

**Verbindungselemente aus NiTi-Formgedächtnislegierungen: Martensitplateau mit
Zwillingen**

Stoeckel

KEM Juni 1987
pp. 22-24

1987

Verbindungselemente aus Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen

Martensitplateau mit Zwillingen

D. Stoeckel Prof. Dr.-Ing.

Wird eine Shape-Memory-Legierung bei tiefer Temperatur bleibend verformt, so erinnert sie sich bei Erwärmung über eine kritische Temperatur an ihre ursprüngliche Gestalt und nimmt diese wieder ein. Der Formgedächtnis- oder Shape-Memory-Effekt wurde bereits 1932 bei der Untersuchung von Gold-Kadmium-Legierungen entdeckt, jedoch erst 1951 als Ergebnis einer martensitischen Umwandlung erkannt.

Die beiden Phasen zeigen charakteristische Unterschiede im Festigkeitsverhalten. Während das Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Austenits dem konventioneller Legierungen gleicht, ist das des Martenits recht ungewöhnlich, Bild 3. Es ist gekennzeichnet durch das sog. Martensitplateau, einen Bereich mit sehr geringer Verfestigung. In diesem Bereich erfolgt die Verformung durch Verschieben der Zwillingsgrenzen. Da diese Verformung bei Temperaturerhöhung rückgängig gemacht werden kann, wird sie gelegentlich auch als quasi- oder pseudoplastisch bezeichnet. An das Martensitplateau schließt sich ein zweiter elastischer

ten Zustand sofern keine Temperaturänderung erfolgt. Bei Erwärmung und Überschreiten der A_s -Temperatur schrumpft der Ring in seine ursprüngliche Form zurück. Kühlt man nun wieder unter M_s ab, erfolgt keine Formänderung, sofern keine Kraft einwirkt. Man spricht hierbei vom Einwegeffekt, Bild 4. Der Einwegeffekt findet vor allem für Verbindungs-, Befestigungs- und Dichtungselemente Verwendung, wobei die Umwandlungstemperaturen so gewählt werden müssen, daß die Elemente im Anwendungstemperaturbereich im austenitischen Zustand vorliegen. Nur in diesem Zustand werden hohe Haltekraften erzielt.

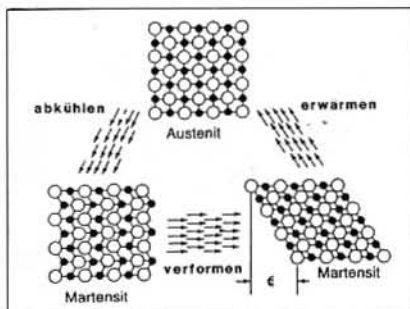


Bild 1

Grundlagen des Shape-Memory-Effektes

Der Mechanismus des Shape-Memory-Effektes ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Die kubisch raumzentrierte Hochtemperaturphase (Austenit) wandelt sich bei Abkühlung in eine verzwillingte Martensitstruktur um. Diese Umwandlung erfolgt diffusionslos durch Scherbewegungen und ist nicht mit einer Gestaltsänderung verbunden. Der Martensit ist durch Verschieben der Zwillingsgrenzen bis zu ca. 8% leicht verformbar. Diese Verformung ist bleibend, solange das Material auf tiefer Temperatur bleibt (unterhalb der Umwandlungstemperatur). Wird der verformte Martensit jedoch erwärmt, stellt sich bei Überschreiten der Umwandlungstemperatur die ursprüngliche Kristallorientierung der Hochtemperaturphasen und damit die ursprüngliche Gestalt wieder ein. Die Umwandlung Austenit/Martensit und die Rückumwandlung Martensit/Austenit findet bei unterschiedlichen Temperaturen statt, d.h. es wird eine Hysterese durchlaufen. In Bild 2 ist der Anteil an Martensit in einer Probe als Funktion der Temperatur schematisch aufgetragen. Die die Umwandlung kennzeichnenden Temperaturen sind Austenit-Start (A_s) und Austenit-Finish (A_f) sowie Martensit-Start (M_s) und Martensit-Finish (M_f).

