

KFK-404

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Februar 1966

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Hauptabteilung Bibliothek und Medien

KFK 404

Institut für Material- und Festkörperforschung

Das Elektronenstrahlschweißen und seine Anwendung in der Reaktortechnik

Willy Scheibe



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M
K A R L S R U H E

Februar 1966

KFK 404

Institut für Material- und Festkörperforschung

Das Elektronenstrahlschweißen und seine Anwendung in der Reaktortechnik ^{x)}

Willy Scheibe

^{x)} Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

Ü b e r s i c h t

=====

- 1 Einleitung
- 1.1 Anforderungen an die Schweißverbindungen
- 1.2 Schweißbarkeit der Werkstoffe

- 2 Prinzip des Elektronenstrahlschweißens

- 3 Beschreibung der Anlage

- 4 Anwendungen des Elektronenstrahlschweißens
- 4.1.1 Allgemeine Anwendungen
- 4.1.2 Versuchsproben für das Projekt Schneller Brüter

- 4.2 Versuchsschweißungen an nickelhaltigen Werkstoffen
und Nickelbasislegierungen
- 4.2.1 Schweißungen an CrNi 18 8
- 4.2.2 Schweißungen CrNi 16 13, CrNi 20 25, Incoloy und Inconel
- 4.3 Schweißungen an Molybdänlegierung TZM
- 4.4 Versuchsschweißungen an Vanadinlegierung

- 5 Abschließende Bemerkungen

- 6 Literaturhinweise

1. Einleitung

Die Anforderungen an die geschweißten Werkstoffe sind allgemein in der Technik während der letzten Jahrzehnte erheblich gestiegen. Vor allem wird verlangt, daß die geschweißten Konstruktionen höhere mechanische und thermische Belastungen ohne Schaden aushalten. Diese hohen Anforderungen zeigen sich besonders deutlich in der Reaktor- und Raumfahrttechnik. Wegen der möglichst geringen Absorption von Neutronen in den Hüllwerkstoffen, aus Wärmeübergangsbetrachtungen, Gewichtsgründen und nicht zuletzt aus finanziellen Überlegungen ist man gezwungen, auf sehr dünne, hochbelastbare Materialstärken auszuweichen. Dazu ein Beispiel:

Die ersten Brennelemente des FR2 mit metallischem Uran als Brennstoff hatten einen Durchmesser von 34 mm. Die Wandstärke der Hülle aus Reinaluminium betrug 1 mm. Die Außentemperatur der Umhüllung lag bei ca 50°C. Wegen des geringen Abbrandes und der niedrigen Temperatur baute sich im Innern kein nennenswerter Spaltgasdruck auf. Der mit keramischen Brennstoff gefüllte Brennstab des Schnellen Brütters wird einen Durchmesser von nur 6 - 8 mm haben bei Wandstärken der Hülle von 0,25 - 0,5 mm. Wegen des erwünschten großen Abbrandes und der hohen Brennstofftemperatur muß man mit Spaltgasdrücken bis zu über Hundert Atmosphären rechnen, die von dem Hüllwerkstoff bei Wandtemperaturen von ca 650°C aufgenommen werden sollen.

Da man bei einem Brennelement nicht ohne Schweißverbindungen auskommt, erhebt sich sofort die Frage, ob solche geringen Materialstärken noch zuverlässig unter Schutzgas geschweißt werden können. Es handelt sich um hochwarmfeste Werkstoffe, über deren Verhalten unter den extremen Reaktorbedingungen bei hoher Neutronenbestrahlung noch relativ wenig bekannt ist,

sowie um Legierungen und Werkstoffkombinationen, die noch entwickelt werden müssen.

Bei solchen Problemen haben sich die Grenzen der konventionellen Schweißverfahren sehr deutlich gezeigt, so daß das Elektronenstrahlschweißen in den letzten Jahren immer mehr in den Vordergrund gerückt ist, dessen Prinzip seit etwa 10 Jahren bekannt ist. Das Schweißen unter Hochvakuum, mit extrem hohen Leistungsdichten ohne Zusatzwerkstoffe, bietet zur Zeit die einzige Möglichkeit, den in Abschnitt 1.1 geschilderten Forderungen an die Schweißverbindungen gerecht zu werden.

Die Anwendungen dieses Verfahrens erfolgt im Kernforschungszentrum Karlsruhe auf folgenden 3 Gebieten

- a) Untersuchungen über die Schweißbarkeit hochwarmfester Werkstoffe und Sonderlegierungen, wobei das mechanische und technologische Verhalten in der Schweißzone von dem des ungeschweißten Grundstoffes möglichst wenig abweichen soll. (s.Abschn. 4.21 - 4.24)
- b) Das Schweißen von kompletten, ggf. plutoniumhaltigen Brennelementen (s.Abschn. 3)
- c) Schweißungen an Proben, die mit den konventionellen Verfahren nicht oder nur ungenügend geschweißt werden können (s.Abschn. 4.1 und 4.2)

1.1 Anforderungen an die Schweißverbindungen.

Wegen der oben geschilderten hohen Anforderungen genügt es nicht, daß ein Werkstück gut geschweißt ist, daß es frei von Schlacke- und Wolframeinschlüssen sowie frei von Poren ist. Derartige Mängel sind bei Wandstärken

von 0,5 mm und darunter von vornherein nicht zulässig.

Man will darüber hinaus erreichen, daß die Schweißnähte und ihre Umgebung frei von Anlauffarben sind, weil diese der Anlaß zu einer verstärkten Korrosion sind und oft durch nachträgliche mechanische Bearbeitung oder durch Beizen nur schwer entfernt werden können. Ferner wird gewünscht, daß die wärmebeeinflusste Zone neben der Schweißnaht sehr klein ist oder durch konzentrierte Energiezufuhr während des Schweißens eine solche nicht auftritt, weil die Rißgefahr in diesem Bereich bekanntlich sehr groß ist. Durch eine konzentrierte Energiezufuhr auf einen kleinen Bereich gelangt außerdem wenig Wärme in das die Schweißnaht umgebende Grundmaterial, wodurch kein nennenswerter Verzug auftritt.

Das Gefüge in der aufgeschmolzenen Zone soll sich von dem des ungeschweißten Grundwerkstoffes möglichst wenig unterscheiden, da eine nachträgliche Wärmebehandlung in vielen Fällen unerwünscht ist. Von der Schmelzzone verlangt man, daß sie möglichst keine Konzentrationsänderungen gegenüber dem Grundmaterial aufweist; z.B. bei CrNi 18 9 keine Verarmung an den stabilisierenden Elementen Niob und Titan. Die Schweißnaht soll möglichst glatt sein, damit keine Kerbwirkung auftritt und eine nachträgliche mechanische Bearbeitung vermieden wird, was eine zusätzliche Erschwerung insbesondere bei plutoniumhaltigen Brennelementen bedeuten würde.

In den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 wird gezeigt, daß bei dem Elektronenstrahlschweißverfahren durch die Vielzahl von Parametern eine sehr günstige, reproduzierbare Beeinflussung bezüglich einer optimalen Schweißung möglich ist.

1.2 Schweißbarkeit der Werkstoffe.

Die Schweißbarkeit eines Werkstoffes ist zunächst von seinen Hauptlegierungselementen abhängig. Sie wird bei den ferritischen Stählen durch den Kohlenstoff entscheidend beeinflusst, dessen unerwünschte Wirkung bei Gehalten $> 0,2\%$ durch die Härteneigung der Übergangszone und der damit verbundenen Rißgefahr besteht. Auch zu hohe Phosphor- und Schwefelgehalte sind unerwünscht. Letzterer bildet mit Nickel, Kobalt, Molybdän usw. niedrigschmelzende Eutektika. Ebenfalls unerwünscht sind zu hohe Sauerstoff-, Stickstoff- und Wasserstoffgehalte.

Bei den austenitischen Stählen mit den zusätzlichen Legierungselementen Molybdän, Wolfram usw. hat der Ferrit zunächst eine positive Wirkung, indem er die Schweiße unempfindlich gegenüber Mikrorissen macht. Schwierigkeiten können jedoch dadurch entstehen, wenn sich bei erhöhter Temperatur die Sigma-Phase bildet. Diese Phase läßt sich zwar durch Erhöhen des Nickelanteils vermeiden, jedoch wächst damit die Gefahr, daß in diesen voll-austenitischen Stählen Risse auftreten. [1].

Eine besondere Beachtung verdient bei nichtrostenden Stählen die interkristalline Korrosion. Sie wird durch niedere Kohlenstoffgehalte ($< 0,02\%$) oder bei höheren C-Gehalten durch sog. Stabilisatoren (Karbidbildende Elemente, Nb, Ti) vermieden.

