

Keramische Werkzeuge für das Isothermschmieden von Titanlegierungen

Bernd-Arno Behrens, Tobias Prüß*

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

*Korrespondenzautor:

Dipl.-Ing. Tobias Prüß

Abteilung Massivumformung

Tel: 0511-762 4106, Fax: 0511-762 3007

pruess@ifum.uni-hannover.de

Der Werkstoff Titan ist aufgrund der Kombination aus geringer Dichte und hoher spezifischer Festigkeit den meisten Konstruktionswerkstoffen hinsichtlich der spezifischen Anforderungen des Leichtbaus überlegen. Bisher wird der Einsatz von Titan vor allem durch die hohen Materialkosten sowie durch die schlechte Umformbarkeit beeinträchtigt. Beim Schmieden von Titan können komplexe Geometrien nur durch eine Angleichung von Werkstück- und Werkzeugtemperatur, dem sog. Isothermschmieden, hergestellt werden. Als Werkzeugwerkstoffe für das Isothermschmieden werden derzeit metallische Werkstoffe auf Basis von Molybdän- oder Nickellegierungen verwendet. Aufgrund hoher mechanischer, thermischer und tribologischer Belastungen weisen selbst diese Hochleistungswerkstoffe jedoch niedrige Standzeiten auf. Eine Erhöhung der Werkzeugstandzeiten beim Isothermschmieden von Titanlegierungen kann durch den Einsatz von Werkzeugen aus technischer Keramik erreicht werden und wird zurzeit am IFUM untersucht.

Schlüsselwörter: Massivumformung, Titanlegierung, Keramische Werkstoffe, Isothermschmieden

Einleitung

Im Rahmen der Untersuchungen soll die Eignung der keramischen Hochleistungswerkstoffe Siliziumnitrid (Si_3N_4) und Siliziumaluminiumoxidnitrid (SiAlON) als Gesenkwerkstoff untersucht werden. Durch die hohe Druck- und

www.utfscience.de IV/2012:

Verschleißfestigkeit keramischer Werkstoffe bei erhöhten Temperaturen sollen Bauteile aus Titanlegierungen mit komplexer Geometrie isotherm geschmiedet werden können. Die erarbeiteten Ergebnisse sollen zu einer Reduzierung der Stückkosten beitragen, wodurch der wirtschaftlich sinnvolle Einsatzbereich geschmiedeter Bauteile aus Titanlegierungen erweitert werden kann.

Titan, ein besonderer Werkstoff

Titan ist mit 0,6% der in der Erdkruste vorkommenden Elemente nach Eisen, Aluminium und Magnesium das vierthäufigste Metall [5]. Mit einer Dichte von $4,51 \text{ g/cm}^3$ liegt Titan zwischen Stahl ($7,8 \text{ g/cm}^3$) und Leichtmetallen wie Magnesium ($1,74 \text{ g/cm}^3$) oder Aluminium ($2,7 \text{ g/cm}^3$). Titan zeichnet sich durch eine Reihe besonderer Eigenschaften aus. Die sehr gute Korrosionsbeständigkeit, die hohe spezifische Festigkeit sowie eine hohe thermomechanische Belastbarkeit und darüber hinaus eine sehr gute Gewebeverträglichkeit machen diesen Werkstoff für die Herstellung von technischen Produkten außerordentlich interessant [8]. Im Flugzeugbau, in der Raumfahrt, im Schiffsbau, in der Reaktortechnik, im Anlagenbau, im chemischen Apparatebau und in der Medizintechnik existieren bereits vielfältige Anwendungsbereiche von Titanwerkstoffen. Der derzeitige Titanverbrauch liegt weltweit bei geschätzten 120.000 Tonnen jährlich [7].

Die große technische Bedeutung der Titanlegierungen beruht neben der hohen Festigkeit vor allem auf der hohen spezifischen Streckgrenze, die bislang von keinem anderen metallischen Werkstoff erreicht wird. Selbst hochfeste Stähle mit Streckgrenzen bis zu ca. 1.000 MPa weisen bezüglich der spezifischen Streckgrenze nur einen ca. halb so großen Wert auf wie z.B. die Titanlegierung TiAl_6V_4 [13].

Titan tritt als polymorphes Metall in zwei allotropen Modifikationen auf. α -Titan kristallisiert in hexagonal dichtester Packung (hdP) und oberhalb von $882 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt es als β -Titan mit kubisch-raumzentriertem (krz) Gitter vor (Abbildung 1).

