

Elektronenstrahlschweißen von Aluminiumkammern mit einer Wandstärke von 49 mm

Dr. Axel Hinse-Stern, Kurt Leeb, igm Robotersysteme AG Steigerwald Strahltechnik, München

1 Einleitung

Die igm Robotersysteme AG Steigerwald Strahltechnik hat in letzter Zeit eine verstärkte Nachfrage aus dem asiatischen Raum nach Elektronenstrahlschweißmaschinen, die zum Schweißen von großvolumigen Aluminiumkammern dienen.

Bild 1 zeigt eine Elektronenstrahlschweißmaschine mit einer Vakuumkammer von 29 m³.



Bild 1: Elektronenstrahl Schweißmaschine EBOCAM KS 290 – G 300 KM; Abmessungen der Vakuumkammer: 3,5 x 3,5 x 2,35 m - Volumen 29 m³ 2 EB-Generatoren in horizontaler und vertikaler Anordnung mit jeweils max. 30 kW Strahlleistung; Tischgröße 1,7 x 1,6 m; Verfahrweg 1,7 m; Maximallast 4.000 daN

Die Aluminiumkammern werden durch Elektronenstrahlschweißen der einzelnen Wände gefügt. Die Wandstärke beträgt zwischen 40 und 70 mm.

Diese meist rechteckigen Aluminiumkammern werden als Handlingskammern oder als Prozesskammern zum Bedampfen und Ätzen von Silizium-Wafern, LCD-Bildschirmen etc. eingesetzt.

Bild 2 zeigt eine Clusteranlage für den Bedampfungs- und Ätzprozeß.

Japanische Unternehmen sind beim Einsatz und der Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen sehr innovativ. Dies beruht auf langjähriger Erfahrung bei der Verwendung von Aluminium in der Konstruktion und im Hochenergie-Beschleunigerbau. Bild 3 zeigt eine elektronenstrahlgeschweißte und gefräste Prozesskammer aus einer Aluminiumlegierung.



Bild 2: Clusterline[®] NRG, Quelle: UNAXIS

In Europa und den USA werden die Kammern bisher geschraubt oder konventionell geschweißt. Auch bei der Werkstoffwahl werden verschiedene Wege beschritten. Es kommen in Europa und den USA für den Bau solcher Prozesskammern fast ausschließlich rostfreier Edelstahl (1.4301, 1.4404, 1.4439 und 1.4571), Nickelbasislegierungen und unlegierter Stahl zum Einsatz.

Trotz des langjährigen erfolgreichen Einsatzes des Elektronenstrahlschweißens von diesen Produkten aus Aluminiumlegierungen in Fernost, hat sich diese Technologie im Westen bisher noch nicht durchgesetzt.

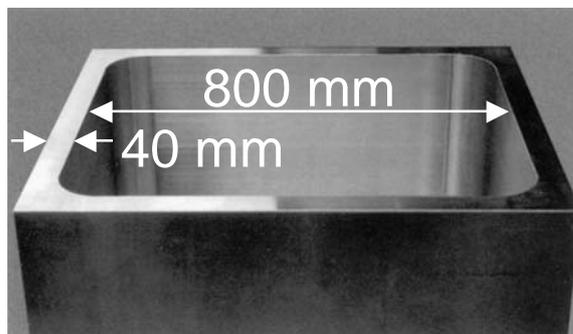


Bild 3: Aluminium-Kammer Elektronenstrahlgeschweißte, gefräste

Um auf konventionellem Weg Aluminiumkammern zu schweißen, kann bei einseitiger Zugänglichkeit eine U-Naht-Vorbereitung mit anschließendem MIG-Schweißen gewählt werden. Der aufwändige Schweißprozess erfordert mehrere Lagen. So sind beim MIG-Schweißen mit 1,6 mm Drahtelektrode (Nahtquerschnitt ca. 17,5 cm²) ca. 25 bis 30 Raupen in Stichraupentechnik erforderlich. Die Anzahl der Raupen kann durch Pendeln zwar verringert werden, der hohe Wärmeeintrag führt jedoch unweigerlich zu starkem Verzug bzw. zum Winkelversatz der Bauteile /1/.

2 Technologischer Vergleich der Aluminiumlegierung mit rostfreiem Edelstahl

Die Aluminiumwerkstoffe des Typs AlMg_{2,5} bzw. AlMg_{4,5Mn} werden üblicherweise beim Kammerbau in Japan verwendet. Diese Aluminiumlegierungen sind Knetlegierungen, naturhart, gut schweißbar und für statische Konstruktionen vorgesehen. Der rostfreie Edelstahl W.-Nr. 1.4301 und ähnliche Legierungen kommen in Europa und den USA zum Einsatz.

