

Schweißverbindungen von Stahl mit Aluminium – eine Perspektive für die Zukunft

N. Jank, H. Staufer und J. Bruckner

Neue Schweißverfahren zum Verbinden von Stahl mit Aluminium werden vorgestellt. Die Mechanismen zur Bildung der intermetallischen Phasen vom Typ Fe_xAl_y werden erklärt und die Auswirkung ihrer Morphologie auf die mechanischen Eigenschaften diskutiert. Mechanische Tests sowie metallographische Untersuchungen dienen dabei zur Charakterisierung der Verbindung und zur Bestimmung der Festigkeit. Ein Ausblick auf die Zukunft zeigt die Bedeutung der Gewichtseinsparung im Automobilbau im Hinblick auf Umweltschutz und Schonung der Ressourcen.

Welded Joints of Steel with Aluminium – an Outlook for the Future. New welding processes to join steel with aluminium are introduced. The mechanisms of intermetallic Fe_xAl_y phase formation are explained, the effects of phase morphology regarding the mechanical properties are discussed. Mechanical tests as well as metallographic researches serve for characterization of joint quality and determination of strength. A preview points at the importance of weight reduction in answer to environmental protection and conservation of natural resources.

1. Einleitung

Lange Zeit hindurch galt das Verbinden von Stahl mit Aluminium durch Schweißen als unmöglich, zu groß schienen die Unterschiede hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften dieser beiden Werkstoffe. Heute können Stahl und Aluminium durch eine sogenannte Schweißlötung – das Aluminium wird aufgeschmolzen, die Schmelztemperatur des Stahls wird hingegen nicht erreicht – miteinander verbunden werden, die sorgfältige Wahl der Zusatzwerkstoffe sowie die Möglichkeit, die Wärmezufuhr beim Schweißen zu steuern und dadurch so gering wie möglich zu halten, haben diesen Fortschritt möglich gemacht.

Gleichzeitig werden Leichtbau und Materialmix in vielen Bereichen unseres Lebens immer wichtiger; die Forderung nach Treibstoffeinsparung im Transportwesen auf Grund von Gewichtsreduzierung – einerseits aus wirtschaftlichen Überlegungen, andererseits aus Motiven des Umweltschutzes – sei hier nur als Beispiel genannt.

2. Verbinden von Stahl mit Aluminium

Die Schwierigkeiten beim Verbinden von Stahl mit Aluminium durch Schweißen liegen – unabhängig vom

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Eisen und Aluminium¹¹

	Eisen	Aluminium	
Dichte	7,86	2,7	g/cm ³
Elektrische Leitfähigkeit (20 °C)	10	37	m/(Ω ·mm ²)
Wärmeleitfähigkeit (0–100 °C)	0,67	2,09	J/(cm·s·K)
Wärmeausdehnung (0–100 °C)	12	24	10 ⁻⁶ ·m/(m·K)
Schmelztemperatur	1536	660	°C

verwendeten Schweißverfahren – einerseits in den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften wie Schmelztemperatur, elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, Wärmeausdehnung (siehe Tabelle 1), sowie andererseits in der Bildung von spröden, intermetallischen Phasen. Intermetallische Phasen besitzen ein eigenständiges, meist recht kompliziert aufgebautes Raumgitter; auf Grund der eingeschränkten Möglichkeit zur Versetzungsbewegung sind sie kaum verformungsfähig.

Ursache für die Bildung dieser intermetallischen Phasen ist die (nahezu) vollkommene Unlöslichkeit von Eisen und Aluminium in festem Zustand¹. Es gibt keine Möglichkeit, die Bildung der intermetallischen Phasen bei der Verbindungsbildung zu verhindern, z. B. durch Verwendung von metallischen Beschichtungen, denn ein Metall, das sowohl in Eisen als auch in Aluminium vollkommen löslich ist (in festem Zustand), gibt es nicht². Die Dicke der intermetallischen Phase sollte dabei geringer als zehn Mikrometer sein, um eine zuverlässige Schweißverbindung mit guten mechanischen Eigenschaften (hohe Scherzugfestigkeit, hohe Dauerfestigkeit) zu gewährleisten³.

Dipl.-Ing. Nasrin Jank, Dipl.-Ing. Dr. techn. H. Staufer, beide: Fronius International GmbH, Forschung und Entwicklung Prozesstechnik, Günter-Fronius-Straße 1, 4600 Wels-Thalheim / Österreich; *Dipl.-Ing. J. Bruckner*, Fronius International GmbH, Global Customer Management, Buxbaumstraße 2, 4600 Wels / Österreich.

