

## **Bericht 5137/2005**

AiF-Nr. 13.597 N

DVS-Nr. 05.030

### **Optimierung der Verbindungsqualität und Ermittlung von verbesserten Prüfkriterien artfremder Schwarz-Weiß-Bolzenschweißverbindungen**

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung der Urheberschaft der SLV München, NL der GSI mbH, veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München.

Der Bericht enthält 98 Seiten.

September 2005

## Zusammenfassung

Für artfremde Lichtbogenbolzenschweißverbindungen mit Bolzen aus dem Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) an unlegierten Blechen (W-S-Bolzenschweißung) besteht eine bauaufsichtliche Anwendungsbegrenzung auf Bolzen bis  $\varnothing 12$  mm gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z-30.3-6 des DIBt. Feuerfestbolzenschweißungen mit hitzebeständigen Bolzen aus z.B. X15CrNiSi20-12 (1.4828), X15CrNiSi15-21 (1.4841) sowie Nickellegierungen an unlegierten Grundblechen S235 oder S355 werden thermischen Belastungen ausgesetzt.

Das Ziel ist es, den Einfluss relevanter Schweiß- und Randbedingungen auf die Qualität von W-S-Bolzenschweißungen bis 19 mm Durchmesser als Basis einer Zulassungserweiterung über 12 mm hinaus zu ermitteln. Die Schweißqualität ist besonders für das Keramikringschweißen zu untersuchen, das bisher aus Gründen von Versprödungseffekten auch im Bereich Feuerfest ausgeschlossen wurde.

Beim Keramikringbolzenschweißen erfolgt die Schweißausführung mit guter Wulstausbildung, geringer Spritzerneigung und geringer Blaswirkungsneigung, wenn die Hinweise der DVS-Merkblätter 0902 und 0904 eingehalten werden.

Bei den untersuchten Bolzenschweißungen zeigt eine dünn ausgeführte Schmelzzone der Bolzenmitte Vorteile bezüglich der Rissbildung im Schweißgut. Dazu wird im wesentlichen der Überstand entsprechend hoch eingestellt, z.B. bei  $\varnothing 16$  und 19 mm um ca. 1 mm auf einen Wert größer als 4,5 mm. Bei den Verbindungen mit Bolzen 1.4301 werden nur in sehr dicken Schmelzbädern mit mittenorientierter Bolzenanschmelzung Risse festgestellt. Bei den Feuerfestverbindungen ist die Rissbildung beim Bolzenschweißen vom Werkstoff abhängig. Werkstoffe mit hohem Nickelgehalt können auch bei dünnen Schmelzbädern Heißrisse aufweisen. Die Biegeprüfung wird trotz Rissen im Schweißgut aufgrund der guten Zähigkeitseigenschaften der legierten Werkstoffe erfüllt. Bei den Nickellegierungen 2.4851 wird eine Abhängigkeit des Prüfergebnisses von der Bolzencharge festgestellt.

Schliffuntersuchungen zeigen ein inhomogenes martensitisch-austenitisches Schweißgefüge mit stark variierenden Härtewerten zwischen 340 und 580 HV<sub>5</sub> bei den Bolzenwerkstoffen 1.4301 sowie Härtewerte unter 300 HV<sub>1</sub> bei den Feuerfestverbindungen auf. Die Schweißungen weisen ansonsten wenig Makrofehler auf.

Die Bruchlage im Bolzen wird bei Bolzen aus 1.4301 erst nach Anwendung einer Wärmebehandlung zur Verminderung der Wasserstoffversprödung (Soaking) erreicht. Ohne Wärmebehandlung erfolgt der Bruch in der Schweiß- und Wärmeeinflusszone des Bolzens bei Bruchspannungen bis 650 N/mm<sup>2</sup>. Dieses Bruchverhalten konnte auf eine partielle Wasserstoffversprödung martensitischer Gefügezonen zurückgeführt werden. Bei den Feuerfestverbindungen wird keine Wasserstoffversprödung in der Schweißzone festgestellt.

Die Untersuchungen haben ein positives Ergebnis des Keramikringschweißens für alle Durchmesser bei Verwendung trockener Keramikringe aufgezeigt. Die bauaufsichtliche Vorgabe der Schweißausführung unter Schutzgas kann daher zugunsten des Keramikringbolzenschweißens aufgehoben werden. Damit wird ein entscheidender Beitrag für eine erweiterte Zulassung dieser Werkstoffkombinationen geleistet. Die wiederholbare Ausführung artfremder Hubzündungsbolzenschweißungen ist gegeben.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

## Optimierung der Verbindungsqualität und Ermittlung von verbesserten Prüfkriterien artfremder Schwarz-Weiß-Bolzenschweißverbindungen

### Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Vorgehensweise .....	3
3	Stand der Technik / Theorie .....	4
3.1	Anwendungen.....	4
3.1.1	W-S-Bolzenschweißen im Bauwesen .....	4
3.1.2	Feuerfeste Verankerungen .....	5
3.2	Bisherige Untersuchungen .....	5
3.3	Problematik W-S und Feuerfest Bolzenschweißverbindungen .....	6
3.4	Risse.....	7
3.5	Wasserstoffversprödung .....	7
4	Experimentelle Randbedingungen.....	8
4.1	Versuchswerkstoffe, Hilfsmittel .....	8
4.1.1	Bolzenwerkstoffe .....	8
4.1.2	Blechwerkstoffe .....	9
4.1.3	Keramikringe.....	9
4.1.4	Schutzgas .....	9
4.2	Blechabmessungen .....	10
4.3	Schweißstromquellen, Handschweißpistolen, Messwerterfassung.....	10
4.4	Prüfmethoden .....	10
5	Ergebnisse.....	13
5.1	W-S-Verbindung: Bolzen X5CrNi18-10 – Blech unlegiert .....	13
5.1.1	Bewertung und Analyse des Bolzenschweißprozesses mit Keramikring	13
5.1.1.1	Ansicht und Spritzerneigung .....	14
5.1.1.2	Lichtbogenstabilität .....	14
5.1.1.3	Anschmelzverhalten .....	15
5.1.1.4	Blaswirkungsneigung .....	16
5.1.1.5	Zusammenfassung .....	17
5.1.2	Optimierung der Schweiß- und Randbedingungen.....	17
5.1.2.1	Mechanische Prüfungen .....	17
5.1.2.2	Variation der Schweißparameter .....	18
5.1.2.2.1	Schweißenergie .....	18
5.1.2.2.2	Hubhöhe .....	19
5.1.2.2.3	Eintauchtiefe .....	20
5.1.2.2.4	Eintauchgeschwindigkeit .....	20
5.1.2.2.5	Günstige Schweißparameter für das Keramikringschweißen .....	21

5.1.2.3	Variation der Randbedingungen .....	21
5.1.2.3.1	Keramikring.....	21
5.1.2.3.2	Al-Kugel .....	23
5.1.2.3.3	Schutzgas .....	23
5.1.2.3.4	Schweißen mit Magnetspule.....	24
5.1.2.3.5	Empfehlung für Schweißparameter zum Schutzgasbolzenschweißen ....	25
5.1.3	Zugprüfungen an optimierten Bolzenschweißungen.....	25
5.1.3.1	Bruchkraft und Bruchlage .....	26
5.1.3.2	Einfluss von Schweißfehlern.....	27
5.1.4	Metallografische Untersuchungen .....	27
5.1.4.1	Gefügebeurteilung .....	27
5.1.4.2	Härteprüfungen.....	28
5.1.4.3	Rissanfälligkeit.....	29
5.1.5	Ermittlung der Bruchursachen optimierter Schweißungen.....	30
5.1.5.1	REM-Bruchflächenuntersuchungen.....	30
5.1.5.2	Nachweis der Wasserstoffversprödung durch Soaking .....	31
5.1.5.3	Möglichkeiten zur Vermeidung der Bruchlage Schweißzone .....	32
5.1.6	Zusammenfassung .....	32
5.2	Bolzen Feuerfest – Blech unlegiert.....	33
5.2.1	Geeignete Schweiß- und Randbedingungen .....	33
5.2.2	Zugprüfungen und Bruchverhalten .....	34
5.2.3	Metallografische Untersuchungen .....	34
5.2.3.1	Gefüge.....	35
5.2.3.2	Härte.....	35
5.2.3.3	Rissneigung .....	35
5.2.3.4	REM-Bruchflächenuntersuchungen.....	35
5.2.3.5	Bolzenschweißneigung.....	36
5.2.3.6	Zusammenfassung .....	37
6	Qualitätsanforderungen gemäß DIN EN 729 – Diskussion.....	38
7	Zusammenfassung .....	40
8	Schrifttum .....	44
9	Anhang .....	46
9.1	Tabellen.....	46
9.2	Bilder .....	58

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke e.V.“ (AiF-Nr. 13.597 N) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS unterstützt. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Der Schlussbericht zu dem Forschungsvorhaben ist von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München, Niederlassung der GSI mbH zu beziehen.

Unser Dank richtet sich auch an folgende Firmen, für die Unterstützung der Forschungsarbeit: Bolzenschweißtechnik bsk & BTV GmbH (Köln), Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH (Wörthsee-Ettersschlag), Köster & Co GmbH (Ennepetal), Nelson Bolzenschweiß-Technik GmbH & Co. KG (Gevensberg) und AS Schöler + Bolte Bolzenschweiß-Systeme GmbH (Witten) sowie an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.

München, 15.09.2005

  
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. D. Böhme