Für die Schweißbarkeit ist ferner das angewendete Schweißverfahren von Bedeutung. Dabei ist wesentlich, auf welche Weise die Energie zugeführt wird, die zum Aufschmelzen des Werkstoffes notwendig ist, und welche

Energiedichten erreicht werden können. Je höher die Energiedichten sind, umso größer kann die Schweißgeschwindigkeit sein. Dies wirkt sich besonders günstig bei Tiefschweißungen, Mikroschweißungen, Schweißungen an hochhitzebeständigen Werkstoffen oder beim Verschweißen verschiedenartiger Materialien aus. Sie haben den weiteren Vorteil, daß die Abkühlungsgeschwindigkeit sehr groß ist, so daß diffusionsgesteuerte Umwandlungsvorgänge nicht zu erwarten sind. In der Tabelle 1 werden einige Schweißverfahren bezüglich der Ausdehnung der Schweißzone und der maximalen Energiedichte verglichen.

Schweißverfahren	Kleinster erreichbarer Querschnitt [cm ²]	Höchste erreichbare Leistungsdichte [Watt cm ⁻²]
Schweißflamme	10 ⁻²	5 x 10 ⁴
Lichtbogen	10 ⁻³	10 ⁵
Elektronenstrahl	10 ⁻⁶	10 ⁹

Tabelle 1 Querschnitt und Leistungsdichten bei verschiedenen Schweißverfahren

2. Prinzip des Elektronenstrahlschweißens

Die Materialbearbeitung durch Elektronenstrahlen ist schon seit mehreren Jahren bekannt [2,3,4]. Von einem glühenden Wolframdraht werden aufgrund der hohen Temperatur Elektronen emittiert. Die zwischen Kathode und

Anode angelegte Hochspannung beschleunigt die Elektronen auf Energien bis zu 150 KeV. Durch geeignete Form des elektrischen Feldes ist es möglich, daß die Elektronen nur innerhalb eines sehr kleinen Raumwinkels austreten. Weitere elektrische und magnetische Felder fokussieren diesen gebündelten Strahl auf das Werkstück, wobei sehr kleine Strahldurchmesser mit entsprechend hohen Energiedichten von 10^9 Watt/cm² erreicht werden können.

Die hochbeschleunigten Elektronen treffen nun auf das Werkstück, wobei die kinetische Energie fast vollständig in Wärme umgewandelt wird. Den Betrag dieser nutzbaren Wärme erhält man durch die Beziehung

$$Q = 0,24 \cdot U \cdot I \cdot t \text{ [cal]}$$

Dabei ist U die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode in Volt, I der Strahlstrom in Ampere und t die Einwirkungszeit des Strahles in Sekunden. Die bei diesem Prozeß entstehende Röntgenstrahlung muß bei der Auslegung der Anlage durch Bleiabschirmung berücksichtigt werden.

Von den thermischen Eigenschaften des bestrahlten Materials hängt die Erwärmung an der Auftreffstelle ab. Je nach dem Dampfdruck des Werkstoffes stellt sich eine bestimmte Verdampfungsgeschwindigkeit ein.

Die Energiedichte kann nun so hoch gewählt werden, daß die Verdampfungsgeschwindigkeit an der getroffenen Stelle so groß ist, daß sich der Strahl als sehr feiner Kanal tief in das Material hineinfrißt. Die durch Verdampfung auftretenden Materialverluste sind erfahrungsgemäß sehr gering. Nach dem Abschalten des Strahles schließt sich der Kanal sofort wieder, so daß ein solcher Effekt zur Ausführung von Schweißungen gut geeignet ist.

Wegen der hohen Energiedichte ist es möglich, den Werkstoff an der Schweißstelle in außerordentlich kurzer Zeit auf Schmelztemperatur zu bringen und dadurch hohe Schweißgeschwindigkeiten zu erreichen, wobei die unmittelbare Umgebung der Schweißnaht wegen der relativ trägen Wärmeleitung nur sehr wenig erwärmt wird. So gelingt es bei Wolfram, eine $8\ \mu\text{m}$ starke Schicht durch Beschuss mit $100\ \text{KeV}$ -Elektronen und einer Leistungsdichte von $10^9\ \text{Watt/cm}^2$ in 10^{-8} Sekunden auf eine mittlere Temperatur von $4000^\circ\ \text{K}$ zu erhitzen, während ein um $8\ \mu\text{m}$ entfernter Punkt im Material durch Wärmeleitung erst in 10^{-5} Sekunden auf eine entsprechende Temperatur gebracht wird. [5].

Bei dem Elektronenstrahlschweißverfahren sind Hochspannung, Strahlstrom und Schweißgeschwindigkeit die wichtigsten Parameter. Darüber hinaus kann man den Strahl während des Schweißens reproduzierbar in Schweißrichtung und senkrecht dazu ablenken. Ferner ist es möglich, die Energiezuführung durch einen gepulsten Strahl äußerst gering zu halten. Dadurch ist es möglich, die Form der Schweißnaht und das Materialgefüge zu verändern. (s. Abb. 8 - 11)

3. Beschreibung der Anlage

Ein Schema der Elektronenstrahl-Schweißmaschine wird in der Abb. 1 gezeigt. Von der Kathode a werden die Elektronen aufgrund der angelegten Hochspannung zu einer ringförmigen Anode beschleunigt, wobei die Kathode mit Wehneltzylinder auf Hochspannungspotential, die Anode dagegen auf Erdpotential liegt. Durch den Wehneltzylinder ist es möglich, den

Strahlstrom fast trägheitslos ein- und auszuschalten, wodurch ein sogenannter Impulsbetrieb ermöglicht wird.

Um den Strahl genau in die optische Achse zu bringen und eine gute Abbildung der Kathode bzw. eine günstige Energieverteilung im Elektronenstrahl zu erhalten, sind unterhalb der Anode zwei Justierspulen angebracht. Eine wassergekühlte Blende absorbiert die Randstrahlen, damit die Abbildungsfehler ähnlich wie bei licht-optischen Systemen klein sind.

Weiter tritt der Elektronenstrahl durch das Beobachtungssystem, bestehend aus durchbohrtem Umlenkspiegel und durchbohrter Glaslinse, in die Magnetlinse, die den Strahl auf dem Werkstück fokussiert. Unter der Magnetlinse ist eine weitere Ablenkspule angebracht, die eine oszillierende Bewegung des Elektronenstrahls über dem Werkstück ermöglicht.

Der Schweißvorgang kann durch das Einblickmikroskop *f* beobachtet werden.

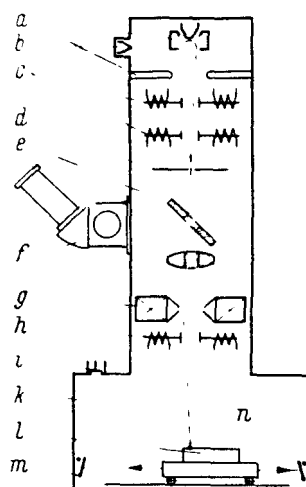


Abb. 1 Schema der Elektronenstrahlschweißmaschine [6]

Die Abb. 2 zeigt die Gesamtanlage. Oben befindet sich das elektronenoptische System, dessen Schema in der vorhergehenden Abbildung zu sehen ist. Daran schließt sich die Schweißkammer mit den Antrieben für die Bewegungsmöglichkeiten des Werkstückes an. Neben der x-, y- und z-Richtung ist eine Drehung um die Achse des elektronenoptischen Systems und um die Kammerachse möglich. Seitlich angebracht ist das Bedienungspult für die Bewegungen, die von außen steuerbar sind. Jede der 5 Bewegungsmöglichkeiten kann mit verschiedenen Geschwindigkeiten gefahren werden. Zusätzlich ist

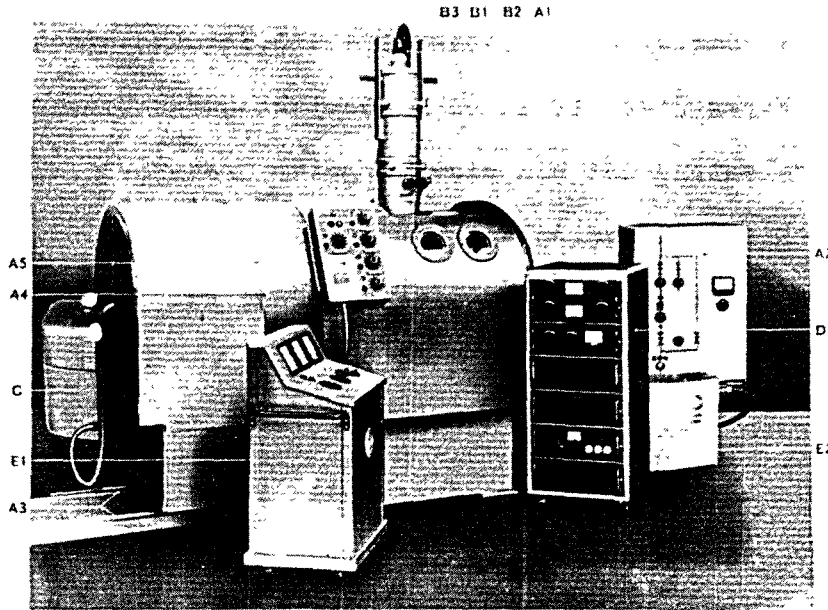


Abb. 2 Elektronenstrahl-Schweißanlage ES 1013 der Fa. Zeiss

ein Feintrieb zum Ausrichten des Werkstückes vorhanden. Es ist selbstverständlich, daß der Elektronenstrahl mit einem kleinsten, leistungsabhängigen Durchmesser von 0,05 mm, genau auf die zu schweißende Stelle gebracht werden muß. Entsprechend genau ist das Werkstück zu bewegen. Leider wird dieser Umstand in der Praxis oft nicht genügend gewürdigt. Für eine gute Schweißanlage sollte der Aufwand für das Bewegungssystem etwa in derselben Größenordnung liegen, wie der des elektronenoptischen Systems. Außerdem ist ein gutes Beobachtungssystem notwendig.

