



Title	Eliminierung der "Plume" beim Laserschweißen von Rohren kleinen Durchmessers mit dem YAG-Hochleistungslaser(Physics, Process, Instruments & Measurements)
Author(s)	Matsuda, Fukuhisa; Matsumoto, Osa; Ishide, Takashi
Citation	Transactions of JWRI. 1992, 21(1), p. 29-35
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/3954
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Eliminierung der "Plume" beim Laserschweißen von Rohren kleinen Durchmessers mit dem YAG-Hochleistungslaser†

Fukuhisa MATSUDA*, Osa MATSUMOTO** and Takashi ISHIDE**

Zusammenfassung

Der YAG-Laserstrahl kann mit Lichtleitfasern übertragen werden, womit das YAG-Laserschweißen geeignet zum Schweißen im engen Raum ist. Um optimale Schweißungen zu erzielen, ist es jedoch sehr wichtig, die "Plume" zu eliminieren.

Dieses Papier berichtet über eine Untersuchung von Laserschweißphänomenen mit verschiedenen Schutzgasen und Kontrollverfahren zum Schutz optischer Komponenten wie Spiegel und Linsen vor Beschädigung durch die "Plume".

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Untersuchung wendeten wir das YAG-Laserschweißen zum Büchsen-schweißen an den Wärmetauscherrohren der Dampfgeneratoren eines PWR-Kernkraftwerks an.

KEY WORDS: (YAG-Laserschweißung) (Lichtleitfaser) (Schutzgas) (Laserplume) (Büchsen-schweißen) (Dampfgeneratoren)

1. Einführung

Die Büchsenteknik ist die praktischste Methode zur Instandsetzung beschädigter Rohre eines in Betrieb befindlichen Dampfgenerators. In diesem Fall wird eine Büchse von kleinerem Durchmesser ($\phi 18.8 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$) in ein Rohr mit kleinem Durchmesser ($\phi 22.2 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$) ein-

geführt. Die beschädigte Stelle befindet sich sowohl in der Stützplatte wie in der Wand des Rohrs; das Schweißen muß, wie Abb. 1 zeigt, in sehr engem Raum durchgeführt werden. Die Autoren haben ein YAG-Hochleistungsschweißsystem (2 kW) mit Lichtleitfasern entwickelt.¹⁾²⁾ Dieses System wird in Abb. 2 gezeigt. Der 2 kW YAG-Lasersoszillator³⁾⁴⁾ wird außerhalb des Sicherheitsbehälters

