



GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV München

Bericht 5161/13

Schlussbericht

IBS 3621b/198/1-IGF-1004-0002

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

Einsatzmöglichkeiten von intelligenten Sensorsystemen bei Ein- und Mehrlagenschweißungen für eine wirtschaftlichere Fertigung in KmUs

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

Der Bericht enthält 79 Seiten.

November 2013

GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik Int. mbH
Niederlassung SLV München
Schachenmeierstraße 37, 80636 München
Niederlass.leiter: Prof. Dr.-Ing. H. Cramer

SB-5161-Sensor-Dm - Internet.docx

GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, HRB 37719 Düsseldorf, Geschäftsführer: Prof. Dr.-Ing. S. Keitel - Aufsichtsrat: Prof. Dr.-Ing. H. Flegel, Vorsitz

Tel.: +49 (0) 89 - 12 68 02 - 0
Fax: +49 (0) 89 - 18 16 43
Fax: +49 (0) 89 - 12 39 39 11 (Ausbildung)
Fax: +49 (0) 89 - 12 68 02 848 (ZFP)
E-Mail: slv@slv-muenchen.de
Internet: www.slv-muenchen.de

Deutsche Bank AG
Konto Nr.: 7 520 471 (BLZ 700 700 24)
Postbank München
Konto Nr.: 76 644 802 (BLZ 700 100 80)

BIC: DEUT 3333 BMUC
IBAN: DE76 7007 0024 0725 0471 00

USt.-Id.-Nr.: DE 813 013 727
St.-Nr.: 106/5772/0212

DVS

Einsatzmöglichkeiten von intelligenten Sensorsystemen bei Ein- und Mehrlagenschweißungen für eine wirtschaftlichere Fertigung in KmUs

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Anlass für das Projekt.....	9
3	Vorgehensweise	12
4	Stand der Technik / Theorie.....	13
4.1	Klassifikation und Begriffsbestimmung der Sensoren für das vollmechanische Lichtbogenschweißen.....	13
4.2	Optische Sensoren	15
4.2.1	Optische Lasersensoren auf Basis der Lasertriangulation.....	16
4.2.2	Anwendungsbereich von optischen Sensoren	18
4.2.3	Probleme beim Einsatz optischer Sensoren	18
4.3	Adaptives Schweißen mittels 3D-Lasersensoren	19
5	Experimentelle Randbedingungen.....	20
5.1	Versuchsstand.....	20
5.1.1	Linearroboter MWR-350	21
5.1.2	Lasersensor MINI – i/D	22
5.1.3	Schweißstromquelle QINEO® Pulse 450A	23
5.2	Vision-System	24
5.2.1	„DATA-2004“	25
5.2.2	„VISUS“	25
5.2.2.1	Unterbrechungspunkte („Break Point“)	26
5.2.2.2	Verfolgungspunkt („Tracking Point“)	26
5.2.3	„ADAP“	26
5.2.4	„WeldCom™“ – Anwenderschnittstelle	27
5.2.4.1	Vision-Menü	27
5.3	Schematischer Schweißbahnverlauf	28
6	Einarbeitung in die Nahterkennung zur Online-Nahtverfolgung	30
6.1	Einfluss wichtigster Parameter des Sensors zur Nahterkennung	30
6.1.1	Laser und Kameraparameter	30

6.1.2	Filter	31
6.2	Einfluss der Bauteiloberfläche.....	31
7	Entwicklung von Regelungsstrategie und Algorithmen zum adaptiven MSG-Schweißen.....	33
7.1	Adaptives Programm „V-Naht“	33
7.1.1	Wurzellage	34
7.1.1.1	Drahtgeschwindigkeit	34
7.1.1.2	Pendelbreite	34
7.1.1.3	Schweißgeschwindigkeit	35
7.1.2	Füll- und Decklagen	36
7.1.2.1	Brennerposition (TP)	37
7.1.2.2	Pendelbreite	37
7.1.2.3	Schweißgeschwindigkeit	37
7.2	Adaptives Programm „Kehlnaht“	39
7.2.1	Einlagenschweißen	40
7.2.1.1	Pendelbreite	40
7.2.1.2	Schweißfläche	40
7.2.2	Zweilagenschweißen	41
7.2.2.1	Schweißbrennerposition (TP)	41
7.2.2.2	Pendelbreite	43
7.2.2.3	Schweißfläche	43
8	Erprobung der Algorithmen zum adaptiven Schweißen.....	45
8.1	Randbedingungen.....	45
8.1.1	Werkstoff, Blechdicke, Schweißzusatz- und Hilfsstoff	45
8.1.2	Nahtvorbereitung und angestrebter Lagenaufbau.....	45
8.1.2.1	Nahtvorbereitung „V-Naht“	45
8.1.2.2	Nahtvorbereitung „Kehlnaht“	46
8.1.3	Störgrößen: Position und Spaltbreite.....	47
8.1.3.1	Schweißbedingungen „V-Naht“	48
8.1.3.2	Schweißbedingungen „Kehlnaht“	48
8.1.4	Spannvorrichtung	49
8.1.5	Brenneranstellwinkel, Brenneranstellung und Stromkontaktrohrabstand.....	50
8.2	Erprobung und Resultate von Algorithmen an V-Naht	51
8.2.1	Voreingestellte Schweißparameter.....	51
8.2.2	Wurzellage	52
8.2.3	Füll- und Decklagen	54
8.2.3.1	Pendelraupentechnik.....	54
8.2.3.2	Strichraupentechnik.....	55

