



We are Nitinol.™

High-Tech-Metalle Made in USA

Stoeckel

Magazin Neue Werkstoffe 2/1987
pp. 27-30

1987

Prof. Dr. Dieter Stöckel*

High-Tech-Metalle Made in USA

Spektakuläre Erfolge werkstoffwissenschaftlicher Forschung beschränken sich, wie es scheint, heutzutage im wesentlichen auf Hochtemperatursupraleiter auf oxidischer Basis, keramische Werkstoffe für den Turbinenbau sowie auf das weite Gebiet der Kunststoffe. Erfolge der Metallforschung sind dagegen weniger publikumswirksam und erscheinen daher seltener im Rampenlicht der Öffentlichkeit. Dies ist in Europa wie in den USA der Fall. Dennoch sind Neu- und Weiterentwicklungen auf dem Gebiet metallischer Werkstoffe technisch nicht weniger bedeutsam.

Im folgenden wird über einige neue metallische Werkstoffe bzw. Verfahrenstechniken berichtet, die in den USA derzeit vor der Markteinführung stehen oder bereits kommerziell genutzt werden.

Pulvermetallurgie

Die beiden grundlegenden Verfahrensschritte in der Pulvermetallurgie sind:

- das Pressen von Formlingen aus pulverförmigen Rohstoffen
- deren anschließendes Verfestigen durch Sintern.

Das Sintern ist eine Wärmebehandlung bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes des betreffenden Metalles oder der überwiegenden Metallkomponente. Die Eigenschaften des Sinterkörpers sind sehr stark von den Herstellungsbedingungen und den Eigenschaften der verwendeten Pulver abhängig [1]. In den letzten Jahren sind erhebliche Fortschritte sowohl bei der Pulver- als auch bei der Formteilherstellung erzielt worden. Die heute zur Verfügung stehenden Pulver weisen eine hohe Reinheit auf. Die Teilchengröße kann sehr genau kontrolliert und die Gleichmäßigkeit von Charge zu Charge eingehalten werden.

Pulver-Spritzen

Das Metall-Pulver-Spritzen ist eine neue pulvermetallurgische Verfahrensvariante, die die Massenproduktion kompliziert geformter Teile ermöglicht. Mit Hilfe dieses

Verfahrens können praktisch alle Teile, die durch Kunststoff-Spritzen herstellbar sind, auch aus metallischen Werkstoffen hergestellt werden. Die Dichte derartiger Teile sowie ihre anderen Eigenschaften sind mit denen gegossener Metalle vergleichbar [2].

Bei den meisten Verfahren wird ein thermoplastisches oder Wachsbindemittel verwendet, das leicht mit dem metallischen Pulver gemischt und in konventionellen Spritzmaschinen verarbeitet werden kann. Während das Spritzen nur wenige Sekunden dauert, werden für das Austreiben des Bindemittels vor dem Sintern im allgemeinen mehrere Tage benötigt. Bei einer von Cabot entwickelten Verfahrensvariante wird ein weitgehend wasserlöslicher Methylcellulose-Binder verwendet. Das Spritzen erfolgt bei Raumtemperatur in vorgewärmte Formen. Dabei verdampft Wasser, und der Binder geliert. Das Austreiben des Binders erfolgt im Sinterofen und ist nach weniger als einer Stunde abgeschlossen.

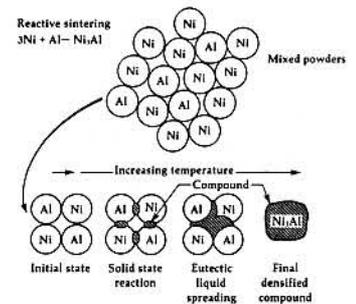
Ursprünglich für die Verarbeitung von Kobalt-Basis-Legierungen entwickelt, wird der Prozeß heute auch im Hinblick auf seine Anwendbarkeit für Hochtemperaturlegierungen auf Eisen- und Nickelbasis, Werkzeug- und rostfreie Stähle sowie Wolframcarbid/Kobalt-Verbundwerkstoffe untersucht.

