

Bericht 5159/2011

AiF-Nr. 16.027N

DVS-Nr. 9.048

Bewertung und Optimierung der Tragfähigkeit von Gewindebolzenschweißverbindungen unter Ermüdungsbeanspruchung

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

Der Bericht enthält 179 Seiten.

Juli 2011

Arbeitsplanänderungen des projektbegleitenden Ausschusses

Anlässlich der PbA-FA9-Sitzung am 04./05.05.2010 wurde einer Umstellung der Arbeitsschwerpunkte aufgrund umfassender Anregungen auch in den vorhergehenden PbA-Sitzungen entgültig zugestimmt. Die Umstellung wurde mit einem Schreiben vom 25.10.2010 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie bewilligt.

Aufgenommen wurden in diesem Bericht als Arbeitspunkt 5 folgende Untersuchungen des Fraunhofer LBF Darmstadt (Leistungen Dritter):

- Berechnung bzw. Modellierung der Bolzenschweißverbindungen mit dem Kerbspannungskonzept.

Die Umstellung erfolgt kostenneutral, wobei bei folgenden Arbeitspunkten des Langantrages Kürzungen vorgenommen wurden:

- 3.2.2 B) und C): Reduzierung der Schwingversuche bei den Nachbehandlungsverfahren PIT und Plastifizierung, grundsätzlich nicht für M6 geeignet,
- 3.2.2 B) und C): Reduzierung der Schwingversuche mit vorgespannten Bolzen auf einen Testlauf bei M12, ebenfalls nicht für M6 geeignet.

Im Vorfeld dieser Umstellung wurde bereits durch den PbA der Hauptarbeitsschwerpunkt auf den M12 Gewindebolzen gelegt. Dabei wurde vor allem die Untersuchung eines höherfesten Bolzens (8MnSi7) in den Arbeitsplan aufgenommen, wogegen die Varianten beim M6 Bolzen reduziert wurden. Ebenfalls als wenig geeignet hat sich die Variation mit unterschiedlicher Anschmelzung bzw. Schweißenergie erwiesen, da dies quasi in der Wulstformung enthalten ist.

Zudem wird bei Punkt 3.2.2 D des Langantrages zur Ermittlung der Schweißeigenstressungen nur die röntgenografische Methode zugunsten einer größeren Probenzahl anstelle der für diese Anwendung umstrittenen Bohrlochmethode eingesetzt.

Zusammenfassung

Das Ermüdungsverhalten von M6 und M12 Gewindebolzenschweißungen an unlegierten Stählen unterschiedlicher Festigkeit wird durch umfangreiche Schwingprüfungen zur Generierung von Nennspannungswöhlerkurven sowie lokalen Berechnungen nach dem Kerbspannungskonzept für zwei Wulstformen ermittelt. Die Schwingbrüche beginnen an oberflächennahen Fehlstellen an den Nahtübergängen des Wulstes zum Bolzen (70 % Anteil) oder zum Blech.

In Abhängigkeit des Schweißbadschutzes bildet sich entweder ein hoher Wulst beim Keramikringbolzenschweißen oder ein kehlnahtförmiger Wulst beim Schutzgasbolzenschweißen aus. Die in Wöhlerkurven bewerteten Schwingergebnisse zeigen eine bessere Ermüdungsfestigkeit der Schutzgasschweißungen im Vergleich zu Keramikringschweißungen auf. Dagegen verbessert sich die Schwingfestigkeit kaum beim Einsatz von höherfesten Materialien wie z.B. einem 8MnSi7 Bolzen oder einem S690Q Blech. Die erstmalige Erprobung von Nachbehandlungen durch das PIT-Verfahren und durch Plastifizierung der gesamten Schweißzone brachte insgesamt keine eindeutige Verbesserung der Schwingfestigkeit, die den Aufwand der Nachbehandlung rechtfertigt.

