

Hinweise zum Schweißen von Titan und Titanlegierungen

Aufgrund der hohen Affinität von Titan zu den atmosphärischen Gasen Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff scheidet sämtliche Schweißverfahren aus, bei denen das schmelzflüssige Metall mit einem dieser Elemente in Kontakt kommen kann und somit eine Versprödung des Werkstoffes zur Folge hätte.

Ein autogenes Schweißen ist deshalb nicht möglich.

Als Schmelzschweißverfahren werden in erster Linie Schweißverfahren unter Edelgasatmosphäre (WIG- und MIG-Verfahren) angewendet. Weitere mögliche Verfahren unter Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Belange sind das Plasma-, das Widerstands-, das Elektronenstrahl-, das Ultraschall-, das Diffusions-, das Laser-, das Reib- und das Sprengschweißen.

Während das WIG-Verfahren das weitest verbreitete Schweißverfahren für Titanwerkstoffe im Behälter- und Apparatebau ist, wird das Plasmaschweißen hauptsächlich für das Fügen dicker Platten eingesetzt. In der Luft- und Raumfahrt kommen dagegen überwiegend das Elektronenstrahl- und das Diffusionsschweißen zur Anwendung.

Die mechanischen Eigenschaften des Grundmaterials werden auch größtenteils in der Schweißnaht erreicht. Ein geringer Duktilitätsverlust, der in erster Linie auf die in der Schmelzzone sich bildenden gröberen Gefügestruktur zurückzuführen ist, kann jedoch auftreten.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß bei unsachgemäßer Schweißung sowohl die Zähigkeit als auch die Korrosionsbeständigkeit der Schweißnaht erheblich beeinträchtigt werden können.

Titanschweißnähte erweisen sich unter passivierenden Bedingungen in ihrer Korrosionsbeständigkeit dem Grundmaterial gleichwertig. Lediglich in Medien, in denen bereits das Grundmaterial angegriffen wird, wie dies z. B. in reduzierend wirkenden Agenzien geschieht, kann die Schweißnaht verstärkt korrodieren.

Eine Wärmebehandlung nach dem Schweißen ist bei den Reintitanwerkstoffen im Regelfall nicht erforderlich. Lediglich bei sehr komplexen Bauteilen oder Mehrlagenschweißungen sowie bei Titanlegierungen ist ein Spannungsarm- oder Rekristallisationsglühen zum Abbau der Schweißspannungen zu empfehlen.

1. Metall Schutzgas (MSG) Schweißen (WIG-/MIG-Verfahren)

Wie beim Schmelzen von Titan muß auch beim Schweißen der Zutritt der Atmosphäre zur Schweißnaht selbst, zur Wärmeeinflußzone und den angrenzenden Bereichen des Grundwerkstoffes verhindert werden. Darüber hinaus muß die Wurzel Seite vor dem Zutritt von Luft geschützt werden. Der Schutz ist auch während der Abkühlung bis ca. unter 300°C aufrechtzuerhalten.

Erreicht wird dies je nach Geometrie und Abmessung der zu verschweißenden Teile durch Schutzgasbrausen, Schleppdüsen, poröse Unterlegschiene oder durch ein Schweißen in evakuierbaren und mit Schutzgas gefüllten Kammern.

Als Schweißzusatz ist eignungsgeprüfter Blankdraht der gleichen Titangruppe zu verwenden. Für die Eignungsprüfung ist das VdTÜV-Merkblatt 1153 maßgebend. Da in der betrieblichen Praxis oft eine geringe Aufhärtung der Schweißnaht durch die Aufnahme kleiner Mengen atmosphärischer Gasbestandteile nicht immer verhindert werden kann, ist ggf. Blankdraht einer niedrigeren Titangruppe als der des Grundwerkstoffes zu wählen.

