

Bericht 5148/09

AiF-Nr. 14.962 N

DVS-Nr. 05.038

Untersuchungen zum Orbitalreibschweißen von metallischen Werkstoffen und Mischverbindungen an nichtrotationssymmetrischen Verbindungsquerschnitten

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 116 Seiten.

April 2009

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das Orbitalreibschweißen als neue Füge-technologie für metallische Werkstoffe und Mischverbindungen an nichtrotations-symmetrischen Verbindungsquerschnitten untersucht. Die Schweißversuche wurden auf einer für metallische Werkstoffe neu entwickelten Orbitalreibschweiß-maschine durchgeführt, die eine kreisförmig schwingende Reibbewegung mit syn-chronisiertem Zweifach-Schwingkopfantrieb erzeugt („Multiorbitales Reibschweißen“, Schwingfrequenz bis 2×100 Hz, Schwingkreisdurchmesser bis 1,5 mm).

Das Werkstoffverhalten, geeignete Arbeitsbedingungen und erzielbare Verbindungseigenschaften wurden an artgleichen Verbindungen und Werkstoffkombinationen mit unlegiertem Stahl (S355, S235), legiertem Stahl (X6CrNiMo-), Aluminium (AlMgSi, AlMg4) und Messing (CuZn39Pb2) untersucht. Daraus resultieren auch verallgemeinerbare Aussagen, die auf andere Legierungen der zumeist verwendeten Werkstoffgruppen anwendbar sind. Als typische Fügegeometrien wurden rechteckigen Verbindungsquerschnitte im Dimensionsbereich a (5 - 20 mm) \times b (10 - 40 mm) und Hohlprofilvarianten mit unterschiedlicher Wanddicke (20x20x2 mm bis 40x40x3 mm) gewählt. Derartige Querschnitte können mit dem konventionellen Rotationsreibschweißen nicht gefügt werden und stellen daher eine wesentliche Anwendungserweiterung für das Reibschweißen metallischer Werkstoffe dar.

Die zum Fügen nötigen Reibdrücke sind beim Orbitalreibschweißen aufgrund der flächig einheitlichen Relativgeschwindigkeit tendenziell niedriger gegenüber den Reibdrücken beim konventionellen Rotationsreibschweißen. Die Stauchdrücke hingegen sind nach derzeitigem Entwicklungsstand vergleichbar hoch. Erst wenn es gelingt, vergleichbar gute Verbindungseigenschaften auch mit niedrigeren Stauchdrücken oder ganz ohne Stauchdruckanhebung zu erzielen, kann das Orbitalreibschweißen auch mit generell niedrigeren Kraftniveaus angewendet werden.

Die Schweißreignung der ausgewählten Werkstoffe zum Orbitalreibschweißen konnte für viele der untersuchten Varianten bei geeigneter Wahl der Arbeitsbedingungen und Schweißparameter nachgewiesen werden. So wird u.a. für artgleiche Verbindungen 20x20 mm aus legiertem Stahl, für Schwarz-Weiss-Verbindungen 30x10 mm und für Al/St-Mischverbindungen (AlMgSi/S355, AlMg4/X6CrNiMo-) bereits eine Festigkeit der Verbindung erzielt, die dem Grundwerkstoff entspricht (Zugversuchs-Bruchlage im Grundwerkstoff). Anwendungsgrenzen ergeben sich bei dünnwandigen Konturen ($t < 3$ mm) durch die reduzierte Quersteifigkeit und den Reibflächenversatz während der kreisend-schwingenden Reibbewegung. Für einzelne Werkstoffe (z.B. unleg. Stahl) ist die Notwendigkeit erweiterter Maschinen-Einstellbereiche für die Reibparameter (Schwingweiten $> 1,5$ mm) erkennbar.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens erbrachten einen großen Erkenntnisgewinn zum Orbitalreibschweißen metallischer Werkstoffe und Mischverbindungen, der anhand einer Anwendungserprobung an Flachband-Mischverbindungen Al/MS 40x5 mm für elektrische Leitungsanschlüsse erfolgreich verifiziert werden konnte.