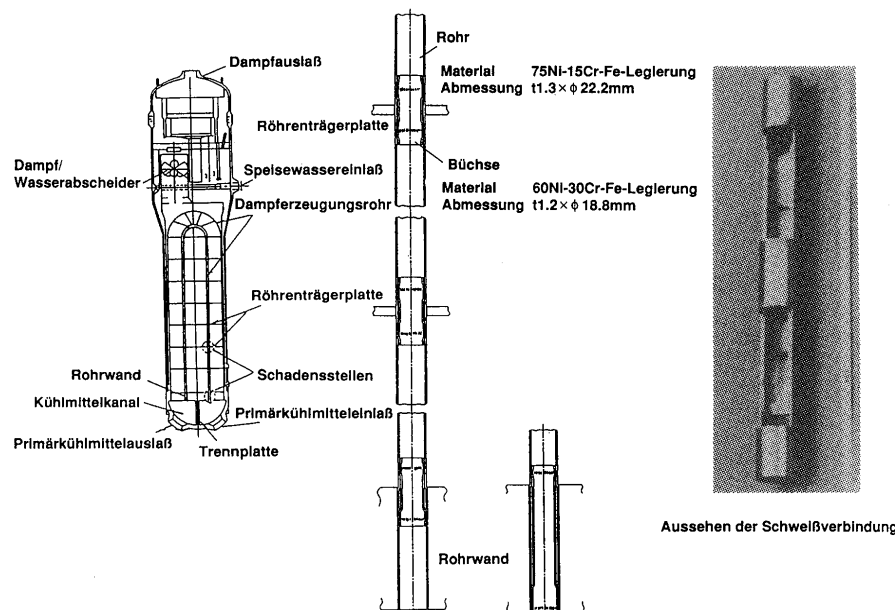


Abb. 1 Schadensstellen und das Büchsenkonzept

† Received on May 6, 1992

* Professor

** Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

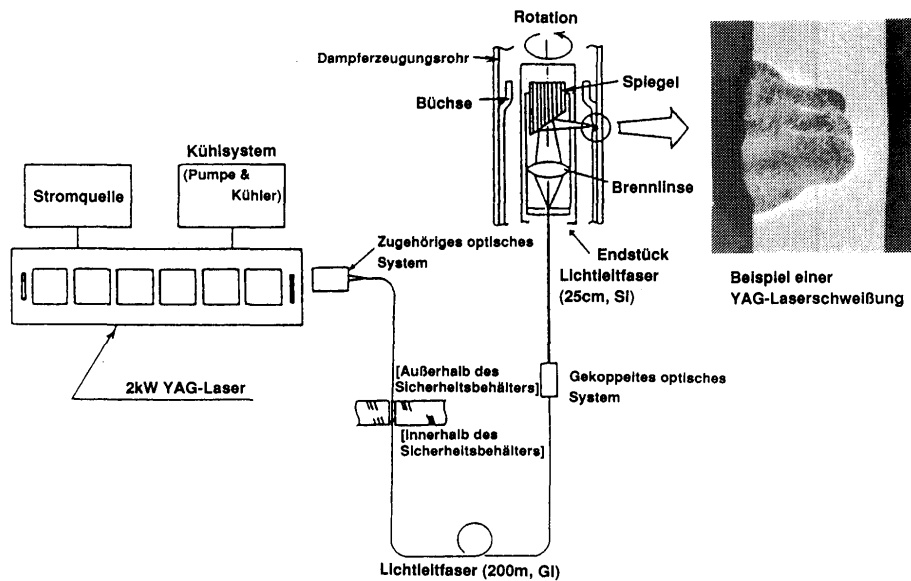


Abb. 2 Schematische Darstellung der Einrichtung zum Laser-Büchsen-schweißen

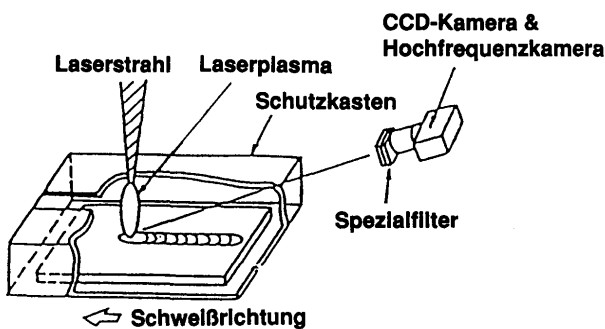


Abb. 3 Laserplasma-Beobachtungsmethode

aufgestellt. Der Laserstrahl wird über Quarzlichtleiterfasern zum Endstück übertragen. Deshalb ist es von äußerster Wichtigkeit, die optischen Komponenten vor Beschädigung durch die von der nächsten Schweißstelle erzeugten "Plumes" zu schützen.

2. Verhalten der "Plume" in verschiedenen Schutzgasen

Zuerst wurde mittels eines 20 kW CO₂-Lasers das Verhalten der "Plume" in Ar-, N₂- und He-Atmosphären untersucht. Abb. 3 zeigt das Beobachtungsverfahren für die

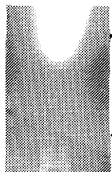
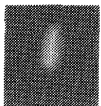
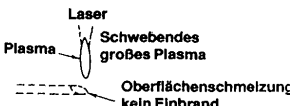

