Pflichtreferat am

Lehrstuhl und Institut für Flugzeugbau
der Technischen Hochschule Stuttgart

Prof. Dr. rer. techn. U. Hütter

„ Titan "

Ein Werkstoff für Luft- und Raumfahrt

H. Dörner

Gehalten am 22.2.66

Heiner Dörner

Inhaltsangabe

1. Einleitung

2. Herstellung von Titan

3. Eigenschaften von Titan und Titanlegierungen
   - 3.1. Metallographie
   - 3.2. Chemische Eigenschaften
   - 3.3. Physikalische Eigenschaften
   - 3.4. Mechanische Eigenschaften
     - 3.4.1. Allgemein
     - 3.4.2. Bei tiefen Temperaturen
     - 3.4.3. Bei hohen Temperaturen
   - 3.5. Sonstige technologische Eigenschaften

4. Behandlung und Verarbeitung von Titan
   - 4.1. Wärmebehandlung von Titan und Titanlegierungen
   - 4.2. Schmieden und Gießen
   - 4.3. Schweißen und Löten
   - 4.4. Zerspanen
     - 4.4.1. Drehen
     - 4.4.2. Fräsen
     - 4.4.3. Bohren
     - 4.4.4. Sägen
     - 4.4.5. Schleifen
   - 4.5. Blechumformung und Massivverformung
   - 4.6. Glühen

5. Anwendung von Titan und Titanlegierungen
   - 5.1. Wahl des Werkstoffes
   - 5.2. Konstruieren mit Titan

6. Zwei Vertreter des Werkstoffes Titan
   - 6.1. Reintitan
     Bezeichnung: LN 3.7064 oder Ti 60 ; Krupp RT18 ; AICMA Ti-P04
   - 6.2. Titanlegierung
     Bezeichnung: LN 3.7164 oder Ti Al6 V4 ; Krupp LT31 ; AICMA Ti-P63

7. Zusammenfassung

8. Literatur

1. Einleitung

Der Fortschritt der Werkstoffentwicklung in den letzten Jahren war durch die Forderungen der Luft- und Raumfahrt und auch der Kernenergietechnik bedingt. Sonderwerkstoffe wie Niob, Beryllium und Zirkonium wurden im technischen Ausmaß bis zur Halbzeugfertigung entwickelt. Ohne die Luftfahrttechnik wäre auch die Entwicklung des Titans bis zur großtechnischen Produktion nicht so schnell vorangeschritten.

Dia △ An die heutigen Werkstoffe werden hohe Forderungen gestellt und diese Forderungen bewegen sich zudem noch in extremen Bereichen. Der Temperaturbereich erstreckt sich z.B. von -270°C bis 3000°C. Von den Werkstoffen verlangt man niedriges Gewicht, hohe Festigkeit, gute Verarbeitbarkeit, keine Versprödung durch äußere Einflüsse oder durch Vorgänge im Material selbst. Oxydationsbeständigkeit gegen die umgebende Atmosphäre, gegen Treibstoffe und Brenngase ist ebenfalls erwünscht. Weiter verlangt man von den Werkstoffen je nach Beanspruchungsart, die verschiedensten physikalischen Eigenschaften. Dabei ist die spezifische Wärme, die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit, die thermische Ausdehnung und die Verdampfungswärme von Bedeutung.

Neben diesen genannten Forderungen bestehen oft große Schwierigkeiten in der Herstellung von Halbzeugen. Es handelt sich meist um ausgefallenen Abmessungen und Formen.

Die Fertigung von großen Schmiedestücken, Preß- oder Gesenkschmiedeteilen erfordert eine beträchtliche Entwicklung und Erfahrung über die Verarbeitbarkeit der Werkstoffe. Neue Einrichtungen und Herstellungsmethoden müssen geschaffen werden. Oft treten dann noch Schwierigkeiten bei Verbindungsarten wie Schweißen und Löten auf.

Betrachtet man die maßgebenden Faktoren bei der Werkstoffwahl für Bauteile der Luft- und Raumfahrt, so kann man sagen, daß in Zukunft die thermische Beanspruchung gegenüber der mechanischen eine immer größere Bedeutung erlangt. Dies möge folgende Tabelle veranschaulichen.

Fluggerät	Geschwindigkeit	Beanspruchungs-temperatur,	zeit
Strahlturbinenflugzeug	1,5 Mach	100°C	1000 h
Staustrahlflugzeug	3 Mach	400°C	100 h
Raketenflugzeug	4,5 Mach	600°C	10 h
Ferngleiter, Raumtransporter	10 Mach	1500°C	1000 sek
Bemannter Satellit	24 Mach	2000°C	200 sek
Langstreckenrakete	24 Mach	4000°C	10 sek

Tabelle 1 Beanspruchungsarten von Fluggeräten

2. Herstellung von Titan

Das Element Titan hat die Ordnungszahl 22 in der 4. Gruppe des periodischen Systems. Das Atomgewicht ist 47,9 , das spezifische Gewicht 4,5 g/cm^3. Titan ist kein seltenes Metall, es ist in der Natur nur sehr verteilt. In der Ackererde ist 0,5 % Titan gebunden. Größere Vorkommen findet man in Brasilien (Titandyoxyd) und in der Sowjetunion sowie in Kanada, Norwegen, Südafrika und Indien (Eisentitanat). Gregor entdeckte Titan 1791 als Oxyd. 1925 wurde es von Arkel und de Boer erstmals in metallisch reiner Form dargestellt. Allerdings eignet sich diese Methode nur für die Titanherstellung im Labormaßstab.

Der Entscheidende Schritt zur Produktionsaufnahme wurde 1939 von Kroll gemacht. Zuerst stellt man aus Titanoxyd flüssiges Titantetrachlorid her. Im Krollprozeß wird es unter Luftabschluß und in reinster Edelgasatmosphäre mit schmelzflüssigem Magnesium zur Reaktion gebracht:

$$TiCl_4 + 2\,Mg = Ti + 2\,MgCl_2$$

Das Titan hat nach diesem Vorgang ein naturschwammähnliches Aussehen. Ab 1948 wurde dieses Verfahren zum großtechnischen Prozeß entwickelt. Auf diese Weise wird heute die überwiegende Menge der Titan-Weltproduktion hergestellt. * Dia

Der Titanschwamm ist äußerst reaktionsfreudig im erhitzten und schmelzflüssigen Zustand. Heute erfolgt das Erschmelzen vorwiegend im Hochvakuum. Ein wassergekühlter Kupfertiegel höchster Wärmeleitfähigkeit dient dazu, da das schmelzende Titan mit fast allen erhitzten Werkstoffen Verbindungen eingeht.

Der granulierte Titanschwamm wird zunächst unter einem Druck von ca. 3 t/cm^2 kalt zu Stäben verpreßt. Mehrere Preßlinge werden im Vakuum verschweißt und bilden eine Elektrodenstange Diese Stange wird im Hochvakuum-Lichtbogenofen eingebracht und bei 10^{-3} bis 10^{-4} Torr abgeschmolzen. So entstehen Rohblöcke bis zu 5 t Gewicht zu Weiterverarbeitung.

Heute wird nach dem Kroll Verfahren Titanschwamm zum Preis von etwa 10.-DM/kg gegenüber 50.-DM/kg 1954 auf den Markt

gebracht. Der komplizierte Herstellungsvorgang wird aber keinen Angleich an die Herstellungskosten der übrigen Gebrauchsmetalle erlauben.

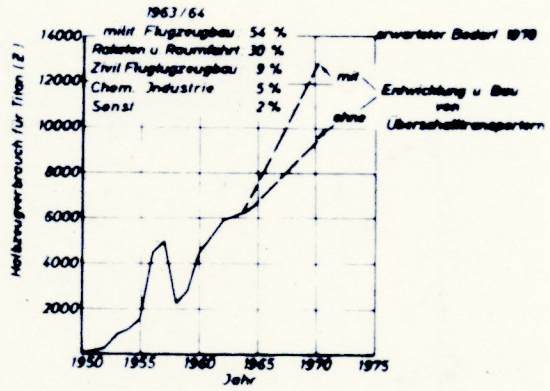


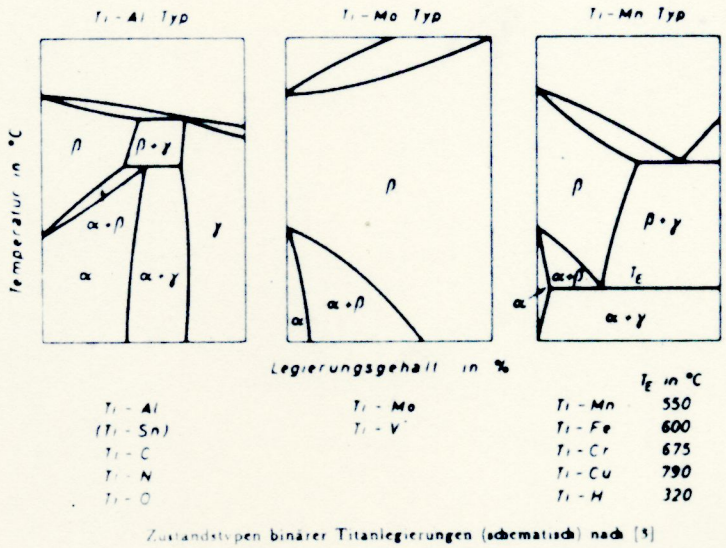
Bild 1 Halbzeugverbrauch von Titan und Titanlegierungen in USA.

Zur Zeit beläuft sich die Produktion in den USA auf über 6000 t/Jahr. Davon werden 93 % für die Luft- und Raumfahrt eingesetzt.

3. Eigenschaften von Titan und Titanlegierungen

3.1. Metallographie

Unlegiertes Titan kristallisiert in zwei polymorphen Modifikationen. Der Umwandlungspunkt liegt bei 882°C. Die hexagonale Phase, α- Titan, wird zur kubisch raumzentrierten β- Modifikation. Legierungszusätze verlegen, je nach Löslichkeit des Zusatzelementes in den beiden Modifikationen, den Umwandlungspunkt.
Schematisch können folgende Gruppen binärer Systeme des Titans angegeben werden:



Zustandstypen binärer Titanlegierungen (schematisch) nach [5]

Bild 2 Zustandstypen binärer Titanlegierungen (schematisch)

Ti-Al Typ: Bei diesem System ist die Löslichkeit des Zusatzelementes in der α- Phase größer als in der β- Phase. Steigt der Legierungszusatz wird die α- Phase stabilisiert, weil die Umwandlungstemperatur von $\alpha+\beta$ in β auch steigt. Zu diesem Typ gehört auch Titan legiert mit Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Zinn.
Ti-Mo Typ: Bei diesem Typ löst sich das Zusatzelement in der β- Phase besser als in der α- Phase. Die Umwandlungstemperatur sinkt mit steigendem Legierungszusatz.
Ti-Mn Typ: Die dritte Gruppe enthält die für technische Zwecke interessantesten Titanlegierungen. Sie enthält Elemente mit hoher Löslichkeit in der α- Phase wie auch im β Mischkristall.
Die wichtigsten Legierungszusätze:
Aluminium, Zinn, Zirkonium, Sauerstoff. Diese weisen eine

hohe Löslichkeit in der α- Phase auf, sind also α- Stabilisatoren.
Vanadium, Molybdän, Chrom, Eisen, Mangan und Wasserstoff sind β- Stabilisatoren.
Die Zuordnung der Titanlegierungen erfolgt zumeist nach der im Verarbeitungszustand vorliegenden Phase.
α Legierungen weisen eine gute Warmfestigkeit auf (ca.400°C bis 600°C). Sie sind schweißbar und auch nach langer Beanspruchungszeit thermisch stabil.
$\alpha+\beta$ Legierungen haben bei Raumtemperatur eine größere Festigkeit als α Legierungen. Die mechanischen Eigenschaften werden durch eine Wärmebehandlung leicht verändert. Bei höheren Temperaturen wird die Festigkeit geringer als bei α Legierungen. β Legierungen sind von großer Bedeutung. Die technischen β Legierungen sind durch ihre kubische Struktur besser kaltverformbar als die hexagonalen α Legierungen. β Legierungen erfordern einen hohen Legierungsgehalt von spezifisch schweren Legierungsmetallen. Der hohe Legierungsgehalt macht es möglich die Hochtemperaturphase auch nach langsamer Abkühlung zu stabilisieren. Eine solche Aushärtung ergibt sehr hohe Festigkeiten. Im lösungsgeglühten Zustand können β Legierungen noch leichter kaltverarbeitet werden als Legierungen der α bzw. $\alpha+\beta$ Phase.

Jede Legierungsart besitzt bestimmte Vor- und Nachteile. Für spezielle Anwendungen muß man die günstigste Legierung sorgfältig auswählen.

Bei der Legierungsbezeichnung werden die Legierungselemente durch das chemische Symbol des Elementes mit dem jeweiligen Legierungsgehalt in Gewichts-% angegeben. Zum Beispiel: Ti Al 7 Mo 4 oder Ti Al 6 V 6 Sn 2 .
Die Firma Friedrich Krupp in Essen, die in Deutschland in der Titanherstellung führend ist, hat eine eigene Bezeichnung eingeführt. Sie bezeichnet Reintitan mit RT-12, RT-18 usw. Die Zahlen geben dabei 1/10 der durchschnittlichen Brinellhärte des erschmolzenen Blockes an. Legierte Titansorten werden von Krupp mit LT-21, LT-31, LT-41 . Diese Legierungen entsprechen der Reihenfolge nach Ti Al 5 Sn 2,5 (α Legierung), Ti Al 6 V 4 ($\alpha+\beta$ Legierung), Ti V 13 Cr 11 Al 3 (β Legierung).

3.2. Chemische Eigenschaften

Titan besitzt gegen oxydierende Medien eine gute Korrosionsbeständigkeit. Es stellt sich ein Passivierungsvorgang ein, weil es zur Ausbildung einer dünnen Oxydschicht kommt. Besonders hervorzuheben ist auch die Beständigkeit gegen Salpetersäure, Chlor und Chloroxyd. Reduzierende Mineralsäurelösungen greifen Titan besonders bei höheren Temperaturen an, Flußsäure schon bei geringer Konzentration. Schlagartige Beanspruchung von Titan in rot rauchender Salpetersäure oder in Stickstofftetraoxyd sowie in flüssigem Sauerstoff führt zur explosionsartigen Reaktion. Wasserstoffsuperoxyd wirkt auf Titan zersetzend. Wasserfreies Fluor, flüssig oder gasförmig zwischen -200°C und + 100°C bewirkt die Bildung einer Titanfluorid-Deckschutzschicht.
Oberhalb 600°C tritt bei Titan Oxydation und Sauerstoffaufnahme in die Oberfläche ein. Schon ab 400°C wird Wasserstoff spontan aufgenommen. Dabei führen geringe Wasserstoffgehalte zur Versprödung. Infolge der geringen Löslichkeit von Wasserstoff in Titan scheidet sich dieser allmählich in Form von Hydridplättchen im Gefüge aus. Dadurch kann es im Laufe der Zeit ohne äußerlich erkennbaren Grund plötzlich zur Rißbildung kommen. Bei tiefen Temperaturen beeinflusst Wasserstoff Titan nicht. Im Gegensatz zu Sauerstoff und Stickstoff ist der Prozeß der Wasserstoffaufnahme reversibel. Durch eine Vakuumglühung kann der aufgenommene Wasserstoff wieder entfernt werden.