Intermetallische Verbindungen

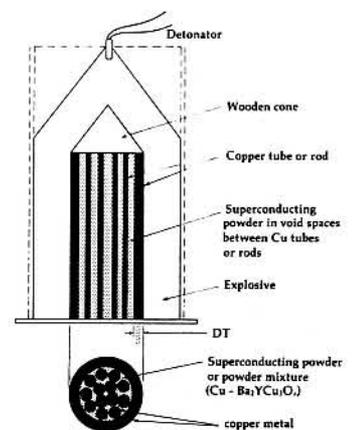
Aluminide - intermetallische Verbindungen des Alumi-

niums - werden häufig als die nächste Generation oxidationsbeständiger Hochtemperaturwerkstoffe für den Turbinenbau angesehen. Sie zeichnen sich durch eine Reihe hochinteressanter Eigenschaften, wie hoher Schmelzpunkt, niedrige Dichte, hohe Festigkeit, gutes Korrosions- und Oxidationsverhalten sowie vergleichsweise niedrige Kosten aus. Bei einigen Verbindungen steigt die Festigkeit mit zunehmender Temperatur. Trotz dieser geradezu idealen Eigenschaftskombination sind Aluminide bisher nicht kommerziell genutzt. Dies ist auf den schwerwiegenden Nachteil der Sprödigkeit und schlechten Verarbeitbarkeit dieser Werkstoffe zurückzuführen.

Am Rensselaer Polytechnic Institute wird die Eignung der intermetallischen Verbindung Ni_3Al als Matrixwerkstoff für Faserverbundwerkstoffe untersucht. Um Reaktionen und Beschädigungen der Fasern zu vermeiden, müssen die Werkstoffe bei möglichst niedrigen Temperaturen hergestellt werden [1]. Hier bietet sich das Reaktionssintern von Aluminium- und Nickel-Pulvermischungen an, das bei Temperaturen um $500^\circ C$ durchgeführt wird. Durch Reaktion von Aluminium mit Nickel wird eine flüssige eutektische Phase bei Temperaturen gebildet, die deutlich unter dem Schmelzpunkt der intermetallischen Verbindung liegen. Die Pulvermischung wird auf ca. $550^\circ C$ erwärmt, um die Reaktion zu starten. Durch die Reaktion wird Wärme frei, sodaß sich der Werkstoff selbst weiter erwärmt. Die flüssige eutektische Phase breitet sich aus und „verzehrt“ dabei die elementaren Pulverpartikel. Unmittelbar hinter der Grenzfläche fest/flüssig scheidet sich die intermetallische Verbindung Ni_3Al aus. Die Dichte derartig hergestellter Werkstoffe liegt bei ca. 97% der theoretischen Dichte. Die



Reaktionssintern von Ni_3Al schematisch [1]



Explosivverdichteter oxidischer Supraleiter schematisch [3]

Werkstoffe können daher containerlos heißisostatisch weiter verdichtet werden.

Das Strangpressen vorlegierter Pulver wird an verschiedenen Stellen untersucht [1]. Durch Zerstäuben der Legierungen $FeAl$, $NiAl$ oder Ni_3Al in kontrollierter Atmosphäre können Pulverpartikel erzeugt werden, die eine aluminiumreiche oxidische Oberflächenschicht aufweisen. Die Pulver werden in Container eingefüllt und durch Strangpressen verdichtet. Die Temperatur und der Umformgrad werden so gewählt, daß ein gleichmäßiger Materialfluß, größtmögliche Verdichtung, ausreichende Diffusion zwischen den Pulverpartikeln und eine kontrollierte Rekristallisation stattfinden. Die Oxidschichten auf den Partikeln werden hierbei aufgebrochen und als Teilchen eingelagert. Die Oxidteilchen verhindern ein unkontrolliertes Kornwachs-

* Prof. Dr. Dieter Stöckel, Los Altos Hills, California

tum und tragen somit zur Verbesserung der Duktilität bei.

