

Abb. 10: Funktionale Ermüdung am Beispiel von NiTiCu. Die Umwandlungstemperaturen werden zu tieferen Temperaturen verschoben.

Mechanisches Zyklieren führt zur Änderung der mechanischen Hysterese, einer Abnahme der elastischen Dehnung sowie der Akkumulation von plastischer Dehnung (Abb. 11). Ursache dafür ist der Anstieg der Defektdichte während der zyklischen Phasenumwandlung, was zu einer Zunahme der inneren Spannungen führt.

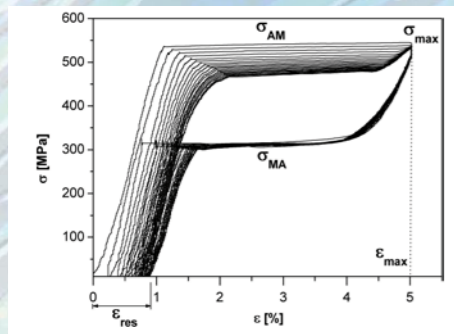


Abb. 11: Änderung der mechanischen Hysterese bei zyklischer Beanspruchung am Beispiel einer pseudoelastischen Legierung. Die obere Plateauspannung σ_{AM} nimmt ab und es akkumuliert sich eine plastische Dehnung ϵ_{res} . Die Größe der gummielastischen Verformung sinkt.

Zudem kann es zur mechanischen Stabilisierung martensitischer Bereiche kommen, so dass diese nicht mehr an Phasenumwandlungen teilnehmen können. Damit verringert sich der Anteil

des umwandlungsfähigen Volumens und höhere Spannungen sind für die Phasenumwandlung erforderlich. Ein Bauteil kann durch diese Form der Ermüdung deutlich vor dem Erreichen der Zyklenzahl bis zum Bruch (N_f) seine funktionellen Eigenschaften verlieren.

Strukturelle Ermüdung wird häufig als Verlust der strukturellen Integrität eines Bauteils definiert. Die dabei auftretenden Phänomene beruhen hauptsächlich auf mikrostruktureller Defektkummulation durch zyklische Beanspruchung. Die Bildung und das Wachstum von Oberflächenrissen bestimmt die Ermüdungslebensdauer. Allerdings können FG-Werkstoffe Spannungen vor der Rissspitze durch eine martensitische Phasenumwandlung abbauen.

Wie werden Formgedächtniselemente für den Einwegeffekt mit NiTi gestaltet?

Das Material wird nach gewünschter Umwandlungstemperatur ausgewählt. Übliche Halbzeuge aus NiTi sind schmale Bleche, Stangen und Drahtmaterial. Nach evtl. weiterer Umformung wird das Metall mittels einer Stahlschablone fest in der gewünschten Position gehalten. Dann wird es kurze Zeit auf ca. 600°C erhitzt und anschließend in Wasser abgeschreckt. Damit ist die Form für den Einwegeffekt eingepreßt (Abb. 12).

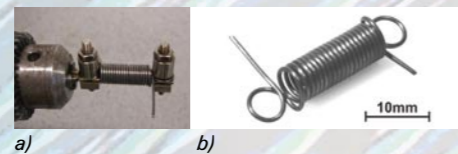


Abb. 12: a) Federwickelwerkzeug und b) NiTi-Federaktor.

Der Zweiwegereffekt verlangt darüber hinaus ein aufwändiges Training des Materials. Die Entwicklung von Konstruktionshilfsmitteln (wie z.B. FEM-Programmen) zur Bauteilauslegung ist auf Grund der komplexen Materialeigenschaft äußerst schwierig und Gegenstand aktueller Forschung.

