

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

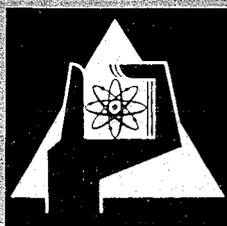
Dezember 1966

KFK 619

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Das induktive Schweißen von Metallen im Vakuum

S. Dorner, F. Reiß, K. Schretzmann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



Das induktive Schweißen von Metallen im Vakuum

Von S. Dorner, F. Reiß und K. Schretzmann, Karlsruhe



VULKAN-VERLAG DR. W. CLASSEN - 43 ESSEN - HAUS DER TECHNIK

Das induktive Schweißen von Metallen im Vakuum

Induction welding of metals under vacuum

Le soudage inductif sous vide de métaux

Von S. Dorner, F. Reiß und K. Schretzmann, Karlsruhe*

DK 621.791.77:669.083.4

EINLEITUNG

Bei Entwicklungsarbeiten auf Gebieten der Hochtemperatur- und Reaktortechnik, z. B. bei thermionischen Konvertern, Heat Pipes, Kapseln für Bestrahlungsversuche in Kernreaktoren und Brennelementen mit Natriumbonding ist es notwendig, metallische Werkstücke unter Bedingungen und Umständen zu verschweißen, bei denen die gebräuchlichen Schweißverfahren nicht angewendet werden können.

Das ist der Fall, wenn

1. Teile wegen besonderer Reinheitsanforderungen im Hochvakuum zusammengeschweißt werden sollen,
2. evakuierte Behältnisse im Hochvakuum zugeschweißt oder Deckel in evakuierte Behältnisse im Hochvakuum eingeschweißt werden sollen, wobei das Gefäß im evakuierten Zustand verschlossen wird,
3. Behältnisse in einem Raum mit einem bestimmten Gasgehalt nach Füllung des Behältnisses zugeschweißt oder Deckel in Behältnisse eingeschweißt werden sollen, wenn das Behältnis mit einem bestimmten Gasgehalt verschlossen wird, oder
4. Gefäße unter gleichzeitigem Verschließen der entstehenden Teile voneinander getrennt werden sollen.

Für einige von diesen Aufgaben haben sich bereits bestimmte Schweißverfahren eingeführt. So können mit Elektronenstrahl-schweißgeräten Vakuumschweißungen ausgeführt werden. Ebenso eignen sich Elektronenstrahl-schweißanlagen zum Zugschweißen von Gefäßen in Vakuum. Wenn ein Gefäß mit einer Gasfüllung zugeschweißt werden soll, kann eventuell Lichtbogenschweißung angewendet werden. Dabei muß sich aber das gewünschte Füllgas als Schweißgas eignen, und der gewünschte Fülldruck muß die Ausbildung eines Lichtbogens gestatten. Ersteres dürfte oft der Fall sein, letzteres wird nur in Ausnahmefällen zutreffen. Ähnliches gilt für die Elektronenstrahl-schweißung, die in Sonderfällen auch in Räumen mit einer Gasfüllung durchgeführt werden kann, jedoch bestehen hier hinsichtlich des Arbeitsdruckes erhebliche Beschränkungen.

Im letzten der oben aufgeführten Fälle kann Kaltpreßschweißung angewendet werden. Das Kaltpreßschweißen (Abquetschen) hat aber den Nachteil, daß die Schweißstelle eine geringe Dicke—etwa 0,1 mm—hat und deshalb nur eine niedrige mechanische Festigkeit aufweist. Kaltpreßschweißungen halten daher nur geringen Innenüberdruck stand. Bei harten Werkstoffen können Rohre durch Kaltpreßschweißen nicht dicht verschlossen werden. Ebenso versagt die Methode, wenn die zu verschweißenden Flächen nicht genügend sauber sind.

Es ist bekannt, daß Metalle auf induktivem Wege durch Hochfrequenzströme erwärmt werden können, wobei die in den Metallen in der Nähe der Hochfrequenz führenden Leitungen erregten Wirbelströme durch den Ohmschen Widerstand und bei ferromagnetischen Stoffen auch durch die Ummagnetisierung Wärme erzeugen. Die Wärmeerzeugung ist auf die unmittelbare Nachbarschaft der stromführenden Leiter beschränkt. Das Werkstück wird an der zu erwärmenden Stelle durch die Heizvorrichtung nicht berührt. Bei höheren Frequenzen nimmt die Stromdichte im Werkstück von außen nach innen aus elektrodynamischen Gründen ab (Skin-Effekt). Die induktive Erwärmung hat in der Technik zum Härten und

Löten eine weite Verbreitung gefunden. Daß sie grundsätzlich auch zum Schweißen angewendet werden kann, ist bekannt [1,2]. Sie ist dazu aber nur in Sonderfällen zum automatischen Rohrlängsschweißen [3, 4] und zum Stumpfschweißen von Kettengliedern [5] eingesetzt worden. Über den Aufbau von Rohren und Rohrleitungen mit induktiver Quernahtstumpfschweißung im technischen Maßstab berichtet [6].

Über die naheliegende Anwendung des Verfahrens zum Schweißen unter Vakuum oder Schutzgas ist nichts bekannt, obwohl die Einführung der Hochfrequenzenergie in Vakuum- oder Schutzgasgefäße keine prinzipiellen Schwierigkeiten bereitet.