Die erarbeiteten wissenschaftlich-technischen Verfahrensgrundlagen ermöglichen die Einführung und den wirtschaftlichen Einsatz des Orbitalreibschweißens als neue und vielseitige Schlüsseltechnologie und eine Erweiterung des Verbindungsgeometriespektrums beim Reibschweißen von Metallen. Ein besonderer Aspekt der wirtschaftlichen Fertigung eröffnet sich durch die Möglichkeit, mehrere Teile parallel bzw. gleichzeitig in einer Aufspannung zu verschweißen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

**Untersuchungen zum Orbitalreibschweißen
von metallischen Werkstoffen und Mischverbindungen
an nichtrotationssymmetrischen Verbindungsquerschnitten**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Vorgehensweise	7
3	Stand der Technik / Theorie	10
4	Experimentelle Randbedingungen	13
4.1	Orbitalreibschweißmaschine	13
4.2	Messtechnik	14
4.3	Spanntechnik	15
4.4	Zuordnung von Versuchsnummern, Werkstoffen, Probenvorbereitung und Geometrien.....	16
5	Orbitalreibschweißen von artgleichen Verbindungen	17
5.1	Orbitalreibschweißen von Aluminium.....	17
5.2	Orbitalreibschweißen von legiertem Stahl.....	22
5.3	Orbitalreibschweißen von unlegiertem Stahl.....	26
5.4	Zusammenfassung Orbitalreibschweißen von artgleichen Verbindungen	32
6	Orbitalreibschweißen von Werkstoffkombinationen	34
6.1	Orbitalreibschweißen von unlegiertem Stahl mit Aluminium	34
6.2	Orbitalreibschweißen von legiertem Stahl mit Aluminium	39
6.3	Orbitalreibschweißen von unlegiertem Stahl mit legiertem Stahl	42
6.4	Orbitalreibschweißen von Aluminium mit Messing.....	45
6.5	Zusammenfassung Orbitalreibschweißen von Werkstoffkombinationen.....	48
7	Wirtschaftliche Betrachtung	51
8	Diskussion	53
9	Zusammenfassung	56
10	Schrifttum	60
11	Anhang	63
11.1	Tabellen	63
11.2	Bilder.....	73

1 Einleitung

Beim Reibschweißen metallischer Werkstoffe und Mischverbindungen kommt heute nahezu ausschließlich das Rotationsreibschweißen zur Anwendung /1 - 19/. Damit werden rotationssymmetrische Voll- und Hohlprofilquerschnitte gefügt. Bestimmte nicht-rotationssymmetrische Querschnitte (Bild 1) sind dabei schweißbar, wenn das drehwinkelgenaue Positionieren angewendet wird.

Das Rotationsreibschweißen ist das bei Metallen am meisten verbreitete Reibschweißverfahren. Die Verbindungen weisen herausragende Eigenschaften auf - nicht nur beim Fügen artgleicher oder artähnlicher Werkstoffe, sondern auch bei Werkstoffen mit eingeschränkter Schweißbarkeit (Guss- oder PM-Werkstoffe, hochkohlenstoffhaltige Stähle) und bei Mischverbindungen, z.B. Stahl/Titan, Stahl/Aluminium, Kupfer/Aluminium, u.s.w.. Aufgrund der drehenden Relativbewegung ergibt sich aber eine Einschränkung der schweißbaren Geometrien auf quasi-rotationssymmetrische Querschnitte.

Das Linearreibschweißen wird unter der Bezeichnung "Vibrationsschweißen" heute überwiegend bei Kunststoffen eingesetzt /20, 21/. Für metallische Werkstoffe /22 - 28/ ergeben sich besondere Anforderungen durch die nicht kontinuierliche Reibbewegung mit dem ständigen Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung in den Umkehrpunkten. Hohe Schubkraftspitzen erfordern hohe Bauteilspannkraften und sind mitverursachend für Schwingungsverluste. Kunststoffschweißmaschinen sind zu leistungsschwach für metallische Werkstoffe und lassen sich meist konzeptbedingt nicht in erforderlichem Maße hochdimensionieren. Hydraulische Anlagen sind sehr groß und schwer, um unerwünschte Nebenschwingungen eindämmen zu können. Der Prozess mit Spanntechnik und Nachbearbeitung ist vergleichsweise aufwändig. Die Anwendung bei Metallen rechnet sich daher nur bei extrem hochwertigen Teilen (z.B. Titanschaufeln an Turbinenrädern, sog. "Blisks" /27/).

Um nichtrotationssymmetrische oder nicht drehbare Teile reibzuschweißen, bieten sich Verfahren mit veränderter Relativbewegung an, z.B. das Linearreibschweißen mit linearer Schwingbewegung (eindimensional) oder das Orbitalreibschweißen mit kreisförmiger Schwingbewegung (zweidimensional). Die Nachfrage nach der Herstellung derartiger Verbindungen von metallischen Werkstoffen und von Mischverbindungen, die die hohe Qualität von Reibschweißverbindungen aufweisen, ist vielfältig.

