

Verarbeitung von Titanwerkstoffen

Technische Hinweise zu Bearbeitung, Umformung, Schneiden, Schweißen und Wärmebehandlung

Titan und Titanlegierungen lassen sich mit etablierten Fertigungsverfahren zuverlässig verarbeiten. Gegenüber konventionellen Stahlwerkstoffen sind jedoch einige werkstofftypische Besonderheiten zu berücksichtigen. Dazu zählen insbesondere die geringe Wärmeleitfähigkeit, der vergleichsweise niedrige Elastizitätsmodul, die Neigung zum Kleben und Fressen bei der Zerspanung sowie die hohe Reaktivität von Titan bei erhöhten Temperaturen.

Diese technische Information fasst die Inhalte der bisherigen Form-&-Technik-Dokumentation in einer gestrafften und neu strukturierten Fassung zusammen. Wiederholungen wurden zusammengeführt; historische Einzelwerte und Versuchsergebnisse werden dort als Richtwerte gekennzeichnet, wo sie nicht ohne Weiteres verallgemeinert werden können.

Wichtiger Hinweis: Konkrete Prozessparameter sind stets auf Werkstoffzustand, Maschine, Werkzeug, Bauteilgeometrie und aktuelle Arbeitsschutz- sowie Herstellerangaben abzustimmen. Angaben zu stark gefährlichen Prozesschemikalien aus der älteren Dokumentation werden in dieser Neuauflage nicht als Rezeptur wiedergegeben.

Inhalt

1. Grundlagen der Titanverarbeitung
2. Spanlose Formgebung und Umformung
3. Spanende Bearbeitung: Drehen und Fräsen
4. Bohren, Gewindeschneiden, Sägen und Schleifen
5. Kühlung, Werkzeugwahl und besondere Bearbeitungshinweise
6. Schneiden und Trennen
7. Schweißen und Fügen
8. Wärmebehandlung
9. Oberflächenbehandlung und Beizen
10. Praktische Hinweise zur Bauteilauslegung und zum Biegen

1. Grundlagen der Titanverarbeitung

Werkstofftypische Besonderheiten

Die Verarbeitung von Titanwerkstoffen unterscheidet sich in einigen Bereichen wesentlich von der Bearbeitung üblicher Stähle. Reintitan ist grundsätzlich gut verformbar; Titanlegierungen können aufgrund ihrer höheren Festigkeit und ihres engeren plastischen Verformungsbereichs deutlich anspruchsvoller sein.

Bei der spanenden Bearbeitung wird die Werkzeugschneide thermisch stark belastet. Titan leitet die beim Zerspanen entstehende Wärme vergleichsweise schlecht ab. Gleichzeitig kann der Werkstoff unter dem Druck des Schneidwerkzeugs elastisch ausweichen und bei lokaler Erwärmung zum Anhaften beziehungsweise Verschweißen mit dem Werkzeug neigen.

- **Werkzeuge:** scharf, stabil und für die Beanspruchung geeignet auswählen.
- **Vorschub:** gleichmäßig und nicht zu gering wählen, um Reibung und Kaltverfestigung zu begrenzen.
- **Kühlung:** ausreichende Wärmeabfuhr sicherstellen.
- **Aufspannung:** Werkstück und Werkzeug möglichst schwingungsarm und steif spannen.
- **Oberflächenzustand:** harte Oxid- oder Zunderschichten können den Werkzeugverschleiß deutlich erhöhen.

Reaktivität bei erhöhten Temperaturen

Erwärmtes Titan besitzt eine hohe Affinität zu Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff. Dies ist insbesondere beim Schweißen und bei Wärmebehandlungen zu berücksichtigen. Eine unkontrollierte Gasaufnahme kann die Zähigkeit und die Oberflächeneigenschaften des Werkstoffs beeinträchtigen.

