



We are Nitinol.™

Gedaechtnis-Effekt und technisch anwendbare Legierungen

Tautzenberger, Stoeckel

ZwF, 78
pp. 486-488

1983

Gedächtnis-Effekt und technisch anwendbare Legierungen

Von Dr. P. Tautzenberger und Prof. Dr. D. Stöckel, Pforzheim

1 Einleitung

Unter dem Begriff Memory- oder Formgedächtnis-Legierungen sind verschiedene Legierungen bekannt geworden, die nach geeigneter Behandlung aufgrund von Gefügeumwandlungen ihre Gestalt in Abhängigkeit von der Temperatur ändern. Voraussetzung für den Memory-Effekt ist eine thermoelastische martensitische Umwandlung, bei der die beteiligten Phasen, Hochtemperaturphase (Austenit) und Niedertemperaturphase (Martensit), geordnete Gitterstrukturen aufweisen. Martensitische Gefügeumwandlungen stellen im wesentlichen eine bei Abkühlung auftretende Scherung des Gitters der Hochtemperaturphase (Austenit) dar. Die martensitische Phase tritt in Form unterschiedlich orientierter Platten auf, die sich meist zu Gruppen zusammenschließen.

Bei einer thermoelastischen martensitischen Umwandlung entstehen und wachsen die Martensitplatten kontinuierlich mit sinkender Temperatur und sie verschwinden genau in umgekehrter Weise bei Temperaturerhöhung, wobei stets ein Gleichgewicht zwischen zwei entgegengesetzten Energietermen vorliegt. Als treibende Kraft der Umwandlung wirkt die Differenz der Freien Enthalpie beider Phasen. Diesem Energieterm sind einige Energiebeiträge nichtchemischer Natur entgegengerichtet, von denen die mit der Phasenumwandlung verbundene elastische Verzerrungsenergie am wichtigsten ist [1, 2].

Der wesentliche Grund für die Reversibilität des thermoelastischen Martensits ist die Tatsache, daß nur sehr geringe elastische Spannungen bei der Umwandlung auftreten, die praktisch keine irreversible plastische Verformung durch Versetzungsbewegung bewirken. Die Verzerrungen, die beim Wachsen der Martensitplatten entstehen, werden durch Akkommodation der Platten innerhalb einer Gruppe weitgehend abgebaut. Darüber hinaus wird der Verzerrungsabbau durch Zwillingsbildung und Stapelfehler in den einzelnen Martensitplatten unterstützt [1].

Formgedächtnis-Legierungen haben geordnete Gitterstrukturen. Dadurch werden bei der Rückumwandlung des Martensits in die Hochtemperaturphase nur die ursprünglichen Austenitorientierungen gebildet, was eine Voraussetzung für den Memory-Effekt darstellt. Darüber hinaus weist das geordnete Gitter eine gegenüber dem ungeordneten Zustand erhöhte Streckgrenze auf, so daß irreversible plastische Verformung durch Versetzungsbewegung erschwert und die Reversibilität der Umwandlung begünstigt wird.

Wird eine Memory-Legierung im martensitischen Zustand im Bereich unterhalb eines kritischen Verformungsgrades bleibend verformt, so findet lediglich reversible Martensitverformung statt. Zu den wichtigsten Verformungsmechanismen zählen hierbei die Martensit-Umorientierung durch Zwillings-Scherungsprozesse und das Wachsen von Martensitplatten mit günstiger Orientierung auf Kosten ungünstig orientierter Bereiche. Der tatsächlich wirkende Mechanismus hängt insbesondere vom Legierungstyp und von der jeweiligen Martensitmorphologie ab [3]. Bei Erwärmung einer reversibel verformten Probe verschwindet der Martensit und es entstehen die ursprünglichen Austenitorientierungen, womit zwangsläufig eine Formrückkehr verbunden ist.

2 Arten des Gedächtnis-Effektes

2.1 Einwegeffekt

Nimmt man entsprechend Bild 1 einen geraden Draht aus einer Memory-Legierung im martensitischen Zustand (a) und biegt ihn so weit, daß zwar reversible Martensitverformung (zum Beispiel durch Zwillings-Scherungsprozesse), jedoch noch keine irreversible Verformung durch Versetzungsbewegung auftritt (b), so erfolgt bei Erwärmung eine Umwandlung in die Austenitphase, mit der die Einstellung der ursprünglichen Probenform einhergeht (c). Wesentlich ist hierbei, daß eine anschließende Abkühlung keine weitere Formänderung bewirkt (d). Daher wird der in Bild 1 dargestellte Vorgang Einwegeffekt genannt [4].

Die Induzierung dieses Einwegeffektes kann nahezu beliebig oft wiederholt werden, sofern die jeweilige Martensitverformung klein ist. Bei etwas höheren Verformungen ist infolge irreversibler Anteile allmählich mit einer unvollständigen Formrückkehr zu rechnen.

