Vorteile des Elektronenstrahlverfahrens bei Titanbauteilen

Titan ist besonders für aussergewöhnliche Anforderungen geeignet und gehört mit einem Gewicht von 4,51 g/cm³ zu den wichtigsten Leichtmetallen. Es ist zwar doppelt so schwer wie Aluminium, aber um etwa die Hälfte leichter als Stahl mit deutlich höheren Festigkeitswerten. Je nach Legierungszusätzen beträgt die Zugfestigkeit von Titan zwischen zirka 300 und 1150 N/mm².

Titan hat Festigkeitseigenschaften, die im Bereich der meisten Legierungsstähle liegen und behält diese Eigenschaften in einem Temperaturbereich von zirka 200 bis 635 °C mit hoher Korrosionsbeständigkeit bei, was in der Luft- und Raumfahrt geschätzt wird. An der Luft bildet Titan eine äusserst beständige oxydische Schutzschicht aus und widersteht dadurch beispielsweise viele Jahre hinweg salzhaltigem Seewasser. Grund dafür ist die Passivierung, welche einen erhöhten Widerstand gegen Angriffe durch Mineralsäuren und Chloride erreicht.

Selbst viele aggressive Säuren können Titanlegierungen nicht angreifen. Dieser Vorteil wird in der Chemieindustrie im Behälter- und Anlagenbau genutzt. Hinzu kommt, dass Titan eine deutlich bessere biomedizinische Verträglichkeit aufweist als Edelstahlbauteile, was bedeutende Vorteile in der Medizintechnik und Lebensmittelindustrie bietet. Grundsätzlich ist Titan biologisch kompatibel mit menschlichem Gewebe und Knochen und löst keinerlei Allergien aus. Zudem besitzt Titan eine niedrige elektrische Leitfähigkeit und hat einen hohen Wärmeleitwiderstand. Es leitet etwa zwölfmal weniger Wärme als beispielsweise Aluminium. Aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften bestehen etwa 30 Prozent der modernen Triebwerke in der Luft- und Raumfahrt aus diesem unverzichtbaren Werkstoff und seinen Legierungen. Titan ist antimagnetisch und dadurch auch bei starken Wirbelstromfeldern nahezu unempfindlich.

Der steigenden Nachfrage an komplexen Teilen aus Titanverbindungen stand bisher ein hoher Preis entgegen, da die Herstellung von Titanbauteilen mit wesentlich höherem Aufwand und Kosten verbunden ist, als bei herkömmlichen Metallen. Gemessen am reinen Kilogrammpreis ist Titan verglichen zu Edelstahllegierungen hochpreisiger, für den professionellen Konstrukteur aber ein äusserst hochwertiges Material. Titan entfaltet in vielen Fällen erst dort komplett seine Eigenschaften, wo selbst gute Materialien wie 1.4581, 1.4461, 1.4571 oder 1.4462 an die Grenzen der Möglichkeiten stossen. So können beim Wechsel zu Titan entweder die Wanddicken reduziert oder die positiveren Eigenschaften wie höhere Festigkeit und Steifigkeit eingesetzt werden. Die Sicherheit eines Bauteils wird nicht erst durch die Qualität der Fertigung und der verwendeten Verfahren bestimmt. Der wesentliche Einfluss ist die Konstruktion, die neben der Gestaltung auch die Berechnung und die Werkstoffauswahl umfasst. Dies trifft insbesondere zu, wenn im Fertigungsablauf ein Fügeprozess enthalten ist. Entsprechend gewinnen auch die Fügeverfahren bei Titan-Schweisskonstruktionen aufgrund ihrer überlegenen physikalischen und mechanischen Eigenschaften an Bedeutung.

