

Teilprojekt A7

Titel

Nutzung der partiellen metallurgischen Injektion zur Steuerung der Erstarrungskräfte bei Schmelzschweißprozessen

Projektleitung/-bearbeitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen,
Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF)

Aufgabenstellung

Beschreiben Sie die Aufgabenstellung im laufenden Jahr Ihres Teilprojekts bzw. Ihrer Arbeitskreisgruppe.

Im ersten Jahr lag der Fokus der Arbeiten primär auf der „Befähigung“. Insbesondere der Aufbau der Messtechnik und Prüfstände standen im Vordergrund der Arbeiten. Im zweiten Jahr wurden diese genutzt um durch Prozessbeobachtung die Entstehung von Eigenspannungen sowie durch Analyse der Erstarrungs- und Umwandlungsvorgänge einen Erkenntnisgewinn zu erzielen. Im dritten Jahr wurden diese durch in-Situ Versuche erweitert. Diese fokussieren einerseits auf die Erstarrungsvorgänge sowie Temperatur-Zeitverläufen der metallurgischen Injektion, welche in Form von Low-Transformation-Temperature Materialien (LTT) in die Schmelze induziert werden. Untersucht wurde der Einfluss des Temperaturgradienten und der Phasenzusammensetzung auf den plastischen Bauteilverzug.

Vorgehensweise

Erläutern Sie die Vorgehensweise die Sie angewandt haben, um die Aufgabenstellung umzusetzen.

1) *Aufbau einer Messtechnik zur Bestimmung des Wirkungsgrades sowie des tatsächlichen Energieeintrages*

Die Energieumwandlung erfolgt beim Elektronenstrahlschweißen nicht vollständig, es treten bspw. Leistungsverluste in Form von rückgestreuten Elektronen auf. Bei einer vollständigen Durchdringung der Kapillaren durch das Werkstück treten Strahlelektronen als Überschussleistung auf der Rückseite aus (Durchtrittselektronen). Während der Wechselwirkung zwischen Strahlelektronen und Werkstoff wird die kinetische Energie der

Strahlelektronen nur teilweise in Wärme umgewandelt. Ein geringer Anteil wird rückgestreut (Rückstreuelektronen). Die Bestimmung des tatsächlichen Energieeintrages sowie des Prozess-Wirkungsgrades des Elektronenstrahlschweißprozesses ist eine qualitätsbestimmende Eingangsgröße der in der zweiten Phase geplanten numerischen Simulation zur Bestimmung der Eigenspannungsformation. Es wurde eine Messmethodik zur Bestimmung von Prozesswirkungsgrad durch Messung des Rückstreu- sowie des Durchtrittselektronenstroms entwickelt. Je nach Parameterwahl wurden Wirkungsgrade im Bereich zwischen 90% und 98% gemessen.

2) Bestimmung der oberflächennahen Spannungen im Bauteil infolge von Volumenänderung durch partielle Phasenumwandlung - Nachweis des LTT-Effekts beim Strahlschweißen

Zum Nachweis der Eigenspannungsbeeinflussung durch LTT-Schweißzusatz wurde ein Eigenspannungsmessgerät nach dem Prinzip der Bohrlochmethode mit optischer Auswertung über Electronic Speckle Pattern Interferometrie (ESPI) beschafft.

Zum Nachweis des LTT-Effekts beim Elektronenstrahlschweißen wurden Schweißnähte mit LTT-Zusatzwerkstoff sowie konventionellem Schweißzusatz miteinander verglichen. Der Nachweis der vollständigen martensitischen Umwandlung im Falle des LTT-Schweißzusatzes erfolgte im Rahmen der Kooperation zusammen mit TP A6 mittels Elektronenrückstreubeugung (EBSD). Durch die hohen Abkühlgradienten des Elektronenstrahlschweißprozesses verbleibt im Gegensatz zu den bisher veröffentlichten Arbeiten mittels Lichtbogenschweißen kein Restaustenit im Schweißgut.

