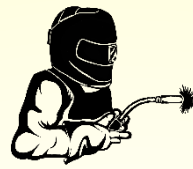




Mit finanzieller Unterstützung
durch das EU-Programm
Erasmus+



MODUL H

Lichtbogenschweißen

Die Art des Lichtbogens



Die Art des Lichtbogens

- Das Lichtbogenschweißen ist eine sehr expandierende Methode zum Schweißen, im Grunde ist es eine elektrische Entladung in Gasen.
- Das Wesentliche beim Schweißen ist die Umwandlung von Elektrizität in Wärmeenergie, es ist eine hohe Stromstärke von bis zu 2000 A erforderlich, aber die Schweißspannung ist sehr klein, bis zu 50 V.



Die Art des Lichtbogens

- Der Lichtbogen entsteht, vorausgesetzt, die Spannung zwischen der Elektrode und dem Material ist bei ausreichender Stromdichte höher als die Spannung des ionisierenden Gases, und eine anhaltende elektrische Entladung tritt auf, wenn die erzeugte Wärme die Erwärmung des Gases auf die Temperatur gewährleistet, die zur thermischen Ionisierung der Atmosphäre erforderlich ist.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 32.



Die Art des Lichtbogens

- Je nach gewählter Technologie kann die Leistung des Lichtbogens, seine Form oder Temperatur variiert werden.
- Schweißoptionen:
 - a) Metallschweißen (manuelles Schweißen mit beschichteten Elektroden, MOG-Schweißen, Flussmittelschweißen, Schweißen in Schutzatmosphäre MIG / MAG),
 - b) Nicht-Wolfram-Schweißen (WIG-Gasschweißen).

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 32.



Die Art des Lichtbogens

- Physikalische und metallurgische Prozesse laufen im Lichtbogen bei hohen Temperaturen sehr schnell ab und werden beeinflusst durch :
 - a) geometrische Anordnung, Polarität und Elektrodenform,
 - b) chemische Zusammensetzung von Elektroden, Plasma und Umgebungsatmosphäre,
 - c) Wärmeleitfähigkeit des Plasmas, der Elektroden und des Basismaterials.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 32.



Eigenschaften des Lichtbogens

- ▶ Helligkeit des Lichtbogens
- ▶ Bei Kurzschlussspannung ist die Spannung höher als bei konstantem Lichtbogenbrand.
- ▶ Die anfängliche Zündung des Lichtbogens kann erfolgen durch:
 - ▶ Kurzzeitiger Kontakt der Elektrode mit dem Basismaterial und nachfolgende Trennung.
 - ▶ Durch Berühren der Elektrode mit dem Material, wenn der Kurzschlussstrom durch einen hohen Übergangswiderstand an der Elektroden-Material-Grenzfläche verläuft, wird das Ende der Elektrode heiß und nachdem das Material aufgrund der thermischen Emission der Elektronen aus dem Material entfernt wurde, kommt es zu einer Ionisierung der Umgebungsgasumgebung und zu einem Lichtbogen des Lichtbogens. Für den Lichtbogenbogen reicht eine relativ geringe Stromstärke aus.
- ▶ Zwischen der Elektrode und dem geschweißten Material entsteht eine ionisierte Umgebung.
- ▶ Dies ist bei Wechselstrom üblich und bei Gleichstrom erfolgt der Funkenbogenübergang in einer Bogenentladung.



Grundbereiche des Schweißlichtbogens

- Spalte des Bogens
 - Der größte Teil des Lichtbogens hat die Form eines sich leicht erweiternden Kegelstumpfes und ist ein leuchtender Bereich von ionisiertem Gas in Form eines Hochtemperaturplasmas, dessen Maximalwert von einer Reihe von Faktoren abhängt, hauptsächlich von der Gaszusammensetzung, dem relativen Ionisationsgrad, der Dissoziation sowie Strom und Spannungswert.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 33.