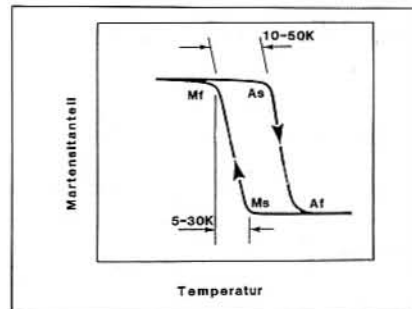


Bild 2

Als Buehler am U.S. Naval Ordnance Laboratory den Shape-Memory-Effekt in der intermetallischen Verbindung Ni-Ti entdeckten, wurde der „Laboreffekt“ technisch bedeutsam. Die Legierung Nickel-Titan weist nicht nur einen sehr ausgeprägten Shape-Memory-Effekt auf, sondern darüber hinaus auch andere wesentliche Eigenschaften wie hohe Festigkeit, Duktilität, niedriges spezifisches Gewicht und ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit. Diese einzigartige Kombination aus Formgedächtnis- und Konstruktionseigenschaften macht die Nickel-Titan-Legierungen zu den heute technisch interessantesten Werkstoffen.

Bereich an. Bei Erreichen der „wahren“ Streckgrenze erfolgt die plastische Verformung konventionell durch Versetzungsbewegung.

Einstellung des Formgedächtnisses

Wird z. B. ein Ring aus einer NiTi-Legierung im martensitischen (Tiefemperatur) Zustand soweit aufgeweitet, daß der Dehnungsbereich des Martensitplateaus nicht überschritten wird, so bleibt er nach Wegnahme der verformenden Kraft im gedehnten

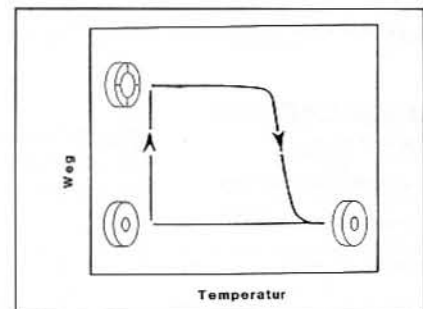


Bild 4

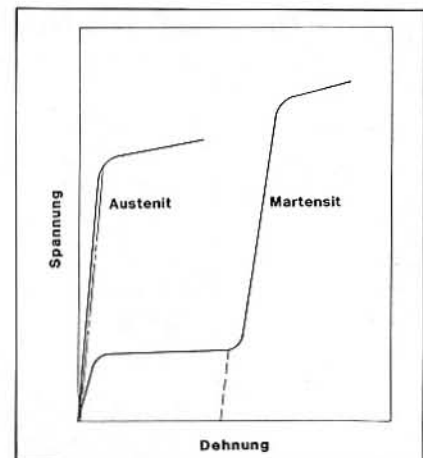


Bild 3

Bild 1 Schematische Darstellung des Shape Memory Effektes

Bild 2 Temperaturabhängigkeit der martensitischen Umwandlung (schematisch)

Bild 3 Verfestigungsverhalten von NiTi im austenitischen und martensitischen Zustand (schematisch)

Bild 4 Einwegeffekt (schematisch)

Der Einwegeffekt kann nahezu beliebig oft wiederholt werden. Es ist dazu jedoch bei jedem Zyklus eine verformende Kraft erforderlich. Ein Zweiwegverhalten kann erreicht werden, wenn das Element gegen eine Gegenkraft arbeitet, die hoch genug ist, das Element im martensitischen Zustand zu verformen.

Shape-Memory-Legierungen auf NiTi-Basis

Die intermetallische Verbindung NiTi mit einem Nickelgehalt von etwa 50 Atom-% bzw. 55 Gewichts-% gilt als Standardlegierung mit Formgedächtnis. Da für die Variation der Umwandlungstemperaturen (A_s , M_s) durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung nur ein schmaler Konzentrationsbereich zur Verfügung steht, muß bei der Herstellung der Legierung auf eine genaue Kontrolle der Legierungszusammensetzung und auf extreme Homogenität geachtet werden. Eine Veränderung der Legierungszusammensetzung um nur 0,1% kann eine Verschiebung der A_s -Temperatur um 10 K bewirken.

