

Projektarbeit WS 2019/2020

## Maximierung der Zugfestigkeit einer Verdichterschaufel aus der Titanlegierung Ti 6Al 2Sn 4Zr

**Ziad Ben Hadj Salem**

Matrikelnummer 4880262

**Thiago Coelho Jordao**

Matrikelnummer 4898717

**Patrick Hartmann**

Matrikelnummer 4880903

**Viktor Rein**

Matrikelnummer 4808590

Ausgegeben: Institut für Werkstoffe  
Institutsleiter: Prof. Dr. Joachim Rösler  
Technische Universität Braunschweig

Betreuer: Carsten Siemers  
Fabian Haase

Veröffentlichung: Datum

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>ii</b>
<b>1 Metallurgie</b>	<b>2</b>
1.1 Metallurgie Titanlegierungen . . . . .	2
1.2 Ti-6242 . . . . .	2
<b>2 Experimentelle Methoden</b>	<b>6</b>
2.1 Metallografische Präparation . . . . .	6
2.1.1 Ofenbehandlung . . . . .	6
2.1.2 Trennen . . . . .	6
2.1.3 Einbetten . . . . .	6
2.1.4 Schleifen/Polieren . . . . .	6
2.1.5 Ätzen . . . . .	7
2.2 Mechanische Prüfverfahren . . . . .	7
2.2.1 Härteprüfung . . . . .	7
2.2.2 Zugversuch . . . . .	8
<b>3 Durchführung</b>	<b>9</b>
3.1 $\alpha_p$ -Studie . . . . .	9
3.2 Martensit-Bildung . . . . .	9
3.3 Martensit-Zerfall . . . . .	10
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>11</b>
<b>5 Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>12</b>
5.1 Martensitbildung . . . . .	12
<b>6 Fazit und Ausblick</b>	<b>13</b>

# Nomenklatur

## Griechische Bezeichnungen

$\alpha$	Anstellwinkel
$\gamma$	Bahnneigungswinkel
$\eta$	Trimmwinkel
$\epsilon_{min}$	minimale reziproke Gleitzahl
$\Lambda$	Flügelstreckung
$\kappa$	Isentropenkoeffizient
$\rho$	Luftsdichte

## Formelzeichen

$A$	Auftrieb
$C_A$	Auftriebsbeiwert
$C_A^*$	Auftriebsbeiwert bei $\epsilon_{min}$
$C_{A\alpha}$	Auftriebsanstieg
$C_W$	Widerstandsbeiwert
$C_{W0}$	Nullwiderstandsbeiwert
$C_W^*$	Widerstandsbeiwert bei $\epsilon_{min}$
$G$	Gewicht
$g$	Erdbeschleunigung
$H$	Flughöhe
$k$	Widerstandsanstieg
$k$	k-Faktor
$m$	Masse
$p$	Luftdruck
$q$	Staudruck
$R$	Gaskonstante
$T$	Temperatur
$t$	Zeit
$V_{IAS}$	angezeigte Fluggeschwindigkeit
$V_{TAS}$	wahre Fluggeschwindigkeit

$V_{opt}$  Fluggeschwindigkeit beim besten Gleiten

$W$  Widerstand

$W_{min}$  minimaler Widerstand

tbd

# Kapitel 1

## Metallurgie

### 1.1 Metallurgie Titanlegierungen

### 1.2 Ti-6242

Ti-6242 oder Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo ist eine Alpha-Beta Titanlegierung, die in 1967 eingeführt wurde. Wie es im Phasendiagramm in Abbildung 1 zu erkennen ist, hat die Legierung Ti6242 bei Raumtemperatur ein hohes Alphaanteil und wird auch deshalb oft als eine Near-Alpha-Titanlegierung bezeichnet.

Neben Titan werden bei Ti6242 andere Legierungselemente zulegiert, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Woraus die Ti-6242 besteht, ist in der Tabelle 1 abzulesen.