Die Gefahr des Auftretens von Spannungsrißkorrosion ist bei Titan gering. In dieser Beziehung kann man Titan mit den austenitischen, rostfreien Stählen vergleichen. Andere Fugen und Spalte, die lange Verweilzeiten des angreifenden Mediums ermöglichen sollten durch konstruktive Maßnahmen vermieden werden.
Vorsicht ist bei ungeschützten Paarungen von Titan mit Magnesium, Kupfer, Aluminium und deren Legierungen geboten. Dabei erfährt nur das Paarungsmetall einen Angriff, wenn nicht eine sauere reduzierende Lösung anwesend ist. Dabei würde das Titan ohnehin eine relativ schnelle Abtragung erfahren. Die Lochfraßkorrosion spielt bei Titan keine bedeutende Rolle.

3.3. Physikalische Eigenschaften

Hervorzuheben ist an erster Stelle das niedrige spezifische Gewicht von Titan. Daraus ergibt sich in Verbindung mit der relativ hohen Festigkeit das Interesse dieses Werkstoffes in der Luft- und Raumfahrt.

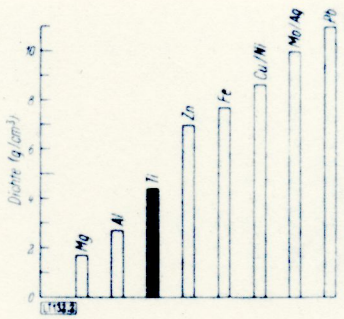


Bild 3 Dichte der Gebrauchsmetalle und von Titan

Titan besitzt eine geringe elektrische und eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Der Schmelzpunkt liegt hoch, der E-Modul erreicht die Hälfte von dem des Stahls. Bei Verbund mit anderen Werkstoffen muß berücksichtigt werden, daß die thermische Ausdehnung von Titan beträchtlich niedriger liegt als z.B. bei Aluminium oder Stahl. Legierte Titansorten unterscheiden sich vom reinen Metall in den physikalischen Eigenschaften nur unwesentlich. Der E-Modul und die thermische Ausdehnung verändern sich kaum. Die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit nehmen ab.

Eigenschaften	Titan	Ti-6 Al-4 V	Al-Legier.	Mg-Legier.	rostfreier Stahl
Schmelztemperatur ..... °C	~ 1700	~ 1680	475—640	565—632	1400—1420
Dichte ..... g/cm³	4,5	4,43	2,80	1,78	7,93
Wärmeleitfähigkeit cal/cm s °C	0,035	0,018	0,29	0,23	0,039
Wärmedehnung (20—110 °C) ... (°C)⁻¹	$8,6 \times 10^{-6}$	9×10^{-6}	$23,3 \times 10^{-6}$	26×10^{-6}	$17,5 \times 10^{-6}$
Spezifische Wärme ... cal/g/°C	0,130	—	0,23	0,25	0,12
Spezifischer el. Widerstand ... Ω mm²/m	0,5	1,7	0,045	0,075	0,6—0,7
Elastizitätsmodul ..... kg/mm²	11 000	11 500	7 300	4 500	20 000
Torsionsmodul ..... kg/mm²	4 500	4 600	2 650	1 700	8 800

Tabelle 2 Physikalische Eigenschaften verschiedener Werkstoffe

3.4. Mechanische Eigenschaften

3.4.1. Allgemein

Zunächst muß man zwischen dem reinen Metall und Titanlegierungen unterscheiden. Reinem Titan sind keine metallischen Legierungselemente bewußt zugesetzt. Der Gehalt an Sauerstoff ist durch Zusatz von Titanoxyd oder durch die Ausgangszusammensetzung des Rohmaterials bedingt. Stickstoff und Sauerstoff rufen im Werkstoff ähnliche Eigenschaftsänderungen hervor.

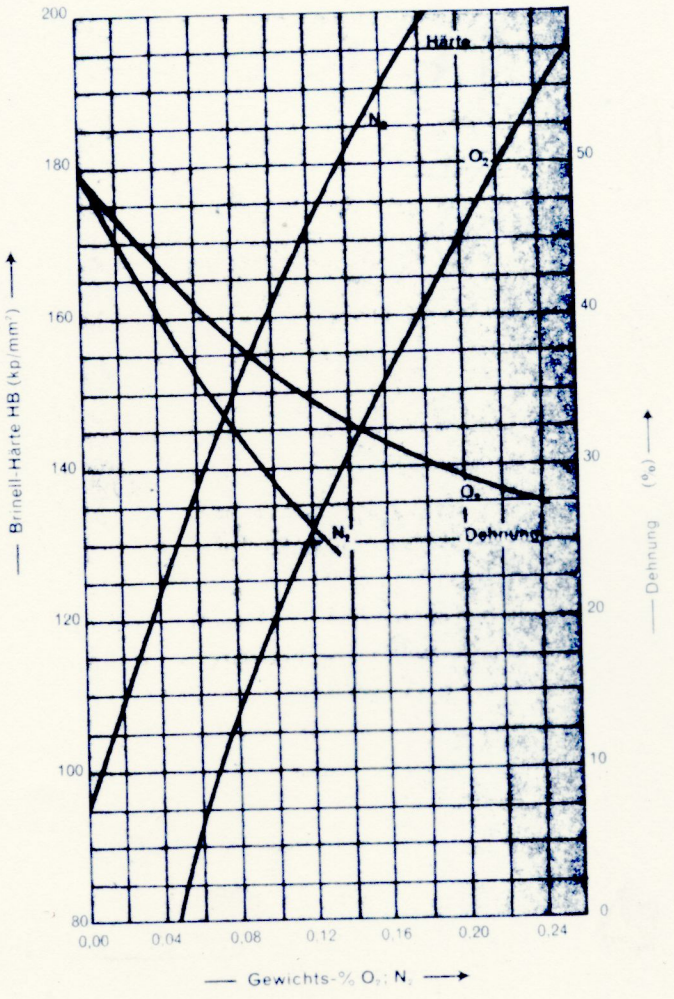


Bild 4 Einfluß des Sauerstoff- und Stickstoffgehaltes auf die Härte und Dehnung von Titan

Beide Elemente, die in beträchtlichen Mengen im Titangitter löslich sind, erhöhen mit steigendem Gehalt die Härte und Festigkeit, während Verformbarkeit (Duktilität) und Zähigkeit absinken. Der Sauerstoffgehalt kann also in kontrollierten Grenzen zur Festigkeitssteigerung ausgenützt werden.

Unsachgemäßes Schmelzen oder verarbeiten z.B. beim Schweißen gibt hohe Gehalte an O_2 und N_2 und der Werkstoff versprödet. Unlegiertes Titan überdeckt einen Festigkeitsbereich zwischen 30 und 70 kp/mm^2. An sich ist bei Reintitan ein kontinuierlicher Verlauf von niedriger zu hoher Festigkeit vorhanden. Die Abgrenzung der einzelnen Sorten ist willkürlich. Sie sind in folgende Bereiche eingeteilt:

				Bleche	Schmiedestücke
Ti 30 (RT-12) (3.7024)	0,2-Grenze	$\sigma_{0,2}$	kp/mm^2	mind. 18	mind. 18
	1,0-Grenze	$\sigma_{1,0}$	kp/mm^2	mind. 20	mind. 20
	Zugfestigkeit	σ_B	kp/mm^2	30-42	30-42
	Dehnung	δ_5	%	mind. 30	mind. 25
	Einschnürung	ψ	%		mind. 35
	Kerbschlagzähigkeit	a_k	mkp/cm^2		mind. 12
	Härte	HB 30	kp/mm^2	mind.100	mind.100
	Biegeradius (105° Biegewinkel)				
	unter 2 mm Blechstärke			1 x S	
	von 2 - 5 mm Blechstärke +)			1,5 x	
Ti 40 (RT-15) (3.7034)	0,2-Grenze	$\sigma_{0,2}$	kp/mm^2	mind. 25	mind. 25
	1,0-Grenze	$\sigma_{1,0}$	kp/mm^2	mind. 28	mind. 28
	Zugfestigkeit	σ_B	kp/mm^2	40-55	40-55
	Dehnung	δ_5	%	mind. 22	mind. 20
	Einschnürung	ψ	%		mind. 30
	Kerbschlagzähigkeit	a_k	mkp/cm^2		mind. 6
	Härte	HB 30	kp/mm^2	mind.140	mind.140
	Biegeradius 105° Biegewinkel)				
	unter 2 mm Blechstärke			1,5 x S	
	von 2 - 5 mm Blechstärke +)			2 x S	
Ti 50 (RT-18 S) -	0,2-Grenze	$\sigma_{0,2}$	kp/mm^2	mind. 33	mind. 33
	1,0-Grenze	$\sigma_{1,0}$	kp/mm^2	mind. 36	mind. 36
	Zugfestigkeit	σ_B	kp/mm^2	47-60	47-60
	Dehnung	δ_5	%	mind. 18	mind. 16
	Einschnürung	ψ	%		mind. 30
	Kerbschlagzähigkeit	a_k	mkp/cm^2		mind. 5
	Härte	HB 30	kp/mm^2	mind.160	mind.160
	Biegeradius (105° Biegewinkel)				
	unter 2 mm Blechstärke			2 x S	
	von 2 - 5 mm Blechstärke +)			2,5 x S	
Ti 60 (RT-18) (3.7064)	0,2-Grenze	$\sigma_{0,2}$	kp/mm^2	mind. 40	mind. 40
	1,0-Grenze	$\sigma_{1,0}$	kp/mm^2	mind. 42	mind. 42
	Zugfestigkeit	σ_B	kp/mm^2	55-75	55-75
	Dehnung	δ_5	%	mind. 16	mind. 15
	Einschnürung	ψ	%		mind. 30
	Kerbschlagzähigkeit	a_k	mkp/cm^2		mind. 4
	Härte	HB 30	kp/mm^2	mind.170	mind.170
	Biegeradius (105° Biegewinkel)				
	unter 2 mm Blechstärke			2,5 x S	
	von 2 - 5 mm Blechstärke +)			3,0 x S	

Tabelle 3 Mechanische Eigenschaften von unlegiertem Titan

Wasserstoff hat im Gegensatz zu Sauerstoff und Stickstoff nur einen geringen Einfluß auf die Festigkeitseigenschaften. Doch schon geringe Gehalte an H_2 erniedrigen die Kerbschlagzähigkeit von Reintitan. Deshalb darf ein Maximalgehalt von 0,013 % H_2 nicht überschritten werden. Folgende Tabelle zeigt die maximalen Zusätze von unlegiertem Titan:

		RT-12	RT-15	RT-18 S	RT-18
Eisen	Gew.-%	max. 0,20	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,35
Sauerstoff	Gew.-%	ca. 0,10	ca. 0,20	ca. 0,25	ca. 0,30
Stickstoff	Gew.-%	max. 0,05	max. 0,06	max. 0,06	max. 0,07
Kohlenstoff	Gew.-%	max. 0,08	max. 0,08	max. 0,10	max. 0,10
Wasserstoff*)	Gew.-%	max. 0,013	max. 0,013	max. 0,013	max. 0,013

*) Bei dünnen Abmessungen sind Gehalte bis 0,015% zulässig.

Tabelle 4 Chemische Zusammensetzung von unlegiertem Titan

Reines Titan kann nicht zu den warmfesten Werkstoffen gerechnet werden. Die Festigkeit fällt oberhalb der Raumtemperatur rasch ab. Festigkeitsbeanspruchte Bauteile sollten deshalb nur bis 300°C eingesetzt werden. Langzeitbeanspruchung fordert die Berücksichtigung der Kriechneigung. Schon bei Raumtemperatur neigt Titan trotz des hohen Schmelzpunktes zum Kriechen. 11 Dia
Beispiel: Wird ein Bauteil 1000 h lang mit 2/3 der Streckgrenze beansprucht, tritt eine plastische Verformung von über 1 % auf. Zwischen 200 - 400°C wird ein etwas andersartiges Verhalten beobachtet. Eine steigende Spannung ergibt eine relativ hohe Anfangsdehnung. Daran schließt sich ein Gebiet sehr geringer Kriechgeschwindigkeit an. Erst bei Temperaturen höher 400°C steigt die Dehnung bei Langzeitbeanspruchung weiter an.

Unlegiertes Titan spielt nur dort eine Rolle wo keine Festigkeitsbeanspruchung auftritt und das Eigengewicht keine zu hohe Spannungen erzeugt. Deshalb geht der Weg eindeutig in Richtung der Titanlegierungen.

Allgemein kann man sagen, daß Titanlegierungen immer schwieriger als Reintitan zu verarbeiten sind. Derzeit gibt es zwei Hauptrichtungen in der Schaffung von neuen Titanlegierungen. Einmal Legierungen mit hoher Festigkeit bei noch ausreichender Verarbeitbarkeit bei Raumtemperatur bis mäßiger Temperatur und dann speziell für gute Warm- und Zeitstandsfestigkeit entwickelte Legierungen für erhöhte Temperaturen. Dies wird durch die Struktur α, β, und $\alpha+\beta$ möglich.

Leg.-Typ	Bezeichnung[a]	Zustand	Mech. Eigenschaften			Kaltverformbarkeit Biegeradius (mm)'s	
			Streckgr. kp/mm²	Zugfestigk. kp/mm²	Dehnung %	ungeschweißt	geschweißt
α	Ti Al5 Sn2,5	geglüht	84	88	18	3,5 - 4,5	4 - 6
	Ti Al5 Sn5 Zr5	geglüht	86	91	18	2,5 - 5	4 - 6
	Ti Zr12 Al7	geglüht	98	102	18	3,5 - 5	4 - 6
	Ti Al8 Nb2 Ta1[b]	geglüht	84	90	17	4 - 6	4 - 6
	Ti Al8 Mo1 V1	geglüht	95	103	16	4 - 5	7 - 8
α + β	Ti Mn8	geglüht	88	97	15	3 - 5	n.schweißbar
	Ti Al3 V2,5	geglüht	60	70	15	2 - 3	4 - 6
	Ti Al4 Mn4	geglüht	94	104	16	-	spröde
	Ti Al4 Mn4	ausgehärtet	98	114	9	-	spröde
	Ti Al6 V4	geglüht	84	95	11	4,5 - 6	9 - 12
	Ti Al6 V4	ausgehärtet	105	119	7	-	spröde
α + β	Ti Al7 Mo4	geglüht	105	112	15	-	spröde
	Ti Al7 Mo4	ausgehärtet	122	133	12	-	
	Ti Al6 V6 Sn2 (FeCu)	geglüht	106	114	17	5	16
	Ti Al6 V6 Sn2 (FeCu)	ausgehärtet	127	133	6	-	-
	Ti Al4 Mo3 V1	geglüht	67	98	16	3 - 4	-
	Ti Al4 Mo3 V1	ausgehärtet	117	137	6	3,5 - 4,5	-
	Ti V16 Al2,5	geglüht	32	74	16	2	-
	Ti V16 Al2,5	ausgehärtet	116	126	6	-	-
β	Ti V13 Cr11 Al3	geglüht	91	95	16	2,5 - 3	3
	Ti V13 Cr11 Al3	ausgehärtet	123	130	8	-	-
	Ti V13 Cr11 Al3	kaltgewalzt ausgehärtet	172	183	4	-	-

Tabelle 5 Mechanische Eigenschaften technischer Titanlegierungen

Die Festigkeit technischer α- Legierungen beträgt 80 - 100 kp/mm^2. Die Bruchdehnung liegt zwischen 10 und 20 %, die Brucheinschnürung bei 20 bis 50 %. Die Festigkeit dieser Legierungen kann durch eine Wärmebehandlung nicht verbessert werden. Die bekannteste Legierung dieser Gruppe ist Ti Al 5 Sn 2,5 . Eine bessere Grundfestigkeit und eine höhere Warmfestigkeit haben z.B. die Legierungen Ti Al 8 Mo 1 V 1 oder Ti Zr 12 Al 7 . Alle α-Legierungen sind schweißbar.

