

FORSCHUNGSBERICHTE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

Herausgegeben

im Auftrage des Ministerpräsidenten Dr. Franz Meyers

vom Landesamt für Forschung, Düsseldorf

Nr. 1703

Prof. Dr.-Ing. Alfred H. Henning †

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Krekeler †

Dipl.-Ing. Rochus Gronwald

**Institut für Schweißtechnische Fertigungsverfahren
der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen**

Untersuchungen zum Elektro-Schlacke-Schweißen von Blechen geringer Wanddicke



SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH

FORSCHUNGSBERICHTE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

Nr. 1703

Herausgegeben

Im Auftrage des Ministerpräsidenten Dr. Franz Meyers

vom Landesamt für Forschung, Düsseldorf

Prof. Dr.-Ing. Alfred H. Henning †

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Krekeler †

Dipl.-Ing. Rochus Gronwald

*Institut für Schweißtechnische Fertigungsverfahren
der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen*

Untersuchungen zum Elektro-Schlacke-Schweißen von Blechen geringer Wanddicke



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Verlags-Nr. 011703

ISBN 978-3-663-06574-6 ISBN 978-3-663-07487-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-07487-8

© 1966 by Springer Fachmedien Wiesbaden

Ursprünglich erschienen bei Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1966.

Inhalt

1. Einleitung	7
1.1. Arbeitsweise des Elektro-Schlacke-Schweißverfahrens	7
1.2. Thermische und metallurgische Vorgänge	9
1.2.1. Primärkristallisation	9
1.2.2. Sekundärkristallisation	12
1.3. Einbrand	13
1.4. Stromquellen	14
2. Versuchseinrichtung	15
3. Versuchsmaterial	18
4. Versuchsdurchführung	19
5. Versuchsauswertung	24
5.1. Temperaturmessung	24
5.1.1. Auswertung des ZTU-Diagrammes	27
5.2. Festigkeitsuntersuchungen	30
5.2.1. Kerbschlagbiegeproben	30
5.2.2. Zugfestigkeit	32
5.2.3. Faltversuch	34
5.3. Die Makrostruktur einer Elektro-Schlacke-Schweißnaht	35
5.4. Die Mikrostruktur einer Elektro-Schlacke-Schweißnaht	38
5.5. Härtemessung des Schweißgutes	41
6. Zusammenfassung	45
7. Literaturverzeichnis	51

1. Einleitung

Im Institut für Lichtbogenschweißung E. O. PATON der Akademie der Wissenschaften in Kiew, UdSSR, wurde bei Versuchen mit dem automatischen Lichtbogen-Vertikal-Schweißen die Beobachtung gemacht, daß der zugeführte Schweißdraht zeitweise ohne Lichtbogen abschmolz. Die Untersuchung dieses Vorganges führte zur Entwicklung eines neuen Schweißverfahrens, des sogenannten Elektro-Schlacke-Schweißens. Gleichzeitig mit dem Schweißverfahren entwickelte das Institut die entsprechenden Schweißgeräte und führte das Verfahren in der Praxis ein. Seit 1951 wird das ESS-Verfahren in der UdSSR, vor allem im Schwermaschinen- und Kesselbau, wirtschaftlich eingesetzt.

Durch einen Aufsatz von G. Z. WOLOSCHKIEWITSCH wurde 1954 das neue Verfahren in Deutschland bekannt. Die erste Anwendung des ESS-Verfahrens erfolgte jedoch erst 1957 durch F. ERDMANN-JESNITZER und G. KÄMMLER.

1.1. Arbeitsweise des Elektro-Schlacke-Schweißverfahrens

Die grundsätzliche Arbeitsweise des ESS-Verfahrens kann aus Abb. 1 abgelesen werden.