Die Summenbilanz aus vielen Versuchsreihen ergab eine mögliche Zuordnung des M12 Keramikringbolzenschweißens zur FAT-Klasse 71 oder 80 bei einem Mittelwert des Bezugswertes der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ von 81 MPa, wogegen die M12 Schutzgasbolzenschweißungen mindestens die FAT-Klasse 90 bei einem Mittelwert $\Delta\sigma_C$ von 107 MPa erreichen, wenn man von den niedrigsten Werten einer Versuchsgruppe ausgeht. Auf dieser Basis wird die Kerbfallkategorie gemäß Eurocode 3 oder anderen Regelwerken festgelegt. Die Streuungen in den Schwingspielzahlen konnten bei gleichem Lasthorizont teilweise auf Unterschiede der Schweißausführung, aber auch der Probeneinspannung mit einer geringen Winkelstellung des Bolzens zurückgeführt werden. Bei den M6 Bolzenschweißungen ist aufgrund der dünnen Bleche (< 3 mm) eine Klassifizierung nicht sinnvoll.

Eigenstressen sind bei Proben ohne Nachbehandlung in einem Bereich zwischen $\sigma = -100 \text{ N/mm}^2$ bis $\sigma = +300 \text{ N/mm}^2$ an den Wulstoberflächen vorhanden. Bei PIT-behandelten Proben werden Zugeigenstressen in Druckeigenstressen in einem Bereich zwischen $\sigma = -150 \text{ N/mm}^2$ bis $\sigma = -400 \text{ N/mm}^2$ umgewandelt. Allerdings können bei der PIT-Behandlung entstandene neue Kerben die Schwingfestigkeit beeinträchtigen. Diese Eigenstressenzustände wurden für beide Wulstformen mit Hilfe des Programms Sysweld auf der Basis einer modellierten Ersatzwärmequelle nach Goldak berechnet. Danach weisen die Eigenstressen ein Maximum in der Wärmeeinflusszone (WEZ) des Bleches unterhalb der Schweißzone auf. Ein Vergleich dieser Berechnungen mit Messungen durch Neutronendiffraktometrie ergab eine gute Übereinstimmung der radialen Spannungsponenten.

Die lokalen Kerbspannungsberechnungen bestätigen eindeutig den Versagensursprung an den Nahtübergängen. Es ergibt sich eine lokal ertragbare Kerbspannungsamplitude von $\sigma_k = 257 \text{ MPa}$ für die Schweißung mit hohem Wulst und von $\sigma_k = 268 \text{ MPa}$ für die Kehlnahtform. Dieser geringe Unterschied lässt eine Bewertung in einer gemeinsamen Wöhlerlinie bei einem σ_k von 267 MPa zu.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Vorgehensweise	6
2.1	Aufgabenstellung.....	6
2.2	Versuchsprogramm	6
3	Stand der Technik / Theorie.....	8
3.1	Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung	9
3.2	Bisherige Schwingfestigkeitsuntersuchungen am Bolzenschweißungen....	9
3.3	Eigenspannungen.....	10
3.4	Schweißsimulation mit der Software Sysweld	11
3.4.1	Einführung in die Schweißsimulation.....	11
3.4.2	Software-Tools Sysweld und Visual Mesh.....	12
3.5	Kerbspannungskonzept.....	12
4	Experimentelle Randbedingungen.....	14
4.1	Schweißanlagen	14
4.2	Versuchsdurchführung	14
4.3	Werkstoffe und Abmessungen	15
4.4	Nachbehandlung der Bolzenschweißungen	15
4.5	Prüfmethoden.....	16
4.5.1	Sichtprüfung	16
4.5.2	Biegeprüfung	16
4.5.3	Statischer Zugversuch.....	16
4.5.4	Schwingprüfung.....	16
4.5.5	Eigenspannungsermittlung	17
4.5.6	Schliffuntersuchungen	18
4.5.7	Bruchflächenuntersuchung.....	18
5	Ergebnisse	19
5.1	Ermittlung von Ermüdungskennwerten nach dem Nennspannungskonzept für M12 Bolzenschweißungen.....	19
5.1.1	Grundlegende Betrachtungen, Wöhlerkurven	19
5.1.2	Bolzenschweißvariante Keramikring ohne Nachbehandlung, Gruppe 01	20
5.1.3	Bolzenschweißvariante Schutzgas ohne Nachbehandlung, Gruppe 02	22
5.1.4	Einfluss der PIT-Nachbehandlung beim Keramikring- und Schutzgasbolzenschweißen, Gruppe 03	23
5.1.5	Einfluss einer Plastifizierung als Nachbehandlung, Gruppe 04	25