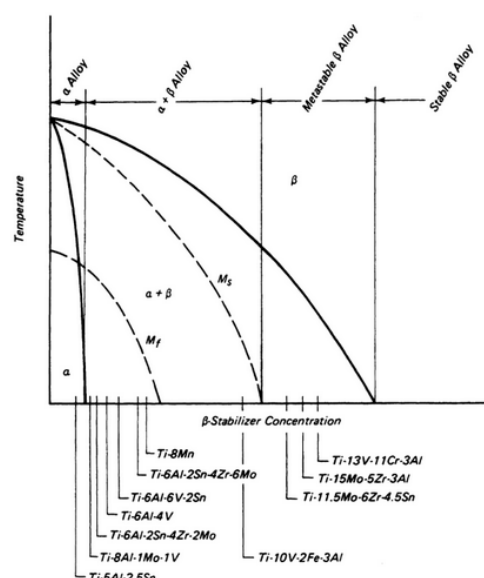


Abb. 1.1: Phasendiagramm [Titanium Technical guide]

Elements	Min %Gwt.	Max %Gwt.
Aluminium	5,5	6,5
Tin	1.80	2.20
Zirkonium	3.60	4.40
Molybdenum	1.80	2.20
Silicon	0.06	0.13
Iron	-	0.25
Oxygen	-	0.15
Carbon	-	0.05
Nitrogen	-	0.03
Hydrogen	-	0.0125
Titanium		Remainder

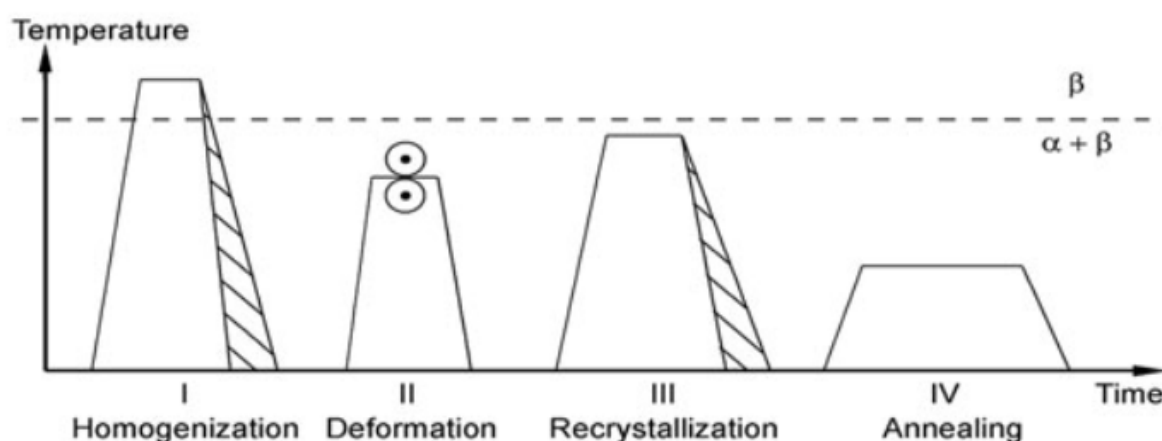
**Tabelle 1.1:** Zusammensetzung von Ti-6242 [Titanium : Technical guide]

Die Ti6242S ist eine Optimierung von Ti6242, die erst 1974 entwickelt wurde. Dieser wurde zusätzlich Silizium in kleinen Mengen zugelegt, um die Resistenz gegen Kriechen vor allem bei hohen Temperaturen durch die Bildung von Siliziden zu erhöhen. [Immanuel Freiherr von Thungen].

Verzeichnis : [Immanuel Freiherr von Thungen] - Immanuel Freiherr von Thungen. Effet dwell: relation microstructure-microtexture-propriétés mécaniques de l'alliage de titane Ti6242. Autre. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2016. Français. NNT: 2016ESMA0027 . tel-01486574

### Kristallstruktur

Ti6242 wird klassischerweise in der bimodalen oder Duplex-Struktur eingesetzt, die nach einer typischen Wärmebehandlung, erklärt in Abbildung 1.2, erreicht werden kann.



**Abb. 1.2:** Schematic processing route for bi-modal microstructures of  $\alpha + \beta$  titanium alloys )

nach DEFORMATION !!!Bei der Erwärmung von Raumtemperatur auf  $T_1 < \beta$ -trans wandelt sich ein Anteil von der Alpha-Phase in Beta um. Nach 1-2h werden die Werkstücke wieder auf Raumtemperatur luftgekühlt. Dabei wandelt sich das Beta in Beta + Alpha Lamellen um. (Photovom Gefüge ...). Als letzte Wärmebehandlung wird normalerweise Ti6242 für 8 h bei 595 C

angelassen. (Aerospace Materials and Material Technologies ) Wärmebehandlungen von Ti6242 und deren Einflüssen werden in den nächsten Kapiteln noch genauer diskutiert.

### Physikalische und mechanische Eigenschaften

Die Tabelle in Abbildung ... fasst ein paar physikalische Kennwerte vom Ti-6242 zusammen.