Die ältere Dokumentation enthält zahlreiche konkrete Einzelwerte aus Versuchen und früheren Fertigungsempfehlungen. Diese Werte sind als technische Referenz zu verstehen und vor einer heutigen Serienanwendung anhand aktueller Werkzeug-, Anlagen- und Werkstoffdaten zu validieren.

2. Spanlose Formgebung und Umformung

Reintitan

Für das Kalttiefziehen eignet sich besonders die weichste Reintitangüte 3.7025 (Grade 1). Härtere Reintitangüten erfordern beim Biegen, Abkanten, Drücken, Bördeln und Falzen größere Radien und höhere Kräfte. Zudem ist mit einer stärkeren Rückfederung zu rechnen.

Die bisherige Dokumentation nennt für anspruchsvollere Umformungen eine kombinierte Kalt-Warmumformung im Bereich von etwa 250 bis 400 °C. Gleichmäßige Erwärmung ist dabei wichtiger als lokale Temperaturspitzen. Bei der Prozessauslegung müssen Werkstoffzustand, Wanddicke, Biegeradius und gewünschte Geometrie gemeinsam betrachtet werden.

Titanlegierungen

Titanlegierungen besitzen bei Raumtemperatur häufig nur einen vergleichsweise kleinen plastischen Verformungsbereich. Kaltumformung ist daher je nach Legierung und Geometrie nur eingeschränkt möglich. Die Ausgangsdokumentation empfiehlt für anspruchsvolle Formgebungen Warmumformungen im Bereich von etwa 500 bis 800 °C oder Kaltverformen mit anschließendem Warmpressen.

Für präzise Bauteile kann eine kontrollierte Warmformgebung die Formgenauigkeit verbessern und die Ausschussquote reduzieren. Bei allen thermisch unterstützten Umformprozessen ist die Reaktivität der Titanoberfläche zu berücksichtigen.

Schmieden

Die ältere Dokumentation nennt für das Schmieden von Titan Temperaturen um etwa 700 °C unter Schutzgasatmosphäre. In der praktischen Anwendung hängen geeignete Schmiedetemperaturen jedoch stark von Legierung, Gefügestand und Umformgrad ab.

3. Spanende Bearbeitung: Drehen und Fräsen

Grundprinzipien

Titan und Titanlegierungen können ähnlich wie austenitische Stähle zerspannt werden, wenn die besonderen thermischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs berücksichtigt werden. Bewährt haben sich geringe bis moderate Schnittgeschwindigkeiten, ein ausreichend großer und gleichmäßiger Vorschub, wirksame Kühlung sowie eine steife und vibrationsarme Aufspannung.

Drehen

In der bisherigen Dokumentation werden hochkobalthaltige Schnellarbeitsstähle, Hartmetalle und Stellite als mögliche Schneidstoffe genannt. Bei Hartmetallen werden insbesondere Wolframkarbid-Sorten mit Kobaltbindung beschrieben. Für historische Werkzeuggeometrien nennt das Dokument beim Schrappen und Vordrehen Spanwinkel von etwa -6° bis $+6^\circ$ und beim Fertigdrehen 0° bis 15° . Diese Werte sind als Ausgangspunkt zu verstehen und mit den Daten des aktuellen Werkzeugherstellers abzugleichen.

Fräsen

Beim Fräsen wird aufgrund der Neigung von Titan zum Anhaften am Werkzeug das Gleichlaufräsen gegenüber dem Gegenlaufräsen bevorzugt. Dadurch kann die Bildung von Aufbauschneiden und das Anhaften von Spänen reduziert werden. Für Fräser nennt die ältere Dokumentation Spanwinkel von 0° bis 10° bei Schnellarbeitsstahl und etwa 0° bei Hartmetall beziehungsweise Stellite.

Praxis-Hinweis: Werkzeugtechnologie und Beschichtungen haben sich seit Erstellung der Ausgangsdokumentation erheblich weiterentwickelt. Aktuelle Herstellerdaten haben bei der Festlegung von Schnittwerten und Werkzeuggeometrien Vorrang.