Beim Erwärmen eines Elementes mit Einwegeffekt erfolgt zunächst keine Bewegung. Erst beim Erreichen der sogenannten A_s -Temperatur beginnt die Formänderung, wobei die gesamte Effektfaltung in einem kleinen Temperaturbereich, zum Beispiel 10 bis 20 K, erfolgt. Die A_s -Temperatur kann je nach Legierungssystem zwischen etwa -150°C und $+150^\circ\text{C}$ liegen. Innerhalb dieses Bereiches können beliebige A_s -Werte durch die Legierungszusammensetzung gezielt eingestellt werden. Richtwerte für die maximalen A_s -Temperaturen sowie die Größe des Einwegeffektes technisch anwendbarer Legierungsgruppen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

2.2 Zweieffekt

Unterwirft man einen geraden Draht im martensitischen Zustand (Bild 2a) einer starken Biegeverformung (Bild 2b) und

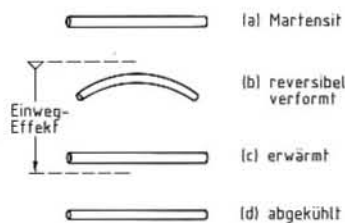


Bild 1. Schematische Darstellung des Einwegeffektes

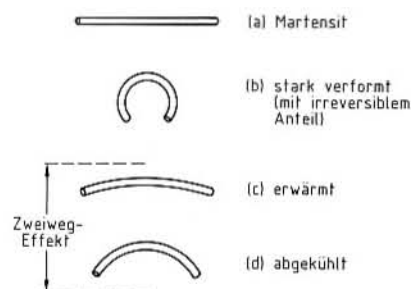


Bild 2. Schematische Darstellung des Zweieffektes

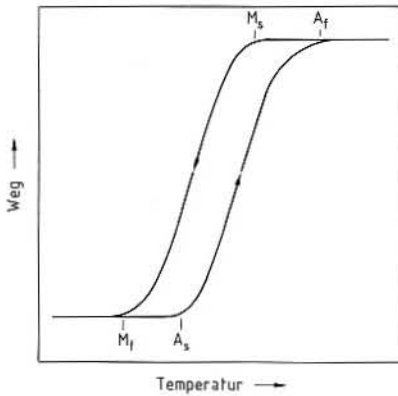


Bild 3. Temperatur-Weg-Kennlinie eines Elementes mit Zweivegeeffekt A_s und A_f : Temperatur, bei der die Formänderung beim Erwärmen beginnt bzw. beendet ist. M_s und M_f : Temperatur, bei der die Formänderung beim Abkühlen beginnt bzw. beendet ist.

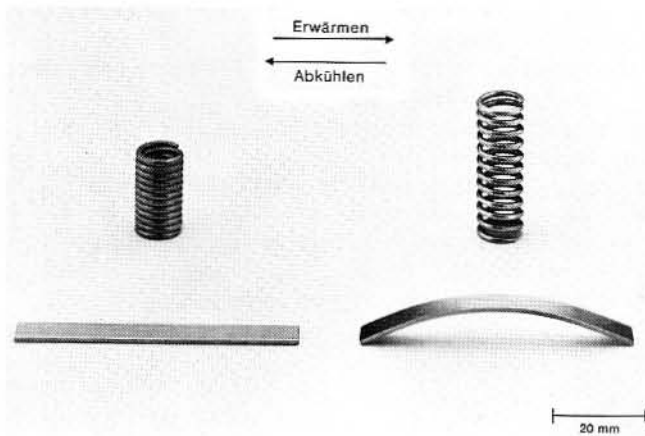


Bild 4. Druckfeder und Biegestreifen mit Zweivegeeffekt aus einer Cu-Zn-Al-Legierung ($A_s \approx 65^\circ\text{C}$, $A_f \approx 80^\circ\text{C}$, $M_s \approx 65^\circ\text{C}$, $M_f \approx 50^\circ\text{C}$)