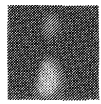
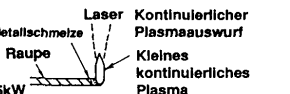
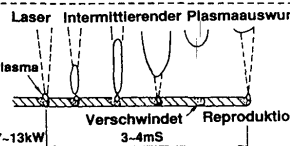
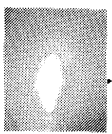
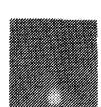
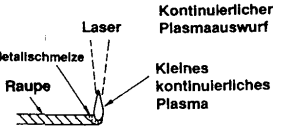
Schutzgas	CO ₂ - Laserleistung	Laserplasma-Phänomene		
		CCD-Kamera (12kW, 1m/Min.)	Hochfrequenzkamera (30000 Bilder/s)	
Ar	5kW ↓ 13kW	 <p>Plasma</p> <p>Oberflächenschmelzung</p>		 <p>Laser</p> <p>Plasma</p> <p>Schwebendes großes Plasma</p> <p>Oberflächenschmelzung kein Einbrand</p>
N ₂	5kW ↓ 7kW ↓ 13kW	 <p>Plasma</p> <p>Metallschmelze</p> <p>Raupe</p>		 <p>Laser</p> <p>Metallschmelze</p> <p>Raupe</p> <p>5kW</p> <p>Kontinuierlicher Plasmaauswurf</p> <p>Kleines kontinuierliches Plasma</p>
				 <p>Laser</p> <p>Intermittierender Plasmaauswurf</p> <p>Plasma</p> <p>Verschwindet</p> <p>Reproduktion</p> <p>3-4mS</p> <p>7-13kW</p>
He	5kW ↓ 15kW	 <p>Plasma</p>		 <p>Laser</p> <p>Metallschmelze</p> <p>Raupe</p> <p>Kontinuierlicher Plasmaauswurf</p> <p>Kleines kontinuierliches Plasma</p>

Abb. 4 Wirkung des Schutzgases auf CO₂-Laserplasma-Phänomene

“Plume”. CO₂-Laserschweißen wurde in dem Schutzkasten durchgeführt, und das Verhalten der “Plume” wurde von der Rückseite des Schmelzbads aus mit einer CCD-Kamera und einer Hochfrequenzkamera beobachtet. Die “Plume” wird mit zunehmender Stärke des Laserstrahls größer. In der Ar-Atmosphäre wurde die schwebende “Plume” 30–50 mm über dem Schmelzbad gebildet. Andererseits wurde die “Plume” in der N₂-Atmosphäre bei einer Laserleistung von 5 kW kontinuierlich gebildet und bei einer Laserleistung von 7–13 kW intermittierend alle 3–4 ms. Daher schwankt die Einbrandtiefe periodisch. In der He-Atmosphäre wurde die kleine “Plume” kontinuierlich gebildet. Die “Plume” wurde in einer zunehmenden Intensitätsreihenfolge für Ar, N₂ und He gebildet.

In der spektrochemischen Emissionsanalyse wurden N₂ und He nicht entdeckt, Ar wurde in allen Atmosphären entdeckt. He wurde in allen Atmosphären entdeckt. Es

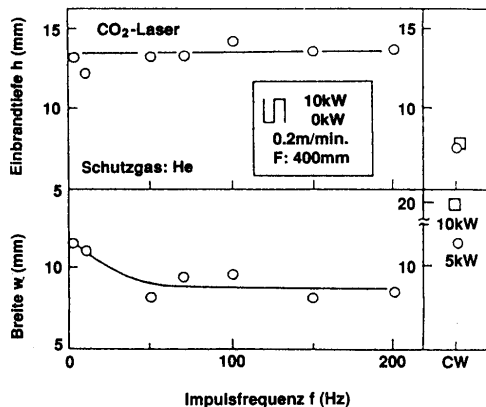


Abb. 5 Wirkung der Impulsfrequenz (f) auf Einbrandtiefe (h) und Breite (w)

wird angenommen, daß die “Plume” durch Verdampfung des Grundwerkstoffs gebildet wird. Als Methoden zur Reduzierung der “Plume” wurden Strahlpulsierung und Vakuumatmosphäre untersucht.

Abb. 5 zeigt die Wirkung der Impulsfrequenz auf Einbrandtiefe und Raupenbreite. Abb. 6 zeigt die Makrostrukturen. Die mit dem Impulsstrahl erzielte Einbrandtiefe war ungefähr 1.5 mal so groß wie die mit dem Dauerstrahl mit einer Leistung von 5 und 10 kW erreichte. Die Impulsfrequenz wurde von 5 bis 200 HZ verändert. Die Beobachtung bestätigte, daß bei der Grundlaserleistung die “Plume” verschwand.

Die oben erwähnte Strahlpulsierung ist eine praktische Technik zur Reduzierung der “Plume”, aber es lag trotzdem noch “Plume”-Bildung vor. Um die “Plume”-Bildung zu minimieren, wurde die Wirkung eines Vakuums untersucht. Abb. 7 zeigt die Makro-Schnitte bei einer Laserleistung von 10 kW. Die Einbrandtiefe war fast konstant bei einem Umgebungsatmosphärendruck von 50 Torr oder weniger und war etwa 3 mal so groß wie die im Atmosphärendruck erzielte. Bei einem Umgebungsatmosphärendruck von 10 Torr oder weniger verschwand die “Plume”.

