

Bericht

5118/2003

Nr. 07 03/685 60/718/00/1144/01/1145/02

Nr. 07 03/892 60/719/00/1146/01/1147/02

Verbesserung der Schweißqualität beim Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung von Stahl – und Aluminiumwerkstoffen

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

Der Untersuchungsbericht enthält 112 Seiten.

Juli 2003

Verbesserung der Schweißqualität beim Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung von Stahl – und Aluminiumwerkstoffen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorgehensweise	3
2.1	Aufgabenstellung	3
	Versuchsprogramm	4
3	Stand der Technik / Theorie	5
3.1	Arbeitsweise Kontaktschweißen.....	5
3.2	Arbeitsweise Spaltschweißen.....	6
3.3	Verfahrensvergleich	6
3.4	Einstellparameter	7
	3.4.1 Stromquelle.....	7
	3.4.2 Schweißpistole/Schweißkopf	8
	3.4.3 Stromkreis	8
3.5	Stand der Forschung.....	9
3.6	Anwendungen	12
3.7	Problemstellungen bei Spitzenzündung	13
3.8	Bewegungsmechanik	14
4	Experimentelle Randbedingungen	16
4.1	Versuchsdurchführung	16
	4.1.1 Schweißanlagen	16
	4.1.2 Versuchsdurchführung.....	16
	4.1.3 Schweiß- und Randbedingungen.....	17
4.2	Meßeinrichtungen	17
4.3	Werkstoffe und Probenabmessungen	18
4.4	Prüfmethoden.....	18
4.5	Hochgeschwindigkeitsvideokamera	19

5	Ergebnisse	20
5.1	Untersuchungen der Bewegungsvorrichtungen	20
5.1.1	Mechanische Kenngrößen handelsüblicher Schweißvorrichtungen	20
5.1.2	Weitere Bewegungssysteme	24
5.2	Verfahrenstechnische Variationen an unlegiertem Stahl	26
5.2.1	Optimierung der Schweißbedingungen an Stahlbolzen der Durchmesser M 6	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.2.2	Einfluss der Randbedingungen	37
5.2.3	Schweiß- und Prüfergebnisse an unlegierten Stahlbolzen der Durchmesser M 8 und M 4	40
5.2.4	Höherfester Stahl	41
5.3	Verfahrenstechnische Variationen an legiertem Stahl	41
5.3.1	SchweißEinstellung und Randbedingungen	41
5.3.2	Prüfergebnisse optimierter Kontaktschweißungen an legierten Stahlbolzen	42
5.4	Verminderung der Schweißspritzer	43
5.4.1	Schutzgas	43
5.4.2	Flüssigkeitsbenetzung	44
5.5	Verfahrenstechnische Variationen an EN AW-ALMg3	45
5.5.1	SchweißEinstellung und Randbedingungen	45
5.5.2	Prüfergebnisse optimierter Spaltschweißungen an Al-Bolzen	46
5.6	Werkstofftechnische Untersuchungen	47
5.6.1	Unlegierter Stahl	47
5.6.2	Legierter Stahl	48
5.6.3	Aluminiumwerkstoffe	48
5.7	Wiederholbarkeit	50
5.8	Qualitätssicherung	51
6	Wirtschaftliche Bedeutung	52
7	Zusammenfassung	53
8	Schrifttum	56
9	Anhang	56
9.1	Tabellen	59
9.2	Bilder	68

1 Zusammenfassung

Das Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung wurde an Stahl- und Aluminiumwerkstoffen im Durchmesserbereich zwischen M 4 und M 8 untersucht. Bei diesem wirtschaftlichen Fügeverfahren wird die Schweißqualität u.a. durch Schweißspritzer vermindert. Dabei werden Schmelztropfen in die Schweißumgebung verspritzt. Beim Verbinden der Schmelzbäder fehlt dieses Material zum vollständigen Auffüllen des Schweißspaltes. Teilweise werden sehr große Bindefehler beobachtet, die die Verbindungsqualität und damit die praktische Anwendung des Verfahrens erheblich beeinträchtigen.

Aber auch die Bolzenbewegung beeinflusst den Schweißablauf beim notwendigen Verbinden der Schmelzbäder im flüssigen Zustand der Schmelze. Der Bewegungsablauf wird anhand verschiedener handelsüblicher Geräte und eigener Bewegungseinrichtungen der Forschungsstelle analysiert. Dazu tragen Beobachtungen mit einer Hochgeschwindigkeitsvideokamera in erheblichem Umfang bei.