Einige besondere Bedingungen müssen eingehalten werden, wenn eine auch technisch befriedigende Verschweißung erreicht werden soll:

1. Die Wärmeleistungsdichte muß sehr hoch sein, im allgemeinen größer als bei den anderen induktiven Arbeitsverfahren, damit die Schweißtemperatur erreicht wird. Das erfordert eine scharfe Konzentration der elektrischen Leistung durch geeignet geformte Spulen.
2. Es muß entlang der Schweißstelle gleichmäßig erwärmt werden. Bei der hohen Leistungsdichte ist dazu eine sorgfältige Bemessung des Spalt zwischen Spule und Werkstück nötig.
3. Die zu verschweißenden Teile müssen gegeneinander gut fixiert sein, wenn während des Schweißvorgangs keine Möglichkeit besteht, die gegenseitige Lage der Teile zu korrigieren.

Wenn diese Bedingungen eingehalten werden, kann man saubere und völlig reproduzierbare Schweißungen erhalten. Insbesondere kann so auch, wie sich gezeigt hat, in den unter 3. und 4. aufgeführten Fällen geschweißt werden. Der Aufwand für dieses Schweißverfahren ist, abgesehen vom Hochfrequenzgenerator, gering. Er richtet sich danach, welche Nebenbedingungen (Vakuum, Schutzgas, Spülgas, reduzieren des Abdeckmittels) eingehalten werden sollen. Weitere Vorteile des Hochfrequenzschweißens liegen darin, daß der Schweißvorgang sehr schnell abläuft und daß dadurch unnötige Erwärmungen des Werkstückes außerhalb der Schweißstelle vermieden werden können. Der Schweißvorgang ist einfach, und deshalb eignet sich dieses Verfahren wegen der guten Reproduzierbarkeit auch für eine automatische Fertigung. Eine Energiezufuhr durch Verbinden der Schweißstelle mit den Polen der Stromquelle ist bei den hohen Leistungsdichten schwierig, weil an den Kontaktstellen leicht eine Überhitzung auftritt, vgl. [7]. Wenn die gesamte Schweißstelle gleichzeitig erhitzt wird, begrenzt die Generatorleistung die Größe der rationell ausführbaren Schweißungen.

EINZELHEITEN DES VERFAHRENS

Aus der Eigenart des Induktionsschweißverfahrens ergeben sich bestimmte Anforderungen an die Schweißstelle. Der Temperaturanstieg in den Werkstücken richtet sich nach der in ihnen erzeugten Wärmeleistung und nach ihrer Wärmekapazität. Die Wärmeleistung ist bei gleicher Hochfrequenzfeldstärke in Körpern mit einem großen spezifischen elektrischen Widerstand größer als in Körpern mit einem kleinen spezifischen Widerstand. Die Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes in den Körper bestimmt die Dicke der Erwärmungszone. Bei guter Leitfähigkeit ist die Eindringtiefe gering, demgemäß werden nur die äußersten Oberflächenschichten des

* Dr. S. Dorner, Dipl.-Phys. F. Reiß, Dr. K. Schretzmann, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, Kernforschungszentrum, Karlsruhe

Körpers erwärmt. Schlechter leitende Stoffe, wie z. B. Stahl, werden bei der Hochfrequenzenerwärmung auch in größeren Tiefen erwärmt. Darauf muß insbesondere dann Rücksicht genommen werden, wenn zwei verschiedene Materialien aneinandergeschweißt werden sollen. Eine Wärmeableitung durch die Schweißstelle, die im allgemeinen unerwünscht ist, kann durch konstruktive Maßnahmen oft vermindert werden. Dazu werden in der Nähe der Schweißstelle im Werkstück Querschnittsvermindierungen vorgesehen, die den abfließenden Wärmestrom einschränken sollen.

Für die Anordnung von Heizspule und Werkstück gelten folgende Gesichtspunkte: Bei gleich starken zu verschweißenden Stücken wird man darauf achten, daß die Spule von beiden aneinanderstoßenden Enden des Werkstücks gleich weit entfernt ist. Bei ungleich starken Werkstücken wird die Spule näher an das stärkere Teil herangebracht. Das geforderte gleichzeitige Fließen bzw. Schmelzen der Werkstücke an der Schweißstelle kann durch Abstimmen der Spulenanordnung erreicht werden, so daß man auch Werkstücke mit verschiedenen Dimensionen gut verschweißen kann. Weiterhin ist es zweckmäßig, die Induktionsspule so anzuordnen, daß durch die Berührungsstellen zwischen den zu verschweißenden Werkstücken kein Strom fließt. Anderenfalls würden sich diese

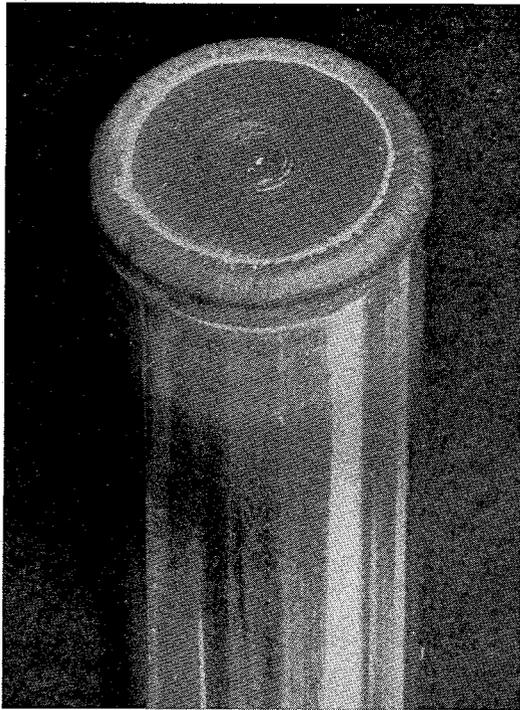


Bild 1: Vacon-Rohr 19,5 × 0,25 mm, mit Deckel, vakuumgeschweißt
 Fig. 1: Vacon pipe, 19.5 × 0.25 mm, with cap, vacuum-welded
 Fig. 1: Tube vacon 19,5 × 0,25 mm, avec couvercle, soudé sous vide

