

Entwicklung des Laserstrahlschweißens unter Vakuum

(Ansprechpartner: Dr.-Ing. S. Olschok, olschok@isf.rwth-aachen.de)

Institut für Schweißtechnik
und Füge­technik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen
Institutsleiter

Die Strahlschweißverfahren zeichnen sich durch eine hohe Intensität an der Werkstückoberfläche aus, wobei sich die Mechanismen der Strahl-Stoff-Wechselwirkung von Laserstrahl- und Elektronenstrahlschweißen deutlich unterscheiden. Kennzeichnend ist der Tiefschweißeffekt, d.h. die Ausbildung einer Dampfkapillare. Hierdurch können Schweißnähte mit einem sehr großen Aspektverhältnis (Nahtbreite zu Nahttiefe) erreicht werden.

Für beide Verfahren stehen unterschiedliche Varianten zur Verfügung, die das Schweißen eines weit gefassten Werkstoffspektrums in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten vom Schwermaschinenbau bis hin zur Mikrosystemtechnik ermöglichen. Im Bereich der Strahlschweißverfahren gibt es seit Jahren konstante Bestrebungen, die Einsatzmöglichkeiten zu verändern bzw. zu erweitern. Dazu gehören u.a. auch die Weiterentwicklung der Anlagentechnik sowie die Verbesserung der mathematischen Modelle zur Prozesssimulation und der Vorhersage von Schweißergebnissen.

Seit einigen Jahren erfährt das Laserstrahlschweißen unter Vakuum eine Renaissance. Erste Versuche dazu gab es bereits aus den 1980er Jahren in Japan. Allerdings bieten die brillanten Festkörperlaserstrahlquellen viele Vorteile im Gegensatz zu den vorher verwendeten CO₂-Laserstrahlquellen. Es sind höhere Leistungen verfügbar, die Schnittstelle, um den Laserstrahl ins Vakuum zu bringen, kann vergleichsweise einfach gestaltet werden und die Schweißkopfführung ist ebenfalls einfach. Schweißungen in Großvakuumkammern können, im Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen, mit einfachen Mitteln bewerkstelligt werden.

Eigene Versuche zum Laserstrahlschweißen unter Vakuum belegen die in den 1980er Jahren erzielten Ergebnisse. Allerdings sind Schweiß­tiefen bis zu 50 mm und mehr mit nur 12 kW Strahlleistung realistisch [1].

Seit über 20 Jahren wird im ISF das Dickblechfügen mit Elektronenstrahlschweißen erfolgreich bearbeitet [2,3,4,5]. Ebenso wurden und werden am ISF Forschungen zum Laserstrahlschweißen und seinen Verfahrensvarianten bis zu 20 mm Blechdicke durchgeführt. [6,7,8] Hieraus ergeben sich sehr gute Voraussetzungen für den nächsten Schritt der Verfahrensentwicklung, das Laserstrahlschweißen von Dickblechen unter Vakuum. Neben der Kompetenz und Erfahrung in der Prozessentwicklung verfügt das ISF über die notwendige Infrastruktur und Ausstattung zur Durchführung des Forschungsvorhabens. Das Forschungsvorhaben wird unter Verwendung eines vorhandenen Laserstrahlerzeugers Trumpf Trudisk 16002 mit 16 KW Leistung durchgeführt. Die Strahlführung erfolgt durch eine Glasfaser, die Strahlformung durch ein Spiegelsystem. Die Versuche im Vakuum finden in einer bereits bestehenden Kammer zum Laserstrahlschweißen unter kontrollierter Atmosphäre statt. Die Kammer hat ein Volumen von ca. 650 l und verfügt über einen Kreuztisch mit jeweils 300 mm freier Weglänge. Es besteht die Möglichkeit die gesamte Kammer um 90° um die Längsachse zu drehen um mehrere Schweißpositionen abzudecken.

Zusätzlich stehen im Haus eine mechanische Werkstatt zur Probenvorbereitung sowie eine Metallographie zur Anfertigung von Schlibbildern und Härtemessungen zur Verfügung. Dies gilt ebenso für die zerstörungsfreie Prüfung mittels Röntgenuntersuchungen. Die zur weiteren Beurteilung der Verbindungen benötigten mechanisch technologischen Untersuchungen, wie Zugversuche und Kerbschlagbiegeversuche können ebenfalls im Haus ausgeführt werden.

