

# UNTERSUCHUNGEN ZUR VERBESSERUNG DER SPANNUNGSRISSKORROSIONS- BESTÄNDIGKEIT EINER GESCHWEISSTEN HOCHFESTEN Al-LEGIERUNG DURCH KUGELSTRAHLEN

Investigations on improvement of the stress corrosion  
resistance of a welded high strength Al-alloy by  
shot peening

W. Köhler

*Dornier System GmbH, Friedrichshafen, Bundesrepublik Deutschland*

## ABSTRACT

The high strength aluminum alloy AlZn<sub>4</sub>,5Mg<sub>2</sub> is used already for welded light-weight structures. But the weld seams are very sensitive to stress corrosion. Therefore, an experimental program to improve the corrosion resistance by shot peening has been carried out.

Extruded profiles of the alloy were WIG-welded and hereby a tensile strength of  $R_m = 440 \text{ N/mm}^2$  was reached. Samples out of these welded profiles were shot peened with glas-balls of 0,25  $\phi$  and 0,84  $\phi$  mm. These samples were tested under constant load (75 % of the yield strength) in 2 % NaCl-Solution on their stress corrosion resistance.

Whereas untreated samples cracked by stress corrosion within a few days, with the shot peened samples (0,15 A2) a significant improvement of the life-time up to 61 days without fracture was reached.

In addition a great improvement of the fatigue strength was obtained by shot peening.

The internal compressive stresses were measured by x-ray-method after shot peening. In the heat affected zone compressive stresses of  $-200 \text{ N/mm}^2$  were found.

## KEYWORDS

Stress corrosion, shot peening, glas-balls, high strength Al-alloy, weld seam, fatigue strength, residual stress.

## EINLEITUNG

Für den Leichtbau werden u.a. hochfeste gut schweißbare Aluminium-Legierungen eingesetzt. Je höher die Festigkeit der Legierung getrieben wird, um so größer wird jedoch die Korrosionsanfälligkeit. Ein typisches Beispiel stellt die neue hochfeste Legierung AlZn<sub>4</sub>,5Mg<sub>2</sub> (noch nicht genormt) dar, die im geschweißten Zustand eine um 25 % höhere Festigkeit hat als die genormte Basislegierung AlZn<sub>4</sub>,5Mg<sub>1</sub>, jedoch an den Schweißnähten eine große Empfindlichkeit gegenüber Spannungsrißkorrosion (SprK) aufweist.

Neben legierungstechnischen Maßnahmen zur Verbesserung der Spannungsrißkorrosions- (SprK)-Beständigkeit gibt es die Möglichkeit durch eine Oberflächenbehandlung und zwar durch Kugelstrahlen die SprK-Beständigkeit zu verbessern.

Wie aus früheren Untersuchungen (Ballotini, 1976; Suss, 1962; Hanley, 1976) bekannt, ist durch Kugelstrahlen mit Glasperlen eine erhebliche Verbesserung der SprK-Beständigkeit erreichbar. Ballotini (1976) konnte an ungeschweißten Proben der Legierung AlZnMgCu<sub>1,5</sub> durch Glasstrahlen eine Erhöhung der Lebensdauer im SprK-Versuch um das 13-fache bei einer Belastung von 75 % der Streckgrenze erzielen.

Bei allen früheren Untersuchungen handelte es sich um Grundmaterial, Ergebnisse an geschweißtem Material liegen bisher nicht vor.

Daher wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen an geschweißten Proben der Legierung AlZn<sub>4,5</sub>Mg<sub>2</sub> eine Kugelstrahlbehandlung mit verschiedenen Parametern durchgeführt, um dadurch eine Verbesserung der SprK-Beständigkeit zu erreichen und die hohe Festigkeit der Legierung bei Schweißkonstruktionen ausnutzen zu können.

#### KUGELSTRAHLBEHANDLUNG

Für die Untersuchungen wurden Strangpreßprofile von 4 mm Dicke der Legierung AlZn<sub>4,5</sub>Mg<sub>2</sub> von den Aluminium-Walzwerken Singen nach dem WIG-Verfahren maschinell geschweißt. Aus den geschweißten Profilen wurden für die Kugelstrahlbehandlung Zugproben von 150 mm Länge herausgearbeitet und danach 2-stufig warmausgelagert, um den Wärmebehandlungszustand T6 herzustellen.