4. Bohren, Gewindeschneiden, Sägen und Schleifen

Bohren

Beim Bohren empfiehlt die Ausgangsdokumentation einen relativ großen Vorschub bei geringer Schnittgeschwindigkeit, eine starre und vibrationsarme Maschine sowie intensive Kühlung. Die Bohrergeometrie soll eine sichere Spanabfuhr unterstützen. Bei tiefen Bohrungen ist ein regelmäßiges Brechen und Entfernen der Späne besonders wichtig.

Als Bohrerwerkstoffe werden Schnellarbeitsstähle und Hartmetalle genannt. Für Durchgangsbohrungen beschreibt das historische Dokument einen Spitzenanschliff von etwa 140° sowie Freiwinkel im Bereich von 10° bis 15°.

Gewindeschneiden

Für Gewinde sind ein steifer Maschinenaufbau und eine sichere Werkzeugbefestigung besonders wichtig. Die ältere Dokumentation nennt als Richtwerte Umfangsgeschwindigkeiten von 5-15 m/min für unlegiertes Titan, 3-10 m/min für gegläute Titanlegierungen und 1-5 m/min für ausgehärtete Titanlegierungen.

Außengewinde sollten bevorzugt maschinell hergestellt werden. Bei Innengewinden können Gewindefräsen beziehungsweise Zirkularfräsen Vorteile bieten, da Späne während des Bearbeitungsvorgangs besser abgeführt werden und die Prozesssicherheit insbesondere bei Sackbohrungen steigen kann.

Sägen

Titan kann mit Bügel-, Kreis- oder Bandsägen getrennt werden. Die Ausgangsdokumentation empfiehlt einen ausreichend hohen Anpressdruck, gute Kühlung und je nach Wanddicke eine geeignete Zahnteilung. Als historische Orientierung wird eine Schnittgeschwindigkeit genannt, die etwa 25 % unter derjenigen für Stahl liegt.

Schleifen

Beim Schleifen können aufgrund des hohen Reibungsanteils hohe lokale Temperaturen entstehen. Diese können zu Verschmieren, Oberflächenschädigungen, Eigenspannungen und im ungünstigen Fall zu Schleifrisen führen. Als Schleifmittel nennt die Ausgangsdokumentation unter anderem Aluminiumoxid, Siliziumkarbid und kunstharzgebundene Diamantscheiben.

Sicherheit: Titanstaub und feine Titanspäne können leicht entzündlich beziehungsweise pyrophor sein. Für Absaugung, Sammlung, Lagerung und Entsorgung sind geeignete betriebliche Brandschutz- und Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich.

5. Kühlung, Werkzeugwahl und besondere Bearbeitungshinweise

Kühlung und Schmierung

Die bisherige Dokumentation beschreibt wasserbasierte Lösungen und Emulsionen als gebräuchliche Kühlschmierstoffe für die spanende Bearbeitung. Ziel ist eine wirksame Wärmeabfuhr sowie die Verringerung von Reibung, Kleben und Fressen.

Historisch werden darüber hinaus schwefel- und chlorhaltige Schneidöle sowie weitere chemisch aktive Schmierstoffe genannt. Solche Angaben sollten heute nicht ungeprüft übernommen werden. Auswahl und Einsatz von Kühlschmierstoffen müssen mit aktuellen Herstellerfreigaben, Arbeitsschutzanforderungen, Entsorgungsvorgaben und dem vorgesehenen Folgeprozess abgestimmt werden.

Diamantbeschichtete Schneidstoffe

Ein Abschnitt der Ausgangsdokumentation beschreibt Laborversuche mit PKD-Schneidstoffen bei der Titanbearbeitung. Dabei wurden unter definierten Bedingungen Schnittgeschwindigkeiten bis 160 m/min und lange Standzeiten untersucht. Zugleich wird auf die hohe thermische Belastung des Diamanten an der Schneide hingewiesen.

