AiF-Nr. 13.407 N / DVS-Nr. 06.042 – Zwischenbericht zum 01.12.2004

1 Forschungsthema

Untersuchungen zur Nutzung der Synergieeffekte beim Hochleistungs-Laser-Hybridschweißen von dickwandigen Rohrkörpern aus C-Mn-Stählen

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

In Deutschland werden ca. 1,2 Mill. Jahrestonnen Grobblech zwischen 6 mm und 70 mm Wanddicke zu längsnahtgeschweißten Rohren verarbeitet, wobei überwiegend Bleche bis zu einer Dicke von 45 mm zum Einsatz kommen. Das derzeit standardmäßig eingesetzte Schweißverfahren zum Fügen dieser Rohre ist das UP-Schweißverfahren. Der internationale Wettbewerb zwingt jedoch die deutschen Hersteller, die Wirtschaftlichkeit und damit die Schweißgeschwindigkeit weiter zu steigern. Andernfalls ist ein Verlust dieses wichtigen Marktsegmentes abzusehen. Die Leistungssteigerung soll durch ein alternatives Schweißverfahren in Hybridtechnik ermöglicht werden. Beim Hybridschweißen werden ein Laserstrahl und ein Lichtbogen, hier ein MSG-Lichtbogen, in einer Prozesszone gekoppelt. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass durch dieses Schweißverfahren erhebliche Vorteile bezüglich Schweißgeschwindigkeit, Eindringtiefe, Wärmebelastung des Bauteils und Schweißmöglichkeiten im Vergleich zu den Einzelprozessen Lichtbogenschweißen und Laserstrahlschweißen mit Zusatzdraht gewonnen werden können. Die Nutzbarmachung dieser Vorteile kann die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Rohrhersteller erheblich verbessern.

Die klein- und mittelständischen Unternehmen dieser Branche verarbeiten ca. 10-20 % der oben genannten Tonnage. Ihr Anteil an der Wertschöpfung ist jedoch deutlich höher, da sich die mittelständische Industrie zunehmend auf spezielle Abmessungen und besondere Eigenschaften der Rohre konzentriert. Zu diesen besonderen Eigenschaften gehören die höheren Wandstärken bis zu 70 mm bei Leitungsrohren, besondere Zähigkeiten für niedrige Einsatztemperaturen, Sauergasbeständigkeit und hohe Festigkeiten sowie Kombinationen der genannten Eigenschaften. Weiterhin werden dickwandige Grobbleche im Behälterbau eingesetzt, wobei die schweißtechnischen Fragestellungen sehr ähnlich sind.

In Abhängigkeit von der Wanddicke und den geforderten Werkstoffeigenschaften wird beim UP-Verfahren mit Lage/Gegenlagetechnik oder mit der Mehrlagentechnik gearbeitet. Es kommen außerdem Mehrdrahtschweißungen zur Anwendung, um die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu steigern. Bei normalen Güten werden Schweißgeschwindigkeiten von ca. 1 m/min erreicht. Die Einschmelztiefe beträgt etwa 8-10 mm, wobei häufig mit einer Doppel-Y-Naht gearbeitet wird. Bei Stählen mit höheren Anforderungen wie z.B. kaltzähem Verhalten oder hoher Festigkeit (z.B. API 5L, Grade X80 – Re = 552 MPa, Rm = 690 MPa) wird in der Regel die Mehrlagentechnik angewandt. Zusätzlich muss häufig die Streckenenergie reduziert werden, um die Eigenschaften in der WEZ nicht zu stark zu beeinträchtigen. Als Folge sinkt die Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Die Schweißgeschwindigkeit wird auf 0.6-0.7 m/min reduziert.