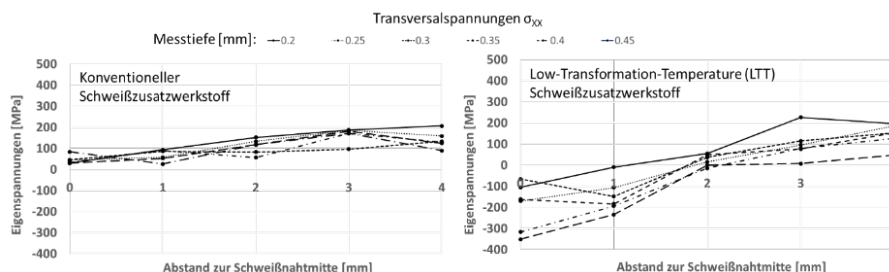


Abbildung 1: Nachweis des LTT-Effekts beim Strahlschweißen – Druckspannungsinduzierung durch den Einsatz von LTT-Zusatzdraht im qualitativen Vergleich zu konventionellem Schweißdraht G3Si1 durch Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochmethode. Ausgewertet werden Messtiefen von 0,2 bis 0,45 mm Tiefe

Der Nachweis des positiven Effektes durch die Druckspannungsinduzierung zeigt Abbildung 1. Exemplarisch werden hier nur die

Transversalspannungen dargestellt. Bei Einsatz des LTT-Werkstoffs (links) liegen die Spannungswerte für alle Messtiefen (0,20 bis 0,45 mm) wie postuliert in der Schweißnaht deutlich im negativen Bereich, während der konventionelle Zusatzdraht (rechts) zugspannungsdominiert ist. Das ISF wurde hierbei durch den Gastwissenschaftler Dr. John Francis von der Universität Manchester, ein Spezialist auf dem Gebiet der Eigenspannungen, unterstützt. Versuche an laserstrahlgeschweißten Nähten zeigen vergleichbare Ergebnisse.

3) *Prozessbeobachtung der Entstehung von thermischem und umwandlungsinduziertem Verzug durch hochauflösende Messtechnik – Digitale Bildkorrelation*

Die in-situ Detektion der Entstehung von thermischem und umwandlungsinduziertem Verzug und der Formation von Eigenspannungen im Prozess erfolgte mittels digitaler Bildkorrelation während des Laserstrahlschweißprozesses, da die Eigenspannungen zu denen beim EB vergleichbar sind.

Dabei wird vor dem Prozess ein kontrastreiches, zufälliges Farbpunktemuster auf der Bauteiloberfläche aufgetragen, Abbildung 2 rechts. Dessen Verschiebung und Dehnung wird während der Abkühlung aus der Schmelzwärme mittels eines digitalen Stereokamerasystems ermittelt. Dies erlaubt die Aufnahme von Verschiebungen sowie Dehnungen im dreidimensionalen Raum. Diese Technik ermöglicht Rückschlüsse auf den vorherrschenden Eigenspannungszustand, aufgelöst nach Ort und Größenordnung. Letzteres erfolgt durch Umrechnung basierend auf Werkstoffkonstanten wie Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl.

Die oberflächlichen Verschiebungen können in Form von Vektoren visuell dargestellt werden, Abbildung 2 links. Dabei repräsentieren der Betrag der Vektoren als auch die Färbung das Maß der Verschiebung der aktuellen Bildaufnahme zum Referenzbild. Neben der Volumenkontraktion in der Schweißnaht infolge der Abkühlung aus der Schmelze, begleitet durch den Aufbau von Zugspannungen, sind die Folgen der für die Anwendung des LTT-Effekts relevanten Druckspannungsinduzierung während der Phasenumwandlung beobachtbar. Diese äußern sich in einem Rückgang der Verschiebung zur Schweißnaht bis hin zum Aufbau von Bereichen ohne Verschiebung (Übergangsbereich in Abbildung 2 links) Somit sind die Formierung und Verschiebung von Zug- und Druckbereichen optisch identifizierbar. Im direkten Vergleich zwischen konventionellem Schweißdraht und LTT-Zusatzdraht zeigen sich die Unterschiede durch die bei geringerer

Temperatur einsetzende Martensitbildung und durch die gesamte bleibende Dehnung (durchschnittliche Ausdehnung der Vektorenlängen).