Mit diesem Forschungsvorhabens soll das Prozessverständnis des Laserstrahlschweißens erweitert werden. Dies geschieht über Untersuchungen zu der Fragestellung, welche Auswirkungen der Umgebungsdruck auf das makroskopische Schweißergebnis, aber auch auf die Metallurgie, d.h. insbesondere die Durchmischung der Schweißnaht hat. Hierdurch soll durch Ausschluss des Umgebungsdruckes bzw. der Atmosphäre als „Störgröße“ des Prozesses geklärt werden, wie die einzelnen Strömungsmechanismen in der Fügezone eines Laserstrahl-Tiefschweißprozesses qualitativ und quantitativ zustande kommen bzw. wie sie von den verschiedenen Prozessgrößen wie der eingebrachten Leistung, der Schweißgeschwindigkeit, etc. abhängen. Darüber hinaus soll geklärt werden, wie der Prozesswirkungsgrad durch unterschiedliche Umgebungsdrücke beeinflusst wird.

Mit dem Laserstrahlschweißen unter Vakuum soll eine Prozessvariante untersucht werden, mit der sich ggf. neue Anwendungsfelder erschließen lassen. Darüber hinaus liefert sie wichtige Daten für die Prozessmodellierung, da die Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen auch ohne Interaktion mit der Atmosphäre untersucht werden können.

Das Forschungsvorhaben trägt entscheidend dazu bei, die Randbedingungen und die physikalischen Vorgänge bei der Prozesssimulation eines Laserstrahlschweißprozesses besser als bisher möglich in die verschiedenen Modelle einbinden bzw. überhaupt erstmals berücksichtigen zu können.

Nicht zuletzt werden die Prozessgrenzen des Laserstrahlschweißens erweitert, da das Laserstrahlschweißen unter Vakuum u.a. einen Übergang zum Tiefschweißen bei niedrigeren Intensitäten, größere Einschweißstiefen und insgesamt ein größeres Prozessfenster für einen stabilen Schweißprozess ermöglicht.

Dem Antragsteller sind weltweit nur zwei weitere Forschungsstellen bekannt, die sich mit der Thematik Laserstrahlschweißen unter Vakuum in den vergangenen 5 Jahren beschäftigen: Prof. Katayama (Osaka, Japan) und Fraunhofer USA.

Development of Laser Beam Welding under Vacuum

(Contact person: Dr.-Ing. S. Olschok, olschok@isf.rwth-aachen.de)

The beam welding methods are characterised by a high intensity at the work-piece surface while there are significant differences in the mechanisms of the beam-material interaction of laser beam and electron beam. The deep-penetration effect is characteristic, i.e. the development of a vapour capillary which allows to achieve weld seams with a very high aspect ratio (weld width : weld depth).

Different variations are available for both methods. These variations allow welding of a broad material spectrum for most different application fields which reach from the construction of heavy machinery to micro-systems technology. In the field of beam welding, constant attempts to alter and/or to broaden

the application possibilities have been made for years. Among those attempts are the further development of the equipment technology and the improvement of mathematical models for process simulation and the prediction of weld results.

During the last few years, laser beam welding under vacuum has been enjoying a renaissance. First tests about the subject have taken place in Japan already in the Eighties. The brilliant solid-state laser beam sources, however, offer many advantages compared with the previously used CO₂-laser beam sources. Higher powers are available, the method of bringing the laser beam into the vacuum and also weld head guidance are quite straightforward. Compared with electron beam welding, just basic means are required for welding in large vacuum chambers.

Tests about laser beam welding under vacuum which have been carried out in the ISF confirm the results which had been gained in the Eighties. In order to achieve a weld depth of up to 50 mm and more, a beam power of just 12 kW is required [1].

In the ISF, thick-plate joining with the electron beam has been carried out successfully for more than 20 years now [2,3,4,5]. Moreover, research work about laser beam welding and its process variations for a plate thickness of up to 20 mm is carried out in the ISF, currently and also in the past [6,7,8]. The results present excellent preconditions for the next step of process development: the laser beam welding of thick plates under vacuum. Besides competence and experience in process development, the ISF also provides the required infrastructure and equipment for carrying out the research project. For the project, the available laser beam generator Trumpf Trudisk 16002 with a power of 16 kW is used. Beam guidance is accomplished via a glass fibre, beam forming is carried out by a mirror system. The tests under vacuum are taking place in the available chamber for laser beam welding under controlled atmosphere. The chamber volume is approximately 650 l and it provides of a cross table with a free length of path of 300 mm each. There is the possibility to rotate the entire chamber by 90° around the longitudinal axis and to cover thus several weld positions.