8.2.4 Untersuchungen mit unterschiedlichen Drahtgeschwindigkeiten und Werkstoffübergängen.....	57
8.2.5 Erprobung mit Blechstärke 10 mm.....	59
8.2.6 Erprobung mit starken Abweichung der Nahtgeometrie.....	60
8.3 Erprobung von Algorithmen an Kehlnaht.....	61
8.3.1 Voreingestellte Schweißparameter	62
8.3.2 Einlagenschweißen.....	63
8.3.3 Zweilagenschweißen	65
8.3.3.1 Strichraupentechnik	65
8.3.3.2 Pendelraupentechnik	67
8.3.4 Einfluss von unterschiedlichen Prozessbedingungen	67
8.3.4.1 Drahtgeschwindigkeit.....	67
8.3.4.2 Werkstoffübergänge.....	68
8.3.4.3 Kehlwinkel.....	70
8.3.5 Untersuchung zur Nahtverfolgung mit verschiedener Neigung der Schweißnahtachse.....	71
8.4 Zusammenfassung der Erprobung	72
9 Wirtschaftliche Bedeutung	73
10 Zusammenfassung.....	74
11 Literaturverzeichnis	77

1 Einleitung

Die weltweit große Nachfrage an geschweißten Produkten z.B. aus dem Maschinenbau sowie dem Anlagen-, Rohrleitungs- und Behälterbau und der gleichzeitige Mangel an erfahrenen und qualifizierten Handschweißern in dieser Branche drängt die Hersteller verstärkt vollmechanisierte, wirtschaftliche und prozesssichere Fertigungsprozesse zu nutzen.

Durch ständig steigende Qualitätsansprüche bei gleichzeitiger Reduzierung der Fertigungskosten werden immer höhere Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Schweißprozesse sowie an die Präzision der Nahtvorbereitung, Spanntechnik und Werkzeugführung gestellt.

Nahtverfolgungssysteme basierend auf Lasersensoren, die auf dem Prinzip des Triangulationsverfahrens beruhen, können speziell für kleine und mittelständische Schweißbetriebe ein hilfreiches Werkzeug zur Verbesserung der Prozesssicherheit bei gleichzeitiger Steigerung der Schweißnahtqualität sein. Selbst bei Einzelteilerfertigungen oder auch bei kleinen Stückzahlen können Sensoren rentabel sein, da sie den Aufwand für ein exaktes Teachin des Roboters minimieren können. Sensorsysteme sind in der Lage, eine Nahtposition und Spaltmaße als Raumkoordinaten (xyz) mit hoher Präzision 3-dimensional zu erfassen /2/, /5/. Mit einer intelligenten Sensorsteuerung sind während dem Schweißen Korrekturen bei der Brennerführung und den Schweißparametern möglich, wodurch die Prozesssicherheit deutlich erhöht werden kann.

Zahlreiche Anfragen und Gespräche zeigen ein verstärktes Interesse an solchen Sensorsystemen zur Verbesserung und Sicherstellung der Fertigungsqualität zum einen und der Wirtschaftlichkeit zum anderen /1/, /3/, /4/. Aber insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen verfügen nur über sehr geringe Kenntnisse im Hinblick auf solche Sensorsysteme. Daraus sehen sie sich häufig mit Fragen zur Handhabung, zur Funktionalität und letztendlich auch zur Wirtschaftlichkeit konfrontiert. Resultierend aus dieser Unsicherheit, einhergehend mit fehlenden Erfahrungen aus der Praxis mit der neuen Technologie sowie fehlender Mittel der kmUs, zeichnet sich deutlich Handlungsbedarf dahingehend ab, im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojektes Antworten auf diese Fragen zu finden.