Die $\alpha+\beta$ Legierungen enthalten meistens einen Aluminiumgehalt zwischen 4 - 7 % sowie einen Gehalt an β Stabilisatoren (V, Mo, Cr, Fe, Mn) von ca. 4 %. Die Grundfestigkeit bewegt sich zwischen 90 und 100 kp/mm^2. Die Warmfestigkeit liegt höher als bei aluminiumfreien Legierungen. Ti Al 4 Mn 4 und Ti Al 7 Mo 4 sind Schmiedelegierungen. Die Legierung Ti Al 6 V 4 kann praktisch zu allen Halbzeugen verarbeitet werden. Sie hat sich damit zu einer Universallegierung entwickelt. Sie ist auch nicht so sehr H_2 empfindlich. $\alpha+\beta$ Legierungen können durch Wärmebehandlung verbessert werden. Man erreicht dabei Festigkeiten bis zu 120 kp/mm^2.

Die technische β Legierung Ti V 13 Cr 11 Al 3 hat von allen Titanlegierungen das höchste Verhältnis Festigkeit zu spezifischem Gewicht, bezogen auf den ausgehärteten Zustand.

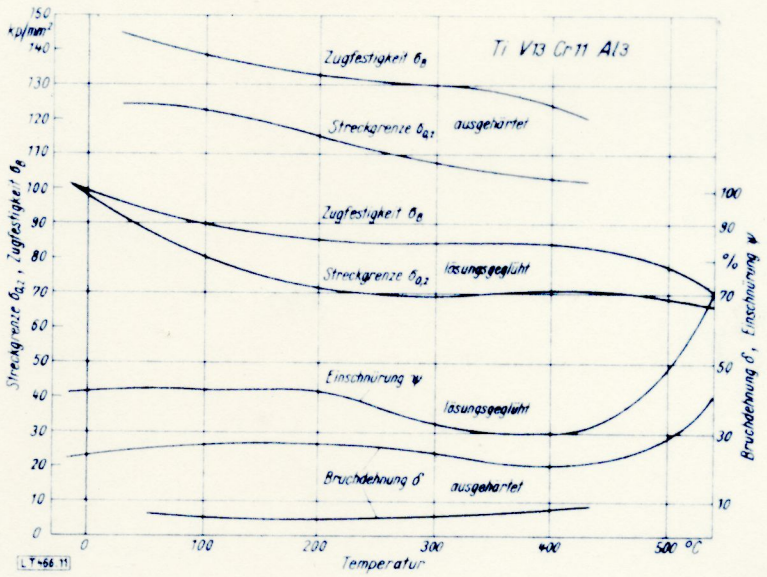


Bild 5 Festigkeitseigenschaften von Ti V 13 Cr 11 Al 3

Um diesen Zustand zu erreichen, muß man nach dem Lösungsglühen nicht mehr abschrecken. Dies rührt von den hohen Legierungszusätzen her welche die β - Phase stabilisieren.

Die höchste Festigkeit beim Anlassen wird nach einer Auslagerung von etwa 100 h bei 480°C erzielt. Eine vorangehende Kaltverformung verkürzt die Auslagerungszeit wesentlich und erhöht nochmals die Festigkeit. Zu langes anlassen oder auslagern bei 300°C führt zu Versprödung, da sich $TiCr_2$ ausscheidet. Dies führt zu merklichem Duktilitätsverlust.

3.4.2. Bei tiefen Temperaturen. O Dia

Zunächst ist die hohe Festigkeit und Duktilität der Reintitansorten hervorzuheben. Ebenso steigt bei diesen die Kerbschlagzähigkeit mit sinkender Temperatur an. Nur bei Reintitan höchster Festigkeit und bei Titanlegierungen tritt ein Abfall der Kerbschlagzähigkeit und Duktilität auf, allerdings auch erst ab ca. -200°C. Ein Steilabfall der Kerbschlagzähigkeit wie beim Stahl ist jedoch in keinem Fall zu beobachten.

Die Kerbempfindlichkeit bei tiefsten Temperaturen wird bei allen Titanlegierungen durch steigende Gehalte an O_2 und N_2, sowie durch eine Festigkeitssteigerung nach Aushärtung erhöht. Die α- Legierung Ti Al 6 V 4 zeigt die geringste Kerbempfindlichkeit, die Legierung Ti V13 Cr 11 Al 3 liegt etwas schlechter. Für spezielle Anwendungsfälle bei tiefsten Temperaturen hat man Legierungen mit geringsten Sauerstoffgehalten entwickelt.

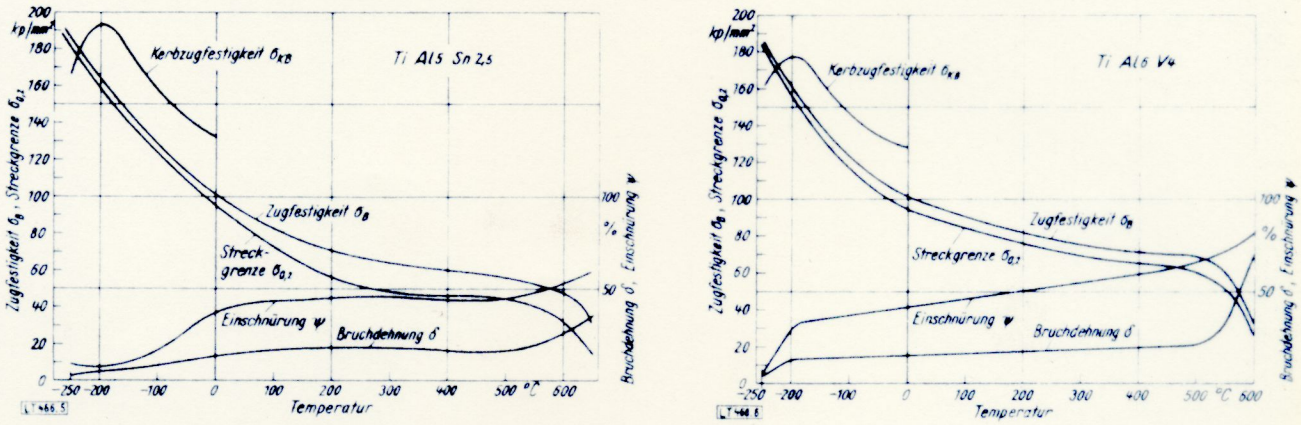


Bild 6 Festigkeitseigenschaften zweier Titanlegierungen in Abhängigkeit von der Temperatur

3.4.3. Bei hohen Temperaturen.

Unlegierte Titansorten sind bei erhöhten Temperaturen für Festigkeitsbeanspruchungen nur bis ca. 350°C brauchbar. Nicht festigkeitsbeanspruchten Teilen setzt die oberhalb 500°C einsetzende Oxydation bei längerer Einwirkungsdauer

eine Grenze. In reaktionsträger Atmosphäre oder im Hochvakuum kann Titan wegen seines hohen Schmelzpunktes thermisch recht hoch beansprucht werden.

Festigkeitsbeanspruchte Konstruktionsteile müssen nach den Zeitstandswerten des Titans ausgelegt werden, da Titan zum Kriechen neigt.

Temperatur °C	RT-15	RT-18 S	RT-18
20	22	26	29
75	17	20	22
150	15	17	18
200	14	16	17
250	11	13	14

Tabelle 6 Berechnungskennwerte für drei Reintitan-Sorten in kp/mm^2

Den angegebenen Berechnungskennwerten sind die Zeitstandswerte $\sigma_{B/100\,000}$ zugrunde gelegt. Dabei ist ein Sicherheitsfaktor von 1,5 und ein Verschwächungsbeiwert von 0,8 für Schweißnähte berücksichtigt. Kürzere Beanspruchungszeiten ermöglichen höhere Berechnungskennwerte.

Zwischen 300 und 400°C treten nur geringe Festigkeitsänderungen auf, darüber findet ein stärkerer Abfall statt. Wegen der hexagonalen Struktur zeigen α- Legierungen die höchste Warmfestigkeit zwischen 500 und 600°C. Dies ist bei Langzeitbeanspruchung noch augenfälliger. Für die Luft- und Raumfahrt ist die Festlegung weiterer Werkstoffkennwerte von Interesse. Zeitstandsprüfungen bei Beanspruchungszeiten von 1 - 100 h sind zweckmäßig. Diese Werte gibt es noch nicht für viele Legierungen.

Bei Bauteilen die einer raschen Erhitzung oder Belastung ausgesetzt sind, verschiebt sich die Anwendungsgrenze von Titanlegierungen zu etwas höheren Temperaturen hin.

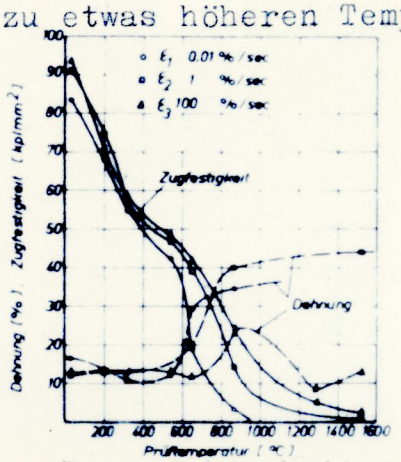


Bild 7 Einfluß der Temperatur bei verschiedenen Verformungsgeschwindigkeiten auf Ti Al 5 Sn 2,5

3.5. Sonstige technologische Eigenschaften.

Das Schwingungsverhalten des Titans ist als gut zu bezeichnen. Im allgemeinen wird das Verhältnis der Dauerfestigkeit zur Zugfestigkeit von Stahl auch von Titan erreicht und meist überschritten.

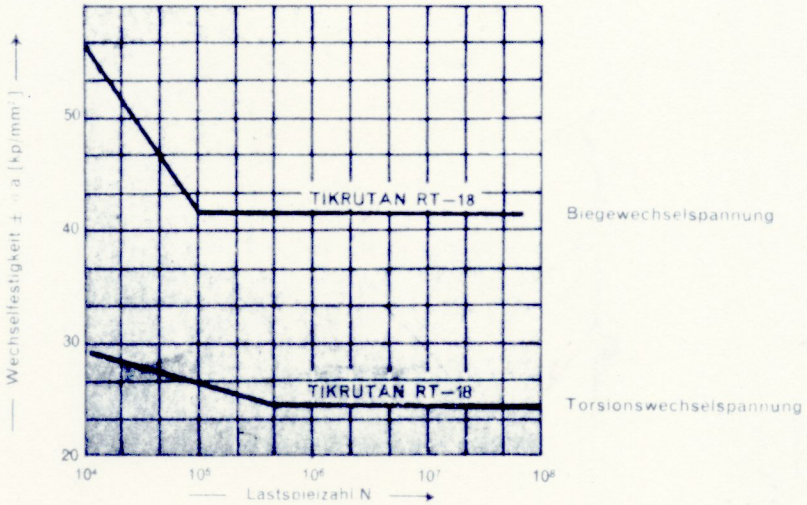


Bild 8 Dauerfestigkeit von Ti 60 (3.7064)

Das Verhältnis von Biegewechselfestigkeit zur Zugfestigkeit liegt für geglühte Werkstücke zwischen 0,5 und 0,7. Durch Aushärtung steigt die Dauerfestigkeit an, jedoch nicht im gleichen Verhältnis wie die Zugfestigkeit. Grobkörnige Struktur durch falsche Warmbehandlung macht sich auf die Dauerfestigkeit nachteilig bemerkbar.

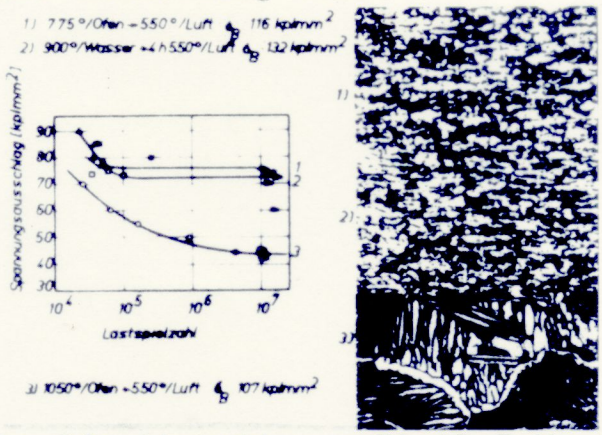


Bild 9 Wechselfestigkeit von Ti Al 7 Mo 4

Die 0,2-Quetschgrenze bei unlegiertem Titan entspricht etwa der 0,2-Dehngrenze. Die Scherfestigkeit bei Raumtemperatur liegt bei etwa 80 % der Zugfestigkeit dieses Werkstoffes.

Das Biege- und Tiefziehvermögen des Titans ist ebenfalls gut. Die Erichsen-Tiefungswerte bei Titanblech von 1,5 mm aus Ti 30 (3.7024) liegen bei mehr als 8mm (20-mm-Kugel) .

4. Behandlung und Verarbeitung von Titan

4.1. Wärmebehandlung von Titan und Titanlegierungen.

Bei Titanlegierungen kann man folgende Verfahren der Wärmebehandlung unterscheiden: Spannungsfreiglühen, Rekristallisationsglühen, Lösungsglühen, Aushärten uns Stabilisierungsglühen.

Das Spannungsfreiglühen baut die beim Kaltverformen oder Schweißen entstandenen Spannungen ab. Die Glühtemperaturen richten sich je nach Legierungsgehalt. Sie liegen für Reintitan zwischen 450 - 550°C, für aluminiumfreie Legierungen zwischen 550 - 600°C und für aluminiumhaltige Legierungen zwischen 600 - 750°C. Die Glühzeit beträgt dabei 15 bis 30 Minuten. Will man bei α- Legierungen einen weichen Zustand erreichen, wendet man das Rekristallisationsglühen zwischen 750 und 900°C mit nachfolgender Luftabkühlung an. Reintitan wird auch zu den α- Legierungen gezählt. Es rekristallisiert bei ca. 600°C und wird deshalb bei 650 - 700°C geglüht.

Bei $\alpha+\beta$ und β- Legierungen tritt die Phasenänderung im Temperaturbereich zwischen 600 und 1000°C ein. Daraus ergibt sich eine Vielfalt der Wärmebehandlung. Hauptsächlich ist die sich bildende Menge und Stabilität an β Mischkristallen wichtig. Mit steigendem Gehalt an β stabilisierenden Legierungszusätzen steigt also die Möglichkeit zur Aushärtung einer Legierung.

Ein Stabilisierungsglühen wird zur Erzielung eines weichen Zustandes nach der Verarbeitung durchgeführt. Durch langsame Abkühlung wird der Gleichgewichtszustand im Gefüge fast erreicht.

Die Lösungsglühtemperatur soll bei $\alpha+\beta$- Legierungen unterhalb der Umwandlungstemperatur $\alpha+\beta$ nach β liegen. Ein Abschrecken von Temperaturen aus dem β Gebiet gibt eine starke Kornvergröberung. Diese führt naturgemäß zur Zähigkeitsabnahme im ausgehärteten Zustand.

Durch Anlassen übersättigter βMischkristalle erhält man eine Aushärtung mit großer Festigkeitssteigerung. Die Höhe der Anlasstemperatur muß genau eingehalten werden, da sich bei den meisten Legierungen um 400°C eine spröde Zwischenphase (ω - Phase) bildet.