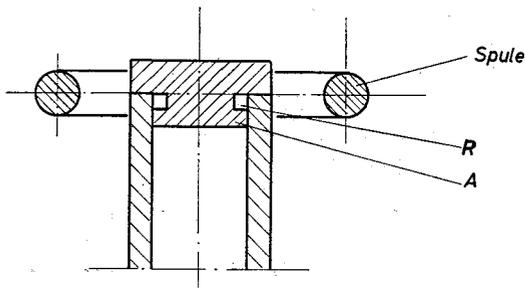


Bild 2: Rohr und Deckel zum Einschweißen mit Wärmestaurille R und Zentrieransatz A
 Fig. 2: Pipe and cap with groove R and centering boss A
 Fig 2: Tube et couvercle prêts à être soudés, avec rainure de retenue de la chaleur R et élément de centrage A

Stellen sehr stark und ungleichmäßig erwärmen. Es ist bei neu auftretenden Werkstücksformen oft erforderlich, die richtige Spulenform und Spulenanordnung durch einen Versuch zu ermitteln. Dazu wird man zunächst einmal versuchen, den Spalt zwischen der Spule und dem Werkstück an allen Stellen möglichst gleich groß zu machen. Man wird dann, wenn eine ungleichmäßige Erwärmung festgestellt wird, den Abstand zwischen Spule und Werkstück entsprechend korrigieren.

Es ist natürlich auch bei der induktiven Methode möglich, die Schweißstelle im Vorschub zu erhitzen und zu schweißen, wie das beim Flammen-, Lichtbogen- oder Elektronenstrahlschweißen fast immer geschieht. Dort wird die Vorschubenerwärmung deshalb gewählt, weil die Wärmeleistung insgesamt beschränkt ist (Elektronenstrahl), oder weil die Wärmeerzeugung ihrer physikalischen Natur nach auf einen kleinen Raumbereich lokalisiert ist (Lichtbogen). Bei der Vorschubenerwärmung nach der Induktionsmethode müssen die Stellen des Werkstückes, die geschweißt werden sollen, an der gegen das Werkstück kleinen Spule vorbeigeführt werden. Beim automatischen Rohrschweißen (hier wird ein Blechstreifen zum Rohr gebogen und dann die entstandene Naht verschweißt) wird dieses Verfahren technisch angewendet [3, 4, 6].

In dem Spalt zwischen Spule und Werkstück kann sich auch eine elektrisch nicht leitende Trennwand befinden (Quarz, Glas oder ähnliches), wenn Werkstück und Spule nicht dem gleichen Gas ausgesetzt sein sollen. Dabei muß zwangsläufig der Abstand zwischen Werkstück und Spule um die Dicke der Trennwand und den Abstand, der notwendig ist, um bei zufälligen Bewegungen eine Berührung zu vermeiden, vergrößert werden. Die Wärmeleistung im Werkstück wird dadurch geringer. Das Material der Trennwand muß der Wärmebelastung durch die Strahlung des Werkstücks standhalten können.

APPARATUR

Die Geräte zur Erzeugung des Hochfrequenzstromes sind gängige Technik. Einen Überblick über gebräuchliche Schaltungen bringt u. a. [8]. Bei den im nächsten Abschnitt beschriebenen Schweißungen wurde als Hochfrequenzgenerator ein Röhrensender benutzt, der eine Höchstleistung von 15 kW abgeben kann. Die Leistung des Senders konnte stufenweise bis auf ein Viertel der Höchstleistung herabgesetzt werden. Die Arbeitsfrequenz lag zwischen 330 und 500 kHz. Die Eindringtiefe des Hochfrequenzfeldes in austenitische Stähle liegt bei dieser Frequenz bei etwa 1 mm. Bei Vakuumschweißungen wurden die Werkstücke in ein Quarzrohr gebracht. Die Spule wurde außen um das Rohr herumgelegt. Das Quarzrohr wurde mit einer Öldiffusionspumpe mit entsprechender Vorpumpe auf einen Druck von weniger als 10^{-3} Torr evakuiert. Zu den Schutzgasschweißungen wurde Reinstargon bis zu einem Druck von etwa 200 Torr eingelassen.