Beim Spitzenzündungsverfahren werden zwei Varianten unterschieden: das Spaltschweißen und das Kontaktschweißen. Für beide Varianten werden mechanische Kenngrößen und deren Einfluss auf das Schweißverhalten anhand der Auftreffgeschwindigkeit und der Lichtbogenbrennzeit ermittelt.

Beim Spaltschweißen werden in den Schweißgeräten Federkräfte durch Vorspannung und Aufsetzen des Bolzens auf dem Blech in Höhe von 20 bis 40 N bei den leichteren Schweißpistolen und 20 bis 80 N bei den schwereren Schweißköpfen erzeugt. Die Federkräfte beschleunigen beim Auslösen des Vorganges den Bolzen auf Geschwindigkeiten zwischen 400 und 800 mm/s je nach Einstellung.

Beim Kontaktschweißen wird der Bolzen aus der Ruhelage heraus in Richtung des Bleches beschleunigt. Dazu verfügen die Kontaktschweißgeräte über höhere Federkräfte zwischen 40 und 140 N je nach Anwendungsfall. Die erreichten Geschwindigkeiten sind mit Werten zwischen 300 und 650 mm/s deutlich niedriger als beim Kontaktschweißen.

Bei beiden Varianten verursacht das Auftreffen der bewegten Pistolenmasse auf ein unterstütztes Blech ein Rückprellen um teils mehrere Millimeter in Abhängigkeit von der kinetischen Energie der Kolbenmasse. Dies konnte mit Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen sehr gut beobachtet werden.

Der Einfluss der Auftreffgeschwindigkeit auf das Schweißergebnis ist in beiden Fällen erheblich. Beim Spaltschweißen sind folgende Abhängigkeiten zu beachten:

- Idealfall: bei Auftreffgeschwindigkeiten zwischen 450 und 650 mm/s erstarrt die Schmelze in der Abwärtsbewegung des Bolzens.
- Auftreffgeschwindigkeiten kleiner als 400 mm/s führen häufig zu Bindefehlern.
- Auftreffgeschwindigkeiten größer als 700 mm/s verringern den Energieeintrag und damit die Erstarrungszeit meist erheblich. Bei geeigneter Energie kann die Erstarrung in der Rückprellphase erfolgen.

Das Kontaktschweißen ist mit Auftreffgeschwindigkeiten größer als 400 mm/s auszuführen.

Beim Spaltschweißen wird eine Abhängigkeit der Auftreffgeschwindigkeit auf die Lichtbogenbrennzeit (= Schweißzeit) ermittelt. Diese variiert zwischen 0,6 ms bei hohen Auftreffgeschwindigkeiten größer als 800 mm/s und 2,8 ms bei niedrigen Auftreffgeschwindigkeiten kleiner als 450 mm/s. Diese Abhängigkeit ist nicht linear, sondern weist im Geschwindigkeitsbereich zwischen 450 und 600 mm/s einen steilen Abfall auf. Für die Praxis bedeutet dies, dass sich die Lichtbogenbrennzeiten beim Spaltschweißen bereits bei geringen Änderungen der Einstellung oder der Pistolenreibung deutlich ändern.

Beim Kontaktschweißen ist diese Abhängigkeit deutlich geringer. Die ermittelten Schweißzeiten beim Kontaktverfahren betragen zwischen 3,5 und 4,5 ms. Es ergibt sich eine angenähert lineare Abhängigkeit der Lichtbogenbrennzeit von der Federvorspannung.

Die Messungen von Stromstärke und Lichtbogenspannung zeigen für einen definierten Schweißstromkreis weitgehend konstante Stromverläufe in Abhängigkeit von der Ladespannung auf. Die Bolzen- und Blechwerkstoffe beeinflussen den Stromverlauf kaum. Der wesentliche Einflussfaktor auf die Schweißenergie ist die Schweißzeit.

Für handelsübliche Spitzenzündungsbolzen M 4 bis M 8 der Werkstoffgruppen unlegierter Stahl, legierter Stahl und Aluminium werden für eine Schweißanlage die Einstellbedingungen für das Schweißen mit einem stationären Schweißkopf optimiert. Die optimierten Schweißergebnisse erfüllen die Prüfanforderungen der DIN EN ISO 14555. Die Einbrandformen zeigen sehr fehlerarme Schweißverbindungen auch beim größten Durchmesser M 8. Eine Übertragung der Ergebnisse auf das Schweißen mit Handschweißpistolen im ansonsten unveränderten Stromkreis ist gegeben. Zu beachten ist die richtige Anpassung der Auftreffgeschwindigkeit der Pistolen.