Teile des Lichtbogens

Kathode
 Kathodenspitze
 Ionenwolke
 Primärelektronen

Bogensäule
 positive Gasionen

Sekundärelektronen
 räumliche Ladung
 des Elektrons
 Anodenblut

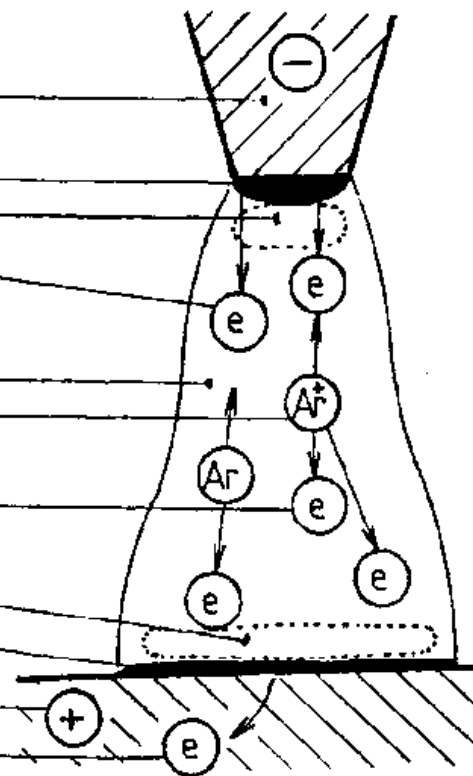
Anode
 Elektronenneutralisationsanode

katoda
 katodová skvrna
 prostorový náboj iontů
 primární elektrony

sloupec oblouku
 kladné ionty plynu (Ar)

sekundární elektrony
 prostorový náboj elektronů
 anodová skvrna

anoda
 neutralizace elektronů



AMBROŽ, O. A KOL. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. s. 75.



Lichtbogen

- Die Bogensäule ist leitend und verursacht Elektronen.
- Diese sind auf thermische Ionisierung zurückzuführen.
- Multiatomische Gasmoleküle werden bei hohen Temperaturen an Atomen gespalten.
- Positive Ionen werden von der Kathode angezogen.
- Elektronen sorgen für einen Stromfluss in der Bogensäule, da ihre Masse geringer ist als die Masse der Ionen, weshalb ihre Abwärtsgeschwindigkeit schneller ist.



Kathodenbereich

- Es besteht aus einem heißen Kathodenpunkt, ein Grenzbereich, der Primärelektronen emittiert, der entweder abhängig von der Geometrie und der Kathodentemperatur relativ stabil ist oder dazu neigt, sich entlang der Oberfläche der Kathode zu bewegen.
- Die Stromdichte im Kathodenfleck beruht auf der Verengung des elektrischen Lichtbogens von 10^4 A/cm^2 bis 10^5 A/cm^2 .
- Positive Ionen, die auf die Kathodenfleckoberfläche treffen, werden neutralisiert. Die ionisierende Energie durchläuft die Kathode.
- Diese Energie hilft dann bei der Thermoemission von Elektronen.
- Unmittelbar am Kathodenfleck tritt die Fläche des kathodischen Tropfens mit einer Dicke von $l_k = 10^{-6} \text{ m}$ bis 10^{-7} m auf.
- Bei diesem Spannungsabfall beträgt $U_k = 10 \text{ V}$ bis 16 V .
- Der Spannungsabfall verursacht eine räumliche Ladung von Ionen, die von der Kathode freigesetzte Elektronen hemmt.



Anodenregion

- Sie besteht aus einem Anodenfleck, der durch auftreffende Elektronen absorbiert (absorbiert) und neutralisiert wird. Ihre kinetische Energie wird in thermische Energie umgewandelt.
- Im Bereich des Anodenspots kommt es zu einer räumlichen Ladung von Elektronen, die bei einer Dicke $l_A = 10^{-5} \text{ m}$ bis 10^{-6} m einen Anodenspannungsabfall von $U_A = 4 \text{ V}$ bis 8 V verursacht.
- Der Spannungsabfall im Anodenbereich bleibt durch Erhöhung des Stroms nahezu unverändert.
- Kritisch ist der Strom, bei dem die Anodenoberflächentemperatur den Siedepunkt des Anodenmaterials erreicht.
- In dem überkritischen Strom führen die Metallpaare der Anode aufgrund des Einsiedens in den Anodenbereich zu einer Verringerung des Ionisierungspotentials des Gasgemisches und zu einer Verringerung des Spannungsabfalls an den Anodenbereichen.