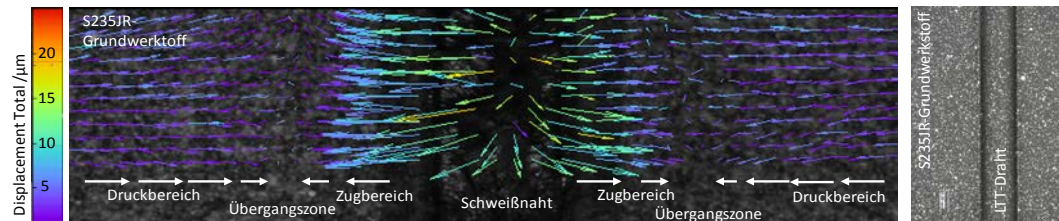


Abbildung 2: Entwicklung von Eigenspannungen während der Erstarrung einer Laserstrahlschweißnaht mit LTT-Zusatz-Werkstoff-Wirkung von Druckspannungsentstehung aus Phasenumwandlung. Momentaufnahme während der Abkühlung, bezogen zum Referenzbild im warmen Zustand (links)- Betrag und Farbe der Vektoren beschreiben die Verschiebung/Dehnung, Farb-Punktemuster als Vorbereitung der digitalen Bildkorrelation (rechts)

4) In-situ-Prozessbeobachtung der Erstarrungsvorgänge und Temperaturen von metallurgischer Deposition aus LTT-Legierung – Infrarot-Thermografie

LTT-Werkstoffe durchlaufen die Phasenumwandlung von Austenit zu Martensit in Abhängigkeit der Legierungselemente Chrom, Nickel und Mangan im Schweißgut bei unterschiedlichen Temperaturen. Für die Applikation von Wärmefeldern, die lokal die Abkühlgradienten und folglich die Spannungsformation beeinflussen, sind genaue Kenntnisse über die Temperaturverteilung und eine thermische Identifikation der Phasenumwandlung im Prozess notwendig. Entsprechende Information sind mittels hochauflösender Infrarot-Thermografie detektierbar, Abbildung 3. Dazu wird im Laserstrahlschweißprozess eine Infrarotkamera implementiert, die den Strahlauftreffpunkt und seine direkte Umgebung analysiert. Zur Interpretation der örtlichen Ausdehnung der Isothermen sind im Abstand von 5 mm orthogonal zur Schweißrichtung Markierungen auf der Oberfläche angebracht. Durch das Freisetzen der latenten Wärme während der martensitischen Phasenumwandlung bildet sich beim Einsatz des LTT-Werkstoffes ein wesentlich längerer Isothermenscheit als beim Einsatz eines konventionellen Werkstoffes (G3Si1).

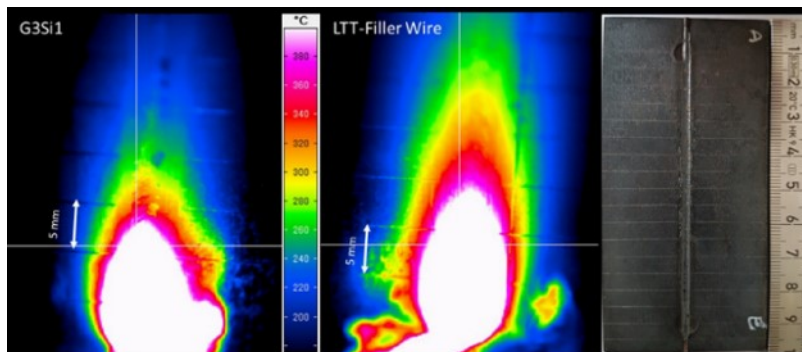


Abbildung 3: Hochauflösende Thermografiemessung - Vergleich von unlegiertem Zusatzwerkstoff G3Si1 (links) und LTT Zusatzmaterial im Laserstrahlschweißprozess (Mitte) – Nahtvorbereitung mit Maßstab und Markierung (rechts).

5) Adaption der Drahtförderung im Elektronenstrahlschweißprozess

Die Adaption einer Kaltdrahtfördereinrichtung für LTT-Zusatzmaterial in Drahtform ermöglicht die Deposition des Zusatzwerkstoffes in den Schweißprozess. Der Elektronenstrahl wird durch hochfrequente Wechselfelder in der Ablenkspule aufgeteilt in eine Punktfigur hoher Intensität und einer breit gependelten Linienfigur. Die Punktfigur sorgt durch Anwendung des Tiefschweißeffektes zur Anbindung großer Blechdicken, während die Linienfigur nachlaufend das Zusatzmaterial aufschmilzt. Als Nahtvorbereitung wurde eine rechteckige Nahtfuge in Größendimension des Zusatzdrahtes gewählt. Durch Wahl der chemischen Zusammensetzung des Zusatzdrahtes, der Drahtfördergeschwindigkeit sowie der Leistungsverteilung zwischen Punkt und Linienfigur kann das Schweißergebnis und die Gefügezusammensetzung in der Schweißnaht beeinflusst werden und folglich auch die Temperatur der martensitischen Phasenumwandlung. Bei der Ausführung von Verbindungsschweißungen ergibt sich somit die Möglichkeit, direkten Einfluss auf den Verzug zu nehmen und diesen z.B. anhand des Winkelverzuges in Querschliffrufen zu vermessen.

