

Qualifizierung des Elektronenstrahlschweißens zum Fügen einer Blisktrommel eines Flugtriebwerkes

Karl-Hermann Richter, Klaus-Uwe Heins und Jürgen-Ulrich Specht, MTU Aero Engines (München)

1 Zusammenfassung

Zum Fügen von rotierenden Bauteilen in Flugtriebwerken werden ausschließlich die Fügeverfahren Schwungrad-Reibschweißen (SR-Schweißen) und Elektronenstrahlschweißen (EB-Schweißen) eingesetzt. Das EB-Schweißen hat gegenüber dem SR-Schweißen bezüglich Kosten und Flexibilität Vorteile und wird deshalb von der Fertigung bevorzugt.

Im folgenden wird die Vorgehensweise zur Validierung des EB-Schweißens zum Fügen einer Blisktrommel, deren Komponenten aus zwei unterschiedlichen Titanlegierungen bestehen, beschrieben. Dazu werden die Anforderungen an die EB-Schweißnaht und einige Ergebnisse aus der Verfahrenserprobung dargestellt. Potentieller Schwachpunkt jeder Rundnaht ist der Ausfädelbereich des Elektronenstrahls, in dem bedingt durch Instabilitäten der Dampfkapillare Fehlstellen auftreten können. Im Rahmen der Verfahrenserprobung wird dieser Bereich gesondert optimiert und bewertet. Die Auswertung der Verfahrenserprobung erfolgt durch metallographische Schliffe sowie durch Röntgen- und Ultraschallprüfung. Zusätzlich werden Ergebnisse von dynamischen Festigkeitsuntersuchungen an Prüfproben präsentiert. Die Ergebnisse zeigen, daß die EB-Schweißnähte die Anforderungen an die Verbindung erfüllen.

2 Einleitung

Elektronenstrahlschweißen ist das qualitativ hochwertigste Schmelzschweißverfahren. Aus diesem Grund ist dieses Fügeverfahren auch eine Schlüsseltechnologie bei der Fertigung von Flugtriebwerken. Elektronenstrahlschweißverbindungen im Flugtriebwerkbau zeichnen sich durch einen sehr geringen Verzug bei relativ großen Einschweißstiefen bis zu etwa 20 mm aus. Gegenüber dem artverwandten Laserstrahlschweißen besitzt das Elektronenstrahlschweißen eine höhere Prozeßstabilität und ermöglicht bei wesentlich größeren Arbeitsabständen schlankere und damit verzugsärmere Nähte. Ein weiterer Vorteil des Elektronenstrahlschweißens bietet die Bearbeitung in einer Hochvakuumkammer. Damit können auch Werkstoffe, die eine hohe Affinität zu Gasen aufweisen, optimal geschweißt werden. Da die Stückzahlen im Triebwerkbau relativ gering sind, spielt die durch das Evakuieren der Hochvakuumkammer bedingte Erhöhung der Prozeßzeit nur eine untergeordnete Rolle.

Die Hauptanwendungen des Elektronenstrahlschweißens im Triebwerkbau beinhalten das Fügen statischer als auch rotierender Komponenten [1]. EB-geschweißte statische Bauteile sind vor allem Gehäuse und integrale Leitkränze. Rotierende Bauteile, die mit dem Elektronenstrahl gefügt werden, sind insbesondere Getriebe, Wellen und Scheiben.

Das Elektronenstrahlschweißen ist neben dem aufwendigeren Schwungrad-Reibschweißen das einzige Fügeverfahren im Triebwerkbau, mit dem Bauteile der Sicher-

heitsklasse I gefügt werden dürfen. Bei diesen Bauteilen kann ein Versagen der Schweißnaht zum Verlust des Luft- oder Raumfahrtgeräts bzw. zur unmittelbaren Gefährdung von Personen führen. Bauteile der Sicherheitsklasse I sind insbesondere rotierende Komponenten.

Im folgenden werden exemplarisch die Vorgehensweise und einige Ergebnisse zur Qualifizierung des Elektronenstrahlschweißens zum Fügen eines Bauteils der Sicherheitsklasse I dargestellt.