	Al bzw. AlMg _{4,5Mn}	W.-Nr. 1.4301 u.ä.
Dichte [kg/dm ³]	2,68	7,8
Schmelztemp. [°C]	660 bzw. 575 - 640	1350 - 1480
E-Modul x10 ¹⁰ [N/mm ²]	7,1	11
Längenausdehnungskoeffizient x10 ⁻⁶ [K ⁻¹]	23,7	16,5
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	220 bzw. 110 - 120	15
Festigkeit R _{es} [MPa]	50 bzw. 120	190
R _m [MPa]	100 bzw. 310	500-700
A ₅ [%]	20-4	45
Härte [HB]	50-73	<215
Preis [DM/kg]	ca. 5 - 8	ca. 5 - 8
[DM/dm ³]	13,- bis 21,-	38,- bis 61,-

Tabelle 1: Daten von Al bzw. AlMg_{4,5Mn} und rostfreiem Edelstahl W.-Nr. 1.4301 /2/

Der geringe E-Modul, der als Werkstoffkennwert den Widerstand gegen Durchbiegung bestimmt, erfordert bei den Aluminiumlegierungen eine um 50 % dickere Wand als beim rostfreien Edelstahl 1.4301. Auch die geringere Festigkeit der Aluminiumlegierung wird so kompensiert.

Der Einsatz des Leichtmetalls Aluminium führt beim Bau einer Prozesskammer trotz einer Wandstärke von 40 mm zu einer Gewichtsersparnis von fast 50 % gegenüber einer Kammer aus rostfreiem Edelstahl mit einer Wandstärke von 25 mm.

Die Wärmeleitfähigkeit von AlMg_{4,5Mn} ist gut 7-mal so hoch wie die von rostfreiem Edelstahl 1.4301. Bei einer 50 % dickeren Wand ist die Wärmeableitung der Aluminiumkammer immer noch 4-mal besser als die einer Kammer aus rostfreiem Edelstahl.

Die Härte von Aluminium ist gering, es lässt sich leicht mechanisch bearbeiten, wohingegen die Bearbeitung von rostfreiem Edelstahl aufwändiger ist.

Der Kilopreis von Aluminium und rostfreiem Edelstahl 1.4301 ist ähnlich. Bei gleichem Gewicht bekommt man bei Aluminium jedoch fast das dreifache Volumen. Somit sind die Werkstoffkosten, trotz einer 50 % dickeren Wand bei Aluminium, nur halb so hoch wie die Werkstoffkosten für den rostfreien Edelstahl 1.4301 mit geringerer Wandstärke.

Es gibt Anwendungen, bei denen aus korrosionstechnischen Gründen der Werkstoff Aluminium aufgrund der Aggressivität des Mediums beim Prozess (RIE Rapid Ion Etching mit Cl- und F-Ionen) eindeutig von Vorteil gegenüber Edelstahl ist. Hier müssen Prozesskammern aus Aluminium eingesetzt werden. Auch die Leckrate stellt bei Aluminiumkammern kein Problem dar, da die Ausgasrate unkritisch ist.

Somit ist der Einsatz von Aluminiumlegierungen für den Kammerbau aufgrund folgender Vorteile sinnvoll: Gewichtsersparnis, einfache mechanische Bearbeitbarkeit, bessere Wärmeleitfähigkeit und Kostensenkung beim Werkstoff.

3 Schweißversuche

Es wurden Schweißversuche an der Legierung AlMg_{4,5Mn} durchgeführt. In Vorversuchen wurden die Prozessparameter hinsichtlich Einschweißtiefe, Nahtbreite, Nahtraupengeometrie optimiert und danach auf Bauteile übertragen. Es wurde mit folgenden Einstellungen der Elektronenstrahlschweißmaschine geschweißt: Werkstoff: A5083 (AlMg_{4,5Mn}), Blechstärke 49 mm; Generatoranordnung horizontal; Strahlleistung: 19,8 kW, Schweißgeschwindigkeit: 8,0 mm/s (= 480 mm/min).