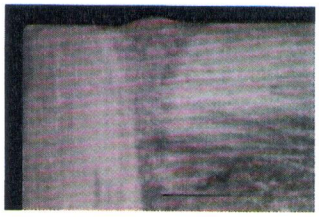
Handelsmarke TIKRUTAN®	Dichte g/cm³	Spezifische Wärme bei 20°C J/Kg K	Spezifische Wärme bei 400°C J/Kg K	Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient 10^{-6}/°C 20 - 200°C	Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient 10^{-6}/°C 20 - 400°C	Wärmeleitfähigkeit bei 20°C W/m K	Wärmeleitfähigkeit bei 400°C W/m K	Spezifischer elektr. Widerstand bei 20°C Ohm mm² / m	Spezifischer elektr. Widerstand bei 400°C Ohm mm² / m
RT 12	4,5	520	630	8,7	9,3	22,6	19,3	0,47	1,18
RT 15	4,5	520	630	8.7	9,3	22,6	19,3	0,48	1,18
RT 18	4,5	520	630	9,1	9,3	22,6	19,3	0,52	1,20
RT 20	4,5	520	630	9,4	9,3	20,1	20,5	0,55	1,22
RT 12 Pd	4,5	520	630	8,7	9,3	22,6	19,3	0,50	1,18
RT 15 Pd	4,5	520	630	8,7	9,3	22,6	19,3	0,50	1,18
RT 18 Pd	4,5	520	630	8,7	9,3	22,6	19,3	0,52	1,20
LT 27	4,5	520	630	9,5	9,3	19,0	-	0,52	-

Physikalische Eigenschaften (Richtwerte) der unlegierten und niedriglegierten Titansorten.

Bild: ThyssenKrupp AG

Besonderheiten beim Schweissen von Titan

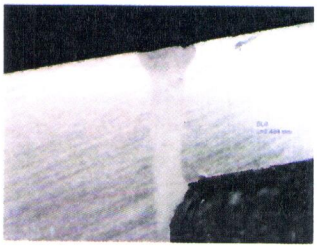
Titan und Titanlegierungen sind weiss und metallisch glänzend. Beim Abkühlen kristallisiert Titan in zwei Gefügemodifkationen, zunächst in die kubisch-raumzentrierte β-Phase und ab etwa 880 °C in die bei Raumtemperatur stabile hexagonale α-Phase. Mit Legierungszusätzen kann die Umwandlungsgrenze so verschoben werden, dass bei Raumtemperatur Titanlegierungen auch in α+β- beziehungsweise in β-Modifikation vorliegen. Reintitan mit α-stabilisiertem Sauerstoff dotiert und die α+β-Legierungen sind gut schweigeeigne. Titan zählt zu den gasempfindlichen Metallen und muss daher entweder mit Inertgasen, vorzugsweise hochreines Argon oder im Vakuum geschweisst werden.



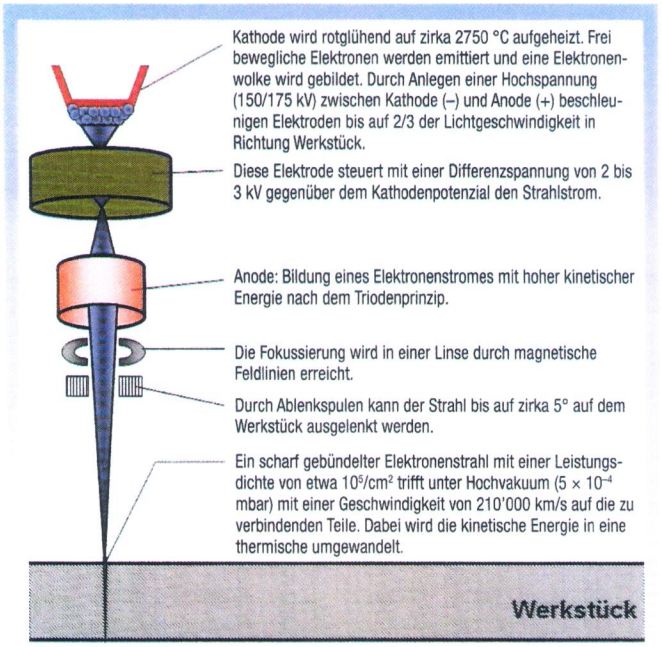
Titan «Grad 5» mit 7,8 mm Schweisstiefe.

Durch die hohe Affinität zu den atmosphärischen Gasen im erwärmten und schmelzflüssigen Zustand entstehen poröse und spröde Schweissnähte mit sogenannten Anlauffarben. Daher scheiden sämtliche Schweissverfahren aus, bei denen erwärmtes Titan mit einem dieser Gase in Kontakt kommen könnte. Beim Elektronenstrahlschweissen können Verunreinigungen in der Restatmosphäre in der Kammer auf ein Minimum reduziert werden und daher ist dieses Verfahren die bestmöglichste Methode, um Titan zu schweissen.