Müssen Schweißverbindungen zwischen Titanwerkstoffen unterschiedlicher Festigkeit hergestellt werden, richtet sich die Wahl des Schweißzusatzwerkstoffes üblicherweise nach der im Vordergrund stehenden Anforderung an die Schweißnaht. Bei Priorität der Festigkeit wird Blankdraht der härteren Titangruppe verwendet, während Draht der weicheren Gruppe gewählt wird, wenn

Duktilitätsanforderungen von Bedeutung sind. Außerdem ist bei der Auswahl des Schweißzusatzes die Einsatztemperatur zu berücksichtigen.

Zur Erzielung qualitativ guter Schweißverbindungen ist eine sorgfältige Schweißnahtvorbereitung unerlässlich. Zweckmäßigerweise wird unmittelbar vor dem Schweißen durch Schmiegeln, Bürsten oder durch Entfetten und anschließendes Beizen in wässrigen Flußsäure-Salpetersäure-Lösungen der Schweißbereich von sämtlichen Oberflächenverunreinigungen befreit, um Schweißnahtfehler, wie z. B. Poren, Einschlüsse oder örtliche Aufhärtungen zu vermeiden. Da selbst Handschweiß im Bereich der Schweißnaht Aufhärtungen zur Folge hat, sollte unmittelbar vor dem Beginn des Schweißens der Schweißbereich mit einem fettlösenden Mittel, das keine Rückstände hinterläßt, nochmals gesäubert werden.

Bleche mit 2 - 2,5 mm Dicke können in einer Lage geschweißt werden. Bei größeren Dicken ist eine Zwei- oder Mehrlagenschweißung angebracht. Nach jeder Lage ist jedoch der Schweißbereich erneut gründlich von den Anlauffarben, die sich evtl. gebildet haben, zu reinigen. Dies gilt entsprechend auch für Heftstellen, deren Anzahl durch entsprechende Sorgfalt bei der Konstruktion der Schweißvorrichtung auf ein Mindestmaß beschränkt werden sollte. Zur Vermeidung örtlicher Sauerstoffanreicherungen sind auch vor jedem neuen Ansetzen die Oxidationsprodukte zu entfernen. Dies gilt ebenso für die Spitze des Schweißzusatzdrahtes, sofern sie oxidiert ist.

Die Schweißnaht, die erhitzten Randzonen und auch die Wurzelseite müssen mit Argon geschützt werden. Unter sehr günstigen Bedingungen kann der Schutz der Wurzelseite auch durch sattes Aufspannen des Werkstückes auf eine wärmeableitende, plane Unterlage erfolgen.

Die Schweißgeschwindigkeit und damit die Schweißstromstärke hängen von der Qualität des Schutzgasschleiers ab. Geschweißt wird mit Gleichstrom und negativ gepolter Elektrode. Als Schutzgas kommt meist Argon zur Anwendung. Gute Ergebnisse werden mit einer Argonmenge von etwa 6 bis 8 l/min erzielt. Eine höhere Durchflußgeschwindigkeit bewirkt keine Verbesserung des Schutzes sondern vielfach eine Wirbelbildung, die durch zu hohe Ausströmgeschwindigkeiten des Argons hervorgerufen wird. Es sollte Argon > 4.6 (Reinheitsgrad $\geq 99,99\%$) verwendet werden.

Neben der Reinheit ist der Feuchtigkeitsgehalt, der häufig in der Analyse nicht mit angegeben wird, von Interesse. Es kommt nur Argon mit besonders niedrigem Feuchtigkeitsgehalt in Betracht. Der Taupunkt sollte möglichst unter $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen.

