Methode zur Verbindung von Metallen und anderen Materialien durch Einwirkung von Wärme und Verwendung eines Lotes (Füllmittel). Es ist eine Alternative zum Schweißen. Schweißen ist eine bevorzugte Reparaturmethode für stationäre Bauteile, besonders bei örtlich begrenzten Restaurierungen. Im großflächigen Einsatz kann es auf Grund von Erosion, Haarrissen usw. technische und wirtschaftliche Grenzen geben. Für diese Fälle bietet sich Löten als Lösung an.

2 Gefüge der speziell von Sulzer Hickham für Reparaturprozesse mit Vakuum-Hartlöten entwickelten Lotlegierung (100fach vergrößert).



Überwindung der Einschränkungen beim gewöhnlichen Hartlöten

Die meisten Legierungen zum Löten für Anwendungen bei hohen Temperaturen/Belastungen bestehen aus einem Material, das eine ähnliche Zusammensetzung aufweist, wie der zu lötende Werkstoff, plus Bor oder Silizium. Bor und Silizium reduzieren den Schmelzpunkt um einige hundert Grad. Sie sind daher als Schmelzpunkt senkende Materialien bekannt. Sobald sich das Lot verflüssigt, diffundieren Bor oder Silizium in das Grundmaterial. Leider fehlt dem resultierenden Material oft die Duktilität oder Widerstandsfähigkeit gegen Oxidation/Korrosion, die das Grundmaterial aufwies. Verbesserungen beim Hartlötprozess von Sulzer Hickham haben durch Zugabe des Grundmaterials in pulverisierter Form diese Probleme überwunden.

Darüber hinaus mindern Zunderschichten und andere Verunreinigungen, die sich beim Betrieb auf der Materialoberfläche bilden, Qualität und Eigenschaften einer Hartlötverbindung durch Verhinderung der Benetzbarkeit (Fließfähigkeit) und Diffusion des Lotes. Daher müssen diese Verunreinigungen vor dem Hartlöten komplett von der Oberfläche entfernt werden.

Sulzer Hickham stellte eine Hartlöttechnologie vor, die negative Eigenschaften früherer Hartlötprozesse überwunden hat. Dazu gehören die Folgen unzureichender Reinigung und die nicht vorhandene Möglichkeit, nach einer ersten Reparatur durch Hartlöten weitere Reparaturen an Bauteilen durchzuführen. Grundlage dieser neuen Technologie ist ein

einzigartiger Reinigungsprozess, kombiniert mit einem Lot, das eine ähnliche Zusammensetzung und ähnliche Eigenschaften wie das Grundmaterial auf Kobalt-Basis hat. Die Reparaturergebnisse weisen im Vergleich zu jenen mit Schweißzusätzen erzielten bessere Eigenschaften auf. Diese Technologie ermöglicht Reparaturen an Teilen, die mit traditionellen Prozessen bislang als nicht reparierbar galten.

Entwicklung von Material und Prozessen

Sulzer Hickham hat ein Lot entwickelt (Bild 2), das für gebräuchliche Legierungen auf Kobalt-Basis bei stationären Turbinen eingesetzt werden kann, z.B. für



3 Gefüge einer simulierten Reparatur-Schweißnaht nach Entspannungs-wärmebehandlung (50fach vergrößert, ungeätzt).

FSX 414, ECY 768 und X 45. Das Lot kann durch einen Pinsel, als Band oder Spray aufgebracht werden. Nach Aufbringen des Lotes wird ein Hartlötzyklus im Ultrahochvakuum ($<10^{-4}$ Torr) durchgeführt. Die Wärmebehandlung soll sicherstellen, dass der Schmelzpunkt nach der Diffusion weit genug oberhalb von 1200°C (2200°F) liegt, also höher als die Brenntemperatur der Turbine. Diese Anpassung ermöglicht den Einsatz von Vakuum-Hartlöten für Hochtemperatur-Komponenten und verbessert im Folgenden die Schweißbarkeit dieser Komponenten.