Hochtemperatur-supraleiter

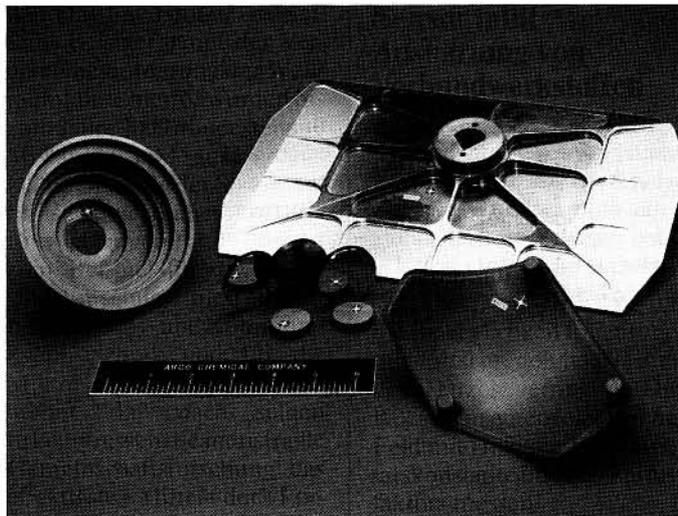
Mit der Entdeckung der Supraleitfähigkeit in speziellen Oxiden ist eine beispiellose Entwicklungsaktivität auf diesem Gebiet ausgelöst worden. Dabei steht zwar die weitere Erhöhung der Sprungtemperatur im Vordergrund, jedoch ist die Entwicklung von Herstellungstechniken von gleicher Bedeutung. Die supraleitfähigen Oxide sind nicht umformbar und können daher bisher noch nicht als Draht oder andere Halbzeugformen hergestellt werden. Eine Möglichkeit zur Herstellung supraleitender Drähte ist gegebenenfalls die Einlagerung der oxidischen Pulver in eine metallische Matrix.

Am Oregon Graduate Center wird derzeit das Explosivverdichtete supraleitfähiger $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Pulver in metallischer Matrix erprobt. Das supraleitfähige keramische Pulver wird in Kupferrohre eingefüllt, die in einem Container aus Kupfer angeordnet werden. Die Zwischenräume zwischen den Kupferrohren werden ebenfalls mit dem keramischen Pulver ausgefüllt [3]. Der gefüllte Container wird in dem Explosivstoff eingebettet. Durch entsprechende Anordnung des Zünders kann die bei Zündung des Explosivstoffes ausgelöste Druckwelle gerichtet werden. Dadurch wird der gewünschte Verdichtungseffekt erzielt.

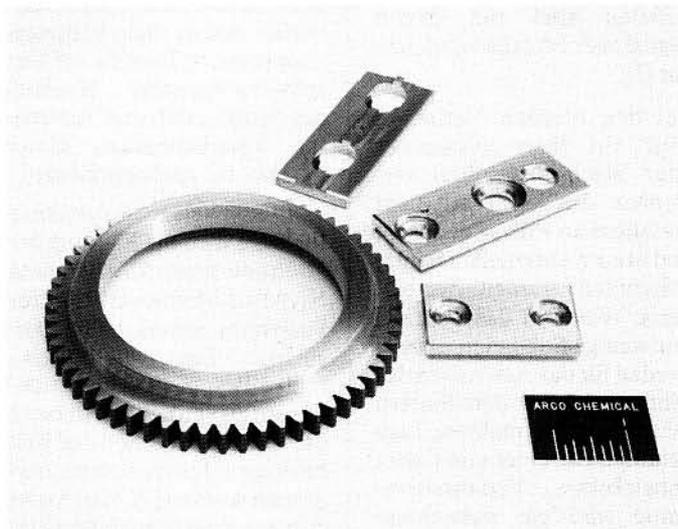
Derartig verdichtete Metall/Keramik-Supraleiterwerkstoffe sollen eine gegenüber anderen Verdichtungs-techniken verbesserte Duktilität aufweisen. Da der Prozeß weitgehend kalt abläuft, finden darüber hinaus keine schädlichen Reaktionen zwischen den Pulvern und den Kupferrohren statt.

Metallische Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe sind laut Definition mikroskopisch



Teile optischer Systeme aus SiC/Al [6]



Zahnrad aus SiC/Mg [6]

heterogene und makroskopisch homogene Werkstoffe, die durch mechanisch-thermisches Zusammenfügen von mindestens zwei Bestandteilen hergestellt wurden. Im allgemeinen gehören ihre Bestandteile oder Phasen nicht einer Werkstoffhauptgruppe an, sondern sind Kombinationen aus metallischen und keramischen, keramischen und polymeren sowie polymeren und metallischen Bestandteilen. Unter **Metallischen Verbundwerkstoffen** versteht man Werkstoffe, bei denen entweder alle Bestandteile metallisch sind oder der überwiegende Bestandteil ein Metall oder eine Legierung ist.

Nach der geometrischen Anordnung der Komponen-

ten im Verbund unterscheidet man:

- Teilchenverbundwerkstoffe,
- Faserverbundwerkstoffe,
- Schichtverbundwerkstoffe.