Abb. 1 zeigt die vorbereitete Schweißstelle. Die Kupferbacken dienen zur Führung des entstehenden Schmelzbades (Schlacke- und Metallbad) und zur Kühlung der Schweißstelle. Der Schweißdraht, der gleichzeitig stromzuführende Elektrode ist, wird durch das Schlackepulver geleitet, bis er auf den Steg des aus Grundwerkstoff gefertigten Anlaufstückes aufstößt. Beim Auftupfen der Elektrode auf den Grundwerkstoff wird im Kurzschluß ein Lichtbogen gezündet. Es kann jedoch vorkommen, daß die Elektrode auf ein Pulverkorn aufstößt. Das Pulverkorn hat im festen Zustand eine isolierende Wirkung und erschwert das Zünden des Lichtbogens. Eine dünne Lage Stahlwolle unter dem Pulver hat sich als Zündhilfe bewährt.

Durch die hohe Temperatur des Lichtbogens wird das Pulver geschmolzen und bildet das Schlackebad. Das Schlackebad löscht den Lichtbogen und übernimmt nun seinerseits den Stromtransport zwischen Elektrode und Grundwerkstoff. Die flüssige Schlacke ist zwar elektrisch leitend, stellt aber doch einen beachtlichen Widerstand dar, den der elektrische Strom überwinden muß. Beim Stromdurchgang durch diesen Widerstand ergibt sich die Wärmeleistung nach dem Jouleschen Gesetz aus $U \cdot I$ bzw. $R \cdot I^2$. Bei dem jetzt beginnenden Schweißprozeß entsteht die Wärmeleistung

$$Q = 0,24 \cdot U \cdot I.$$

Q = Wärmeleistung in kcal, U = Spannung in Volt, I = Strom in Amperé

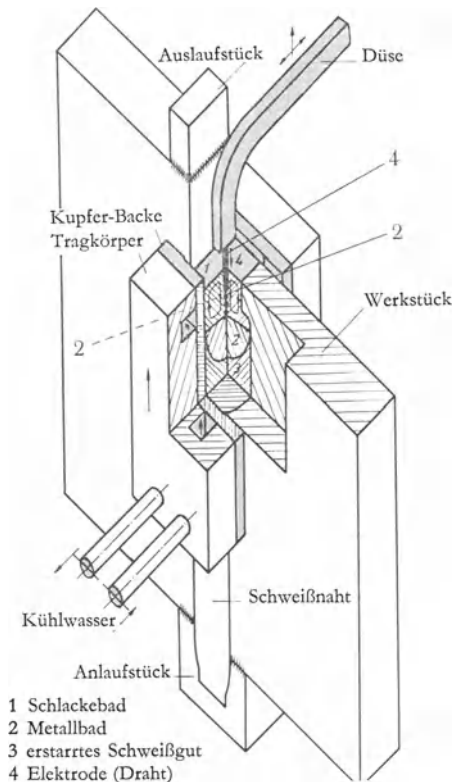


Abb. 1 Arbeitsablauf beim Elektro-Schlacke-Schweißen (ESS)

Infolge von Verlusten kann jedoch nur ein Teil dieses maximalen Leistungswertes genutzt werden.

Die Wärmeleistung hält das Schlackebad auf einer mittleren Temperatur von über 1600°C . Der das Schlackebad umgebende Grundwerkstoff wird dadurch aufgeschmolzen, es entsteht der sogenannte Einbrand. Die Kupferbacken werden, da sie wassergekühlt sind, dabei nicht angegriffen. Gleichzeitig beginnt auch der jetzt kontinuierlich zugeführte Schweißdraht im Schlackebad tropfenförmig abzuschmelzen.

Der geschmolzene Grund- und Zusatzwerkstoff sammelt sich durch sein höheres spezifisches Gewicht am Boden des Schlackebades und bildet dort das Metallbad. Das Metallbad nimmt durch den ständig abschmelzenden Grund- und Zusatzwerkstoff an Volumen zu und beginnt das Schlackebad, d. h. in diesem Fall die Wärmequelle, nach oben hin abzudrängen. Dadurch erhält der am weitesten von der Wärmequelle entfernte, also hier der untere Teil des Metallbades, die Möglichkeit, zu erstarren. Auf diese Weise wächst die Schweißnaht von unten nach oben.