In der Raumfahrt gilt das Elektronenstrahlschweissen, auch EBW (electron-beam welding) ge-



2,5 mm Schweisstiefe mit Unterraupe, Titan «Grad 4».



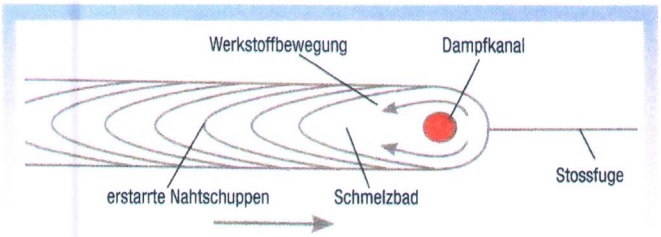
Prinzip einer Elektronenstrahlschweissanlage.

nannt, als eine hervorragende und besonders zuverlässige Fügetechnologie, die als einzig zugelassenes Verfahren für (Tief-) Schweissungen dieses Metalls zugelassen ist.

Elektronenstrahlschweiss-Verfahren

Das Prinzip dieser Technologie findet sich in jedem klassischen Fernseher oder Röhrenmonitor wieder. In der sogenannten «Braunschen Röhre» erzeugt ein feiner Strahl aus Elektronen einen Leuchtfleck auf dem Bildschirm. Trifft der Elektronenstrahl auf einen mit einer geeigneten Schicht bestrichenen Schirm, so leuchtet dieser im Auftreffpunkt des Elektronenstrahls auf. Das gleiche Prinzip findet auch beim Elektronenstrahlschweiss-Verfahren Anwendung, mit dem Unterschied einer signifikant höheren Leistung. Das EB-Schweissen im Vakuum (ohne Gase und Schweisshilfsstoffe) bietet mit seiner berührungslosen Arbeitsweise und hohen Strahlqualität zahlreiche Vorteile hinsichtlich hochgradiger Qualitätsanforderungen. Die Energie wird mit 150 kV Hochspannung im Vakuum durch ein Triodensystem erzeugt und dabei werden Elektronen aus einer Kathode gelöst und mithilfe von elektrischen Feldern zu einem Strahl geformt, welcher in Richtung des Werkstücks beschleunigt wird. Die Beschleunigungsspannung der Elektronen beträgt 30 bis 150 kV und der Brennfleckdurchmesser des Strahls liegt unter 1 mm. Die Elektronen fliegen mit $^2/_3$ Lichtgeschwindigkeit und prallen auf das zu verschweissende Werkstück auf. Dabei wird die kinetische Energie zum grössten Teil in Wärme umgewandelt. Der Elektronenbeschuss ist so intensiv, dass die Verdampfungstemperatur des Metalls erreicht wird und ein kleines Loch (Dampfkanal) im Schmelzbad gebildet wird und dadurch ein sogenannter Tiefschweisseffekt entsteht.

Das Schweissen der Werkstücke wird vorrangig durch die Ablenkung des Elektronenstrahls erreicht. Bei sehr grossen Bauteilabmassen ist eine Kombination aus der Bewegung von Werkstück und Strahl möglich. Elektronenstrahlschweissen erlaubt hohe Schweissgeschwindigkeiten und sehr tiefe, schmale und parallele Nähte. Diese Präzision eignet sich auch für kleine und komplex geformte Schweissnähte, bei denen der Elektronenstrahl durch elektrische oder magnetische Felder entlang der Schweissnaht abgelenkt wird, ohne das Werkstück zu bewegen. Die schnelle Ablenkung kann auch für paralleles Schweissen mehrerer Nähte zeitsparend genutzt werden. Das EB-Schweissen bietet eine ähnliche Leistungsflussdichte wie Laserstrahlschweissen, allerdings ist der Wirkungsgrad des Elektronenstrahls mit etwa 70 Prozent deutlich grösser und effizienter. Durch die hohe Energiedichte des Elektronenstrahls können höchstschmelzende Werkstoffe wie Wolfram, Titan usw. aber auch Mischverbindungen von unterschiedlichsten Metallen mit grossen Einschweisstiefen gefügt werden. Damit es nicht zur Ablenkung des Elektronenstrahles kommt, werden alle magnetischen Einflüsse von Vorrichtungen und Bauteile vor dem Schweissen entmagnetisiert.