ERGEBNISSE

Es wurden Schweißungen an Eisennickel-, -kobalt- und an Eisenchromnickellegierungen, an Kupfer, an Tantal und an Aluminium ausgeführt. Bei ersten Versuchen wurden Deckel in Rohre eingeschweißt. Bild 1 zeigt ein solches fertiges Werkstück. Das Rohr besteht aus weichgeglühtem Vacon 70 (49 Fe, 28 Ni, 23 Co) mit 19,5 mm Außendurchmesser und 0,25 mm Wandstärke. In dieses Rohr wurde ein Deckel aus Vacon 70 eingeschweißt. Einen schematischen Querschnitt durch die ungeschweißten Werkstücke zeigt Bild 2. Die im Deckel eingestochene Rille R soll den Wärmestrom von der Schweißstelle zum Rohr vermindern. Der Ansatz A des Deckels dient dazu, eine Zentrierung des Deckels im Rohr auch dann zu gewährleisten, wenn der obere Rand des Rohres geschmolzen ist. Aus der Tatsache, daß der Deckel seine senkrechte Lage zur Rohrachse beim Schweißen beibehalten hat, siehe Bild 3, kann man sehen, daß bei der Schweißung wirklich nur das oberste Ende des Rohres und die Außenkante des Deckels schmelzflüssig geworden sind. Bild 4 zeigt einen Schliff

der Schweißstelle in 50facher Vergrößerung. Man sieht deutlich, daß Deckel und Rohr im oberen Teil verschmolzen sind und daß das Rohr in etwa 3 mm Abstand von der eigentlichen Schweißstelle nicht schmelzflüssig geworden ist. Das in Bild 1 gezeigte Rohr wurde nach dem Schweißen weder gereinigt noch sonstwie überarbeitet. Aus einem ähnlichen Werkstück zeigt Bild 5 einen Schliff in 38facher Vergrößerung von einer weiter innen liegenden Stelle der Deckeloberfläche. Man erkennt deutlich die Schmelzzone; sie hat eine axiale Länge von etwa 1 mm. Beachtenswert ist die scharfe Trennlinie zwischen der geschmolzenen Zone und dem fest gebliebenen Material. Die Kristalle in der geschmolzenen Zone sind in der Nähe der Trennlinie entsprechend dem Temperaturgradienten senkrecht zu ihr ausgerichtet. Die Übergangszone ist bei die-

sem ferromagnetischen Material sehr schmal. In der Einflußzone sind mikroskopisch keine Veränderungen festzustellen. In dieser Zone kann sich allenfalls die Wirkung der Nachschumpfung durch Verformung bemerkbar machen. Da bei der Induktionsschweißung der Wärmestrom im Vergleich zu den anderen Schweißverfahren gering ist, darf man erwarten, daß diese Nebenwirkungen entsprechend klein sind.

Rohrenden, bei denen das Verhältnis von Wandstärke zu Durchmesser etwas größer ist, können ohne Deckel durch Niederschmelzen verschlossen werden. Proben dieses Arbeitsverfahrens zeigen die Bilder 6 und 7. Die Rohre hatten 12 mm Außendurchmesser und 2 mm Wandstärke. Sie bestanden aus austenitischem Chromnickelstahl, X 10 CrNiTi 189. Das Rohr

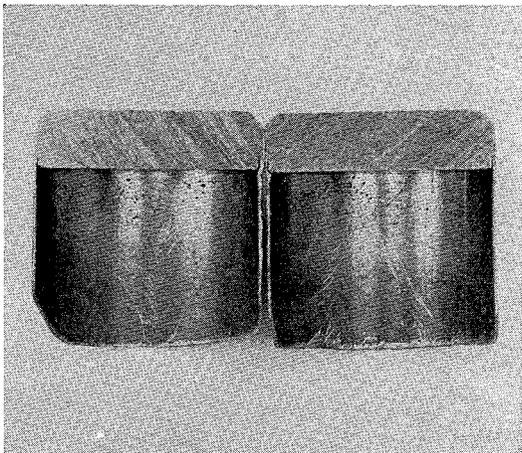


Bild 3: Vacon-Rohr mit Deckel von Bild 1, durchschnitten
Fig. 3: Vacon pipe with cap shown in Fig. 1, sectional view
Fig. 3: Coupe du tube vacon avec couvercle de la fig. 1

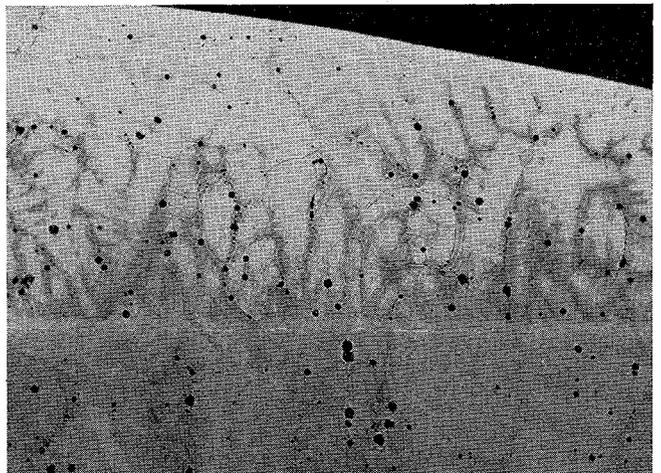


Bild 5: Schliff eines eingeschweißten Vacon-Deckels ähnlich Bild 3, Oberseite, in der Nähe der Mitte 38fach vergrößert
Fig. 5: Polished section of welded Vacon cap as shown in Fig. 3, upper surface, magnification near centre 38 X
Fig. 5: Section polie d'un couvercle vacon soudé, analogue à celui de la fig. 3, parti supérieur, grossi 38 fois