Beispiele für Anwendungen von NiTi-Formgedächtniselementen

Der erste kommerzielle Einsatz einer NiTi-Legierung erfolgte durch Raychem im Dezember 1970 im Bereich der Luftfahrt für eine Kuppelungshülse (Cryofit) im Hochdruck-Hydrauliksystem eines Kampfflugzeuges der U.S. Navy. Heute werden NiTi-FGL schwerpunktmäßig in der Medizintechnik eingesetzt. Typische Anwendungen sind Gefäßimplantate (Stents), orthodontische Drähte, Klammern, Haken, Zwingen oder Mikrogreifer (Abb. 13).

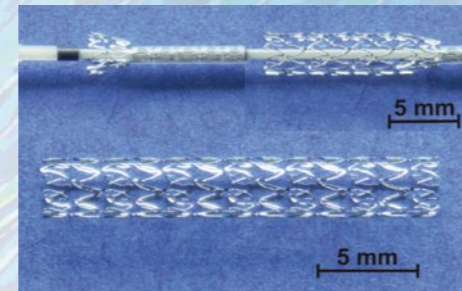


Abb. 13: Freisetzung eines pseudoelastischen NiTi-Stents vom Katheter.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel stellt die Nutzung der guten Dämpfungseigenschaften von NiTi dar. Bislang wird dies für die Dämpfung von seismischen Schwingungen im Bauwesen eingesetzt. Der Vorteil von NiTi zur Dämpfung von hochfrequenten Schwingungen im Zerspanprozess durch Spannhülsen oder gesputterte NiTi-Dünnschichten auf Werkzeugschäften konnte experimentell bereits gezeigt werden (Abb. 14 a). Der Einsatz von NiTi-FGL in der Antriebstechnik zur Reduktion des Verzahnungsspiels bei Umlaufgetrieben bzw. der Spielvergrößerung bei Temperaturerhöhung stellt eine innovative Einsatzmöglichkeit dar. Dabei wird das FG-Material sowohl als Aktorelement, als auch als pseudoelastischer Konstruktionswerkstoff verwendet (Abb. 14 b).

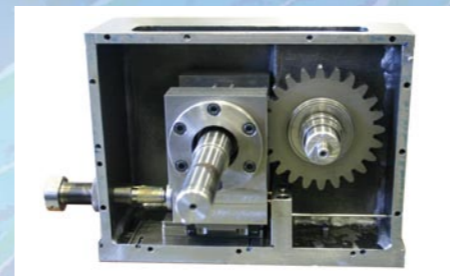
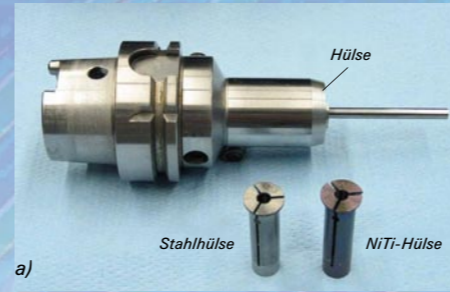


Abb. 14: a) NiTi-Spannhülse zur Schwingungsdämpfung. b) NiTi-Elemente (Pfeil) zur Spieleinstellung im Getriebe.

Literatur

Duerig, T.W. et al., Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, London: Butterworth-Heinemann, 1990
Otsuka, K., Wayman, C.M., Shape Memory Materials, Cambridge: Cambridge University Press, 2008
Proceedings of the 7th ESOMAT 2006, Materials Science & Engineering A, Vol. 481–482, Elsevier, 2008

Kontakt

M. Frotscher (Koordinator Industrie-Transfer) matthias.frotscher@ruhr-uni-bochum.de
SFB 459 „Formgedächtnistechnik“, Ruhr-Universität Bochum, Werkstoffwissenschaft IA 1/44, Universitätsstr. 150, 44780 Bochum, Telefon: (0234) 32-25910, Fax: (0234) 32-14235, Internet: <http://www.ruhr-uni-bochum.de/sfb459>