Als Strahlgut wurden u.a. Glasperlen von 0,25  $\phi$  mm und 0,84  $\phi$  mm der Ballotini GmbH verwendet. Zunächst wurden in Vorversuchen an geschweißten und ungeschweißten Teststreifen der Al-Legierung sowie an Almenplättchen (SAE J442) die gewünschten Strahlparameter ermittelt und die dazugehörigen Sättigungskurven aufgenommen, Abb. 1. In Anlehnung an Versuchsergebnisse aus der Literatur (Ballotini, 1976) wurden folgende Almenwerte angestrebt 0,1 A2 (0,3 N2), 0,15 A2, 0,2 A2 und 0,37 A2.

Für eine 98%-ige Flächenbedeckung bei den Almenwerten von 0,1 A2 und 0,15 A2 waren für die einzelnen Strahlmittel die aus den Diagrammen, Abb. 1, ersichtlichen Strahlmittelmengen erforderlich. Auf die übrigen Almenwerte soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

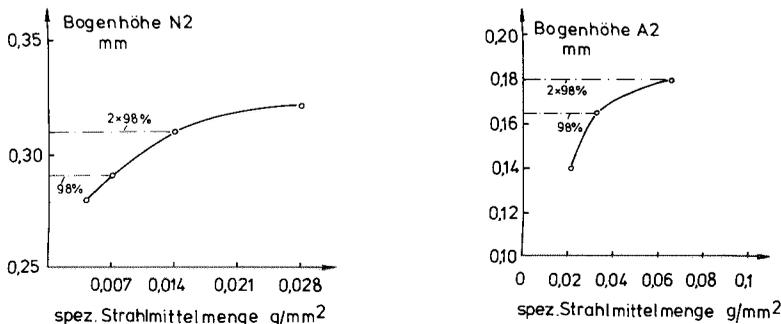


Abb. 1. Sättigungskurven  
 a) für das Strahlgut 0,25  $\phi$  mm    b) für das Strahlgut 0,84  $\phi$  mm  
 Glasperlen (p = 0,5 bar)    o Almentestblech N2 bzw. A2

Die geschweißten Zugproben wurden dann mit den ermittelten Strahlparametern und dem jeweiligen Strahlgut in einer Kugelstrahlkammer (Fabrikat: Baiker AG) rundherum kugelgestrahlt.

#### SPANNUNGSRISSKORROSIONSVERSUCHE

Die SpRK-Versuche wurden unter konstanter Last in einzelnen Korrosionsständen durchgeführt. Die Belastung wurde hierbei jeweils mit Hilfe von vorgespannten Schraubenfedern aufgebracht. Jede SpRK-Probe war von einem Plexiglaszylinder, gefüllt mit Elektrolyt, umgeben. Zur exakten Bestimmung der Standzeit, wurde die Belastungsvorrichtung mit einem Kontaktschalter versehen, der beim Reißen der Probe eine Zähluhr abschaltete. Als Elektrolyt wurde 2%-ige NaCl-Lösung mit 0,5 %  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  (als Korrosionsinhibitor gegen Schichtkorrosion) verwendet, als Belastung wurde jeweils 75 % von der Streckgrenze ( $R_{p0,2}$ ) eingestellt.

Die Versuche wurden in Anlehnung an die LN 65 666 (Luftfahrtnorm) durchgeführt.

Zunächst wurden ungestrahlte Schweißproben auf SpRK-Beständigkeit getestet. Diese Proben zeigten eine relativ hohe Empfindlichkeit gegen Spannungsriß-Korrosion. Die erreichte mittlere Standzeit von 10 Proben betrug nur 4,5 Tage, siehe Abb. 3. Der Bruch verlief bei allen Proben an der Schweißraupengrenze, siehe Abb. 2. Es handelt sich hierbei um sog. Schweißraupengrenzkorrosion (Pirner, 1975; Cordier, 1977), wie sie auch an der Legierung  $\text{AlZn}_4,5\text{Mg}_1$  auftreten kann.