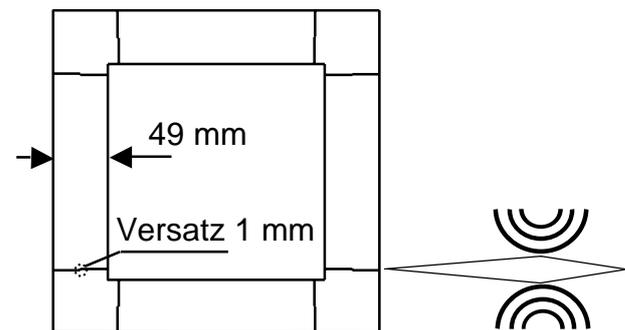


Bild 4: Schematischer Versuchsaufbau Kantenlänge 300 mm

Wie in Bild 4 und 5 dargestellt, wurden die Aluminiumkammern aus 8 Elementen zusammengesetzt, gespannt und verschweißt.

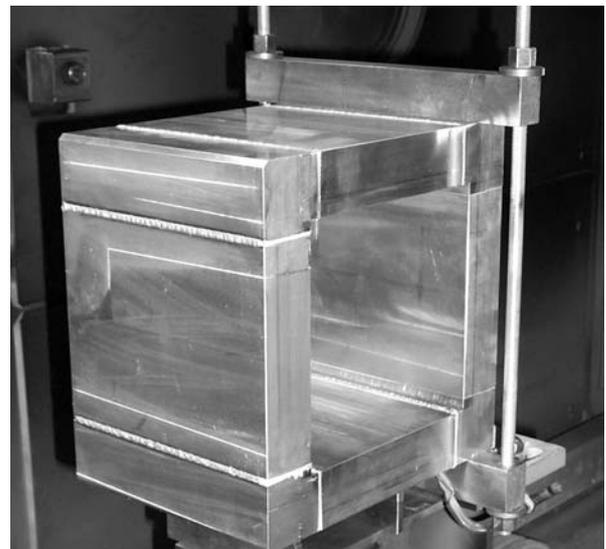


Bild 5: Eingespanntes Probeteil nach dem Elektronenstrahlschweißen, Nähte deutlich sichtbar

4 Charakterisierung der Schweißnähte

Die Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn lässt sich gut elektronenstrahlschweißen. Die 49 mm tiefen Schweißnähte sind nur 2,3 bis 3,2 mm breit, siehe Bild 6. Die Schweißnahttraufe am Strahleintritt und die Nahtwurzel am Strahlaustritt sind leicht überhöht und zeigen einen flachen Nahtübergang ohne Schweißgutüberlauf. Die Mikrostruktur der Schweißnähte ist homogen und weist ein sehr feines Erstarrungsgefüge auf, welches auf die hohe Abkühlgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Die Nähte zeigen keine Risse. Vereinzelt wurden kleine Poren gefunden.

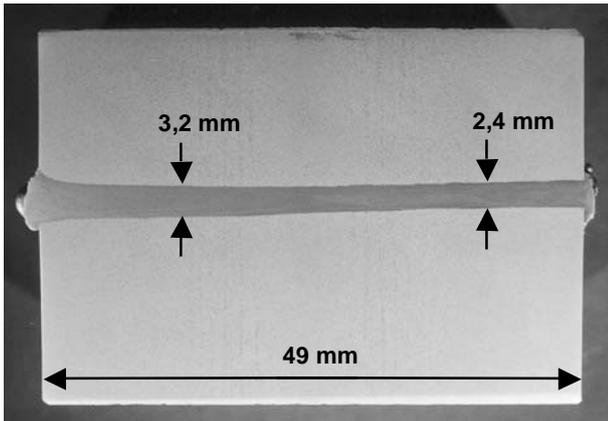


Bild 6: Querschliff durch die elektronenstrahlgeschweißte Naht, Strahleintritt links, Ätzung NaOH-aq.

An der Übergangszone Naht-Grundwerkstoff hat sich im unaufgeschmolzenen Grundwerkstoff ein Saum mit erhöhter Mikroporosität gebildet. Dieser ist vermutlich auf die herstellungsbedingten gelösten Restgase zurückzuführen, die durch die thermische Aktivierung frei werden und koagulieren, vgl. Bild 7 und 8.