3 Aufgabenstellung

Bild 1 zeigt ein Zweikreistriebwerk mit kleinem Nebenstromverhältnis. Im Niederdruck- und Hochdruckverdichter dieses Triebwerkes werden anstelle von Scheiben mit Räumnuten, in denen die Laufschaufeln befestigt werden, integrale Laufräder eingesetzt. Diese als Blisks

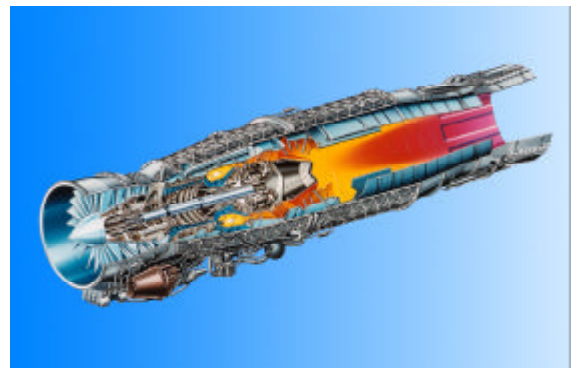


Bild 1: Schnittdarstellung eines modernen Zweikreistriebwerks mit kleinem Nebenstromverhältnis.

(Bladed disks) bezeichneten Bauteile sind dadurch charakterisiert, daß die Scheibe und der umlaufende Schaufelkranz eine integrale Einheit bilden. Die Bearbeitungsaufgabe bestand darin, eine Rotortrommel (s. Bild 2) durch EB-Schweißen zu fügen. Diese Trommel besteht aus zwei Blisks der ersten beiden Hochdruckverdichterstufen und einem Flansch. Bild 3 zeigt eine Schnittzeichnung inklusive der Fügezonen zwischen den beiden Blisks sowie dem Blisk der Hochdruckverdichterstufe 2 und dem Flansch. Als Werkstoff für die beiden Blisks kam die Titanlegierung Ti6242 zum Einsatz. Der Flansch, der mittels einer Schraubverbindung mit der folgenden Verdichterstufe verbunden wird, besteht aus der Titanlegierung IMI834. Die Nennicken der Rohteile betragen jeweils 11 mm.

Da die Bauteile rotationssymmetrisch sind, könnte als Fügeverfahren für beide Verbindungen auch Schwungrad-Rotationsschweißen eingesetzt werden. Der Vorteil des Elektronenstrahlschweißens liegt in einem geringeren Aufwand für Sonderbetriebsmittel, dem niedrigeren Maschinenstundensatz und vor allem in der Möglichkeit, daß dieses Verfahren auch zur Reparatur bei Fertigungsschäden oder in der Instandsetzung eingesetzt werden kann.



Bild 2: EB-geschweißte Blisktrommel für das in Bild 1 dargestellte Flugtriebwerk.

4 Anforderungen

Da eine zerspanende Endbearbeitung zwischen den beiden Blisks nach dem Fügen nur noch bedingt in der Umgebung der Schweißnaht möglich ist, müssen die Komponenten im nahezu endbearbeiteten Zustand EB-geschweißt werden. Aus diesem Grund sind nur geringe geometrische Toleranzen zulässig. Weiterhin muß durch

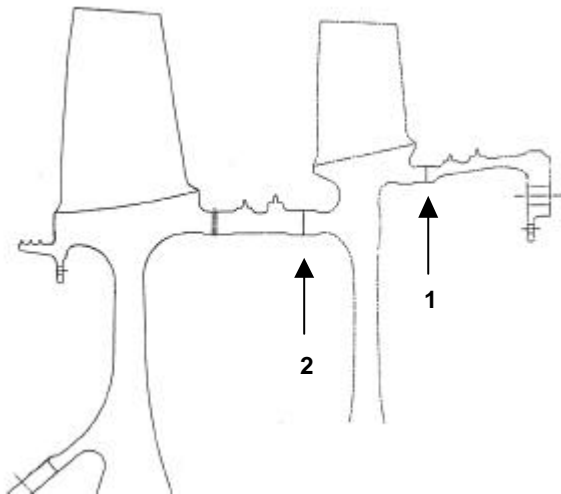


Bild 3: Schematische Schnittzeichnung des in Bild 2 dargestellten Bauteils (die Triebwerkachse ist nicht eingezeichnet). Die Numerierung der beiden EB-Nähte entspricht der Bearbeitungsfolge.

einen geeigneten Spritzschutz sichergestellt werden, daß

die Schaufelblätter nicht durch Schweißspritzer beschädigt werden.

