

Bericht 5154/2010

AiF-Nr. 15.564N

DVS-Nr. 1.061

Untersuchung zur Vermeidung der Wasserstoffversprödung beim Lichtbogenbolzenschweißen an Stahlwerkstoffen

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 100 Seiten.

Juni 2010

Arbeitsplanänderungen des projektbegleitenden Ausschusses

Aufgrund der teils widersprüchlichen Ergebnisse bei der Heißextraktion wurden Schweißversuche an geglühten Materialien sowie verschiedene Wärmenachbehandlungen in das Arbeitsprogramm aufgenommen. Reduziert wurde dafür der Arbeitspunkt Detektierung der Wasserstoffversprödung durch Prozessüberwachung.

Zusammenfassung

In diesem Projekt werden die Ursachen und Auswirkungen gelegentlich erkannter Versprödungseffekte an Bolzenschweißungen mit Hubzündung der Durchmesser 16 bis 22 mm an gebräuchlichen Werkstoffkombinationen ermittelt. Mit Hilfe der Heißextraktionsmethode wird dabei der Einfluss des Keramikringes, der Grundmaterialien Bolzen und Blech sowie die Oberflächenvorbehandlung auf den Wasserstoffgehalt der Schweißproben und deren Auswirkungen auf das Tragverhalten bestimmt.

Die Heißextraktion der Bolzenschweißproben bei 1040 °C mit der Messanlage Typ Rosemount (Trägergas Stickstoff) an der SLV Duisburg ergab Wasserstoffgehalte von im Mittel 1 bis 1,2 ppm bei artgleichen Bolzenschweißungen an dem gebräuchlichen Bolzenwerkstoff S235 (Streubereich: 0,5 bis 3,5 ppm). Die höheren Werte zeigen sich an Schweißungen an dem Blechwerkstoff S355. Bei artfremden Verbindungen mit einem Fügepartner aus X5CrNi18 10 ist mit noch höheren H₂-Gehalten zwischen 2 und 3 ppm in den Schweißproben (Streubereich: 0,5 bis 6 ppm) zu rechnen. An den legierten Ausgangsmaterialien sind Wasserstoffgehalte zwischen 1 und 6 ppm ermittelt. Höhere H₂-Gehalte zeigen verunreinigte Werkstoffe z.B. in einer Zunderschicht (+0,5 ppm). Umfangreiche Versuche an unterschiedlichen Blechoberflächen sowie in einer Klimakammer bei 92% relativer Feuchtigkeit ausgelagerten Keramikringen lassen dennoch keinen eindeutigen Einfluss dieser äußeren Randbedingungen auf den Wasserstoffgehalt der Schweißprobe erkennen. Dieser befindet sich in dem durch die Materialien vorgegebenen Streubereich.

Die Bolzenschweißungen an feuchtigkeits- bzw wasserstoffarm geglühten Bolzen, Blechen und Keramikringen führten ebensowenig wie Schutzgasbolzenschweißungen zu einer Verringerung des Wasserstoffgehaltes gegenüber den Referenzschweißungen. Zudem haben sich an mittig geteilten Schweißproben deutliche Unterschiede in den H₂-Gehalten zwischen den beiden Probenhälften ebenso wie bei den Grundwerkstoffen z.B. innerhalb einer Blechtafel oder eine Bolzencharge ergeben. Der Wasserstoffgehalt der Grundwerkstoffe spiegelt sich angenähert in der Schweißprobe wieder. Eine zusätzliche Wasserstoffbeladung der Schmelze durch den äußerlich beeinflussten Lichtbogenprozess hat sich nicht gezeigt. Nur bei extremem Feuchtigkeitsangebot wie z.B. bei wassergetränkten Keramikringen oder starker Oberflächenbenetzung durch Feuchtigkeit oder Öl wird das Tragverhalten der Schweißungen infolge großer Poren und Lunken erheblich gemindert.

Anhand von REM-Untersuchungen werden an einigen Bruchflächen getrennte Bereiche mit Wabenbruchanteil einerseits von Sprödbuchgebieten andererseits unterschieden. Andere Proben zeigen ein eher homogenes Bruchbild mit Sprödbuchmerkmalen eines Wasserstoffeinflusses, deren Bruchlage häufig in der WEZ des Bolzens oder des Bleches je nach Werkstoffkombination zu finden ist. Bei Bruchlagen in der Schweißzone ist vorwiegend ein duktiler Bruchverhalten ohne Wasserstoffversprödung, dafür aber mit kleineren Fehlstellen festzustellen.