In Verbundwerkstoffen werden die Eigenschaften der beteiligten Komponenten kombiniert, sodaß diese Werkstoffe Eigenschaftsspektren aufweisen, die in Metallen und Legierungen im allgemeinen nicht gefunden werden. So kann z. B. das niedrige Gewicht von Aluminium mit der hohen Festigkeit von Kohlenstofffasern kombiniert werden, wodurch sich ein Werkstoff ergibt, dessen auf das Gewicht bezogene Festigkeit und Steifigkeit die des Stahles übertrifft.

Welche Bedeutung derartigen Verbundwerkstoffen in den USA beigemessen wird, kann daran abgeschätzt werden, daß ausländische Besucher zu Tagungen zu diesem Thema nicht zugelassen werden und Firmen, die auf speziellen Gebieten metallischer Verbundwerkstoffe arbeiten, ein „Veröffentlichungsverbot“ auferlegt wurde. Im folgenden sollen dennoch einige der bekannten Werkstoffe und deren Anwendung besprochen werden.

Teilchenverbundwerkstoffe

Bei den Teilchenverbundwerkstoffen sind Partikel eines im allgemeinen harten Materials in eine Matrix aus einem weicherem Metall eingebettet. Die Teilchen sind meist Siliziumkarbid, Borkarbid, Aluminiumoxid oder andere keramische Werkstoffe. Als Matrixwerkstoffe kommen Leichtmetalle, Schwermetalle, warmfeste Legierungen u. a. in Frage. Bereits kommerziell erhältlich sind teilchenverstärkte Leichtmetalle, die vor allem im Bereich der Luft- und Raumfahrt Verwendung finden.

Für die Einlagerung der nichtmetallischen Teilchen in die metallische Matrix finden pulvermetallurgische Verfahren sowie einige speziell entwickelte schmelzmetallurgische Sonderverfahren Anwendung. Die Eigenschaften von Teilchenverbundwerkstoffen sind im Gegensatz zu den von Faserverbundwerkstoffen isotrop, d. h. in allen Richtungen gleich. Besonders intensiv wird auf dem Gebiet der SiC/Aluminium-Verbundwerkstoffe gearbeitet. Gegenüber unverstärktem Aluminium zeichnen sich die Verbundwerkstoffe durch folgende Eigenschaften aus:

- höhere Steifigkeit,
- höhere Festigkeit,
- geringere Verschleißneigung,
- bessere Hochtemperatur-eigenschaften,
- beeinflussbare thermische Ausdehnung,

- Dimensionsstabilität,
- vergleichbare Bruchzähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, elektrische und thermische Leitfähigkeit, Umformung.

Gegenüber Stählen sind folgende Eigenschaften erwähnenswert:

- höhere spezifische Steifigkeit,
- höhere spezifische Festigkeit,
- dadurch erhebliche Gewichtseinsparung, bessere Verarbeitbarkeit

Selbst gegenüber Titanlegierungen ergeben sich Vorteile:

- höhere spezifische Steifigkeit,
- vergleichbare spezifische Festigkeit,
- dadurch Gewichtseinsparung,
- einfachere Verarbeitung,
- geringere Kosten.

Bei der Dural Aluminium Composites Corp., einer Alcan-Tochter, werden diese Materialien für hochbeanspruchte Teile in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrttechnik, der Sportgerätechnik und anderer Industriezweige eingesetzt [4]. Als Beispiele seien hier nur die Motorpleuel, Verdichtungsschaufeln und Tennis- bzw. Golfschläger genannt.

Wegen ihrer ausgezeichneten Dimensionsstabilität und der Möglichkeit, den thermischen Ausdehnungskoeffizient an den anderer Werkstoffe anzupassen, werden SiC/Aluminium-Verbundwerkstoffe häufig für hochpräzise optische Systeme eingesetzt [5]. So stellt Arco Instrumentenabdeckungen aus SiC/Al her, die solche aus Beryllium ersetzt haben. Die hohe Verschleißfestigkeit von SiC-teilchenverstärktem Magnesium macht den Einsatz dieses extrem leichten Materials für Zahnräder möglich [6].

Faserverbundwerkstoffe

Wenn im allgemeinen Sprachgebrauch von Faserverbund-

werkstoffen die Rede ist, denkt man meist an die faserverstärkten Kunststoffe, die sich als Konstruktionswerkstoffe im Leichtbau weitgehend durchgesetzt haben. Wesentlich weniger verbreitet sind dagegen die Faserverbundwerkstoffe mit Metallmatrix. Diese geringere Verbreitung ist in erster Linie auf die bedeutend höheren Herstellungskosten zurückzuführen, die sich wiederum durch die Schwierigkeiten bei der Einlagerung nichtmetallischer Fasern in eine metallische Matrix ergeben.