Abb. 8 zeigt die “Plume” beim YAG-Laserschweißen. Die “Plume” nahm größenmäßig in der Reihenfolge Ar, N₂ und He zu, wie beim CO₂-Laserschweißen. Aber die Einbrandtiefe war nahezu gleich in den verschiedenen Schutzgasen. Es wurde angenommen, daß die Ursache dafür die Wirkung der Frequenz war. Die Frequenz des YAG-Laserstrahls ist nämlich größer als die des Laserplasmas. Der YAG-Laser wird nie in der “Plume” absorbiert.

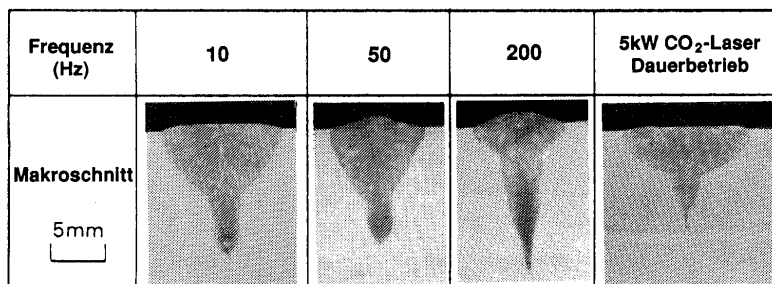


Abb. 6 Wirkung der Impulsfrequenz auf die Raupenform

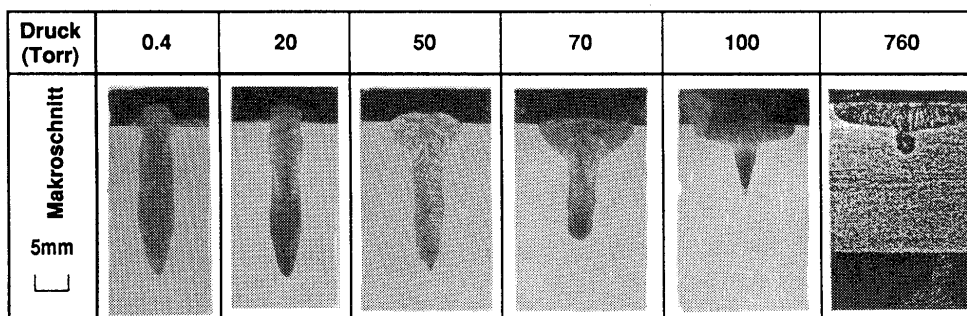


Abb. 7 Makroschnitt bei verschiedenen Drücken (CO₂-Laser 10 kW, 0.2 m/Min.)

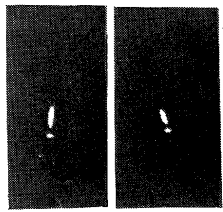
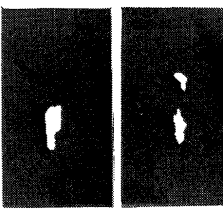
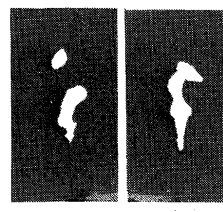

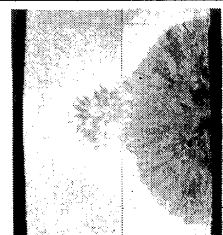
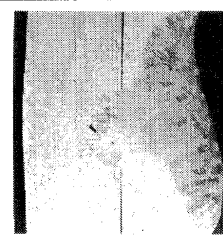
	He	N ₂	Ar	Bemerkungen
"Plume"-Phänomene				YAG-Laserleistung: 800W Dauerbetrieb Schweißgeschwindigkeit: 0.2mm/Min. Aufnahmegeschwindigkeit: 5000 Bilder/s 5.0 mm
Querschnittsmakrostrukturen	 Porosität	 Keine Porosität	 Porosität	YAG-Laserleistung: 730W Dauerbetrieb Schweißgeschwindigkeit: 0.2mm/Min. 1.0 mm

Abb. 8 Wirkung des Schutzgases auf die Porosität im Schweißgut und YAG-Laser "Plume"-Erzeugung

Beim YAG-Laserschweißen ist es sehr wichtig, Porosität zu verhindern.

