

Al-Scandium-Lösungen für Druckbehälter

Von Jonas Eriksson, Johannes Winklhofer, Michael Schwarz, Dmitry Ryabov, Dror Shaked

Moderne ökologische und umweltfreundliche Trends im Transportwesen führen zur Notwendigkeit, Leichtbau-Lösungen mit möglichst geringen Emissionen zu schaffen. Dies macht es für die Konstrukteure notwendig, neue Lösungen auf dem Gebiet der Materialwissenschaft und -technologie zu erproben.

Aluminiumlegierungen werden als Konstruktionswerkstoffe immer beliebter, denn sie zeichnen sich durch eine geringe Dichte, hohe Korrosionsbeständigkeit und gute Festigkeit aus. Unter den verschiedenen Arten von Aluminiumlegierungen weisen Al-Mg-Systeme einige herausragende Eigenschaften auf, die zu einem breiten Anwendungsspektrum führen, das von Getränkedosen bis hin zum Fahrzeugbau reicht. Diese Legierungen erfordern keine Wärmebehandlung mit anschließendem Abschrecken, um ausreichende Festigkeiten zu erreichen. Das erleichtert ihre Herstellung; außerdem sind diese Legierungen sehr gut schweißbar. Die Festigkeitseigenschaften von Al-Mg-Legierungen sind jedoch selbst bei hoher Magnesiumkonzentration von bis zu fünf Prozent eher mäßig. Deshalb gibt es eine starke Nachfrage nach der Entwicklung und Einführung neuer Legierungssysteme. Diese sollen verbesserte Festigkeitseigenschaften bei mindestens gleicher Korrosionsbeständigkeit und Schweißbarkeit im Vergleich zu traditionellen Al-Mg-Legierungen aufweisen.

Modifikation mit Scandium

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Festigkeitseigenschaften zu erhöhen, wie zum Beispiel durch Einsatz von zusätzlichen Legierungsbestandteilen oder durch die Entwicklung alternativer thermomechanischer Verfahren für bestehende oder neue Legierungen. Dabei ist die Modifikation von Aluminiumlegierungen mit Scandium eine Möglichkeit. Scandium steht unter der Vielzahl an festigkeitssteigernden Legierungselementen an vorderster Stelle. Es ist eines der wirksamsten Modifizierungsmittel, und wie systematische Studien gezeigt haben, können selbst kleine Zusätze von Scandium in Al-Legierungen eine erhebliche Verbesserung bewirken. Dieser Effekt beruht auf der Fähigkeit von Scandium, eine gemeinsame intermetallische Verbindung mit Aluminium zu bilden, die eine dem Aluminiumgitter ähnliche L12-Gitterstruktur aufweist. Dies ermöglicht den Dispersoiden, mit der Aluminiummatrix kohärent zu sein. Darüber hinaus können sich andere Elemente wie Zirkonium oder Yttrium in der Phase lösen und ternäre Phasen mit Aluminium und Scandium bilden, die die gleiche Gitterstruktur und eine höhere thermische Stabilität als reines Al₃Sc aufweisen. Es ist hervorzuheben, dass kleine Anteile von Sc die Korrosionseigenschaften nicht beeinträchtigen und sich positiv auf die Festigkeit von Schweißverbindungen auswirken, was für die Anwendung im Fahrzeugbau entscheidend ist. Ein positiver Effekt wurde bereits in den 1970er Jahren in US-Patenten beschrieben, allerdings machte der damals sehr hohe Sc-Preis alle Vorteile zunichte. Ein neuer Schritt in der Entwicklung von Al-Sc-Legierungen in den 1980er Jahren führte zur Entwicklung



mehrerer Zusammensetzungen auf Grundlage des Al-Mg-Sc-Systems mit etwa 0,3 Prozent Sc. Diese Legierungen wurden erfolgreich für einige Raumfahrtprogramme eingesetzt. Der Rest der Industrie konnte sie wegen des hohen Preises der Produkte noch nicht verwenden. Danach gab es mehrere erfolgreiche Versuche, schaltige Legierungen in der Luftfahrt zu verwenden, angeführt von Airbus und Alaris. Der hohe Sc-Gehalt verhinderte jedoch immer noch eine Anwendung auf breiterer Basis. In den letzten Jahren hat die Industrie intensive Forschung auf dem Gebiet Sc und Sc-haltige Aluminiumlegierungen durchgeführt, die zur Entwicklung komplexer Wertschöpfungsketten und entsprechender Technologien für die Extraktion Sc-haltiger Produkte aus Rotschlamm, sowie deren Behandlung und Veredelung zu neuen Vorlegierungen geführt haben.