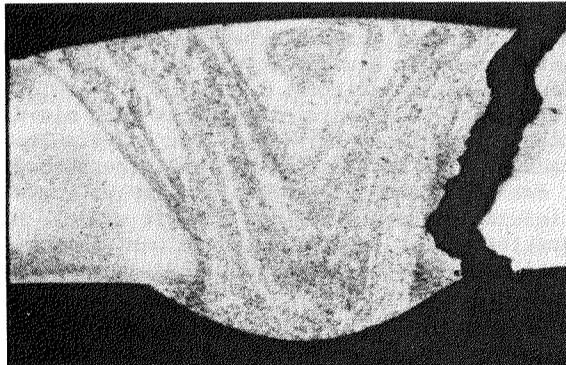


Abb. 2. WIG-geschweißte Zugprobe, ungestrahlt  
SpRK-Bruch an der Schweißraupengrenze,  
Übersicht 8 : 1

Danach wurden mit Glasperlen von 0,25  $\phi$  mm und 0,84  $\phi$  mm jeweils mit einfacher und mit zweifacher Flächenbedeckung gestrahlte Schweißproben und zwar jeweils 5 Proben mit gleichen Parametern untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abb. 3 zusammengestellt.

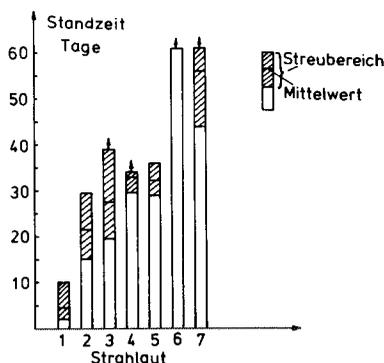


Abb. 3. Mittlere Standzeiten der WIG-geschweißten SprK-Proben mit unterschiedlicher Strahlbehandlung

- 1 ungestrahlt
- 2 Glasperlen 0,25  $\phi$  mm, 98 %
- 3 Glasperlen 0,25  $\phi$  mm, 2x98 %
- 4 Glasperlen 0,84  $\phi$  mm, 98 %
- 5 Glasperlen 0,84  $\phi$  mm, 2x98 %
- 6) Glasperlen 0,84  $\phi$  mm mit
- 7) optimierten Parametern

Die mittlere Standzeit der Proben wurde hierbei gegenüber den ungestrahlten beträchtlich erhöht, wobei zunächst die mit 0,84  $\phi$  mm mit 1-facher Flächenbedeckung gestrahlten die besten Ergebnisse zeigten.

Durch weitere Optimierung der Strahlparameter wurden dann mit den 0,84  $\phi$  mm Glasperlen z.T. Standzeiten von 61 Tagen erreicht, ohne daß die Proben infolge Spannungsrißkorrosion brachen. Dies bedeutet eine Standzeiterhöhung um mehr als das 13,5-fache gegenüber den ungestrahlten Proben. Die Proben wurden nach 61 Tagen ausgebaut und anschließend die Restfestigkeit geprüft und die Mikrostruktur untersucht. Während die Restfestigkeit noch ausreichend war, zeigte die Mikrostruktur im Bereich der Wärmeeinflußzone eine Korrosionsschädigung, die bei längerer Standzeit zum SprK-Bruch geführt hätte.

#### EIGENSpannungsmessungen

Um die durch das Kugelstrahlen erzeugten Druckeigenstressungen zu ermitteln, wurden an ungestrahlten und mit Glas gestrahlten (0,84  $\phi$  mm, 2-fache Flächenbedeckung) Schweißproben die Eigenspannungsverteilungen an der Oberfläche röntgenografisch gemessen.

Die Messungen wurden in einem Siemens Diffraktometer mit Cu-K $_{\alpha}$ -Strahlung durchgeführt. Für jede Eigenspannungskomponente wurden Gitterdehnungsmessungen unter verschiedenen Neigungswinkeln vorgenommen und nach dem  $\sin^2\psi$ -Verfahren ausgewertet. Zur Berechnung wurden die Konstanten  $E = 70630 \text{ N/mm}^2$  und  $\nu = 0,31$  verwendet.

In Abb. 4 sind die Meßergebnisse dargestellt. An der ungestrahlten Probe wurden sehr geringe Zug- und Druckeigenstressungen gefunden. Der Verlauf der Eigenspannungen ist typisch für Schweißnähte wie er auch an austenitischem Stahl gefunden wird (Yu, 1979).