Beim MSG-Schweißen sind alle Bedingungen so zu wählen, daß die fertige Naht metallisch blank ist. Anhand von eventuell aufgetretenen Anlauffarben lassen sich in gewissem Maße Rückschlüsse auf die Qualität der Schweißung ziehen. So deuten gelbliche bis bläuliche Anlauffarben auf eine geringfügige Aufhärtung der Schweißnaht hin, die allerdings noch tragbar ist. Das Auftreten dunkelblauer Anlauffarben oder gar einer grauen Oxidschicht weist hingegen auf einen zu geringen Schutz der Schweißnaht und damit auf Versprödungen durch eine Sauerstoff- und/oder Stickstoffaufnahme hin. Die Härte darf bei einer guten Schweißnaht bis max. 50 Härteeinheiten höher liegen als die des voll rekristallisierten Grundmaterials. Liefert eine Härteprüfung nach einem leichten Überschleifen der Nahtoberfläche höhere Werte, ist die Naht als versprödet anzusehen. Eine solche Schweißnaht muß restlos entfernt werden.

2. Plasmaschweißen

Neben dem Mikroplasmaschweißen ist das Plasmaschweißen besonders zum Fügen von Titanplatten mit Dicken zwischen 3 und 20 mm geeignet. Die Vorteile sind dabei im Gegensatz zum WIG-Schweißen in der größeren Einbrandtiefe, der höheren Schweißgeschwindigkeit und der geringeren Größe der Schweißnaht mit gleichmäßigeren Oberflächen (Decklage und Wurzelseite) zu sehen. Übertroffen wird das Plasmaschweißen in dieser Hinsicht nur noch von dem Elektronenstrahlschweißen.

3. Widerstandsschweißen

Titan läßt sich ohne Vorkehrungen und unter ähnlichen Bedingungen, wie sie für korrosionsbeständige Stähle gelten, punktschweißen. Auf die Verwendung von Schutzgas kann

aufgrund der Kürze des Stromstoßes und der verhältnismäßig geringen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit des Titans verzichtet werden.

Bei Verwendung von handelsüblichen Kupferbasiselektroden (z. B. Cu-Cr-Legierungen) mit flachem Kopf (Ballungsradius ca. 75 mm) sind hohe Scherfestigkeitswerte bei kleinen Elektrodeneindrücken, geringem Verzug, vermindertem Spritzen und weitgehender Porenfreiheit zu erzielen.

Ein Aufhärten der Schmelzzone bis ca. 50 Vickersheiten gegenüber dem Grundwerkstoff ist auch hier als normal anzusehen und beeinträchtigt die Festigkeitseigenschaften der Verbindung nicht nennenswert.

Beim Rollennahtschweißen und beim Abbrennstumpfschweißen sind Maschinen möglichst hoher elektrischer Leistung für kurze Erwärmzeiten zu wählen. Das Rollennaht- und Abbrennstumpfschweißen läßt sich nur unter Argonschutz durchführen.

4. Elektronenstrahlschweißen

Ein wesentlicher Vorteil des Elektronenstrahl-(ES/EB)-Schweißens ist die geringere Wärmeeindringtiefe, wodurch die Schweißspannungen und der Verzug gering bleiben. Dieses Schweißverfahren ist für Titan besonders geeignet und kann bis zu Dicken von ca. 100 mm als I-Naht, d.h. ohne Schweißzusatzwerkstoff eingesetzt werden.

Darüber hinaus bietet das ES-Schweißen im Vakuum eine Reihe von Vorteilen, da die große Leistungsdichte im Elektronenstrahl überdurchschnittlich schmale Nähte und engbegrenzte, anlauffarbenfreie Wärmeeinflußzonen, gute Schweißmöglichkeiten für große Dicken und hohe Schweißgeschwindigkeiten ermöglicht und eine exakte Reproduzierbarkeit auch komplizierter Schweißungen und damit die Garantie einer gleichbleibenden Qualität zuläßt.

Die zu verschweißenden Flächen sollten bei Dicken über 10 mm eine Oberflächenrauigkeit von $R_a < 3,2 \mu\text{m}$ aufweisen und abstandsfrei aneinander anliegen. Die Schweißnähte sind im allgemeinen zu bearbeiten, um eine exakte Prüfbarkeit und eine kerbfreie Oberfläche zu erhalten.