Die Anforderungen an die Verfahrenserprobung und –durchführung sind in einer MTU-spezifischen Fertigungsverfahrensnorm für das Elektronenstrahlschweißen zusammengestellt. Diese Spezifikation legt unter anderem die Nahtvorbereitung fest, definiert die Form und die Anzahl der Schweißproben für die Verfahrenserprobung und beschreibt die Anforderungen an die Prüfungen der Schweißproben und Probeteile. Da der Ausfädelbereich (fade out bzw. down slope) der Elektronenstrahlschweißnaht eine potentielle Schwachstelle bei Rundnähten darstellt, fordert die Spezifikation in diesem Bereich für Bauteile der Sicherheitsklasse I besondere Nachweise. Insbesondere muß nachgewiesen werden, daß innerhalb des Ausfädelbereiches keine durch den Spiking-Effekt [2] verursachten Fehlstellen auftreten. Diese durch Instabilitäten der Dampfkapillare bedingten Fehler können zu einer signifikanten Reduzierung der dynamischen Festigkeit führen. Die durch Spiking verursachten Materialtrennungen sind bei der obligatorischen Röntgenprüfung nicht unter allen Umständen sichtbar. Aus diesem Grund müssen im Rahmen der Verfahrenserprobung geeignete EB-Schweißparameter ermittelt werden, welche derartige Fehlstellen ausschließen. Die in Bild 4 sichtbaren Lunker und Materialtrennungen sind durch den Spiking-Effekt im Ausfädelbereich bei nicht optimierten Parametern verursacht worden.

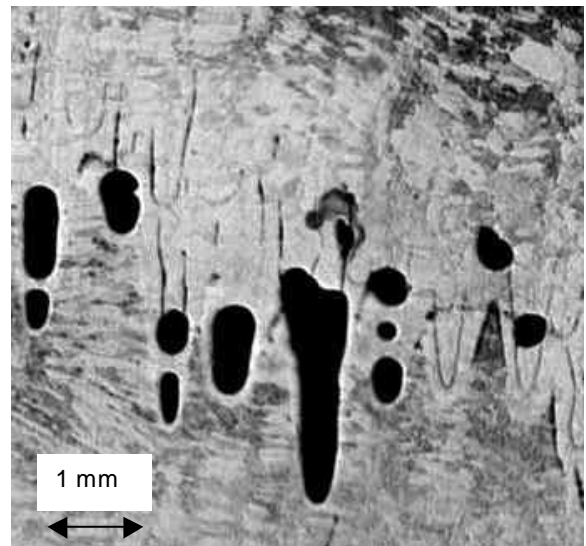


Bild 4: Durch Spiking verursachte Fehlstellen im Ausfädelbereich einer EB-Naht

Die Abnahmegrenzen für die für Klasse I-Bauteile obligatorische Röntgenprüfung sind in einer MTU-spezifischen Güteprüfnorm definiert. Darin sind insbesondere die maximal zulässige Porengröße und der minimal zulässige Porenabstand im Bereich einer festgelegten Prüfnahtlänge definiert. Die Abnahmegrenzen für die relevante Bewertungsgruppe sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Rotierende Bauteile in Flugtriebwerken müssen grundsätzlich hinsichtlich des LCF-Verhaltens (Low Cycle Fatigue) validiert werden. Dazu wird die durch FEM ermittelte Spannungsverteilung an den kritischen Bereichen eines Bauteils durch LCF-Schleudertests an originalen Bauteilen sowie durch LCF-Proben abgesichert.

Hochbelastete und damit kritische Bereiche bei rotierenden Bauteilen sind unter anderem Flansche, Bolzen- und Nabenbohrungen sowie Fügezonen (EB- und Reibschweißnähte). Die zunächst an repräsentativen Proben und anschließend an Original-Bauteilen ermittelten Grenzwerte dürfen die berechneten Betriebsspannungen in den kritischen Bereichen nicht unterschreiten, wobei stets ein Vertrauensbereich von $\pm 3 \sigma$ zugrunde gelegt wird.

| Merkmals | Abnahmegrenze |
|-----------------------|---------------------------|
| Lineare Anzeige (Riß) | < 0.2 mm |
| Bundefehler | unzulässig |
| Porengröße | < 0.3 * t, stets < 1.0 mm |
| Porenabstand | > 3*d |
| t: Dicke | |
| d: Porendurchmesser | |

Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten Merkmale und Abnahmegrenzen bei der Röntgenprüfung für EB-Schweißnähte bei Bauteilen der Sicherheitsklasse 1.

Im vorliegenden Anwendungsfall sollte zunächst durch ein Probenprogramm nachgewiesen werden, daß EB-geschweißte Proben die LCF-Lebensdauer des Grundwerkstoffes bei den gegebenen Randbedingungen (Wandstärke, EB-Schweißparameter) nicht unterschreiten.