Thickness[mm]	Tensile strength [MPa]	Yield strengh [MPa]	Elongation[%]	Reduction in Area [%].
25-50	1000	930	14	33
102	1000	930	12	30
205	1035	940	12	28
330	1000	825	11	21

**Tabelle 1.2:** Physikalische Kennwerte von Ti6242 : ???]

Die mechanischen Eigenschaften von Titanlegierungen, wie bereits im ersten Kapitel erklärt wurde, hängen hauptsächlich von den verschiedenen Wärmebehandlungen ab, die die Gefügestruktur des Werkstoffes verändern und so auch sein thermomechanisches Verhalten. Als eine Near-Alpha Titan Legierung, ist Ti6242 zum größten Teil Alpha (90-95%). Da die Diffusionsrate bei Beta-Strukturen höher ist als bei Alpha-Strukturen weist Ti6242 eine bessere Stabilität bei höheren Temperaturen auf + Temperatur Bereich !!!!. (Aerospace Materials and Material Technologies )

Die Alpha-Beta Transformationstemperatur von Ti-6242 liegt bei 995C +- 15C. Die Abweichung hängt von den Anteilen der verschiedenen Legierungselementen ab. Wie bereits im ersten Kapitel beschrieben wurde, stabilisieren Al, O , N und C die Alpha Phase und erhöhen im Gegensatz zu Mo die Beta-transus Temperatur. Aufgrund des niedrigen Mo-Gehalts von Ti6242 liegt ihre Betat-trans-Temperatur oberhalb der von Reinem Titan, die bei 882 +- 2C liegt.

Thickness[mm]	Tensile strength [MPa]	Yield strength [MPa]	Elongation[%]	Reduction in Area [%].
25-50	1000	930	14	33
102	1000	930	12	30
205	1035	940	12	28
330	1000	825	11	21

**Tabelle 1.3:** Elastische Eigenschaften bei Raumtemperatur von Ti6242Si (Annealed 1h 954C/AC + 8h/600C/AC ) [Titanium : Technical guide]

Alle sekundären Fertigungsverfahren, die für die Herstellung von Bauteilen erforderlich sind wie zB. Biegen, Fräsen und Schweißen können Eigenschaften von Titan oder Titanlegierungen stark beeinflussen und müssen daher mitberücksichtigt werden.

### Verwendung

Für den Oben genannten Eigenschaften, die der Ti6242/Ti6242S bezeichnen, werden diese Legierungen hauptsächlich in der Luftfahrt eingesetzt. Vor allem bei rotierenden Teilen im Triebwerk, wo hohe Kriechbeständigkeit, Ermüdungsresistenz neben eine hohe metallurgische Stabilität bei hohen Temperaturen erforderlich sind.

Diese Legierung wird aufgrund ihres guten Festigkeit-Gewichtsverhältnisses und ihrer Stabilität bei hohen Temperaturen (538C - 595 C) hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt verwendet. Ti6242 wird z.B. in der Herstellung von Hochdruckverdichtern, Turbinenschaufeln und Nachbrennern verwendet, wo neben den oben erwähnten Eigenschaften auch die Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen erforderlich ist.



(a) Compressor spool for GE CF6 class engine using inertia welding to connect the individual stages: front (smaller) five stages: Ti-6Al-4V; rear two stages: Ti-6242



(b) Impeller used in a small engine for regional jets, diameter 35 cm. The alloy is Ti-6242 with a bimodal microstructure

**Abb. 1.3:** Beispiele von Einsatzbereichen von Ti-6242 (Aerospace Materials and Material Technologies )



# Kapitel 2

## Experimentelle Methoden

### 2.1 Metallografische Präparation

#### 2.1.1 Ofenbehandlung

Alle Proben werden unter Normalatmosphäre wärmebehandelt. Da für die mechanischen Eigenschaften

#### 2.1.2 Trennen

Die wärmebehandelten Proben werden in der Mitte mit einer Siliziumkarbid-Scheibe unter ständigem Kühlmittelfluss getrennt (Trennmaschine Jean Wirtz CUTO 20). Durchgehende Kühlung verhindert eine zusätzliche, ungewollte Gefügeveränderung an der Schnittfläche während des Trennvorgangs.