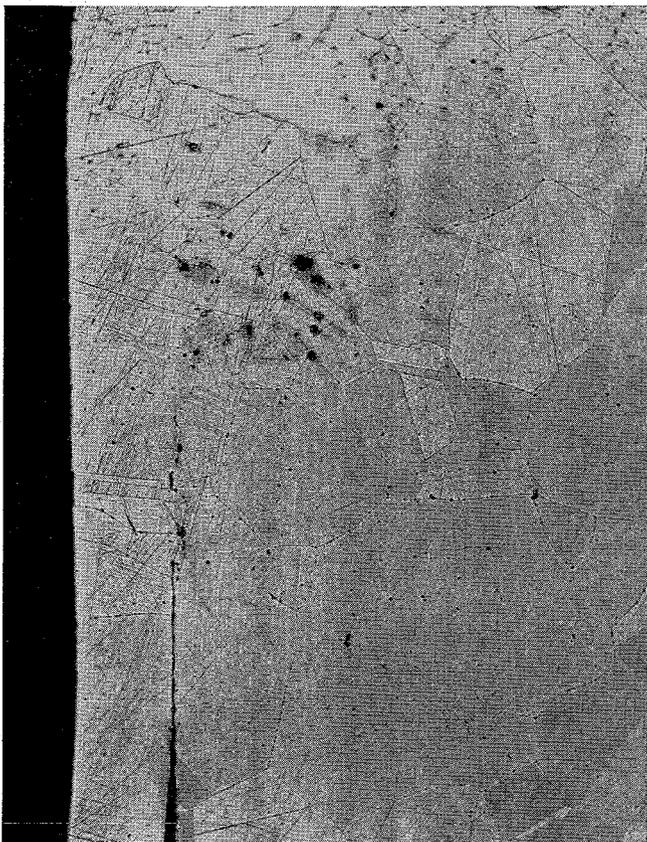


Bild 4: Schliff der Schweißstelle von Bild 3, 50fach vergrößert
Fig. 4: Polished section of the weld shown in Fig. 3, magnification 50 X
Fig. 4: Section polie du point de soudure de la fig. 3, grossi 50 fois

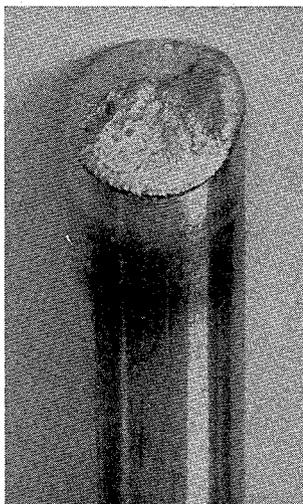


Bild 6: Zugeschmolzenes Ende eines Rohres 12 x 2 mm aus rostfreiem Stahl; im Vakuum geschweißt
Fig. 6: Closed end of a 12 mm dia. pipe 2 mm thick of stainless steel welded in vacuum
Fig. 6: Extrémité fondue d'un tube 12 x 2 mm en acier inoxydable, soudé sous vide

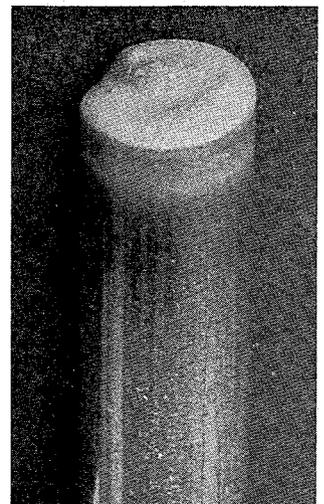


Bild 7: Zugeschmolzenes Ende eines Rohres 12 x 2 mm aus rostfreiem Stahl; unter 200 Torr Argon geschweißt
Fig. 7: Closed end of a 12 mm dia. pipe 2 mm thick of stainless steel welded in argon at a pressure of 200 Torr
Fig. 7: Extrémité fondue d'un tube 12 x 2 mm en acier inoxydable; soudé sous atmosphère contrôlée d'argon à 200 Torr

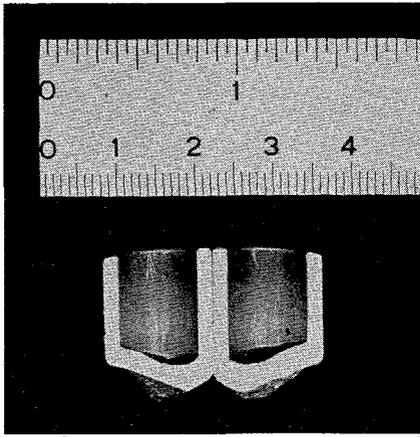


Bild 8: Rohrende von Bild 6, geschnitten
 Fig. 8: Sectional view of the pipe end of Fig. 6
 Fig. 8: Extrémité du tube de la fig. 6, sectionnée

von Bild 6 wurde im Vakuum geschweißt, das in Bild 7 gezeigte Rohr unter Argon bei 200 Torr. Die Oberfläche des vakuumgeschweißten Rohrendes ist rau, aber glänzend. Das unter Schutzgas geschweißte Rohrende hat eine feinere und gleichmäßigere Oberflächenstruktur, ist aber matt. Einen Schnitt durch das zugeschmolzene Ende des Rohres von Bild 6 zeigt Bild 8. Man sieht, daß der Verschuß des Rohrendes eine Wandstärke hat, die der Wandstärke des ursprünglichen Rohres etwa entspricht. Bei sorgfältigerer Zentrierung des Rohres in der Arbeitsspule ist es möglich, einen Verschuß des Rohres zu erhalten, der senkrecht zur Achse des Rohres steht.

Eine Ampulle aus rostfreiem Stahl, X10CrNiTi 189, ist in Bild 9 in zwei Dritteln der natürlichen Größe zu sehen. Bei dieser Ampulle wurde mit Hochfrequenz zuerst der Boden und dann der Deckel mit dem Füllstutzen im Vakuum eingeschweißt. Danach wurde der Stutzen ebenfalls im Vakuum verschlossen.