Cryogene Legierungen

Als cryogene Legierungen werden solche NiTi-Legierungen bezeichnet, deren Umwandlungstemperaturen unter -100°C liegen. Sie werden meist für Verbindungs- und Befestigungselemente verwendet, wenn die Installation wegen Brand- und

Anwendungsbeispiele: Verbindungs- und Befestigungselemente

Der Shape-Memory-Effekt ist als dreidimensionaler Effekt anzusehen, gegeben durch die Dimensionen Spannung, Dehnung und Temperatur.

Wird eine im martensitischen Zustand verformte Probe daran gehindert, bei Erwärmung über A_s in ihre ursprüngliche Gestalt zurückzukehren, spricht man von un-

wärmt. Bei der Rückumwandlung schrumpft der Ring zunächst frei (freies Formgedächtnis), bis er die Welle berührt. Die weitere Formänderung wird unterdrückt, d.h. verhindert. Stattdessen wird eine Spannung aufgebaut. Bild 6a zeigt dieses Verhalten in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Relevante Größen sind nun ϵ_c , die Dehnung, bei der der Ring die Welle berührt, und σ_r , die Spannung, die durch die unterdrückte Gestaltsänderung aufgebaut wird. Im Deh-

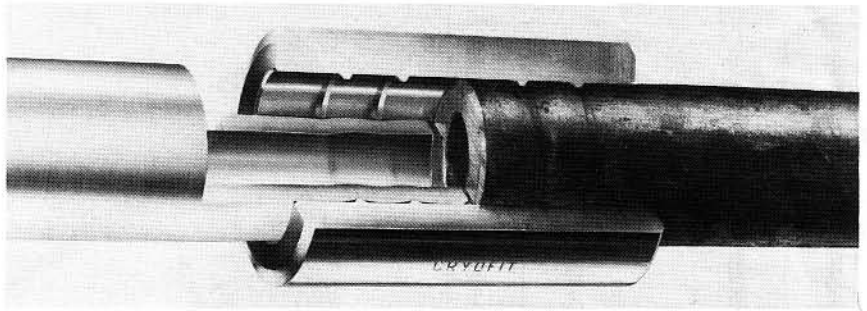


Bild 7

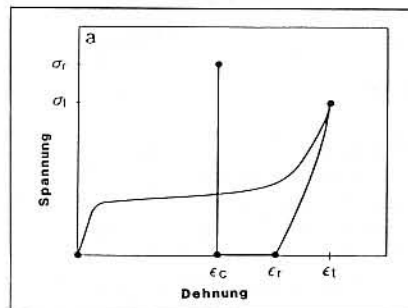


Bild 6a

Bild 5 Temperaturabhängigkeit des Martensitgehaltes einer cryogenen NITI-Legierung (---) und einer Legierung mit erweiterter Hysterese —1. Zyklus, —2. Zyklus)

Bild 6 Unterdrücktes Formgedächtnis

ϵ_t : Gesamtdehnung
 ϵ_p : plastische Dehnung
 ϵ_c : Kontaktdehnung
 σ_r : verformende Spannung
 σ : durch unterdrückte Formänderung aufgebaute Spannung
 T_d : Verformungstemperatur
 T_c : Kontakttemperatur
 Bild 7 NITI-Rohrverbindungselement