In den Fällen, wo das Schutzgas He oder Ar war, wurde Porosität im Schweißgut gefunden, bei N₂ dagegen wurde keine Porosität festgestellt. Das liegt vielleicht daran, daß die Oberflächenspannung des Schmelzbads durch Hinzufügung von N₂ verringert wird und geringere Oberflächenspannung es leicht macht, Porosität vom Schmelzbad zu vermeiden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wählten wir N₂ als Hautschutzgas.

3. Das Schutzgas beim YAG-Laserschweißen

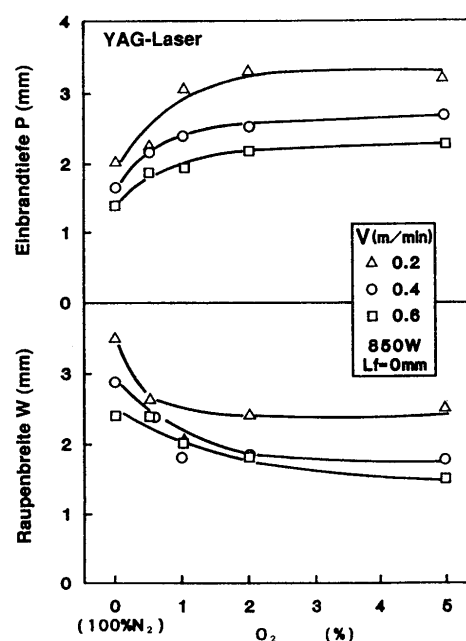
Die Wirkung der O₂-Konzentration im Schutzgas auf die Einbrandtiefe wurde bei einer Laserleistung von 850 W (Dauerbetrieb) untersucht. Die Testergebnisse werden in Abb. 9 gezeigt. Bei jeder Schweißgeschwindigkeit nahm die Einbrandtiefe mit Erhöhung der O₂-Konzentration zu. Und wenn die O₂-Konzentration etwa 2% überstieg, erreichte die Einbrandtiefe ihre Sättigung.

Die Beziehung zwischen der O₂-Konzentration und der "Plume" (Spritzer)-Erzeugung wurde untersucht. Bei diesem Test wurde die Schweißgeschwindigkeit bei 0.6 m/Min. gehalten, und die Laserleistung (Modulationsgrad: 100%, Tastverhältnis: 50%) wurde verändert. Die "Plumes" (Spritzer) nahmen mit zunehmender Laserleistung zu, und bei höherer O₂-Konzentration wurden mehr Spritzer erzeugt. Die Tatsache, daß die Menge der erzeugten Spritzer der Einbrandtiefe entspricht, läßt darauf schließen, daß die Erzeugung von Spritzern durch den plötzlichen Druckanstieg im Schmelzbad verursacht wird. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde 2% O₂-N₂-Gas als Schutzgas gewä-

hlt.

4. Schweißtechnische Bedingungen des YAG-Laserschweißens

Die Wirkung eines Laserausgangsmusters auf die Einbrandtiefe wurde untersucht. Bei einer Laserleistung von 575W und einer Schweißgeschwindigkeit von 0.8 m/Min. war die Einbrandtiefe etwa 0.5 mm im Dauerbetrieb. Bei Modulation des Lasers (Impulsbetrieb: Modulationsgrad: 100%, Tastverhältnis: 50%, Pulsrepetitionfolge: 42 pps),

Abb. 9 Wirkung der O₂-Konzentration im Schutzgas

wurde eine Einbrandtiefe von 1.7 mm erzielt. Es wird angenommen, daß dies daher kommt, weil die Spitzenleistung des Lasermusters infolge der Modulation des Lasers zunimmt.

Eine Wirkung der Pulsrepetitionsfolge auf die Einbrandtiefe wurde im Testbereich von 30–50 pps nicht festgestellt. Eine extrem niedrige Pulsrepetitionsfolge ist jedoch nicht wünschenswert, weil die Verteilung der Einbrandtiefe entlang der Schweißrichtung dann nicht einheitlich ist. Auf der Grundlage dieser Testergebnisse wurden die Bedingungen des Laserausgangsmusters festgelegt auf 100% Modulationsgrad, 30–50 pps Pulsrepetitionsfolge und 50% Tastverhältnis. **Abb. 10** zeigt ein Beispiel des mit den obigen Bedingungen modulierten Laserausgangsmusters.