Die beschriebenen Ergebnisse beziehen sich auf konkrete Werkzeugtypen und Versuchsbedingungen und sind nicht als allgemein gültige Schnittwerte zu verstehen. Sie zeigen jedoch, dass Werkzeugwerkstoff, Schneidengeometrie und Kühlstrategie einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität der Titanbearbeitung haben.

Hobeln

Für das Hobeln beschreibt die ältere Dokumentation eine deutliche Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit gegenüber austenitischem Chrom-Nickel-Stahl sowie den Einsatz von Wolframkarbid-Schneidwerkzeugen. Das Verfahren wird heute je nach Bauteil durch andere Zerspanungsstrategien ergänzt oder ersetzt.

6. Schneiden und Trennen

Titan und Titanlegierungen können mit thermischen Trennverfahren sowie mit Abrasiv-Wasserstrahlschneiden bearbeitet werden. Die Ausgangsdokumentation behandelt Autogen-Brennschneiden, Plasma-Brennschneiden, Laserschneiden und Wasserstrahlschneiden.

Thermische Schneidverfahren

Für Autogen- und Plasma-Brennschneiden nennt die ältere Dokumentation qualitativ zufriedenstellende Schnitte bis etwa 50 mm Materialstärke; für das damalige Laserschneiden wird eine Grenze von etwa 10 mm beschrieben. Diese historischen Leistungsgrenzen spiegeln nicht zwingend den heutigen Anlagenstand wider.

Bei thermischen Verfahren entstehen Wärmeeinflusszonen. Die Dokumentation nennt als historische Versuchswerte Größenordnungen von etwa 1 mm beim Plasmaschneiden, 0,5 mm beim Autogenschneiden und 0,1-0,2 mm beim Laserschneiden. Wärmebeeinflusste Bereiche sollten vor kritischen Folgeprozessen - insbesondere vor dem Schweißen - fachgerecht bewertet und gegebenenfalls entfernt werden.

Abrasiv-Wasserstrahlschneiden

Der wesentliche Vorteil des Abrasiv-Wasserstrahlschneidens liegt im fehlenden thermischen Wärmeeintrag. Dadurch entsteht keine klassische Wärmeeinflusszone und es tritt keine thermisch bedingte Kantenaufhärtung auf.

TiAl4Mo4Sn2Si, ausgehärtet	26 mm	50 mm/min, gerader Schnitt
TiAl6V4	110 mm	7 mm/min, gerader Schnitt
TiAl6V4	110 mm	1 mm/min, Radian

Die genannten Werte stammen aus einzelnen Versuchen der Ausgangsdokumentation und dürfen nicht verallgemeinert werden. Moderne Anlagen können deutlich andere Leistungsbereiche aufweisen.

7. Schweißen und Fügen

Schmelzschweißen

Titan ist grundsätzlich gut schweißbar, sofern die hohe Affinität des erwärmten Werkstoffs zu Gasen berücksichtigt wird. Geschmolzenes beziehungsweise stark erwärmtes Titan muss während des Schweißens und in der Abkühlphase zuverlässig vor Luftzutritt geschützt werden.

Die Ausgangsdokumentation nennt WIG/TIG-, Elektronenstrahl- und Laserschweißen als geeignete Verfahren; unter besonderen Bedingungen wird auch MIG erwähnt. Für die Schutzgasführung wird hochreines Argon beschrieben. Moderne Prozessspezifikationen und die Anforderungen des jeweiligen Schweißverfahrens sind hierbei maßgeblich.

- **Schweißzone schützen:** Schutzgasabdeckung auch während der Abkühlung sicherstellen.
- **Wurzelseite schützen:** geeigneten Wurzelschutz beziehungsweise zusätzlichen Schutzgasstrom vorsehen.
- **Sauberkeit:** Fügestellen gründlich reinigen und frei von Verunreinigungen halten.
- **Fremdwerkstoffe:** direkte Schweißverbindungen mit Stahl oder Aluminium sind wegen spröder intermetallischer Phasen problematisch.