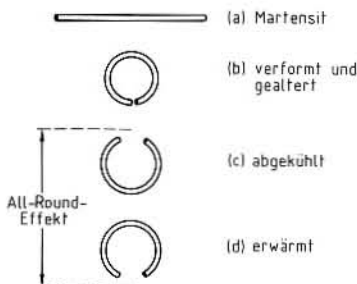


Bild 5. Schematische Darstellung des All-Round-Effektes

erwärmt ihn anschließend, so entsteht die Austenitphase und es bildet sich eine bestimmte Hochtemperaturform (Bild 2c). Wird der Draht danach abgekühlt, so tritt wieder Martensit auf, wobei sich die Niedertemperaturform (Bild 2d) einstellt. Bei der Durchführung von Temperaturzyklen werden dann jeweils die Formen (c) und (d) eingenommen, das heißt, die Probe erinnert sich sowohl an eine Hochtemperatur- als auch an eine Niedertemperaturform. Dieser Zweivegeeffekt bleibt über hohe Zyklenzahlen erhalten und ist auf die starke Verformung (b) zurückzuführen. Durch die hohe Biegeverformung tritt neben reversibler Martensitverformung auch irreversible plastische Verformung auf, wobei eine bestimmte Versetzungsstruktur erzeugt wird. Bei Erwärmung wird zunächst der reversible Anteil der Martensitverformung rückgängig gemacht, wodurch eine Formänderung in Richtung der Ausgangsform (a) stattfindet. Beim Abkühlen lagert sich der ent-

Tabelle 1. Eigenschaften technisch anwendbarer Memory-Legierungen

Eigenschaft	Legierung		
	NiTi	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Dichte (g/cm^3)	6,4–6,5	7,8–8,0	7,1–7,2
Elektrische Leitfähigkeit ($10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$)	1–1,5	8–13	7–9
Zugfestigkeit (N/mm^2)	800–1000	400–700	700–800
Bruchdehnung (%)	40–50	10–15	5–6
Maximale A_s -Temperatur ($^\circ\text{C}$)	120	120	170
Maximaler Einwegeeffekt (%)	8	4	5
Maximaler Zweivegeeffekt (%)	5	1*	1,2
Überhitzbarkeit bis ($^\circ\text{C}$)	400	160	300

* 1 % bedeutet bei einem einseitig eingespannten Biegeelement mit einer Dicke von 1 mm und einer freien Länge von 50 mm eine Ausbiegung von annähernd 25 mm am freien Ende.

stehende Martensit in das Spannungsfeld der bei der starken Biegeverformung induzierten Versetzungsstruktur ein und bewirkt die Niedertemperaturform (d) [3].

Die Temperatur-Weg-Kennlinie eines Elementes mit Zweivegeeffekt ist schematisch in Bild 3 dargestellt. Ähnlich wie beim Einwegeeffekt beginnt auch hier die Formänderung bei Erwärmung erst bei der sogenannten A_s -Temperatur. Bei weiterem Aufheizen erfolgt dann die gesamte Formänderung in einem kleinen Temperaturintervall (zum Beispiel 10 bis 20 K). Die Temperatur-Weg-Abhängigkeit weist eine Hysterese auf, deren Größe durch geeignete Maßnahmen beeinflusst werden kann.

Die Maximalwerte des Zweivegeeffektes technisch anwendbarer Legierungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Auf die Möglichkeit der gezielten Einstellung von A_s -Temperaturen sowie auf die maximalen A_s -Werte wurde bereits in Abschnitt 2.1 hingewiesen. Zwei Beispiele für Elemente mit Zweivegeeffekt sind in Bild 4 zu sehen.

Bauteile mit Zweivegeeffekt dürfen nur in begrenztem Maße überhitzt werden (Tabelle 1). Starke Überhitzungen führen zu Gefügeveränderungen, wodurch in bestimmten Fällen eine Effektverminderung sowie eine Verschiebung des Nullpunktes und der Schalttemperatur auftreten kann. Eine Beeinträchtigung des Formgedächtniseffektes ist auch dann zu erwarten, wenn ein Element sehr hohen Spannungen ausgesetzt wird, so daß irreversible Verformung durch Versetzungsbewegung erfolgt.

2.3 All-Round-Effekt

Bei bestimmten NiTi-Formgedächtnislegierungen ist es möglich, einen besonders ausgeprägten Memory-Effekt zu induzieren, der anhand von Bild 5 erläutert werden soll.

Wird ein im martensitischen Zustand gerader Draht (a) in die Form (b) gebogen und unter besonderen Bedingungen einer Alterung bei etwa 400 bis 500 $^\circ\text{C}$ unterworfen, so stellen sich bei Abkühlung und anschließender Erwärmung die Formen (c) bzw. (d) ein. Die Durchführung weiterer Temperaturzyklen hat jeweils eine völlige Formumkehr zur Folge. Diese bemerkenswerte Erscheinung wird in der Literatur als All-Round-Effekt bezeichnet und ist von ihrer Natur her mit dem normalen Zweivegeeffekt vergleichbar [3, 5, 6]. Der All-Round-Effekt wurde bislang nur bei NiTi-Legierungen mit einem Nickelgehalt über 50,5 Atom-% gefunden. Er ist auf Ausscheidungen, die bei der erwähnten Alterung entstehen, sowie auf Besonderheiten bei der Gefügeumwandlung dieser Legierungen zurückzuführen [6].