Im Gegensatz zu der ungestrahlten Probe zeigt die glasgestrahlte Probe hohe Druckeigenstressungen. Außerhalb einer durch das Schweißen beeinflussten Zone von ca. 20 mm werden rd.  $-200 \text{ N/mm}^2$  gemessen. Zur Schweißnaht hin tritt ein leichter Abfall bzw. ein Anstieg auf  $-170 \text{ N/mm}^2$  in 10 mm Abstand von der Schweißnahtkante ein.

Die Abbildung enthält für dieses Maximum bei 10 mm Abstand Meßergebnisse der Querkomponente ( $\sigma_q$ ) sowie der Längskomponente ( $\sigma_1$ ) an der Decklagenseite.

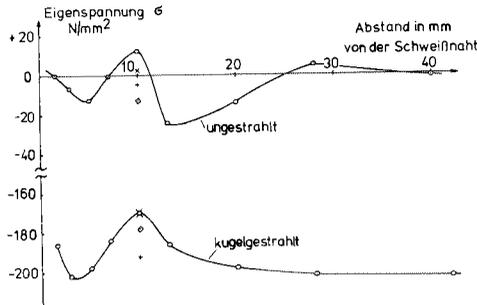


Abb. 4. Eigenspannungsverteilung an ungestrahlten und kugelgestrahlten  $\text{AlZn}_{4,5}\text{Mg}_2$  Proben  
 ungestrahlt  $s = 4,5 \text{ N/mm}^2$   
 kugelgestrahlt  $s = 7,2 \text{ N/mm}^2$   
 $o = \sigma_1$  } Wurzelseite       $\diamond = \sigma_1$  } Decklagenseite  
 $x = \sigma_q$  }                       $+ = \sigma_q$  }

Bei der gestrahlten Probe ist die ursprüngliche Eigenspannungsverteilung nach dem Schweißen fast vollständig überdeckt von den Eigenspannungen durch das Glasstrahlen. Der Abfall der Druckeigenstressungen im Bereich von 10 mm rührt von dem veränderten Verfestigungsverhalten in der Wärmeeinflusszone her.

Weiterhin wurde an einer glasgestrahlten Probe der Verlauf der Eigenspannungen nach der Tiefe durch stufenweises elektrolytisches Abtragen schrittweise gemessen. In etwa 0,08 mm Tiefe wurden die größten Druckeigenstressungen von rd.  $-280 \text{ N/mm}^2$  gemessen und in etwa 0,35 mm Tiefe war der Einfluß der Kugelstrahlbehandlung abgeklungen.

#### ERMITTLUNG DER ZEITSCHWINGFESTIGKEIT

An geschweißten glasgestrahlten und ungestrahlten Proben wurde weiterhin die Zeitschwingfestigkeit bei  $R = 0,1$  und  $f = 30 \text{ Hz}$  ermittelt. Die Versuche wurden statistisch ausgewertet und für die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_{\bar{u}}$  von 100 %, 99 %, 90 %, 50 % und 1 % die Wöhlergeraden berechnet und in Abb. 5 dargestellt. Die Berechnung wurde nach der Extremwerttheorie von Freundenthal und Gumbel (1954) durchgeführt. Durch die Kugelstrahlbehandlung wurde eine Verbesserung der Zeitschwingfestigkeit um mehr als eine Zehnerpotenz gegenüber den ungestrahlten Proben erzielt.

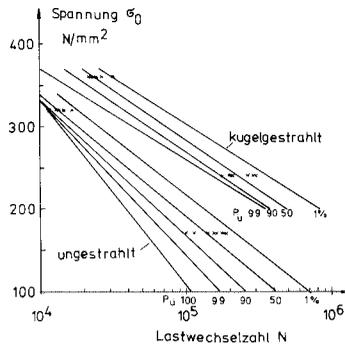


Abb. 5. Zeitschwingfestigkeit von ungestrahltem und kugelgestrahltem WIG-geschweißtem AlZn<sub>4,5</sub>Mg<sub>2</sub>