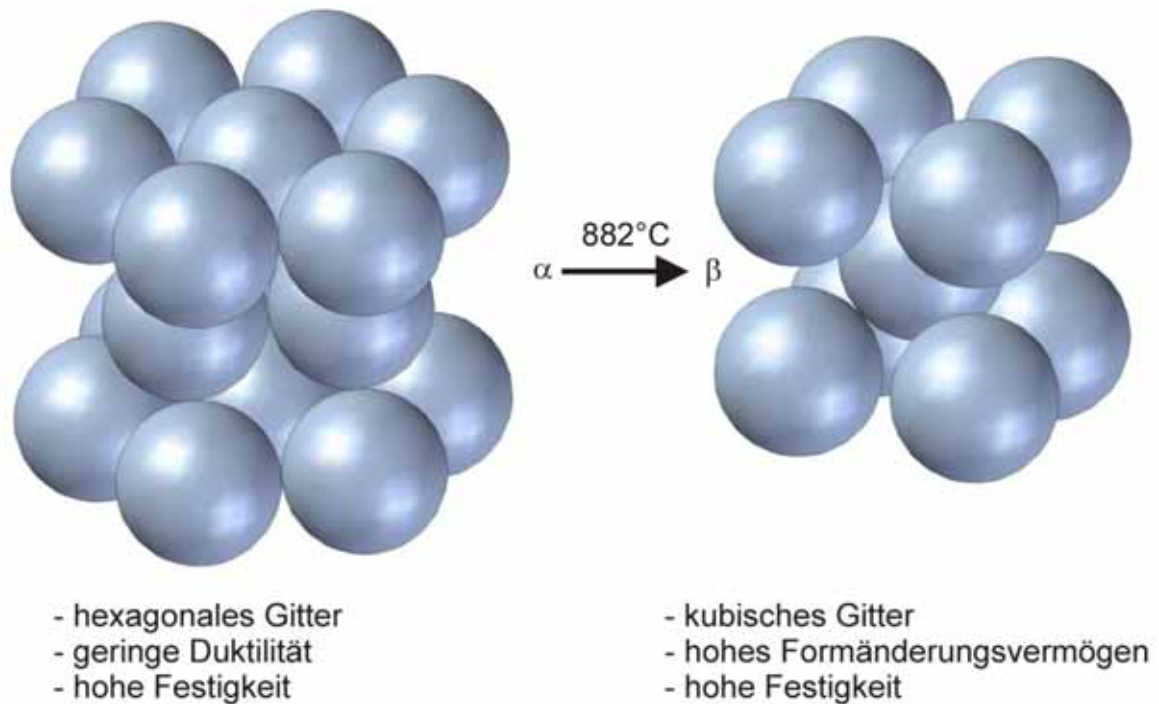


Abbildung 1: Gitterumwandlung bei Titan: α -Titan (links), β -Titan (rechts)

Wie bei den meisten Metallen hängen die mechanischen Eigenschaften auch bei Titan stark von den beigemengten Legierungselementen ab. So hat Reintitan eine im Vergleich zu konventionellen Ti-Legierungen niedrige mechanische Festigkeit. Sauerstoff und Stickstoff erhöhen als Legierungselemente die Dehngrenze von Titan, während die Duktilität verringert wird. Der Sauerstoffgehalt bestimmt den Reinheitsgrad des Titans (Grad 1 bis 4) und somit dessen Festigkeitseigenschaften (290 bis 740 MPa) [26]. Reintitan mit 99,7 % Titan hat etwa die Festigkeit von Aluminiumlegierungen, ist sehr korrosionsbeständig und wird überwiegend in der chemischen Industrie, der Nahrungsmittelindustrie und der Medizintechnik verwendet [15],[17].

Neben der temperaturbedingten Allotropie werden die Titanlegierungen hauptsächlich nach ihrer chemischen Zusammensetzung in α -, Near- α , $\alpha+\beta$ - und β -Legierungen unterteilt (Abbildung 2). Die Legierungen aus der hexagonalen α -Phase, der kubisch-raumzentrierten β -Phase oder aus beiden Phasen bestehende Legierungen haben jeweils spezifische Eigenschaften.

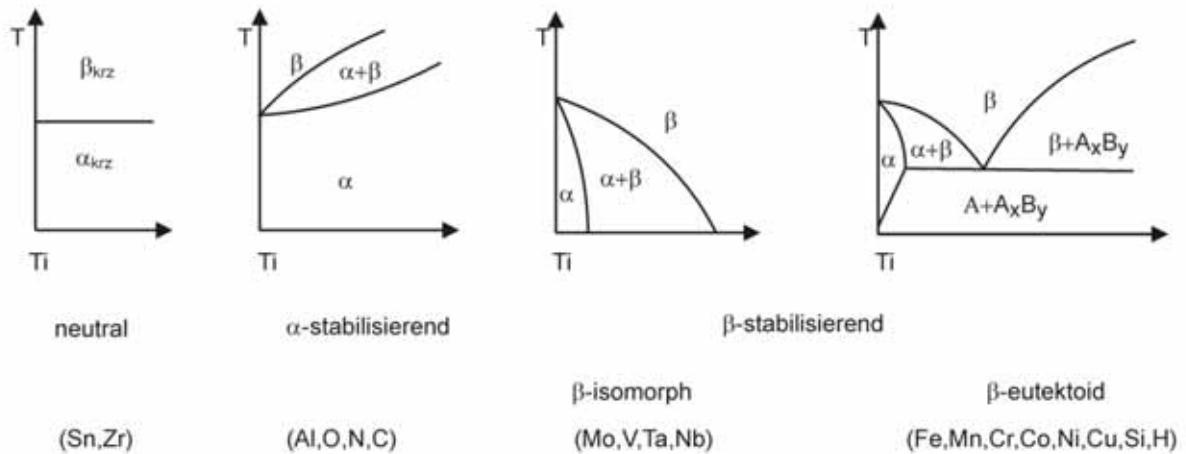


Abbildung 2: Einfluss der Legierungselemente auf die Zustandsdiagramme von Ti-Legierungen [17]

α - und Near- α -Legierungen werden mit Al, O, N und C legiert und weisen hohe Festigkeitswerte sowie eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf. Diese Eigenschaften qualifizieren sie für Anwendungen in der chemischen Industrie sowie in der Verfahrenstechnik. Jedoch sind diese Legierungen nicht vergütbar und zeigen eine schlechte plastische Verformbarkeit sowie anisotrope mechanische Eigenschaften auf [2].

$\alpha+\beta$ -Legierungen werden neben den α -stabilisierenden auch mit β -stabilisierenden Elementen wie Mo, V, Mn, Ta, und Cr legiert. Durch Vergüten ist eine Erhöhung der Festigkeit bei diesen Legierungen möglich, was aber auch eine Steigerung der Sprödigkeit bewirkt. Die Legierung $TiAl_6V_4$ ist mit 50 % Gesamtanteil von technisch eingesetzten Ti-Werkstoffen die meist verwendete Legierung [5]. Die α - β -Legierungen haben ein breites Anwendungsgebiet im Maschinen- und Anlagenbau, in der Automobilindustrie sowie im Flugzeugbau gefunden. Weiterhin werden aus diesen Legierungen hochwertige chirurgische Implantate gefertigt [5],[17].

β -Legierungen mit höherem Anteil an β -stabilisierenden Elementen sind vergütbar und somit sind Festigkeitswerte bis 1.400 N/mm^2 möglich. Die Warmfestigkeit und die Kriechbeständigkeit sind im Vergleich zu α -Legierungen herabgesetzt. β -Legierungen werden z.B. in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie in der Biomedizintechnik eingesetzt [17].