Das Kontaktschweißen führt an Stahlverbindungen in der Regel zu höher belastbaren Schweißverbindungen. Als Ursache wurde in Schliiffuntersuchungen die bessere Randanbindung der Kontaktschweißungen gegenüber Spaltschweißungen ermittelt. Diese resultiert aus der längeren Lichtbogenbrennzeit und der damit verbundenen höheren Energieeinbringung. Beim Kontaktschweißen ist zudem die Spritzerbildung beim Eintauchen geringer als beim Spaltschweißen. Ein Einflussfaktor ist die Auftreffgeschwindigkeit und der Kurzschlussstrom, mit dem der Bolzen eintaucht. Dieser beträgt beim Kontaktschweißen ca. 500 bis 1000 A, während der Bolzen beim Spaltschweißen mit mehr als 4 kA eintaucht.

Die Variante Kontaktschweißen ist auch beim Schweißen an beschichteten Blechen im Vorteil. Durch die längeren Schweißzeit kann das Zink besser verdampfen. Es wird wie bei unbeschichteten Blechen eine bessere Randanbindung des Bolzenflansches als beim Spaltschweißen erreicht.

Das Spaltschweißen ist dagegen dort im Vorteil, wo mit geringster Schweißenergie eine Beeinträchtigung der Blechrückseite unbedingt vermieden werden muß. Dies ist der Fall bei dünneren Blechen kleiner 0,8 mm. Zudem sind die Anpreßkräfte der

Pistole auf dem Blech deutlich geringer und verursachen geringere Verformungen. Beim Aluminiumbolzenschweißen führt die Spaltvariante zu besseren Schweißergebnissen. Die gute Wärmeleitfähigkeit von Aluminium bewirkt eine schnellere Erstarrung als bei Stahlwerkstoffen. Beim Aluminiumkontaktschweißen werden häufig großflächige Bindefehler aufgrund zu langsamer Eintauchgeschwindigkeit festgestellt. Hinzu kommen bei längerer Lichtbogenbrennzeit verstärkte Reaktionen mit der Luft (Sauerstoff).

Zur Vermeidung von Schweißspritzern werden an Stahlwerkstoffen Schweißungen unter Schutzgas sowie an flüssigkeitsbenetzten Blechoberflächen ausgeführt. Bei beiden Schweißvarianten ergeben sich optisch sehr ansprechende Schweißungen mit geringerer Spritzerbildung und Niederschlag (FeO) in der Schweißumgebung.

Die Wirksamkeit von Schutzgas beim Spitzenzündungsverfahren wurde nachgewiesen. Der Schweißablauf zeichnet sich durch ein geringeres Schweißgeräusch aus. Eine Verbesserung des Tragverhaltens durch Schutzgas wurde angesichts der optimierten „konventionellen“ Spitzenzündungsschweißungen bisher nicht erreicht. Die Schutzgaswirkungen lassen sich in Bezug auf Vorrichtung und Gasart weiter optimieren.

Bei den flüssigkeitsbenetzten Oberflächen wurde Prilwasser und ein selbstverflüchtendes Öl eingesetzt. Eine geringe gleichmäßige Benetzung der Oberfläche genügt. Die entstehende Schweißknall ist heftiger als beim blanken, entfetteten Blech. Die Ölbenetzung führt zu Schweißungen mit geringster Spritzerbildung. Bei der Beurteilung der Einbrandform und der Schweißfehler weisen die Schweißungen an prilwasserbenetzter Oberfläche sehr geringe Fehler und eine fast ideale Einbrandform auf.

Das Tragverhalten dieser spritzerreduzierten Schweißverbindungen befindet sich auf hohem Niveau.

Die Wiederholbarkeit der Schweißungen ist bei Anwendung eines stationären Schweißkopfes gut gegeben und erfüllt mit Variationskoeffizienten zwischen 6 und 10 % bereits Anforderungen der Serienfertigung. Die Kontaktvariante führt zu gleichmäßigeren Schweißergebnissen und ist auch in der Praxis leichter einstellbar. Beim Spaltschweißen vor allem mit Handschweißpistolen beeinflussen häufig Unregelmäßigkeiten z.B. der Auftreffgeschwindigkeit, der Handhabung und des Schweißstromkreises das Schweißergebnis.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Die Untersuchungen werden von den bayerischen Geräteherstellern Fa. BTH-Tech GmbH, Fa. HBS Bolzenschweißsysteme GmbH und Fa. Heinz Soyer Bolzenschweißtechnik GmbH unterstützt und kommen diesen Betrieben und damit auch einer Vielzahl bayerischer Bolzenschweißanwender unmittelbar zugute.

München, im Juli 2003


Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. D. Böhme