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 34.

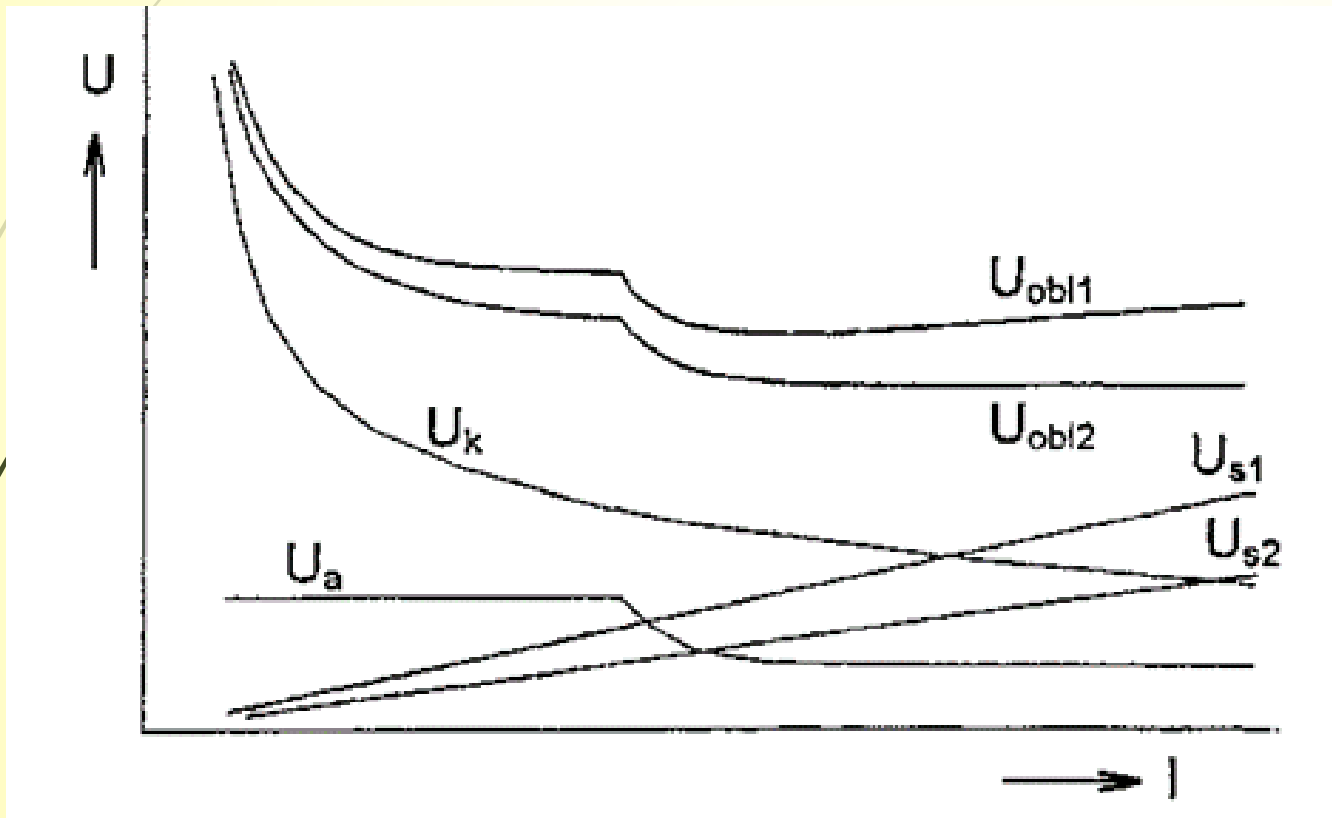


Voltampera Bogencharakteristik

- Die Voltamp-Lichtbogencharakteristik zeigt die Spannungsabhängigkeit des Lichtbogens vom Schweißstrom bei konstanter Lichtbogenlänge.
- Wenn sich die Länge des Lichtbogens ändert, ändert sich auch die Spannung, da die längere Spalte des Lichtbogens in etwa linearer Abhängigkeit einem größeren Spannungsabfall entspricht.
- In seiner eigenen Form, Position und Neigung beeinflussen die chemische Zusammensetzung der Elektrode, die Zusammensetzung des Plasmagases, die Geometrie der Elektrodenspitze und ihr Durchmesser die statischen Eigenschaften des Lichtbogens.
- Die Eigenschaften des voltamperen Lichtbogens variieren für einzelne Schweißtechnologien in Abhängigkeit von den Umgebungsparametern und den Bedingungen, unter denen der Lichtbogen ausgeführt wird.



Voltampere Bogencharakteristik



U_a – Voltampere eigenschaft des Anodenbereichs
 U_k – Voltampere eigenschaft des Kathodenbereichs
 U_{s1}, U_{s2} – Voltampere Lichtbogen-säuleneigenschaften für Länge l_1, l_2
 U_{obl1}, U_{obl2} – Voltampere eigenschaften des gesamten Bogens für Längen l_1, l_2 (Bogenlänge $l_1 >$ Bogenlänge l_2)



Stabilität des Bogens

- Die Stabilität des Schweißprozesses wird als dynamisches Verhalten der gesamten Schweißanlage beurteilt und wird durch die von der Schweißtechnologie abhängige Stabilität des Lichtbogens sowie von den Eigenschaften der Schweißquellen bestimmt.
- Stabilität äußert sich in der Tatsache, dass eine schlechtere Raupe für die Gleichmäßigkeit des Lichtbogenbrennens besser oder schlechter ist.
- Sie hängt hauptsächlich von den Eigenschaften der Schweißquelle ab, von den gewählten Schweißparametern, vom Elektrodentyp oder von der Art des gewählten Schutzgases.