Die Geschwindigkeit, mit der die Schweißnaht wächst, hängt vom Drahtvorschub ab. Wird der Drahtvorschub größer, taucht der Schweißdraht tiefer in das

Schlackebad ein. Der Weg des elektrischen Stromes durch das Schlackebad wird also verkürzt, der zu überwindende Widerstand wird geringer. Da die Spannung in etwa konstant ist, nimmt die Stromstärke zu, und der Draht schmilzt schneller ab. Es tritt eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit ein. Wird der Drahtvorschub verringert, stellt sich analog zu obiger Ausführung eine niedrigere Schweißgeschwindigkeit ein.

Das Verfahren zeichnet sich also durch eine gewisse Selbstregelung aus. Wird jedoch der Drahtvorschub extrem geändert, treten folgende Störungen auf, die den Schweißprozeß behindern:

Ist der Vorschub zu groß, taucht der Draht in das Metallbad ein und es entsteht ein Kurzschluß.

Ist der Vorschub zu klein, schmilzt der Draht ab, bevor er in das Schlackebad eintaucht. Es bildet sich ein Lichtbogen zwischen Drahtende und Schlackebad.

Wie die Beschreibung der Arbeitsweise zeigt, handelt es sich beim ESS um eine Einlagenschweißung mit zwangsweiser Nahtbegrenzung, die jedoch nur bei nahezu senkrechter Anordnung der zu verbindenden Werkstücke durchgeführt werden kann. Besondere Vorteile sind:

1. Möglichkeit der Verschweißung großer sowie unterschiedlicher Blechdicken in einer Lage.
2. Einfache Nahtvorbereitung mit parallelem Spalt.
3. Sehr geringe Quer- und Winkelschrumpfung.
4. Hohe Schweißgeschwindigkeit bei gleichbleibend guter Qualität der Naht.
5. Relativ niedriger Verbrauch an elektrischer Energie und an Schweißpulver.
6. Hohe Abschmelzleistung je Elektrode.
7. Die Möglichkeit, Stähle mit höherem Kohlenstoffgehalt sowie legierte Stähle ohne Vorbehandlung zu verschweißen.

Als Nachteile wären zu erwähnen, daß das Verfahren nur bei annähernd vertikalen Schweißverbindungen anzuwenden ist, und daß ein einmal begonnener Schweißvorgang nicht unterbrochen werden kann.

1.2. Thermische und metallurgische Vorgänge

Wird die chemische Zusammensetzung der Schweiße als konstant vorausgesetzt, so bestimmen die Kristallisationsbedingungen das Gefüge und damit auch die Eigenschaften der Schweißnaht.

1.2.1. Primärkristallisation

Im Gegensatz zum Lichtbogen (4000°C) braucht das Schlackebad (1600°C) eine lange Zeit, um im Grundwerkstoff einen genügenden Einbrand zu erzielen. Die

Abkühlung der einzelnen Werkstoffteilchen erfolgt ebenfalls langsam. Ursache dafür ist das große Volumen und damit der große Wärmehalt des Schmelzbades bei verhältnismäßig geringer Wärmeabfuhr. Die Schweißstelle wird also lange Zeit auf hoher Temperatur gehalten.

Auf diese Weise entsteht eine breite Übergangszone. Mit der Übergangszone werden auch deren einzelne Gefügeschichten breiter. Unerwünscht ist dieser Umstand an der Grenze zwischen Grundwerkstoff und Schweiße, wo sich infolge von Überhitzung eine grobkristalline Schicht bildet, die zudem noch zur Aufhärtung neigt.

Die Makrostruktur der Schweißnaht bildet sich bei der Erstarrung des Metallbades (Primärkristallisation). Das Gefüge der Schweiße ist grobkörnig, lediglich an der durch die Kupferbacken unterkühlten Oberfläche der Schweißnaht hat sich eine dünne Schicht kleiner Kristalle ausbilden können. In Abb. 2a ist zu erkennen, daß die groben Kristalle konzentrisch um die Mitte der Schweißnaht, wo sich die Elektrode und somit das Wärmezentrum befindet, angeordnet sind. Wie später dargelegt wird, sind es die Achsen von Dendriten (Stengelkristallen), die diese kreisförmige Orientierung der Kristalle deutlich machen. In Abb. 2b sind im Gegensatz zu Abb. 2a die Dendriten im Gefüge der Schweißnaht klar zu sehen.