Unter Verwendung des optischen Systems wurde die Beziehung zwischen Einbrandtiefe und Defokussierabstand L_f bei einer Laserleistung von 500 und 650 W untersucht. Die Testergebnisse werden in **Abb. 11** gezeigt. Es ergab sich, daß unter den Bedingungen von 650 W Laserleistung und 0.4 mm/Min. Schweißgeschwindigkeit trotz einer Abweichung von ± 0.8 mm des Defokussierabstands eine Einbrandtiefe von mehr als 1.8 mm erzielt wurde. **Abb. 12** zeigt ein Beispiel von Querschnittsmakrostrukturen der

Schweißung. Es zeigte sich, daß ohne Defekte eine austreichende Einbrandtiefe erreicht wurde.

Aus diesen Untersuchungen ergibt sich, daß eine Büchse von 1.2 mm Dicke mit den folgenden Bedingungen trotz einer Abweichung von ± 0.8 mm des Defokussierabstands unter Verwendung des optischen Systems and das Rohr geschweißt werden kann.

Schutzgas : 2% O₂-N₂
 Pulsrepetitionsfolge : 42 pps
 Laserleistung : $\cong 650$ W
 Modulationsgrad : 100%
 Tastverhältnis : 50%
 Schweißgeschwindigkeit: $\cong 0.4$ m/Min.

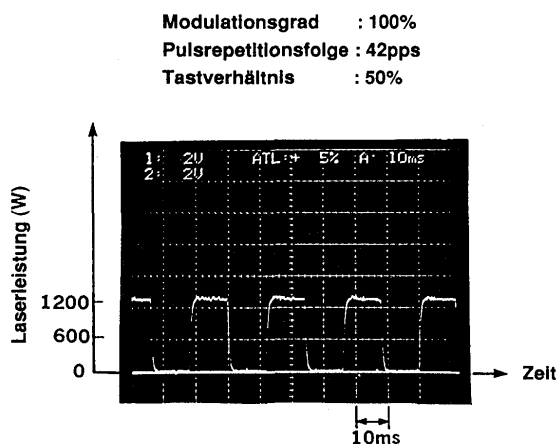


Abb. 10 Beispiel für moduliertes Laserausgangsmuster

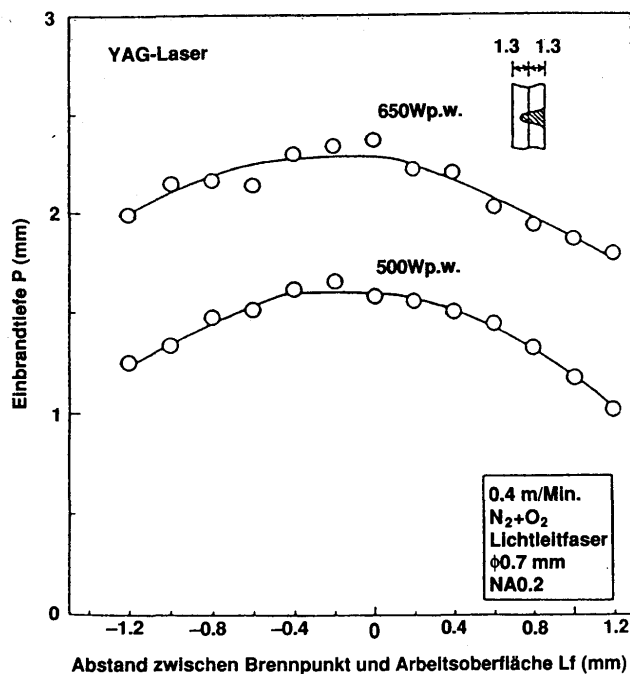


Abb. 11 Wirkung des Defokussierabstands (L_f) auf die Einbrandtiefe

Position	0°	90°	180°	270°	Bemerkungen
Makrostrukturen					

Abb. 12 Beispiel von Querschnittsmakrostrukturen der Schweißung mit der Laser Büchschenschweißeinrichtung

5. Eliminierung der "Plume" durch Gasassistentz

Es wurden die Bedingungen der Gasassistentz untersucht, mit denen das Eindringen von Spritzern in das Endstück verhindert werden kann.