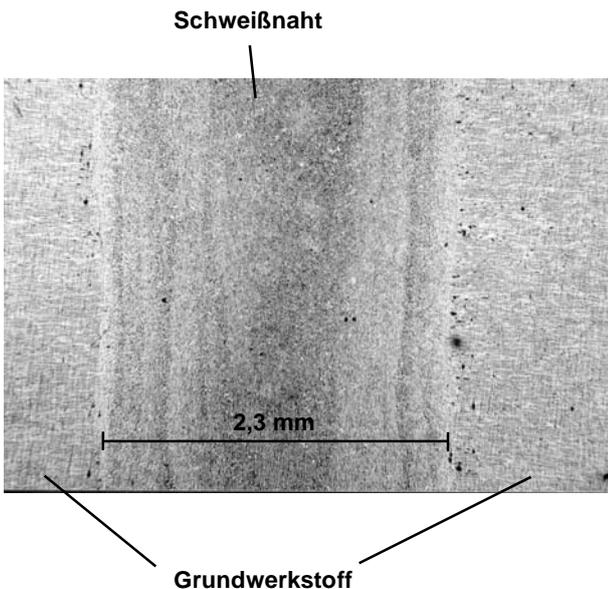


Bild 7: Querschliff durch die elektronenstrahlgeschweißte Naht, Nahtmitte

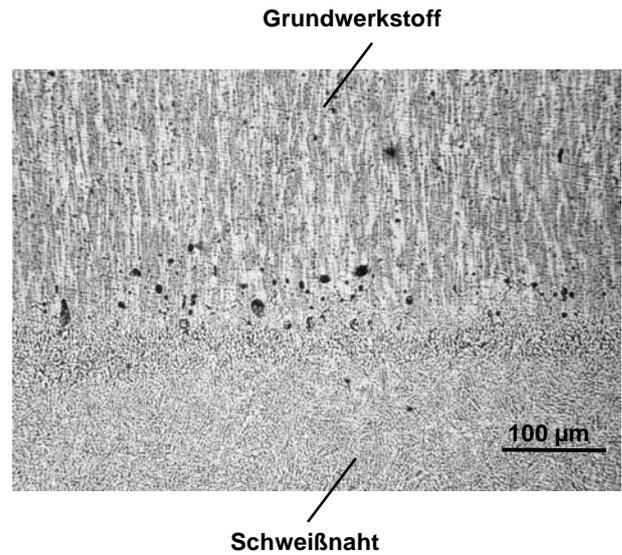


Bild 8: Übergangsbereich Schweißnaht - Grundwerkstoff

Der Kleinlasthärteverlauf über der Schweißnaht ist in Bild 9 dargestellt. Die Härte des Grundwerkstoffs beträgt 94 HV_{0,2}. Im Bereich der Schweißnaht liegt die Härte mit 89 bis 91 HV_{0,2} nur wenig unter dem Wert des Grundwerkstoffs. Die Übergangszone Grundwerkstoff-Schweißnaht ist deutlich anhand der Härteminima zu erkennen. Der Härteverlauf des Grundwerkstoffs wird erst wieder in 3 bis 4 mm Abstand von der Übergangszone erreicht. Absolut gesehen ist die Härteminderung nur gering, so dass kein nennenswerter Festigkeitsverlust in der wärmebeeinflussten Zone bzw. in der Naht zu erwarten ist.

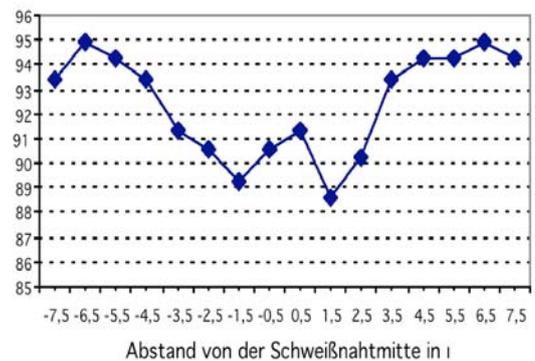


Bild 9: Kleinlasthärteverlauf AlMg4,5Mn über der elektronenstrahlgeschweißten Naht

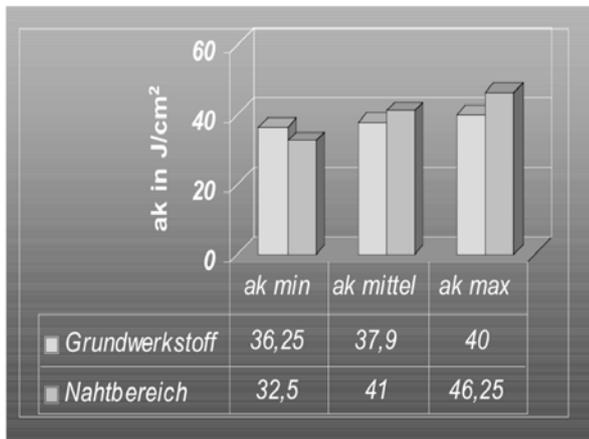


Bild 10: Kerbschlagarbeit des Grundwerkstoffs AlMg4,5Mn und der elektronenstrahlgeschweißten Naht

Bild 10 vergleicht die Kerbschlagarbeit des ungeschweißten Grundwerkstoffs AlMg4,5Mn mit der Kerbschlagarbeit elektronenstrahlgeschweißter Proben. Es lässt sich erkennen, dass die Kerbschlagarbeit der elektronenstrahlgeschweißten Proben einen etwas höheren Wert aufweist (im Mittel 8 %). Die Streubreite der Messwerte ist durch den Minimal- bzw. Maximalwert gegeben.