5 Werkstoffe

Im Verdichter moderner Flugtriebwerke werden aufgrund der hohen spezifischen Festigkeit (Verhältnis zwischen Festigkeit und Gewicht) überwiegend Titanlegierungen eingesetzt. Diese Werkstoffe werden häufig in sogenannter bimodaler Mikrostruktur verwendet, d.h. eine

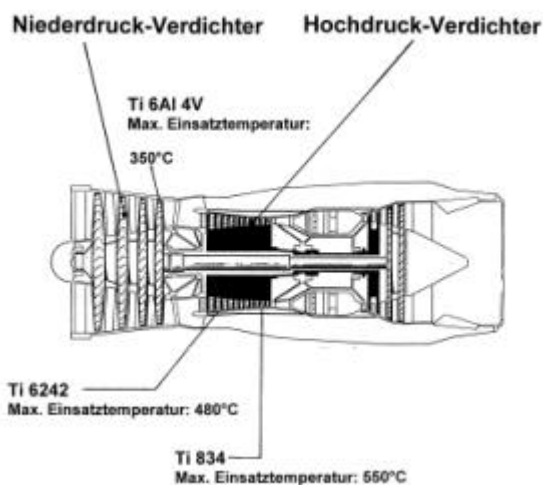


Bild 5: Einsatzbereich der im Verdichter von Flugtriebwerken häufig verwendeten Titanlegierungen TiAl6V4, Ti6242 und IMI834

globulitische Primär- α -Phase (mit 5-45 Vol%) ist in eine lamellare α/β -Matrix eingebettet. Während die ältere ($\alpha+\beta$)-Standardlegierung TiAl6V4 nur im relativ kalten Bereich des Verdichters eingesetzt werden kann, kommen die beiden Ti-Hochtemperaturlegierungen Ti6242 (mit 6% Al-, 2% Sn-, 4% Zr- und 2% Mo-Massenanteil) und IMI834 (mit 6% Al-, 4% Sn- und 3.5% Zr-Massenanteil) auch in heißeren Bereichen, z.B. im Hochdruckverdichter, zum Einsatz. Bild 5 zeigt den Einsatzbereich der oben genannten Titanlegierungen. Da bei Ti6242 und IMI834 der α -Anteil wesentlich größer als bei der Standardlegierung TiAl6V4 ist, werden beide Titanwerkstoffe als Near- α -Legierungen bezeichnet. Bild 6 zeigt exemplarisch das Gefüge der Near- α -Titanlegierung Ti6242 im Grundwerkstoff, in der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) und in einer EB-Schweißnaht.

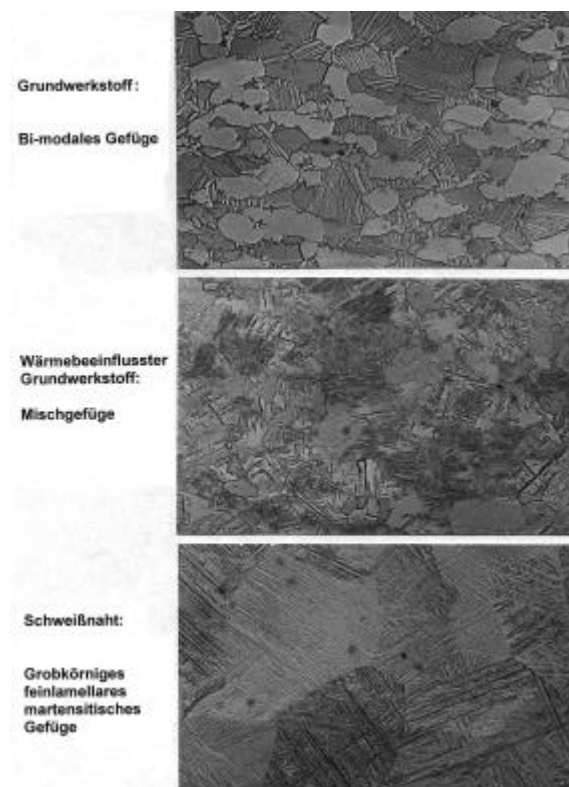


Bild 6: Gefüge der Near- α -Titanlegierung Ti6242 im Grundwerkstoff, in der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) und in einer EB-Schweißnaht.

Grundsätzlich gelten Titanlegierungen mit einem α/β -Mischgefüge als gut schmelzschweißbar. Aufgrund der hohen chemischen Affinität von Titan zu Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff muß jedoch beim WIG- und Laserstrahlschweißen mit aufwendigen Schutzgasvorrichtungen gearbeitet werden. Das Elektronenstrahlschweißen in der Vakuumkammer bietet im Vergleich dazu ideale Voraussetzungen für das Schweißen von Titanwerkstoffen.