Neben der Anlage befindet sich der Steuerschrank für das elektronenoptische System sowie die Bedienungspulte für die Hochspannungs- und Vakuumanlage. Es kann bei einem Druck von $5 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}$ Torr in der Kammer geschweißt werden. Bei einem kleineren Unterdruck als $5 \cdot 10^{-4}$ Torr sind Überschlüge im Kathodenteil möglich. Außerdem nimmt die Lebensdauer der Kathode ab. Sauerstoff- bzw. stickstoffempfindliche Werkstoffe sind bei ca. 10^{-5} Torr zu schweißen.

Die Schweißkammer hat einen Durchmesser von 0,9 m und eine Länge von 1,20 m, in der Werkstücke bis zu 60 kg Gewicht aufgenommen werden können. Bis zu dieser Belastung ist ein einwandfreier Transport der Werkstücke gewährleistet. Die Höhe der Anlage beträgt ca. 3 m, das Gewicht, nicht zuletzt wegen der erforderlichen Bleiabschirmung, ca. 3 to.

Die für die verschiedenen Materialdicken erforderlichen Leistungen werden bei der oben beschriebenen Anlage durch eine veränderliche Hochspannung von 70 - 150 kV und variablen Strahlströmen bis zu 20 mA erreicht. Daher kann mit einem sehr schmalen, langbrennweitigen Elektronenstrahl gearbeitet werden, dessen Durchmesser sich über eine Strecke von 20 mm nicht wesentlich ändert, so daß nur eine Fokussierung auf der Werkstoffoberfläche zu erfolgen braucht.

Es gibt noch eine andere Möglichkeit, ähnliche Schweißleistungen von 3 - 5 kW zu erhalten, indem mit einer relativ kleinen, konstanten Hochspannung von 30 kV und veränderlichem Strahlstrom bis zu 170 mA gearbeitet wird. Dieses Prinzip [7] ist bei der Anlage der Fa. Balzers (s. Abb. 4) verwirklicht. Es hat zwei Vorteile: die Isolationsprobleme am Kathodenteil sind wesentlich einfacher, und die auftretende Röntgenstrahlung ist erheblich geringer. Sie wird schon von der Kammerwand ohne zusätzliche Bleiabschirmung absorbiert.

Für die hohen Emissionsströme bei kleinerer Hochspannung muß die Kathode jedoch anders ausgebildet sein. Ein dünner Wolframfaden würde sofort verdampfen. Deshalb besteht die Kathode aus einem Wolframstab von 0,5 bis 1,5 mm Durchmesser. Ein Ende ist senkrecht zur Achse plangeschliffen und wirkt als Emissionsfläche, wenn der Schaft durch Elektronenbeschuß be-

heizt wird. Der Durchmesser des Wolframbolzens bestimmt den Durchmesser des Brennflecks am Werkstück.

Die Abb. 3 zeigt einen Schnitt durch eine solche Anlage.

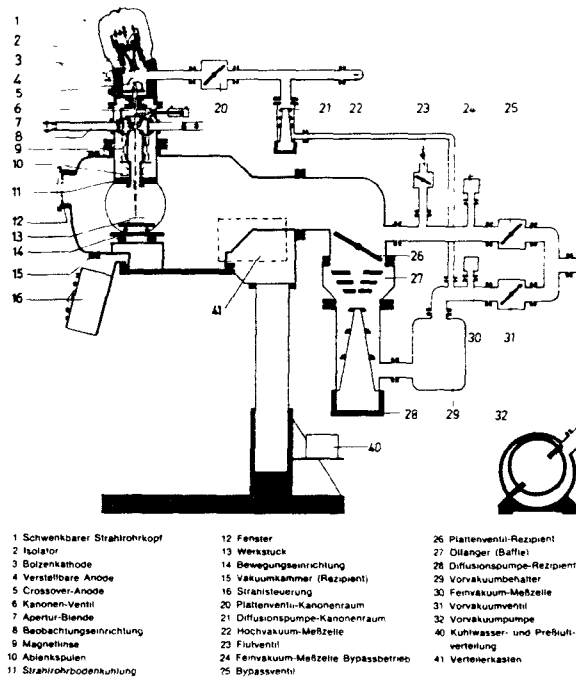


Abb. 3 Schema der Elektronenstrahl-Schweißmaschine-ESW5 der Fa. Balzers

Oben erkennt man wieder das elektronenoptische System mit Kathode, Anode, Beobachtungseinrichtung, Magnetlinse und Ablenkspulen, ähnlich wie bei der vorher beschriebenen Anlage. Über der Beobachtungseinrichtung ist ein Absperrventil angebracht. Dadurch kann der Kathodenraum von der Schweißkammer getrennt werden. Eine kleine Diffusionspumpe hält im oberen Teil einen Druck von 10^{-5} Torr aufrecht, während unten die Schweißkammer geöffnet werden kann. Am Schaltpult unterhalb der Schweißkammer erfolgt die Steuerung des Elektronenstrahles und die des Werkstücktransportes. Die Gesamtanlage wird in der Abbildung 4 gezeigt. Wegen der bereits er-

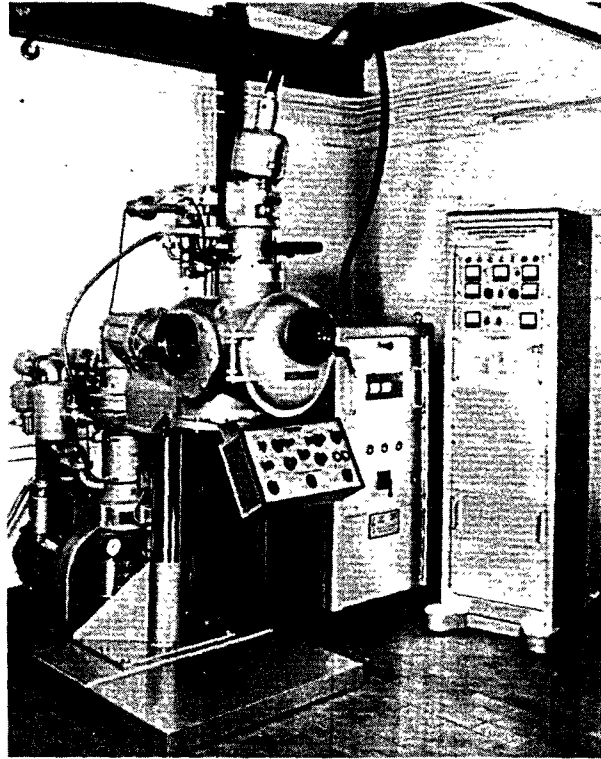


Abb. 4 Elektronenstrahl-Schweißmaschine ESW 5 der Fa. Balzers

wähnten Isolationsprobleme fällt der Kathodenteil relativ klein aus. Das erleichtert das Auswechseln der Kathode wesentlich, weil dieser Teil nur aufgeklappt wird. Die Schweißkammer fällt ebenfalls relativ klein aus. Dadurch ist die Evakuierungszeit entsprechend kurz. Nach einer Minute ist ein Druck $< 5 \cdot 10^{-4}$ Torr zu erreichen, so daß bereits nach dieser Zeit geschweißt werden kann. Unter der Schweißkammer befindet sich die Bedienungseinrichtung für den Elektronenstrahl und die Bewegung des Werkstückes. Daneben sind die Hochspannungseinrichtung und der Schaltschrank für die Vakuumanlage angeordnet mit den Meßgeräten für das elektronenoptische System.

An dieser Balzersanlage, die hauptsächlich zum Dichtschweißen der rohrförmigen, plutoniumhaltigen Brennelemente angeschafft wurde, ist am seit-

lichen Einblick der Schweißkammer eine Vorrichtung angebracht, in der Rohre bis zu 1,50 m Länge geschweißt werden können. Sie besteht hauptsächlich aus einem Rohr von ca. 50 mm Durchmesser mit verschiedenen Lagerstellen, in die das Brennelement nach dem Einfüllen des Brennstoffes gebracht wird. Vorrichtung mit Brennelement wird zur Schweißanlage transportiert und über eine Schnellflanschverbindung an die Kammer angeschlossen.