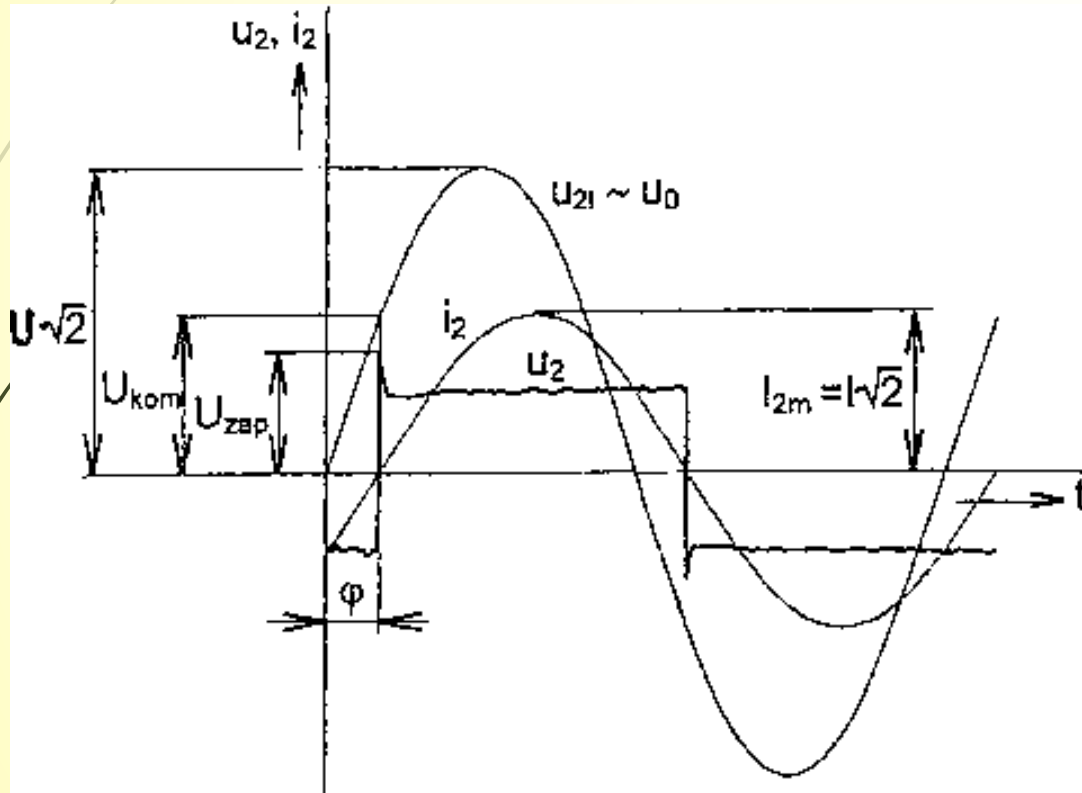


Lichtbogen im Wechselstromkreis

- Allgemein ist es einfacher, die Stabilität der Lichtbogenverbrennung beim Gleichstromschweißen bereitzustellen als bei Wechselstrom.
- Der Wechselstromlichtbogen brennt weniger leise als der Gleichstromlichtbogen, da er erlischt, während die Lichtbogenspannung unter die Ionisierungsspannung fällt und bei einer wesentlich höheren Spannung wieder zündet.
- Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass sowohl die Spannung als auch die Stromstärke ihre Größe und Richtung ändern.
- Um den Lichtbogen erneut zu zünden, muss die Zündspannung erhöht werden.
- Dies kann sichergestellt werden, indem eine Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Spannung erzeugt wird. durch Verbinden der Induktivität mit der elektrischen Schaltung (durch Einfügen der Drossel in die Schaltung der Schweißquelle).



Der zeitliche Verlauf der Lichtbogenspannung beim Wechselstromschweißen



U_2 – Spannungskurve auf dem Bogen;
 I_2 – Wechselstrom durch den Lichtbogen;
 U_{2t} – Quellenspannungstrend;
 U_{zap} – Zündspannung;
 U_{kom} – Kommutierungsspannung;
 p – Phasenverschiebung zwischen Strom und Quellspannung; $U_{kom} > U_{zap}$



Materialübertragung durch den Lichtbogen

- Faktoren, die die Materialübertragung durch einen Lichtbogen beeinflussen :