Zur Herstellung von Bauteilen aus Titanlegierungen werden üblichen Fertigungsverfahren nach DIN 8580 angewendet. Bei der Kaltumformung verfügt Titan durch das hexagonale Kristallgitter nur über ein Gleitsystem, wodurch eine Kaltumformung der Titanwerkstoffe nur in engen Grenzen möglich ist. Das Streckgrenzenverhältnis bei Ti-Legierungen $R_{p0,2}/R_m$ von meist über 90 % ist im Vergleich zu anderen gebräuchlichen Umformwerkstoffen relativ hoch. Durch dieses hohe Streckgrenzenverhältnis und eine geringe Gleichmaßdehnung wird die plastische Verformungsfähigkeit bei Raumtemperatur von α - und $\alpha+\beta$ -Legierungen auf einen sehr engen und technisch kaum nutzbaren Bereich eingeschränkt [5],[16].

Bei einer Erhöhung der Umformtemperatur T_U sinkt die Fließspannung k_f von Titanlegierungen deutlich ab. So sinkt diese je nach Temperatur T_U und Formänderungsgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ um ca. 90 % [16] (Abbildung 3). Bei Temperaturen oberhalb der Rekristallisationstemperatur 500 °C verringert sich sowohl das Streckgrenzenverhältnis $R_{p0,2}/R_m$ als auch das Verhältnis von Elastizitätsmodul zu Streckgrenze $E/R_{p0,2}$. Definitionsgemäß findet die Warmumformung oberhalb der Rekristallisationstemperatur statt, wobei der nach oben und unten einzuhaltende Temperaturbereich durch die Gefügeanforderungen, den Umformwiderstand und die Neigung zur Rissbildung begrenzt wird. Das konventionelle Gesenkschmieden von Titan erfolgt abhängig von der Legierung zwischen 840 °C und 1050 °C [9],[16],[23].

Titanwerkstoffe weisen bereits bei niedriger Temperatur ein großes Diffusionsvermögen für Wasserstoff auf und zeigen oberhalb von 700 °C eine verstärkte Zunderbildung, die mit einer Diffusion insbesondere von Sauerstoff in die obersten Werkstoffschichten verbunden ist. Durch die Aufnahme atmosphärischer Gase werden das Formänderungsvermögen und die Zähigkeitseigenschaften von Titan vermindert, so dass diese Einflüsse durch begrenzte Wärmezeiten und saubere Schutzgasatmosphären gering zu halten sind [17],[18].

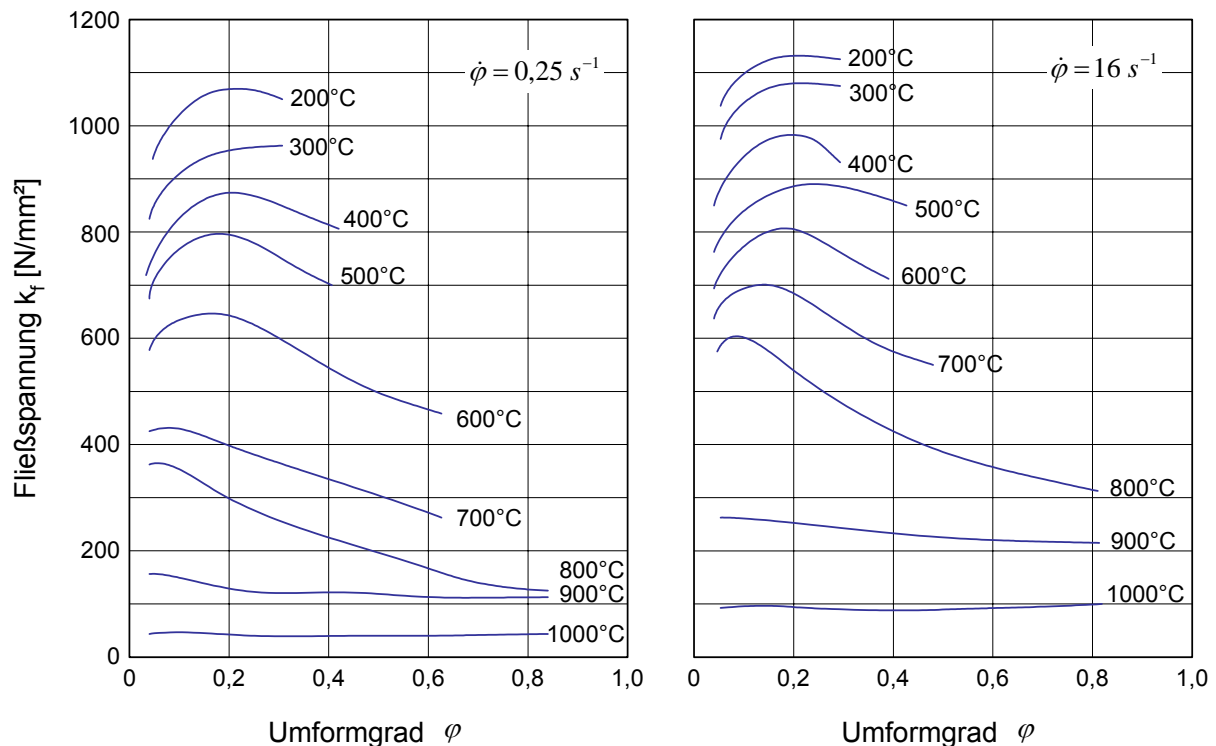


Abbildung 3: Fließkurven (Stauchversuch) von TiAl6V4 bei unterschiedlichen Umformgeschwindigkeiten und –temperaturen [6]

Konventionelle Umformung

Besonders beim Umformen im Gesenk sind die geringe spezifische Wärmekapazität und die vergleichsweise niedrige Wärmeleitfähigkeit von Titan nachteilig. Dies hat langen Aufheizzeiten zum Schmieden sowie eine schlechte Durchhärbarkeit bei einer Wärmebehandlung zur Folge [16]. Durch die beim Erwärmen an Luft entstehenden Oxidschichten wird der hohe Reibungsbeiwert des Titans zwar herabgesetzt, die Gleiteigenschaften müssen aber dennoch durch Schmierung der Gravuren und Verwendung von schmierenden Deckschichten auf den Werkstückoberflächen weiter verbessert werden [5]. Als Schmiermittel können bei der Warmumformung Graphit- oder MoS₂-Schmiermittel verwendet werden.