#### 2.1.3 Einbetten

Die getrennten Proben werden in Warmeinbettpressen (Buehler Simplimet Mounting Press 1000/4000) für besseres Handling und Stützung der Randzonen eingebettet. Beim Warmeinbetten wird mit Hilfe von Druck und Temperatur die Probe in ein Kunststoffgranulat eingebettet. Vorteile des Warmeinbettens sind die hohe Härte und Spaltfreiheit des Einbettmaterials. Dabei wird Epomet als erste Schicht im Bereich der Probenoberfläche benutzt und für die oberflächenfernen Bereiche Bakelit, da Epomet eine bessere Spaltfüllung hat. Das Warmeinbetten erfolgte bei  $180\text{ deg } C$  und  $3\text{ bar}$ . Die fertig eingebetteten Proben werden entgratet und auf der Seite der Probe mit einer Fase versehen.

#### 2.1.4 Schleifen/Polieren

Die Trennfläche der Proben wird in Vorbereitung auf die Ätzung der Oberfläche geschliffen und poliert. Ziel ist eine Oberfläche, die frei von Riefen und Fremdpartikeln ist. Als Schleif-/Poliergerät wurde ein ATM Saphir 550 benutzt. Im ersten Schritt werden die Proben mit steigender Körnung im Gegenlauf geschliffen und dabei wassergekühlt 2.1.

Zwischen jeder Körnung werden die Proben  $3\text{ min}$  im Ultraschallbad in einer Seifenlauge gereinigt,

Körnung (FEPA P)	180	240	320	400	600	800	1200	2500
Zeit (min:s)	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00
Anpressdruck	10	10	10	10	10	10	6	6

**Tabelle 2.1:** Schleifstufen

um größere Schneidkörner und Abrieb nicht zu verschleppen, und die Dauer des Schleifens um 30s verlängert.

Zum Polieren wird eine Wabenscheibe mit destilliertem Wasser und einer Poliersuspension bestehend aus Oxid-Polier-Suspension ( $0,05\mu\text{m}$ ) und Wasserstoffperoxid im Verhältnis 5:1 benetzt. Jede Minute wird Poliersuspension nachgegeben, um eine kontinuierliche Politur zu gewährleisten.

Schritt	Druck [N]	Zeit [min]	Richtung
1	7	5	Gegenlauf
2	5	2	Gleichlauf

**Tabelle 2.2:** Polierstufen

Die Proben werden nach jedem Schritt 4min in einem Ethanolbad ultraschallgereinigt. Nach Beendigung beider Polierschritte wird die Wabenscheibe mit Spülmittel gesäubert und die Schritte eins und zwei wiederholt. Dieser Prozess wird solange wiederholt bis die Probenoberfläche frei von Riefen und Fremdpartikeln ist. Ist dies der Fall, wird im letzten Schritt die Probenoberfläche mit Spülmittel und anschließend mit Ethanol gereinigt und getrocknet.

### 2.1.5 Ätzen

Im letzten Schritt der Probenpräparation werden die Oberflächen der Trennfläche geätzt. Die polierte Oberfläche der Proben reflektiert Licht nahezu gleichmäßig, wodurch das Gefüge der Legierung nicht zu erkennen ist. Die Proben werden in einem Ätzmedium nach Kroll 7s geätzt. Martensitische Proben werden länger geätzt, hier 10s.

Destilliertes Wasser	100ml
Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ )	6ml
Flusssäure (HF)	3ml

**Tabelle 2.3:** Ätzlösung nach Kroll

## 2.2 Mechanische Prüfverfahren

### 2.2.1 Härteprüfung

Die Härte der Proben wurde mit einer Vickers-Prüfung ermittelt. Bei der Vickers-Prüfung wird die Eindringhärte des Materials gegenüber eines Eindringkörpers in Form einer gleichseitigen Diamantpyramide gemessen. Die Diamantpyramide hat einen Öffnungswinkel von  $136^\circ$  zwischen den Seitenflächen und wird mit 10kg (98,1N) statischem Druck 15s lang in die Probe gedrückt. Die Längen der Diagonalen  $d_1$  und  $d_2$  des dabei entstehenden Eindrucks werden mittels einer optischen Messeinheit vermessen. Daraus lässt sich aus

$$HV = \frac{2 * 0,102 * F * \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (2.1)$$

mit der Kraft  $F$  in Newton und  $d = \frac{d_1+d_2}{2}$  die Vickershärte  $HV$  berechnen.