Insbesondere das Orbitalreibschweißen bietet dafür gute verfahrenstechnische Voraussetzungen, weil an jedem Ort der Reibfläche zu jeder Zeit die gleiche Relativgeschwindigkeit für optimale Reibbedingungen vorliegt. Allerdings mangelte es bisher an der Verfügbarkeit geeigneter, leistungsfähiger Orbitalreibschweißmaschinen für metallische Werkstoffe. Für Kunststoffe mit geringerem Reibleistungsbedarf wird dieses Reibschweißprinzip bereits angewendet. Für metallische Werkstoffe steht die Anwendungsentwicklung derzeit bevor. Das Orbitalreibschweißen stellt eine neue Schlüsseltechnologie zum Fügen metallischer Werkstoffe und Mischverbindungen mit nahezu beliebiger (nichtrotationssymmetrischer) Geometrie

dar, z.B. Verbindungen von Flachband oder Kastenprofilen, Verbindungen an nicht drehbaren Teilen (schiefe Rohranschlüsse, Pipeline), bei winkliger Anbindung (Alu-Fensterrahmen) sowie für die wirtschaftliche Serienfertigung mehrerer Teile oder Fügestellen in einem Arbeitsgang.

Ein neues Maschinenkonzept zum Orbitalreibschweißen eröffnet den Einstieg in diese neue Schlüsseltechnologie mit konkreten Produktionsanwendungen, wenn dem Anwender Kenntnisse über die Arbeitsbedingungen des Schweißprozesses und die erzielbaren Verbindungseigenschaften zur Verfügung stehen.

Das Orbitalreibschweißen /29, 30/ erweitert das eindimensionale Linearreibschweißen auf eine zweidimensionale Schwingbewegung, die im Spezialfall kreisförmig ist. Neben dem normierten Begriff "Orbitalreibschweißen" gemäß DIN EN 15620 /1/ wird daher vereinzelt auch die Bezeichnung "Zirkularreibschweißen" verwendet /29/. Das Orbitalreibschweißen arbeitet mit einer kreisend-schwingenden Relativbewegung. Dabei ist die Relativgeschwindigkeit an jedem Ort der Reibfläche und zu jeder Zeit gleich groß. Im Hinblick auf querschnittsbezogen einheitliche Reibungs- und Erwärmungsbedingungen ist dies ein grundsätzlicher Vorteil sowohl gegenüber dem Linearreibschweißen als auch gegenüber dem Rotationsreibschweißen. Das Verfahren bietet sich insbesondere für nichtrotationssymmetrische Stumpfverbindungen an, z.B. Flachband-Verbindungen Stahl/Stahl, Al/Al oder Al/MS für Stromleiter, Verbindungen an Kastenprofilen und beliebigen Strangpressprofilgeometrien. Aber auch die Verbindung nichtdrehbarer rotationssymmetrischer Verbindungen (lange Rohrleitungen, "schiefe" Rohranschlüsse) kommen für eine Weiterentwicklung in Betracht.

Reibschweißverfahren, so auch das Orbitalreibschweißen, sind "saubere" Schweißverfahren, bei denen keine Verunreinigungen oder Emissionen durch Spritzer, Rauche oder Strahlung entstehen. Das Orbitalreibschweißen eröffnet ein neues weites Anwendungsgebiet für metallische Fügequerschnitte, die mit den angestrebten Verbindungseigenschaften weder mit dem Rotationsreibschweißen, dem Abbrennstumpfschweißen, oder herkömmlichen Schmelzschweißverfahren realisierbar sind.

Dazu werden Schweißversuche mit Flachbandprofilen und rechteckigen Verbindungsquerschnitten im Dimensionsbereich $a \times b$ ($a = 5 \dots 20$ mm, $b = 10 \dots 40$ mm) durchgeführt. Das grundsätzliche Verhalten der Werkstoffe beim Orbitalreibschweißen wird zunächst an artgleichen Verbindungen aus unlegiertem Stahl (S355 und S235), legiertem Stahl (1.4571) und Strangpress-Aluminiumlegierungen (AlMg4 und AlMgSi) untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse mit standardisierten Verbindungsgeometrien sollen anhand konkreter Anwendungsfälle verifiziert werden, z.B. für Al/MS-Verbindung für Stromanschlüsse, und an dünnwandigen Stahl-Hohlprofilen für Gartenmöbel.

Das Forschungsvorhaben zum Orbitalreibschweißen von metallischen Werkstoffen und Mischverbindungen an nichtrotationssymmetrischen Verbindungsquerschnitten trägt dieser Entwicklung Rechnung und unterstützt klein und mittelständische Unternehmen bei der Einführung dieser neuen Technologie.