6 Verfahrenserprobung

6.1 EB-Schweißanlage

Die Verfahrenserprobung zum EB-Schweißen und die anschließende Serienfertigung werden an einer Anlage

mit maximal 150 kV Beschleunigungsspannung („Hochspannungsanlage“) durchgeführt.

6.2 Nahtausführung

Die Naht wurde als I-Stoß mit Zentrierlippe ausgelegt. Bild 7 zeigt schematisch die geometrische Konfiguration der Nahtausführung mit einer schematisch eingezeichneten Einschweißung. Obwohl diese Nahtausführung einen höheren Aufwand bei der Nahtvorbereitung erfordert, bietet sie mehrere Vorteile:

- (a) Die Werkstücke können bei geringem Vorrichtungsaufwand formschlüssig positioniert werden.
- (b) Am Strahlaustritt treten nahezu keine Spritzer auf, welche das fast fertig bearbeitete Bauteil beschädigen und damit zum Ausschuß führen können.
- (c) Die Zentrierlippe bewirkt eine Unterstützung des Schmelzbades.
- (d) Die eingebrachte Streckenenergie ist geringer als bei einer vollständigen Durchschweißung.

Die in den Punkten (c) und (d) genannten Vorteile tragen zu einer Minimierung der geometrischen Toleranzabweichungen bei.

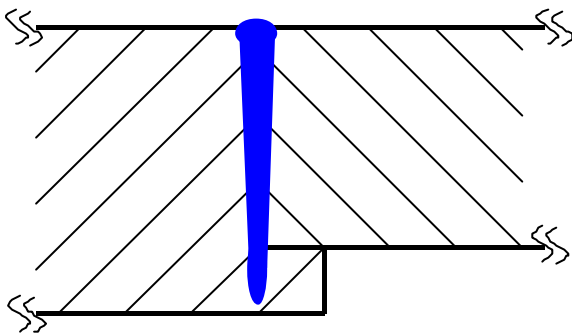


Bild 7: Geometrische Konfiguration der Nahtausführung mit einer schematisch eingezeichneten Einschweißung.

6.3 Schweißproben

Zur groben Festlegung der EB-Schweißparameter wurden zunächst einfache Flachproben verwendet und die EB-Schweißungen als Blindnähte ausgeführt. An diesen Proben wurde insbesondere das Ausfädeln des Elektronenstrahls simuliert. Dazu wurde zunächst eine Blindnaht geschweißt. Zur Simulation des Ausfädelns wurde die zuerst geschweißte Blindnaht mit einer weiteren Blindnaht überschweißt.

Im nächsten Schritt wurden die an Flachproben ermittelten EB-Schweißparameter auf ringförmige Proben (entsprechend dem Durchmesser der Original-Bauteile) mit der oben beschriebenen Nahtausführung übertragen. Die Proberinge entsprachen bezüglich Abmessungen, der Nahtform und dem Werkstoffzustand dem originalen Bauteil.

7 Ergebnisse

Die Optimierung der EB-Schweißparameter ergab, daß die Verbindung zwischen den beiden Titanwerkstoffe Ti6242 und IM1834 (Blisk Stufe 2 und Flansch) mit den gleichen EB-Schweißparametern wie die Verbindung

zwischen den artgleichen Werkstoffen Ti6242 (Blisk Stufe 1 und Blisk Stufe 2) EB-geschweißt werden kann. In beiden Fällen betrug die Schweißgeschwindigkeit 1.0 m/min. Zur Vermeidung von Poren wurde mit einer kreisförmiger Strahlwedelung gearbeitet.

Im Ausfädelbereich der Rundnaht wurde zur Vermeidung von Fehlstellen eine separate wegabhängige Optimierung der EB-Schweißparameter durchgeführt. Optimale Ergebnisse wurden erreicht, indem der Strahlstrom I_S im Ausfädelbereich linear auf 0 reduziert wurde. Gleichzeitig wurde der Linsenstrom I_L über die gleiche Wegstrecke in zwei Schritten linear erhöht. Bild 8 zeigt schematisch den Verlauf von I_S und I_L als Funktion der Ortskoordinate.