5.1.6	Bruchverhalten der ermüdeten Bolzenschweißungen	26
5.1.6.1	Bruchlage bei Schwingprüfungen	26
5.1.6.2	REM-Untersuchung der Bruchfläche	27
5.1.7	Vergleich der Schwingfestigkeit und Kerbklassenermittlung	28
5.1.8	Zusammenfassung Schwingprüfungen an M12 Bolzenschweißungen.....	29
5.2	Ermittlung von Ermüdungskennwerten nach dem Nennspannungs- konzept für M6 Bolzenschweißungen, Gruppe 05	30
5.3	Röntgenografische Eigenspannungsermittlung	31
5.4	Eigenspannungsberechnungen mit Sysweld	33
5.4.1	Bauteilanalyse und schweißgerechte Vernetzung	33
5.4.2	Kalibrierung der parametrisierten Ersatzwärmequelle	34
5.4.3	Prozesseinfluss und Temperaturverlauf	35
5.4.4	Berechnete Eigenspannungen im Bauteil.....	35
5.4.4.1	Entstehung der Eigenspannungen	35
5.4.4.2	Einfluss der Wulstgeometrie	36
5.4.4.3	Optimierung der Vernetzungsstrategie	37
5.4.4.4	Einfluss der Werkstoffe.....	37
5.4.4.5	Bewertung anhand der Vergleichsspannungen Von-Mises und Tresca ...	38
5.4.5	Simulation der Schweißnahtplastifizierung	38
5.4.6	Vergleich der Berechnung mit Messergebnissen	39
5.5	Berechnungen nach dem Kerbspannungskonzept	40
5.5.1	Zusätzliche experimentelle Untersuchungen	40
5.5.1.1	Dehnungsanalyse an einer eingespannten Schweißprobe.....	40
5.5.1.2	Auswirkung der Einspannung auf die Schwingfestigkeit.....	41
5.5.2	Numerische Untersuchungen	41
5.5.2.1	Aufbau der FE-Modelle.....	41
5.5.2.2	Abgleich der FE-Modelle mit der Dehnungsanalyse.....	42
5.5.2.3	Berechnung der Kerbspannungen an versagenskritischen Stellen	42
5.5.2.4	Einfluss von Schweißnahtunregelmäßigkeiten	42
5.5.3	Bewertung der Ergebnisse	43
5.5.3.1	Bewertung anhand von Kerbspannungswöhlerlinien.....	43
5.5.3.2	Bewertung der Blechvorspannung.....	45
5.5.4	Wöhlerlinienvergleich mit Literaturdaten.....	45
6	Diskussion	47
7	Darstellung: Forschungsziel - angestrebte Forschungsergebnisse - erzielte Forschungsergebnisse, Verwendung der Zuwendung.....	49
8	Zusammenfassung.....	50
9	Schrifttum	55
10	Anhang	58
10.1	Liste der Abkürzungen.....	58
10.2	Bilder	59
10.3	Tabellen.....	103

1 Einleitung

Das Lichtbogenbolzenschweißen eignet sich zum schnellen Anschweißen von stiftförmigen Bauteilen wie Gewinde- oder Kopfbolzen mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik. Je nach Schweißbadschutz – zur Wahl stehen Keramikringe, Schutzgase oder der Verzicht auf einen Schweißbadschutz – wird ein unterschiedliches Wulstaussehen der beim Eintauchen verdrängten Schmelze rund um den Bolzenschaft generiert. In Europa gehen die Meinungen z.B. über das Wulstaussehen je nach Anwendung ländertypisch auseinander. In Deutschland hat sich zur einfacheren Einhaltung der baurechtlichen Vorschriften ein hoher Wulst bei Nutzung des Keramikrings sehr bewährt. Diese Wulstform ist bei der Anwendung von Schutzgas nicht einstellbar, sondern es kann bei geeigneter SchweißEinstellung ein kehlnahtförmig aussehender Schweißwulst erzeugt werden. In Abhängigkeit von der Materialkombination wirkt diese Wulstform an den Nahtübergangstellen glatter und weniger fehlerbehaftet. Unabhängig davon zeigen fachgerecht aufgebrauchte Bolzenschweißungen eine hohe Verbindungsqualität, bei der die Schweißverbindung bei statischer Belastung mehr Last ertragen kann als das verwendete Grundmaterial von Bolzen und Blech /1/.