5.1 Schätzung der Spritzerauswurfgeschwindigkeit

Um die Bedingungen der Gasassistentz bestimmen zu können, muß man die Auswurfgeschwindigkeit der Spritzer kennen. (Es ist ziemlich einfach, das Eindringen der "Plumes", die einen kleineren Durchmesser als die Spritzer haben, in das Endstück zu verhindern.) Wegen der unterschiedlichen Spritzerauswurfrichtungen ist es jedoch nicht einfach, die Geschwindigkeit zu messen. Deshalb wurde beschlossen, die Auswurfgeschwindigkeit der Spritzer anhand der Messung der Geschwindigkeit der leichter zu beobachtenden "Plumes" zu schätzen. Die "Plumes", die für jeden Impuls (eine Periode von 24 ms) der Laserleistung erzeugt werden, wachsen und verschwinden, wurden beobachtet. Die Spitze der "Plume" erreicht nach $1/5000$ s eine Höhe von 7 mm. Das heißt, daß die "Plume" mit einer Geschwindigkeit von 35 m/s wächst. Bei einem Spritzer von größerer Größe ist infolge des größeren Gewichts die Auswurfgeschwindigkeit geringer als die Wachstumsgeschwindigkeit der "Plume", die aus winzigen Partikeln besteht. Die so gewonnenen Daten wurden daher als sicher für die Bestimmung von Gasassistentzbedingungen zum Zweck der Verhinderung des Eindringens von Spritzern in das Endstück angesehen. So wurde die höchste Auswurfgeschwindigkeit eines Spritzers auf etwa 35 m/s geschätzt.

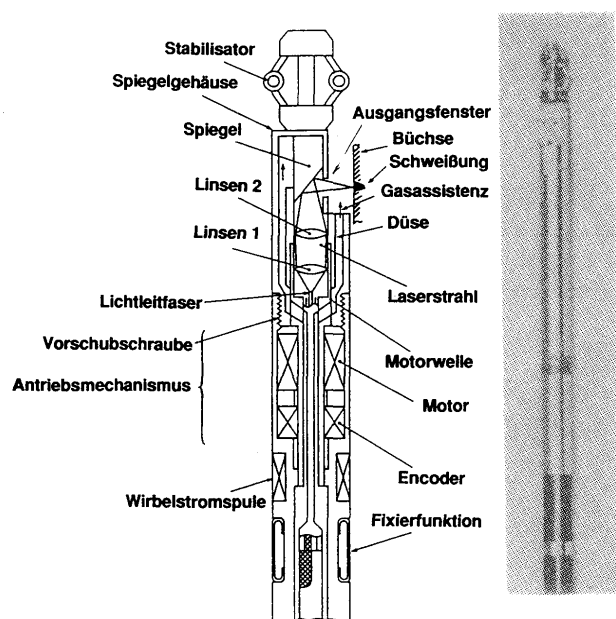


Abb. 13 Laserschweiß-Endstück

5.2 Notwendige Gasassistentz-Durchflußgeschwindigkeit

Um zu verhindern, daß vom Schmelzbad ausgeworfene Spritzer in das Endstück eindringen, wurde die Bahn der Spritzer berechnet. Der Berechnung wurden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt:

- Ein Spritzer wird als Kugel mit konstanter volumenbezogener Masse angesehen.
- Die Gasassistentzströmung ist einheitlich.
- Nur Stirnwiderstand wird für den Spritzer berücksichtigt.
- Die Spritzerauswurfgeschwindigkeit ist 35 m/s.

Die physikalischen Eigenschaften sind wie folgt:

- Volumenbezogene Masse des Gases : 1.251 kgf/m^3
- Volumenbezogene Masse des Spritzers : $8,510 \text{ kgf/m}^3$
- Viskositäts-Dichteverhältnis des Gases : $1.38 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Die Ergebnisse der Berechnung entsprechend der Beziehung zwischen dem Spritzerdurchmesser und der Gasassistentz-Durchflußgeschwindigkeit werden in Abb. 14 gezeigt. Aus dieser Abbildung geht hervor, daß mit größerer Spritzergröße eine größere Gasassistentz-Durchflußgeschwindigkeit erforderlich ist, um zu verhindern, daß die Spritzer in das Endstück eindringen. Die Größe der meisten Spritzer war unter $10 \mu\text{m}$. Deshalb ist eine Gasassistentz-Durchflußgeschwindigkeit von etwa 20 m/s notwendig, wenn die Gasassistentzströmung 1.0 mm Dicke in der diametralen Richtung hat.