Dampfkanal

Projektablauf beim Elektronenstrahlschweissen

1. Konstruktion

Die Anwendung des Elektronenstrahlschweissverfahrens ermöglicht dem Konstrukteur viele neue Alternativen, die bereits bei der Entwicklung und der Definition eines Bauteils beginnen.

Die I-Naht stellt beim Elektronenstrahlschweissverfahren, bei dem kein Zusatzwerkstoff verwendet wird, die ideale Nahtvorbereitung dar und kann in dieser Form in nahezu jeder Schweissverbindung realisiert werden. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten in der Ausführung, von denen einige aus-

Anzeige

schliesslich mit den Strahlschweissverfahren als Längs- und Rundnähte realisiert werden können. Die Schweissnahtvorbereitung ist beim Elektronenstrahlschweissen verhältnismässig einfach, da die Einzelteile lediglich möglichst spaltfrei (technischer Nullspalt) zueinander in Position gebracht werden müssen. Die zu verschweissenden Flächen sind bearbeitet und sollten bei Dicken über 10 mm eine Oberflächenrauigkeit von Ra <3,2 µm aufweisen und abstandsfrei aneinander anliegen, um eine exakte und kerbfreie Oberfläche zu erhalten. Dabei sind die Einhaltung von Form- und Lagetoleranzen sowie die Rauigkeit der Oberflächen am Fügestoss von grosser Bedeutung. Viele weitere konstruktive Möglichkeiten (Design, Werkstoffe usw.) können von fachkundigen Lohnunternehmen angeboten werden.

2. Reinigung von Fügeteilen

Unreinheiten, sowohl in der Legierung wie auch an der Oberfläche der Fügezone, können die Nahteigenschaften beeinträchtigen und zu Unregelmässigkeiten führen. Um Schweissnähte von höchster Qualität herzustellen, müssen vor dem Schweissen von Titan die Verbindungsstellen gründlich von allen Kohlenwasserstoffverunreinigungen und jeglichen Schmutzpartikeln gereinigt werden. Dies kann mechanisch durch Schleifen, Feilen oder Edelstahldrahtbürsten erreicht werden. Es gibt auch chemische Reinigungsmethoden wie beispielweise Eintauchen in ätzende Lösungen, die wirksam sein können. Es ist ebenfalls darauf zu achten, das Teil mit absolut trockener und sauberer (ölfreier) Luft abzublasen.

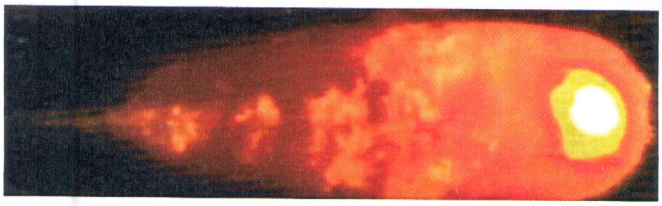
Das gewählte Reinigungsverfahren wird weitgehend durch die Konfiguration des Teils bestimmt. Der Kohlenwasserstoffrückstand auf Titan wird mit Aceton oder einem Lösungsmittel auf Alkoholbasis entfernt. Es ist sicherzustellen, dass frisch gereinigte Titanteile daraufhin möglichst zeitnah geschweisst werden. Ist dies nicht möglich, sollten gereinigte Teile in luftdichten Plastikbeuteln aufbewahrt werden, die mit einem neutralen Gas wie Argon gefüllt sind.

3. Fixierung der Teile

Das computergesteuerte Elektronenstrahlschweissen erfordert eine genaue Positionierung der zu schweissenden Einzelteile, um eine hohe und zuverlässige Reproduzierbarkeit erzielen zu können. Der Elektronenstrahlschweissprozess kommt ohne Zusatzwerkstoff (Füllmaterial) aus und erfordert daher einen maximal zulässigen Spalt (technischer Nullspalt) zwischen den Einzelteilen.