Ähnlich im Prinzip, also mit einer Hochspannung von 30 kV arbeitend, ist die Anlage der Fa. Sciaky, Frankreich, die in der Abb. 5 gezeigt wird.

In der Schweißkammer befindet sich gleichzeitig das elektronenoptische System, das im Gegensatz zu anderen Anlagen bewegt wird, während das Werkstück stillsteht. Für Versuchsschweißungen ist diese Anlage weniger gut geeignet, weil die Bewegungsmöglichkeiten für das elektronenoptische

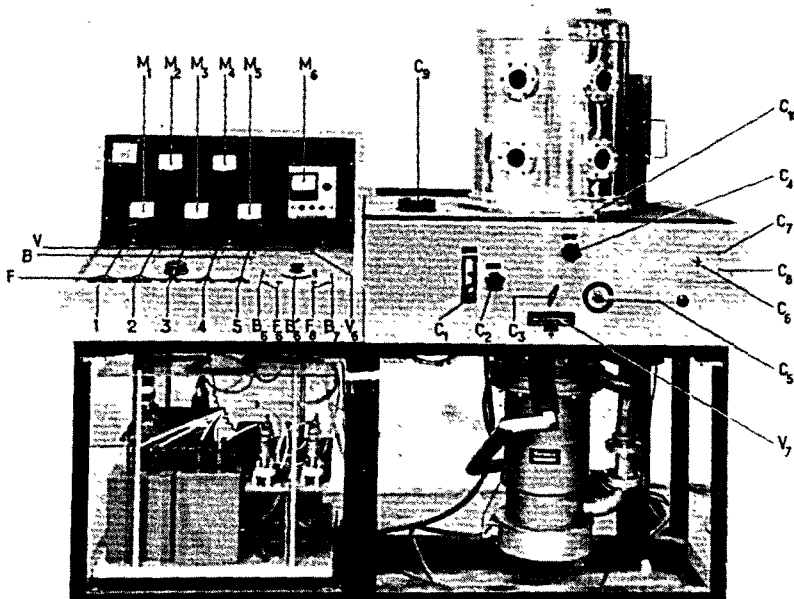


Abb. 5 Elektronenstrahl-Schweißmaschine der Firma Sciaky

System kleiner sind, und die Beobachtung des Schweißvorgangs wegen der bewegten Kathode bei stillstehendem Werkstück erschwert ist. Dagegen ist die Anlage aufgrund des einfachen Aufbaus für Serienschweißungen bestimmter Geometrie und zum Einbau in eine Glove-Box mit eventueller Fernbedienung gut geeignet.

4. Anwendungen des Elektronenstrahlschweißens

4.1 Allgemeine Anwendungen

Zunächst wird das Verhältnis Schweißnahtbreite zu Schweißnahttiefe gezeigt. Es beträgt $1 : 10$ bis $1 : 20$ (F_1), während bei Lichtbogen- oder Autogenschweißungen (F_2) ein Verhältnis besser als $1 : 1$ kaum erreicht werden kann.

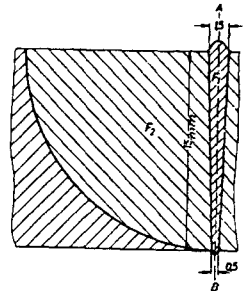


Abb. 6 Schematischer Vergleich der Schmelzzonen [9]

Die maximalen Materialstärken, die mit unserer Zeiß-Maschine geschweißt werden können, betragen an V2A ca. 30 mm.

Die größten Schweißanlagen in Amerika, die nach dem selben Prinzip, jedoch mit weit höheren Strahlströmen arbeiten, ermöglichen das Schweißen von 100 mm dicken Chrom-Nickellegierungen. Die Schweißgeschwindigkeit liegt dann allerdings nur bei etwa 0,2 m pro Minute, während sie bei dünneren Materialstärken 1 - 5 m pro Minute beträgt. Mit größerer Hochspannung als 150 KV ist kaum noch eine nennenswerte Verbesserung zu erreichen, weil die Isolationsprobleme oberhalb 150 KV sehr schwer zu beherrschen sind.

Voraussetzung für gute Schweißnähte ist einmal, daß die Proben an den zu schweißenden Stellen sorgfältig bearbeitet sind, damit der Elektronenstrahl nicht zwischen den Stoßkanten hindurchtritt, ohne das Material aufzuschmelzen. Außerdem müssen die zu schweißenden Teile sehr sauber sein.

Verunreinigungen führen zu Gasporen bzw. zu Löchern. Darüber wird noch an anderer Stelle zu berichten sein.

Auch Metalle mit hohen Schmelzpunkten, wie Tantal und Wolfram, lassen sich gut schweißen. So wurde z.B. ein Tantalblech von 0,3 mm Stärke zu einem Rohr gebogen und mit entsprechenden Deckeln zu einer Kapsel verschweißt. Das Material ist so gut verlaufen, daß die Naht kaum zu sehen ist.

Stahl-, Tantal- und Wolframbleche von 0,1 mm Dicke lassen sich noch gut schweißen. Unter gewissen Voraussetzungen können Materialstärken von 0,01 mm geschweißt werden, sogar bei sehr verschiedenen Stärken der beiden Teile. Das ist nur möglich, weil diese wegen der hohen Energiedichte im Strahl gleichzeitig zum Schmelzen gebracht werden, was mit anderen Verfahren nicht gelingt.

Deshalb bereitet es keine Schwierigkeiten, verschiedenartige Werkstoffe miteinander zu verschweißen, auch wenn deren Schmelzpunkte sehr unterschiedlich sind, z.B. V2A mit Kupfer. Ähnlich günstig liegen die Verhältnisse bei Kupfer-Nickel, Inconel-V2A oder Incoloy-V2A.

Schwieriger ist es bei den Materialkombinationen, die sich wegen Bildung einer intermetallischen Phase nicht direkt miteinander verschweißen lassen, wie etwa Eisen-Aluminium oder die Fe/Ni-Legierungen mit Zircaloy bzw. Vanadium. Dies gelingt auch nicht mit anderen Schmelzschweißverfahren. Bei derartigen Systemen kann man sich aber durch Zwischenlegen eines Materials helfen, das mit den anliegenden Werkstoffen keine neuen Phasen bildet.

4.1.2 Versuchsproben

Im folgenden werden eine Reihe von Beispielen beschrieben, die den vielseitigen Einsatz unserer Elektronenstrahlschweißanlage verdeutlichen. Es wurden folgende Schweißungen ausgeführt:

Bestrahlungsproben für Projekt Mol 2 zum Testen verschiedener hochwarmfester Materialien unter Bedingungen, denen das Brennelement des Schnellen Brüters ausgesetzt sein wird.

Brennelementrohre mit Abstandshaltern

Fermi-Brennelemente

EVESR-Brennelemente

Brennelemente mit Sinterstopfen zur Ableitung der Spaltgase

Versuchsproben mit Natriumfüllung, um den Einfluß des Kühlmittels auf das Zeitstandsverhalten bestimmter Werkstoffe studieren zu können

Brennelemente mit Sollbruchstellen zur Lokalisierung eventueller Brennelementschäden

Brennstoffplättchen mit extrem dünner Umhüllung

Detektorkapseln für Projekt Mol III zur Neutronenflußmessung

Detektorkapseln zur Ermittlung von Wärmeübergängen

Das Hüllrohr hat einen Durchmesser von ca. 7 mm, eine Wandstärke von 0,3 mm, eine Länge von etwa 50 mm und besteht aus den oben genannten Legierungen. Daran ist auf jeder Seite eine Kappe aus V2A aufzuschweißen, in die jeweils der Heizleiter und die Kapillare von 1,5 mm bzw. 1,2 mm Durchmesser mit einer Wandstärke von 0,3 mm einzuschweißen sind.

Wenn derartig kleine Abmessungen und dünne Wandstärken zuverlässig zu schweißen sind, werden an die Herstellung des Prüflings und an das Schweißverfahren beachtliche Anforderungen gestellt. Sofern die Verbindungsteile genügend gesäubert werden, bereitet das Verschweißen der Hüllrohre mit den Kappen keine Schwierigkeiten, obwohl es sich um verschiedenartige Werkstoffe handelt. Das Reinigen der Proben ist deshalb so wichtig, weil Verunreinigungen beim Auftreffen des Elektronenstrahles sofort verdampfen und zu Poren und Löchern führen. Dasselbe gilt für die Schweißungen an Heizleiter und Kapillare. Diese müssen in den Kappen gut eingepasst sein. Ein unterschiedlicher Spalt beeinflusst den Wärmeübergang zur Kapillare bzw. zum Heizleiter. Deshalb wird deren Oberfläche entweder nicht genügend aufgeschmolzen, oder aber die Teile schmelzen ab.