Über das Ermüdungsverhalten der unter einer zyklisch-mechanischen Zugbelastung stehenden Schweißverbindungen von Gewindebolzen an unlegierten Stahlwerkstoffen im mittleren Durchmesserbereich (M12) liegen bisher kaum Erfahrungen vor. Repräsentativ für den gesamten Durchmesserbereich wird in dieser Untersuchung die offene Fragestellung der Bolzenschweißindustrie nach der besseren Wulstform als maßgeblichen Einflussfaktor auf das Ermüdungsverhalten von Bolzenschweißungen grundlegend unter Zuhilfenahme von Schwingfestigkeitskennwerten ($\Delta\sigma_C$, $\sigma_{A,nom}$) nach dem Nennspannungsprinzip (DIN 15100 /2/, Eurocode 3 /3/) geklärt. Von Interesse sind dabei auch die Wirkungen von Nachbehandlungsmethoden zum Abbau von Eigenspannungen, erstens an der Wulstoberfläche mit Hilfe des PIT-Verfahrens und zweitens den gesamten Querschnitt betreffend durch Plastifizierung der Schweißnaht bei Werten oberhalb der Streckgrenze. Beide Verfahren werden erstmalig an Bolzenschweißungen mit unterschiedlicher Wulstausführung an unlegierten Werkstoffen S235 und S355 untersucht. Die Tragfähigkeit der Schweißverbindungen bei zyklischer Beanspruchung wird anhand von Wöhlerkurven bewertet.

Ebenfalls erstmalig wird das Kerbspannungskonzept als rechnerische Methode zur Bestimmung von Kerbspannungswöhlerlinien auf die schwinggeprüften Bolzenschweißungen mit unterschiedlichen Wulstformen angewendet. Der Nutzen dabei liegt in einer zusätzlichen Beurteilung der erzielten Ergebnisse und Ermittlung des lokalen Beanspruchungszustandes direkt an den versagenskritischen Stellen bzw. Kerben der Schweißverbindung. Hierfür werden im Gegensatz zum Nennspannungs- und Strukturspannungskonzept die durch die Nahtgeometrie auftretenden lokalen Einflüsse berücksichtigt. Die Berechnung der Kerbspannung erfolgt mittels der Finite-Elemente Methode, wobei linear-elastisches Materialverhalten vorausgesetzt wird. In den Berechnungsmodellen wird die Schweißnahtdetailgeometrie komplett auf der Basis von Schliifuntersuchungen zur Einbrandgeometrie, aber dennoch vereinfacht ohne die Vielzahl individueller schweißtechnisch bedingter Kerben, vor allem an den Übergängen einer realen Bolzenschweißung dargestellt. Es wird versucht, die am Nahtüber-

gang und in der Wurzel der Schweißverbindung vorliegenden Kerben durch einen fiktiven Radius (Referenzradius) abzubilden.

Als weiteres Novum der Forschung an Bolzenschweißverbindungen werden Eigenspannungszustände sowohl mit röntgenografischer Messmethode an der Oberfläche als auch testweise mit der Neutronendiffraktometrie innerhalb der Schweißung ermittelt. Bedingt durch die hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten der Schmelze aufgrund der kurzzeitigen Wärmeeinbringung liegen über die Eigenspannungen der Bolzenschweißungen keinerlei Erkenntnisse vor. Auf Basis dieser Messungen wird mit geeigneten numerischen Methoden ein erstes Modell zur Eigenspannungssimulation erstellt und auf die untersuchten Wulstgeometrien angewendet.

Obwohl die exakte Dimensionierung von Bolzenschweißverbindungen ein enormes wirtschaftliches Potential in sich birgt, wird diese meist durch unzureichende Kenntnisse über eine optimierte Wulst- und Anschmelzungsform verhindert. Beispielsweise werden im Ermüdungsnachweis ohne weitere Differenzierung ungünstige Kerbfälle angesetzt.

Dieses Projekt gibt Aufschluss über das Ermüdungsverhalten von Bolzenschweißverbindungen mit unterschiedlicher Wulstform aufgrund des unterschiedlichen Schweißbadschutzes. Die erzielten Ergebnisse gelten für den beschriebenen Fall einer zyklisch-mechanischen Beanspruchung. Das etwas bessere Tragverhalten fachgerecht ausgeführter Schutzgasbolzenschweißungen bei schwingender Beanspruchung sollte jedoch nicht zwangsläufig zu einem Ersatz der meist bei statischer Belastung eingesetzten Keramikringschweißungen führen.