Optimierte Strukturen, Effizienz und Ökologie

Der Schlüsselgedanke für das gesamte Sc-Ökosystem ist die Bereitstellung von marktfreundlichen Lösungen für die Anwendung von Aluminium in verschiedenen Industrien zur Optimierung von Aluminiumstrukturen und maximaler Effizienz in Verbindung mit ökologischen Vorteilen. Der Fokus der Strategie liegt bei der Entwicklung und Einführung von Sc-haltigen Endprodukten mit geringem Sc-Gehalt. Trotz der Einführung verschiedener industrieller Technologien zur Auslaugung und Behandlung von Sc ist dieses Element immer noch teurer als die traditionell verwendeten. Aus diesem Grund wurden neue Legierungen entwickelt, die im Vergleich zu den bestehenden Lösungen einen deutlich geringeren Sc-Gehalt aufweisen. Darunter sind zwei entwickelte Legierungen, die als 5081 und 5181 bezeichnet wurden. Bei beiden handelt es sich um Al-Mg-Legierungen mit einem hohen Mg-Gehalt (etwa fünf Prozent) und einem Sc-Gehalt von 0,1 Prozent in der Legierung 5081 und 0,03 Prozent in der Legierung 5181.

Für die Transport- und Schiffsindustrie ist 5181 derzeit aufgrund des moderaten Preises und der verbesserten Eigenschaften von Interesse. Selbst 0,03 Prozent Sc, in Verbindung mit einigen komplexen Additiven und speziell entwickelten Behandlungsparametern, können in Al-Mg-Zusammensetzungen Vorteile bringen. Metallurgisch und produktionstechnisch gibt es bei 5181 im Vergleich zu konventionellen Al-Mg-Legierungen keine signifikanten Unterschiede. Lediglich beim Gießen und bei den Walzparametern sollten geringfügige Änderungen vorgenommen werden, damit das Material erfolgreich in der Produktion eingesetzt werden kann. Die Legierung wurde für Schiffsanwendungen zugelassen, da

sie ein ähnliches Korrosionsverhalten wie 5083 und vergleichbare maritime Aluminiumsorten aufweist.

Anwendungen im Automobilbereich

Abgesehen von maritimen Anwendungen stellen Luftdrucktanks für Kraftfahrzeuge, die heute aus Stahl oder Aluminium hergestellt werden, eine weitere potenzielle Anwendung dar. Aluminium hat immer noch einen großen Gewichtsvorteil gegenüber Stahl und die Anwendung fortschrittlicher hochfester Aluminiumlegierungen kann eine noch höhere Gewichtseffizienz ermöglichen. Als Referenzlegierung wird 5042 im Zustand H111 mit 3,5 Prozent Mg verwendet. Diese Legierung weist eine gute Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit auf. Derzeit werden für Luftdruckbehälter Flachprodukte mit Wandstärken von circa zwei Millimetern eingesetzt. Für 5081 wurde der Härtegrad H22 gewählt, der einen guten Kompromiss zwischen hoher Streckgrenze und ausreichender Bruchdehnung aufweist. Typische mechanische Kennwerte für beide Legierungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die vorteilhaften mechanischen Kennwerte von 5181 H22 ermöglichen eine Reduktion der Blechstärke auf 1,5 Millimeter. Das entspricht einer Gewichtsreduktion um circa 25 Prozent. Versuche zeigten, dass der Werkstoff mit einem Standard-Tiefziehverfahren mit Stempeldurchmessern von 200 Millimetern umgeformt werden kann. Aufgrund des hohen Mg-Gehalts und der hohen Festigkeit ist die Umformbarkeit von 5181 im Vergleich zu 5042 jedoch deutlich geringer. Die experimentell ermittelte Grenzformänderungskurve liegt deutlich unter der von 5042. Folglich ist das Tiefziehen möglich, allerdings nur für weniger komplexe Formen. Für die Herstellung von Luftdruckbehältern mit 5181 bedeutet dies, dass nur flache Böden gezogen werden können, was weniger effizient ist (siehe Abbildung 1a). Der Mangel an Umformbarkeit kann jedoch durch einen verlängerten Mantel kompensiert werden, der an seinen Verbindungsstellen mit den tiefgezogenen

Endkappen zweimal rundgeschweißt werden muss (siehe Abbildung 1b). Diese Art der Konstruktion setzt eine hohe Schweißeffizienz voraus. Die Prototypen wurden wie folgt hergestellt und untersucht: Aus den Tanks wurden Proben geschnitten, und im Lichtmikroskop die Mikrostruktur analysiert. Das Vorhandensein von Sc und anderen Zusätzen in 5181 führt nach dem Gießen zu einer sehr feinen, teilweise nicht rekristallisierten Struktur, was wiederum gute Festigkeitseigenschaften nach sich zieht. Zum Schweißen wurde der Schweißdraht der Legierung 5183 verwendet. Dieser wird standardmäßig für 5xxx-Aluminiumlegierungen eingesetzt. Die Schweißnaht weist keine Porosität und nur sehr geringe Auswirkungen auf die Korngröße in der Wärmeinflusszone auf. Dies deutet auf eine hohe Schweißnahtqualität hin. Zugversuche zeigen Festigkeitswerte von bis zu 91 Prozent des Grundmaterials. Das Schweißnahtmaterial weist eine Korngröße von weniger als 110 Mikrometern auf. Die Verwendung von Draht mit Kornfeinern könnte die Korngröße um die Hälfte reduzieren. Neben den mikrostrukturellen Untersuchungen ist die Korrosionsprüfung kritisch für diese Anwendung. Diese wird anhand der Norm ASTM G67 durchgeführt, die die Gewichtsverlustmessung für die Bewertung der Korrosionsbeständigkeit beschreibt. Es wurden Proben aus verschiedenen Bereichen des Behälters entnommen, da das Material während des Formungsprozesses an einigen Stellen stark verformt wird, was sich auf das Korrosionsverhalten auswirken kann. Nach der Umformung und dem Schweißen weist das Material in jeder der analysierten Zonen niedrige Werte des Gewichtsverlusts von unter 2,5 Milligramm pro Quadratzentimeter auf. Des Weiteren wurden Sensibilisierungsbehandlungen bei drei verschiedenen Temperaturen durchgeführt: 190 Grad Celsius für 45 Minuten, 80 Grad Celsius für 200 Stunden und 130 Grad Celsius für 17 Stunden. Nach der Sensibilisierung bei 190 und 80 Grad Celsius wurde ein Anstieg des