Die Entstehung des dendritischen Gefüges wird durch die bereits erwähnte langsame Erstarrung der Schweiße und das große Volumen des Schmelzbades begünstigt.

Von der Erstarrungsfront, zwischen fester und flüssiger Phase der Schweiße, wachsen von Kristallisationskeimen ausgehend, Kristalle in die Schmelze hinein. Diejenigen Kristalle, bei denen die Richtung größter Kristallisationsgeschwindigkeit zufällig mit der Richtung des Wärmegefälles übereinstimmt, können sich schnell und ungehindert ausdehnen und zu Dendriten anwachsen. Das Wachstum anderer Kristalle wird unterdrückt.

Die Richtung des Wärmegefälles bestimmt also die Orientierung der Dendriten, welche stets zum Wärmezentrum (Elektroden spitze) hinwachsen.

Ist das Schweißbad im Verhältnis zu seiner Breite sehr tief, überwiegt die Wärmeabfuhr nach den Seiten. Somit wachsen die Dendriten von den Wänden ausgehend in der Mitte stumpf zusammen. Mit zunehmender Breite des Schweißbades verlagert sich die Wärmeabfuhr von den Seiten zum Boden hin. Es entsteht eine konkave Erstarrungsfront (siehe Abb. 2b), von welcher jetzt die Dendriten senkrecht in die Schmelze wachsen. Die Dendriten stoßen dadurch unter einem stumpfen Winkel in der Nahtachse zusammen und verzahnen sich ineinander. Die Stoßstellen bilden die Mittelrippe, in der sich alle niedrig schmelzenden Elemente sammeln und erstarren. Über die Ausbildung der Mittelrippe gibt der Formfaktor f Aufschluß. Er ist definiert:

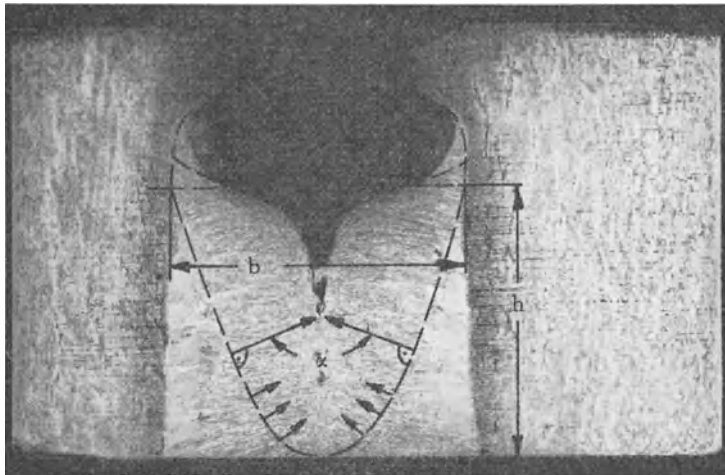
$$\text{Formfaktor } f = \frac{\text{max. Badbreite } b}{\text{max. Badtiefe } h}$$

Aus den vorausgegangenen Ausführungen ist zu erkennen, daß er im wesentlichen von den Einflußgrößen: Spannung, Strom und Drahtvorschubgeschwindigkeit



2a Querschliff

Die groben Kristalle sind konzentrisch zur Nahtmitte, wo sich die Elektrode und somit das Wärmezentrum befindet, angeordnet



2b Längsschliff

Die Dendriten stoßen in der Nahtmitte unter einem stumpfen Winkel zusammen; die dadurch mögliche Verzahnung der groben Kristalle verhindert die Entstehung einer schwachen Zone; die gestrichelte Linie deutet die Erstarrungsfront des Metallbades an

Abb. 2a und b Typische beim ESS-Verfahren auftretende Makrostruktur der Schweißnaht

abhängig ist. Ist der Formfaktor bedeutend kleiner als 1, d. h. $\alpha \leq 180^\circ$ (vgl. Abb. 2b), bilden die Stoßstellen der Kristalle eine schwache Mittelrippe. Sie hat verhältnismäßig schlechte Gütewerte und setzt die Qualität der Schweißnaht herab. Mit einem Formfaktor $f > 1$ erreicht man eine günstige Kristallisationsrichtung. Eine gute Verzahnung der Kristalle und damit gute technologische Eigenschaften werden bei einem Winkel von $\alpha < 127^\circ$ erzielt.

