Universität Stuttgart



On-line Prozessüberwachung beim Laserstrahltiefschweissen

Das Ziel jeder Qualitätssicherungsstrategie ist es, Ausschussund Nacharbeitskosten zu senken. Zum Erreichen dieses Ziels bedarf es einer Qualitätsprüfung, die nicht erst als eine Beurteilung des fertigen Bauteils im Sinne einer Ausschusserkennung ansetzt. Für das Laserstrahltiefschweißen bietet ein Zusammenhang zwischen Einkoppelgrad der Laserstrahlung und Schachtverhältnis der Dampfkapillare die Möglichkeit, eine 100%-Dokumentation hinsichtlich der Nahtqualität aus der Tiefe des zu bearbeitenden Werkstoffvolumens on-line zu erhalten. Die durch Laserstrahlung erzeugte Dampfkapillare, die das Tiefschweißen ermöglicht, wird dabei als prägender Informationskanal für die aus der Kapillare rückreflektierte Laserstrahlleistung verwendet. Eine Simulationsrechnung zeigt hierfür die optimale Detektorposition, ein vielfältiges Versuchsprogramm erbrachte den Nachweis der Funktionsfähigkeit.

PhysikalischeGrundlagen

Die aus der Dampfkapillare reflektierte Laserleistung ist dem Anteil der einfallenden Laserleistung, der nicht in der Kapillare absorbiert wird, gleichzusetzen: $P_r = P_L(1-\eta_A)$ Die Absorption η_A in der Kapillare kann durch ein Modell, basierend auf Vielfachreflexionen an deren Wänden, beschrieben werden (s.Abb. 1).MitHilfe optischen Raytracing wurde ein Algorithmus entwickelt, der in Abhängigkeit der einfallenden Laserleistung, deren Wellenlänge, Polarisation, Leistungsdichteverteilung und Strahlpropagation sowie den



Abb.1: Vielfachreflexion in der Kapillare

optischen Eigenschaften des Werkstoffs die reflektierte Laserleistung und deren räumlichen Verteilung berechnet. Verschiedene Kapillargeometrien wurden angenommen, um den Einfluss der Prozessparameter auf den Reflexionsgrad darzustellen.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnung zeigen eine asymptotische Annäherung des Reflexionsgrads zur vollständigen Einkopplung mit steigendem Schachtverhältnis der Kapillare (s. Abb. 2). Begründet ist dies durch die sich erhöhende Anzahl an Vielfachreflexionen und der damit einhergehenden Wandabsorption. Die kürzere Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers bedingt diesen Verlauf bereits bei kleineren Aspekten im Vergleich zu CO₂-Lasern aufgrund der höheren Wandabsorption. Die reflektierte Leistung ist daher ein direkter Indikator des Aspektverhältnis der Kapillare und damit der Einschweißtiefe, sofern der Kapillardurchmesser konstant bleibt.

Nahtfehler

Die Dampfkapillare wird durch die hohe Intensität des Laserstrahls gebildet und wächst durch hohe Absorption im Bereich des Kapillargrunds indieTiefe, bis sich ein Kräftegleichgewicht eingestellt hat. Der Gesamtdruck in der Kapillare, der hydrostatische und -dynamische Druck der Schmelze und deren Oberflächenspannung geben der Kapillaren ihre Geometrie. Laterale Oszillationen der Kapillare können bis zur vollständigen Blockade des ausströmendenMetalldampfes führen. Daraus ergibt sich ein Druckaufbau im Kapillargrund, der eine Schmelzauswurf.

Die einher gehende Veränderung des Schachtverhältnis beeinflusst den Reflexionsgrad der Kapillare als auch die räumliche Verteilung der reflektierten Laserleistung. DieModellrechnung zeigt, dass ein bezüglich der Kapillaren stechend angeordneter Detektor dabei den größten Signalgradienten erwarten lässt.

Experimentelle Evaluierung

Für Nd:YAG- und CO₂-Laser wurden unterschiedlicheMesssysteme entwickelt. Zur Datenaquise dient ein Laser WeldingMonitorLWM900 der Fir-





Vergrößerung des Kapillarvolumens hervorruft. Die Verdrängung der Schmelze führt dabei zu einer positiven Rückkopplung. Prozessporen entstehen, wenn durch Abschnüren der Kapillare die so entstandene Schmelzbrücke erstarrt, ohne dass der darunter liegende Hohlraum aufgefüllt wird, und der darin enthaltene Metalldampf an den Wänden kondensiert. Übersteigt der Druck im inneren der Kapillare den Widerstand der entgegenwirkenden Kräfte um ein Vielfaches, kommt es zum

ma JURCA Optoelektronik mit hoher zeitlicher Auflösung. Flankierend wurde der Schweißprozess mit einem Hochgeschwindigkeits-Videosystemobserviert.