Um festzustellen, ob das Verfahren reproduzierbare Ergebnisse liefert, wurden mit derselben Anlage Schweißversuche an einer Reihe von identischen Probestücken durchgeführt. Die Probestücke entsprachen den Füllstutzen von Bestrahlungskapseln. In diesem speziellen Fall wurde beim Schweißen ein Konzentrator verwendet, siehe Bild 10. Der Konzentrator sollte einmal die Leistungsdichte an der Schweißstelle erhöhen, zum anderen wurde erwartet, daß er um die Schweißstelle genauer und besser reproduzierbar justiert werden kann, als das bei einer relativ großen Spule möglich wäre. Es wurden Versuche an insgesamt neun Modellstutzen durchgeführt. Alle diese Stutzen wurden nach dem Schweißen längs durchgeschnitten, um ein Bild vom Aussehen der Schweißstelle zu erhalten. Bild 11 zeigt diese durchgeschnittenen Stutzen von der Außen- und von der Innenseite. Man sieht, daß sich stets eine runde Kuppe ausbildet und daß die Schweißstelle stets eine axiale Länge hat, die etwa der Stärke des Rohres entspricht. Der Außendurchmesser der Stutzen war 8 mm, die Bohrung 2 mm.

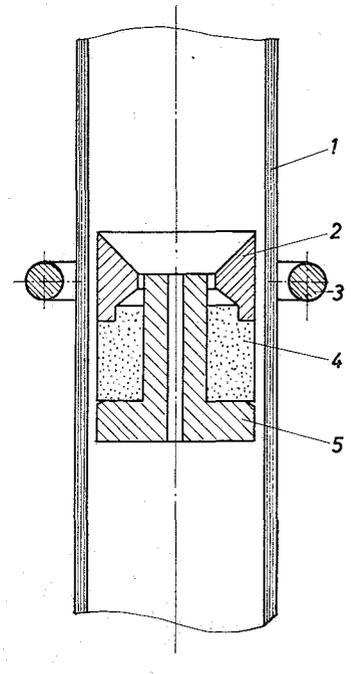
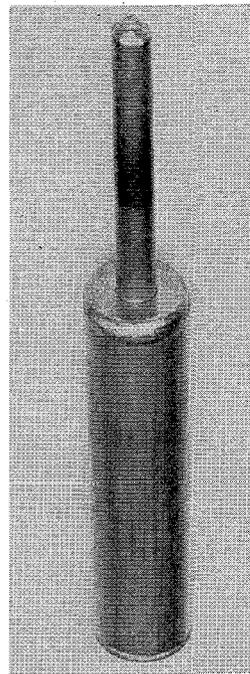
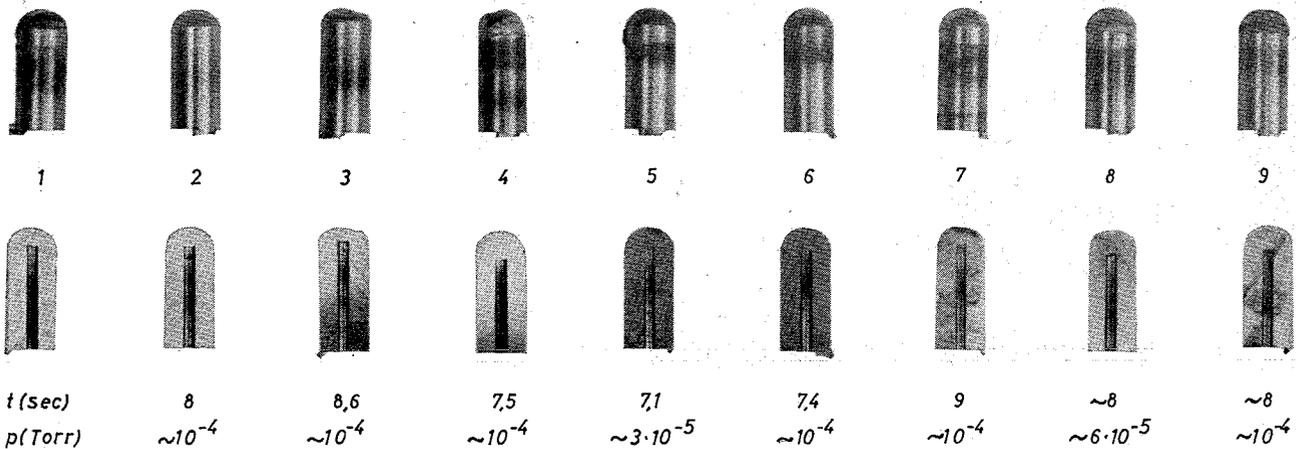


Bild 9 (links): Verschlussene Ampulle mit Stutzen aus rostfreiem Stahl, vakuumgeschweißt; etwa 2/3 natürlicher Größe
 Fig. 9: Closed phial with vacuum-welded connection of stainless steel, about 2/3 natural size
 Fig. 9: Ampoule fermée avec tubulure en acier inoxydable, soudée sous vide; représentée au 2/3 de sa grandeur naturelle