Führt das langsame Abkühlen der Schmelze auf der einen Seite zu Grobkornbildung mit all ihren Nachteilen und ist deshalb ungünstig, so haben andererseits Verunreinigungen genügend Zeit sich aus der Schmelze auszuscheiden.

Dieser Vorgang wird durch die vertikale Lage des Schmelzbades – Gasblasen können ungehindert entweichen – und durch die wirbelförmige Bewegung des Schlackebades – Verunreinigungen werden ständig von der Oberfläche des Metallbades fortgespült – unterstützt (siehe Abb. 3). Weiterhin schützt das

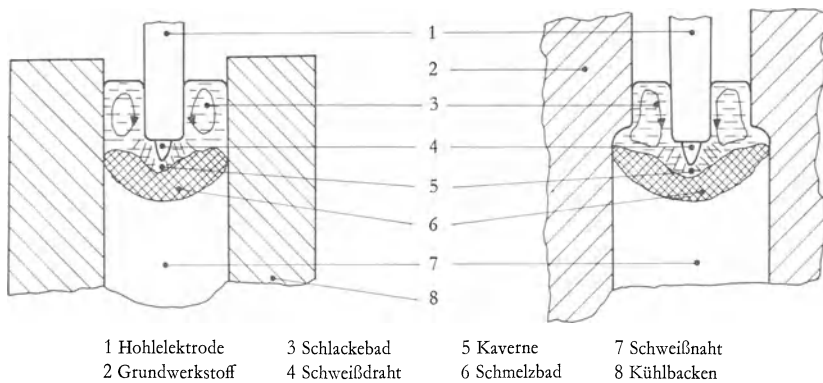


Abb. 3

Schlackebad die Schweiße vor schädlichen Einwirkungen der Atmosphäre. Auf Verunreinigungen zurückzuführende Fehler in der Schweißnaht sind deshalb höchst selten.

1.2.2. Sekundärkristallisation

Die Mikrostruktur bildet sich erst nach den Phasenumwandlungen der schon erstarrten Schweiße voll aus (Sekundärkristallisation).

Die langsame Abkühlung der Schweißnaht – bedingt durch dieselben Ursachen, die ein langsames Erstarren der Schweiße bewirken – ermöglicht die Entstehung von Perlit. Weiterhin wird das Anwachsen von Ferriteinfassungen an den Korngrenzen begünstigt.

Schweißnaht und Übergangzone haben bei unlegierten Stählen vielfach Widmannstättengefüge. Dieses grobnadelige, spröde und deshalb unbeliebte Gefüge tritt an Stellen mit etwas schnellerer Abkühlung aus dem γ -Gebiet auf, da in diesem Fall der eutektoide Zerfall der γ -Mischkristalle unterdrückt wird.

Es ist klar, daß sich am Anfang der Schweißnaht das typische ESS-Gefüge noch nicht einstellt. Durch das anfangs noch kleine Schmelzbadvolumen (geringer Wärmeinhalt) und die andererseits große Wärmeabfuhr an die noch kalten Werkstücke, tritt bei Schweißbeginn eine schnelle Abkühlung der Schweißstelle ein. Das Gefüge ist dementsprechend feinkörnig.

Eine Gefügeverbesserung kann in den meisten Fällen durch eine thermische Nachbehandlung – Normalisieren oder Vergüten – erreicht werden. Man erhält hierdurch ein feinkörniges Gefüge in der Schweiß- und Übergangszone. Eine weitere Möglichkeit der Gefügeverbesserung besteht darin, daß dem Schmelzbad Zusätze beigegeben werden. Diese Zusätze, meist Titan, Vanadium oder Aluminium, wirken als Keimbildner. Es entstehen viele Kristalle, die sich gegenseitig im Wachstum hindern. Auf diese Weise wird die Bildung von großen Dendriten unterbunden.

