

Bericht

AiF-Nr. 12.934 BG
DVS-Nr. 1.029

Erarbeiten werkstoffkundlicher Kennwerte geschweißter Aluminiumbauteile in Abhängigkeit von der Wärmeeinbringung

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung unserer Urheberschaft veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München, Niederlassung der GSI mbH, sowie der SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH, Rostock.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Zielstellung	6
3	Vorgehensweise.....	6
4	Experimentelle Randbedingungen und verwendete Geräte	8
4.1	MIG - Verfahren	8
4.1.1	Stromquelle	8
4.1.2	Brennerführung und Bauteilfixierung	9
4.1.3	Gas und Gasgemische	9
4.1.4	Messwerterfassung	10
4.2	WIG - Verfahren	10
4.2.1	Stromquelle	10
4.2.2	Brennerführung und Bauteilfixierung	10
4.2.3	Gas und Gasgemische	11
4.3	Geräte zur Ermittlung der mechanischen und wärmephysikalischen Kennwerte ..	11
4.4	Versuchswerkstoffe	12
4.5	Probenvorbereitung.....	13
4.6	Werkstoffkundliche Untersuchungen.....	13
4.7	Umsetzung der Ergebnisse auf Praxisanwendungen.....	14
5	Ergebnisdarstellung	15
5.1	Allgemeines zu den MIG-/WIG-Schweißungen	15
5.2	MIG – Verfahren.....	15
5.2.1	Zusatzwerkstoff AlMg5 und Schutzgas Ar	15
5.2.2	Zusatzwerkstoff AlSi5 und Schutzgas Ar	16
5.2.3	Zusatzwerkstoff AlSi5 und Schutzgas Ar/He	16
5.3	WIG – Verfahren	17
5.3.1	Wechselstrom (AC) mit Zusatzwerkstoff AlSi5 und Schutzgas Ar	17
5.3.2	Gleichstrom (DC) mit Zusatzwerkstoff AlSi5 und Schutzgas He.....	18
5.4	Gefüge und Härte am Grundwerkstoff und bei einfacher Schweißsimulation	18
5.5	Gefüge und Härte nach Schweißsimulation mit Variante 1 und Variante 2.....	19
5.6	E-Modul und Fließspannung	20
5.7	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	21

5.8	Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität.....	22
6	Diskussion.....	23
6.1	MIG-/WIG-Schweißungen	23
6.2	Temperaturabhängigkeit von Gefüge und Ausscheidungen	24
6.3	Temperaturabhängigkeit der untersuchten mechanischen Kennwerte	24
6.3.1	Härte.....	24
6.3.2	E-Modul	25
6.3.3	Fließspannung k_f	26
6.4	Temperaturabhängigkeit der untersuchten wärmephysikalischen Kennwerte	28
6.4.1	Thermischer Ausdehnungskoeffizient.....	28
6.4.2	Spezifische Wärmekapazität	29
6.4.3	Wärmeleitfähigkeit	29
6.4.4	Temperaturleitfähigkeit	30
7	Testrechnung mit SYSWELD	31
8	Zusammenfassung.....	32
9	Schrifttum	35
10	Anhang.....	37
10.1	Tabellen	37
10.2	Bilder	56

1 Einleitung

Aluminiumwerkstoffe sind gut spanlos und spanend bearbeitbar und weisen ein sehr günstiges Verhältnis von Dichte zu Festigkeit auf. Aus Sicht des Umweltschutzes überzeugt der Werkstoff durch gute Korrosionsbeständigkeit und seine hervorragenden Recyclingeigenschaften. Geschweißte Konstruktionen und Bauteile aus Aluminiumwerkstoffen sind daher in nahezu allen Bereichen der Technik zu finden. Das Spektrum reicht vom Schiffbau über Baugerüste, Brückenbau, Karosseriebau bis hin zu Strukturbauteilen der Luft- und Raumfahrt. Bei der schweißtechnischen Anwendung kommen alle gängigen Verfahren zum Einsatz.

Die Umsetzung einer Produktidee in ein fertiges Bauteil stellt höchste Anforderungen an die ausführenden Firmen. Aluminium ändert seine Werkstoffeigenschaften in hoher Abhängigkeit von der Bauteilerwärmung im Fügeprozess (z. B. durch Schweißen). Kaltverfestigte oder ausgehärtete Aluminiumhalbzeuge erleiden durch den Schmelzschweißprozess einen Abfall der Festigkeitseigenschaften in der Wärmeeinflusszone (WEZ) bis zu 50 % vom Ausgangswert. Im gängigen Regelwerk (DIN 4113) sind für die konstruktive Auslegung geschweißter Aluminiumbauteile daher nur die Festigkeitseigenschaften des weichen Ausgangszustandes zulässig, unabhängig von den tatsächlich vorhandenen Festigkeitswerten.