Elektronenstrahl- und Impulsschweißen

Elektronenstrahlschweißen wird in der Ausgangsdokumentation als besonders gut für Titan geeignet beschrieben. Auch Impulsschweißverfahren werden genannt.

Löten

Löten von Titan ist grundsätzlich möglich, kann jedoch durch die Bildung spröder intermetallischer Phasen erschwert werden. Die Ausgangsdokumentation betont deshalb eine sorgfältige Reinigung und Entzunderung der Fügeflächen und beschreibt positive Erfahrungen mit bestimmten Silberloten.

8. Wärmebehandlung

Glühen und Spannungsarmglühen

Glühen dient dazu, eine durch Umformung oder Aushärtung verursachte Verfestigung zurückzunehmen oder einen stabilen Werkstoffzustand einzustellen. Spannungsarmglühen soll Eigenspannungen reduzieren, ohne das Gefüge wesentlich zu verändern.

Bei sämtlichen Wärmebehandlungen ist die hohe Reaktionsfreudigkeit von Titan gegenüber Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff zu berücksichtigen. Die Ausgangsdokumentation weist darauf hin, dass Wasserstoffaufnahme bereits ab etwa 500 °C relevant werden kann und oberhalb etwa 700 °C Sauerstoff und Stickstoff verstärkt zu Zunderbildung und einer sauerstoffangereicherten Diffusionszone beitragen können.

Glühen Reintitan 3.7025 / 3.7035 / 3.7055 / 3.7065	600-800 °C	700 °C	2 min/mm; min. 10, max. 20 min	Luft
Glühen TiAl6V4 (3.7165)	700-840 °C	730 °C	2 min/mm; min. 30, max. 300 min	Luft oder Ofen bis 500 °C, dann Luft
Glühen TiAl6V6Sn2 (3.7175)	700-840 °C	730 °C	2 min/mm; min. 30, max. 480 min	Luft oder Ofen bis 500 °C, dann Luft
Spannungsarmglühen Reintitan	500-600 °C	550 °C	30-60 min	Luft
Spannungsarmglühen TiAl6V4	550-700 °C	675 °C	60 min*	Luft oder Ofen bis 500 °C, dann Luft
Spannungsarmglühen TiAl6V6Sn2	550-650 °C	600 °C	60-120 min	Luft oder Ofen bis 500 °C, dann Luft

* Die Ausgangstabelle enthält an dieser Stelle eine typografisch uneindeutige Angabe („60 - 60 min.“). Für diese Neuauflage wurde sie nicht eigenständig korrigiert; vor technischer Freigabe sollte der Originalwert fachlich verifiziert werden.

Anlagen und Chargierung

Als Wärmebehandlungsanlagen werden Schutzgas- und Vakuumöfen sowie elektrisch oder gasbeheizte Luftöfen genannt. Bei gasbeheizten Öfen beschreibt die Ausgangsdokumentation einen Luftüberschuss von etwa 10-15 % und fordert, den direkten Kontakt des Werkstücks mit der Flamme zu vermeiden.

Werkstücke einer Charge sollten möglichst vergleichbare Dicken aufweisen. Teile müssen sauber und trocken sein. Kontakte mit Werkstoffen, die bei hohen Temperaturen unerwünschte Reaktionen oder niedrigschmelzende Phasen bilden können, sind zu vermeiden.

9. Oberflächenbehandlung und Beizen

Entzundern und Beizen

Nach Wärmebehandlungen entstandene Zunder- und Oxidschichten können mechanisch, beispielsweise durch Strahlen, Schleifen oder Bürsten, und anschließend chemisch entfernt werden. Leichte Anlauffarben können je nach Zustand durch geeignete Beizprozesse beseitigt werden.