3 Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

Zur Realisierung des Forschungszieles muss das Schweißverfahren bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Dabei können die wichtigsten Forderungen an das alternative Schweißverfahren wie folgt beschrieben werden:

- Schweißgeschwindigkeit von ca. 2 m/min,
- deutliche Reduzierung der Streckenenergie,
- Einschweißtiefen von 15 bis 20 mm,
- Spalttoleranzen bis 1,5 mm,

- möglichst kleine WEZ,
- Schweißprozess an Atmosphäre

Die Forderungen verlangen einen Schweißprozess, der eine hohe Leistungsdichte mit einer entsprechenden Vorschubgeschwindigkeit realisieren kann. Es ist daher in erster Linie an Strahlschweißverfahren auf der Basis eines CO2- oder Nd:YAG-Lasers zu denken, die jedoch auf Grund ihrer Verfahrenscharakteristik nicht alleine diese Forderungen erfüllen können. Beim Einsatz des CO2-Lasers steht die Absicht im Vordergrund, von außen zu schweißen, auch wenn die Schweißmöglichkeit von der Rohrinnenseite als gegeben angesehen werden kann. Der Einsatz des Nd:YAG-Lasers bietet auf Grund seiner einfacheren Handhabung eine deutlich bessere Möglichkeit zu Schweißungen von der Rohrinnenseite, was z.B. auch für Heftschweißungen zur Fixierung der Nahtgeometrie genutzt werden könnte. Hiermit ist die Möglichkeit zum Ersatz des heute standardmäßig zum Heften eingesetzten MSG-Schweißens gegeben. Insbesondere in der Erwartung, dass Laserstrahlleistung und -qualität der angebotenen Nd:YAG-Laserstrahlquellen weiter steigen, soll ein Vergleich von Hybridschweißungen mit unterschiedlichen Strahlquellen vorgenommen werden. Der neue Prozess muss einen Schweißzusatz zulassen, um auf Grund der großen Blechdicke auftretende Spalte bis zu 1,5 mm überbrücken zu können. Eine gute Durchmischung des Schweißgutes muss gewährleistet sein. Einen sinnvollen Lösungsansatz für die Erfüllung des Forderungskataloges bietet hier das Laser-MSG-Hybridverfahren, das durch die Kopplung des Laser- und des Lichtbogenprozesses die Überbrückung natürlicher Fugenspalte ermöglicht und ein großes Potenzial zur Automatisierung beinhaltet.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden mehrere Nahtgeometrien verschweißt und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften analysiert. Als MSG-Draht wurde bisher SG2 eingesetzt, als Schutzgas wurde Helium der Schweißstelle getrennt vom MSG-Schutzgas über einen Helium-Plasma-Jet zugeführt, um das über dem Keyhole induzierte Laserplasma aus der Prozesszone zu blasen. Als weiteres Schutzgas wurde Corgon 18, ein Gasgemisch aus Argon und Kohlendioxid, verwendet, welches über die Schutzgasdüse des MSG-Brenners zugeführt wurde. Die Schweißgeschwindigkeit betrug 1 bzw. 1,1 m/min.

Als erste Fugenvorbereitung wurde eine Y-Naht mit 10 mm Steg und 70° Fugenöffnungswinkel an 20 mm dicken Blechen untersucht. Das Nahtvolumen konnte nicht bei der geforderten Schweißgeschwindigkeit von mindestens 1 m/min gefüllt werden, so dass diese Fugengeometrie nicht weiter untersucht wurde.

Bei einer weiteren Fugenvorbereitung (Y-Naht mit 15 mm Steg und 70° Fugenöffnungswinkel) konnte aufgrund zu geringer Laserleistung keine Durchschweißung erzielt werden. Die mechanisch-technologischen Untersuchungen sind daher nicht weiter verfolgt worden.

Bei der dritten Versuchsreihe wurde der zu verschweißende Steg auf 10 mm reduziert und das aufzufüllende Volumen verringert. Der Fugenöffnungswinkel betrug somit 20° und 35°. Diese Nähte wurden den folgenden Prüfungen unterzogen: Sichtprüfung, Röntgendurchstrahlprüfung, metallographische Prüfung (Querschliff), Härteprüfung, Zugversuch und Kerbschlagbiegeversuch.