 - die chemische Zusammensetzung des Metalls der Elektrode,
 - Zusammensetzung der Verpackung, Flussmittel, Schutzgas,
 - die Länge des freien Endes der Elektrode,
 - Vorschub.
- Für die Stabilität des Lichtbogenbrennens ist es erforderlich, das Gleichgewicht zwischen Elektrodenzuführgeschwindigkeit, Schmelzgeschwindigkeit und Metallübertragung zu halten.



Möglichkeiten der Metallübertragung durch Lichtbogen

- Das Lichtbogenschweißen, das mit einer Metallelektrode im Gasschutz erfolgt, erzeugt eine Vielzahl von Möglichkeiten zum Übertragen von Material von der Schmelzelektrode zum Schweißbad, hauptsächlich in Abhängigkeit von Strom, Lichtbogenspannung, Elektrodendurchmesser und Schutzgaszusammensetzung.



Schweißmetalltransferverfahren

- Abhängig von den obigen Aspekten des Schweißens können diese Metalltransferverfahren unterschieden werden :
 - Dusche Übertragung
 - Übertragung ablegen
 - Kurzschlussübertragung



Dusche Übertragung

- Wobei ein relativ langer Lichtbogen charakteristisch ist, eine hohe Stromdichte und eine höhere Lichtbogenspannung ($U_s = 28 \text{ V}$ bis 40 V ; $I_s = 200 \text{ A}$ bis 500 A).
- Flüssiges Metall fließt durch den Lichtbogen als Strom von kleinen Tröpfchen.
- Diese Art der Übertragung tritt hauptsächlich beim Schweißen in argonreichen Schutzgasen auf.
- Ein Metalltropfen wird mit einem Impulsstrom von der Elektrode abgegeben.