#### DISKUSSION

Die hochfeste Aluminiumlegierung AlZn<sub>4,5</sub>Mg<sub>2</sub> kann im geschweißten Zustand eine große Empfindlichkeit gegenüber Spannungsrißkorrosion aufweisen. Durch geschickte Wahl der Schweißparameter kann zwar die Anfälligkeit gegen Spannungsrißkorrosion in Grenzen gehalten werden, jedoch gelingt dies kaum bei maschinellen, technischen Schweißungen, wie aus Untersuchungen an MIG-Schweißungen von der Herstellerfirma bekannt ist und wie das vorliegende Ergebnis der WIG-geschweißten Proben deutlich macht. Schon nach wenigen Tagen brachen die Schweißproben im SprK-Versuch. Die Spannungsrisse beginnen hierbei in der Regel im Überlappungsbereich an der Wurzel der Schweißnähte und verlaufen an der Schweißraupengrenze.

Um die hohe Festigkeit der geschweißten Legierung für Konstruktionen voll ausnutzen zu können, dienten die durchgeführten Untersuchungen dazu, die SprK-Beständigkeit durch Kugelstrahlen der Schweißnähte zu verbessern.

Durch Strahlen mit Glasperlen sollte eine Verdichtung der Oberfläche erzielt werden sowie Zugeigenspannungen abgebaut und Druckeigenspannungen in der Oberfläche erzeugt werden. Glasstrahlperlen ergeben im Gegensatz zu Stahlkugeln keine Oberflächenverunreinigungen.

Es wurden WIG-geschweißte Proben mit Glasperlen von 0,25  $\phi$  mm und 0,84  $\phi$  mm mit verschiedenen Parametern kugelgestrahlt. Dadurch konnte eine erhebliche Standzeitverbesserung im SprK-Versuch erzielt werden. Hierbei war das Strahlgut von 0,84  $\phi$  mm, mit dem höhere Intensitäten erreicht wurden, den kleineren Perlen überlegen.

Außerdem zeigten die mit einfacher Flächenbedeckung gestrahlten Proben eine geringere Streuung in den Standzeiten als die mit zweifacher Bedeckung gestrahlten. Die metallographische Untersuchung nicht gebrochener Proben nach dem SprK-Versuch zeigte jedoch z.T. eine beginnende Korrosion. Um absolute Korrosionsbeständigkeit zu erreichen, sind daher weiterführende Untersuchungen notwendig.

In begleitenden Spannungsmessungen wurden Druckeigenstressungen bis  $-280 \text{ N/mm}^2$  aufgrund der Kugelstrahlbehandlung gefunden. Hierbei liegt das Spannungsmaximum etwa  $0,08 \text{ mm}$  unter der Oberfläche. Zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Eigenstressungen und unterschiedlicher SpRK-Beständigkeit sind weitere Messungen notwendig.

Die Ermittlung der Zeitschwingfestigkeit zeigte, daß die gleiche Strahlbehandlung, die eine erhebliche Verbesserung der SpRK-Beständigkeit bewirkte, auch zu einer Verbesserung der Zeitschwingfestigkeit um mehr als eine Zehnerpotenz gegenüber ungestrahlten Proben führte.

Die Untersuchungen wurden durch das Bundesministerium der Verteidigung gefördert.

Die Kugelstrahlbehandlung wurde im Institut für Bildsame Formgebung in Aachen vorgenommen, Herrn Prof. Dr. R. Kopp und Herrn Dipl. Ing. K.P. Hornauer sei herzlich gedankt, ebenso Herrn Dr. U. Wolfstieg, Bad Herrenalb, der die Eigenstressmessungen durchführte.

#### SCHRIFTTUM

- Potters-Ballotini GmbH (1976), Z. Oberflächentechnik, 10-12, 326  
 Cordier, H., Schippers, M., Polmear, J. (1977), Z. Metallkunde, 68, 280  
 Freudenthal, A.M., Gumbel, E.J. (1954), J. Amer. Statistic Assoc. 49, 575  
 Hanley, W.E. (1976), Galvano Organo, 2, 136  
 Pirner, M., Bichsel, H. (1975), Metall, 29, 275  
 Suss, H., (1962), Corrosion, 1, 17  
 Yu, H.J. Wolfstieg, U., Macherauch, E., (1979), Arch. Eisenhüttenwesen, 50, 219