Besondere Anforderungen sind an die Einhaltung der Maße am Bund der Kappe zu stellen. Eine Vergrößerung der Materialstärke an dieser Stelle um 1/10 mm bedeutet bereits einen Materialzuwachs von etwa 30 %. Dies würde zur Folge haben, daß der Elektronenstrahl nicht wie vorgesehen 0,15 mm tief in die Kapillare eindringt, sondern nur 0,05 mm. Dadurch verschlechtert sich die Festigkeit und die Güte der Schweißverbindung. Dasselbe gilt für eine entsprechende Maßunterschreitung, die zum Zulaufen der 1,2 mm dicken Kapillare führt. Außerdem ist wichtig, daß die Bohrungen für den Heizleiter und die Kapillare genau zentrisch angebracht sind. Bei einer Exzentrität

von 0,1 mm beträgt die Wandstärke einmal 0,4 mm und dann nur 0,2 mm. Während der Elektronenstrahl in dem einen Fall kaum bis zur Kapillare vordringt, läuft diese im anderen Fall zu. Besonders kritisch sind die Verhältnisse am Heizleiter, weil der Isolator zwischen Draht und Wand sehr stark erhitzt wird und verdampft. Deshalb wurde der Mantel an der Schweißstelle verstärkt, um Gasausbrüche zu vermeiden. [10]

Es hat sich gezeigt, daß die Eindringtiefe des Elektronenstrahls wegen der guten Stabilität der elektrischen Daten auf $\pm 0,015$ mm genau festgelegt werden kann, sofern die maßlichen Voraussetzungen erfüllt sind. So konnten bei anderen Proben noch dünnere Kapillaren in größerer Stückzahl ohne jeden Ausschuß geschweißt werden. Einige Prüflinge wurden mit Wasser bis zum Bruch abgedrückt. Dabei konnten ca. 1100 atü erreicht werden, wobei der Bruch stets im Hüllrohr und nicht an den Schweißstellen auftrat.

4.2. Versuchsschweißungen an nickelhaltigen Werkstoffen und Nickelbasislegierungen

Es hat sich gezeigt, daß eine gute Schweißbarkeit bei der Auswahl von Hüllmaterialien mit am Anfang aller Überlegungen stehen muß. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Legierungen, die in der Technik bisher relativ wenig Verwendung finden und deshalb ziemlich teuer sind. Außerdem muß in diesem Zusammenhang immer an die Verbindung derartiger Materialien mit mehr konventionellen Werkstoffen gedacht werden. Über die dabei auftretenden Probleme des Verschweißens verschiedenartiger Materialien wird gesondert berichtet werden.

4.2.1 Schweißungen an CrNi 18 8

Bei dieser Legierung handelt es sich um einen gut schweißbaren Werkstoff.

Dies zeigte sich bei Zerreiß- und Biegeversuchen. Für den Zugversuch wurden 37 Proben verwendet. Davon sind 18 Proben in der Schweißnaht und 19 Proben im Grundmaterial gerissen. Die Zugfestigkeit bei Raumtemperatur schwankt zwischen 60 und 67 kp/mm². Der Biegeversuch zeigte eine ausgezeichnete Duktilität der Schweißnaht. Es wurden 32 Bleche über einen Stempel mit dem Radius der Materialstärke bis zu einem Winkel von 150° gebogen. Dabei traten keine Risse auf.

In den folgenden vier Abbildungen soll gezeigt werden, welchen Einfluß die verschiedenen Schweißparameter auf die Ausbildung der Schweißnaht und das Materialgefüge haben.

Die Abb. 8 zeigt einen Querschliff von einer Elektronenstrahlschweißung an CrNi 18 8 von 5 mm Stärke mit gleichbleibender Schweißnahtbreite von 0,7 mm. Weder oben noch unten ist Material aufgeworfen. Sehr deutlich hebt sich die Schweißzone vom unbeeinflussten Grundmaterial ab. Eine wärmebeeinflusste Zone ist nicht zu erkennen. Bei den im Bild dunkel erscheinenden Bereichen handelt es sich um sehr feinkristallines Material, wie aus der Abb. 9, einer Ausschnittsvergrößerung, zu ersehen ist. Die Dentriten sind sehr deutlich zu erkennen. Die Abb. 10 zeigt eine Aufnahme, in der durch niedrige Spannung, etwas mehr Strahlstrom und ohne periodische Ablenkung des Elektronenstrahls während des Schweißens das Gefüge in einzelnen Bereichen der Naht nicht mehr so ausgeprägt feinkristallin ist wie im vorhergehenden Bild. Dafür ist das Material unten aufgeworfen. In der Abb. 11 sind die Gefügeunterschiede sehr gering. Die obere Hälfte weist praktisch keine Unterschiede zwischen Schweißzone und Grundmaterial auf. Dafür ist jetzt oben das Material aufgeworfen. Die Höhe des aufgeworfenen Materials täuscht etwas durch die Vergrößerung.

In Wirklichkeit beträgt die Materialaufwerfung nur 0,6 mm.

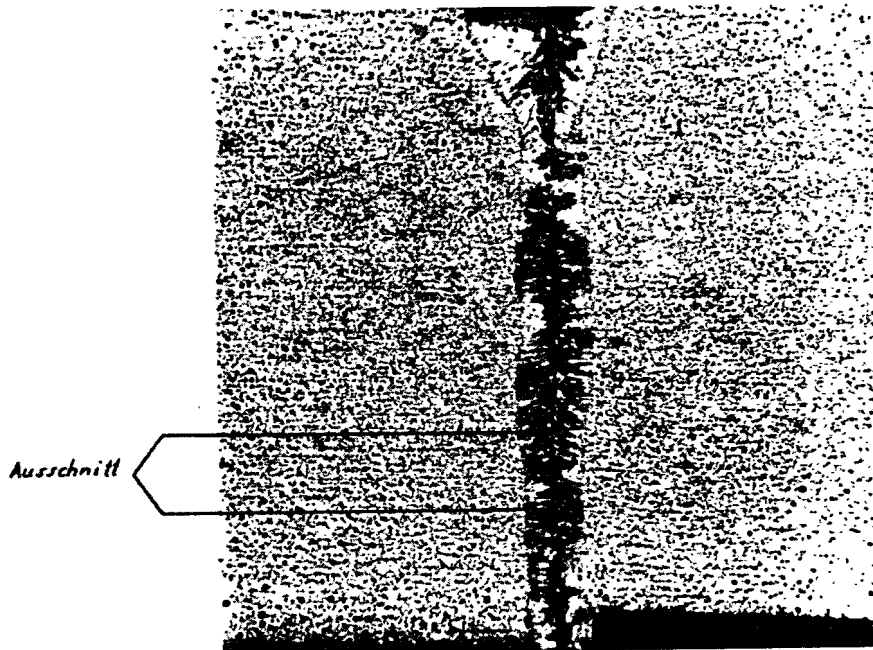


Abb. 8 Querschliff an CrNi 18 8, 5 mm dick
Schweißdaten 150 KV, 11 mm A, 10 mm/sek., LG1

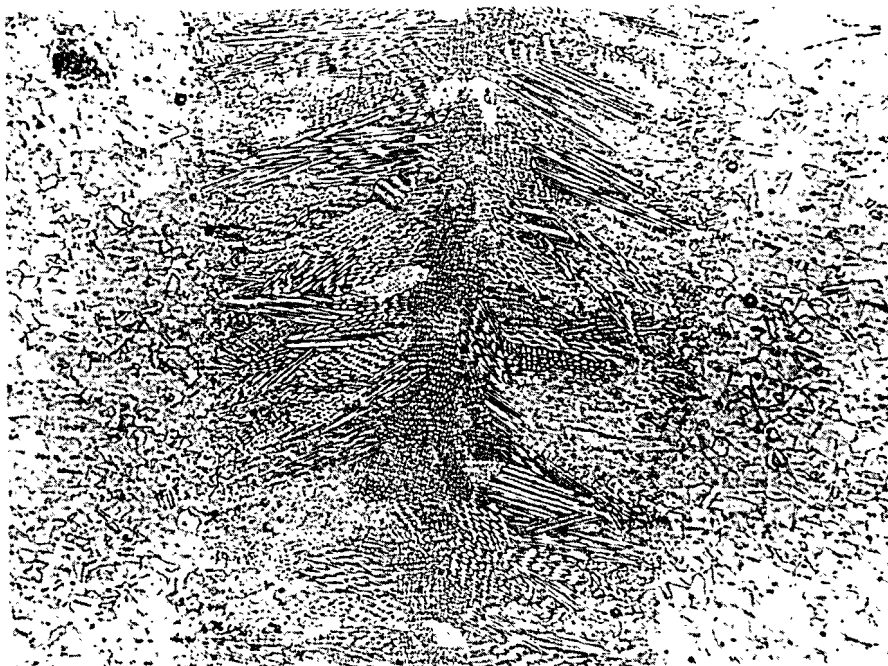


Abb. 9 Ausschnittsvergrößerung von Abb. 8 (200 x)