Deutlich empfindlicher auf die Umformbedingungen beim Schmieden reagieren β -Ti-Legierungen. Zum Schmieden dieser Legierungen wird der Werkstoff über den β -Transus von 980 °C erwärmt und anschließend vor der β - α -Umwandlung umgeformt. Bei diesen hohen Temperaturen sollte wegen der unerwünschten Kornvergrößerung

und der Wasserstoffaufnahme auf eine kurze Haltezeiten und geeignete Schutzgasatmosphäre geachtet werden [17].

Beim konventionellen Schmieden von Titan tritt durch das Temperaturgefälle zwischen Werkstück und Gesenk eine Abkühlung der Werkstückoberfläche ein, wodurch die mit der hohen Temperatur verbundenen günstigen Umformigenschaften stark absinken. Der daraus resultierende Anstieg der Fließspannung beschränkt das Umformvermögen und erschwert somit das Ausformen feiner Werkzeugpartien erheblich [8]. Der Wärmeübergang vom Werkstück in das Gesenk kann durch die Erwärmung der formgebenden Werkzeugkomponente auf Umformtemperatur (isothermes Schmieden) unterbunden werden. Das Isothermschmieden ermöglicht eine wesentliche Reduzierung der Umformkraft sowie die Herstellung endkonturnaher Bauteile durch eine Steigerung des Formänderungsvermögens von Titan. Isothermschmieden von Ti-Legierungen führt im Vergleich zum konventionellen Schmieden zu einer Kostenreduzierung von rund 30 % (Abbildung 4). Ausschlaggebend für diese Entwicklung sind gute Werkstoffausnutzung, geringe Nacharbeitung sowie verkürzte Durchlaufzeiten [10].

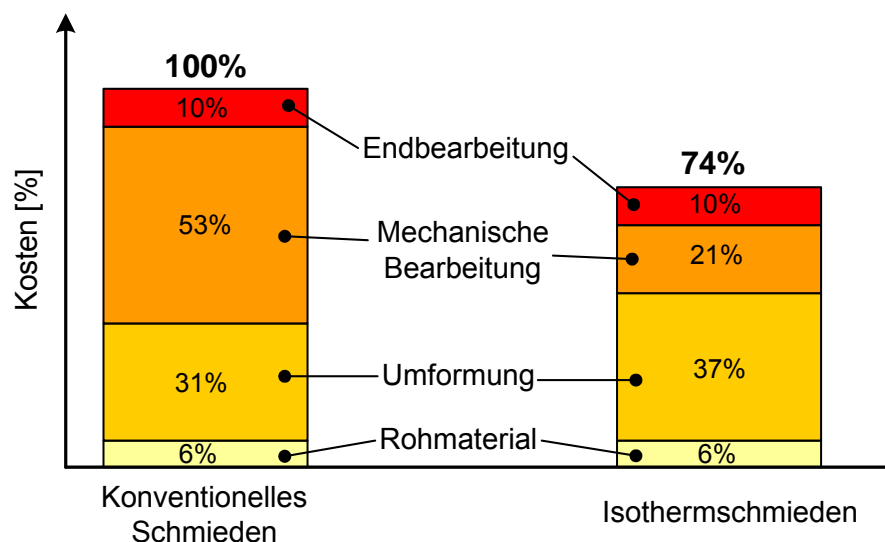


Abbildung 4: Kostenvergleich zwischen konventionellem und Isothermschmieden [10]

Feinkörnige Titanwerkstoffe weisen unter isothermen Umformbedingungen, verbunden mit einer niedrigen Umformgeschwindigkeit, ein superplastisches Verhalten [1] auf. Das Kennzeichen der Superplastizität, auch als „quasi-viskoses

Fließen in kristallinem Zustand“ bezeichnet, ist ein starker Abfall der Fließspannungen mit einer erheblichen Zunahme des Formänderungsvermögens [11],[24]. Für das Erreichen des superplastischen Zustandes müssen folgende Randbedingungen erfüllt werden [24]:

- Feinkörniges, zweiphasiges Gefüge (Korndurchmesser 1-10 μm),
- konstante Umformtemperatur (je nach Legierung zwischen 900-950 $^{\circ}\text{C}$) sowie
- niedrige Umformgeschwindigkeit von 10^{-2} bis 10^{-5} s^{-1} .

Bei der Umformung von Titanlegierungen im Bereich bis 950 $^{\circ}\text{C}$ bestehen die Werkzeuge derzeit aus Nickel-Basis- oder Molybdänlegierungen. Molybdän kann jedoch aufgrund starker Korrosionsneigung zu Sauerstoff bei erhöhten Temperaturen nur unter Schutzgasatmosphäre eingesetzt werden. Sowohl Nickel-Basis- als auch Molybdänwerkzeuge haben im Vergleich zu Werkzeugen beim konventionellen Schmieden von Stahl niedrige Standmengen [21].

Die Qualifizierung von alternativen Werkzeugwerkstoffen stellt somit ein Potential zur Standmengenerweiterung der Werkzeuge dar. Aufgrund ihrer hervorragenden technologischen Eigenschaften bieten sich hierzu keramische Werkstoffe an.

Technische Keramiken – Werkstoffe mit Potential

Im Allgemeinen sind Keramiken anorganische, nichtmetallische, teilweise oder vollständig kristallin aufgebaute Werkstoffe. Bei keramischen Werkstoffen herrschen ionische oder kovalente Bindungen zwischen den Atomen, die im Gegensatz zu metallischen Bindungen wesentlich stärker sind. Bezüglich der chemischen Zusammensetzung wird zwischen Oxid-, Nichtoxid- und Silikatkeramiken unterschieden. Der Einsatz keramischer Werkstoffe ist heutzutage in vielen technischen und medizinischen Anwendungsbereichen Stand der Technik. Technische Keramiken werden unter anderem im Motorenbau, Ofenbau und Hochtemperaturtechnik, für Schneid- und Schleifkörpern, Gleit- und Kugellagern sowie im Werkzeugbau eingesetzt. Die Anwendungsgebiete der keramischen Werkstoffe reichen von Feuerfestkeramiken (Geschirr), über Baukeramik (Fliesen) bis zu technischen Keramiken (Funktions- und Konstruktionskeramik). Keramische Werkstoffe haben sich auf Grund einer Reihe vorteilhafter Eigenschaften, die denen

von Metallen in vielen Bereichen überlegen sind, ihren Platz in technischen Anwendungen erobert. Die wichtigsten Eigenschaften keramischer Werkstoffe, die gegenüber Metallen als vorteilhaft bewertet werden können, sind [14],[25]:

- Ihre hohe Härte und Verschleißfestigkeit,
- die nahezu gleich bleibende Festigkeit auch bei hohen Temperaturen sowie
- eine hervorragende chemische Beständigkeit.