**Typische Zusammensetzung gebräuchlicher Legierungen auf Kobaltbasis
(Gew.%, Rest-Kobalt)**

	X 45	FSX 414	ECY 768	L 605	H 188
Kohlenstoff	0,25	0,25	0,6	0,1	0,1
Nickel	10	10	10	10	22
Chrom	25,5	29	22	20	22
Eisen		1		<3	<3
Tantal			3,5		
Wolfram	7,0	7,5	7	15	14,5

Zu Beginn wurden mehrere Hundert Proben verarbeitet und geprüft. Untersucht wurden unter anderem das Gefüge des Materials, die Härte, Schlagzähigkeit, Bruchfestigkeit und Schweißbarkeit. Härteverläufe wurden bei hartgelöteten ECY-768-Querschnitten vor (diffusionswärmebehandelt) und nach dem Härten (vollständig wärmebehandelt) erfasst. Nach der vollständigen Wärmebehandlung wurden keine signifikanten Härteunterschiede zwischen Lot, Diffusionszone und Grundmaterial mehr gefunden. Ein typischer Härtebereich für ECY768 ist 24–34HRC im vollständig wärmebehandelten Zustand. Das Lot liegt gut innerhalb dieses Bereiches.

Die Schlagzähigkeit des Lotes wurde an einer einseitig hartgelöteten ECY-768-Platte bestimmt. Die Proben wurden bearbeitet und ungekerbt bei Raumtemperatur geprüft. Die Schlägeinwirkung erfolgte auf der hartgelöteten Seite. Alle hartgelöteten Proben zeigten ein besseres Verhalten als die un-

behandelten Vergleichsproben.

Bruchfestigkeitseigenschaften sind ein wichtiger Faktor für alle Reparaturarbeiten. Sie werden durch Herstellung von Proben geprüft, die zur Hälfte aus der Grundmateriallegierung und zur anderen Hälfte aus Lot bestehen. Zwei Grundmaterialien wurden verwendet: ECY768 und FSX414. Die Ergebnisse zeigten, dass Bruchfestigkeit und Duktilität vergleichbar oder besser als bei gewöhnlichen Legierungen waren.

Die Schweißbarkeitsprüfungen bestanden aus dem Aufbringen mehrerer Schweißnähte in Bereichen, die hartgelötet wurden. Schweißparameter, Schweißtechnik und Schweißzusatz waren dieselben wie bei einer typischen Schweißreparatur (Bild 3). Die Schweißverbindungen wurden sofort nach dem Schweißen und nach einer entlastenden Wärmebehandlung mit verschiedenen Methoden untersucht. In beiden Fällen zeigten Schweißverbindungen, Lot und Grundmaterial keinerlei Mängel.

Die metallographische Untersuchung der reparierten Bereiche realer Bauteile zeigte, dass das Lot vollständig in alle Risse eingedrungen war. Das aufgetragene Material zeigte sich frei von Einschlüssen und anderen Verunreinigungen. Die Porosität war ähnlich wie die in der Legierung des Grundmaterials. Bei kritischen Anwendungen kann heißisostatisches Pressen die Porosität im Lot eliminieren.

Erfolgreiche Ergebnisse

In den vergangenen vier Jahren wurden zahllose Turbinenkomponenten erfolgreich mit dieser Technik instand gesetzt (Bild 4), und der Prozess hat sich als sinnvolle Ergänzung des Service-Portfolios von Sulzer Hickham erwiesen. Die Kunden von Sulzer Hickham haben die Verbesserungen durch diese neue Prozessentwicklung hinsichtlich Ausführung, Qualität und Kosten-Nutzen-Verhältnis begrüßt. ◀

KONTAKT

Sulzer Hickham Inc.
Wayne Greaves
11518 Old La Porte Road
La Porte, TX 77571
USA
Telefon +1 (1)713 567 2826
Telefax +1 (1)281 842 5626
wayne.greaves@sulzer.com



4 Vorher-/Nachher-Vergleich einer von Sulzer Hickham ausgeführten Reparatur durch Vakuum-Hartlöten. Dieselbe Gasturbinendüse vor (links) und nach (rechts) der Reparatur.