Bild 10 (rechts): Anordnung zum Zuschweißen von Füllstutzen unter Verwendung eines Konzentrators
 1 Quarzrohr – 2 Konzentrator – 3 Heizspule – 4 Teilbarer Keramikring (vordere Hälfte abgenommen) – 5 Werkstück
 Fig. 10: Setup for sealing filler nozzles by welding using a concentrator
 1 Quartz tube, 2 Concentrator, 3 Heating coil, 4 Split ceramic ring (front half removed), 5 Workpiece
 Fig. 10: Installation pour fermer par soudage des tubulures de remplissage, avec utilisation d'un concentrateur
 1 tube de quartz – 2 concentrateur – 3 bobine de chauffe – 4 anneau de céramique en deux parties (moitié avant déposée) – 5 pièce à souder

Unter den Abbildungen sind die Schweißzeiten, soweit sie registriert worden sind, angegeben. Aus diesen Zeiten ist zu sehen, daß mit einer fest vorgegebenen Schweißzeit gearbeitet werden kann. Gewisse Unregelmäßigkeiten der Schweißperlen, die auf den Abbildungen zu sehen sind, rühren von der teilweise nicht sorgfältigen Justierung her. Die Schweißprobe Nr. 2 wurde geschliffen und geätzt. Sie ist in Bild 12 in etwa zehnfacher Vergrößerung zu sehen. Man sieht, daß die Schmelzzone gleichmäßig ausgebildet ist und daß ein Tropfen von dem geschmolzenen Material die Bohrung des Stutzens verschließt, wobei er das Wandmaterial des Stutzens

Bild 11: Füllstutzen mit 8 mm Außendurchmesser, im Vakuum zugeschweißt
 Fig. 11: Tubulure de remplissage d'un ϕ ext. de 8 mm, fermée par soudure sous vide



von innen her teilweise angelöst hat. Alle diese Schweißproben zeigen etwa 4 mm unterhalb der Schmelzzone innen und außen leichte Anlauffarben. Man kann annehmen, daß der zur Bildung der Oxide nötige Sauerstoff nicht aus dem Restgas stammt. Die Anlauffarben erscheinen nämlich unabhängig von dem durch das Manometer angezeigten Druck, der während der Schweißungen einige 10^{-4} Torr betrug. Daher wird vermutet, daß der Sauerstoff, der für die Entstehung der Anlauffarben verantwortlich ist, im Stahl selbst gebunden war und beim Erhitzen und Schmelzen freigegeben wurde. Darauf deutet auch der Druckanstieg kurz vor und bei der Schweißung hin.

Um die Brauchbarkeit der Methode weiter zu prüfen, wurden Schweißversuche an Metallen mit hohem Schmelzpunkt und an Metallen mit niedrigem Schmelzpunkt sowie an Metallen mit starker Oxydationsneigung durchgeführt. Dazu wurden Tantalröhrchen von 11 mm Außendurchmesser und 1 mm Wandstärke mit Tantaldeckeln von 3 mm Stärke versehen. Die mit dem Hochfrequenzgenerator erreichbare Leistung reichte für eine Schweißung bei 3050 °C aus. Aluminiumrohre von 10 mm Außendurchmesser und 1 mm Wandstärke konnten ohne Stopfen durch Zuschmelzen verschlossen werden. Kupferrohre von 8 mm Außendurchmesser und 1,5 mm Wandstärke konnten in derselben Weise verschlossen werden. Wegen der besseren elektrischen und thermischen Leitfähigkeit mußte dazu eine höhere Senderleistung eingestellt und eine größere Erwärmungsdauer in Kauf genommen werden als bei gleich großen Stahlrohren. Einen Schliff der Schweißstelle eines Kupferrohres im Maßstab 10:1 zeigt das Bild 13.

Eine besonders interessante Anwendung des induktiven Schweißverfahrens ist in der Möglichkeit zu sehen, in einem Arbeitsgang Füllstutzen von Behältnissen oder Kapseln zugleich von der Füllvorrichtung abzutrennen und die Kapsel im Vakuum zu verschließen, siehe Bild 14. Hier wird das Rohr durch Hochfrequenzheizung an einer Stelle soweit erwärmt, daß es sich trennt. Zur Erleichterung der Trennung kann dort eine Rille eingestochen sein. Man muß lediglich dafür sorgen, daß die beiden Teile sich tatsächlich trennen können. Das erreicht man entweder dadurch, daß das Werkstück frei aufgehängt wird, oder durch Anheben des Obertheiles der zu trennenden Stücke. Die Induktionsspule wird anschließend, wenn nötig, etwas verschoben. Dann wird das offene Rohrende zugeschmolzen. Diese Arbeitsgänge können unmittelbar nacheinander durchgeführt werden, ohne daß das Werkstück dabei aus der Arbeitsvorrichtung entnommen werden muß. Der Vorgang kann sowohl im Vakuum als auch unter einem Schutzgas mit beliebigem Gasdruck ausgeführt werden.

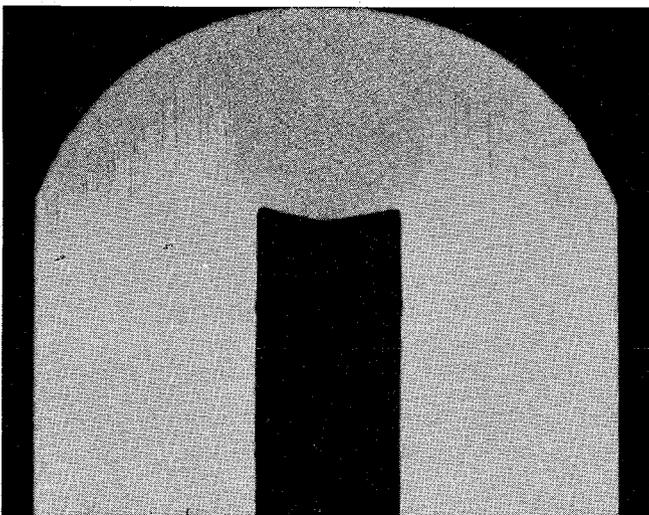


Bild 12: Schweißprobe Nr. 2 von Bild 11, geschliffen und geätzt, etwa 10fach vergrößert