Eine Versprödung ist somit in den Grundwerkstoffen vor allem in der WEZ des Bolzens zu erkennen. Im Falle kaltverformter Bolzen S235 lässt sich in der WEZ zudem eine partielle Entfestigung feststellen. In keinem Fall war diese Versprödung die Bruchursache; wie Zeitstandversuche und Versuche an vorgespannten Bolzen bestätigten. Eine Verminderung ist hauptsächlich durch Begrenzung der H₂-Gehalte von Bolzen und Blech, z.B. auf Werte unter 1 ppm möglich. Ein Ausfall der in der Praxis eingesetzten Bolzenschweißungen aufgrund von Wasserstoffversprödung kann bei Ausführung nach dem Stand der Technik hiermit ausgeschlossen werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Vorgehensweise	5
2.1	Aufgabenstellung.....	5
2.2	Versuchsprogramm	5
3	Stand der Technik / Theorie	7
3.1	Keramikringbolzenschweißen.....	8
3.2	Ver sprödungsproblematik beim Bolzenschweißen	8
3.3	Einstellparameter.....	10
3.4	Einschränkende Faktoren.....	10
4	Experimentelle Randbedingungen.....	12
4.1	Versuchsdurchführung	12
4.1.1	Schweißanlagen	12
4.1.2	Versuchsdurchführung	12
4.1.3	Schweiß- und Randbedingungen	13
4.2	Werkstoffe und Abmessungen	13
4.3	Prüfmethoden	14
4.3.1	Sichtprüfung	14
4.3.2	Biegeprüfung	14
4.3.3	Zugversuch.....	14
4.3.4	Durchstrahlungsprüfung	15
4.3.5	Schliffuntersuchungen	15
4.3.6	Heißextraktion und Proben transport.....	15
4.4	Befeuchtung der Keramikringe	16
5	Ergebnisse	17
5.1	Einfluss des Keramikrings auf den Wasserstoffgehalt unterschiedlicher Werkstoffkombinationen beim Hubzündungs bolzenschweißen	17
5.1.1	Kristallwassergehalt der Keramikringe	17
5.1.2	Befeuchtung der Keramikringe in einem Wasserbad.....	18
5.1.2.1	Wasserstoffentgasung bei der Heißextraktion (HE)	18
5.1.2.2	Wasserstoffgehalte von Schweißproben mit Keramikringauslagerung von 2 h und 24 h im Vergleich zum kellergelagerten trockenen Keramikring	19
5.1.2.3	Einfluss der Keramikringauslagerung von 2 h und 24 h im Wasserbad auf die Bolzenschweißqualität, ermittelt anhand von Sichtprüfung und Einbrandform	20
5.1.3	Vergleich der Auslagerungsart kryogen und Raumtemperatur auf den Wasserstoffgehalt.....	21
5.1.4	Befeuchtung der Keramikringe in der Klimakammer	22

5.1.4.1	Einfluss auf den Wasserstoffgehalt an Bolzen der Durchmesser 16 mm	22
5.1.4.2	Einfluss auf den Wasserstoffgehalt an Bolzen der Durchmesser 22 mm	24
5.1.5	Einfluss des Keramikrings auf den H ₂ -Gehalt im Vergleich mit Schutzgas.....	25
5.1.6	Fazit.....	25
5.2	Materialeinflüsse auf den Wasserstoffgehalt in Abhängigkeit von Werkstoffkombination, Blechoberfläche und Wärmebehandlung	26
5.2.1	Wasserstoffgehalte der verwendeten Materialien.....	26
5.2.2	Wasserstoffgehalte artgleicher und artfremder Bolzenschweißungen.....	27
5.2.3	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung des Bleches auf den H ₂ - Gehalt.....	28
5.2.4	Einfluss der Wärmeverbehandlung von Bolzen und Blech auf den Wasserstoffgehalt der Bolzenschweißung.....	30
5.2.5	Fazit.....	30
5.3	Auswirkungen unterschiedlich wasserstoffbeladener Schweißproben auf Tragverhalten und Schweißfehler.....	31
5.4	Bruchverhalten und Rissanfälligkeit unterschiedlich wasserstoffbeladener Bolzenschweißungen	33
5.4.1	REM-Untersuchungen	33
5.4.2	Bruchlage	35
5.4.3	Rissbeurteilung im Mikroschliff, Härtemessung.....	36
5.5	Analyse und Bewertung des Schweißprozesses bei unterschiedlichen Randbedingungen	38
5.6	Zeitstandverhalten	38
6	Diskussion	39
7	Darstellung: Forschungsziel - angestrebte Forschungsergebnisse - erzielte Forschungsergebnisse, Verwendung der Zuwendung.....	41
8	Zusammenfassung.....	42
9	Schrifttum	46
10	Anhang.....	48
10.1	Tabellen.....	48
10.2	Bilder	66