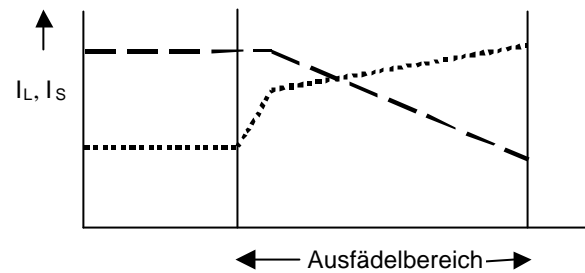


Bild 8: Linsenstrom I_L (-----) und Strahlstrom I_S (- · -) als Funktion der Ortskoordinate. Im Ausfädelbereich tritt eine Überlappung der Naht auf.

In den Bildern 9a und 9b ist jeweils ein Querschliff der EB-Schweißnaht (Werkstoff: Ti6242) außerhalb bzw. innerhalb des Ausfädelbereiches dargestellt. Durch die Defokussierung des Strahls im Ausfädelbereich wird die Naht am Strahleintritt verbreitert.

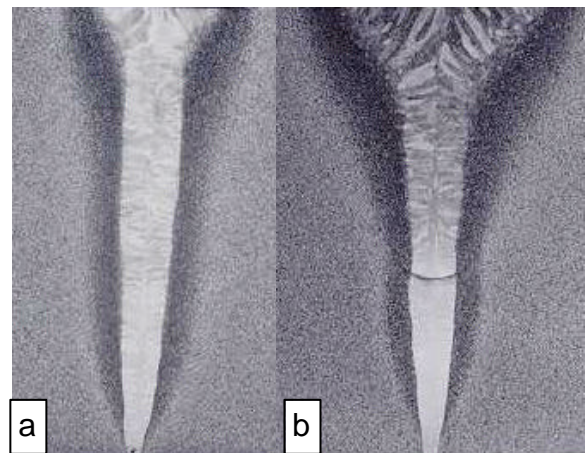


Bild 9: Querschliff der EB-Schweißnaht (Werkstoff: Ti6242) außerhalb (a) und innerhalb (b) des Ausfädelbereiches dargestellt. Die Nennstärke beträgt 11 mm.

Das Bild 10b zeigt als Beispiel das Ergebnis einer Ultraschallprüfung an einer Elektronenstrahlschweißnaht im Ausfädelbereich bei Messung quer zur Strahlrichtung (Werkstoff: Ti6242). Bei offensichtlich ungeeigneten EB-Schweißparametern sind deutlich Ultraschall-Anzeigen entlang des Ausfädelbereiches zu erkennen. Diese Anzeigen korrelieren im dazugehörigen Längsschliff (s. Bild 10a) vollständig mit Fehlstellen, die durch den Spiking-

Effekt verursacht werden. Bei optimierten Schweißparametern sind bei der Ultraschallprüfung keine Anzeigen sichtbar (s. Bild 11b). Den dazugehörigen Längsschliff zeigt Bild 11a. Die Ultraschallprüfung bei Einschallung quer zur Strahlrichtung ermöglicht demnach für die Verfahrenserprobung eine qualitativ schnelle Beurteilung des Ausfädelbereiches der Elektronenstrahlschweißnaht. Sie ist jedoch als Serienprüfverfahren bei Einschallung in Strahlrichtung nur bedingt aussagefähig.

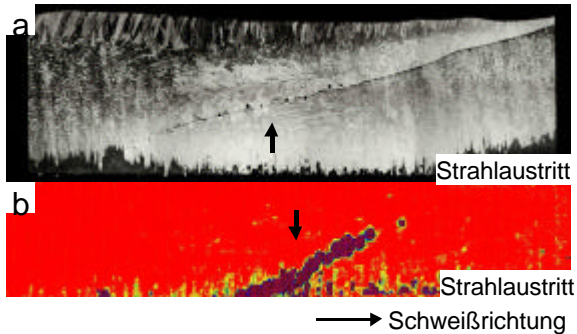


Bild 10: Längsschliff bei ungeeigneten Schweißparametern im Ausfädelbereich (a) und dazugehörige Ultraschallprüfung (b). Bild (a) und (b) sind verschieden skaliert. Die Pfeile in beiden Bildern zeigen auf die durch den Spiking-Effekt bedingten Fehlstellen im Ausfädelbereich. Die Nenndicke beträgt 11 mm.