2 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden Einsatzmöglichkeiten und Randbedingungen von Schweißsystemen zum adaptiven Schweißen mit Lasersensorsystemen zum Ein- und Mehrlagenschweißen ermittelt. Es wurde untersucht, ob durch ein Sensorsystem - zur Online-Nahtverfolgung, mit Erkennung der Nahtvorbereitung und kombinierter Nahtinspektion - bei Mehrlagenschweißungen ein autonomer Lagenaufbau reproduzierbar realisiert werden kann. Zeitintensive mehrlagige Schweißverbindungen könnten dann ohne ständige Aufsicht des Bedienpersonals reproduzierbar in hoher Qualität effizient hergestellt werden und den bayerischen kmUs somit wirtschaftliche Vorteile im globalen Wettbewerb verschaffen. Die Untersuchungsergebnisse geben den kmUs Hinweise im Sinne einer Entscheidungshilfe, wodurch sie besser in der Lage sind, die Qualität und Wirtschaftlichkeit ihrer Produktion sicherzustellen, ohne riskant hohe Investitionen in ein System zu tätigen.

Die Inbetriebnahme und Einarbeitungsphase in das Sensor- und adaptive Regelungssystem gestaltete sich aufgrund von Problemen mit Schnittstellenanpassungen zeitintensiv. In Zusammenarbeit mit ServoRobot wurden Entwicklungen hinsichtlich der Schnittstelle Sensor- / Robotersteuerung und der Software erfolgreich umgesetzt, die zu deutlichen Verbesserungen führten.

Das Sensorsystem arbeitet, abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, sehr zuverlässig hinsichtlich der Erkennung der Nahtvorbereitung, der Nahtverfolgung und eignet sich grundsätzlich auch zum adaptiven Regeln der Schweißparameter. Variierende Bauteilbedingungen wie z.B. Bauteillage, Spaltbreite, Nahtvorbereitung werden prozesssicher erkannt und in geeigneter Weise durch die adaptive Regelung kompensiert.

Die adaptive Regelung über das ADAP-Modul bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten der Programmierung. Weil es jedoch keine vorgefertigten ADAP-Programme für Schweißaufgaben gibt, muss der Benutzer für die jeweilige Schweißaufgabe selbst eine geeignete Strategie für die adaptive Regelung entwickeln, welche in das adaptive Programm implementiert werden muss. Die Programmierung der Nahterkennung, der Nahtverfolgung, die Festlegung von Strategien und Algorithmen, sowie die Parametrierung der adaptiven Regelung erfordert einen fachkundigen und erfahrenen Bediener. Die in diesem Projekt sehr zeitintensiv erarbeiteten Strategien und Programme liefern eine gute Basis für weitere Programme zum adaptiven Schweißen. Sie können von kmUs für eigene Anwendungen genutzt und / oder angepasst werden.

Zur Entwicklung der Regelungsstrategie zum adaptiven Mehrlagenschweißen mit dem MSG-Prozess wurden die folgenden Schweißparameter herangezogen:

- Schweißgeschwindigkeit (v_s);
- Drahtgeschwindigkeit (v_d);
- Schweißbrennerposition (Steuerung und Verschiebung des Verfolgungspunkts);
- Pendelbreite.

Die Schweißparameter werden entsprechend der Daten des Lasersystems, während dem Schweißvorgang, korrekt angepasst. Die Geometriedaten werden in einem ADAP-Programm aufgerufen und in verschiedenen Funktionen zur Umsetzung der Strategien verwendet. Die wichtigsten Erkenntnisse nach der Entwicklung und Erprobung der Algorithmen zum adaptiven, lasersensorgestützten Mehrlagenschweißen werden nachfolgend erläutert.