Tabelle 2: Eigenschaften der intermetallischen Phasen des Typs Fe_xAl_y ⁶

Verbindung	Al-Gehalt [at.-%]	Aufbau	Mikrohärte [HV]	Dichte [g/cm ³]
Fe_3Al	25	geordnete krz-Struktur	250–350	6,67
$FeAl$	50	geordnete krz-Struktur	400–520	5,37
Fe_2Al_7	63	komplexe krz-Struktur	650–680	nicht bekannt
$FeAl_2$	66–67	komplexe rhombohedrale Struktur	1000–1050	4,36
Fe_2Al_5	69,7–73,2	krz-orthorhombische Struktur	1000–1100	4,11
$FeAl_3$	74–76	sehr komplexe monokline krz-Struktur	820–980	3,95

3. Bildung der aluminiumreichen Phasen des Typs Fe_xAl_y

Einen Überblick über die intermetallischen Phasen des Typs Fe_xAl_y und deren Eigenschaften gibt Tabelle 2: Bei kurzzeitiger Wärmebeeinflussung bilden sich vor allem intermetallische Sprödphasen ($FeAl_3$, Fe_2Al_5)⁴, wogegen die Bildung von Überstrukturen (Fe_3Al , $FeAl$) ein Prozess ist, der für die notwendigen Umordnungsvorgänge ein größeres Zeitintervall benötigt. Auch aus diesen Gründen ist die Bildung der Phasen $FeAl_3$ (aluminiumseitig) und Fe_2Al_5 (stahlseitig) am wahrscheinlichsten.

Zunächst bildet sich bereits bei Temperaturen oberhalb von 350 °C $FeAl_3$ in Form einer dichten Schicht in der Übergangszone. Bei Temperaturen oberhalb 500 °C bildet sich Fe_2Al_5 in charakteristischer Stängelkristallform. Während der Abkühlung wird ebenfalls $FeAl_3$ gebildet, wobei sich bei Temperaturen zwischen 500 und 350 °C die Fe_2Al_5 -Phase zugunsten der $FeAl_3$ -Phase auflöst^{5,6}.

Eine schematische Darstellung der Phasenbildung zeigt Abbildung 1.

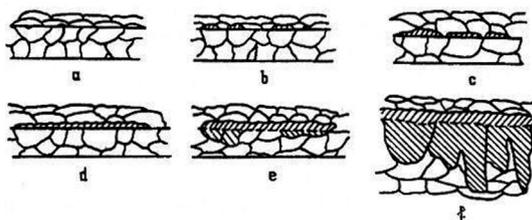


Abb. 1: Darstellung der Bildung und des Wachstums von intermetallischen Phasen: a) Diffusion der Elemente der angrenzenden Metalle, b) Bildung der ersten Bereiche der ersten intermetallischen Phase, c) beginnendes Wachstum der intermetallischen Phase entlang der Fügeebene, d) Zusammenwachsen der einzelnen Bereiche der intermetallischen Phase und beginnendes Wachstum quer zur Fügeebene, e) Bildung der ersten Bereiche der zweiten intermetallischen Phase, fortgesetztes Wachstum quer zur Fügeebene der ersten intermetallischen Phase, f) beginnendes Wachstum und Zusammenwachsen der zweiten intermetallischen Phase entlang der Fügeebene und Wachstum quer zur Fügeebene⁴

4. Schweißverfahren zum Verbinden von Stahl mit Aluminium

Bei der Verbindung von Stahl mit Aluminium durch Schweißen handelt es sich um einen Hybrid-Prozess: Während das Aluminium aufgeschmolzen wird, wird die Schmelztemperatur des Stahls nicht erreicht, man spricht daher von einer „Schweißlötlung“.

4.1 Der „DeltaSpot“-Prozess

Mit dem sog. DeltaSpot-Prozess wurde ein neuartiges Widerstandspunktschweißverfahren entwickelt, das sich

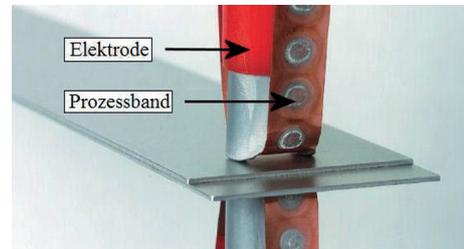


Abb. 2: DeltaSpot-Prozess: Elektrode mit umlaufendem Prozessband¹²

durch hohe Stabilität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auszeichnet. Möglich wird dies durch Verwendung eines sogenannten Prozessbandes, das um die Elektroden geführt wird und sie so vor Verschmutzung schützt sowie einen höheren Wirkungsgrad durch geringeren Strombedarf gewährleistet, siehe Abb. 2.