Gewichtsverlusts auf bis zu fünf Milligramm pro Quadratzentimeter an den Seitenwänden festgestellt. Am restlichen Behälter konnte kein Anstieg festgestellt werden. Nach 130 Grad Celsius und 17 Stunden zeigen die verformten Zonen einen erhöhten Wert von bis zu 20 Milligramm pro Quadratzentimeter. Dieses Ergebnis zeigt, dass auch Legierungen mit hohem Mg-Gehalt für Automobilanwendungen verwendet werden können. Mit einer weiteren Kontrolle der Wärmebehandlung und des Verformungsgrades könnte die Anwendung erweitert werden.

Vergleichende Untersuchungen bringen Sicherheit

Die Ermüdungseigenschaften des Materials wurden durch zyklische Druckprüfung des Behälters mit 200.000 Lastwechseln von Nenndruck bis zum maximalen Arbeitsdruck untersucht. Da bei der Legierung 5181 reduzierte Wandstärken verwendet wurden, ist es notwendig, eine vergleichende Untersuchung mit der konventionellen Legierung und den Standardwandstärken des Druckbehälters durchzuführen. Die grundlegenden Parameter des Tanks sind in Tabelle 2 für die untersuchte Legierung 5181 und die Standardgüte 5042 aufgeführt.

Die Korngröße könnte reduziert werden

Da die Legierung 5181 annähernd die gleiche Dichte wie 5042 hat, ist das Endgewicht des Tanks um 0,4 Kilogramm geringer, was einer Reduktion um 25 Prozent entspricht. Sc-haltige Legierungen haben eine höhere Festigkeit, selbst bei einem geringen Anteil von nur 0,03 Prozent. Unter Berücksichtigung des geringeren Sc-Materialanteils und der Gewichtsersparnis ist der Preis für den neuen Tank mit 5181 im Vergleich zur konventionellen Konstruktion mit 5042 vergleichbar. Das bedeutet, dass der Kunde das Produkt mit einem geringeren Gewicht bei gleicher Leistung und gleichem Preis erhält.

Neue Aluminiumlegierungen bieten klare Vorteile

In einem weiteren Schritt wird an der Optimierung der Legierung gearbeitet, um eine neue Konstruktion des Tanks zu ermöglichen, die aus lediglich zwei geformten Blechteilen mit nur einer Rundschweißnaht besteht. Es ist deutlich zu erkennen, dass Sc-haltige Aluminiumlegierungen allmählich attraktiver für den Markt werden, da selbst kleine Anteile des Bestandteils mehrere Vorteile bei einem moderaten Preisanstieg mit sich bringen. Lösungen mit hohem Sc-Gehalt, die sich in der Raumfahrt bewährt haben, können für allgemeinere und breitere Anwendungen modifiziert werden. Der nächste Schritt ist die Schaffung einer großtechnischen Produktion von Sc aus Rotschlamm, die eine weitere Preissenkung ermöglicht. Sobald der Preis für Scandium dem von Zirkonium (Zr) entspricht, wird dies eine neue Ära des Aluminiums als Konstruktionswerkstoff einläuten. Schon jetzt ist man in der Lage, dem Markt neue Lösungen auf Sc-Basis für das Transportwesen zu präsentieren, die auch auf ein Wachstumspotenzial in weiteren Branchen schließen lassen.

Info: www.sag.at

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von 5042- und 5181-Aluminiumblechen (in Längsrichtung)

	5042-H111	5181-H22
Zugfestigkeit R _m	240 MPa	330 MPa
Streckgrenze R _{p0,2}	120 MPa	200 MPa
Dehnung	18 %	18 %

Tabelle 2: Spezifikationen der Tanks, die mit den Al-Legierungen 5181 und 5042 hergestellt wurde

5181-H22	Parameter	5042-H111
10 dm ³	Volumen	10 dm ³
20 bar	max. Druck	20 bar
1,5 mm	Blechdicke	2,3 mm
1,3 kg	Gewicht	1,7 kg
600 mm	Länge	600 mm
200 mm	Durchmesser	200 mm