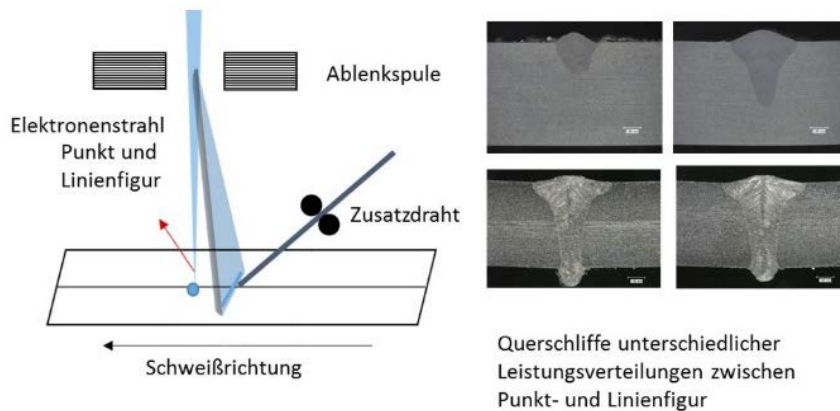


Abbildung 4: Prinzip der Prozessanordnung Partielle metallurgische Injektion (PMI) im Elektronenstrahlschweißprozess (links) und Querschliffe von Schweißnähten mit PMI unterschiedlicher Leistung und Legierungszusammensetzung (rechts)

Ergebnisse

Nennen Sie Ihre erzielten Ergebnisse im Hinblick auf die Aufgabenstellung.

Bezogen auf die übergeordnete Zielsetzung des SFB in Phase 1 (Messen) kann festgestellt werden, dass mit digitaler Bildkorrelation sowie hochauflösender Infrarot-Thermografie zwei in-situ Messmethoden für das Strahlschweißen entwickelt wurden, die das Phasenumwandlungsverhalten der metallurgischen Injektion aufzeigen.

Je nach Legierungszusammensetzung können Winkelverzüge bereits ohne präzise Optimierung der Umwandlungstemperatur um 30% reduziert werden, wie ein Vergleich zwischen Verbindungsschweißungen an austenitischem Edelstahl (1.4301) mit artgleichem sowie niedriglegiertem Schweißzusatz zeigen, Abbildung 5. Während ein unlegierter Schweißzusatz (oben) ein LTT-Gefüge in der Schweißnaht erzeugt, wird ein artgleicher Schweißzusatzwerkstoff als Benchmark herangezogen. Je nach Parameterwahl ist eine Winkelverzugsmindeung um 30% möglich. Mit steigendem Energieeintrag nimmt der Winkelverzug in Folge einer sinkenden M_s ab. Diese ist durch eine zunehmende Volumenexpansion durch Zulegieren von Chrom und Nickel aus dem hochlegiertem Grundwerkstoff begründet. Somit nimmt die Wirkung des LTT-Effekts zu.

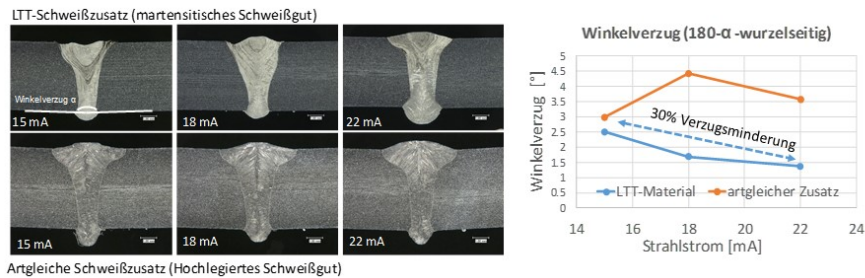


Abbildung 5: Vergleich zwischen LTT-Schweißzusatz (oben) und artgleichem hochlegiertem Schweißzusatz (unten) bei variierendem Energieeintrag (links), Vergleich der Winkelverzug auf der Nahtunterseite (rechts)

Zusammenfassung und Ausblick

Schreiben Sie eine kurze abschließende Zusammenfassung und geben Sie einen Ausblick über die nächsten Schritte in Ihrem Teilprojekt bzw. Ihrer Arbeitsgruppe.