Als Werkzeugkomponenten werden Keramiken bislang in Fließpress-, in Biege- und in konventionellen Schmiedewerkzeugen erfolgreich in der Forschung untersucht. Keramische Komponenten werden dabei mit den übrigen Werkzeugkomponenten stoffschlüssig durch Kleben, Löten und Schweißen oder kraftschlüssig durch Einschrumpfen verbunden. [4]

Als ein wesentlicher Nachteil für die Anwendung als Werkzeugwerkstoff ist die hohe Sprödigkeit keramischer Werkstoffe zu nennen. Spannungsspitzen führen zum Bruch und müssen deswegen vermieden werden.

Die positiven Eigenschaften von Keramiken lassen diese als interessante Werkstoffe für den Werkzeugbau in der Umformtechnik erscheinen. So wurden in der Vergangenheit verschiedene Untersuchungen mit keramischen Einsätzen durchgeführt. Unter anderem wurde die Verwendbarkeit von Keramikmatrizen für das Napf-Rückwärts-Fließpressen geprüft [3].

Eine Untersuchung unterschiedlicher keramischer Werkstoffe als Werkzeugwerkstoff beim Gesenkschmieden fand durch Romanowski statt. Er konnte bei Schmiedeversuchen mit heißgepresstem Siliciumnitrid eine deutliche Standmengenerhöhung aufzeigen, wobei Oxidkeramiken wegen der geringen Wärmewechselbeständigkeit und Siliciumcarbid wegen der geringen Festigkeit in den Versuchen versagten [19]. Barnert untersuchte die Möglichkeiten zur Verschleißminderung bei Werkzeugen der Warmmassivumformung durch Verwendung von keramischen Gesenkeinsätzen. Es wurden Schmiedeversuche an Modellgeometrien mit Keramikeinsätzen an hochbelasteten Gesenkbereichen durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass ein fünffach geringerer Verschleiß gegenüber vergüteten und nitrierten Stahlwerkzeugen festgestellt wurde [3]. Huscic setzte aktiveingelötete keramische Einsätze in verschleißkritischen Bereichen an

www.utfscience.de IV/2012:

Modellgesenken im Schmiedeprozess ein. Die Ergebnisse stellen einen vielversprechenden Ansatz zur Standmengenerhöhung von Schmiedewerkzeugen dar [12].

Es ist also festzuhalten, dass durch den Einsatz von keramischen Werkstoffen im Gesenkbau eine deutliche Standmengenerhöhung der Werkzeuge erzielt werden kann, was zur erheblichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Prozesses beiträgt.

Dem gegenüber steht jedoch ein höherer Aufwand bei der Auslegung der Werkzeuge, da bei der Konstruktion mit Keramiken aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften spezielle Konstruktionsregeln befolgt werden müssen.

Untersuchungen am IFUM

Zur Erhöhung der Werkzeugstandmengen beim Isothermschmieden soll die Eignung zwei verschiedener keramischer Werkstoffe untersucht werden. Hierzu wird im Rahmen von experimentellen Untersuchungen das in Abbildung 5 dargestellte Bauteil gefertigt werden. Es handelt sich hierbei um einen einfachen Napf mit ausgeprägtem Flansch, wie beispielweise einem Modell-Federteller. Diese Geometrie wurde auf Grund ihrer komplexen Kontur mit dünnwandigen Bereichen und langen Fließwegen beim Schmieden ausgewählt. Somit können die Vorteile des Isothermschmiedens ausgenutzt werden.

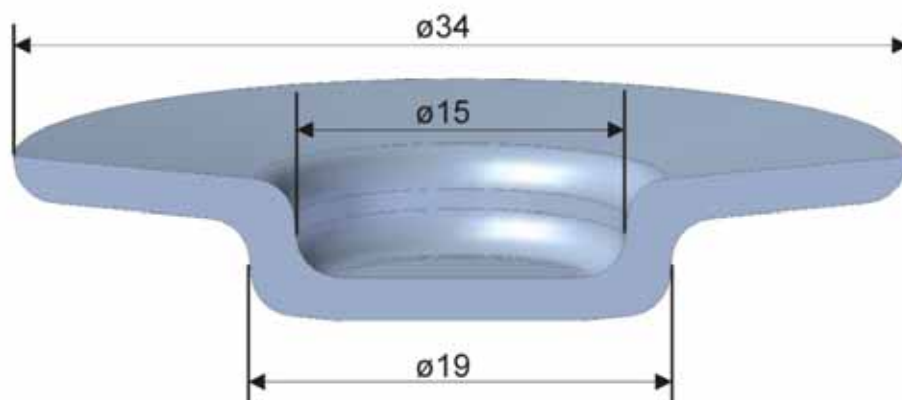


Abbildung 5: CAD-Modell des Bauteils

Durch die Rotationssymmetrie wird die Herstellung der keramischen Gesenke erleichtert. Des Weiteren werden filigrane Details vermieden, um auftretende Zugspannungen in den Gesenken während der Umformung zu reduzieren und die zur Umformung benötigte Kraft gering zu halten. Aufgrund der Gestaltungsrichtlinien für keramische Produkte weist das Werkzeug Formschrägen an allen Flächen sowie Radien an den Kanten auf. Die Radien dienen dazu, Zugspannungen in den keramischen Gesenken zu vermeiden.

In den geplanten Untersuchungen werden zwei keramischen Werkstoffe, Siliciumnitrid (Si_3N_4) und SiALON, hinsichtlich ihrer Eignung als Werkzeugwerkstoff beim isothermen Schmieden von Titanlegierungen untersucht.