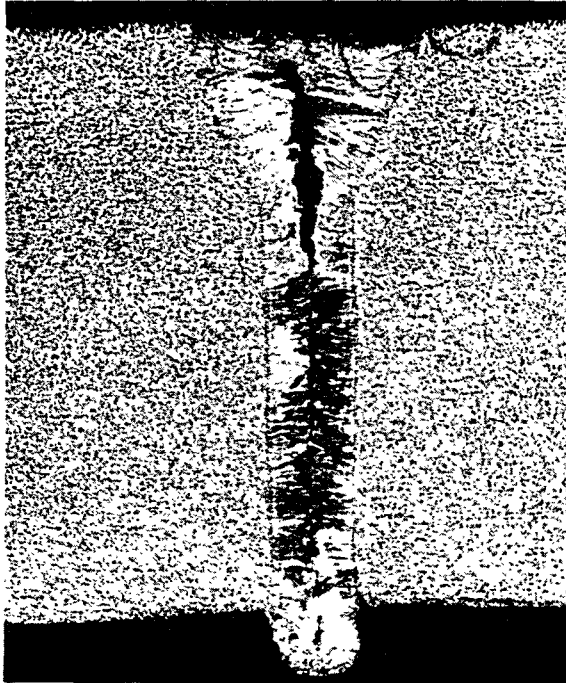


Abb. 10 Querschliff CrNi 18 8, 5 mm dick
Schweißdaten 145 KV, 12 mm A, 10 mm/sek, o.W.

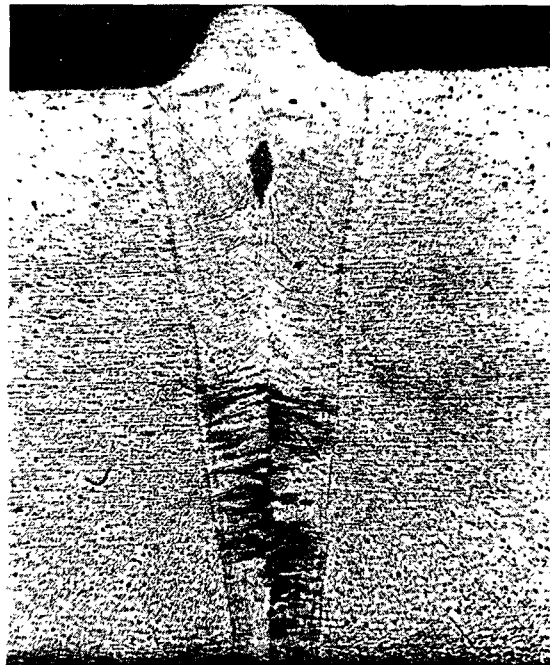


Abb. 11 Querschliff an CrNi 18 8, 5 mm dick
Schweißdaten 150 KV, 15 mm A, 10 mm/sek, LG1

4.2.2 Schweißungen an CrNi 16 13, CrNi 20 25, Incoloy und Inconel.

Obwohl sich die einzelnen Legierungen bezüglich ihres Nickelgehaltes, der hauptsächlich für die Rißbildung in der Übergangszone bei den konventionellen Schweißverfahren verantwortlich ist, wesentlich unterscheiden, ist bei allen diesen Legierungen ein sehr gutes Schweißverhalten zu verzeichnen. Deshalb erübrigt es sich diese Legierungen einzeln zu besprechen und Versuchsreihen über Festigkeit und Duktilität anzuführen.

Die Kohlenstoffgehalte liegen bei den genannten technischen Legierungen zwischen 0,1 bis 0,01 % und stören beim Schweißen überhaupt nicht. Die Phosphor und Schwefelgehalte sind noch niedriger und liegen zwischen 0,01 und 0,001 %. Deshalb ist auch von diesen Komponenten kein störender Einfluß zu erwarten.

Das gute Schweißverhalten der obengenannten Werkstoffe bezieht sich auf Materialstärken von 0,3 - 2 mm, die von uns untersucht wurden. Bei Dicken von 10 - 20 mm kann sich dies anders verhalten, weil Schweißvorgang und Abkühlung wesentlich langsamer verlaufen, so daß wärmebeeinflusste Zonen möglich werden.

Unterschiede im Härteverlauf müßten sich jedoch bei den Inconel-Proben einstellen. Bei Inconel X 550 handelt es sich um einen ausscheidungshärtenden Werkstoff im Gegensatz zum Inconel 600 als nichtausscheidungshärtende Legierung. Aufgrund dieser Tatsache ist die Härte bei der ersten Legierung in der Schweißnaht deutlich kleiner als im unbeeinflussten Grundmaterial, da der Werkstoff in der aufgeschmolzenen Zone praktisch homogenisiert ist, wie in Abb. 12 zu sehen ist.

Daß der Unterschied nicht noch ausgeprägter ist, liegt daran, daß die Bleche nicht voll ausgehärtet gewesen sind. Dies erkennt man an den relativ niedrigen Werten der Zugfestigkeit um 90 kp/mm^2 , während bei voll-
ausgehärteten Blechen Werte von 120 kp/mm^2 zu verzeichnen sind.

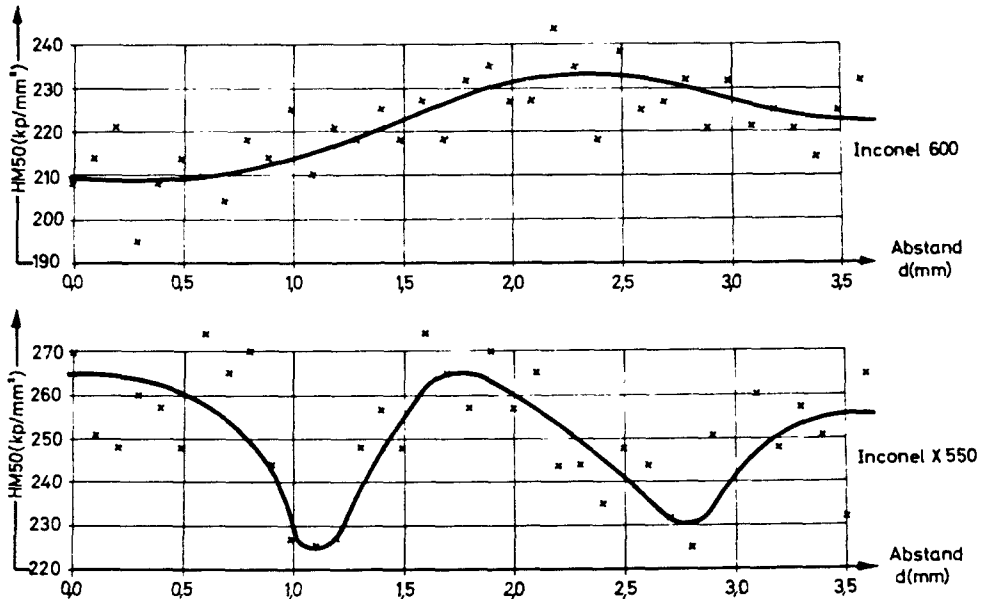


Abb. 12 Härteverlauf an Inconel 600 und Inconel X 550

Bei der Legierung CrNi 20 25 sei noch auf eine Besonderheit hingewiesen. In der Schweißnaht treten je nach den Abkühlungsbedingungen sehr häufig durchgehende, gerichtete Korngrenzen in der Schweißnaht auf, wie Abb. 13 zeigt.

Die durchgehenden Korngrenzen lassen vermuten, daß die Festigkeit derartiger Schweißungen herabgesetzt ist und ein schlechteres Biegeverhalten auftritt. Beides wurde jedoch nicht beobachtet. Die gerichteten Korngrenzen sind nicht besonders stabil. Glühversuche nach dem Schweißen ergeben, daß nach 30 Minuten bei 900°C vom Rand der Zone Rekristallisation einsetzt. Nach einstündiger Glühzeit bei 1000°C ist die gesamte Zone rekris-

tallisiert.