Übertragung ablegen

- Es ist charakteristisch für das Schweißen im CO₂-Gasschutz, bei dem Schweißparameter ($U_s = 24$ V bis 28 V, $I_s = 200$ A bis 300 A) und ein kürzerer Lichtbogen zum Schmelzen größerer Metalltröpfchen bei Frequenzen von 5 bis 10 Tropfen pro Sekunde verwendet werden.
- Wenn die Tröpfchengröße mit zunehmendem Strom abnimmt, steigt die Häufigkeit ihrer Trennung.



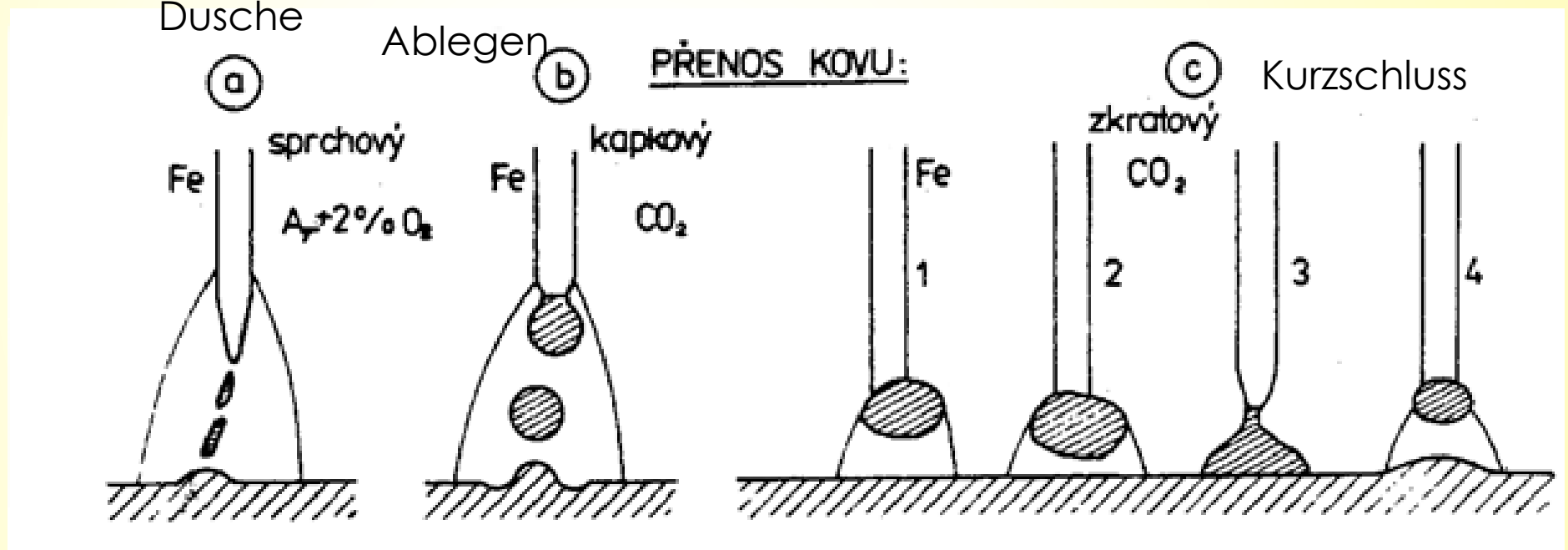
Kurzschlussübertragung

- Bei einem kurzen Lichtbogen, der durch einen regelmäßigen Wechsel zwischen der Lichtbogenphase und der Kurzschlussphase gekennzeichnet ist, in der der Tropfen geschmolzenen Metalls am Ende der Elektrode das Schmelzbad berührt, entsteht ein Kurzschluss und nach einer Unterbrechung der Lichtbogen.
- Die Stromdichte ist mittel bis klein sowie die Lichtbogenspannung ($U_s = 14 \text{ V}$ bis 22 V ; $I_s = 50 \text{ A}$ bis 200 A).