Siliciumnitrid ist überwiegend kovalent gebunden und besitzt eine Kristallstruktur, die aus leicht verzerrten Si_3N_4 -Tetraedern aufgebaut ist. Durch die unterschiedliche Verknüpfung der Tetraeder resultieren zwei kristallographische Modifikationen: α - Si_3N_4 und β - Si_3N_4 . Die α -Modifikation, welche als Hauptphase bei der Herstellung von Si_3N_4 -Pulvern entsteht, ist unter Umständen metastabil und wandelt sich bei höheren Temperaturen in Anwesenheit von Verunreinigungen, insbesondere Sauerstoff, in β - Si_3N_4 um. Die Umwandlung erfolgt relativ langsam und ist irreversibel. Siliciumnitrid-Keramiken zeichnen sich gegenüber anderen Hochleistungskeramiken durch eine Kombination von guten Raumtemperatur- und Hochtemperatureigenschaften aus. Die Eigenschaften können in weiten Bereichen variiert und für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert werden. Des Weiteren hängen sie entscheidend vom Herstellungsverfahren sowie der Zusammensetzung der Sinteradditive und der Qualität der Rohstoffe ab. Um die große Variabilität der Eigenschaften auszudrücken wird zunehmend auch von Siliciumnitrid-Legierungen gesprochen. Die Dichte wird von der Menge der zugesetzten Oxide (z.B. Al_2O_3 , BeO , Ga_2O_3 etc.) bestimmt und liegt zwischen 3,2 und $3,6 \text{ g/cm}^3$. Außerdem besitzen Si_3N_4 -Keramiken eine gute Thermoschockbeständigkeit aufgrund der relativ geringen thermischen Ausdehnung von 3 bis $13,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Dieser geringe Ausdehnungskoeffizient ist verantwortlich für relativ geringe lokale Spannungen beim Vorhandensein eines Temperaturgradienten innerhalb der Keramik. Siliciumnitrid weist zusätzlich eine hohe Festigkeit auf [20].

Als zu vergleichender Werkstoff wird Siliciumaluminiumoxinitrid (SiAlON) verwendet. Dabei handelt es sich um eine Siliciumnitrid-Legierung, bei der dem Si_3N_4 -Gefüge Aluminiumoxid (Al_2O_3) beigemischt wird. Generell hängen die Anwendungsmöglichkeiten von den Verunreinigungen, der Restporosität, der Korngröße sowie den hiermit erzielten mechanischen, thermischen oder elektrischen Eigenschaften ab. In Tabelle 1 sind die mechanischen Eigenschaften von Al_2O_3 -Werkstoffen in Abhängigkeit des Al_2O_3 -Gehalts der Keramik dargestellt [20].

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Al_2O_3 -Bauteilen

Al_2O_3 -Gehalt	(Gew.-%)	85	95	>99,5
Elastizitätsmodul	GN/m ²	200	400	400
Druckfestigkeit	N/mm ²	2000	3000	4000
Biegefestigkeit	N/mm ²	250	300	400
Zugfestigkeit	N/mm ²	120	240	320
Vickershärte	N/mm ²	$1,5 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^4$	$12,3 \cdot 10^4$

Bei Hochleistungskeramiken hat Al_2O_3 durch seine hohe mechanische Belastbarkeit eine breite Anwendung sowohl als Monowerkstoff als auch als mehrphasige Keramik gefunden. Diese werden, wie u. A. SiAlON auch, Dispersionskeramiken genannt [20]. In der hier betrachteten Anwendung soll das Aluminiumoxid dazu dienen, die Druckfestigkeit, die Zähigkeit sowie die Thermoschockbeständigkeit des Si_3N_4 -Grundwerkstoffes zu verbessern.

Werkzeugkonzept

Nach einem Auswahlprozess von mehreren Lösungsvarianten und der Umformprozessanalyse wurde das im Folgenden dargestellte Werkzeugkonzept erarbeitet. Die Hauptkomponenten und deren Funktionen sind in Abbildung 6 als Explosionsmodell dargestellt. Isotherme Versuchsbedingungen werden durch einen dickwandigen Thermobehälter gewährleistet. Darin befinden sich beide Gesenkhälften, bestehend aus Ober- und Untergesenk. Sie werden durch konisch geformte Führungen mit Druckspannungen beaufschlagt und im Thermobehälter geführt.