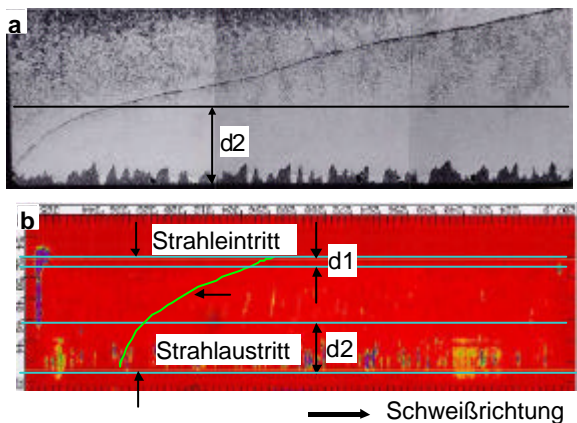


Bild 11: Längsschliff bei optimierten Schweißparametern im Ausfädelbereich (a) und dazugehörige Ultraschallprüfung (b). Bild (a) und (b) sind verschieden skaliert. In Bild 11b ist der Ausfädelbereich (s. Pfeil) markiert. Die mit d1 und d2 bezeichneten Bereiche werden bei der Endbearbeitung entfernt. Die Nenndicke beträgt 11 mm

Im Wurzelbereich der gesamten Rundnaht treten ebenfalls durch den Spiking-Effekt bedingte Fehlstellen auf (s. Bilder 10 und 11). Diese infolge des Einschweißprozesses verursachten Defekte erfordern in diesem Bereich ein Aufmaß. Dieses betrug im vorliegenden Anwendungsfall 4.5 mm. Für geometrisch bedingte Unregelmäßigkeiten an der Nahtoberseite wurde ein Aufmaß von 1 mm vorgesehen. Da das definierte Endmaß bei beiden Schweißverbindungen auf jeweils 5.5 mm festgelegt

wurde, betragen die Nenndicken für die zu fügenden Rohteile jeweils 11 mm (s. Kapitel 3).

Wie bereits erläutert, sind nur geringe geometrische Toleranzen zulässig. In Tabelle 2 sind die geforderten geometrischen Sollwerte den gemessenen Werten gegenübergestellt. Die Anforderungen an die Toleranzen wurden in jedem Fall erfüllt.

| Kriterium | Zulässige Toleranz | Gemessene Toleranzen |
|------------------|----------------------|----------------------|
| Axialer Schrumpf | 24/100 bis 36/100 mm | 26/100 bis 34/100 mm |
| Planlauf | 30/100 mm | 15/100 mm |
| Rundlauf | ----- | 3/100 mm |
| Einbrandkerben | < 0.8 mm | < 0.5 mm |

Tabelle 2: Zulässige geometrische Toleranzen (Sollwerte) und gemessene Toleranzen (Istwerte) der EB-geschweißten Blistrommel (s. Bild 2)

8 Festigkeitsuntersuchungen

Zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit, die das EB-geschweißte Bauteil unter Betriebsbeanspruchung ertragen kann, werden üblicherweise Low cycle fatigue (LCF)-

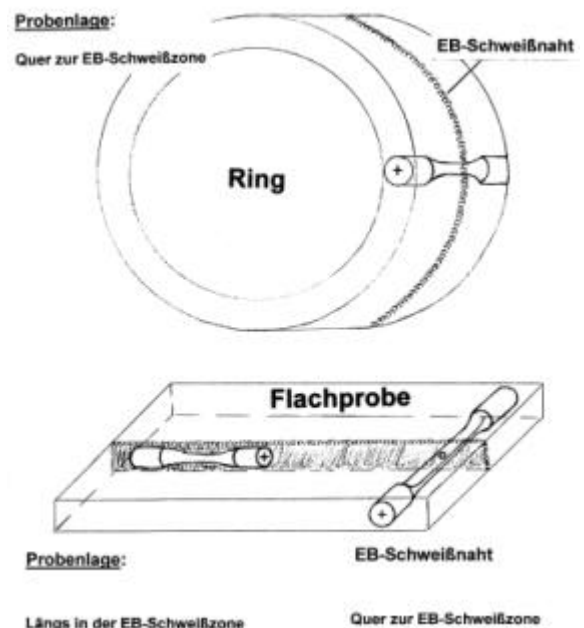


Bild 12: Mögliche Lage der LCF-Prüfproben

Zug- oder Biegeproben aus EB-geschweißten Flachproben oder Ringen entnommen und bei den für das Bauteil relevanten Temperaturen geprüft. Die Abmessungen der Ringe entsprechen bezüglich des Durchmessers und der zu verschweißenden Nenndicke dem Original-Bauteil. Bei LCF-Prüfungen in Richtung der Schweißnaht müssen aus geometrischen Gründen zwangsläufig Flachproben verwendet werden. Bild 12 zeigt die in Betracht kommenden Probenlagen an einem EB-geschweißten Ring bzw. an einer EB-geschweißten Flachprobe.