Als Richtwerte für das ES-Schweißen von Bauteilen mit Dicken zwischen 4 und 22 mm der Titanlegierung TiAl6V4 können bei Schweißgeschwindigkeiten von 9 - 70 mm/s Beschleunigungsspannungen von 110 - 150 kV und Stromstärken von 20 - 55 mA angegeben werden.

5. Diffusionsschweißen

Beim Diffusionsschweißen werden zwei metallische Oberflächen im Vakuum oder unter Schutzgas unter Druck und bei hoher Temperatur ohne lokale Aufschmelzung miteinander verbunden.

Dieser Vorgang bewirkt, daß die Fügezone ein dem Grundwerkstoff entsprechendes Gefüge aufweist. Im Idealfall ist sie beim Verschweißen gleicher Werkstoffe nicht mehr zu erkennen und besitzt die Festigkeitseigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit des Grundwerkstoffes.

Das Diffusionsschweißen ist für Titan deshalb so interessant, weil bei Titan leichter als bei anderen Metallen eine homogene Bindung im festen Zustand erreicht wird. Außerdem ermöglicht das Diffusionsschweißen, welches nicht nur linienförmige sondern auch großflächige Verschweißungen erlaubt, Materialeinsparungen immer dort, wo Teile aus dem Vollen gefräst oder kompliziert geschmiedet werden müssen.

Meistens wird das Diffusionsschweißen mit einer superplastischen Umformung kombiniert (SPF/DB).

6. Laserschweißen

Ähnlich wie beim ES-Schweißen liegt ein großer Vorteil des Laserschweißens in den geringen Schweißspannungen und der daraus resultierenden geringen Verzugsgefahr von Schweißkonstruktionen. Erreicht wird dies durch den aufgrund der hohen Energiedichte des

Laserstrahls entstehenden kleinen Schmelzbadquerschnitt und durch die hohe Schweißgeschwindigkeit. Vorteilhaft bei Titanwerkstoffen ist das Schweißen ohne Zusatzwerkstoff und zur Vermeidung von Aufhärtungen eine Spülung mit Schutzgas.

Die Tiefe der Schweißnaht und die davon abhängige verschweißbare Dicke wird in erster Linie über die Laserleistung geregelt. Mit dem Laserschweißen lassen sich Schweißnähte mit einem Breite/Tiefe-Verhältnis von bis zu 1:5 erzielen, so daß sich auch Bauteile durchschweißen lassen. Zudem können mit Hilfe des Laserschweißens auch an schlecht zugänglichen Bereichen kompliziert verlaufende Nähte geschweißt werden, da der Laserstrahl mit Linsen, Spiegeln oder Lichtleitfasern zur Bearbeitungsstelle geführt und fokussiert werden kann.

Mehrere Schweißversuche mit Titan und Titanlegierungen bis zu Dicken von 12 mm erfolgten sowohl mittels Co₂-Lasern als auch mittels Nd:YAG-Lasern. Die jeweilig verschweißten Dicken und die angewendeten Schweißgeschwindigkeiten sind dabei von der Laserleistung abhängig. Nähere Einzelheiten zu den Schweißparametern können den entsprechenden Veröffentlichungen entnommen werden.

7. Reibschweißen

Das Auftreten einer schmelzflüssigen Phase während des Schweißvorganges wird beim Reibschweißen vermieden. Die Verbindung der Oberflächen erfolgt im teigigen Zustand im Temperaturbereich der Warmumformung. Typische Fehler, die auf Aufschmelz- und Erstarrungsvorgänge zurückzuführen sind, wie Poren, Lunker, Schrumpfrisse, Seigerungen, Grobkorn und Gußgefüge treten daher nicht auf und die Gefahr der Gasaufnahme ist aufgrund der kurzen Schweißzeiten gering.