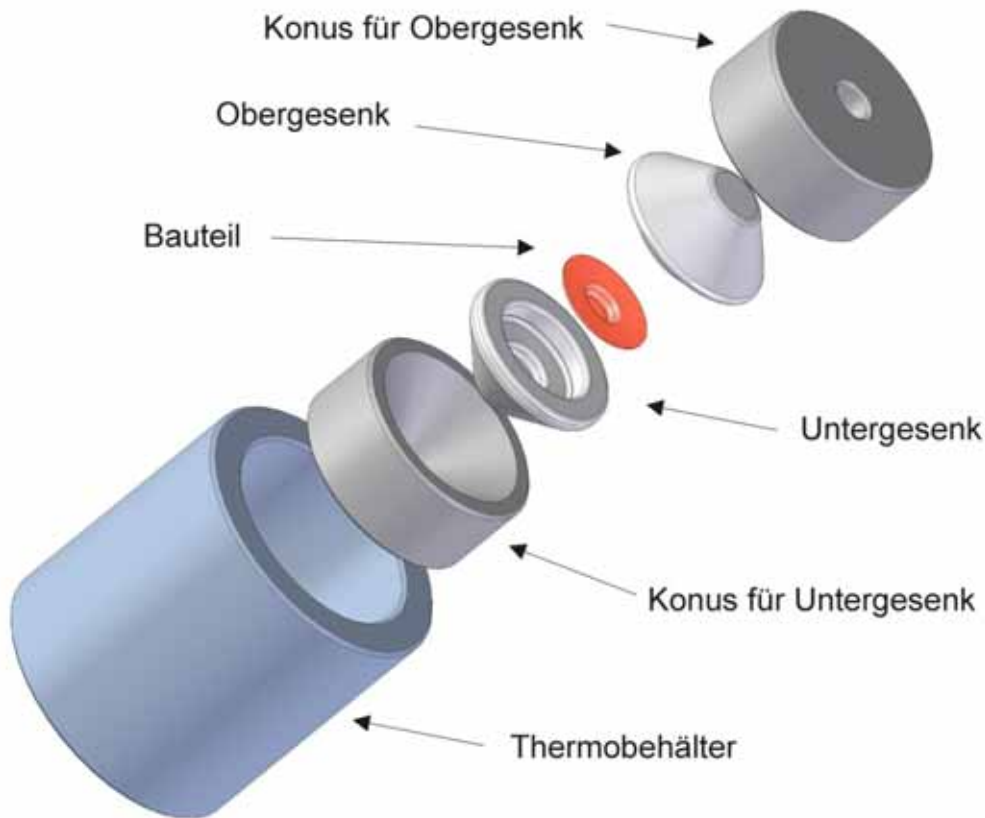


Abbildung 6 Explosionsmodell des Schmiedewerkzeug für das Isothermschmieden

Die Versuche werden auf einer servohydraulischen Prüfmaschine ohne ansteuerbarem Auswerfersystem durchgeführt. Deswegen kann auf die Lochung des Untergesenks verzichtet werden. Die Gefahr von Spannungspitzen wird so vermindert. Die Entnahme der Bauteile sollte durch das Schrumpfungsverhalten während der Abkühlung nach der Umformung unterstützt werden. Siliciumnitrid weist mit $3,2 \cdot 10^{-6}$ K und SiAlON mit $3,3 \cdot 10^{-6}$ K einen weit geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als $TiAl_6V_4$ mit $9,0 \cdot 10^{-6}$ K. Die Gesenke werden demnach weniger schrumpfen als das Werkstück.

Die Schnittansichten des Werkzeuges im oberen (OT) sowie im unteren Totpunkt (UT) sind in Abbildung 7 abgebildet.

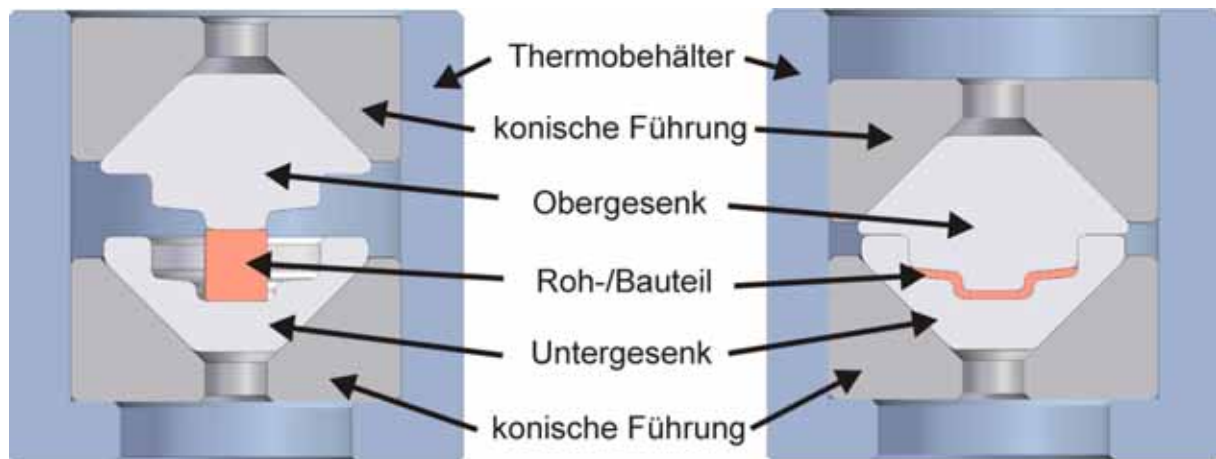


Abbildung 7: Oberer Totpunkt (links) und unterer Totpunkt (rechts)

Die Werkzeugkonstruktion wurde durch numerische Verfahren mittels konventionellen FEM-Simulationen unterstützt. Mit einer handelsüblichen FEM-Software wurden anhand der spezifischen Belastungskombination beim Schmieden sowie der Materialkennwerte für die ausgewählte Ti-Legierung TiAl6V4 die Fließwege und der Kraftbedarf beim Schmieden berechnet. Ferner wurde durch die numerische Simulation des Schmiedeprozesses die optimale Rohteilabmessung bestimmt. Mit Hilfe der FEM-Simulation wurden, abhängig von unterschiedlichen Prozessparametern, die Spannungsfelder in der Umformzone identifiziert sowie der Materialfluss vorhergesagt. Durch mehrere Iterationsschritte wurde die optimale Fertigteilgeometrie ermittelt die insbesondere an den Bauteilkanten und –schrägen an das Schmiedeverfahren angepasst ist. Als Negativbild des Fertigteils ergeben sich die Kontaktflächen des keramischen Werkzeugmoduls.

Versuchsvorhaben

Nach der Fertigung der keramischen Werkzeuge sind isotherme Versuche geplant. Hierbei soll unter Verwendung des vorgestellten Werkzeugsystems zum Isothermschmieden.

Die Erwärmung der Rohteile und der keramischen Werkzeugkomponenten auf eine Umformtemperatur von 950 °C findet in einem Kammerofen statt. Die Dauer der Erwärmung wird der Rohteilabmessung und den werkstoffspezifischen Eigenschaften angepasst. Nach der Erwärmung wird das Werkzeugmodul samt dem Rohteil aus

dem Ofen entnommen, in den Maschinenraum gebracht und geschmiedet. Die Umformgeschwindigkeit wird zunächst 1/s betragen. Zur leichteren Entnahme ist die Matrize mit der metallischen Armierung durch eine konische Kontaktfläche verbunden.

Zur Bewertung der Schmiedeergebnisse werden anschließend metallographische Analysen durchgeführt. Hiermit wird die Mikrostruktur des Gefüges charakterisiert und mit dem Zustand vor der Umformung verglichen. Hierzu werden Schliffbilder angefertigt, um Aussagen über die Korngröße und Kornverformung zu erhalten. Ferner wird durch metallographische Untersuchungen der Verlauf der bei Schmiedeteilen typischen Texturlinien bestimmt. Die Vollständigkeit der Konturenausbildung bei Schmiedeteilen gibt Auskunft über die Formfüllung der Matrize, eventuelle Störungen im Werkstofffluss sowie Verschleißbildung an den Werkzeugen.