Die Sichtprüfung ergab bei beiden Nahtvorbereitungen eine Einstufung der Naht nach DIN EN ISO 5817 in die Bewertungsgruppe B. Die Röntgendurchstrahlprüfung ergab eine höhere Porenanfälligkeit der 20°-Fuge gegenüber der 35°-Fuge. Die Einschweißtiefe konnte im Stegbereich durchschnittlich auf 8,8 mm gesteigert werden. Daraus resultiert eine Gesamtschweißnahttiefe (mit MSG-Prozess) von 18,8 mm. Die Härtewerte ergaben eine zu hohe Aufhärtung in der Nahtwurzel. Die Kerbschlagwerte liegen im Bereich bis zu 100 J bei –30°C.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde der Einsatz eines Nd:YAG-Lasers mit 6 kW Ausgangsleistung untersucht. Die Versuche wurden an 15 mm dicken Blechen mit 2 unterschiedlichen Fugenvorbereitungen (Y-Naht mit 3 mm Steg und 35° Öffnungswinkel und V-Fuge mit 8° Fugenöffnungswinkel) mit 3 unterschiedlichen Spaltweiten (0 mm, 0,4 mm und 0,8 mm) durchgeführt. Als Zusatzdraht kam der Fülldraht Coreweld 80C-Ni1 zum Einsatz. Es wurden die Lagen PA, PC, PF und PG getestet. Die V-Naht stellte sich hierbei als nicht geeignet heraus. Bei der Y-Nahtvorbereitung

konnten alle Schweißversuche bis auf die Position PG (fallend) zufriedenstellend durchgeführt werden. Allerdings stellte sich bei den Zwangspositionen eine erhöhte Porenanfälligkeit ein. Durch den Steg von 3 mm wurden Zusatzwerkstoff und Grundwerkstoff gut durchmischt, so dass nur eine geringe Aufhärtung in der Schweißnahtwurzel zu verzeichnen ist. Die Anforderungen an den Zugversuch und den Kerbschlagbiegeversuch wurden von ausgewählten Proben erfüllt. Da die Bedingung der Zwangslagenschweißung von den Schweißversuchen in PG-Lage nicht erfüllt wurde, die maximale Einschweißtiefe von lediglich 8 mm im Vergleich zum Hochleistungs-CO_2-Laserstrahl-Hybridschweißen geringer ist, wurden die Schweißversuche mit dem Nd:YAG-Laser nicht weiter verfolgt.

Die bisher gewonnen Daten wurden für die weitere Vorgehensweise verwendet: Es wurde versucht, die hohe Aufhärtung bei den CO_2-Laser-Hybrid-Schweißversuchen mit spezieller Laserstrahlformung (Strahlpendelung, Strahlaufweitung mittels adaptiver Optik) zu verringern, indem mehr Laserenergie in die Tiefe des Werkstücks gebracht wird und durch veränderte Schmelzbadströmungen der Zusatzwerkstoff Einfluss auf die Ferritbildung in der Nahtwurzel ausübt. Zudem sollte der Steg weiter verringert werden. Die CO2-Laserleistung wurde auf 20 kW erhöht.

Die Schutzgaszuführung erfolgte von jetzt an komplett über die Gasdüse des MSG-Prozesses, da der erforderliche große Heliumstrom zum Herausblasen des Metalldampfplasmas aus der Prozesszone Schmelzbadauswürfe verursachte. Der Schwingspiegel sowie die adaptive Optik trugen marginal zu einer geringeren Aufhärtung in der Nahtwurzel bei wobei es zu einer vermehrten Porenbildung kam. Durch eine weitere Verringerung der Schweißgeschwindigkeit und durch den Einsatz eines gering kohlenstoffhaltigen Grundwerkstoffes (0,01%) konnte die Aufhärtung so weit reduziert werden, dass sie den Anforderungen des Rohrbaus entsprechen (deutlich geringer als 280 HV 0,5). Durch die Umstellung des MSG-Brenners von schleppend auf stechend konnte die Porenbildung fast vollständig vermieden werden, jedoch wurde die Einschweißtiefe auf 18 mm reduziert. Spalte bis 0,4 mm und Versatz bis zu 1,5 mm ließen sich mit guter Wurzelanbindung fügen. Spalte größer 0,4 mm verursachten das Phänomen des Mittelrippendefektes.

Des weiteren wurde ein Blech der Dicke t = 30 mm mit dem Laser-Hybridprozess als Wurzellage verschweißt und anschließend mit dem UP-Verfahren fertiggeschweißt. Es stellte sich keine Problematik bei der Verfahrenskombination Laser-Hybrid/UP ein. Die Schweißnaht wurde in jedem Blechdickenbereich hinsichtlich der mechanisch-technologischen Eigenschaften untersucht. Alle Anforderungen des Zugversuches, des Kerbschlagbiegeversuches und der Härte wurden erfüllt.