In zunehmenden Maße gewinnt die Simulation von Fertigungsprozessen in der Entwicklung und Konstruktion an Bedeutung. Um die Schweißprozesse in ihrer Auswirkung auf den Werkstoff mit ausreichender Genauigkeit simulieren zu können, sind Kenntnisse der mechanischen Eigenschaften und der Ausdehnung der WEZ nicht nur bei Raumtemperatur, sondern auch bei erhöhten Temperaturen erforderlich. Hierzu ist derzeit die vorhandene Datenmenge sehr begrenzt. Zum Werkstoffzustand, Art der Gefügeumwandlung, Phasenbildung und Grad der Entfestigung in Abhängigkeit von der Wärmeeinbringung finden sich bisher keine zusammenhängenden Angaben in der Literatur. Die zu erarbeitenden Daten sind nicht nur die Voraussetzung für eine erfolgreiche Simulation, sondern können auch dazu verwendet werden, dass bei der Auslegung von Aluminiumkonstruktionen gegebenenfalls höhere mechanische Gütewerte zugelassen werden können.

Das Schweißen in hoch belasteten Zonen des Bauteils kann oftmals nicht vermieden werden. Für die mechanische, wie konstruktive Auslegung von Bauteilen ist daher die Kenntnis der Größe der WEZ in Abhängigkeit von der Wärmeeinbringung und die zu erwartende strukturelle Schwächung des Bauteils durch Phasenbildung und Gefügeumwandlungen von großer Wichtigkeit. Die „metallurgische Kerbe“ am Übergang der WEZ zum unbeeinflussten Grundwerkstoff fällt geometrisch nicht mit der Schweißnaht zusammen. Je nach Schweißverfahren, Streckenenergie und Wärmeableitungsbedingungen ergeben sich unterschiedliche Abmessungen der WEZ. Die Beeinflussung der mechanischen Gütewerte durch die Wärme erfordern eine genaue Kenntnis der Werkstoffbeeinflussung durch die gängigen Schweißprozesse, um den der Konstruktion und dem Werkstoff gerechtwerdenden Schweißprozess sowie zuordenbare Schweißparameter auszuwählen oder schweißgerecht konstruieren zu können.

Zur Simulation stehen geeignete Software-Werkzeuge zur Verfügung, die eine Darstellung der Temperatur- und Wärmemengenverteilung unterschiedlicher Schweißverfahren bzw. Arbeitsbedingungen im Bauteil ermöglichen.

Das alleine reicht aber nicht aus, um über Simulation das Bauteilverhalten z. B. auch bezüglich Verzug vorhersagen zu können. Hierzu sind die mechanischen Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit des Zeit- und Temperaturverhaltens erforderlich. Da diese Werte im allgemeinen nicht bekannt sind, sind die Erfolge der Simulation von Schweißverfahren und deren Auswirkungen auf das Bauteil für die Praxis nicht ausreichend. Um den Anforderungen der Praxis gerecht werden zu können, sind die entsprechenden Werkstoffkennwerte bei erhöhten Temperaturen zu erarbeiten.

Technische Aluminiumwerkstoffe sind als Vielkristall aus Kristalliten aufgebaut. Dieser kristalline Aufbau bildet zusammen mit den Kristallfehlern die Grundlage für nahezu alle Eigenschaften. Alle technischen Aluminiumwerkstoffe kristallisieren im kubisch flächenzentrierten Gitter.

Eine Reihe von Eigenschaften sind (nahezu) unverändert, andere (z.B. der Elastizitätsmodul oder die spezifische Wärme) nur wenig von Störungen im Gitteraufbau abhängig, wieder andere (z. B. die Festigkeit oder die elektrische Leitfähigkeit) reagieren z. T. sehr empfindlich auf das Vorhandensein solcher Störungen.

Fast alle technisch wichtigen Eigenschaften gehören zur letzten Gruppe und werden weitgehend von Gitterbaufehlern, Größe und Verteilung der Kristallkörner des Mischkristalls sowie Art, Größe und Verteilung von weiteren Phasen beeinflusst /1/.

Aus dieser Tatsache wird deutlich, dass eine genaue Erkenntnis der Temperatur-Abkühlgeschwindigkeit für verschiedene Schweißverfahren (Wärmeeinbringung) wichtig für eine sichere Abschätzung der technisch wichtigen Eigenschaften ist.

Auf Grund der Temperatureinwirkung können Gefügeänderungen auftreten. Das eigentliche Nahtgefüge hat Gussstruktur und weicht bei Knetwerkstoffen immer vom Gefüge des Fügeites ab; es wird im Zusammenhang mit der Dauerfestigkeit auch als „metallurgische Kerbe“ bezeichnet /1/.

8 Zusammenfassung

In Teil „MIG-/WIG-Schweißungen“ des Gemeinschaftsprojektes werden die Abkühlgeschwindigkeiten während des Schweißens in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie, Legierung, Bauteildicke und dem Schweißverfahren (MIG bzw. WIG) ermittelt.

Hierzu wurde eine Messautomation entwickelt, in der acht Thermoelemente in Abständen von 5 mm quer zur Nahrichtung auf der Grundwerkstoffunterseite den Temperaturverlauf während des Schweißprozesses kontinuierlich messen.

