

1 ■ Abgenützte Gasturbinenschaufeln zu reparieren (statt sie zu ersetzen) hilft Kosten sparen.



## Ein fortschrittliches Reparaturverfahren: **Laser-Pulver- auftragsschweißen**

**STEFAN KRAUSE**  
SULZER TURBOMACHINERY SERVICES

*Der Trend zu Gasturbinen mit hohem Wirkungsgrad durch Erhöhung der Einlasstemperaturen erfordert neue Werkstoffe für die in der Heißgaszone liegenden Bauteile, d.h. den Einsatz von Einkristall- oder gerichtet erstarrten Werkstoffen. Die hohen Austauschkosten für diese Bauteile erfordern Hightech-Reparaturlösungen. Um diesen Anforderungen genügen zu können, hat Sulzer Elbar (eine Tochtergesellschaft von Sulzer Turbomachinery Services) im Frühjahr 2001 eine neuartige Laser-Pulverschweißtechnik eingeführt, die nicht nur die Wiederherstellung des Grundwerkstoffs durch Auftragschweißen mit höher kriechfesten Zusatzlegierungen erleichtert, sondern auch die Reproduktion des Einkristallgefüges ermöglicht.*

■ Obwohl moderne Gasturbinen äußerst zuverlässig sind, ist der Verschleiß der Stufen – besonders der thermomechanisch stark belasteten – unvermeidlich (Bild 1 ■). Die Reparatur der Schaufeln (statt eines Ersatzes) hilft Kosten sparen, besonders bei den neuesten Ausführungen mit ihren gerichtet erstarrten oder sogar Einkristallgefügen. Ein neues Laser-Pulverschweißverfahren eröffnet Sulzer Elbar ein breites Spektrum von Möglichkeiten, die Grenzen der Reparatur konventio-

nell gegossener Bauteile und zukünftiger Typen von Gasturbinenbauteilen zu erweitern.

### **STANDARD- REPARATURVERFAHREN**

Die grundlegenden Verfahren, die von Sulzer Elbar zur Instandsetzung abgenutzter Turbinenbauteile eingesetzt werden, sind Schweißen, Hartlöten und Plattieren. Das Schweißen wird in erster Linie zur Erneuerung vollständiger Wandstrukturen verwendet, während die modernen Hartlöt- und Plat-

tiertechiken zur Wiederherstellung der Wanddicken dienen.

Die Reparatur neuartiger Gasturbinenbauteile unter Beibehaltung des Einkristall- oder gerichtet erstarrten Grundwerkstoffgefüges erfordert eine Kombination verschiedener Reparaturtechniken sowie eine sehr genaue Steuerung der Wärmezufuhr.

Das automatisierte Laser-Schweißverfahren (Bild 2 ■), das eine Kombination von Schweißen und Plattieren darstellt, hat sich als die einzig aussichtsreiche Methode erwie-

### 3<sup>■</sup> Prinzip des Laser-Pulverschweißverfahrens.

sen, mit der diese Anforderungen zu erfüllen sind. Dank genau steuerbarer Energiezufuhr – sie ermöglicht eine geringe Wärmeaufnahme und kleine Wärmeinflusszonen, begrenzt den Verzug und sichert die Maßhaltigkeit – sind Bauteile, die früher hätten verschrottet werden müssen, jetzt durch Auftragschweißen erneuerbar.

#### DAS LASER-PULVERSCHWEISSVERFAHREN

Beim Laser-Pulverschweißen werden als Erstes die zu reparierenden Bereiche separat digitalisiert, um die Oberflächengeometrie festzulegen. Dies erleichtert den Ausgleich geringer Änderungen der Geometrie und ermöglicht nahezu endkonturnahe Schweißgutaufträge. Die digitalisierten Oberflächendaten werden dann in den NC-Kern der Schweißanlage übertragen. Eine positionsabhängige Steuerung der Laserleistung (welche Geschwindigkeit, Energie und Schweißparameter regelt) wird mit der Nahtbewegung abgestimmt.