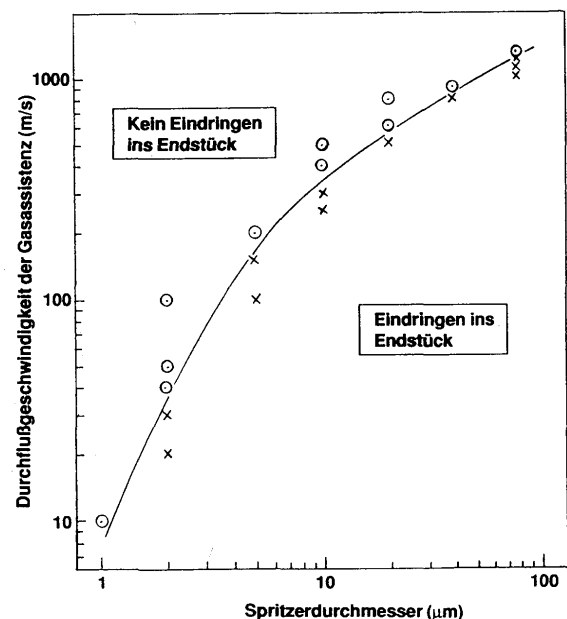


Abb. 14 Zur Verhinderung des Eindringens von Spritzern erforderliche Durchflußgeschwindigkeit der Gasassistentz

6. Schätzung der tatsächlichen Anwendung

Bei der praktischen Anwendung dieser Ergebnisse beim Laser-Büchenschweißen zeigte sich, daß über 100 Verbindungen ohne Beschädigung der optischen Komponenten effektiv geschweißt wurden.

7. Schlußfolgerung

Im Fall des Laser-Büchenschweißens mit dem YAG-Laser zur Instandsetzung von beschädigten Dampfgeneratorrohren wurden die Wirkung des Schutzgases und des Laserausgangsmusters auf die Porosität im Schweißgut, die Einbrandtiefe und die "Plume" untersucht. Die Gasassistenzenbedingungen wurden ebenfalls untersucht. Es wurden die folgenden Testergebnisse erzielt.

- a) Als Schutzgas wurde N_2 -Gas mit 2% O_2 gewählt weil dieses Gas keine Defekte wie Porosität im Schweißgut verursacht und eine große Einbrandtiefe erreicht wird.
- b) Als Bedingungen des Laserausgangsmusters wurden 100% Modulationsgrad, 50% Tastverhältnis und 42 pps Pulsrepetitionsfolge gewählt. Mit diesen Bedingungen konnte bei 650 W Laserleistung und einer Schweißgeschwindigkeit von 0.4 m/Min. eine Einbrandtiefe von 1.8 mm erreicht werden, selbst wenn der Defokussierabstand ± 0.8 mm beträgt.

- c) Auf der Grundlage der Beobachtung der "Plumes" mit einer Hochfrequenzkamera wurde die Spritzerauswurfgeschwindigkeit auf etwa 35 m/s geschätzt.
- d) Eine Gasassistentz-Durchflußgeschwindigkeit von etwa 200 m/s ist erforderlich, wenn die Gasassistentzströmung 1.00 mm Dicke in diametraler Richtung hat.

Bei der praktischen Anwendung dieser Ergebnisse für das Laser-Büchenschweißen wurden erfolgreiche Schweißungen erzielt.

Literatur

- 1) A. Yokoyama, et al. : "YAG Laser Welding Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants," The 5th International Symposium on Advanced Technology in Welding Materials Processing and Evaluation. April 1990, Tokyo.
- 2) S. Shono, et al. : "Fundamental Study on 1 kW Class YAG Laser Welding Using Optical Fiber," IIW Doc. IV-451-88 (1988)
- 3) T. Yamada, et al. : "Multi-kW Continuously-pumped Nd: YAG Laser," CLEO-88.
- 4) K. Okino, et al.: "1.8 kW CW YAG Laser Application," ICALEO-89, Proceedings.
- 5) T. Ishide, et al. : "Optical Fiber Transmission of 2 kW CW YAG Laser and Its Practical Application to Welding," SPIE Vol. 1277, p. 188-198 (1990)