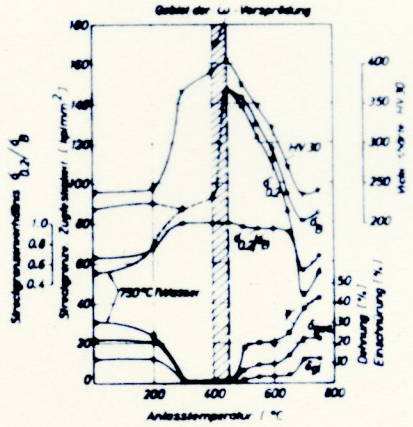


Bild 10 Einfluß der Anlaßtemperatur auf Ti V 16 Al 2,5

Nach dem Abschrecken zeigt die Legierung Ti V 16 Al 2,5 eine instabile β- Phase mit sehr niedrigem Streckgrenzenverhältnis. Die ω - Phase, d.h. das Gebiet der Versprödung tritt bei einer Anlaßtemperatur um 450°C ein. Höhere Anlaßtemperaturen führen zur Ausscheidung der α - Phase und damit zur Erhöhung der Festigkeit bei ausreichenden Zähigkeitskennwerten. Feinkörnige Gefüge ergeben optimale Duktilitätswerte. Deshalb muß eine Kornvergröberung bei Verarbeitung bei zu hohen Temperaturen oder beim Lösungsglühen vermieden werden.

4.2. Schmieden und Gießen

Das Schmieden von Titansorten bereitet keine grundsätzlichen Schwierigkeiten. Dabei gibt es folgende Richtwerte:

TIKRUTAN-Sorte	Anfangstemperatur in °C	Endtemperatur in °C
RT-12	900	unter 800
RT-15	920	unter 800
RT-18 S	950	unter 800
RT-18	950	unter 800
LT-21	1050	unter 900
LT-31	1000	unter 850
LT-32	1050	unter 900

Tabelle 7 Richtwerte für Schmiedetemperaturen von Titan

Am zweckmäßigsten erwärmt man im Elektroofen. Bei gasbeheizten Öfen darf die Flamme keinesfalls auf das Werkstück gerichtet sein. Die Gasflamme soll neutral oder leicht oxydierend wirken, darf aber keinesfalls reduzierend eingestellt sein.

Gesenkschmiedeteile können heute mit guter Oberflächengüte unter dem Hammer geschmiedet, aber auch im geschlossenen Gesenk gepresst werden.

Um die geforderten mechanischen Kennwerte zu erreichen, muß bei diesen Verformungen die Temperatur so geregelt werden, daß keine Überhitzung oder Kornvergröberung eintritt. Schmiedestücke von 300 kg sind schon unter dem Gegenschlaghammer hergestellt worden. Die größten Schmiedeteile w werden auf 50 000 t Pressen aus der Legierung Ti V 13 Cr 11 Al 3 hergestellt. Nach der Aushärtung lag bei diesen Teilen die Festigkeit über 140 kp/mm^2.
Die Versuche Gußstücke aus Titan herzustellen haben bis heute noch kaum brauchbare Ergebnisse geliefert.

4.3. Schweißen und Löten

Beim Schweißen von Titanwerkstoffen ist eine Gasaufnahme während des Schweißvorganges unbedingt zu vermeiden. Sauerstoff und Stickstoff verspröden die Schweißnaht. Es müssen also Schmelzschweißverfahren unter Edelgasschutz (Argonarc) oder im Vakuum angewendet werden.

Beim Schweißen ist darauf zu achten, daß nicht nur die Nahtseite wie sonst beim Argonarc-Verfahren üblich, sondern mit gleicher Sorgfalt auch die Wurzelseite vor dem Zutritt der Luft geschützt wird. Bei Werkstücken geringer Abmessungen mit verwickelter Form, ist die Verwendung einer edelgasgefüllten Schweißkammer empfehlenswert. Falls zu erwarten ist, daß durch das Schweißen starke Spannungen in der Konstruktion auftreten, ist ein Spannungsfreiglühen von Vorteil. Die bereits erwähnte Ofenatmosphäre ist auch hier zu beachten.

Widerstandspunkt- oder Rollennahtschweißen kann unter Bedingungen wie sie für rostfreien Stahl gelten auch ohne Edelgasschutz durchgeführt werden. Dies gilt nicht für Preßstumpfschweißen wie irrtümlich oft angenommen wird.

Bei sachgemäßer Schweißung erreicht man bei Reintitan und α - Legierungen die gleiche Festigkeit wie im Grundmaterial. Als Elektrode wird der Grundwerkstoff benützt.

Bei $\alpha+\beta$ - Legierungen können bei der Abkühlung nach dem Schweißen durch Umwandlungsvorgänge Versprödungen auftreten. Eine Kornvergröberung im Bereich der Schweißzone trägt zur Duktilitätsverminderung bei. Die Versprödungsneigung erhöht sich mit steigendem Gehalt an β - Legierungselementen.

Von den $\alpha+\beta$ Legierungen welche in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden sind die Legierungen Ti Al 6 V 4 schweißbar, die Legierungen Ti Al 4 Mo 3 V 1 und Ti Al 6 V 6 Sn 2 bedingt schweißbar und die Legierung Ti Mn 8 ist nicht schweißbar.

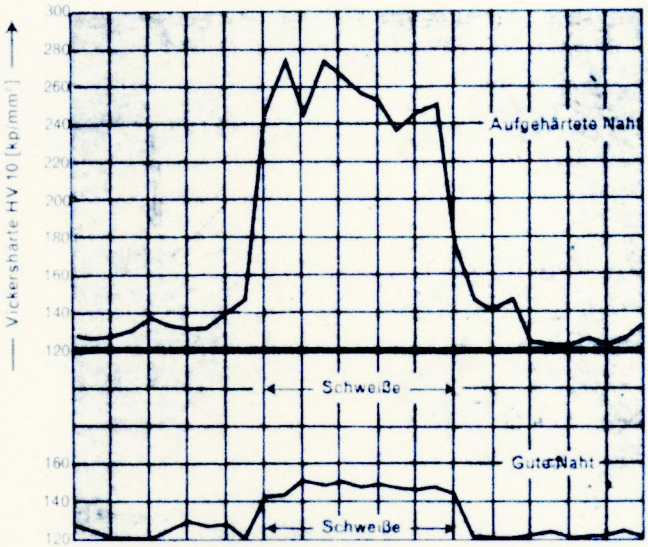


Bild 11 Härteverlauf in einer guten und in einer versprödeten Titan-Schweißnaht von Ti 30

Ein unmittelbares Verschweißen von Titan mit anderen Werkstoffen scheidet aus metallurgischen Gründen aus. Die hohe Löslichkeit vieler Metalle in Titan bzw. die Bildung von intermetallischen Phasen führen zu einer starken Versprödung des Schweißbereiches. Die Berührung von Titan mit anderen Metallen führt bei hohen Temperaturen, die jedoch weit unter dem Schmelzpunkt beider Metalle liegen, schon zu einer Aufschmelzung durch Bildung niedrigschmelzender Eutektika. Im Zweistoffsystem Titan-Eisen liegt der Schmelzpunkt des Eutektikums bei 1085°C.

Grundsätzlich läßt sich Titan auch löten. Eine Weichlötung erfordert aber zuerst ein Überziehen mit einem lötfähigen Metall wie Silber oder Kupfer. Die mechanische Festigkeit solcher Verbindungen liegt in den Grenzen normaler Weichlötverbindungen. Hartlöten von Titan gelingt nur, wenn wie beim Schweißen die Bildung einer Oxydschicht verhindert wird. Dazu gibt es spezielle Flußmittel. Mit diesen ist es möglich mit Hilfe des Autogenbrenners Titan mit Titan oder anderen Werkstoffen durch eine Hartlötung zu verbinden. Lote mit hohem Silbergehalt bei gleichzeitig niedriger Arbeitstemperatur sind von Vorteil.

4.4. Zerspanen

4.4.1. Drehen

Beim Zerspanen muß man für eine möglichst starre Einspannung von Werkstück und Werkzeug sorgen. Der relativ geringe E-Modul von Titan würde sonst die Bildung von Rattermarken fördern.

Für das Drehen von unlegiertem und legiertem Titan eignen sich in erster Linie Hartmetallwerkzeuge. Da recht hohe Schneidentemperaturen auftreten, liegen die Schnittgeschwindigkeiten mit 30 bis 75 m/min nicht sehr hoch. Die Bildung von Aufbauschneiden verhindert ein Spanwinkel von 12 bis 15°. Die nachfolgende Tabelle 8 enthält die günstigsten Zerspanungsbedingungen für das Drehen von Titan.

Vorschub mm	WIDIA-Hartmetallsorte Bez. neu	alt	Zerspanungs-Anw.-Gruppe	Schnittgeschw. v m/min	Freiwinkel α Grad	Spanwinkel γ Grad	Fasenspanwinkel γF Grad	Neigungswinkel λ Grad
a) glatter Schnitt und starre Schnittverhältnisse								
0,1 bis 0,3	TH20	G1	K20	75 bis 50	6 bis 8	12	—	—4
	TH30	G69	K30	65 bis 45	6 bis 8	12	—	—4
0,3 bis 0,5	TH30	G69	K30	50 bis 35	6 bis 8	12	—	—4
b) unterbrochener Schnitt oder unstarre Schnittverhältnisse								
0,1 bis 0,3	TH30	G69	K30	55 bis 35	6 bis 8	12	6	—4

Tabelle 8 Richtwerte für das Drehen von Titan

4.4.2. Fräsen

Beim Fräsen können Schwierigkeiten durch das Kleben der Späne am Werkzeug auftreten. Deshalb ist Gegenlauffräsen zu vermeiden und Gleichlauffräsen zu bevorzugen. Hierbei haftet nur das Ende des kommaförmigen Spanes am Werkzeug. Als Schneidwerkstoff eignen sich Hartmetall aber auch Schnellstahl.

4.4.3. Bohren.

Das Bohren wird zweckmäßig mit Schnellstahlbohrern durchgeführt. Eine reichliche Kühlung des möglichst scharfen Werkzeuges ist zu empfehlen. Da man mit relativ großem Vorschub arbeiten sollte, muß häufig abgesetzt werden um den Spanabfluß zu ermöglichen.

4.4.4. Sägen

Es kann mit den üblichen Bügelsägen gesägt werden. Dabei ist ein starker Anpreßdruck bei reichlicher Kühlung günstig. Bei den unlegierten Titansorten wird zweckmäßig ein grobes

Schnellstahlblatt (4 Zähne/Zoll), bei den Titanlegierungen ein fein gezahntes (6 - 8 Zähne/Zoll) gewählt.

4.4.5. Schleifen

Titan läßt sich gut schleifen. Dabei wirkt sich eine Herabsetzung der Schleifgeschwindigkeit auf 5 - 10 m/sec günstig aus. Eine reiche Kühlmittelzufuhr ist zu empfehlen, weil Titanschleifspäne pyrophor sind. Sie können sich wie die beim Feinstdrehen entstehenden Späne leicht durch die Reibungshitze erhitzen und explosionsartig entzünden. Ein Löschen mit Wasser ist - ähnlich wie bei Magnesium - unbedingt zu vermeiden.

4.5. Blechumformung und Massivverformung

Zu diesem Abschnitt möchte ich zunächst eine wertvolle Literaturangabe machen. In der Zeitschrift Luftfahrttechnik Raumfahrttechnik Nr.3 März 1965 hat Dr. Kossira einen interessanten Beitrag über Verformungsverfahren dünner Titanbleche veröffentlicht. Dr. Kossira hat am Lehrstuhl und Institut für Flugzeugbau unter Anleitung von Professor Hütter promoviert. Sein Beitrag behandelt die Probleme die sich bei der Fertigung der Zelle der dritten Stufe der Trägerrakete „ Eldo A" bei der Vereinigte Flugtechnische Werke GmbH (VFW) ergaben.

Bei der Blechumformung müssen die Eigenheiten der Titanlegierungen besonders berücksichtigt werden. Die hohe Streckgrenze bedingt große Verformungskräfte. Das hohe Streckgrenzenverhältnis und eine geringe Gleichmaßdehnung ergeben nur einen kleinen plastischen Verformungsbereich.

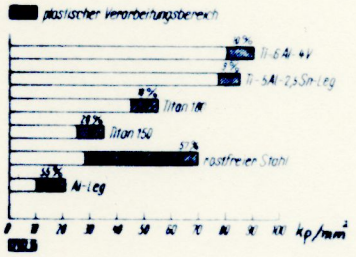


Bild 12 Verarbeitungsbereich von Titan im Vergleich zu anderen Metallen

Auf Grund des kleinen plastischen Verformungsbereiches erhält man eine starke Rückfederung. Die Titanstruktur erfordert bei der Umformung relativ große Biegeradien. Sie liegen bei 2 - 6-facher Blechdicke. Bei größeren Biegebreiten müssen die Radien auf 4-8-fache Blechdicke erhöht werden.

Fließdrückmaschinen können auch auf Titan angewendet werden. Dabei geht man von vorgeschmiedeten, gepreßten oder gewalzten zylindrischen Hohlkörpern oder von Blechronden aus. Die Zunahme der Zylinderlänge ergibt eine fortschreitende Wanddickenverminderung. Bei kleinen Gehäusen aus Ti V 13 Cr 11 Al 3 konnten Wandstärkeabnahmen bis 50% erzielt werden. Die Zugfestigkeit erreichte nach Anlassen von 7h bei 450°C 180 kp/mm^2 bei einer Dehnung von 5%. Auf diese Weise werden Raketendüsen, Druckgasflaschen und auch die zweite Stufe der Minuteman hergestellt.

Strangpreßprofile aus Titanlegierungen waren lange Zeit schwer herzustellen. Die erreichte Oberflächengüte erforderte immer eine spangebende Nachbearbeitung. Heute werden aber schon Strangpreßprofile bis zu 3mm beherrscht und man hofft in Kürze Stegstärken bis 1,5mm fertigen zu können.

Die Umformung erfolgt am günstigsten oberhalb Raumtemperatur. Dadurch werden die Umformkräfte und die Rückfederung verringert. Es können auch kleinere Abrundungsradien erzielt werden.

Kompliziert geformte Teile aus α oder $\alpha+\beta$-Legierungen werden bei 200°C vorgeformt. Zur Erzielung der erforderlichen Maßgenauigkeit erfolgt dann bei 500 - 650°C eine Kriechverformung. Dabei ist der gegenüber Stahl geringere Wärmeausdehnungskoeffizient zu beachten. Ein Werkstück aus Titan schrumpft weniger stark und fällt, in der gleichen Form hergestellt, etwas größer als ein entsprechendes Stahlteil aus. Diese Kriechverformung in entsprechenden Werkzeugen und Formen kann mit Spannungsfreiglühen und Aushärtung gekoppelt werden. Schwierige Umformungen an Werkstücken aus Reintitan und β-Legierungen können bei Raumtemperatur ausgeführt werden.

Große Formteile bei geringen Stückzahlen stellt man heute auch durch Explosionsumformung her.

4.6 Glühen

Nach der letzten Bearbeitung ist ein Schlußglühen angebracht. Die folgende Tabelle zeigt die Richtwerte der Temperaturen die unbedingt eingehalten werden müssen.