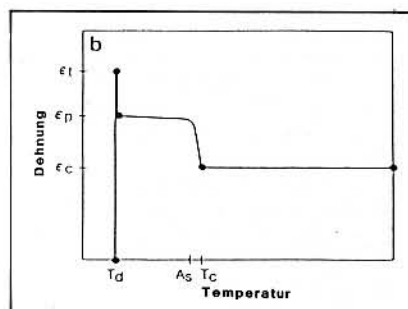


Bild 6b

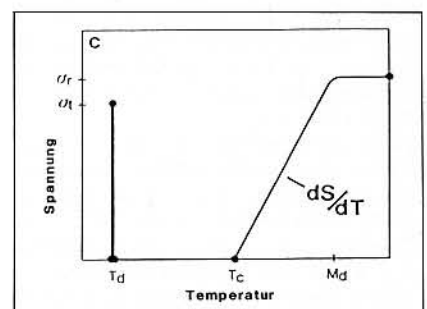


Bild 6c

Explosionsgefahr oder anderen Gründen ohne Wärmeeinwirkung erfolgen muß. Die Legierungen sind im Hinblick auf Austenitfestigkeit optimiert und liefern in einem Anwendungsbereich von -65°C bis 300°C außerordentlich gute Haltekräfte.

Legierungen mit erweiterter Hysterese

Während cryogene Legierungen nach der Tieftemperaturformgebung auch bei tiefer Temperatur gelagert, transportiert und die entsprechenden Bauteile bei tiefer Temperatur installiert werden müssen, können Legierungen mit erweiterter Hysterese nach der Tieftemperaturformgebung bei Raumtemperatur gelagert und transportiert werden. Verbindungs- und Befestigungselemente aus diesen Legierungen werden durch Erwärmen auf ca. 150°C installiert. Nach der Installation bleiben die Legierungen im hochfesten (Hochtemperatur-) Zustand, auch wenn sie auf Temperaturen bis -65°C abgekühlt werden, Bild 5.

Legierungen für wieder lösbare Verbindungen

Wieder lösbare Verbindungen erfordern Zweiwegverhalten. Durch Entwicklung von Legierungen mit sehr niedriger Martensitfestigkeit und hoher Austenitfestigkeit kann das Zweiwegverhalten mit relativ geringen Rückstellkräften vorteilhaft genutzt werden.

terdrücktem Formgedächtnis (constrained recovery). Die Probe kann dabei eine erhebliche Kraft entwickeln. Dieser Effekt wird technisch in großem Umfang genutzt. Er kann am Beispiel eines Schrumpfringes anschaulich erläutert werden. Ein Ring aus NiTi wird in der Hochtemperaturphase (Austenit) z. B. durch Stanzen oder Drehen hergestellt. Der Innendurchmesser dieses Ringes ist kleiner als der Durchmesser des Schaftes oder der Welle, auf die der Ring aufgebracht werden soll. Anschließend wird der Ring unter M_f abgekühlt. Die Umwandlung von Austenit in Martensit verläuft ohne Gestaltsänderung. Der Ring wird im martensitischen Zustand aufgeweitet, bis der Innendurchmesser größer als der Durchmesser der Welle ist. Danach wird der Ring über die Welle geschoben und er-

nungs-Temperatur-Diagramm, Bild 6b, erscheint der Anteil der freien Formänderung ($\epsilon_p - \epsilon_c$), sowie die Temperatur, bei der der erste Kontakt Ring/Welle zustande kommt.

Eine weitere wichtige Darstellung ist die Temperaturabhängigkeit der Spannung, Bild 6c. Sobald der Ring die Welle berührt, ergibt sich eine lineare Zunahme der Spannung mit steigender Temperatur bis bei M_d die maximale Spannung erreicht wird. Es ist verständlich, daß die Spannung von der Kontaktdehnung abhängt. Um maximale Spannungswerte zu erhalten, sollte die Kontaktdehnung mindestens 2% betragen. Für die praktische Anwendung von Schrumpfverbindungen bedeutet dies, daß vom gesamten Formgedächtniseffekt von ca. 8% nur maximal 6% für die Montage zur Verfügung stehen.