Die zusätzliche Schwierigkeit beim Verbinden von Stahl mit Aluminium durch Widerstandspunktschweißen – verglichen mit z. B. Schutzgasschweißverfahren – besteht darin, dass bei Anwendung dieses Verfahrens nicht die Möglichkeit des Einsatzes eines Zusatzwerkstoffs besteht und dadurch die Anzahl der Parameter zur Prozesssteuerung – und damit zur gezielten Wärmebringung – eingeschränkt wird. Der DeltaSpot-Prozess kann diese Einschränkung durch den Einsatz von Prozessbändern ausgleichen, damit wird es möglich, auch die Werkstoffe Stahl und Aluminium miteinander durch Widerstandspunktschweißen zu verbinden.

Der gebildete intermetallische Phasensaum der Verbindung $AlMg_3 + DC01+ZE25/25$ besteht aluminiumseitig aus der intermetallischen Phase $FeAl_3$, stahlseitig aus der intermetallischen Phase Fe_2Al_5 und erreicht eine maximale Ausdehnung (quer zur Fügeebene) von unter vier Mikrometern, siehe Abb. 3.

Die mechanischen Eigenschaften (Scherzugfestigkeit, Dauerschwingfestigkeit) dieser artungleichen Verbindung sind jener der artgleichen Verbindung $AlMg_3 +$

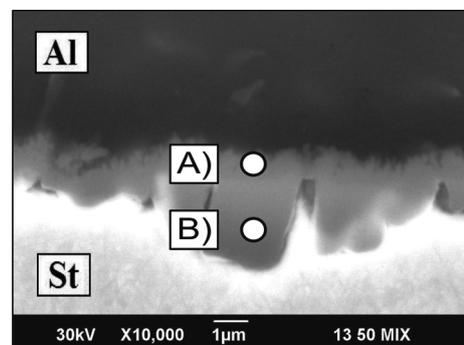


Abb 3: Intermetallischer Phasensaum der Verbindung $AlMg_3 + DC01+ZE25/25$, Schweißverfahren: DeltaSpot-Prozess, a) $FeAl_3$, b) Fe_2Al_5 ¹³

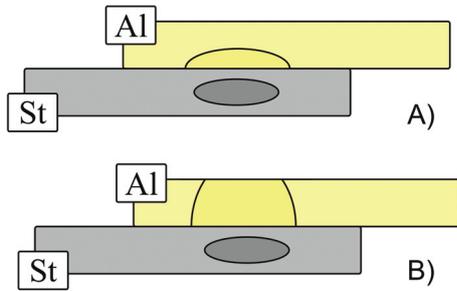


Abb. 4: Form der Aluminiumschweißlinse, a) Konventionelle Widerstandspunktschweißung, b) DeltaSpot-Prozess

AlMg₃ überlegen, Ursache dafür ist die größere Schweißlinse der Stahl-Aluminium-Verbindung, die durch den DeltaSpot-Prozess möglich gemacht wird.

Durch den Einsatz der Prozessbänder entsteht eine neue Form der Aluminiumschweißlinse, siehe Abb. 4. Das Aluminium wird bis an die Oberfläche aufgeschmolzen und hinterlässt einen Abdruck auf dem Prozessband. Dadurch besteht die Möglichkeit einer uneingeschränkten Prozessüberwachung, da der Abdruck am Prozessband in bekannter Relation zu Größe und Form des Schweißbutzens steht.

4.2 Der „CMT“-Prozess

Die Abkürzung „CMT“ steht für „Cold Metal Transfer“ und bezeichnet einen innovativen Schutzgasschweißprozess, der im Vergleich zu konventionellen Schutzgasschweißprozessen einige Besonderheiten aufweist: Die Drahtbewegung ist direkt in die Prozessregelung mit eingebunden – der Schweißdraht bewegt sich bis zu 90 Mal pro Sekunde vor und zurück, das Rückziehen des Drahtes während des Kurzschlusses unterstützt die Tropfenablöse. Der Kurzschluss wird dabei kontrolliert und der Kurzschlussstrom gering gehalten, dadurch wird ein spritzerfreier Werkstoffübergang erreicht. Die Wärmeeinbringung erfolgt nur in der Brennphase und bleibt somit gering, siehe Abb. 5.