SFB 459 FORMGEDÄCHTNISTECHNIK

Grundlagen

Konstruktion und Anwendungen

Herstellung und Verarbeitung

Industrie-Transfer

Werkstoffe mit Erinnerungsvermögen – Formgedächtniswerkstoffe

Weiterführende Informationen

Einleitung

Der Formgedächtniseffekt (FGE) ist seit 1951 an NiTi bekannt. Zunächst wurde er nur an exotischen Legierungssystemen festgestellt. Doch gelang es durch intensive Forschung in den letzten Jahrzehnten, Legierungen zu entwickeln, die den Anforderungen der Industrie gerecht werden. Diese Materialien finden zunehmend Verwendung, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt-technik sowie im Medizinsektor. Gerade in diesen Hochtechnologiebereichen sind hohe Sicherheitsstandards einzuhalten. Dieses Anwendungsprofil erfordert deshalb weiterführende werkstoffspezifische Forschung. An der Ruhr-Universität Bochum wurde daher Anfang 2000 der Sonderforschungsbereich 459 „Formgedächtnistechnik–Grundlagen, Konstruktion, Fertigung“ ins Leben gerufen. Finanziert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, den Bund, das Land NRW sowie die Ruhr-Uni-

versität, wurde das bereits dort vorhandene Wissen gebündelt. Zusammen mit international führenden Forscher/innen aus aller Welt widmet sich der SFB 459 zentral allen wesentlichen Aspekten der FG-Forschung.

Was ist der Formgedächtniseffekt?

Formgedächtniswerkstoffe (engl.: shape memory alloys) zeichnen sich durch die erstaunliche Eigenschaft aus, eine vorausgehende Verformung vollständig zurückbilden zu können (Abb. 1). Klar – die lokale Dehnung im Werkstück muss bei der Deformation unter einem kritischen Wert bleiben, sonst wird das Material unwiederbringlich plastisch verformt oder gar zerrissen. Dieser Wert ist jedoch bis zu 100-mal größer als der elastische Grenzwert konventioneller Materialien, die so genannte Streckgrenze.

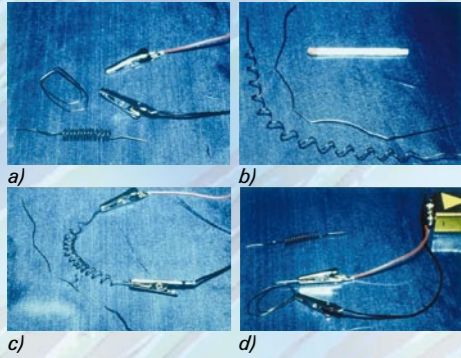


Abb. 1: FG-Einwegeffekt: a) Ausgangsgestalten, b) verformt, c) Feder bei und d) Büroklammer nach der Rückumwandlung. Die Erwärmung erfolgte durch Strom aus einer 9V-Batterie. Der 0,5 mm dicke Draht besteht aus NiTi und wandelt bei ca. 60 °C um. Der Vorgang dauert weniger als eine Sekunde.

Um die Gestalterinnerung abzurufen, benötigt das Bauteil beim Einwegeffekt lediglich einen „Denkstoß“ in Form von Erwärmung über die Umwandlungstemperatur. Neben dem Einwegeffekt gibt es noch den Zweiwegeffekt (ZWE) sowie die technisch bedeutende Pseudoelastizität. Beim ZWE schaltet das Material zwischen Warmform und Kaltform hin und her (Abb. 2).

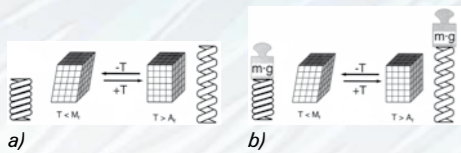


Abb. 2: a) intrinsischer ZWE (Bewegung erfolgt allein bei Temperaturwechsel und nur auf Grund der Materialeigenschaft), b) extrinsischer ZWE mit durch Konstruktion gegebener Rückstellkraft. Diese kann z.B. von einem im Gegentakt arbeitenden zweiten FG-Element (Aktor/Gegenaktor-Prinzip) oder einer herkömmlichen Feder kommen).

