



Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München - Niederlassung der GSI mbH

## Bericht 5147/2008

### **Fügen von hochwarmfesten Werkstoffen mit dem Kondensatorentladungsschweißen (CD-Schweißen)**

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie  
Innovationsberatungsstelle Südbayern  
Nr.: 3621b - IBS/e - 640/04

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung der Urheberschaft der SLV München, NL der GSI mbH, veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München.

Der Bericht enthält 73 Seiten.

Juni 2008

## 1 Einleitung

Die Herstellung verschiedenster industrieller Komponenten für die Luft- und Raumfahrttechnik, Automobilbau, Medizintechnik und chemische Industrie erfordert zunehmend neue Werkstoffkonzepte und Fertigungslösungen, um teils konträre Produktanforderungen (z.B. Festigkeit, Leichtbau, dynamisches und thermisches Verhalten, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit) erfüllen zu können. Die Anforderungen durch thermische Beanspruchung, Verschleiß oder Korrosionsbeständigkeit, wie sie für Motorenkomponenten oder Anbauaggregate typisch ist, können Werkstoffe mit geringer Warmfestigkeit und Härte nur unzureichend erfüllen. In diesem Bereich werden Nickelbasislegierungen, Titanaluminide (TiAl) und Molybdänbasislegierungen eingesetzt, die artgleich oder artfremd gefügt werden. Herkömmliche Lichtbogenschweißverfahren stoßen dabei an ihre Grenzen. Insbesondere beim Fügen von Titanaluminiden als Mischverbindung mit niedrig- und hochlegierten Stählen entstehen Verbindungen mit spröden Phasen, die bei geringer Belastung versagen.

Anwender fragen daher vermehrt nach widerstandsgeschweißten Verbindungen aus Stahl mit hochwarmfesten oder verschleißbeständigen Nickelbasis, Titanaluminiden und Molybdänlegierungen, die sowohl artgleich als auch artfremd mit niedrig- und hochlegierten Stählen verschweißt werden. Das Fügen mit diesen Werkstoffen ermöglicht die optimale Verknüpfung verschiedener Werkstoffeigenschaften wie hoher Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und niedriger Masse.

Das Kondensatorentladungsschweißen (auch als CD = **C**apacitor **D**ischarge-Schweißen bezeichnet) bietet aufgrund der kurzen Stromanstiegszeit und der vergleichsweise niedrigen und schnellen Wärmeeinbringung gegenüber dem konventionellen Punkt- oder Buckelschweißen große Vorteile und wird seit Mitte der 50er Jahre für ausgewählte Schweißaufgaben in der Industrie eingesetzt /1-7/. Es ermöglicht auch die Herstellung von Mischkombinationen unterschiedlicher Werkstoffe, indem die bisher vollständig aus einem Werkstoff gefertigten Teile teilweise durch einen artfremden Werkstoff substituiert werden, z.B. in Bereichen lokal veränderter Beanspruchung. Dadurch kann eine hohe Betriebs- oder Verschleißfestigkeit mit einem großen Kostenvorteil und einer leichten Bauweise verknüpft werden. Das Schweißverfahren bietet durch seine extrem kurzen Schweißzeiten ( $< 0,1$  s), Vorteile durch eine geringe Wärmebelastung der Werkstoffe, eine symmetrische Erwärmung und

---

Abkühlung mit geringem Verzug (niedrige Eigenspannungen) und eine hohe Prozesssicherheit. Tabelle 1 zeigt die Verfahrensvorteile zusammengefasst.

## 2 Zusammenfassung zum CD-Schweißen

Das CD-Schweißen eignet sich teilweise gut zum Fügen der untersuchten hochwarmfesten Werkstoffe. Es sind fundierte Beispiele zur rissfreien Herstellung von Schweißungen zwischen Nickelbasislegierungen mit dem hitzebeständigen Chromstahl X45CrSi9-3 und Vergütungsstahl 42CrMo4 erarbeitet worden. Ansatzweise sind rissfreie Verbindungen bei TiAl-Legierungen und TZM erkennbar, doch ist die Reproduzierbarkeit und damit die Schweißbeugung noch sehr eingeschränkt.

Die Parameter Schweißenergie, Elektrodenkraft und Buckelgeometrie sind die wesentlichen Einflussgrößen beim CD-Schweißen. Sie bestimmen die Wärmeeinbringung an der Fugestelle und beeinflussen maßgeblich die Schweißqualität. Sind diese Parameter nicht aufeinander abgestimmt, entstehen Schweißfehler wie Spritzer, Risse oder Bindefehler. Für die Nickelbasislegierungen in Kombination mit dem hitzebeständigen Chromstahl (Ringbuckeldurchmesser 11,4 mm) sind Schweißenergien im Bereich von 4000 bis 7000 Ws bei einer Elektrodenkraft von 15 kN zu empfehlen. Als geeignete Buckelgeometrie hat sich ein Spitzenwinkel von 70° bei einer Auflagebreite von ca. 0,3 mm herausgestellt. In Zusammenspiel mit der geeigneten Schweißenergie werden damit günstigste Randbedingungen geschaffen, um stoffschlüssige und fehlerarme Anbindungen zu erreichen. Sowohl mit der Inconellegierung IN 625 (Knetlegierung) als auch mit IN 713 und MAR 246 (Gusslegierungen) sind ebenfalls gute Schweißverbindungen hoher Nahtgüte möglich. Es werden Festigkeiten von über 700 MPa erreicht. Der Bruch erfolgt im Grundwerkstoff des X45CrSi9-3 bzw. 42CrMo4. Das Parameterfenster ist jedoch im Vergleich deutlich schmaler ausgebildet als z.B. bei hochkohlenstoffhaltigen Stählen. Durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit der Inconellegierungen (10 W/mK) wird dort mehr Widerstandserwärmung erzeugt als bei X45CrSi9-3 (20 W/mK) und 42CrMo4 (45 W/mK). Eine zu hoch gewählte Schweißenergie führt zu einer starken Spritzerbildung.

TiAl-Werkstoffe sind bisher mit dem CD-Schweißen in Kombination mit dem hitzebeständigen Chromstahl X45CrSi9-3 nur bedingt prozessgeeignet. Im Querschliff sind zwar rissfreie Bereiche erkennbar, doch über den kompletten Querschnitt kann Rissfreiheit derzeit nicht garantiert werden. Die Fügezone ist sehr spröde durch die unregelmäßig ausgebildeten intermetallischen Phasen, sodass keine Verformungen auf-

genommen werden können. Das Verwenden einer Pufferschicht führt bisher nicht zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften.

TZM-Verbindungen sind bisher ebenso nur eingeschränkt möglich. Stoffschlüssige Verbindungen sind in kleinen Segmenten möglich, doch ist die Rissneigung im Grundwerkstoff sehr groß. Durch die gegebenen Prozesskräfte ist bisher mit Rissbildungen im Grundwerkstoff außerhalb der Fügezone zu rechnen.

Die Untersuchungen wurden vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie – Innovationsberatungsstelle Südbayern – gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Der Schlussbericht zu dem Projekt ist von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München, Niederlassung der GSI mbH zu beziehen. Unser Dank richtet sich an die Firma Conntronic GmbH und BorgWarner Turbo Systems für die Unterstützung der Forschungsarbeit.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

München, Juni 2008

ppa.

Peter Wagner