Beim MIG-Schweißen sind die Abkühlzeiten sehr gering. Die Abkühlung von 500 auf 200 °C verläuft in einem Zeitraum von minimal 7 bis maximal 15 s ab. Bei Änderungen des Zusatzwerkstoffes bzw. des Gases treten keine signifikanten Unterschiede im Abkühlverhalten auf. Aus schweißtechnischer Sicht ändern sich dagegen die Schweißparameterinstellungen und das Einbrandprofil erheblich.

Der WIG-Schweißprozess übt auf Grund seiner sehr langsamen Prozessgeschwindigkeit einen starken Einfluss auf das Abkühlverhalten aus. Es wurden Abkühlzeiten bis zu 160 s gemessen. Ebenso erstaunlich ist der starke Einfluss der Probengeometrie. Während bei T-Stößen bis zu 160 s gemessen wurden, steht der Überlappstoß mit der gleichen Legierung und Blechdicke mit nur 80 s gegenüber. Nimmt man noch die Streckenenergie von 1500 J/mm für den T-Stoß und etwa 1650 J/mm für die Überlappnaht als Vergleich hinzu, wird dieser Unterschied noch deutlicher.

Die in diesem Bericht dargestellten und diskutierten Ergebnisse zu den temperaturabhängig gemessenen mechanischen und wärmephysikalischen Kennwerten von Al-Legierungen waren für alle Al-Verarbeiter und FEM-Benutzer sehr wichtig. Ausgangspunkt war der Mangel an ausreichend sicheren Messwerten bzw. das grundsätzliche Fehlen von Messwerten für den durch Schweißwärme beeinflussten Nebennahtbereich. Derartige Daten sind in keiner kommerziell erhältlichen Datenbank vorhanden. Dort findet man lediglich ausgewählte Untersuchungen am reinen Grundwerkstoff (verschiedene Legierungen, Prüftemperaturen und Eigenschaften, aus unterschiedlichsten Quellen zusammengetragen).

Natürlich konnte auch im Rahmen dieses Vorhabens – bedingt durch vorhandenes Material, Zeit und zur Verfügung gestellte Finanzen – nur ein sehr kleiner Ausschnitt aus der gesamten Problematik der möglichen Werkstoffpalette der Al-Legierungen und der FEM-Berechnungen mit Hilfe temperaturabhängiger Werkstoffdaten betrachtet werden. Die durchführbare Anzahl an Versuchen und damit auch die Anzahl möglicher Variationen von wichtigen Einflussgrößen musste begrenzt bleiben. Schon aus diesem Grund sollte an eine Fortsetzung der Untersuchungen gedacht werden.

Auf Anraten des projektbegleitenden Ausschusses wurde kurzfristig eine Erweiterung des ursprünglichen Versuchsplanes vorgenommen. Statt der ausschließlichen Berücksichtigung verschiedener Prüftemperaturen wurden auch die Ziehgeschwindigkeiten beim Zugversuch variiert. Neben E-Modul und Fließspannung wurden zusätzlich die Spannung-Dehnung-Kurven dargestellt.

Letztlich muss festgestellt werden, dass die Anzahl der durchgeführten Versuche, obwohl schon größer als im Vorhaben geplant, zu gering war. Die vorgelegten Ergebnisse zu Härte, E-Modul, Fließgrenze, thermischem Ausdehnungskoeffizienten, Wärme- und Temperaturleitfähigkeit sowie spezifischer Wärmekapazität sollten deshalb als erste Erweiterung der vorhandenen Datenbanken eingestuft werden, die durch weitere gleichartige Versuche zu untersetzen, zu vertiefen, zu erweitern sind (z.B. durch weitere Dehngeschwindigkeiten und geringere Hubwege beim Warmzugversuch; z.B. durch Berücksichtigung des Einflusses infolge Schweißens bei der Messung der wärmephysikalischen Daten mittels LFA- und DSC-Technik, was die Entnahme der dazu erforderlichen Proben aus realen Schweißungen an dickeren als hier untersuchten Blechen erfordert; z.B. durch Nutzung von berührungsloser Lasertechnik bei der Aufnahme von Längs- und Querdehnung, um die Genauigkeit der Ergebnisse im Warmzugversuch zu erhöhen; z.B. durch Erfassung der Querkontraktion an den Proben im Warmzugversuch).

Mit den erzielten Ergebnissen der Forschungsarbeit sind gute Voraussetzungen gegeben, die Materialdatenbanken von Simulationsprogrammen zu erweitern bzw. auch zu korrigieren und dem Anwender Anhaltspunkte bzgl. Abkühlgeschwindigkeit und Ausdehnung des Temperaturfeldes für den zu programmierenden Energieeintrag an die Hand zu geben.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS unterstützt. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit.

Unser Dank richtet sich auch an folgende Firmen für die Unterstützung der Forschungsarbeit: Alcan AG (Singen/ Hohentwiel), Drahtwerk Elisental (Neuenrade), Peri GmbH (Weißhorn), DaimlerChrysler AG (Stuttgart) und an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.

München, Oktober 2003

Prof. Dr.-Ing. D. Böhme

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. Peter Seyffarth