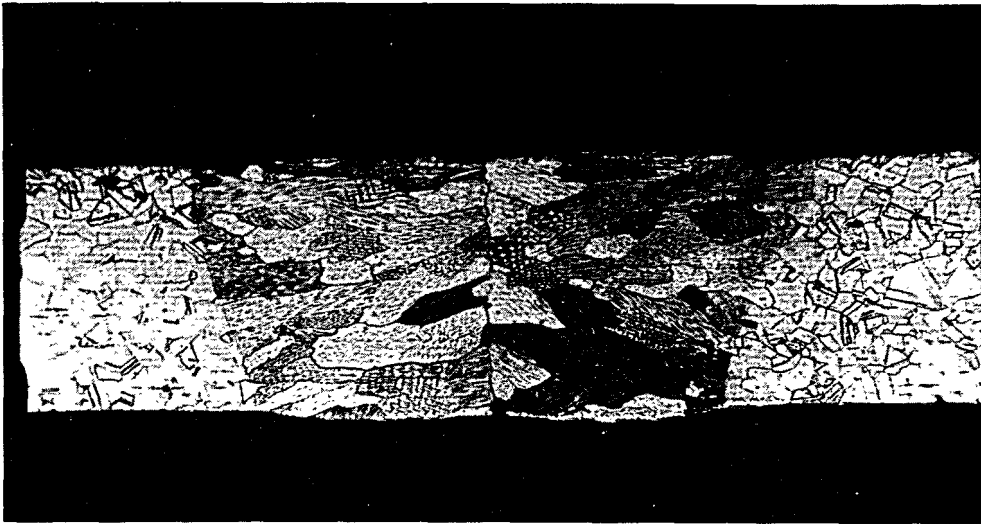


Abb. 13 Querschliff an CrNi 20 25; 0,5 mm dick

4.2.3 Schweißungen an der Molybdän-Legierung TZM

Molybdän ist bekannt als ein Werkstoff, der sich nicht gut schweißen läßt. Zugfestigkeit und Duktilität der geschweißten Proben sind bei Raumtemperatur wesentlich niedriger als die des Ausgangsmaterials [11]. Mit steigender Temperatur werden die Verhältnisse günstiger.

Wir hatten die Legierung TZM der Fa. Climax mit 0,5 % Ti und 0,08 % Zr als Bleche von 0,5 mm Stärke vorliegen. Die Schwierigkeiten beginnen bereits bei der Probenherstellung, da die Bleche bei der Trennung auf der Schlagschere außerordentlich leicht aufsplintern und die Ecken abbrechen. Da sich Sägen, Fräsen und eine vorhandene Trennscheibe nicht eigneten, blieb als einzige rationelle Methode für die 200 Proben das Trennen auf der Schlagschere mit einem anschließenden Schleifen der geschnittenen Bleche. Eine zusätzliche Erwärmung während des Schneidens brachte keine Verbesserung.

Da sich oberflächliche Verunreinigungen sehr nachteilig auf das Schweißverhalten auswirken, müssen die Proben sehr sorgfältig gereinigt werden. Dies erfolgt in 3 Schritten.

Die Bleche werden zunächst in heißem Trichloräthylen entfettet. Danach sind sie 10 Minuten einer 80°C warmen Lösung von 10 % NaOH + 5 % KMnO_4 + 85 % H_2O auszusetzen. Anschließend bringt man die Bleche weitere 10 Minuten bei Raumtemperatur in eine Lösung von 15 % HCl + 15 % H_2SO_4 + 10 % CrO_3 + 60 % H_2O (alles in Gewichtsprozent). Mit einem Spülen in kaltem Wasser wird der Reinigungsprozeß beendet. Es ist zweckmäßig, die Proben anschließend unter Vakuum aufzubewahren.

Am TZM der Firma Climax ist uns bisher beim Schweißen kein Erfolg beschieden. Es konnte kein nennenswerter Biegewinkel erreicht werden. Auch der Übergang vom Dauerstrahl zum gepulsten Strahl bei verschiedenen Impulsfrequenzen und Impulsdauern brachte keine Verbesserung. Das Vakuum in der Schweißkammer wurde deshalb verändert, um den Sauerstoffeinfluß bei ungenügendem Unterdruck auszuschließen. Eine Abhängigkeit von der Walzrichtung zeigte sich nicht. Um die Schrumpfspannungen klein zu halten, blieben die Bleche einseitig eingespannt.

In der Abb. 14 wird ein Schliffbild vom TZM gezeigt. Man erkennt eine relativ breite, sich vom Grundmaterial sehr deutlich abhebende Schmelzzone, in der ein starkes Kornwachstum auftritt. Bemerkenswert ist die wärmebeeinflusste Zone mit einer Breite von 0,3 mm. Daran schließt sich das Grundmaterial mit seiner Walztextur an. Es konnte kein meßbarer Biegewinkel erreicht werden.

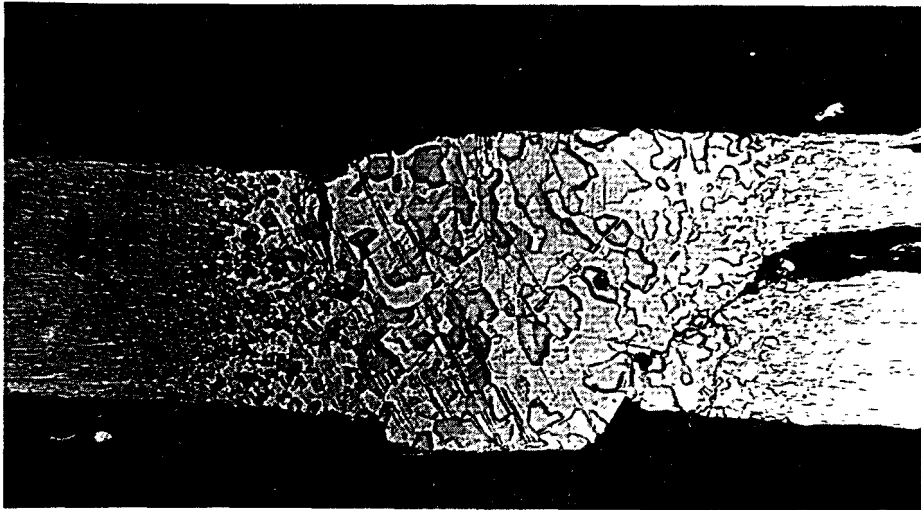


Abb. 14 Querschliff an TZM; 0,5 mm dick

Daß beim Schweißen von Molybdänlegierungen Schwierigkeiten auftreten, war uns aus der Literatur bekannt [12]. Derartig schlechte Ergebnisse sind jedoch überraschend, zumal die Verunreinigungen nach den Analysenangaben der Firma als sehr gering anzusehen sind. Erst eine nachträgliche von uns im chemisch-analytischen Labor vorgenommene Analyse lieferte einen Hinweis. In der folgenden Tabelle sind die Werte für Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff gegenüber gestellt.

Material TZM	O ₂ [ppm]	H ₂ [ppm]	N ₂ [ppm]
Climax (Herstellerangabe)	< 5	< 1	4
Climax (gemessener Mittelwert)	200	50	100
Fansteel (gemessen)	120	12	46

Tabelle 2: Gasförmige Verunreinigungen in TZM

Die gemessenen Werte bei dem Climax-TZM schwanken um $\pm 50\%$, so daß sie gesintertes Material, die konstanten Werte des Fansteel-TZM geschmolzenes Material vermuten lassen. Obwohl die Werte bei Fansteel weit über den maximal zulässigen Verunreinigungen liegen, konnte auf Antrieb ein Biege-
winkel von 40° erreicht werden. Später ist sogar ein Winkel von 150° erzielt worden. Es stand jedoch nur wenig Material zur Verfügung, weshalb systematische Untersuchungen nicht möglich waren. Außerdem konnten die Ergebnisse vom Climax-TZM wegen unterschiedlicher Blechstärken nicht unmittelbar auf Fansteel-TZM übertragen werden.

Wenn auch die Schweißbarkeit des TZM sicher noch verbessert werden kann, so ist es doch unwahrscheinlich, daß größere und kompliziertere Konstruktionen fehlerfrei und zuverlässig schweißbar sind. Zumindest würde jede Geometrie und Materialstärke ein eigenes Untersuchungsprogramm erfordern.

4.2.4 Versuchsschweißungen an einer Vanadium-Legierung.

Abschließend noch einige Bemerkungen zu einer Vanadin-Legierung mit 10% Nb und 20% Ti, die hinsichtlich einer Wahl zwischen Molybdän- oder Vanadin-Legierungen als Hüllmaterial sehr aufschlußreich sind [13]. Zur Verfügung stand nur ein kleines Stück Rundmaterial, das ausgewalzt einen Streifen von 10 mm Breite, 150 mm Länge und $0,6\text{ mm}$ Dicke ergab. Die Kaltverformung betrug 90% . Wegen der geringen Menge konnten noch keine systematischen Versuchsschweißungen zur Ermittlung der optimalen Schweißdaten durchgeführt werden. Trotz der ungleichen, ziemlich rauhen Schweißnähte ist bei den wenigen bisher geschweissten Proben ein ausgezeichnetes Ver-

halten zu beobachten. Es zeigten sich wenig Unterschiede in der Zugfestigkeit ($82 - 88 \text{ kp/mm}^2$), wenn man von 2 Proben absieht, die wegen eines Materialfehlers im Grundmaterial ca. 10 mm neben der Schweißnaht bei 72 und 72 kp/mm^2 gerissen sind (s. Tabelle 3). Vergleicht man die oben genannten $82 - 88 \text{ kp/mm}^2$ mit dem Wert der geglühten, ungeschweißten Probe aus Rundmaterial, so ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung. Die Festigkeit der gewalzten, ungeschweißten Probe liegt bei 114 kp/mm^2 .