Realisierung des Messaufbaus

Im Strahlengang des Nd:YAG-Lasers befindet sich ein teildurchlässiger Spiegel (Strahlteiler) als 90° -Umlenker, dessen Transmissionsgrad T_i=1% beträgt. Die vom Strahlteiler reflektierten 99% Laserleistung des Leistungsstrahls werden fokussiert (Fokussierlinse mit Brenn-weite $f_B=150$ mm), um dann mit dem Werkstück in Wechselwirkung zu treten. Nicht absorbierte Laserstrahlung tritt aus der Dampfkapillare, durchläuft Fokussierlinse, Strahlteiler und Interferenzfilter (λ =1064 ± 3 nm) und trifft schließlich auf



Abb.3: Messaufbau für Nd:YAG-Laser

die zur Messung der rückreflektierten Laserstrahlung verwendete Silizium-Photodiode. Der Interferenzfilter gewährleistet bei der Messung der rückreflektierten Laserstrahlung, dass keine Streustrahlung fremder Lichtquellen (z.B. einer breitbandig emittierenden Metalldampfwolke) das Ergebnis verfälschen kann (s. Abb. 3).

Im Gegensatz zu den teildurchlässigen optischen Komponenten für die kürzere Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers bedarf der Messaufbau für CO₂-Laser einen Scraper Spiegel oder einen Lochspiegel zur Auskopplung der reflektierten Leistung.

Einschweißtiefe und Reflexionsgrad der Kapillare

Referenzschweißungen in Stahl konnten den grundlegenden Zusammenhang zwischen Aspektverhältnis und Reflexionsgrad der Kapillare nachweisen. Abbildung 4 zeigt den Einfluss ansteigender Vorschubgeschwindigkeit auf die Einschweißtiefe (aus Schliffbild), auf den Kapillaröffnungsdurchmesser (aus Videoaufnahmen) und damit auf das Schachtverhältnis. Mit fallendem Schachtverhältnis steigt der Reflexionsgrad der Kapillare an; dies konnte sowohl experimentell (aus Rückreflexmessung) als auch theoretisch (aus Simulationsrechnung) dargelegt werden. Die grundlegende Funktionsfähigkeit zur Messung der Einschweißtiefe ist damit nachgewiesen. Auch zeigen sich hier bereits die Grenzen des Verfahrens: Zu große Schachtverhältnisse (für die hier verwendete Fokussierung S>8) absorbieren nahezu die gesamte Laserleistung und damit das Messsignal. Änderungen der Einschweißtiefe werden nicht mehr im Signalverlauf der reflektierten Laserleistung angezeigt.

Weiterführende Versuche mit dem Werkstoff Stahl ergaben, dass der untersuchte Indikator Nahteigenschaften belegen kann wie z.B. Ein- und



Abb. 4: Versuchsergebnisse zur Einschweißtiefe



Abb. 5: Schmelzauswurf beim Schweissen von AlMgSi1

Durchschweißung, Anbindefehler im Überlappstoß, Nahtlage an der Kehlnaht, Spalt am Stumpfstoß und Nahteinfall.

Poren und Auswürfe

Erhebliche Kapillarfluktuationen als Vorboten von Poren und insbesondere Auswürfen zeichnen sich durch Abbildung eines Messflecks, der unmittelbar hinter der kontinuierlich ausgebildeten Kapillare auf dem Schmelzbad liegt, deutlich im Messsignal ab. Die Wellenbewegung des Schmelzbads (Al: ca. 350Hz) kollidiert mit dem ausströmenden Metalldampf, der erhöhte Druck im inneren der Kapillare kann zum Abschnüren eines Hohlraums oder zum Auswerfen der Schmelze führen. Die einhergehende Vergrößerung der Kapillaröffnung lässt den Messfleck in den Bereich der Re-Emissionen wandern und für Signalausschlag sorgen. Zusätzlich verringert sich das Schachtverhältnis, der Reflexionsgrad nimmt zu. Die Sequenz in Abbildung 5 zeigt das Abheben des gesamten Schmelzguts in hoher zeitlicher Auflösung. Für einen Zeitraum von ca. 10ms wird das Aspektverhältnis der Kapillare durch die Schmelzbaddimension bestimmt. Dies sehr kleine Schachtverhältnis resultiert in einem Maximum der gemessenen reflektierten Laserleistung.

Ausblick

Die Erfahrungen und Ergebnisse werden nun in einem bilateralen Projekt mit Industriepartnern aus der Systemtechnik und Applikation genutzt, um die verwendeten Prototypen in ihrer Funktion zu optimieren und zugleich ein industrietaugliches Produkt zu entwickeln. Dabei werden insbesondere ein einfacher und robuster Aufbau berücksichtigt, als auch eine vollständige Integration der Sensorik in den Bearbeitungskopf, um diese vor Einflüssen einer industriellen Umgebung zu schützen.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung der Forschungsarbeiten im Rahmen des Projekts 'Online Detektion innerer Nahtqualität beim Laserstrahltiefschweissen' (Förderkennzeichen13N6787).

Institutsadresse: Institut für Strahlwerkzeuge Pfaffenwaldring 43 70569 Stuttgart Tel.: +49 (0)711-685 6840 Fax: +49 (0)711-685 6842 Kontakt / Redaktion. Dipl.-Ing. Matthias G. Müller FGSW - Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge Nobelstr. 15 70569 Stuttgart Tel.: +49 (0)711-687 4321 Fax: +49 (0)711-685 6842 E-Mail: matthias.mueller@fgsw. uni-stuttgart de http://www.ifsw.uni-stuttgart.de