A mechanical workshop for specimen preparation and also a metallography laboratory for the preparation of micrographs and hardness measurement are available in the ISF. This applies also to non-destructive testing via X-ray examinations. The mechano-technological tests which are required for the further evaluation of the joints, such as tensile tests and notch bending tests will be also carried out in the ISF.

Work on this research project will allow to further expand process comprehension of laser beam welding. This is accomplished via research work about the questions of the effects which the ambient pressure exerts on the macroscopic weld result, and also on the metallurgy, i.e. particularly the thorough mixing of the weld seam. Via exclusion of the ambient pressure and/or the atmosphere as a “disturbance variable” of the process it shall be clarified how the individual flow mechanisms in the joining zone of a laser beam deep welding process are developing qualitatively and quantitatively and/or to which degree they are depending on different process parameters such as the energy input, the welding speed, etc. It shall, moreover, be clarified how the process efficiency is influenced by different ambient pressures.

Laser beam welding under vacuum is a process variation which may allow the use of new application fields. It provides, moreover, important data for process modelling since the beam-material interactions in laser beam welding can be examined also without interaction with the atmosphere.

The research project contributes essentially towards the improved integration of the boundary conditions and the physical processes into the different models during the process simulation of laser beam welding processes and it allows for the first time even the consideration of those parameters.

Last, but not least, the process boundaries of laser beam welding will be expanded since laser beam welding under vacuum allows, among other things, the changeover to deep penetration welding with lower intensities, deeper weld depth and, all in all, a larger process window for a stable welding process.

To the best of the applicant's knowledge there are on a worldwide level only two other research institutions who, during the last 5 years, have been working on the subject 'laser beam welding under vacuum': Prof. Katayama (Osaka, Japan) and Fraunhofer USA.

-
- [1] Reisgen, U.; Olschok, S.; Jakobs, S.: A comparison of electron beam welding with laser beam welding in vacuum, International Electron Beam Welding Conference, 2nd IEBW Conference, Aachen, March 26-30, 2012. DVS-Berichte, Band 285
 - [2] Reisgen, U.; Olschok, S.: Qualifizierung und Optimierung des Fügens mit dem Elektronenstrahl in Zwangsposition, Abschlussbericht zu AiF 15.560 N
 - [3] Dilthey, U.; Woeste, K.: Elektronenstrahlschweißen bei der Fertigung von dickwandigen Großrohren aus C-Mn-Stählen, Abschlussbericht zu AiF 12.187 N
 - [4] Eichhorn, F., Depner, K.: Grundlagenuntersuchungen zum Werkstoffverhalten und zur Gütesicherung beim Elektronenstrahlschweißen von niedriglegierten, warmfesten Baustählen mit Blechdicken bis zu 100 mm, Abschlussbericht zu BMFT-FB-T 86-133
 - [5] Reisgen, U.; Olschok, S.; Ufer, S.: Qualifizierung des Elektronenstrahlschweißens im Dickblechbereich für Anwendungen im Windenergieanlagenbau, AiF 372 ZN, Fosta P863
 - [6] Dilthey, U.; Olschok, S.: Untersuchungen zur Nutzung der Synergieeffekte beim Hochleistungs-Laser-Hybridschweißen von dickwandigen Rohrkörpern aus C-Mn-Stählen, Abschlussbericht zu AiF 13.407N
 - [7] Dilthey, U.; Lüder, F.: Analytische Untersuchungen der Prüfproblematik an laserstrahlgeschweißten Verbindungen unter besonderer Berücksichtigung der zu tolerierenden Härtespitzen : [LASER 2000, Qualifizierung von Laserverfahren ; Teilprojekt: Charakterisierung laserstrahlgeschweißter Verbindungen], Abschlussbericht zu BMBF 13N 6867 4
 - [8] Dilthey, U.; Eichhorn, F.: Sonderprobleme der Materialbearbeitung vom CO₂-Hochleistungslasern - Laserstrahlschweißen mit großer Einschweißtiefe und hoher Verfahrensgeschwindigkeit, Abschlussbericht zu BMFT 13 N 5469/0