Die Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe ergeben sich in erster Linie aus den Eigenschaften der verwendeten Fasern. Dagegen werden die Eigenschaften metallischer Faserverbundwerkstoffe in weit stärkerem Maße sowohl durch die speziellen mechanischen, physikalischen oder chemischen Eigenschaften der Matrix als auch der Fasern bestimmt. Dazu kommen Haftung, Benetzung und Faser/Matrix-Verträglichkeit. Die Einlagerung von Verstärkungsfasern in eine metallische Matrix bereitet wegen der hohen Temperaturen nach wie vor wesentlich größere Schwierigkeiten als die Einlagerung in Kunststoffe. Faserverstärkte Leichtmetalle besitzen gegenüber faserverstärkten Kunststoffen einige Vorteile:

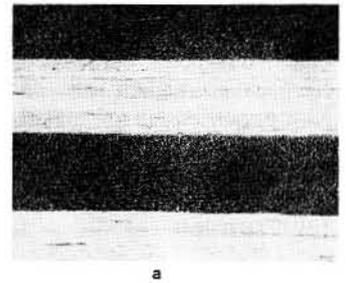
- Temperaturbeständigkeit,
- Löt- und Schweißbarkeit,
- Formbarkeit,
- mechanische Eigenschaften, Schubfestigkeit, Zugfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung, Kerbschlagzähigkeit,
- physikalische Eigenschaften, elektrische und thermische Leitfähigkeit, magnetische Eigenschaften,
- Beständigkeit gegen Umgebungseinflüsse, UV-Strahlung, Feuchtigkeit.

Gegenüber Legierungen weisen faserverstärkte Metalle im allgemeinen bessere Schwing-

festigkeit, höhere Ermüdungsfestigkeit, höhere spezifische mechanische Eigenschaften sowie bessere Dimensionsstabilität auf. Trotz dieser unbestreitbaren Vorteile sind bisher auch in den USA nur wenige Serienbauteile für industrielle Anwendungen auf dem Markt. Im Bereich der (vorwiegend militärischen) Luft- und Raumfahrt finden diese Hochleistungsverbundwerkstoffe dagegen zunehmend Verwendung. So wurden für das Space Shuttle 243 Rohre aus Borfaser-verstärktem Aluminium als Versteifungselemente im mittleren Rumpfstück eingesetzt. Das längste dieser von General Dynamics Convair in 89 unterschiedlichen Konfigurationen hergestellte Rohr war ca. 2.50 Meter lang. Gegenüber der Verwendung von Aluminiumlegierung konnte eine Gewichtseinsparung von 44% erzielt werden [7]. Wegen der geringeren Wärmeleitfähigkeit können darüber hinaus Wärmeschutzeinrichtungen weggelassen werden.

Neben den erwähnten Borfasern werden vor allem Kohlenstoff-, Siliziumcarbid- und Aluminiumoxidfasern für die Verstärkung von Aluminium- und Magnesiumlegierungen für Kantenschutzprofile, Druckbehälter, Kompressorschaukeln, Strukturbauteile etc. eingesetzt. Daneben finden in zunehmendem Maße Siliziumcarbid-Whisker (einkristalline Kurzfasern hoher Festigkeit) Verwendung. Im Bereich kommerzieller Anwendungen stehen Sportgeräte und Motorenbau im Vordergrund. Nachdem Toyota 1982 mit der Produktion von Dieselkolben mit Einsätzen aus faserverstärktem Aluminium begonnen hat, wird an vielen Stellen an ähnlichen Projekten gearbeitet. Inzwischen bieten japanische Hersteller derartige Kolben auf dem amerikanischen Markt zu Preisen an, die deutlich unter denen konventioneller Kolben liegen [8]. Die Produktionsmengen sollen bei ca. 350000 Einheiten pro Jahr liegen.