Pseudoelastisches Metall verhält sich ähnlich wie Gummi. Die Verformung geht bei Raumtemperatur nach Entlasten der Probe spontan zurück.

Diese komplexen makroskopischen Erscheinungsformen des FGE sind in Abb. 3 graphisch zusammengefasst.

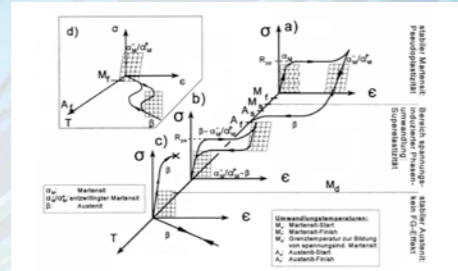


Abb. 3: Schema des Zusammenspiels der drei für den FGE zentralen Größen: Spannung ($\sigma = \text{Kraft/Fläche}$), Dehnung ($\epsilon = \text{Längenänderung/Länge}$) und Temperatur (T). a) Einwegeffekt, b) Pseudoelastizität, c) konventionelles Verhalten, d) intrinsischer Zweiwegeffekt. Im Plateaubereich in a) und b) ist die Dehnung stark lokalisiert.

Wie funktioniert der FGE?

Mikroskopisch beruht der FGE auf einer martensitischen Umwandlung. So werden alle Umwandlungen bezeichnet, bei denen Atome nicht ungeordnet diffundieren. Stattdessen bewegen sie sich kollektiv, geordnet, in eine neue Konfiguration. Dadurch bleiben die Nachbarbeziehungen unter den Atomen erhalten – im Gegensatz zur Diffusion – was für die Umkehrbarkeit des Vorgangs entscheidend ist. Ein einzelnes Atom bewegt sich dabei nicht viel – aber in der Summe führt das zu makroskopischer Gestaltänderung. Die Tieftemperaturphase wird Martensit (M) genannt. Bei hoher Temperatur bildet sich der Austenit (A). Der Übergang von der einen in die andere Form erfolgt durch eine gruppenweise Scherbewegung der Atome. Diese wird in den gezeigten Abbildungen schematisch durch zu Parallelogrammen verformte Rechtecke angedeutet.

Wenn ein martensitischer, unverformter FG-Werkstoff erwärmt wird und Austenit bildet, passiert makroskopisch (!) nichts – die kollektiven Bewegungen arrangieren sich so, dass keine sichtbare Gestaltänderung auftritt (Abb. 4).

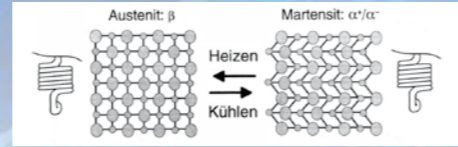


Abb. 4: Selbstakkommodation: Keine Gestaltänderung trotz Umwandlung bei zuvor unverformtem Martensit.

Wenn hingegen martensitisches Material verformt wird, richtet sich der zunächst ungeordnete Martensit (Abb. 5 l.u.) geordnet aus (Abb. 5 r.u.). Die Umordnung folgt der lokalen Spannungsverteilung im Bauteil. Der Martensit kann nur durch Erwärmung in Austenit umgewandelt werden.

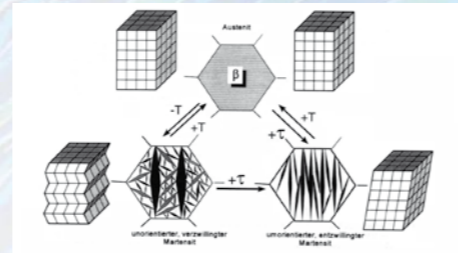


Abb. 5: Bildung von ungeordnetem thermischen (l.u.) sowie von geordnetem spannungsinduzierten Martensit (r.u.). Letzterer wird durch eine Schubspannung τ hervorgerufen.