Probe	Behandlung	σ_p kp/mm ²	Ort des Bruches
1	Blindnaht, mech. gereinigt 90 % kaltverformt	88,5	wärmebeeinflusste Zone
2	Stumpfnah, mech. gereinigt, 90 % kaltverformt	81,0	wärmebeeinflusste Zone
3	Blindnaht, chem. gereinigt, 90 % kaltverformt	81,2	Grundmaterial
4	Blindnaht, mech. gereinigt, geglüht	71,8	Grundmaterial
5	Blindnaht, mech. gereinigt, geglüht	74,5	Grundmaterial
6	Vergleichsprobe aus Rundmaterial, ungeschweißt geglüht	82,5	-
7	ungeschweißt, mech. gereinigt, 90 % kaltverformt	114	-

Tabelle 3. Zugfestigkeit einer Vanadin-Legierung mit 10 % Nb und 20 % Ti

Ein Gefügebild der genannten Legierung zeigt die Abb. 15. Am rechten Bildrand ist sehr deutlich das Verformungsgefüge zu sehen, daneben zur Schweißnaht hin, die wärmebeeinflusste Zone. Besonders zu beachten ist, daß sich die Schweißzone nur wenig vom Grundmaterial unterscheidet, obwohl Vanadium in der aufgeschmolzenen Zone sehr zum Kornwachstum neigt, wie Untersuchungen an Rein-Vanadium gezeigt haben. Erwähnenswert ist noch die Tatsache, daß an allen bisher geschweißten Werkstoffen nie eine Porenbildung beobachtet wurde. Bei Rein-Vanadium dagegen traten stets Poren auf. Sie sind auf Oxydoberflächenschichten zurückzuführen. Die Poren verschwinden, sobald die Bleche chemisch gereinigt werden, wie bei TZM be-

schrieben.



Abb. 15 Querschliff an Vanadium mit 10 % Nb und 20 % Ti; 0,5 mm dick

Die Duktilität der geschweißten Bleche ist sehr gut. Bis zu einem Biegewinkel von 150° traten keine Risse auf. Erst nach mehrmaligem Hin- und Herbiegen zerbricht schließlich die Probe.

5. Abschließende Bemerkungen.

An den bisherigen Beispielen sollte gezeigt werden, daß das Elektronenstrahlschweißen besonders bei erhöhten Sicherheitsanforderungen ein sehr wertvolles Schweißverfahren ist, das in der Reaktortechnik auch komplizierte Konstruktionselemente mit großer Genauigkeit und Sicherheit zu verbinden gestattet. Es soll damit nicht gesagt sein, daß das Elektronenstrahlschweißen den anderen Verfahren in jeder Beziehung, insbesondere ökonomisch, überlegen ist. Es wäre unsinnig, z.B. unlegierte oder niedrig legierte Stähle, Aluminium oder Kupfer in jedem Fall mit Elektronen-

strahlen zu schweißen. Trotzdem ist es erstaunlich, wie oft sogar Massenteile auf diese Weise rationell geschweißt werden können, wenn man mehrere hundert gleichartige Schweißungen hintereinander ausführt, ohne die Kammer zwischendurch zu belüften.

Wenn jedoch sauerstoffempfindliche Legierungen zu schweißen sind und Anlauffarben aus Korrosionsgründen vermieden werden müssen, ist eine Schutzgasschweißung mit entsprechender Pistole nicht ausreichend, auch dann nicht, wenn unterhalb des zu schweißenden Werkstückes zusätzlich Schutzgas zugeführt wird. Abgesehen davon, daß es infolge des Gasstromes leicht zu Poren im Schweißgut kommt, ist aufgrund der Wirbelbildung an der Schweißstelle nie auszuschließen, daß Sauerstoff bzw. Stickstoff an diese Stelle gelangt. In einem solchen Falle bleibt nichts anderes übrig, als eine geschlossene Kammer, am besten eine Vakuumkammer, zu verwenden. Heute beherrscht man die Vakuumtechnik dermaßen, daß Kammern bis zu 20 m Länge und Durchmessern von einigen Metern möglich sind, in denen ganze Tragflächen, Raketenstufen und Brennelementanordnungen geschweißt werden können.

In der letzten Zeit hat es nicht an Versuchen gefehlt, Elektronenstrahlschweißungen an Luft vorzunehmen [14][15]. Das Problem dabei ist nicht der Austritt des Elektronenstrahles in die Atmosphäre, der durch mehrere hinter- bzw. übereinander liegende Druckstufen mit getrennten Absaugstellen erfolgt. Hierdurch wird ein schrittweiser Übergang von 760 Torr bis zu ca 10^{-4} Torr hergestellt, der wegen Isolationsproblemen im Kathodenteil und Streuung der Elektronen an Luft erforderlich ist. Das eigentliche Problem ist die Verbreiterung des Elektronenstrahls aufgrund

der Streuprozesse an Luft. Man braucht deshalb einen kleinen Abstand zwischen Strahlaustritt und Werkstück. Die Abstände liegen im allgemeinen zwischen 5 und 20 mm. Die Streuung ändert sich mit der Atmosphäre, in Helium z.B. ist sie wesentlich geringer als in Luft oder Argon.

Durch die Strahlverbreiterung ist die Energiedichte wesentlich kleiner. Damit verliert man praktisch die großen Vorteile des Elektronenstrahlschweißens. Durch die breitere Schweißzone gelangt außerdem wesentlich mehr Wärme in das umgebende Material. Trotzdem ist es gelungen, CrNi 18 8 bis zu 20 mm Dicke zu schweißen. Die Schmelzzone ist etwa 5 mm breit. Ein Verhältnis von Schweißnahtbreite zu Schweißnahttiefe besser als 1 : 4 gegenüber 1 : 20 im Vakuum ist nicht zu erreichen. Die Schweißgeschwindigkeiten sind ebenfalls kleiner, was zusätzlich zu einer stärkeren Erwärmung des umgebenden Materials führt.

Literatur:

- [1] P. Bettzieche "Schweißbarkeit der Stahlwerkstoffe"
Stahl und Eisen 85, 1965, Nr. 1, Januar
- [2] K.H. Steigerwald "Materialbearbeitung mit Elektronen"
Physikalische Verhandlungen 4 (1953) S. 123
- [3] K.H. Steigerwald "Materialbearbeitung mit Elektronenstrahlen"
4. Internationaler Kongreß für Elektronenmikroskopie
Springer Verlag, Berlin 1958, S. 276/78
- [4] K.H. Steigerwald "Schweißen und Schneiden mit Elektronenstrahlen"
Schweißen und Schneiden 12 (1960) H.3, S. 89/95
- [5] K.H. Steigerwald "Thermische Feinbearbeitung mit Elektronenstrahlen"
Feinwerktechnik, Jg. 66, Heft 2, 1962
- [6] W. Opitz "Der Elektronenstrahl als neuartiges Werkzeug"
Werkstattstechnik (1961) Heft 9, S. 448 - 454
- [7] E.B. Bas, G. Cremosnik, H. Lerch "Beitrag zum Problem der Erzeugung des
Elektronenstrahles für Schmelzen, Verdampfen, Schweißen und Bohren
mit Elektronenstrahlen", Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft
und Technik, H. 3, 28. Jahrgang 1962
- [8] K. Gast und W. Kramer Sicherheitsbericht für BR2-Material
Bestrahlungsversuche, Projekt Mol 2 Brüter-Bericht Nr. 90/65

- [9] S.Panzer "Fortschritte bei dem Schweißen, Trennen und Abtragen mit dem Elektronenstrahl", Schiff und Hafen August 61, Heft 8
- [10] W.Scheibe "Elektronenstralschweißen an Prüflingen für das BR2-Material-Bestrahlungsprogramm, LFM-Arbeitsbericht Nr. 7 v. 30.12.64
- [11] "Erfahrungsbericht der Firma Zeiss "Materialbearbeitung mit Elektronenstrahlen," Nr. 5, Januar 1963
- [12] M.Schwartz "Electron Beam Welding of Brazed Refractory Joints" AED-Conf. - 64 - 060 - 3
- [13] W.Scheibe "Elektronenstrahl-Schweißversuche an einer Vanadin-Basislegierung, IMF-Notiz Nr. 4/65 v. 12.4.65
ESB-Notiz Nr. 162 v. 12.4.65
- [14] H.Kluger, W.Dietrich "Elektronenstrahlschweißungen an freier Atmosphäre", Schweißen und Schneiden 16 (1964) H. 10 S. 477/78
- [15] R.F. Duhamel "Nonvacuum Elektron Beam Welding Technique Development and Progress", Welding Journal, June 1965, S. 465 -474