LN	AICMA	TIKRUTAN-Sorte	Temperatur in °C*)
3.7024	oder AICMA Ti-P01 ,	RT-12	650 bis 700
3.7034	oder AICMA Ti-P02 ,	RT-15	650 bis 700
		RT-18 S	650 bis 700
3.7064	oder AICMA Ti-P04 ,	RT-18	650 bis 700
		LT-21	800 bis 850
3.7164	oder AICMA Ti-P63	LT-31	700
		LT-32	780

*) Die Abkühlung kann im allgemeinen an Luft erfolgen, lediglich bei der Legierung LT-32 ist eine Ofenabkühlung von 780° C auf etwa 550° C mit einer Abkühlungsgeschwindigkeit von ca. 3° C/min durchzuführen.

Tabelle 9 Richtwerte für das Glühen von Titan

Die erforderlichen Glühzeiten sind abhängig von der vorangehenden Verformung sowie der Stärke des Materials. Bei Blechen von etwa 1 bis 3 mm genügt eine Haltezeit von 15 Minuten, die sich für Schmiedestücke großer Querschnitte auf ca. 1Stunde erhöht. Auch hier empfiehlt sich die Verwendung eines Elektroofens. Da Titan sein eigenes Oxyd löst, sollte vor der Schlußglühung eine Entzunderung der Oberfläche erfolgen.

Bei sehr geringen Querschnitten, z.B. Titan-Draht und -Folien, sollte zur Vermeidung einer zu starken Gasaufnahme während der Glühung eine Warmbehandlung im Hochvakuum erfolgen.

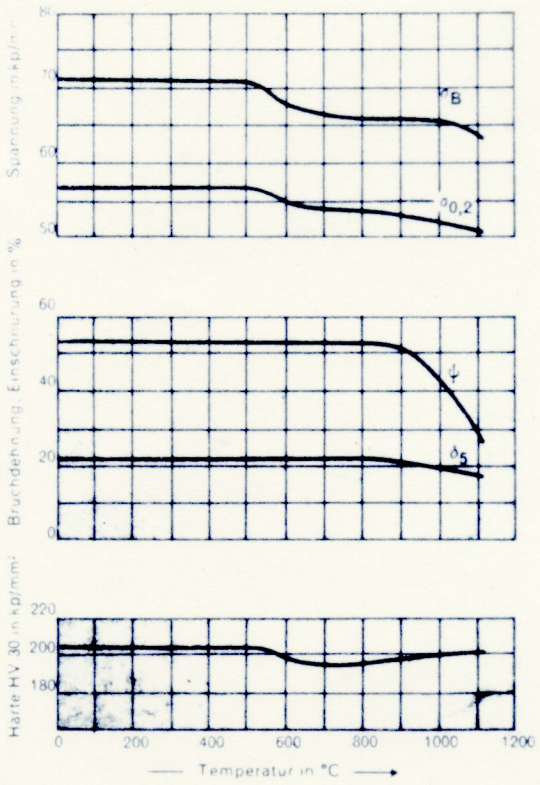


Bild 13 Einfluß der Glühtemperatur auf Ti 60 (3.7064)

5. Anwendung von Titan und Titanlegierungen

5.1. Wahl des Werkstoffes

Die Wahl der Titansorte richtet sich nach den Anforderungen an die Festigkeit, die Verarbeitbarkeit und nach den Korrosionsbeanspruchungen. Unlegiertes Titan kommt praktisch nur für die chemische Industrie in Frage. Bei einer Festigkeitsbeanspruchung von untergeordneter Bedeutung, jedoch starker Wärmebeanspruchung z.B. bei Wärmetauscherplatten oder Brandschotten wird besonders die Reintitansorte Ti 30 (3.7024) verwendet. Schmiedestücke für Pumpen, Armaturen usw. werden am günstigsten aus Ti 60 (3.7064) hergestellt.

Hochbeanspruchte Schmiedeteile an denen keine Schweißarbeiten oder spangebende Verformungen mehr erforderlich sind werden aus den Legierungen Ti Al 6 V 4 und Ti Al7 Mo 4 gefertigt.

Hier sei auch erwähnt, daß nur ca. 20% des von der Flugzeugindustrie verwendeten Titans in den Zellenbau gehen, das übrige Material wird im Triebwerksbau eingesetzt.
Einige Anwendungsbeispiele seien kurz gezeigt.
Hispano Suiza hat schon ganze Fahrwerke aus Titan hergestellt. Titanteile sind ebenfalls schon in Hydrauliksystemen von Flugzeugen erprobt worden. Die Atlasrakete besitzt mehrere Kugeldruckbehälter für Helium aus Ti Al 6 V 4 für Innendrücke von 350 atü bei -185°C. Dieser Behälter wiegt 22 kg gegenüber einem solchen aus Aluminium mit 36 kg oder aus Stahl mit 56 kg. Die Titanverwendung liegt dabei auf der Hand, wenn man bedenkt, daß jedes eingesparte Kilogramm Eigengewicht eine Vergrößerung der Reichweite um etwa 3,5 km ermöglicht. Der interkontinentale Flugkörper Atlas hat nur durch die Verwendung von Titan eine um 1 100 km größere Reichweite erhalten.

Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung rechnet man heute im Flugzeugbau mit einem üblichen Aufwand von rund 300.-DM zur Einsparung eines Kilogramms Eigengewicht. Dadurch liegt die Wirtschaftlichkeitsgrenze der Titanverwendung beim Austausch von Stahlteilen mit Titan bei solchen Stücken, die eine Ausbringung von 65% des Halbzeuges zum einbaufertigen Teil ermöglichen.

1 kg Einsparung am Triebwerksgewicht ergibt sogar eine Verringerung des Flugzeugeigengewichtes um etwa 5 kg. Dafür können unter Berücksichtigung oben genannter Zahl Mehrkosten in Höhe

von 1500.-DM entstehen ohne die Wirtschaftlichkeit zu beeinträchtigen. Beim Triebwerk J57 liegen die Materialmehrkosten z.B. unter 950.-DM, obwohl ein Abfall von 80% beim Austausch von Stahlteilen mit Titan vom Halbzeug bis zum einbaufertigen Teil entsteht.

Typ	Hersteller	Titanverwendung
A. Flugzeuge		
I. Militär-Flugzeuge		
F-84 Thunderjet	Republic	1. praktischer Versuchseinsatz 1951
F-86 Sabre	North American	Schotten, diverse Verkleidungen
F-100 Super Sabre	North American	Schotten, Spanten, Triebwerkverkleidungen, 600 Teile, ca. 500 kg brutto
F-101A Voodoo	McDonnell	Triebwerkverkleidung, Haut usw., ca. 650 kg brutto
F-102	Convair	Triebwerkverkleidungen usw., ca. 670 kg brutto
F-103	Republic	Spanten, Verkleidungen usw.
F-104 Starfighter	Lockheed	Triebwerkverkleidung ca. 125 kg brutto
F-105 Thunderchief	Republic	Triebwerkverkleidung, Sturzflugbremsen, ca. 125 kg
FJ-2 Fury	North American	Diverse Zellenbauteile
FJ-4 Fury	North American	Diverse Zellenbauteile
F3H Demon	McDonnell	Diverse Zellenbauteile
F7U Cutlass	Chance Vought	Diverse Zellenbauteile
F8U-1 Crusader	Chance Vought	Div. Verkleidungen, Titanschrauben, ca. 275 kg
P-1	English Electric	Einige Titanteile
C-130 Hercules	Lockheed	Triebwerkgondel-Verkleidung, ca. 500 kg
B-52D Stratofortress	Boeing	Triebwerkgondel-Verkleidung, 625 kg
B-52D (M.I. Stratofortr.	Boeing	dto. Schrauben, Schmiedestücke, 2100 kg
B-58 Hustler	Convair	Titanschrauben, ca. 135 kg
CL-28 Argus	Canadair	Haut, Brandschotten, Verkleidungen, 1200 kg
A3D Skywarrior	Douglas	Vorflügelführung aus Titan
P6M Seamaster	Martin	Verkleidungen usw., rd. 500 Teile
X-3	Douglas	Triebwerk- und Heckverkleidung
X-15	North American	Titanverkleidung von Bienenwaben
II. Zivilflugzeuge		
DC-7	Douglas	Triebwerkgondeln, sonstige Teile, 333 Einzelteile, rd. 220 kg
DC-7B	Douglas	wie vor
DC-7C	Douglas	wie vor, 554 Teile, rd. 360 kg
DC-8	Douglas	wie vor, ca. 430 kg
L-188A Electra	Lockheed	Gondel- und sonstige Teile, ca. 220 kg
CV-880	Convair	Triebwerkverkleidung
Britannia 310	Bristol	wie vor, Brandschotten
Comet 4	De Havilland	wie vor
IL-18	Iljuschin	Teile der Triebwerkgondel
B. Hubschrauber		
S-56	Sikorsky	Brandschotten
S-58	Sikorsky	Brandschotten
YH16A	Vertol	Triebwerkverkleidung
47J	Bell	Brandschotten
C. Triebwerke		
J57-19	Pratt & Whitney	Verdichterteile, 630 kg
J57 Serie C	Pratt & Whitney	Verdichterteile, 1650 kg
J75	Pratt & Whitney	Verdichterteile, 1350 kg
Iroquois	Orenda	Verdichterteile
Avon RA 28	Rolls-Royce	Verdichterschaufeln von 4 Stufen
Proteus 755	Bristol	Div. Verkleidungen, versuchsweise
J71	Allison	Verkleidungen, versuchsweise
J54	Westinghouse	Verdichterteile
T33	Lycoming	Schaufelrad, versuchsweise
Gyron	De Havilland	Schaufelrad, versuchsweise
T53	Lycoming	Verdichterscheibe, versuchsweise
D. Flugkörper		
SM-65 Atlas	Convair	Helium-Druckbehälter
SM-78 Jupiter	Chrysle	Verkleidungen

Tabelle 9
Zusammenstellung von Flugkörpern bei denen Titan verwendet wurde

5.2 Konstruieren mit Titan

Konstruktiv sind einige Eigenschaften des Titans zu berücksichtigen. Der E-Modul liegt mit etwa 11 000 kg/mm^2 halb so hoch wie der von Stahl. Biege- und knickbeanspruchte Teile können nicht ohne Änderung aus der auf Stahl abgestellten Konstruktion übernommen werden. Da jedoch die Abmessungen eines Bauteils in der 3. Potenz in das Widerstandsmoment als Berechnungsgrundlage eingehen, genügt eine Vergrößerung etwa um den Faktor $\sqrt[3]{2}$. So erhält man ungefähr die gleiche Steifigkeit eines Titanbauteils im Vergleich zu Stahl. Das günstige Gewichtsverhältnis Titan/Stahl=0,58 wird dadurch nicht mehr erreicht. Die Gewichtseinsparung beträgt aber immer noch rund 30%.

Ist bei Titanbauteilen mit Dauerbelastung zu rechnen, müssen die Werte der Zeitstandsfestigkeit zugrunde gelegt werden. Bei rotierenden Teilen ist die Neigung des Titans unter metallischer Reibung zu Fressen zu berücksichtigen.

Beim Entwurf von Titan-Bauteilen, die üblicherweise als Formguß aus herkömmlichen Werkstoffen hergestellt werden, ist zu prüfen, ob eine Schweißkonstruktion, eine geschmiedete und geschweißte oder eine gesenkgeschmiedete Ausführung zweckmäßig ist. Wegen des hohen Sachwertes von Titan liegt die Wirtschaftlichkeitsgrenze für Gesenkschmiedestücke oft bei nur relativ geringen Stückzahlen. Dies trifft ja allgemein im Flugzeugbau auch zu.
Grundsätzlich kann Titan in den für Stahl üblichen Gesenken verarbeitet werden. Scharfe Kanten sollten allerdings vermieden werden. Die Abrundungsradien sind so groß wie möglich zu wählen. Es ist auch zu beachten, daß das Werkstück aus Titan bei der Abkühlung weniger schrumpft als ein im gleichen Gesenk geschlagenes Stahlteil. Die Differenz ist jedoch geringer, als es beim Vergleich der Wärmedehnzahlen dieser Werkstoffe den Anschein hat, da Titan bei tieferen Temperaturen verarbeitet wird.

Bei Federn aus Titan muß die Kriechneigung des Titans beachtet werden. Sofern die auftretenden Beanspruchungen gewisse Zeit-Dehn-Werte übersteigen, muß mit einer allmählichen Änderung der Federhärte gerechnet werden. Bei vorgegebenem Federweg wird die Feder im Laufe der Zeit ein wenig weicher. Bei der Dimensionierung der Feder ist der geringere Schubmodul des Titans gegenüber Stahl dadurch zu berücksichtigen

daß z.B. der Drahtdurchmesser um das 1,2fache stärker ausgelegt wird. Damit erreicht man mit Stahl vergleichbare Federeigenschaften.

Berührung von Titan mit anderen Metallen muß bei zu erwarteter Berührungskorrosion durch geeignete konstruktive Maßnahmen umgangen werden. Von der Korrosion wird im allgemeinen nicht das Titan betroffen, sondern nur das Paarungsmetall angegriffen. Bezüglich der Wahl des Paarungsmetalles kann man das Titan mit rostfreiem Stahl vergleichen.

Es sei noch erwähnt, daß sich Titan auch kleben läßt. Dieses Verfahren findet bei den Bestrebungen, Honigwaben für den Zellenbau aus Titan herzustellen, Anwendung. Hier bringt Titan einige Vorteile, da inzwischen neuzeitliche Klebemittel hergestellt werden, deren Warmfestigkeit 50 bis 100°C höher liegt als die des Aluminiums. In diesem Temperaturbereich kann man nunmehr mit Titan leichter bauen als mit der bisher gebotenen Verwendung von Stahlfolien.

6. Zwei Vertreter des Werkstoffes Titan

6.1 Reintitan

Bezeichnung: LN 3.7064 oder Ti 60; Krupp RT18; AICMA Ti-P04

Verwendungsbereich: Unlegiertes Titan wird hauptsächlich im chemischen Apparatebau auf Grund seiner guten Korrosionsbeständigkeit gegenüber oxydierenden Medien eingesetzt. Wegen des niedrigen spezifischen Gewichtes findet Titan im Flugzeugbau Verwendung.

Chemische Zusammensetzung in Gewichts-%:

Eisen	max. 0,35
Sauerstoff	etwa 0,30
Stickstoff	max. 0,07
Kohlenstoff	max. 0,10
Wasserstoff	max. 0,013
Titan	Rest

Physikalische Eigenschaften:

Spezifisches Gewicht	4,5	p/cm^3
Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur	11.000	kp/mm^2
Torsionsmodul bei Raumtemperatur	4.500	kp/mm
Schmelzpunkt	1.700	°C
Umwandlungstemperatur $\alpha \rightarrow \beta$	885	°C
Spez. Wärme bei 15°C	0,125	cal/g grd
Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur	0,04	cal/cm s grd
Mittl. Wärmeausdehnungszahl (20 bis 200°C)	8,5.10^{-6}	m/m grd
Spez. elektrischer Widerstand bei 20°C	0,50	Ω mm^2/m
Magnetisches Verhalten	paramagnetisch	

Mechanische Eigenschaften:

RT-18	0,2-Grenze	$\sigma_{0,2}$ kp/mm²	mind. 40	mind. 40
	1,0-Grenze	$\sigma_{1,0}$ kp/mm²	mind. 42	mind. 42
	Zugfestigkeit	σ_B kp/mm²	55—75	55—75
	Dehnung	δ_5 %	mind. 16	mind. 15
	Einschnürung	ψ %		mind. 30
	Kerbschlagzähigkeit	a_k mkp/cm²		mind. 4
	Härte	HB 30 kp/mm²	mind. 170	mind. 170
	Biegeradius (105° Biegewinkel)			
	unter 2 mm Blechstärke		2,5 x S	
	von 2 bis 5 mm Blechstärke*)		3,0 x S	

*) Über 5 mm Blechstärke wird die Kerbschlagzähigkeitsprüfung durchgeführt.