Da der Austenit nur eine bestimmte Atomanordnung zulässt, ist dies mit einer Formänderung verbunden. Nach dem Abkühlen (ohne äußere Krafteinwirkung!) bildet sich wieder der selbstakkommodierte Martensit ohne makroskopische Gestaltänderung gegenüber dem Austenit (Einwegeffekt, Abb. 6).

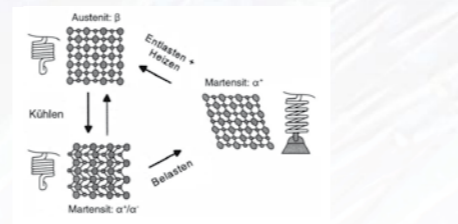


Abb. 6: Einwegeffekt: thermischer, selbstakkommodierter (α^+) sowie durch äußere Kraft ausgerichteter Martensit (α^+).

Für den Zweiwegeffekt muss das Material zuvor trainiert werden, damit im Umwandlungszyklus der Umweg über den unorientierten Martensit in Abb. 6 entfällt. Durch mechanische Behandlung gelingt es, den ausgerichteten Martensit so zu stabilisieren, dass direkt zwischen dieser Konfiguration und dem Austenit thermisch hin und her geschaltet werden kann (Abb. 3d, Abb. 7).

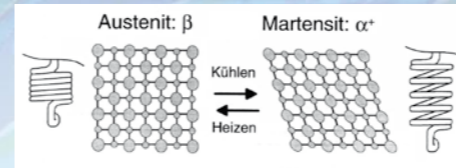


Abb. 7: ZWE: Direkte Umwandlung zwischen Austenit und orientiertem Martensit.

Bei der Pseudoelastizität reicht die Umgebungstemperatur aus, den orientierten, spannungsinduzierten Martensit in Austenit rückzuwandeln (Abb. 8). Dieses Verhalten setzt allerdings austenitisches Material unterhalb einer kritischen Temperatur M_D voraus (Abb. 3b).

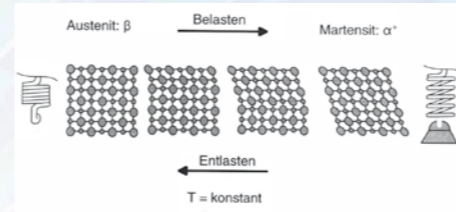


Abb. 8: Pseudoelastizität: Der Martensit wird nur durch die Verformung gebildet.

Welche FG-Werkstoffe gibt es?

Tabelle 1 zeigt einige Beispiele für FG-Materialien. Der FG-Effekt tritt im Bereich gewisser Zusammensetzung (Spalte Z) der Legierung (Spalte L) auf. Die Ausprägung und die Umwandlungstemperaturen zeigen eine starke Abhängigkeit von der genauen Zusammensetzung. Deshalb ist in der Spalte U das Intervall für die ungefähre Umwandlungstemperatur im Bereich der möglichen Konzentrationen Z angegeben. Die Herstellung präzise legierter Werkstoffe mit definierter Umwandlungstemperatur ist neben

der Reinheit und den edlen Materialien ein weiterer Grund für den hohen Preis dieser Werkstoffklasse. Bei NiTi ändert z.B. eine Abweichung von 0,1 Atom-% der Ni-Konzentration die Umwandlungstemperatur bereits um 10 °C. Die Spalte H gibt die ungefähre Temperaturdifferenz zwischen Hin- und Rückumwandlung an (so genannte Hysterese).

Tab. 1: Anhaltswerte für einige FG-Werkstoffe. Spalte L = Legierungssystem, Z = ungefähre Zusammensetzung (Atom-%), T = Umwandlungsbereich (°C), H = Umwandlungshysterese (°C). (Ag = Silber, Al = Aluminium, Au = Gold, Cd = Cadmium, Cu = Kupfer, Mn = Mangan, N = Nickel, Ti = Titan, Zn = Zink).