Die ältere Dokumentation enthält konkrete Rezepturen mit Salpeter- und Flusssäure. Wegen des hohen Gefährdungspotenzials solcher Chemikalien werden diese Mischungsverhältnisse in dieser Neuauflage bewusst nicht als Arbeitsanweisung wiedergegeben. Für Beizprozesse sind aktuelle, freigegebene Verfahrensanweisungen, Sicherheitsdatenblätter und betriebliche Schutzmaßnahmen maßgeblich.

Anodische Oxidation

Die anodische Oxidation verstärkt beziehungsweise verändert die natürliche Oxidschicht von Titan. Je nach Prozessführung und angelegter Spannung können unterschiedliche Interferenzfarben entstehen. Die Ausgangsdokumentation beschreibt Farbbereiche von Silber und Gold über Blau und Purpur bis zu hellen Blautönen.

Die Schichtausbildung hängt wesentlich von Oberflächenzustand, Vorbehandlung, Elektrolyt und Spannung ab. Für gleichmäßige und reproduzierbare Oberflächen ist eine saubere, kontaminationsfreie Ausgangsoberfläche erforderlich.

Arbeitsschutz: Flusssäure und andere stark ätzende Prozesschemikalien können schwerste Verletzungen verursachen. Chemische Oberflächenbehandlungen dürfen nur in dafür geeigneten Anlagen, durch geschultes Personal und nach aktueller Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden.

10. Praktische Hinweise zur Bauteilauslegung und zum Biegen

Biegen von Titanstäben und Titanrohren

Der abschließende Praxishinweis der bisherigen Dokumentation warnt davor, Titanstäbe oder Titanrohre ohne geeignete Führung einfach von Hand beziehungsweise im Schraubstock zu biegen. Ungleichmäßige Belastung, lokale Oberflächenschädigungen und zu kleine Biegeradien können zu ungleichmäßiger Verformung oder Rissbildung führen.

Für reproduzierbare Ergebnisse ist eine geeignete Biegemaschine oder zumindest eine formgebende Lehre sinnvoll. Die Biegezone sollte gleichmäßig behandelt und - sofern für Werkstoff und Verfahren vorgesehen - kontrolliert temperiert werden. Die ältere Dokumentation nennt hierfür einen Temperaturkorridor, dessen genaue Zahl im überlieferten Scan jedoch nicht eindeutig lesbar ist. Dieser Wert wird daher in der Neuauflage nicht rekonstruiert.

Fertigungsgerechte Alternative

Bei größeren Stückzahlen identischer Geometrien kann es wirtschaftlich sinnvoll sein, statt einer aufwendigen Biegeoperation ein endkonturnahes Guss- oder anderes Fertigungsverfahren zu prüfen. Die ursprüngliche Dokumentation nennt insbesondere den Feinguss als mögliche Alternative.

Entscheidend ist eine Gesamtbetrachtung aus Werkstoff, Geometrie, Stückzahl, Ausschussrisiko, Nacharbeit und geforderter Bauteilqualität.

Zusammenfassung

Titan ist kein grundsätzlich schwierig zu verarbeitender Werkstoff, verlangt jedoch eine werkstoffgerechte Prozessführung. Besonders wichtig sind kontrollierte Wärmeentwicklung, scharfe und geeignete Werkzeuge, stabile Bearbeitungsbedingungen, eine wirksame Schutzgasführung bei thermischen Prozessen sowie die Berücksichtigung des jeweiligen Titan Grades und Gefügezustands.

Die in dieser Dokumentation wiedergegebenen historischen Richtwerte dienen der technischen Orientierung. Für die konkrete Fertigung sind aktuelle Werkstoffspezifikationen, Werkzeug- und Anlagenherstellern Daten sowie die jeweils geltenden Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen heranzuziehen.



Form & Technik GmbH
Kompetenz in Titan seit 1997
form-technik.biz