Tabelle 6.1.1 Mechanische Eigenschaften von Ti 60

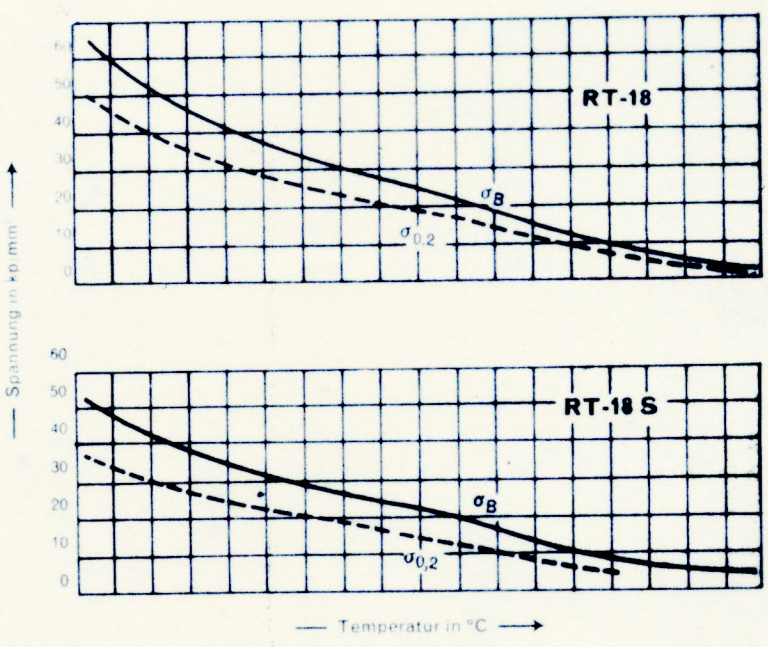


Bild 6.1.1 Zugfestigkeit und 0,2-Grenze von unlegiertem Titan bei erhöhten Temperaturen

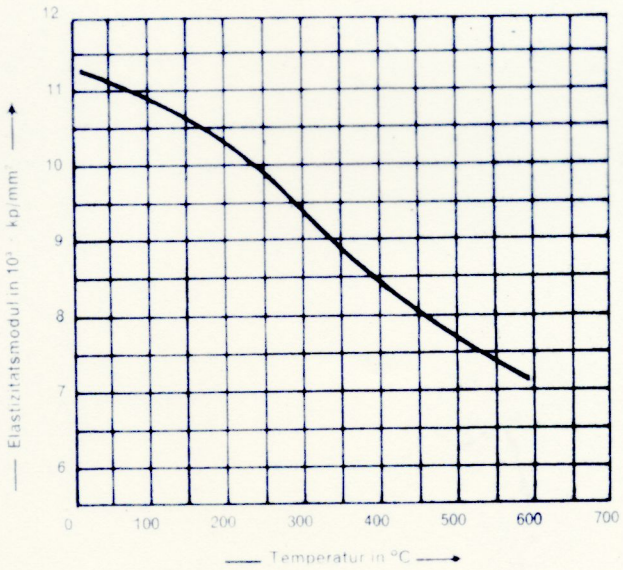


Bild 6.1.2 Elastizitätsmodul von Ti 60 in Abhängigkeit von der Temperatur

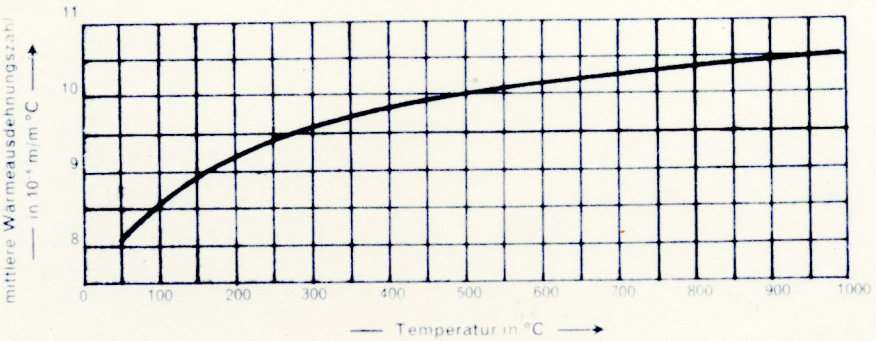


Bild 6.1.3 Wärmeausdehnung von unlegierten Titan-Sorten in Abhängigkeit von der Temperatur (Mittelwerte)

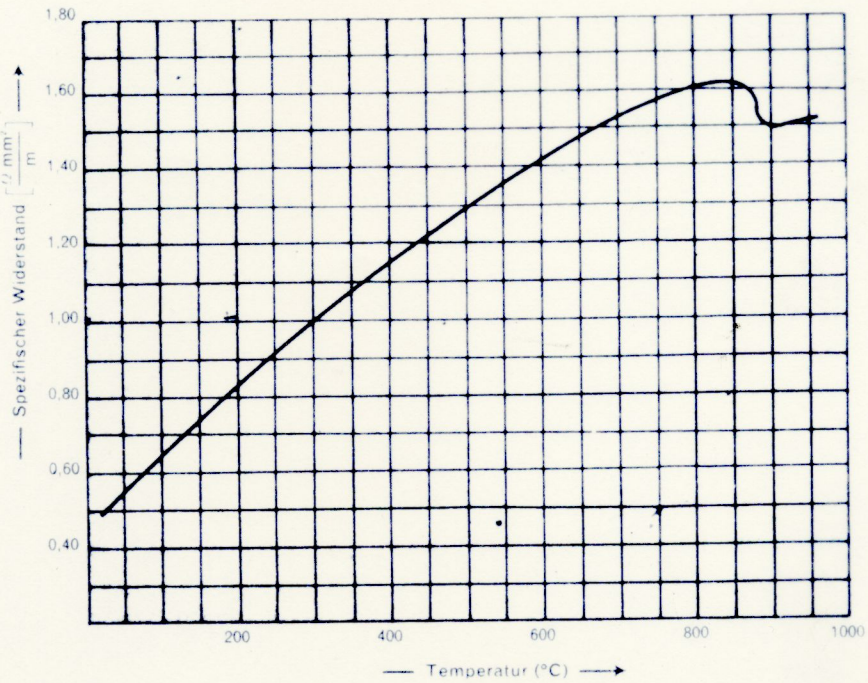


Bild 6.1.4 Spezifischer elektrischer Widerstand unlegierter Titan-Sorten (Mittelwerte)

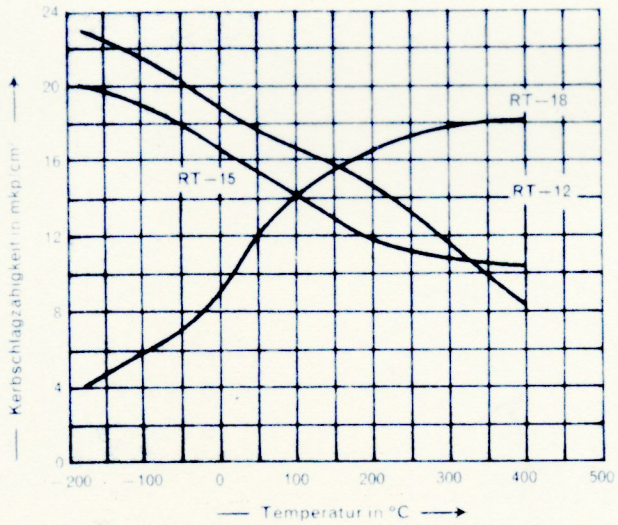


Bild 6.1.5 Kerbschlagzähigkeit unlegierter Titan-Sorten bei tieferen und höheren Temperaturen (Mittelwerte)

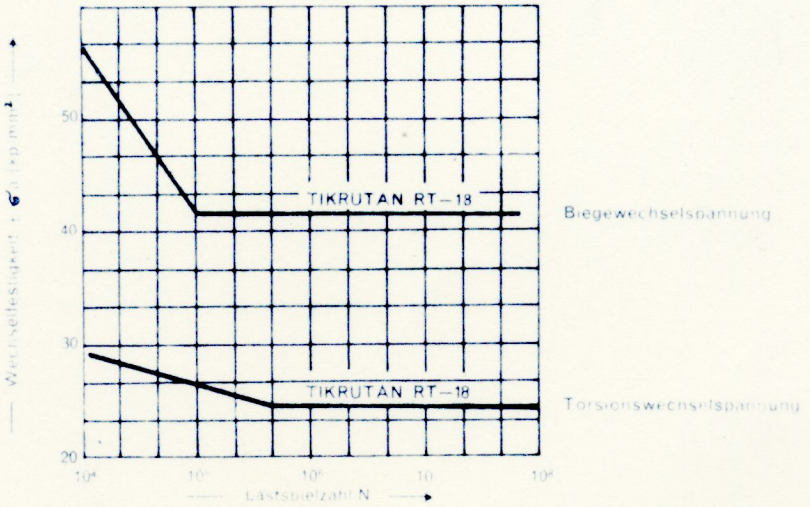


Bild 6.1.6 Dauerfestigkeit von Ti 60

Wärmebehandlung: Glühen bei 650 bis 700°C, Haltezeit drei Minuten je mm Wanddicke, jedoch mindestens 15 Minuten.

Schweißen: Verwendung von Argon 99,95 %. Schutz der Nahtoberseite und Wurzelseite vor Luftzutritt auch während der Abkühlung bis unter etwa 300°C. Als Zusatzdraht ist ein Blankdraht gleichen Materials zu verwenden.

Verarbeitung: Bei der Umformung ist in allen Fällen eine Glühbehandlung erforderlich, auch wenn die Kaltverformung unter 5 % liegt.

6.2 Titanlegierung

Bezeichnung: LN 3.7164 oder Ti Al6 V4; Krupp LT31
AICMA Ti-P63

Verwendungsbereich: Bei Raumtemperatur besteht diese Legierung aus einem Gefüge von $(\alpha+\beta)$-Mischkristallen. Diese Legierung weist neben hoher Festigkeit und einem hohen Streckgrenzenverhältnis eine gute Duktilität und eine bemerkenswerte Zähigkeit auf. Teile für hohe Festigkeitsbeanspruchungen auch bei erhöhten Temperaturen werden aus Ti Al6 V4 hergestellt, wie: Verdichterteile von Gasturbinen (Schaufelringe und Scheiben), Beschlagteile, Schrauben, Bolzen.

Chemische Zusammensetzung in Gewichts-%:

Aluminium	5,5 - 7,0
Vanadium	3,5 - 4,5
Kohlenstoff	max. 0,08
Eisen	max. 0,25
Stickstoff	max. 0,07
Wasserstoff	max. 0,013
Sauerstoff	max. 0,20

Physikalische Eigenschaften:

Spezifisches Gewicht	4,43	p/cm^3
Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur	11.000	kp/mm^2
Umwandlungstemperatur $(\alpha+\beta) \rightarrow \beta$	980	^oC
Spez. Wärme bei 20°C	0,134	cal/g grd
Mittlere Wärmeausdehnungszahl (20 bis 100°C)	$8,6.10^{-6}$	m/m grd
Spez. elektrischer Widerstand	1,66	$\Omega\, mm^2/m$
Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur	$1,54.10^{-2}$	cal/cm s grd
Magnetisches Verhalten	paramagnetisch	

Mechanische Eigenschaften:

Zugfestigkeit *)	mind. 90	kp/mm^2
0,2-Dehngrenze	mind. 84	kp/mm^2
Dehnung	mind. 10	%
Einschnürung	mind. 25	%
Kerbschlagzähigkeit	mind. 4	mkp/cm^2
Härte	ca. 260 - 340	HB 30 kp/mm^2

+) Durch Vergüten können bei dünnwandigen Teilen bis max. 25mm Festigkeiten im Bereich von 110 bis 120 kp/mm^2 erzielt werden.

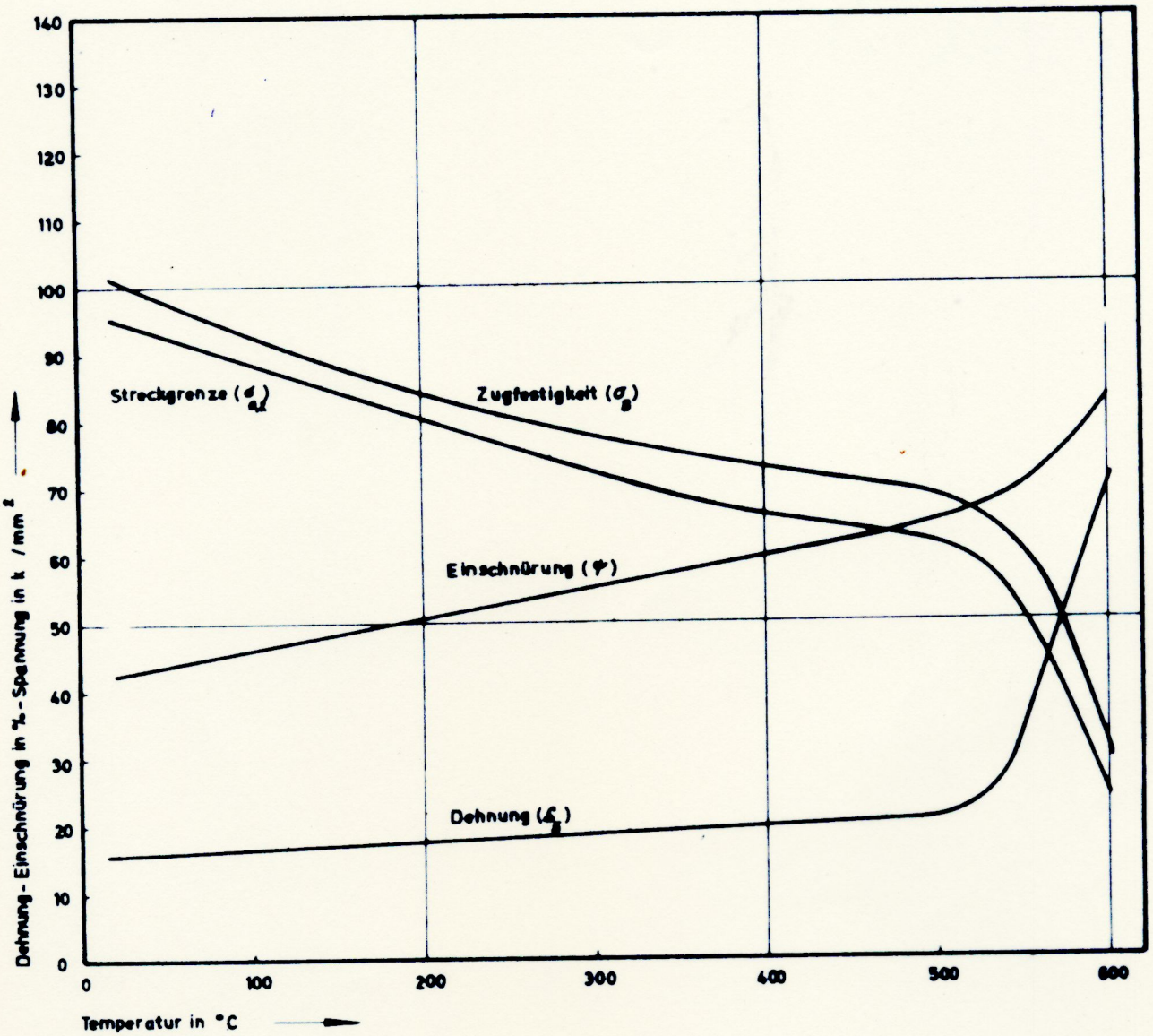


Bild 6.2.1 Festigkeitsverhalten von Ti Al 6 V 4 in Abhängigkeit von der Temperatur
Wärmebehandlung: 2h 700°C / Luft