1.3. Einbrand

Der Einbrand ist ein wesentliches Merkmal bei Schweißverbindungen. Bei der Elektro-Schlacke-Schweißung hängt er von mehreren Faktoren ab. B. E. PATON hat die Einbrandtiefe als Funktion von bestimmten Einflußgrößen graphisch dargestellt (siehe Abb. 4). Danach nimmt der Einbrand bei sonst konstanten Bedingungen mit Erhöhung der Schweißspannung U und der Spaltbreite S zu. Bei Erhöhung der Schlackebadtiefe T_b , der freien Elektrodenlänge L_e (Abstand zwischen Düse und der Oberfläche des Schlackebades), der Pendelgeschwindigkeit

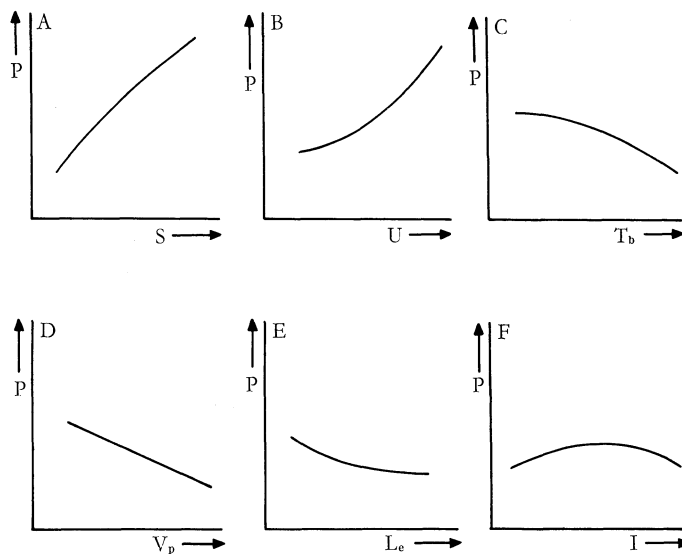


Abb. 4 Einfluß der Schweißfaktoren auf den Einbrand beim Elektro-Schlacke-Schweißen

keit V_p (nur bei dickeren Blechen) und der Stromstärke I nimmt dagegen der Einbrand ab.

Mit zunehmender Schweißstromstärke wird auf Grund der größeren Wärmeentwicklung der Einbrand vorerst größer.

Eine weitere Erhöhung führt jedoch dazu, daß die Elektrode sehr schnell abschmilzt, sich eine große Schweißgeschwindigkeit einstellt und dadurch dem Schlackebad zu wenig Zeit bleibt, die Kanten über ein bestimmtes Maß hinaus aufzuschmelzen. Der Einbrand strebt also einem Maximalwert zu und nimmt bei weiterer Erhöhung der Stromstärke wieder ab.

Bei dickeren Blechen läßt man, um quer zur Naht einen gleichmäßigen Einbrand zu erzielen, die Elektrode pendeln oder benutzt mehrere nebeneinander angeordnete Elektroden gleichzeitig. Besonders dicke Bleche werden mit mehreren pendelnden Elektroden oder mit Plattenelektroden verschweißt.

1.4. Stromquellen

Als Stromart ist Gleich-, Wechsel- und Drehstrom möglich. In der UdSSR wird jedoch hauptsächlich mit Wechselstrom geschweißt. Hierfür werden vor allem harte Transformatoren mit besonders flacher äußerer Kennlinie benutzt. Das Schweißen mit Gleichstrom hat den Vorteil eines kürzeren Anlaufstückes, da sich der Vorgang schneller stabilisieren kann.

2. Versuchseinrichtung

Die im Rahmen dieser Arbeit notwendigen Schweißversuche wurden mit einem Vertikal-Schweißautomaten Typ Arcos Vertomatic G durchgeführt.

Die zu verschweißenden Teile werden an zwei senkrechten Führungsschienen aufgespannt und mit Hilfe von zwei Exzentrern entsprechend der Schweißrichtung ausgerichtet. Abb. 5b zeigt eine aufgespannte Schweißprobe, bei der die vordere Kupferbacke für die Nahtformung und Kühlung noch nicht montiert ist.