4. Ermittlung Schweissparameter

Die notwendigen Prozessparameter sind nicht in Merkblättern oder Regelwerken vereint und müssen für jeden Anwendungsfall erarbeitet und ermittelt werden. Damit ein verzugsarmes Schweissen mit schmalen Schmelz- und Wärmeeinflusszonen entsteht, ist der Elektronenstrahl mit seiner hohen Leistungsdichte zu einem Fokus von weit unter 1mm Durchmesser zu bündeln.



Schmelze mit Dampfkanal.

Dabei werden die wichtigsten und relevantesten Parameter wie Spannung, Leistung, Fokuslage, Geschwindigkeit, Stromstärke, Nahtform und Brennfleckgeometrie in experimentellen Untersuchungen definiert. Die Einflussgrösse der Parameterermittlung unterliegt den grundsätzlichen Rahmenbedingungen wie:

- Schweissnahtbreite
- Schweissnahttiefe
- Schweissnahtform

Aber auch die Materialbeschaffenheit hinsichtlich Legierungselemente und die Werkstückgeometrie sind wesentliche Faktoren, welche zu berücksichtigen sind.

Alle Parameter können sowohl digital von Hand als auch numerisch programmiert werden. Damit erzielt der Elektronenstrahlschweissprozess eine sehr hohe Reproduzierbarkeit.

5. Schweissung

Das Schweissen mit Elektronenstrahl im Vakuum ist für den Werkstoff Titan besonders geeignet, da die minimale Wärmeeinbringung mit einer hohen Leistungsdichte überdurchschnittlich schmale Nähte und geringste Schweissspannungen erzielt. Der reaktive Werkstoff Titan TiAl6V4 wird gewöhnlich bei Dicken zwischen 4 und 22 mm im Hochvakuum (10-4 mbar) bei Schweissgeschwindigkeiten von 8 bis 60 mm/s mit einer Beschleunigungsspannung von 110 bis 150 kV und Stromstärken von 20 bis 50 mA geschweisst. Die Schmelztemperatur von Titan liegt bei 1668 °C. Damit die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften nach dem Schweissen weitgehend beigehalten werden kann, muss der gesamte Temperaturzyklus, vom Aufschmelzen bis zum vollständigen Erkalten, im Vakuum gezielt gesteuert werden. Damit die Zähigkeitseigenschaften nach dem Schweissen weitgehend erhalten bleiben, ist die hohe Affinität von erwärmtem Titan zu Gasen zu berücksichtigen. Wegen der dürftigen Duktilität von Titanlegierungen sollen Eigenspannungen im Bauteil vermieden werden. Dies wird unter anderem erreicht, indem im lösungsgeglühten Zustand die als I-Naht gestaltete Form vollständig durchgeschweisst wird.

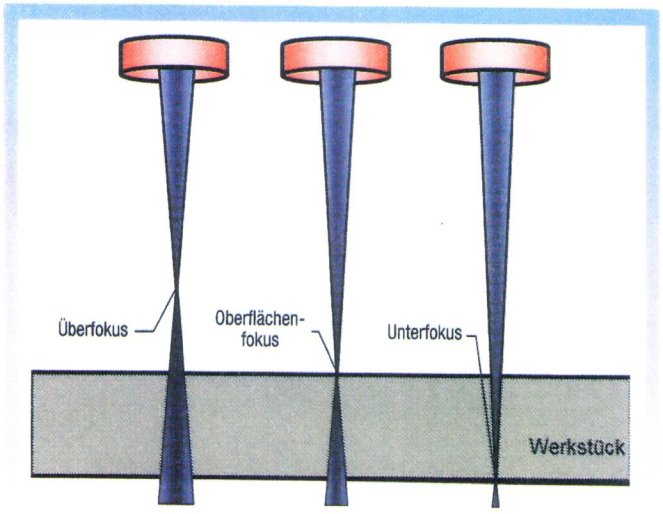
6. Tiefschweisseffekt

Der Tiefschweisseffekt tritt bei höheren Strahlintensitäten von >106 W/cm² auf. Dabei wird der Werkstoff durch den Elektronenstrahl so stark aufgeheizt, dass die Verdampfungstemperatur überschritten wird. Durch den Druck des Metalldampfes entsteht in der Mitte der Schmelze ein Dampfkanal, auch Dampfkapillare genannt. Durch die Vorschubbewegung des Elektronenstrahls wird bildlich eine kleine Röhre durch den Werkstoff gezogen, wobei die Schmelze die Kapillare mit einem Durchmesser in der Grössenordnung des Brennfleckdurchmessers umgibt. Mit dem Verdampfen des Werkstoffes an der Auftreffstelle können die Elektronen bis zu 100 mm tiefe Titanschweissnähte in einem Arbeitsgang und damit weitaus tiefere Nähte als alle anderen Verfahren erzeugen.