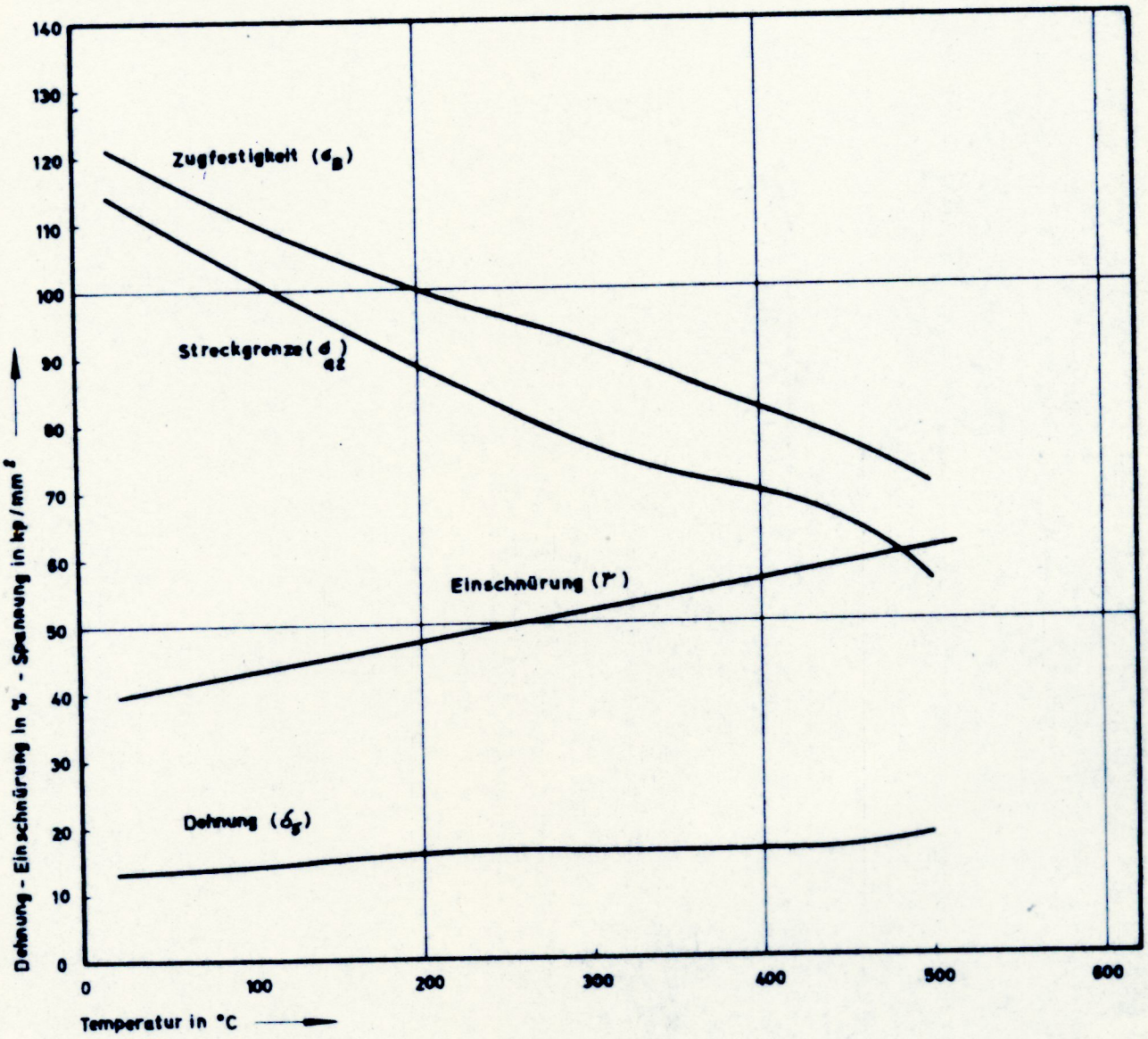


Bild 6.2.2 Festigkeitsverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur
Wärmebehandlung: 1/2 h 950°C / Wasser
+ 8 h 500°C / Luft

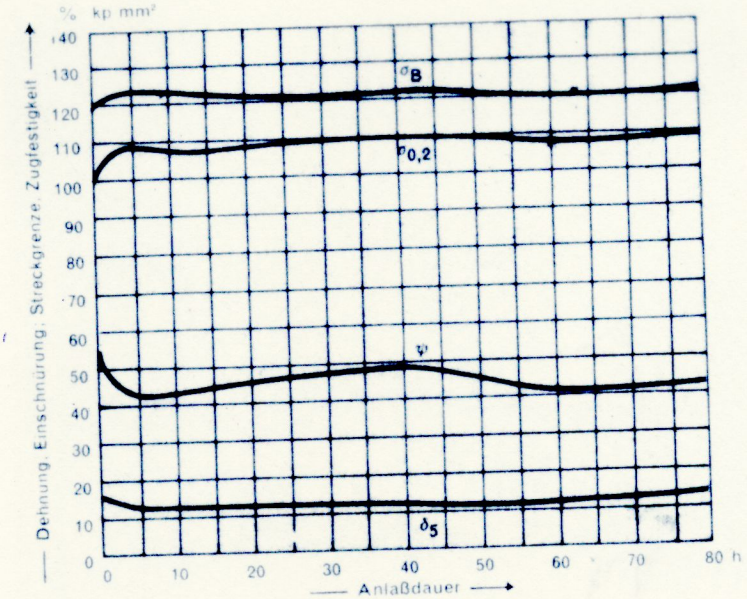


Bild 6.2.3 Einfluß der Anlaßzeit bei 500°C auf die mechanischen Eigenschaften von Ti Al6 V4
Vorbehandlung: 1/2 h 950°C / Wasser

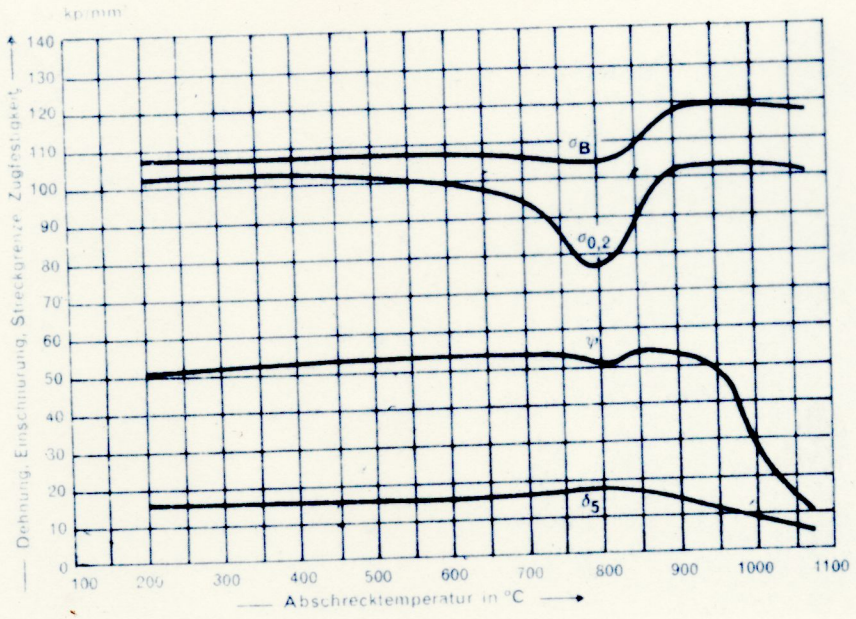


Bild 6.2.4 Einfluß der Abschrecktemperatur auf die mechanischen Eigenschaften von Ti Al6 V4