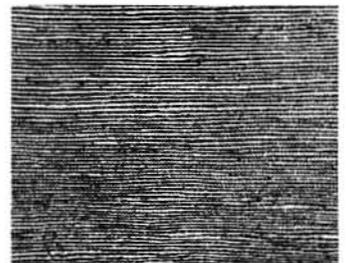
Wie in Deutschland [10], wird auch in den USA an der Entwicklung von Motorpleueln aus faserverstärktem Aluminium gearbeitet. Im wesentlichen finden hierbei SiC-Whisker und Al₂O₃-Fasern als Verstärkungsmaterialien Verwendung.



a



b



c

Schichtverbundwerkstoff aus hoch und niedrig kohlenstoffhaltigen Stählen [11]

Schichtverbundwerkstoffe

Schichtverbundwerkstoffe sind nicht, wie man vielleicht annehmen könnte, Produkte des High Tech-Zeitalters. Schon Jahrhunderte vor Christi Geburt haben findige Waffenschmiede im kleinasiatischen Raum unterschiedliche Eisen- bzw. Stahlsorten zu „Verbundwerkstoffen“ zusammenschmiedet und damit Werkstoffe mit überlegenen Eigenschaften hergestellt. Die Klingen der Wikinger-, Merowinger- und Samuraischwerter sowie der

javanischen Kris' sind weitere Beispiele der Entwicklungsgeschichte metallischer Verbundwerkstoffe [11]. Ähnlich aufgebaute Werkstoffe sind auch heute noch Gegenstand intensiver Entwicklungsarbeit. An der Stanford University wird an Schichtverbundwerkstoffen gearbeitet, die aus abwechselnden Schichten aus niedrig und hoch kohlenstoffhaltigen Stählen bestehen und eine deutlich verbesserte Kerbschlagzähigkeit als die Komponenten aufweisen sollen.

Formgedächtnislegierungen

Wird eine Formgedächtnislegierung (Shape-Memory-Legierung) unterhalb einer bestimmten kritischen Temperatur plastisch verformt, so kann sie bei Temperaturerhöhung wieder in ihre Ausgangsgestalt zurückkehren. Dieses Formgedächtnis ist das Ergebnis einer Phasenumwandlung, die im allgemeinen als reversible, thermoelastische, martensitische Umwandlung bezeichnet wird [12]. Die Gestaltsänderung findet bei einer durch die Legierungszusammensetzung vorbestimmten Umwandlungstemperatur statt. Die wichtigsten Shape-Memory-Legierungen sind die Nickel-Titan-Legierungen, die auch unter den Namen Nitinol oder TinelTM bekannt sind.

Legierungen für Verbindungs- und Befestigungselemente

NiTi-Legierungen zeigen sowohl einen ausgeprägten Formgedächtniseffekt als auch extrem unterschiedliche Festigkeitseigenschaften in der Hochtemperaturphase (Austenit) und der Niedertemperaturphase (Martensit) [14]. Während der Martensit schon bei niedrigen Spannungen verformt werden kann, ist die Festigkeit des Austenits mit der rostfreier Stähle vergleichbar. Diese Tatsache macht man sich bei der Verwendung von Nickel-Titan-Formgedächtnislegierungen für Verbindungs- und Befestigungselemente zunutze. Wird



Wärmeschrumpfende Befestigungsringe aus NiTi

nämlich z. B. ein im martensitischen Zustand aufgeweiteter Ring aus Nickel-Titan daran gehindert, bei Erwärmung über die Umwandlungstemperatur in seine ursprüngliche Gestalt zurückzukehren, so baut er anstelle der Gestaltungsänderung eine erhebliche Kraft auf.

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 kleiner als der Außendurchmesser der zu verbindenden Rohre ist. Da die Legierung nur im austenitischen Zustand die hohe Haltekraft aufweist, muß ihre Zusammensetzung so gewählt werden, daß die Legierung im Anwendungstemperaturbereich austenitisch ist. Bei Verwendung sog. *cryogener Legierungen* (mit Umwandlungstemperaturen um -100°C) wird der Zylinder in flüssigem Stickstoff sowie mechanisch aufgeweitet, bis der Innendurchmesser größer ist als der Rohrdurchmesser. Das aufgeweitete Verbindungselement wird in flüssigem Stickstoff gelagert und transportiert. Zur Montage wird das Element dem Kühlbehälter entnommen und über die Rohrenden geschoben. Bei Erwärmung auf Raumtemperatur schrumpft das Element auf die Rohrenden und verbindet diese druck- und vakuumdicht [13]. Die Lagerung und vor allem der Transport gedehnter Verbindungselemente ist für