Abschließend werden die Werkzeugwerkstoffe bezüglich ihrer Eignung für das Isothermschmieden von Titan verglichen. Das Hauptaugenmerk gilt dabei den erzielten Standmengen bis zum Versagen des jeweiligen Werkzeugs. Der zweite wichtige Qualitätsfaktor ist die Formfüllung der Matrize, die hauptsächlich vom Wärmehaushalt im Werkzeug sowie von Reibungsverhältnissen abhängig ist. Neben der Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug werden Schmiermittelverbrauch und eventuelle Verschleißerscheinungen an den Werkzeugen betrachtet. Ferner wird der Kraftbedarf bei vollständiger Formfüllung der Matrize verglichen. Nicht zuletzt sind die Verarbeitbarkeit unterschiedlicher Werkstoffe sowie die dabei entstehenden Kosten von Bedeutung. Die chemischen und physikalischen Wechselwirkungen zwischen dem Werkstoff Titan und den keramischen Werkzeugkomponenten (Anhaftung, Adhäsion) oder dem Schmierstoff (Schmierstoffansammlung, Diffusion) beeinflussen ebenfalls die Fließfähigkeit des Umformguts und werden deshalb in der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt.

Durch diese Grundlagenuntersuchungen sollen Erfahrungen gesammelt werden, die das Vorgehen und die Auswahl von keramischen Werkstoffen für das Isothermschmieden von Ti-Legierungen erleichtern sollen.

Literatur

- [1] Alalykin, A. A.; Boitsov, V. V.; Gutman, S. E.: The forging process for titanium alloys, Metall – Internationale Zeitschrift für Metallurgie, Band 56, Heft 12, S. 806-807, 2002.
- [2] Ashby, M. F.; Johnes, D. R. H.: Ingenieur-Werkstoffe, Springer-Verlag, 1986.
- [3] Barnert, L: Verschleißminderung bei Werkzeugen der Massivumformung durch Verwendung von keramischen Einsätzen, Dissertation, PZH, Leibniz Universität Hannover, 2005
- [4] Boretius, M.-H.: Aktivlötten von Hochleistungskeramiken und Vergleich mit konventionellen Lötverfahren, Dissertation Aachen, 1990
- [5] Collings, E. W.: The physical metallurgy of titanium alloys, American Society for Metals, 1984
- [6] Doege, E.; Meyer-Nolkemper, H.; Saeed, I.: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe, Hanser Verlag, 1986
- [7] http://www.friadent.de/media/cms/addon/addon_pdf/titanverbrauch, Stand 08/06
- [8] Genschow, M.: Entwicklung eines Verfahrens zum Schmieden von Titanpulverpreßlingen im beheizten Gesenk; VDI-Verlag, 1984, Düsseldorf, Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 2, Betriebstechnik, Nr.87
- [9] Hegazy, A. A.: Untersuchung zur Warmumformbarkeit von Titanlegierung TiAl6V4, Aluminium Band 59, Heft 6, 1983
- [10] Heisig, E.: Auch für Kleinserien, Isothermes Schmieden im Net-shape-Verfahren, Schweizer Maschinenmarkt, 1995
- [11] Heisig, E.: Komplexe Werkstücke endkonturnah herstellen. Isothermschmieden von Pulvermetall reduziert Verschleiß, Industrieanzeiger, Band 120, Heft 1314, 1998
- [12] Huscic, A.: Verschleißreduzierung an Schmiedegesenken durch Mehrlagenbeschichtungen und keramische Einsätze, Dissertation, PZH, Leibniz Universität Hannover, 2005
- [13] Klocke, F.; Gerschwiler, K.: Zerspanen von Titan- und Nickelbasislegierungen – Schneidstoffe im Leistungsvergleich, 14th International Plansee Seminar; Volume 2; Plansee AG; Reutte, S. 27-43, 1997

- [14] Linsmeier, K.-D.: Technische Keramik, Werkstoff für höchste Ansprüche, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech 2000
- [15] Merkel, M.; Thomas, K.-H.: Taschenbuch der Werkstoffe, Fachbuchverlag Leipzig, 6. Auflage 2003
- [16] Möllman, M.: Schmieden von Titanlegierungen, Schmiede-Journal, September 1999
- [17] Peters, M.; Leyens, C.: Titan und Titanlegierungen, WILEY-VCH Verlag, Weinheim 2002
- [18] Röger, E.; Ufer, D.: In enge Grenzen, Maschinenmarkt, Würzburg 1989
- [19] Romanowski, C.: Verschleißminderung an Schmiedegesenken mittels keramischer Werkstoffe, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 1998
- [20] Salmang, H.; Scholze, H.:
„Keramik“ Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [21] Schepp, P. P.: Isothermes Umformen, Endkonturnahe Formgebung für anspruchsvolle Werkstoffe und komplexe Konturen, FMB Fertigungs-Technologie, Band 66, Heft 2, S. 96-102, 1989
- [22] Seino, J.: Trend of metal mold for forging utilizing ceramics, cermet, etc. Sokeizai (1994), 35(8), 10 – 16
- [23] Siegert, K. (Hrsg.): Schmieden von Titan, Konferenz-Einzelbericht: Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, S. 291-310, 2001
- [24] Stöwer, B.: Stand der Entwicklung von Titanlegierungen für superplastische Formgebung, Blech Rohre Profile, Band 38, Heft 3, S. 226-228, 1991
- [25] Tietz, K.-D.: Technische Keramik, VDI Verlag Düsseldorf 1994
- [26] Datenblatt Sonderwerkstoffe Titan Grade 1-4; Zapp;
http://www.zapp.com/fileadmin/downloads/01-Produkte/Sonderwerkstoffe/Download/Titan_1-4_d_02.12.pdf
- [27] Zwicker, U.: Titan und Titanlegierungen, Springer-Verlag, 1974