Durch die geringe Wärmeeinbringung wird eine Schweißverbindung zwischen Stahl und Aluminium möglich gemacht; Voraussetzung dafür ist die Verwendung eines verzinkten Stahlblechs (Zinkschichtdicke größer zehn Mikrometer), um eine ausreichende Benetzung des Aluminiums am Stahlblech zu gewährleisten.

Abbildung 6 zeigt eine Überlappnaht der Verbindung AlMg_{0,4}Si_{1,2} + DX54D+Z140.

Das Versagen bei Scherzugbelastung tritt nicht im Bereich der intermetallischen Phase auf, sondern entweder in der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht im Aluminium oder im Aluminiumgrundwerkstoff.

4.2.1 Stifte („pins“), aufgeschweißt mittels CMT-Schweißsystem

Durch die Möglichkeit der exakten Positionierung des Zusatzwerkstoffs mittels CMT-Prozess können „pins“

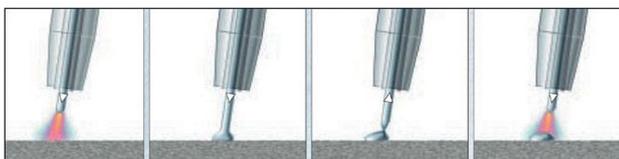


Abb. 5: Ablauf des CMT-Prozesses¹²



Abb. 6: CMT-Überlappnaht der Verbindung AlMg_{0,4}Si_{1,2} + DX54D+Z140, Zusatzwerkstoff: Spezieller Draht für Stahl-Aluminium-Nähte, Schutzgas: 100 % Argon¹²

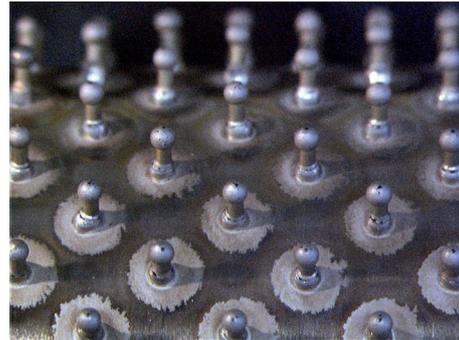


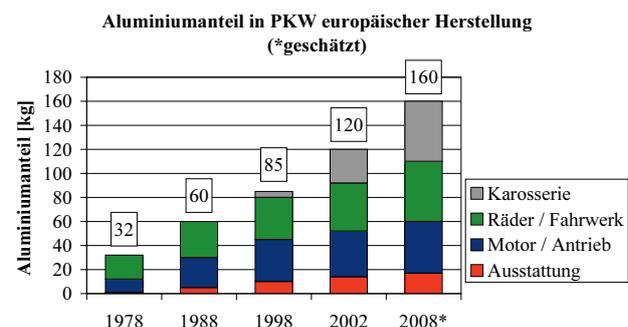
Abb. 7: Pins, aufgeschweißt mittels CMT-Schweißsystem¹²

auf eine Vielzahl von schweißbaren Werkstückoberflächen aufgebracht werden, siehe Abb. 7: Diese Pins sind die Grundlage für eine formschlüssige Verbindung von Metallbauteilen mit einer Vielzahl anderer Werkstoffe wie z. B. Keramik, Kunststoff oder Textilfasern. Artungleiche Metalle – wie Stahl und Aluminium – können durch Umgießen der Pins miteinander verbunden werden.

5. Einsatz von Aluminium im Automobilbau

Während der letzten Jahre hat der Anteil von Aluminium im Automobilbau stetig zugenommen, siehe Tabelle 3: Während der Anteil an Aluminium in europäischen PKW im Jahr 1978 erst 32 kg betrug, so konnte dieser Anteil innerhalb eines Jahrzehnts auf einen Anteil von 60 kg im Jahre 1988 nahezu verdoppelt werden. Im Jahr 2002 betrug der Anteil schon 120 kg, für das Jahr 2008 wird ein Anteil von 160 kg erwartet. Am stärksten war dabei der Zuwachs im Bereich der Karosserie, die restlichen

Tabelle 3: Aluminiumanteil in PKW⁷



Anteile entfallen auf die Bereiche Räder und Fahrwerk, Motor und Antrieb sowie Ausstattung⁷.