Mit der LCF-Prüfung in Richtung der Schweißnaht kann z.B. gezielt der Ausfädelbereich des Elektronenstrahls geprüft werden. Im folgenden wird insbesondere auf die LCF-Prüfung quer zur EB-Schweißnaht (Werkstoff Ti6242) eingegangen, d.h. die Ausrichtung der Probe ist identisch mit der Triebwerkachse. Auf zwei der in Bild 13 dargestellten Prüfproben ist eine Bohrung erkennbar. Die Lage dieser Bohrung kann gezielt variiert werden. Dadurch kann der bei der LCF-Prüfung entstehende Anriß entweder in der Schweißnaht oder in der wärmebeeinflussten Zone des Grundwerkstoffes erzwungen werden.



Bild 13: LCF-Prüfproben. Für die hier vorgestellten Ergebnisse wurden nur Proben mit Bohrungen (oben links bzw. rechts) verwendet.

Die LCF-Proben werden auf servohydraulischen Prüfmaschinen (siehe Bild 14) kraftgesteuert geprüft und gegebenenfalls nach erfolgtem Bruch mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops und zusätzlicher metallographischer Schlitte nachuntersucht. Bild 15 zeigt als Beispiel den Rißausgang und den Rißverlauf im Bereich der Fügezone. Die Bohrung wurde in diesem Fall direkt in die Schweißnaht gelegt, so daß der Anriß dort erzwungen wurde.

Bild 16 zeigt die Auswertung der LCF-Prüfung in der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) der EB-Schweißnaht bei einer Prüftemperatur von 400°C. Dazu wurde die oben beschriebene Bohrung der Prüfprobe in die WEZ positioniert. In dem Diagramm ist die Oberspannung in relativen Einheiten gegen die Bruchlastwechselzahl N_B aufgetragen. Die durchgezogene Linie entspricht dem Grundwerkstoff Ti6242. Die Meßwerte bei $N_B = 10^5$ Lastwechseln entsprechen Durchläufern bei der LCF-Prüfung. Die Meßergebnisse zeigen, daß die LCF-Festigkeit in der WEZ nicht geringer als im Grundwerkstoff ist.



Bild 14: Prüfmaschine für die LCF-Prüfung

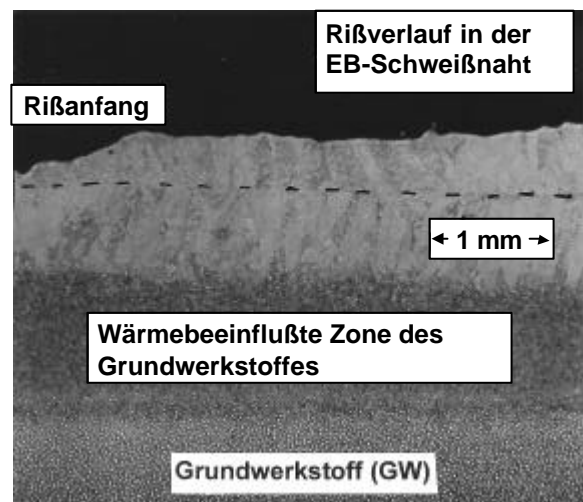


Bild 15: Querschliff durch eine gebrochene LCF-Prüfprobe. Der Riß wurde durch eine Bohrung in der EB-Schweißnaht initiiert.

Aus dieser und weiteren LCF-Probenprüfungen (die hier nicht vorgestellt werden) an EB-geschweißten Titanwerkstoffen geht hervor, daß eine fehlerfreie EB-Schweißnaht eine höhere Ermüdungsfestigkeit als der Grundwerkstoff besitzt.

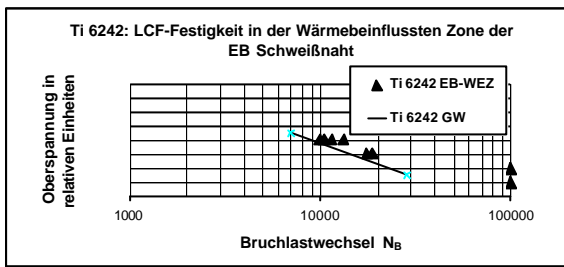


Bild 16: Auswertung der LCF-Prüfung in der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) der EB-Schweißnaht bei einer Prüftemperatur von 400°C.

Schrifttum

- [1] Peter Adam, Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken, Birkhäuser Verlag, Basel (1998)
- [2] Helmut Schultz, Elektronenstrahlschweißen, DVS-Verlag, Düsseldorf (2000)