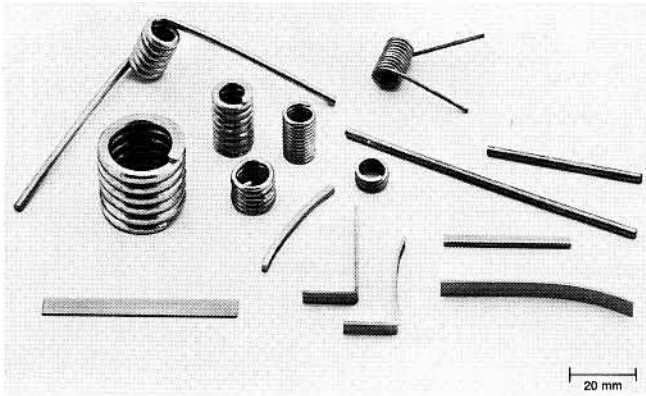


Bild 6. Beispiele möglicher Ausführungsformen von MEMOTAL-Elementen

3 Memory-Legierungen

Bauteile mit Memory-Effekt haben aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften ein großes, praxisbezogenes Interesse hervorgerufen. Für technische Anwendungen sind bislang jedoch erst die drei Legierungsgruppen NiTi, Cu-Zn-Al und Cu-Al-Ni geeignet.

Als Prototyp der technisch anwendbaren Formgedächtnislegierungen gilt Nickel-Titan mit annähernd stöchiometrischer Zusammensetzung. Unter dem Namen Nitinol wurde dieser Werkstoff vor rund 20 Jahren in den USA entwickelt [7]. Nickel-Titan zeichnet sich unter anderem durch einen besonders großen Ein- und Zweiwegeeffekt, eine relativ hohe Überhitzbarkeit sowie eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit aus. Als Nachteile gelten vor allem die schlechte Zerspanbarkeit sowie der hohe Preis.

Als zweite Generation der Memory-Legierungen wurden in den letzten Jahren die wesentlich billigeren Kupferbasislegierungen Cu-Zn-Al entwickelt [2], die jedoch eine schlechtere Korrosionsbeständigkeit und eine geringe Überhitzbarkeit aufweisen.

Vor etwa zwei Jahren wurden die Kupferbasislegierungen Cu-Al-Ni entwickelt [8], mit denen erhöhte Schalttemperaturen

und hohe Überhitzbarkeit erreicht werden können. Nachteile stellen hier die geringe Duktilität sowie die schlechte Zerspanbarkeit dar.

Einige physikalische und mechanische Eigenschaften sowie die Memory-Daten der drei Legierungsgruppen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Die aufgeführten Eigenschaften hängen von verschiedenen Einflußgrößen ab und wurden daher durch Wertespanspannen oder Maximalwerte angegeben.

4 MEMOTAL-Elemente

MEMOTAL-Elemente aus dem Hause G. RAU GmbH & Co., Pforzheim, sind neue Bauteile mit temperaturabhängigem Formänderungsvermögen aus Memory-Legierungen. Sie können den Einweg- oder den Zweiwegeeffekt aufweisen und zeichnen sich durch folgende Besonderheiten aus:

- Große Arbeitsleistung pro Volumeneinheit.
- Vollständige Arbeitsverrichtung in einem kleinen Temperaturintervall.
- Möglichkeit zur Durchführung verschiedener Bewegungsarten (Zug, Druck, Biegung, Torsion).
- Der Formänderungseffekt kann auf bestimmte Elementbereiche beschränkt werden.

Beispiele für einige Ausführungsformen von MEMOTAL-Elementen sind in Bild 6 zu sehen.

Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften lassen sich MEMOTAL-Elemente in zahlreichen Fällen für Meß-, Regel- und Anzeigezwecke in der Elektrotechnik und Elektronik, in der Wärme- und Installationstechnik, im Maschinen- und Apparatebau sowie im Automobilbau einsetzen.

Literatur

1. J. Perkins: Mat. Sci. Eng., 51 (1981), S. 181-192.
2. L. Delaey, E. Aernoudt, J. Roos: METALL, 31 (1977) S. 1325-1331.
3. K. Otsuka, K. Shimizu: Int. Summer Course on Martensitic Transformations, Katholieke Universiteit Leuven (1982), S. 81
4. K. N. Melton, O. Mercier: Material + Technik, 6 (1978), S. 59-66.
5. N. N.: Tohoku Metal Industries Ltd. of Japan, Firmenschrift (1983).
6. M. Nishida, T. Honma: Int. Conf. on Martensitic Transformations, Leuven 1982, Journal de Physique, Colloque C-4 suppl. No. 12 (1982), S. 225-230.
7. C. M. Jackson, H. J. Wagner, R. J. Wasileski: NASA Report, SP 5110 (1972), S. 1-86.
8. T. W. Duerig, J. Albrecht, G. H. Gessinger: Journal of Metals, 34 (12) (1982), S. 14-20. 1883 A