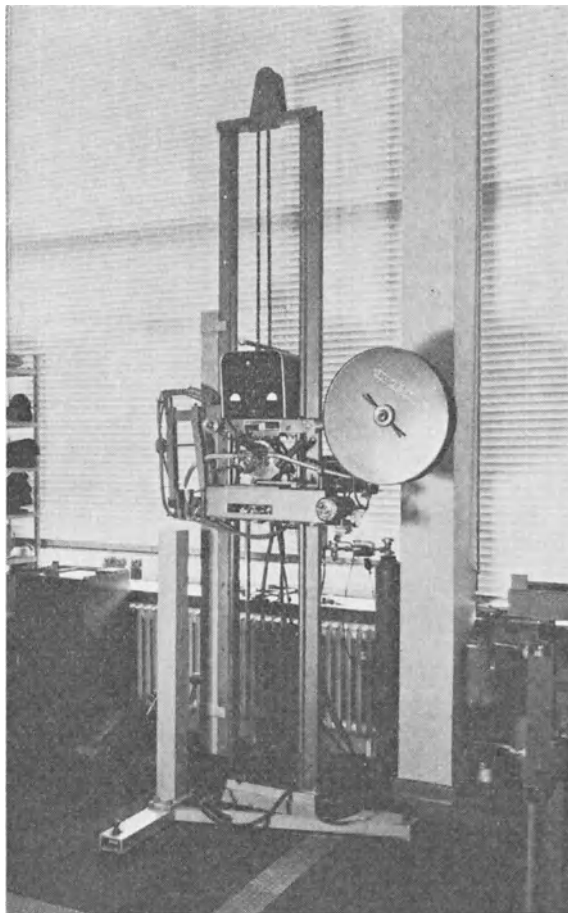


Abb. 5a Der verwendete Schweißautomat

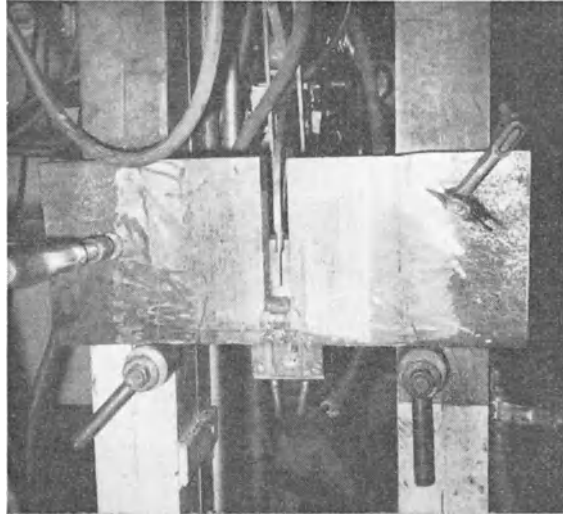


Abb. 5b Die aufgespannte Schweißprobe

Der in Abb. 5a gezeigte Schweißautomat besteht im wesentlichen aus:

1. dem Laufwerk für die vertikale Bewegung des Schweißautomaten;
2. der Vorschubeinrichtung für den Schweißdraht;
3. dem Pendelmotor zur Pendelung des Schweißdrahtes;
4. der nahtformenden Einrichtung, den wassergekühlten Kupferbacken.

Als Stromart wird bei den nachfolgenden Versuchen Gleichstrom verwendet, da in Vorversuchen festgestellt werden konnte, daß dabei das Anlaufstück der Schweißnaht mit den bekannten Fehlern kürzer ist, als es bei der Verwendung von Wechselstrom der Fall ist.

Als Stromquellen bei der Versuchsdurchführung dienten zwei Gleichrichter der Fa. Linde-Miller, Typ RHLA 444, die bei den größeren Blechdicken parallel geschaltet werden konnten.

Leerlaufspannung:	79 V
Regelbereich stufenlos:	100 A/22 V bis 525 A/40 V
Leistung bei 100% ED:	310 A/32 V
70% ED:	370 A/34 V
55% ED:	440 A/36 V
35% ED:	525 A/40 V

Die Schweißgleichrichter hatten die in Abb. 7 gezeigte fallende Charakteristik.