Rohrverbindingssysteme

Eine der ältesten und bisher erfolgreichsten Anwendungen des Shape-Memory-Effektes sind Rohrverbinder. Im einfachsten Fall besteht ein Rohrverbinder aus einem Hohlzylinder aus einer NiTi-Legierung, dessen Innendurchmesser im Arbeitstemperaturbereich (Austenit) kleiner ist als der Außendurchmesser der zu verbindenden Rohre. Bei Verwendung cryogener Legierungen wird der Zylinder in flüssigem Stickstoff soweit mechanisch

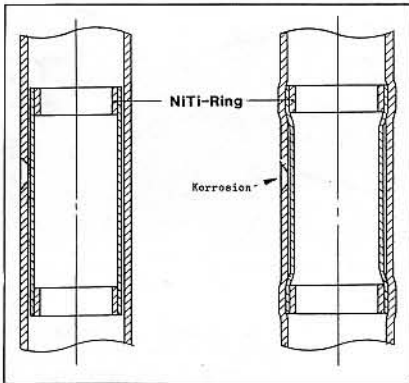


Bild 9

aufgeweitet, bis der Innendurchmesser größer ist als der Rohrdurchmesser. Das aufgeweitete Verbindungselement wird in flüssigem Stickstoff gelagert und transportiert. Zur Montage wird das Element mit einer speziellen Zange dem Kühlbehälter entnommen und über die Rohrenden geschoben. Bei der Erwärmung auf Raumtemperatur schrumpft das Element auf die Rohrenden und verbindet diese druck- oder vakuumdicht. Zur Verbesserung der Dichtwirkung weisen die Elemente im allgemeinen Dichtlippen auf der Innenoberfläche auf, Bild 7.

Shape-Memory-Rohrverbinder aus NiTi zeichnen sich durch außergewöhnlich hohe Zuverlässigkeit aus. Von den mehr als 1 000 000 Elementen, die seit 1971 für die Grumman F-14 „Tomcat“ eingesetzt wurden, wurde kein einziger Schadensfall gemeldet. Neben Flugzeugbau sind vor allem der Schiffbau und die Prozeßtechnik bevorzugte Anwendungsgebiete der NiTi-Rohrverbindingssysteme.

Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet für Rohrverbindingssysteme vor allem aus NiTi-Legierungen mit weiter Hysterese sind Unter-Wasser-Rohrverbindingen. Die Verbindung von Gas- und Ölleitungsrohren auf dem Meeresgrund muß schnell und zuverlässig erfolgen. Bei dem in Bild 8 gezeigten System, das für die Verbindung von dickwandigen Rohren mit ca. 60 mm Durchmesser ausgelegt ist, besteht das eigentliche Verbindungselement aus rostfreiem Stahl. Die „Treiber“ sind Ringe aus NiTi mit erweiterter Hysterese.

Rohrreparatursysteme

Korrosionsschäden an Wärmeaustauscherrohren in Kraftwerken können auf elegante Weise mit Hilfe von Shape-Me-

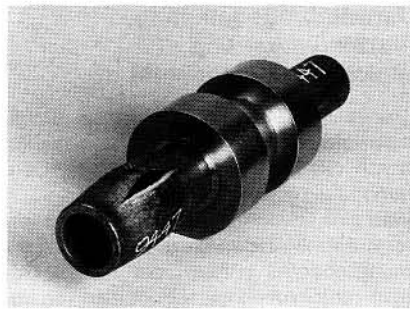


Bild 8

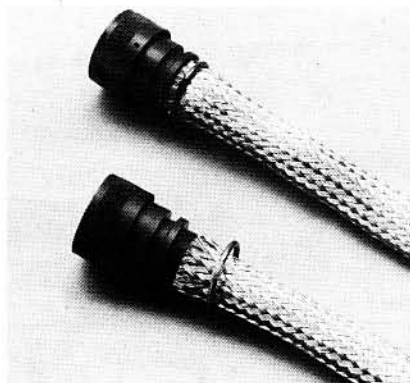


Bild 10

Voraussetzung für den Shape-Memory-Effekt ist eine thermoelastische martensitische Umwandlung, bei der die beteiligten Phasen, Hochtemperaturphase (Austenit) und Niedertemperaturphase (Martensit), geordnete Gitterstrukturen aufweisen.