7. Prüftechniken

Zum Nachweis der Qualität von geschweissten Bauteilen können verschiedene zerstörungsfreie und zerstörende Prüfverfahren angewendet werden:

- Eine Farbeindringprüfung findet Anwendung zum Auffinden von äusseren Unregelmässigkeiten wie feinste Risse und Poren zur Oberfläche hin.
- Durchstrahlungs- und Ultraschallprüfung werden zum



Fokuslagen des Elektronenstrahls.

Auffinden von inneren Unregelmässigkeiten im Bauteil angewandt.
- Eine Härteprüfung liefert Ergebnisse, die sich mit den klassischen Verfahren wie Rockwell und Vickers prüfen lassen.
- Die Dichtheitsprüfung beurteilt die Dichtheit durch Messung mittels eines Heliumlecktestgeräts im Vakuumverfahren.
- Makroschliffe werden zur Kontrolle einer Schweissnahtgeometrie und -tiefe herangezogen.

Projektbeispiel, Herausforderung für das faszinierende Weltall

Beim neuesten Projekt durften Titanteile für eine Atomuhr im Hochvakuum geschweisst werden. Titan spielt als Leichtbauwerkstoff und Abschirmung für Hochfrequenzfelder in der Raumfahrt, aber auch in der Telekommunikation eine ausserordentlich wichtige Rolle. Titan hat eine hohe Affinität zu den atmosphärischen Gasen Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff. Bei Temperaturen über 550 °C werden vor allem Sauerstoffatome in das Metallgitter gebunden und verspröden somit die Schweissnaht.

Das Schweissen von Titan und Titanlegierungen (Schmelzpunkt 1668 °C) ist geradezu prädestiniert für die Elektronenstrahlschweiss-Technik, da die gestellten Anforderungen und Qualitätskriterien lediglich bei einer Anwendung unter Hochvakuum erfüllt werden können.

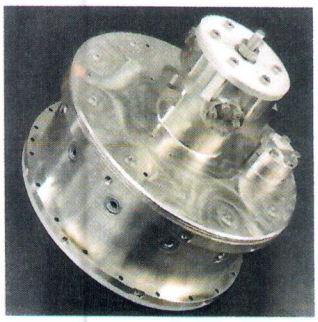
Die Atomuhren der Neuenburger Firma «SpectraTime» gelten als präziseste Uhren im ganzen Weltall. Die Positionierung und Navigation von mehreren Satelliten beruht auf der Signalübertragung, die auf ein Milliardstel einer Sekunde genau miteinander synchronisiert werden.

Je präziser diese Uhren sind, desto genauer sind die Angaben, welche die GPS-Navigationssysteme liefern können. Die grenzenlosen Ablenkmöglichkeiten und die einmalige Strahlqualität machen den Elektronenstrahl zu einem Fügewerkzeug allerhöchster Qualität, welches auch für die Wissenschaft immer neue Meilensteine ermöglicht.

Projektbeispiel, gezieltes Bersten

Berstscheiben sind Sicherheitseinrichtungen und werden dort eingesetzt, wo eine sofortige Druckentlastung bei einer vorgegebenen Temperatur erforderlich ist. Sie dienen dem Schutz vor Überdruck innerhalb eines Prozesses zum Beispiel bei Behältern, Rohrleitungen und anderen unter Druck stehenden Systemen. Wenn der Druck des Mediums in einem Anlagenteil über den zulässigen Betriebsdruck ansteigt, öffnet die Berstscheibe beim entsprechenden Berstdruck und entlässt so den ungewünschten Überdruck aus dem Behälter. Mit dem Hintergrund von wachsenden Anforderungen wie Wechseldrücke, höhere Prozesstemperaturen und die zunehmende Technologisierung durften wir eine weiterentwickelte Version einer Berstscheibe schweissen.