In-Situ Messmethoden, wie digitale Bildkorrelation und hochauflösende Infrarot-Thermografie erlauben eine Detektion von Phasenumwandlungen aufgelöst nach Temperatur, Ort und Größenordnung sowie deren Auswirkung auf den Bauteilverzug. Damit stellen sie das Handwerkszeug bereit um bei Einsatz von martensitisch umwandelnden LTT-Legierungen den plastischen Bauteilverzug zu minimieren.

Der Einsatz von LTT-Werkstoffen als metallurgische Injektion im Strahlschweißprozess ermöglicht bereits ohne Optimierung eine Verzugsreduktion von 30% im Vergleich zum Einsatz von artgleichen Schweißzusätzen. Die entwickelten Messmethoden zur Bestimmung des tatsächlichen Energieeintrages erlauben zukünftig in Kombination mit einer numerischen Prozesssimulation sowie der Abbildung der Eigenspannungsentstehung durch Struktursimulation eine weitere Optimierung der Verzugsminde rung.

Eine Variation der Martensit-Start-Temperatur (M_s), welche Auswirkung auf die Eigenspannungsentstehung und folglich auf den plastischen Bauteilverzug nimmt, erfolgt dabei durch eine Modifikation der verwendeten Legierungssysteme. Diese wird durch Einsatz partielle metallurgische Injektion von LTT-Werkstoff in Drahtform im Strahlschweißprozess erreicht.

Die Verifikation der Simulationsergebnisse soll durch die Messung von Oberflächenverschiebungen/-dehnungen (digitale Bild-

korrelation) sowie Thermografiemessungen und daraus abgeleitet der Rückschluss auf oberflächennahe Spannungen beim Strahlschweißen erfolgen. Eine Überprüfung der ermittelten Spannungen soll post-mortem durch die Bohrlochmethode mit optischer Auswertung durch Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), Röntgenbeugungsmessungen (A12) bzw. Elektronenbeugung im Transmissionselektronenmikroskop (A6) erfolgen.

Veröffentlichungen

Geben Sie einen Überblick über Ihre Publikationen im laufenden Jahr.

a) Referierte Veröffentlichungen:

- 1) Gach, S., Schwedt, A., Olschok, S., Reisgen, U. and Mayer, J., 2017. Confirmation of tensile residual stress reduction in electron beam welding using low transformation temperature materials (LTT) as localized metallurgical injection – Part 1: Metallographic analysis; *Materials Testing* 59, 2017, S. 148-154, Verfügbar unter: DOI: 10.3139/120.110957
- 2) Gach, S., Olschok, S. Francis, J.A., Reisgen, U., 2017. Confirmation of tensile residual stress reduction in electron beam welding by use of low transformation temperature materials (LTT) as localised metallurgical injection – Part 2: Residual stress measurement, *Materials Testing* 59, 2017, S. 618-624. Verfügbar unter: DOI: 10.3139/120.111046
- 3) Francis, J. Gach, S., Olschok, S., Haeusler, A., Gillner, A., Poprawe, R., Reisgen, U., 2017. Characterisation of Quasi-Stationary Temperature Fields in Laser Welding by Infrared Thermography, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2017, 48 (Heft 12)
- 4) Reisgen, U., Olschok, S., Sharma, R., Gach, S., 2017. Influence on Martensite-start-temperature and volume expansion of Low-Transformation-Temperature (LTT) materials used for residual stress relief in beam welding, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2017, 48 (Heft 12)
- 5) Reisgen, U., Sharma, R., Gach, S., Olschok, S., Francis, J.A., Bobzin, K., Oete, M., Wiesner, S., Knoch, M. Schmidt A., 2017. Residual stress measurement in AISi alloys, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2017, 48 (Heft 12)

b) Andere Veröffentlichungen - Konferenz Beiträge/ Veröffentlichung in Tagungsbänden:

- 1) Reisgen, U., Olschok, S., Gach, S., 2017. Residual stress reduction by low-transformation-temperature (LTT) filler materials for stress reduction in electron beam welding -Electron Beam Welding. In: DVS Berichte, Band 334, DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2017
- 2) Reisgen, U., Olschok, S., Mokrov, O., Gach, S., Akyel, F., 2017. Simulation des thermischen Einflusses auf Verzug und Eigenspannungen in Kohlenstoff-Mangan-Stählen im Elektronenstrahlschweißprozess. In DVS-Berichte Band 337, 2017, S.96-101 ISBN 978-3-96144-008-5