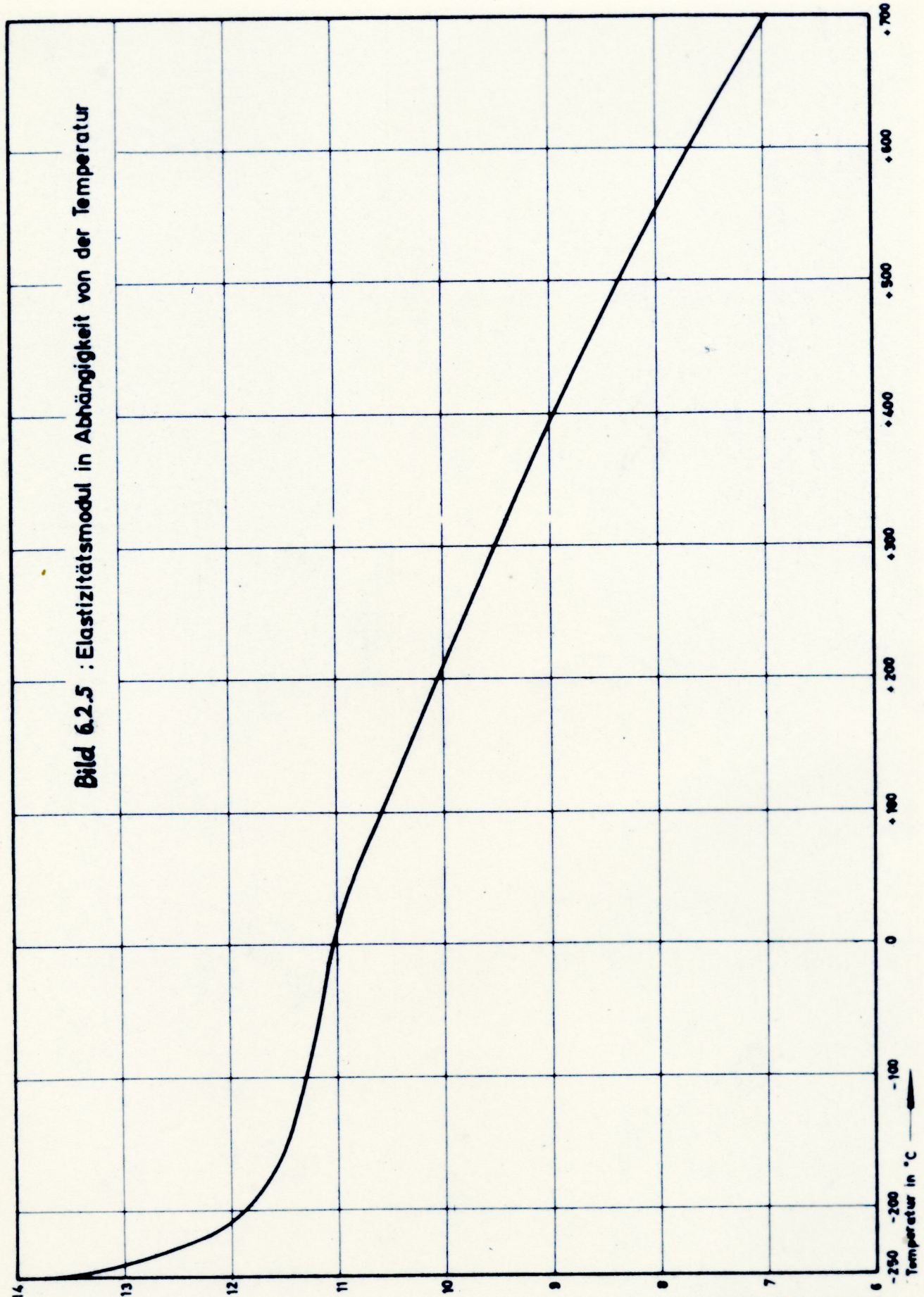


Bild 6.2.5 : Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur

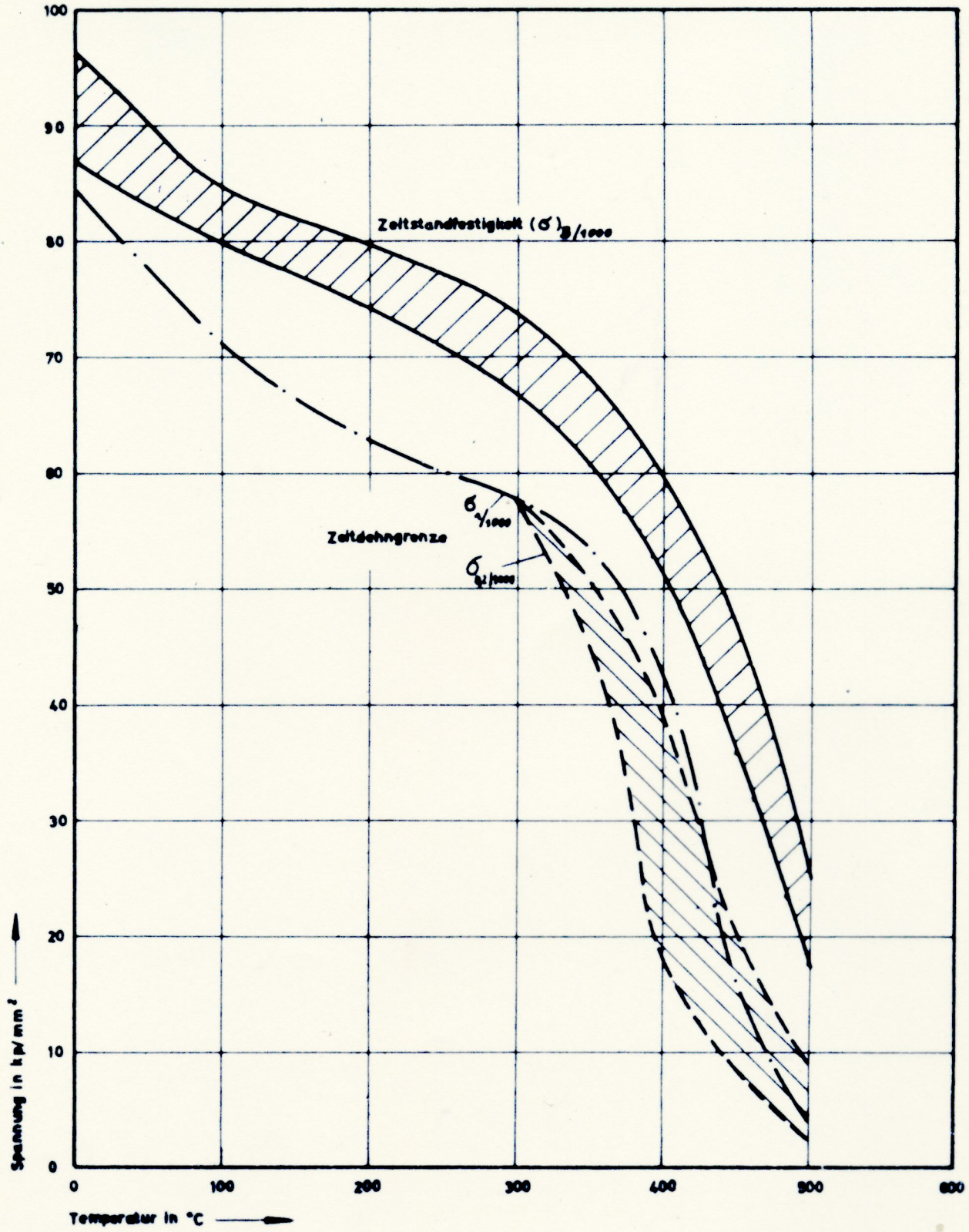


Bild 6.2.6 Zeitstandverhalten von Ti Al6 V4

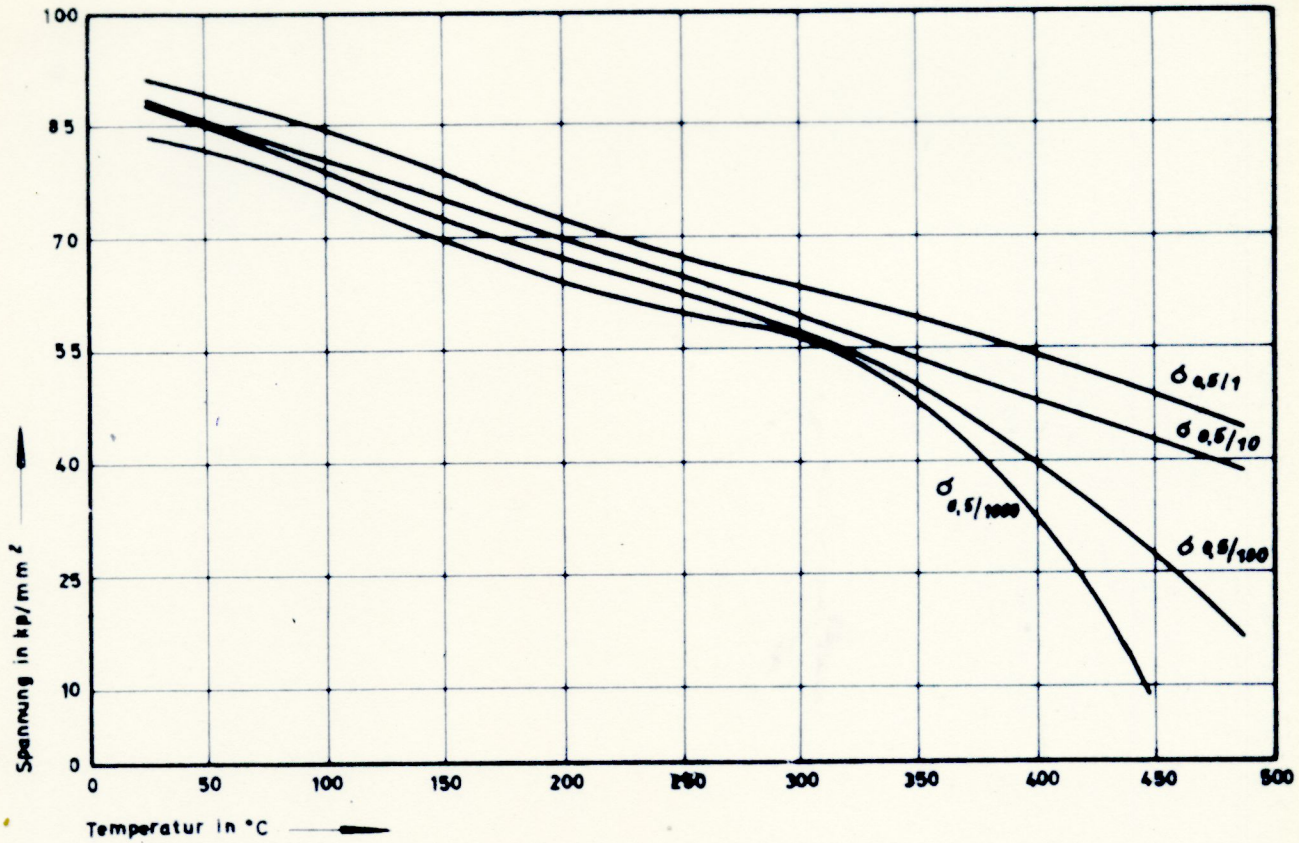


Bild 6.2.7 Zeitdehngrenzen von Ti Al6 V4 in Abhängigkeit von der Temperatur

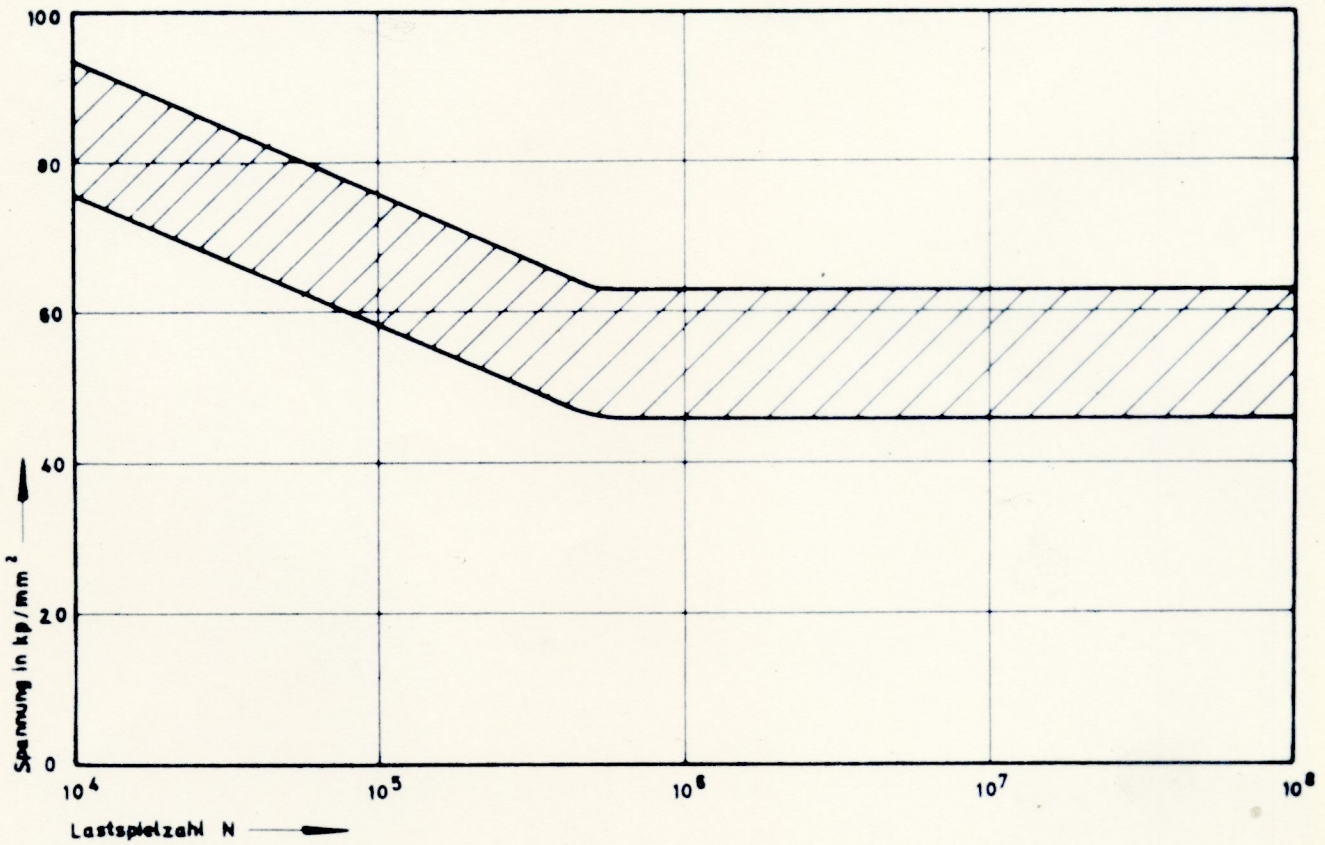


Bild 6.2.8 Wöhlerschaubild der Biegewechselfestigkeit für Ti Al6 V4

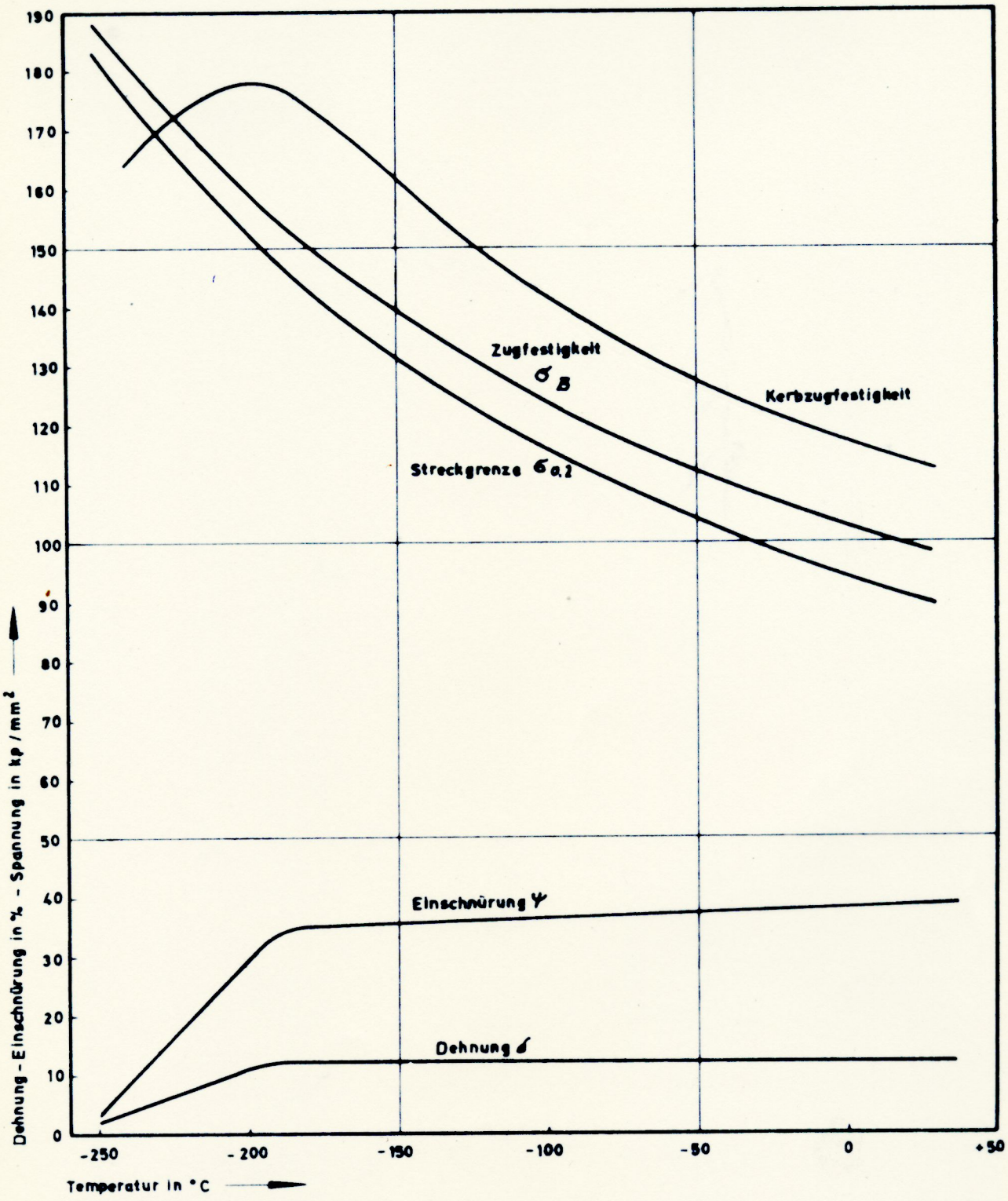


Bild 6.2.9 Tieftemperatureigenschaften von Ti Al6 V4

Wärmebehandlung:_ Zur Erzielung maximaler Duktilität und Zähigkeit bei hoher Festigkeit wird geglüht: 1 - 2 h 700°C/Luft. Durch eine Abschreckung läßt sich die Legierung auf hohe Festigkeitswerte vergüten. Dabei liegt allerdings die Grenze der Durchhärtbarkeit bei Teilen mit maximal 25 mm Wandstärke bzw. Durchmesser. Das Vergüten erfolgt so: 15 min - 1 h 930°C bis 950°C / Wasser; Anlassen 4 h - 8 h bei 500°C - 540°C /Luft.

Schmieden: Es sollte bei der tiefsten Temperatur, die noch eine ausreichende Verformung gewährleistet, geschmiedet werden. Besonders wichtig ist eine ausreichende Schlußverformung bei der Schmiedeendtemperatur, um ein feinkörniges Gefüge und damit gute mechanische Eigenschaften zu erhalten.

Vorwärmen:	700°C
Schmiedebeginn:	900 - 950°C
Schmiedeende:	750 - 800°C

Schweißen:_ Wegen geringer Duktilität der Schweißnaht sollte eine Schmelzschweißung vermieden werden.
Eine Punkt- oder Rollennahtschweißung ist bei dieser Legierung gut durchführbar. Ein Schutzgasschleier ist nicht erforderlich weil der Anpreßdruck den Luftzutritt zur Verbindungsstelle verhindert.

Spanabhebende Bearbeitung: Es gelten die Bedingungen wie für die unlegierten Titan-Sorten, doch müssen teilweise die Schnittgeschwindigkeiten um über die Hälfte herabgesetzt werden. Eine vorhandene Oxydschicht ist durch Sandstrahlen, Beizen oder Schleifen restlos zu entfernen, da sonst ein ausserge-wöhnlich hoher Verschleiß an Schnittwerkzeugen auftritt.

Hauptverwendungsgebiet: Die Legierung Ti Al6 V4 wird hauptsächlich für Schmiedestücke verwendet. Scharfe Kanten und Übergänge sind zu vermeiden.

7. Zusammenfassung

Titan und Titanlegierungen werden auf Grund des hohen Festigkeit / Dichte-Verhältnisses in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Der Temperaturbereich der Beanspruchung reicht von -250 bis +500°C. Kurzzeitige Beanspruchungen können bei noch höheren Temperaturen erfolgen. Für spezielle Anwendungsfälle sind für den Einsatz die hohe Korrosionsbeständigkeit oder entsprechende physikalische Eigenschaften maßgebend.

Trotz des heute noch verhältnismäßig hohen Preises von Titan hat sich gezeigt, daß der Mehraufwand im Werkstoffpreis mehr als ausgeglichen werden kann. Infolge des geringeren Leergewichtes der Fluggeräte lassen sich größere Reichweiten und höhere Zuladungen erzielen.

Der Aufwand für ein Titanteil liegt im allgemeinen nicht höher als der übliche Gewichtseinheitspreis im Flugzeugbau und oft unter der Grenze, die als wirtschaftlich tragbarer Aufwand für die Eigengewichtsverminderung angesehen wird.

Während bei militärischen Objekten solche wirtschaftliche Betrachtungen eine untergeordnete Rolle spielen und in erster Linie eine höhere Leistungsfähigkeit ausschlaggebend ist, sind heute im zivilen Bereich die wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten von Titan aus oben genannten Gründen schon gegeben.

8. Literatur

8.1 Dr. Ing. W. Knorr
Titanlegierungen in der Raumfahrt
3. Lehrgang für Raumfahrttechnik Aachen 1964

8.2 Dr. Ing. H. van Kann und Dr. Ing. W. Knorr
Titan im Flugzeugbau
Luftfahrttechnik Juni 1957

8.3 Dr. Ing. H. Goossens und Dr. Ing. W. Knorr
Unlegiertes und legiertes Titan im Flugzeugbau
Luftfahrttechnik Raumfahrttechnik August 1963

8.4 Dr. Ing. H. van Kann
Titan als Werkstoff für den Flugzeug und Flugkörperbau
Flugkörper Heft 1 1959

8.5 Friedrich Krupp Schmiede und Giesserei Essen
„Tikrutan" Arbeitsprogramm der Firma Krupp