Es wurde eine ausreichende Anzahl von Proben im Kerbschlagversuch untersucht. Die Werte können allerdings nur als Vergleich der Gesamtbauteile untereinander dienen. Der Probenanriss bzw. der Kerb erfolgte in der Naht. Weicht der Riss während des Kerbschlagbiegeversuches in den Grundwerkstoff aus, so ergeben sich zwangsläufig die „normalen“ Werte des Grundwerkstoffes bzw. die geringeren Werte der wärmebeeinflussten Zone. Pflanzte sich der Riss in der Naht fort, so ist in der Regel mit höheren Werten der Kerbschlagarbeit zu rechnen.

Die gemessenen Werte der Kerbschlagarbeit und der Härte zeigen, dass das Elektronenstrahlschweißen der Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn zu einer mit dem Grundwerkstoff vergleichbaren hohen Güte in der Verbindung führt.

5 Zusammenfassung

Die kontinuierliche Nachfrage aus dem asiatischen Raum nach Elektronenstrahlschweißmaschinen zum Schweißen von großvolumigen Aluminiumkammern ist im westlichen Wirtschaftsraum bisher nicht vorhanden. Hier wird immer noch konventionell gefertigt, d.h. MIG-geschweißt oder geschraubt. Die Verwendung von Aluminiumlegierungen ist eher die Ausnahme, obwohl viele Gründe die Anwendung im Kammerbau sprechen. Zu nennen sind bei gleicher mechanischer Festigkeit der Konstruktion die Kosteneinsparung beim Werkstoff, die Gewichtsersparnis, die einfachere mechanische Bearbeitung und die bessere Wärmeleitfähigkeit der Aluminiumkammern.

Um eigene Erfahrungen beim Elektronenstrahlschweißen von Aluminiumkammern zu erhalten, wurden Schweißversuche an der Legierung AlMg4,5Mn durchgeführt. Die Durchschweißtiefe betrug 49 mm.

Es wurde festgestellt, dass die Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn sich gut elektronenstrahlschweißen lässt. Die Schweißnähte sind schlank und homogen.

Die mechanischen Kenndaten Kleinlasthärte und Kerbschlagarbeit wurden bestimmt. Die Elektronenstrahlschweißung der Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn führt zu einer Verbindung mit vergleichbaren Eigenschaften, wie sie der Grundwerkstoff aufweist.

Es wurde eine Aluminiumkammer mit einer Kantenlänge von 300 x 300 x 300 mm und einer Wandstärke von 49 mm erfolgreich geschweißt. Der Verzug war dabei außerordentlich gering.

Japanische Unternehmen haben im Laufe der Jahre viel Erfahrung beim Elektronenstrahlschweißen von Aluminiumkammern gewonnen. Basierend auf diesem technologischen Vorsprung wurde die Fertigungsstrategie stetig erweitert. Dies ist anhand der wachsenden Anzahl von Elektronenstrahlschweißmaschinen für diesen Anwendungsbereich nachvollziehbar.

Die völlig verschiedene Fertigungsstrategie im fernöstlichen und im westlichen Wirtschaftsraum führt dazu, dass im Westen bisher kaum Bedarf für das Elektronenstrahlschweißen von Aluminiumkammern vorliegt. Ein Unternehmen, das sowohl Kammern baut, als auch mit dem Elektronenstrahl schweißt gibt es hier nicht. Für Lohnbetriebe scheint die Auslastung oder Anschaffung einer geeigneten Schweißanlage durch die kleinen Stückzahlen noch unrentabel zu sein.

Deshalb ist es wünschenswert, dass der Bekanntheitsgrad hinsichtlich der Möglichkeiten und der Leistungsfähigkeit des Elektronenstrahlschweißens größer wird, um einen Einstieg für den Einsatz der Elektronenstrahltechnik auf dem Gebiet des Kammerbaus auch in unserem Wirtschaftsraum zu schaffen.

Die 5. Strahltechnische Konferenz in Halle an der Saale dient diesem Zweck und wir möchten an dieser Stelle unseren Dank für dieses Forum ausdrücken !

6 Schrifttum

- /1/ Mitteilung aus der SLV München, Juni 2001
- /2/ Aluminium Taschenbuch, Band 1, 15. Auflage, Aluminium Zentrale, Düsseldorf