Das Reibschweißen wird mittlerweile u.a. auch in der Luftfahrtindustrie eingesetzt, um die einzelnen Schaufeln auf die Verdichterscheiben zu bringen. Ergebnisse liegen hierzu für die Titanlegierungen TiAl₆V₄, TiAl₆Sn₂Zr₄Mo₂ und TiAl_{5.8}Sn₄Zr_{3.5}Nb_{0.7}Mo_{0.5}Si_{0.35}C_{0.06} vor.

8. Schweißverbindungen von Titan mit anderen metallischen Werkstoffen

Das Verschweißen von Titan mit anderen metallischen Werkstoffen bereitet wegen auftretenden starken Versprödungen durch die Bildung von intermetallischen Phasen große Schwierigkeiten. Zahlreiche Versuche, Titan mit Hilfe des WIG-Verfahrens ohne Zusatzwerkstoffe mit Molybdän, Tantal, Silber und Vanadium zu verbinden, führten mit Ausnahme von Vanadium und Silber sowie auch mit Niob und Hafnium zu wenig verformungsfähigen Schweißnähten.

Eine Schweißverbindung von Stahl und Titan ist wegen der geringen Löslichkeit des Eisens im α -Titan bei Raumtemperatur sehr schwierig. So bilden sich beim Schweißen von Titan mit Stahl die intermetallischen Phasen TiFe und TiFe₂, die sehr hart und spröde sind und keine technisch brauchbaren Schweißverbindungen zulassen.

Eine Möglichkeit zur Erzielung verformungsfähiger Schweißverbindungen von Stahl und Titan führt über Zwischenlagen aus Werkstoffen, mit denen sich sowohl Titan als auch Stahl verschweißen lassen, ohne daß spröde Phasen auftreten. Ein solcher Werkstoff ist Vanadium. Titan/Vanadium/Stahl-Verbindungen wurden bereits erfolgreich mit dem Widerstandspunkt-, dem Elektronenstrahl- und dem Diffusionsschweißen hergestellt.

Ebenso wurden erste erfolgreiche Plasma-Auftragsschweißungen von Titan grade 2 und grade 12 auf Kesselblech H11 durchgeführt, wobei Zwischenschichten aus Kupfer verwendet wurden.

Ein geeigneter Werkstoff für Zwischenlagen zur Erzeugung brauchbarer Kupfer/Titan-Schweißverbindungen ist Niob, während sich Silber zur Herstellung von Aluminium/Titan-Verbindungen bewährt hat.

Eine weitere Möglichkeit Schweißverbindungen zwischen Titan und anderen metallischen Werkstoffen, wie z. B. korrosionsbeständiger Stahl oder Aluminium, herzustellen, bietet das

Reibschweißen. In den meisten Fällen ist dabei allerdings mit einem Festigkeitsverlust der Schweißnaht zu rechnen.

Anhand der dargestellten Möglichkeiten, Titan mit Stählen und anderen metallischen Werkstoffen zu verschweißen wird deutlich, daß es sich dabei um Sonderverfahren handelt. Die Anwendung dieser Verfahren ist aufgrund des großen Aufwands (Zwischenschichten) oder aus Geometrie Gründen (Reibschweißen) nur auf spezielle Einzelfälle beschränkt und als Einsatz in Serienproduktionen noch nicht verbreitet.

Zur Erzeugung großflächiger ebener Verbindungen zwischen Titan und anderen metallischen Werkstoffen hat sich das Sprengplattieren bewährt, das bereits routinemäßig Anwendung findet.

9. Literaturhinweise

- Merkblatt DVS 2713 "Schweißen von Titanwerkstoffen" (zu beziehen durch: Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Postfach 2725, 4000 Düsseldorf 1)
- VdTÜV-Werkstoffblatt 230 (Druck und Vertrieb: Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Postfach 101750, 5000 Köln 1)
- Fachbuch "Schweißen von Sondermetallen", (1971) (Herausgeber H. Schultz, Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Postfach 2725, 4000 Düsseldorf 1)

Deutsche Titan, Nov. 2000