Der grösste Vorteil von Berstscheiben gegenüber elektronisch und pneumatisch betriebenen Sicherheitssystemen ist die Ausfallsicherheit, was jene zur



Projektbeispiel: Geschweisste Titanteile in einer Atomuhr.

wirtschaftlichsten und wichtigsten Sicherheitseinrichtung in industriellen Betrieben macht. Andere Schweissverfahren konnten die geforderte Bauteilfestigkeit und Dichtheit nicht erzielen. Lediglich durch das Elektronenstrahlschweiss-Verfahren wurden die gewünschten Ziele erreicht.

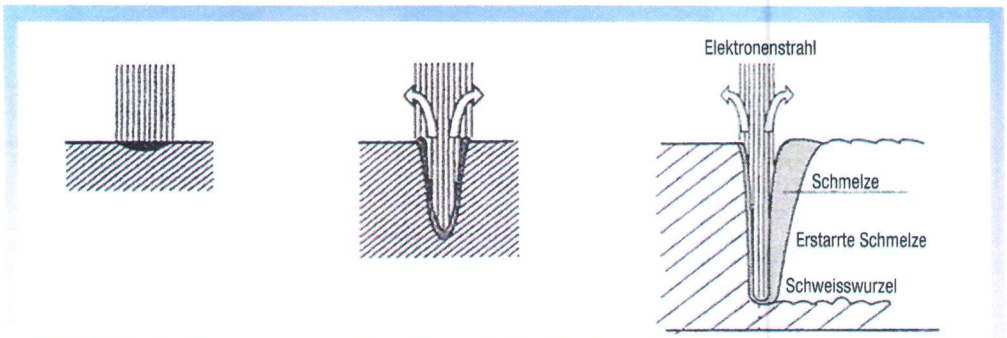
Verbindungen von Titan mit anderen metallischen Werkstoffen

Eine Schweissverbindung von Titan mit anderen metallischen Werkstoffen, wie beispielsweise Stahl mit Titan, bereitet aufgrund der Bildung von intermetallischen Phasen keine technisch brauchbare Schweissverbindung.

Es sei denn über eine Zwischenlage aus Werkstoffen, mit denen sich sowohl Titan als auch Stahl verschweissen lassen, kann eine Verbindung ohne spröde Phasen entstehen. Ein solcher Werkstoff ist Vanadium. Verbindungen aus Titan, Vanadium und Stahl wurden bereits durch das Elektronenstrahlschweiss-Verfahren hergestellt. Die Anwendung dieser Mischverbindung ist aufgrund des zusätzlichen Aufwands (Zwischenschichten) nur auf spezielle Einzelfälle beschränkt und muss im Einzelfall geprüft werden.

Wesentliche Vorteile der Elektronenstrahlfügetechnik

- Automatisierbar
- Keine Schutzgase nötig, da der Prozess im Vakuum erfolgt
- Elektronenstrahl ist sehr exakt und schnell lenkbar
- Mehrstrahlschweissen möglich
- Hohe Energiedichte und geringe Wärmeeinbringung
- Tiefschweisseffekt –> Grosse Werkstoffquerschnitte in einer Lage schweissbar
- Ausbildung schmaler und tiefer Nähte sowie sehr geringe Wärmeeinflusszone
- Gegenüber anderen Schweissverfahren sehr geringer Verzug der Konstruktion
- Geringere Rissgefahr durch Beibehaltung der Plastizität
- Schweissen geometrisch schwieriger Werkstücke wie Hohlkörper, I-Profile möglich
- Geringe Strahlausweitung von etwa 0,5° –> Schweissen in engen Spalten möglich
- Fügen feinster Folien/Fertigen von Tiefenschweissungen
- Festigkeit der Schweissnaht in Höhe des ungeschweissten Grundwerkstoffes
- Verbinden gasempfindlicher Werkstoffe wie Titan, Tantal, Zirkon usw.



Elektronenstrahl schmilzt die Werkstückoberfläche

Im Kern bildet sich eine Dampfkapilare, welche ein weiteres Eindringen der Elektronen ermöglicht

Dampfkanal und Schmelzkanal haben die gewünschte Tiefe im Werkstück erreicht

Tiefschweisseffekt.

INFOS | KONTAKT
SwissBeam AG
Grossmattrain 3
CH-8964 Rudolfstetten
T +41 (0)44 545 20 80
www.swissbeam.ch
info@swissbeam.ch