Fig. 12: Welded specimen No. 2 of Fig. 11, polished and etched, magnification about 10 X

Fig. 12: Echantillon de soudure N° 2, poli et corrodé, de la fig. 11, grossi env. 10 fois



Bild 13: Zugeschmolzenes Ende eines Kupferrohres 8 × 1,5 mm, Übergang vom Rohr zur Schweißperle, etwa 10fach vergrößert

Fig. 13: Closed end of a copper tube 8 × 1.5 mm, radius from pipe to bead, magnification about 10 X

Fig. 13: Extrémité fermée par soudure d'un tube de cuivre de 8 × 1,5 mm, passage du tube aux perles de soudage grossie env. 10 fois

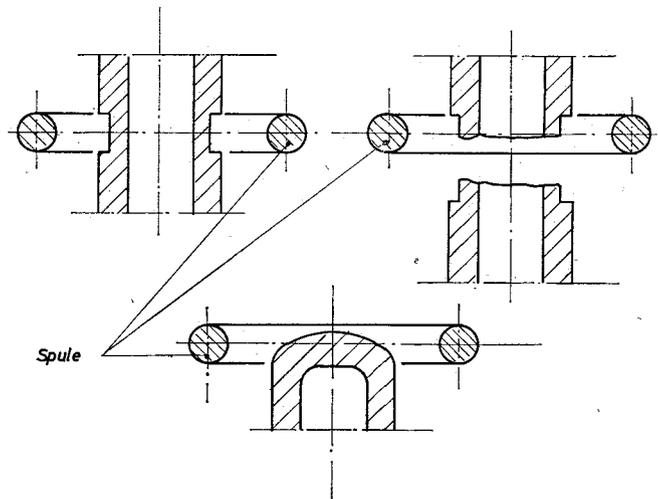


Bild 14: Abtrennen und Zuschmelzen von Füllstutzen

Fig. 14: Cutting and welding up of fillers

Fig. 14: Séparation et fermeture de tubulures de remplissage

SCHRIFTTUM

- [1] Chrenow, K. K.: Schweißen, Schneiden und Löten von Metallen, VEB Karl Marhold, Halle, 1958
- [2] Phillips, A. L.: Welding Handbook, Section Three, Miscellaneous Metal Joining and Cutting Processes, American Welding Society, New York, 1960
- [3] Jefferson, T. B.: The Welding Encyclopedia, Monticello Books, Morton Grove, 1964
- [4] Gengenbach, O.: Übersicht über den Stand des Widerstandsschweißens und ähnlicher Verfahren, 2. Teil, Technische Zeitschrift für praktische Metallbearbeitung, 57 (1965), S. 135/9
- [5] Brown, G. H., Hoyler, C. N., Bierwirth, R. A.: Theory and Application of Radio-Frequency Heating, D. van Nostrand Comp. Inc., New York, 1947, S. 139 f.
- [6] Hörmann, E.: Induktionsschweißen sowie induktive Wärmebehandlung von Schweißnähten, Elektrowärme, 23 (1963), S. 493/501
- [7] Rudd W. C.: High-Frequency Resistance Welding, The Welding Journal, 36 (1957), S. 703/7
- [8] Jordan, J. P.: The Theory and Practice of Industrial Electronic Heating, General Electric Review, 46 (1943), S. 675/83

Zusammenfassung

Die Möglichkeiten des induktiven Schweißens werden mit denen anderer Schweißverfahren verglichen, wobei das Schweißen im Vakuum oder in beliebiger Schutzgasatmosphäre besonders berücksichtigt wird. Das Verfahren und die verwendete Apparatur werden beschrieben. Schweißversuche und Ergebnisse, die unter den genannten Bedingungen erzielt wurden, werden dargestellt. Insbesondere wird das Zuschweißen von Füllstutzen und von Rohren mit vorher aufgesetzten Deckeln und ohne Deckel an Werkstücken aus Chrom-Nickel-Stählen, FeNiCo-Legierungen, Kupfer, Aluminium und Tantal gezeigt. Die Reproduzierbarkeit wird an Schweißserien nachgewiesen.

Summary

The potential applications of induction welding are compared with those of other welding processes. Special attention is devoted to vacuum and inert gas welding. Process and apparatus are described together with the results of welding

tests carried out under these conditions. In particular, the welding of filler nozzles and pipes with and without caps to components of chrome-nickel steel, FeNiCo alloys, copper, aluminium and tantalum is shown. Reproducibility is verified by making series of welds.

Résumé

Les auteurs comparent les possibilités du soudage inductif aux autres procédés de soudage, en prenant tout particulièrement en considération le soudage sous vide ou dans une atmosphère contrôlée quelconque. Ils font la description du procédé et de l'appareillage utilisé. Des essais de soudage ont été effectués dans les conditions précitées; les auteurs exposent ceux-ci et en donnent les résultats. Ils traitent plus spécialement du soudage de tubulures de remplissage et de tubes, avec ou sans couvercle posé au préalable, sur des pièces en acier au chrome-nickel, en alliages de FeNiCo, en cuivre, en aluminium et tantale. La reproductibilité est démontrée sur des séries de soudages.