Bei der V-Naht ermöglicht das adaptive Schweißen eine Spaltüberbrückung von 0 bis 3,5 mm. Die Drahtgeschwindigkeit und die Pendelbreite wurden abhängig von der ermittelten Spaltbreite angepasst. Dadurch kann das Schmelzbad und die Wurzelaustragung gut kontrolliert werden. Besonders beim Schweißen der Wurzellage ist eine prozesssichere Nahterkennung notwendig. Die Prozesssicherheit hängt von der Nahtvorbereitung und der Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile ab. Die reflektierte Laserlinie wird auf matten Oberflächen zuverlässiger erkannt als auf spiegelnden Oberflächen. Weil die Berechnung der Drahtgeschwindigkeit und der Pendelbreite in Abhängigkeit von der gemessenen Spaltbreite erfolgt, führen ungenaue Messwerte der Spaltbreite, infolge schlechter Nahterkennung, zu fehlerhaften Korrekturen. Daraus resultiert ein entsprechendes Schweißergebnis.

Es wurden Algorithmen zum Mehrlagenschweißen mit Strichraupen- und Pendelraupentechnik entwickelt. Die Verschiebung der Brennerpositionen erfolgt automatisch in Abhängigkeit von der jeweiligen Schweißraupe. Die entwickelten Algorithmen erlauben eine Strichraupentechnik bis zu 3 Schweißraupen in der Decklage. Werden mehr Raupen für die Decklage

benötigt, müssen die vorhandenen Strategien für die Verschiebung der Brennerposition modifiziert werden.

Die Füllgradregelung anhand des Füllgradfaktors ($k_{\text{füllung}}$) erwies sich bei den Erprobungen als geeignet. Die Eingabe der Füllgradfaktoren hängt jeweils von der Blechdicke, der Nahtvorbereitung und dem Lagenaufbau ab (Tabelle 3).

Untersuchungen mit unterschiedlichen Blechdicken bei gleicher Nahtvorbereitung haben gezeigt, dass für jede Blechdicke entsprechende Füllgradfaktoren erarbeitet werden müssen, weil jede Blechdicke unterschiedliche aufzufüllende Schweißnahtvolumen ergeben. Weitere Untersuchungen mit verschiedenen Drahtgeschwindigkeiten und Werkstoffübergängen, für Pendeltechnik und Strichraupentechnik, zeigten, dass die Naht auch bei diesen unterschiedlichen Schweißvarianten noch gut erkannt wird und der Algorithmus zum adaptiven Schweißen zuverlässig funktioniert. Es wurde ein annähernd gleicher Lagenaufbau für alle Proben erreicht. Anzumerken ist, dass der Schweißprozess bei größeren Drahtgeschwindigkeiten (12~14 m/min) eine stärkere Rauchentwicklung zur Folge hat. Diese kann die Zuverlässigkeit der Nahterkennung stark beeinträchtigen.

Bei der Kehlnaht konnte die adaptive Regelung eine Änderung der Spaltbreite gut kompensieren, was heißen soll, dass die Spaltfläche vom Lasersensor richtig erkannt und das Schweißnahtvolumen entsprechend angepasst wird.

Bei Einlagenschweißungen in PB-Position wurde ein a_{soll} von 5 mm erreicht, ab 5 mm wird das eingebrachte Schweißnahtvolumen zu groß, was zu einer asymmetrischen Schweißnaht führt. Das Programm „Kehlnaht“ ermöglicht bei $a_{\text{soll}} \geq 5$ mm eine zweilagige Strichraupentechnik. Im Rahmen des Projektes wurden Kehlnähte mit einem a -Maß ≤ 10 mm mit Strichraupentechnik erfolgreich geschweißt. Das Schweißen mit Pendeltechnik in PB-Position hat sich, aufgrund des großen Schweißbades und die damit verbundene asymmetrische Ausbildung der Schweißnaht, als nicht zielführend erwiesen. In PA-Position erscheint die Pendeltechnik auch bei Kehlnähten mit großem a -Maß möglich. In PB-Position spielt die richtige Brennerpositionierung durch die adaptive Regelung eine wesentliche Rolle, um bei der Strichraupentechnik eine gewünschte Kehlnahtdicke zu erreichen. Die Positionierung erfolgt automatisch durch das Programm „Kehlnaht“ der adaptiven Regelung, abhängig vom vorgegebenen a_{soll} . Das verwendete adaptive Programm „Kehlnaht“ konnte auch für die Kehlnaht am Schrägstoß erfolgreich verwendet werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie gefördert (Förderkennzeichen IBS 3621b/198/1-IGF-1004-0002).

Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Der Schlussbericht zum Forschungsvorhaben ist von der GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV München, zu beziehen.

München, den 28.11.2013

Dipl.-Ing. (FH) M. Müller