kommerzielle Anwendungen zu umständlich und zu teuer. Um diesen Nachteil zu umgehen, wurden Legierungen entwickelt, die zwar bei tiefer Temperatur gedehnt werden müssen, dann aber bei Raumtemperatur gelagert und transportiert werden können. Die Umwandlung von Martensit in Austenit, und damit in die hochfeste Phase, findet bei Temperaturen um 150°C statt. Zur Montage werden Elemente aus solchen Legierungen entweder elektrisch oder durch Heißluft erwärmt. Die wesentliche Eigenschaft dieser neuen Legierungen ist nun, daß der hochfeste Zustand erhalten bleibt, auch wenn die Elemente auf tiefe Temperaturen abgekühlt werden (bis -60°C). Damit ist ein Durchbruch erzielt worden, der dieser Technologie weite Verbreitung ermöglicht.

Verbindungselemente aus Nickel-Titan-Legierungen zeichnen sich durch außergewöhnlich hohe Zuverlässigkeit aus. Von den mehr als eine Million Elementen, die seit 1971 u. a. für das Kampflugzeug F 14 „Tomcat“ von Grumman eingesetzt wurden, wurde kein einziger Schadensfall gemeldet. Für die Befestigung von Abschirmgeflechtem an Steckergehäusen werden Schrumpfringe verwendet, die, elektrisch erwärmt, in fünf bis zehn Sekunden schrumpfen und eine dauerhafte Anpreßverbindung und dadurch hervorragende Abschirmwirkung in einem weiten Temperaturbereich bewirken. Derartige Befestigungselemente werden u. a. auch in der Verkabelung der Triebwerke des neuen Airbus A 320 verwendet.

Superelastische Legierungen

Da die Martensitbildung nicht nur thermisch, sondern auch mechanisch induziert werden kann, weisen spezielle Nickel-Titan-Legierungen den Effekt der sogenannten Superelastizität auf. Gegenüber Stählen können diese Legierungen um den Faktor 10 stärker elastisch verformt werden, wozu darüber hinaus geringere Kräfte

erforderlich sind. Die außergewöhnliche Federcharakteristik erlaubt die Herstellung von Federn, die unabhängig vom Weg konstante Kraft ausüben.

Technisch wird dieser Effekt in großem Umfang bei der Zahnregulierung genutzt. Während orthodontische Bögen aus Stahl oder Chrom-Nickel-Legierungen während der Regulierungsphase wiederholt nachgespannt werden müssen, üben Bögen aus superelastischen NiTi-Legierungen immer eine nahezu konstante Kraft aus und müssen somit nicht nachgespannt werden. Dies hat eine deutliche Verkürzung der Behandlungsdauer zur Folge.

Eine weitere Anwendung des Superelastizitätseffektes in der Medizintechnik sind Operationshaken, die zu Markierungszwecken verwendet werden. Ein ursprünglich gebogener NiTi-Draht wird in eine Hohnadel eingezogen und damit gestreckt. Wird z. B. bei der Mammographie ein Tumor entdeckt, kann die Nadel während der Beobachtung am Röntgenschirm exakt platziert werden. Der Draht wird sodann aus der Nadel geschoben, wobei er in seine ursprüngliche Gestalt zurückkehrt und sich somit in dem Tumor verankert. Bei der anschließenden Operation folgt der Chirurg dem Draht und entfernt den damit lokalisierten Tumor. Die Operation wird damit wesentlich vereinfacht.

Literatur:

- [1] E. J. Kubel, Met. Progr. 132 Sept. (1987) 52
- [2] C. F. Lewis, Mat. Eng. 104 Jan. (1987) 32
- [3] L. E. Murr, A. W. Hare, N. G. Eror, Met. Progr. 132 Okt. (1987) 36
- [4] Firmenschrift DuralTM
- [5] W. R. Mohn, Res. and Dev. Juli (1987)
- [6] Firmenschrift Arco
- [7] R. B. Aronson, Mach. Des. Aug. (1985)
- [8] C. F. Lewis, Mat. Eng. 103 Mai (1986) 33
- [9] NN, Met. Progr. 131 Jan. (1986) 6
- [10] G. Ibe, J. Penkava, Metall 41 (1987) 590
- [11] J. Wadsworth, D. W. Kum, O. D. Sherby, Met. Progr. 131 Juni (1986)
- [12] D. Stöckel, Metall 41 (1987) 494
- [13] D. Stöckel, KEM Juni (1987) 22