In einem weiteren Untersuchungsabschnitt wurde geprüft, inwieweit sich die Ergebnissen von Schweißversuchen mit dem X65 auf andere Feinkornbaustähle übertragen lassen. Verwendet wurde ein S960QL, der bei unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten und Spaltweiten verschweißt wurde. Es stellte sich heraus, dass die Ergebnisse vom X65 übertragbar sind. Bei angepasster Schweißgeschwindigkeit sowie Wahl eines geeigneten Zusatzwerkstoffes ließen sich Schweißnähte erstellen, die den Normen entsprechen.

Die wichtigste Erkenntnis in den Untersuchungsabschnitten war, dass Feinkornbaustähle mit einer an den Kohlenstoffgehalt des Grundwerkstoffes angepassten Schweißgeschwindigkeit zu fügen sind, ohne dass es zu einer übermäßigen Aufhärtung in der Schweißzone kommt und dass die Verbindungen somit den Anforderungen der Rohrhersteller entsprechen.

Eine Entfestigung der Gefügeveränderungen ist bei Laser-Hybridschweißungen von Feinkornbaustahl nicht zu erwarten. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften wie z.B. die Zähigkeit ist direkt von der im Gefüge eingestellten Härte abhängig.

Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses fanden im September 2003, im Juli 2004 und im November 2004 statt.

4 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)

Die wirtschaftliche Bedeutung dieses Forschungsvorhabens gründet sich in erster Linie auf die enorme Verkürzung der Durchlaufzeit bei der Fertigung dickwandiger Rohre sowie Apparateteile. Die Hauptzeit für das Schweißen dickwandiger Großrohre beträgt heute beim Mehrlagen-Lichtbogenschweißen bis zu 20 Stunden. Beim Hybrid-Schweißen kann diese Zeit deutlich verringert werden. Hierdurch ist eine Reduzierung der Fertigungskosten für ein Rohr um ca. 25 % zu erwarten.

Großrohre werden in Deutschland überwiegend in kleinen und mittleren, auf die Rohrfertigung spezialisierten, Unternehmen hergestellt. Diese Unternehmen werden in Zukunft unter besonderem Druck japanischer und amerikanischer Konkurrenz gesetzt, da in Japan und den USA das Strahlschweißen von Rohrlängsnähten bereits Einzug in die Fertigung hält. Einzelunternehmen sind kaum in der Lage, ein neues Verfahren zu etablieren. Deshalb ist es nötig, diese Anstrengungen zu bündeln, so dass die interessierten Unternehmen durch die Mitarbeit im Projektbegleitenden Ausschusses direkt an den Arbeiten und Ergebnissen partizipieren können. Deshalb wurden neben Rohrherstellern auch weitere Anwender mit in den Projektbegleitenden Ausschuss integriert. Durch dieses Projekt kann das Hybridschweißen Eingang in die internationalen Spezifikationen finden, wodurch sein Einsatz für die Rohrfertigung erheblich erleichtert werden kann.

Darüber hinaus sind die Untersuchungen für die Anwendung des Hybridschweißverfahrens nicht nur in der Rohrfertigung erforderlich. Auch für andere Branchen wie den Schiffbau, Apparatebau, Stahlbau etc. ist das Vorhaben von richtungsweisender Bedeutung.

5 Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse werden in einem Abschlussbericht übersichtlich dargestellt und in Veröffentlichungen, Fachtagungen und Vortragsveranstaltungen bekannt gemacht. Weiterhin werden die Ergebnisse durch den Erfahrungsaustausch über die schon bestehenden intensiven Kontakte zu kleinen und mittelständischen Unternehmen der Allgemeinheit bekannt gemacht. Darüber hinaus werden über die Mitarbeiter des Instituts in Einzelgesprächen mit Anwendern konkrete Lösungsansätze erarbeitet oder Interesse geweckt.

6 Durchführende Forschungsstellen

6.1 Forschungsstelle 1:

Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik
RWTH Aachen (ISF)
Pontstraße 49
52062 Aachen
Tel.: 02 41/80-93 870
Fax: 02 41/80-92 170

6.2.1 Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. U. Dilthey
6.2.2 Projektleiter: Dipl.-Ing. S. Olschok

Ort, Datum	Unterschrift des Leiters und Stempelabdruck der Forschungsstelle