Auf dem Gebiet der Verbindungstechnik konkurrieren die Shape-Memory-Elemente mit konventionellen Techniken wie thermisches Schrumpfen, Kleben, Löten, Schweißen etc. Gegenüber diesen Techniken bietet die Verwendung von NiTi-Befestigungselementen einige Vorteile:

- ☐ keine Wärmeeinwirkung (bei Verwendung cryogener Legierungen)
- ☐ größere zulässige Montagetoleranzen (gegenüber thermischem Schrumpfen)
- ☐ einfache Montagetechnik, keine aufwendigen Werkzeuge
- ☐ Verbindungen artfremder Werkstoffe möglich (z. B. Metall/Keramik)

mory-Rohrreparatursystemen behoben werden. In das beschädigte Rohr wird ein Rohrschnitt aus NiTi eingeführt, der zuvor im martensitischen Zustand komprimiert wurde. Bei Erwärmung dehnt er sich radial aus und legt sich damit an die Innenoberfläche des zu reparierenden Rohres an.

Bei einem modifizierten System wird ein Rohrschnitt aus einem mit dem zu reparierenden Rohr artgleichen Material durch zwei Shape-Memory-Ringe mit großer Kraft in das Rohr eingepreßt, Bild 9. Die Installation des Reparatursystems erfolgt unter Verwendung einer wiederverwendbaren Shape-Memory-Montagevorrichtung.

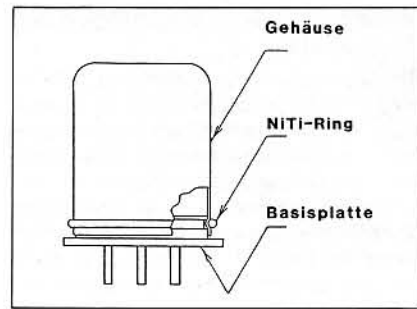


Bild 11

Bild 8 Rohrverbinder für Unterwasser-Gasleitung (nach Berstversuch)

Bild 9 Rohrreparatursystem (schematisch)

Bild 10 Schirmgeflechtbefestigung mit NiTi-Schrumpfringen

Bild 11 Anwendung von NiTi-Schrumpfringen als Dichtelemente

Befestigungs- und Dichtelemente

Wegen der großen erzielbaren Formänderung eignen sich NiTi-Shape-Memory-Elemente in einer Vielzahl verschiedener Konfigurationen hervorragend als Befestigungs- und Dichtelemente. Dies gilt vor allem für Elemente aus Legierungen mit erweiterter Hysterese. Eine bevorzugte Ausführungsform sind geschweißte Draht- oder Bandringe, die bei Erwärmung radial schrumpfen.

Montage von Abschirmgeflechtem

Derartige Ringe werden in großem Umfang für die Befestigung von Abschirmgeflechtem an Steckergehäusen verwendet. Zur Montage wird der Ring über Geflecht und Steckergehäuse geschoben und elektrisch erwärmt, Bild 10. Bei dieser Art der Erwärmung schrumpft der Ring innerhalb 5 bis 10 Sekunden. Gegenüber der konventionellen „Aufschrumpftechnik“, die auf der thermischen Ausdehnung des aufzubringenden Elementes beruht, bieten Shape-Memory-Elemente einen um Größenordnungen größeren Schrumpfweg, wodurch die Montage deutlich erleichtert wird.

Verbindung: Faserverstärkte Kunststoffe – Metallflansch

Eine weitere Ausführungsform radial schrumpfender Befestigungselemente sind aus NiTi-Bändern hergestellte Ringe. Derartige Ringe werden z. B. für die Verbindung von Rohren aus faserverstärktem Kunststoff mit Metallflanschen etc. verwendet.

Draht- oder bandförmige sowie gestanzte Ringe können auch für das gasdichte Verschließen dünnwandiger zylindrischer Gehäuse verwendet werden. Bild 11 zeigt einen solchen Anwendungsfall schematisch. Durch entsprechende Gestaltung der Basisplatte, die aus Metall, Keramik oder Kunststoff bestehen kann, wird eine ausgezeichnete Gasdichtigkeit erzielt. Bei der Verbindung eines Aluminiumgehäuses mit ca. 35 mm Durchmesser mit einer Basisplatte aus Aluminium wurde eine Leckrate von weniger als $1,8 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ He/s}$ gemessen.

Weitere Informationen KEM 271