L	Z	U	H
AgCd	44~49 Cd	-190~-50	~15
AuCd	46~50 Cd	30~100	~15
CuZn	38~42 Zn	-180~-10	~10
MnCu	5~35 Cu	-250~180	~25
NiAl	36~38 Al	-180~100	~10
NiTi	49~51 Ti	-50~110	~30

Die binären Systeme können natürlich noch mit weiteren Elementen legiert werden. So vergrößert dem NiTi-System zugesetztes Niob (ca. 9 at%) die Hysterese, während Cu sie verringert. Zulegieren von Zirkonium und Hafnium erhöht hingegen die Umwandlungstemperatur. Leider nimmt aber die Effektgröße ab, oder die Materialien werden spröde und schlecht bearbeitbar.

Den zurzeit größten bekannten Formgedächtniseffekt hat das NiTi-System. Da es weiterhin einigermaßen effektiv zu bearbeiten ist und eine exzellente Korrosionsbeständigkeit sowie gute Biokompatibilität zeigt, wird es überwiegend eingesetzt. Bei einmaligem Gebrauch sind vollständig rückbildbare Dehnungen bis zu 8% möglich, für über 100.000-maligem Einsatz nur bis zu 4%. Der Schmelzpunkt der Legierung liegt bei ca. 1300 °C, die Dichte beträgt ca. 6.45 g/cm³. Die mechanischen Daten sind sehr von der Temperatur und der Vorbehandlung abhängig. Die Zugfestigkeit erreicht ca. 900 MPa (zum Vergleich: Stahl 300 bis 1700 MPa, Aluminium 80 bis 650 MPa).

Die Plateauspannung (Ausrichten des thermischen Martensits) liegt bei ca. 500 MPa.

Welche Probleme können beim Einsatz von FG-Werkstoffen auftreten?

Je nach Einsatzgebiet müssen FG-Werkstoffe bestimmten Anforderungen, z.B. in Bezug auf die chemische Reinheit, genügen. So ist insbesondere der zulässige Verunreinigungsgehalt von Kohlenstoff und Sauerstoff begrenzt. Diese Begleitelemente gelangen sowohl durch die Ausgangselemente, als auch während der schmelzmetallurgischen Herstellung in das Material und können zur Bildung von zumeist spröden und daher ungewollten Teilchen (Titan-Karbide, Titan-Oxide) führen (Abb. 9). Für Medizinprodukte und Implantate aus NiTi sind die erlaubten Grenzwerte z.B. in der ASTM-Norm F 2063-00 geregelt.

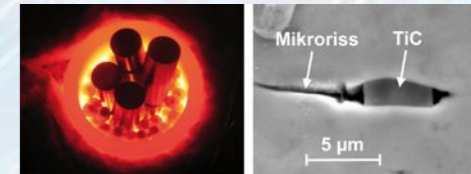


Abb. 9: a) Bei der schmelzmetallurgischen Herstellung von NiTi können Sekundärphasen entstehen. b) Rissbildung an einem Titankarbid (TiC).

In vielen Anwendungen werden FG-Elemente zyklisch beansprucht. Diese ständige Wiederholung kann, ganz ähnlich wie bei konventionellen Strukturwerkstoffen, zu Werkstoffversagen unterhalb der Fließ- oder Bruchspannung führen. FG-Werkstoffe zeigen bei wiederholter Belastung in Abhängigkeit von der Zyklenzahl funktionale und strukturelle Ermüdungserscheinungen. Funktionale Ermüdung tritt bei der thermischen und mechanischen Nutzung des Formgedächtniseffekts auf. Dabei kommt es zu Veränderungen der funktionalen Eigenschaften des Materials. Durch thermisches Zyklieren ändert sich die Lage der Umwandlungstemperaturen und die Lage und Form der thermischen Hysterese (Abb. 10).