Ursache für den verstärkten Einsatz von Aluminium sind einerseits wirtschaftliche Überlegungen (als Faustformel gilt: 100 kg Mehrgewicht kosten einen halben Liter mehr Sprit auf 100 km) und andererseits ökologische Überlegungen, da ein höherer Spritverbrauch zwangsläufig auch einen höheren CO₂-Ausstoß bedeutet.

Ein weiterer Vorteil für den Werkstoff Aluminium ist seine Rezyklierbarkeit ohne Qualitätsverluste; für die Rezyklierung werden nur etwa fünf Prozent der Energie verbraucht, die zur Herstellung von Hüttenaluminium benötigt werden. Gemeinsam mit der langen Lebensdauer trägt dies zur Schonung unserer Ressourcen bei.

5.1 CO₂-Emissionen im Straßenverkehr

CO₂ ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas, es verursacht rund 60 Prozent des anthropogenen Treibhauseffekts⁸.

Ein österreichischer PKW emittiert durchschnittlich 1,6 kg CO₂ auf zehn Kilometern⁹. Der Anteil des PKW-Verkehrs am gesamten CO₂-Ausstoß beträgt in Österreich 9,6 % (weltweit 10,9 %)¹⁰. Der CO₂-Ausstoß des gesamten PKW- und Güterverkehrs hat sich damit in Österreich von 12,8 Mio. t CO₂ im Jahr 1990 auf 24,4 Mio. t CO₂ im Jahr 2005 innerhalb von nur 15 Jahren annähernd verdoppelt⁹.

Um angesichts dieser Zahlen dennoch langfristig die Mobilität „für alle“ ohne Einschränkungen des Komforts bzw. ohne Einschränkungen auf Grund steigender Kosten gewährleisten zu können, muss der Verbrauch und damit der CO₂-Ausstoß von PKW gesenkt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Schwierigkeiten beim Verbinden von Stahl mit Aluminium durch Schweißen wurden geschildert, die Mechanismen der Bildung und des Wachstums der aluminiumreichen intermetallischen Phasen des Typs Fe_xAl_y wurden erklärt.

Mit den Schweißprozessen „DeltaSpot“ und „CMT“ wurden Lösungen vorgestellt sowie Anwendungen präsentiert.

Die Gründe sowie die Vorteile des Einsatzes von Aluminium im Automobilbau und damit die Bedeutung der stabilen und zuverlässigen Verbindung der Werkstoffe Stahl und Aluminium miteinander durch Schweißen wurden dargelegt und diskutiert.

In Zukunft wird die Bedeutung von Leichtbau und Materialmix im Automobilbau weiter zunehmen, nicht zuletzt auf Grund eines gesteigerten Bewusstseins für Umweltschutz und Schonung der Ressourcen. Industrie und Wissenschaft sind daher gefordert, neue Verbindungstechnologien zu entwickeln, um diesen Ansprüchen zu genügen und damit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Mit der Möglichkeit, die Werkstoffe Stahl und Aluminium miteinander zu verschweißen, wurde bereits ein Schritt in diese Richtung gesetzt, weitere werden folgen.

Literaturverzeichnis

- ¹ Hansen, M.: Constitution of Binary Alloys. McGraw-Hill Book Company 1958. – ² Eichhorn, F., M. Emonts, B. Leuschen: Widerstandspunktschweißen der Werkstoffkombination Aluminium und Stahl – erste Versuchsergebnisse. DVS-Berichte Band 70, DVS-Verlag Düsseldorf (1981), 6–12. – ³ Achar, D. R., J. Ruge, S. Sundaresan: Verbinden von Aluminium mit Stahl, besonders durch Schweißen (III); Aluminium 56 (1980) 4, 291–293. – ⁴ Ryabov, V. R.: Welding of aluminium alloys to steels. Welding and Surfacing Reviews, (1998), Vol. 9, Part 3, 1–142. – ⁵ Bouché, K., F. Barbier, A. Coulet: Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium. Materials Science and Engineering A 249 (1998) 167–175. – ⁶ Radscheit, C. R.: Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl. Dissertation BIAS Bremen (1997), Strahltechnik, Band 4. – ⁷ www.aluinfo.de; 2008. – ⁸ Bayrisches Landesamt für Umweltschutz; Treibhausgase, 2004. – ⁹ www.greenpeace.at; 2008. – ¹⁰ www.autotouring.at; 2007. – ¹¹ Domke, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 10., verbesserte Auflage; 1994 Cornelsen Verlag, Berlin. – ¹² Fronius International, Wels. – ¹³ Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Abteilung Werkstoffdiagnostik und Technologie der Stähle; Düsseldorf.