1 Einleitung

Bei Verfahrensprüfungen nach DIN EN ISO 14555 /1/ in der bauaufsichtlichen Praxis wurden bisher partielle Versprödungen des Schweißgutes an Lichtbogenbolzenschweißungen in einigen Fällen erkannt. Dies betrifft die gebräuchliche Werkstoffgruppe der unlegierten Stähle, die artgleich oder artfremd (in Kombination mit austenitischen CrNi-Stählen) verschweißt werden. Versprödungseffekte zeigten sich in der Bruchebene (Schweißbereich) und wurden anhand von REM-Bruchflächenuntersuchungen als wasserstoffinduziert diagnostiziert /2, 3/. Bevorzugt betroffen sind davon Bolzen größerer Durchmesser (13 bis 22 mm), die z.B. als Kopfbolzendübel serienweise im Bauwesen (Hochbau, Verbundbau, Brückenbau) eingesetzt werden. Mit der Versprödung des Schweißgutes ist eine mehr oder weniger starke Beeinträchtigung der Tragfähigkeit der Bolzenschweißung verbunden, wie statische Belastungstests mit Bruchlage in der Schweißzone aufzeigen.

Es stellen sich somit Fragen nach a) den Möglichkeiten der Vermeidung von Versprödungen bei dem weit verbreiteten und sehr wirtschaftlichen Lichtbogenbolzenschweißen und b) den Auswirkungen versprödeter Bolzenschweißungen auf das statische Tragverhalten bestehender Bauwerke.

In diesem Forschungsprojekt werden ausgehend von vielen Anfragen von Anwendern und Geräteherstellern die Ursachen der Wasserstoffversprödung beim Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung näher untersucht.

Dabei wird die Versprödungsneigung der Bolzenschweißung an gebräuchlichen artgleichen und artfremden Werkstoffkombinationen in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen näher bestimmt. Dies erfolgt durch gezielte Variationen von Keramikringen und den verwendeten Materialien für Bolzen und Blech, u.a. mit Hilfe einer Klimakammer. Derart variierte Bolzenschweißungen werden anhand der Heißextraktionsmethode zur exakten Wasserstoffbestimmung verglichen. Die Ergebnisse sollten anhand von Bruchflächen- sowie Schliiffuntersuchungen bestätigt werden, um die maßgeblichen Einflüsse auf die Versprödungsneigung gesichert zu erkennen. Erst dann lassen sich daraus Maßnahmen zur Vermeidung der Versprödung erarbeiten. In diesem Zusammenhang sind die Auswirkungen versprödend ausgeführter Bolzenschweißungen auf das statische Tragverhalten bei verschiedenen Belastungen (Zeitstandverhalten) von Interesse.

Bei der Frage nach der Herkunft der beobachteten Versprödung an Bolzenschweißverbindungen werden zusätzlich Schweißversuche an wärmebehandelten Ausgangsmaterialien vorgenommen. Der Ausgangsgedanke dabei beruht auf der plausiblen Annahme, dass bei geringstem Wasserstoffangebot auch mit der niedrigsten Wasserstoffextraktion und damit der geringsten Versprödungsneigung zu rechnen ist.

Nach Möglichkeit soll ein quantitativer Zusammenhang zwischen Wasserstoffgehalt der Schweißprobe und der Zugfestigkeit bzw. dem Bruchverhalten erarbeitet werden.