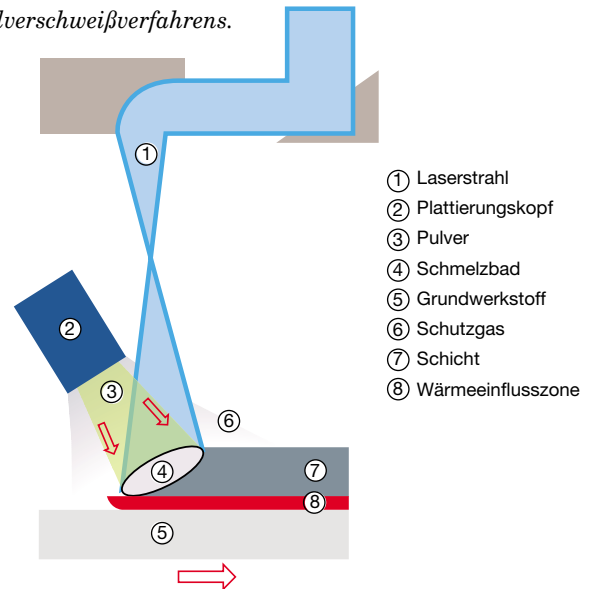
Der Laserstrahl wird senkrecht auf den Grundwerkstoff ausgerichtet und auf die Oberfläche des Grundwerkstoffs fokussiert. In dem Bereich, in welchem der

Laserstrahl auf die Oberfläche auftritt, bildet sich ein Schmelzbad (Bild 3<sup>■</sup>). Auf dieses wird ein Schutzgasstrom gerichtet, der zugleich Pulverteilchen in das Schmelzbad bläst. Da der Grundwerkstoff um Größenordnungen dicker ist als der Schweißauftrag, wirkt der Grundwerkstoff als Wärmesenke. Wegen der schnellen Relativbewegung zwischen Strahl und Schmelzbad kühlt sich Letzteres sofort nach der Entstehung herunter.

#### AUFTRAGSSCHWEISSEN KONVENTIONELLER BAUTEILE

Bild 4<sup>■</sup> zeigt als Beispiel die Auftragsschweißung einer aus der ausscheidungshärtenden Superlegierung Inconel 738 hergestellten Rotorschaukel. Bild 5<sup>■</sup> zeigt das Gefüge des Schweißauftrags mit dendritischem Grundwerkstoff und rekristallisierten Bereichen in der Schmelzzone und in der aufgetragenen Schicht.

Die typischen Auftragsmengen können bis auf 90 g/min ansteigen. Die Schichten weisen Dicken zwischen 0,5 und 1 mm auf und sind zwischen 0,5 und 5 mm breit. Das Verfahren kann zur Reparaturschweißung herkömmlicher Bauteile verwendet werden.



Um die Anwendung der Laser-Pulverschweißtechnik für gerichtet erstarrte oder Einkristallbauteile zu ermöglichen, muss während der Erstarrung des Schmelzbades ein epitaktisches Wachstum des Gefüges – d.h. mit identischer Kristallorientierung – erzielt werden. Dieses Wachstum ist durch die Erstarrung von stengelförmigen Dendriten nachweisbar.

Die Keimbildung und das Wachstum von ungerichtet erstarrten Dendriten – und damit die Bildung unerwünschter Körner – muss vermieden werden. Sie würden Korngrenzen bilden, die in diesen Einkristallbauteilen die Kriechfestigkeit stark herabsetzen würden.

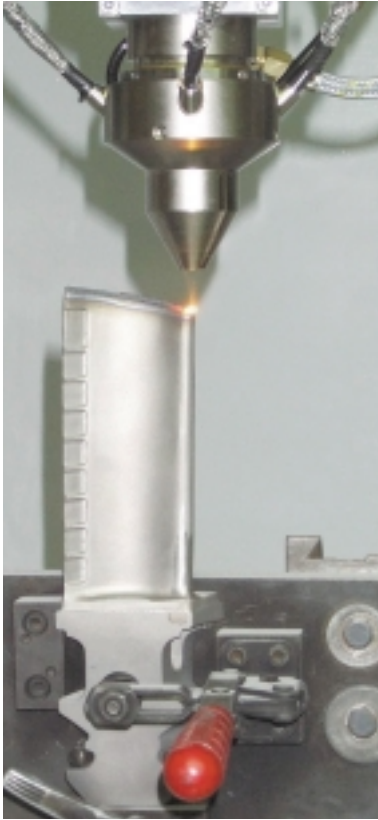
#### GERICHTET ERSTARTE UND EINKRISTALLBAUTEILE

Beim Laser-Pulverschweißen entstehen in der Übergangszone fest-flüssig planare, zellenförmige oder dendritische Erstarrungsgefüge. Ihre Entstehung ist von Parametern wie Legierungszusammensetzung, Temperaturgra-



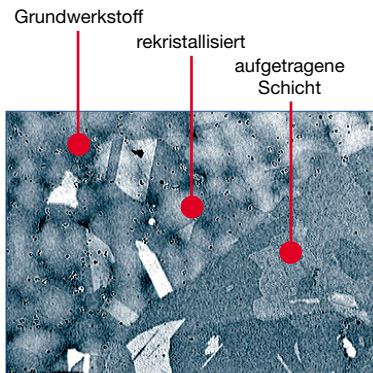
2<sup>■</sup> Das Sulzer-Elbar-Laserzentrum ermöglicht die Reparatur von Gasturbinenbauteilen.