### **2.2.2 Zugversuch**

tbd

## Kapitel 3

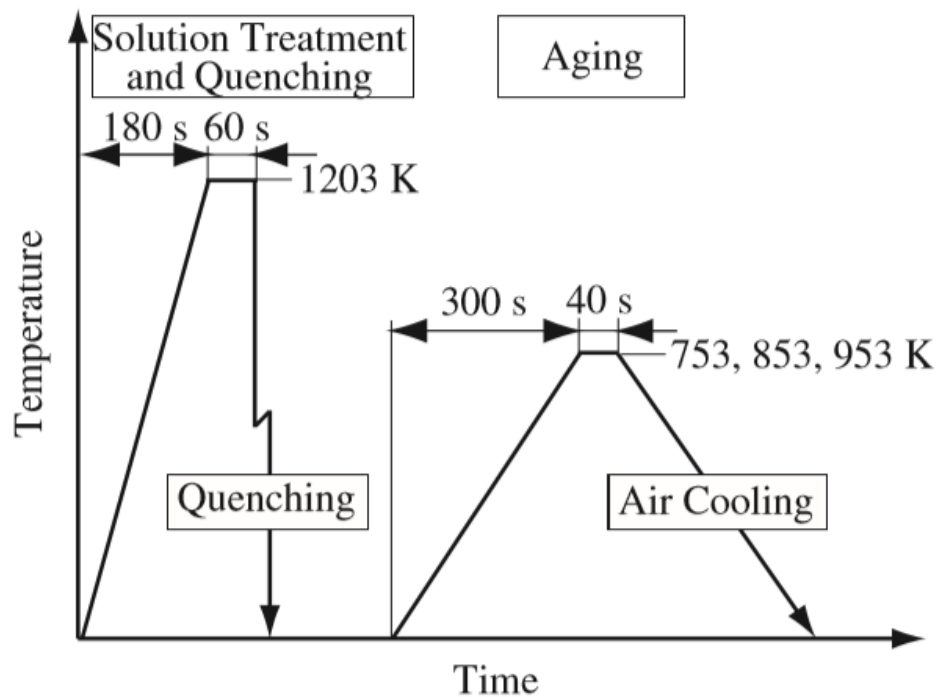
# Durchführung

Erwähnung von Ti64 nochmal und (TS-STDA) Three Step short Time duplex Anneal

### 3.1 $\alpha_p$ -Studie

### 3.2 Martensit-Bildung

Um Martensit zu bilden werden Ti64-Teile nach der ersten Wärmebehandlung, wie es in Abbildung 3.1 zusammengefasst wird, für 1 min bei 930C erwärmt und dann auf Raumtemperatur wassergekühlt. Unter dem Einfluss von der Diffusion soll sich die erhaltene und metastabile Beta Phase aus der bimodalen Struktur weiter wachsen. Die kurze Erwärmungszeit soll dafür sorgen, dass die neu gebildeten Beta-Gebiete nicht mit  $\beta$ -Stabilisatoren, in diesem Fall Vanadium, bereichert und dadurch stabilisiert werden. Durch das schnelle Abschrecken auf Raumtemperatur wandelt sich das neue  $\beta$  diffusionslos und lokal in Martensit um.



**Abb. 3.1:** Vorgehensweise nach dem Duplex-Anneal bei STDA für Ti-64 (Strengthening of Ti-6Al-4V Alloy by Short-Time Duplex Heat Treatment)

Da die  $\beta_t$  von Ti-64 relativ niedriger ist als die von Ti-6242, liegt auch ihrer Gleichgewichtstemperatur unterhalb der von Ti-6242. Außerdem hat Vanadium im Vergleich zu Molybdän eine viel größere Diffusionsrate in Titan, was die schnellen Anlasszeiten noch weiter erklärt [Titan und Titan legierungen, Zwicker]. Aus diesen Gründen wurden in diesem Schritt die Ti-6242-Proben nach dem Duplex-Anneal für 8-16 min jeweils bei 930°C und 950°C wärmebehandelt.

Eine bekannte Wärmebehandlung von  $\alpha+\beta$ -Titanlegierungen ist die *Solution treatment and quenching*, wobei die Titanlegierung direkt von einer Temperatur  $T_1$  unterhalb  $\beta_t$  nach 0,5-1 h abgeschreckt wird. Wie bei der oben beschriebenen Wärmebehandlung stellt sich bei  $T_1$  ein zweiphasiges Gefüge mit  $\alpha_p$  und  $\beta$  ein. Die  $\beta$ -Phase wandelt sich dann auch beim Abschrecken martensitisch um und wird  $\alpha'$  genannt. Zum Vergleich zu der studierten Wärmebehandlung werden AR-Proben bei 983°C für 1h erwärmt und wassergekühlt.

### 3.3 Martensit-Zerfall

## Kapitel 4

# Ergebnisse

tbd

## Kapitel 5

# Diskussion der Ergebnisse

### 5.1 Martensitbildung

## Kapitel 6

## Fazit und Ausblick

tbd