4<sup>■</sup> Die Spitze einer Rotorschaukel wird durch Laserschweißen repariert.

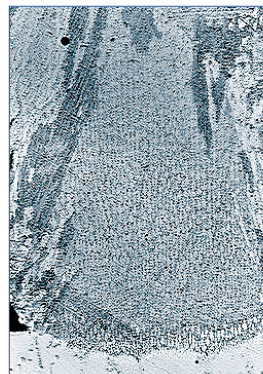


dient und Erstarrungsgeschwindigkeit in der Übergangszone abhängig.

Die Erstarrung der Schweißraupe auf dem angeschmolzenen Grundwerkstoff beginnt mit einer epitaktischen, planaren Übergangszone, die aufgrund der hohen Wach-



5<sup>■</sup> Gefüge von Inconel 738 mit einer Auftragsschweißung von Inconel-738-Pulver.



6<sup>■</sup> Die Gefügeausbildung ändert sich von der Mitte zu den Flanken hin, abhängig von der Abkühlungsgeschwindigkeit.

tumsraten stabilisiert wird. Bei abnehmenden Wachstumsgeschwindigkeiten stabilisiert sich das zellenförmige Gefüge und geht in feine Dendrite über, die nach und nach größer werden (Bild 6<sup>■</sup>). Das gewünschte stengelförmige, epitaktische Wachstum, das in der Schmelzzone und im zentralen Konus zu sehen ist, kann nur in einem kleinen Prozessfenster erhalten werden. Es hängt stark von der Geometrie des Bauteils ab, welche die Wärmeleitung maßgeblich beeinflusst. Die Schweißparameter müssen darum an die verschiedenen Bauteilgeometrien und Legierungszusammensetzungen angepasst werden.

Sind die richtigen Schweißparameter-Kombinationen gefunden, so können gerichtet erstarrte oder Einkristallgefüge reproduziert werden. Bild 7<sup>■</sup> zeigt eine gerichtet erstarrte Nickelbasis-Superlegierung, die mit einem modifizierten MarM002-Pulver auftragsschweißte wurde. Das Gefügebild zeigt die epitaktisch aufgetragenen Schichten mit einer Dicke von rund 0,5 mm.



7<sup>■</sup> Epitaktisches Wachstum bei der gerichtet erstarrten Superlegierung MarM002.

## WEITERE VERBESSERUNGEN

Die Einführung dieser neuartigen Technik ist ein wesentlicher Bestandteil eines vierjährigen Entwicklungsprogramms. In der noch laufenden Einführungsphase ist es Sulzer Elbar gelungen, die Reparaturmöglichkeiten von konventionellen Komponenten zu erweitern sowie Qualität und Zuverlässigkeit im Vergleich zu den Standard-Reparaturverfahren zu verbessern. Die Auftragsschweißung an verschiedenen Typen herkömmlich vergossener Superlegierungsbauteile wurde mit Erfolg durchgeführt.

Mit Blick auf die Zukunft werden sich die Entwicklungsaktivitäten bei Sulzer Elbar auf die Übertragung der für gerichtet erstarrte Gefüge eruierten Schweißparameter auf Anwendungen zur Reparatur von Gasturbinenbauteilen ausdehnen. Zwei Themenkreise stehen dabei im Vordergrund: die aufgrund geometrischer Unterschiede veränderte Wärmeleitung sowie Strukturverschlechterungen des Grundwerkstoffs während des Betriebs.  $\Omega$

## INFO DIRECT

Elbar B.V.  
Dimphy Wilms  
Spikweien 36  
NL-5943 AD Lomm  
Niederlande  
Telefon +31 (0)77-473 86 24  
Telefax +31 (0)77-473 27 85  
E-Mail dimphy.wilms@elbar.com  
Internet www.elbar.nl