Methoden der Metallübertragung der Elektrode im Lichtbogen

Metallübertragung





Übertragung des Elektrodenmetalls im Lichtbogen

- Beim Überführen des geschmolzenen Elektrodenmaterials in das Schweißbad wird ein komplexes Kraftsystem angewendet.
- Die Größe, Richtung und die resultierenden Kräfte, die die Form, Größe und Frequenz der Metalltropfen der Elektrode beeinflussen, werden durch diese Faktoren bestimmt:
 - technologische Parameter des Schweißens,
 - Strom, Spannung, Stromdichte, Elektrodendurchmesser, Polarität,
 - physikalische Eigenschaften der Metallschmelze,
 - Oberflächenspannung, Viskosität, Schmelzpunkt, Siedepunkt,
 - Eigenschaften von Schutzgas,
 - Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, chemische Wechselwirkungen.



Auswirkungen eines Lichtbogens

- Wärmeeffekte des Bogens
- Mechanische Effekte des Bogens



Wärmeeffekte des Bogens

- Der Lichtbogen ist eine intensive Wärmequelle und hat sehr günstige Eigenschaften beim Heißschweißen.
- Der thermische Effekt des Lichtbogens konzentriert sich auf eine relativ kleine Fläche und die Energieübertragungseffizienz des geschweißten Materials ist gut.
- Mittels Schweißparametern kann die Schweißverbindung durch die thermischen und mechanischen Einwirkungen des Lichtbogens hinsichtlich seiner Geometrie (Breite und Eindringtiefe, Breite des Wärmeeinflussbereichs) sowie der Spannung und Dehnung im Schweißgut beeinflusst werden.



Wärmeeffekte des Bogens

- Die in den einzelnen Lichtbogenbereichen erzeugte Wärmemenge ist im Allgemeinen proportional zu dem entsprechenden Spannungsabfall und Stromeffekt (z. B. an der Anode $Q_a = U_a I$).
- Die meiste Wärme entwickelt sich daher im Anodenbereich (wo die kinetische Energie der einfallenden Ladungsträger - Elektronen in Wärme umgewandelt werden), weniger im Kathodenbereich (die Kathode wird durch Thermoemission von Elektronen gekühlt) und zumindest in der Bogensäule.
- Die Anodentemperatur ist 200 °C bis 500 °C höher als die Kathodentemperatur.



Wärmeeffekte des Bogens

- Die Temperatur des Lichtbogens und der Metallschmelze der Elektrode und des Basismaterials gehören zu den wichtigsten Faktoren, die die physikalischen, chemischen und metallurgischen Eigenschaften des Schweißprozesses bestimmen.
- Die Temperatur hängt von dem Dissoziationsgrad und der Ionisierung des Gases im Lichtbogen ab, der Löslichkeit der Gase im Metall, dem Schmelzen der Elektrode und der Übertragung des Metalls durch den Lichtbogen.
- Die Strömungsrichtung des Plasmas und die Wärmeübertragung zwischen Plasma und Schmelzbad haben einen entscheidenden Einfluss auf den Wärmehaushalt des Lichtbogens.
- Die Temperatur in der Lichtbogensäule hängt neben dem thermischen Eintrag von der Wärmeleitfähigkeit des Gases ab, in dem sich der Lichtbogen befindet, und desto höher ist die Wärmeabgabe Dadurch wird die Wärmeleitfähigkeit der Umgebung reduziert.



Wärmeeffekte des Bogens

- Von den beim Schweißen üblicherweise angetroffenen Gasen, dem thermisch weniger leitfähigen Argon, ist Kohlendioxid das förderlichste.
- Bei gleichem Wärmeeintrag und gleicher Länge liegen daher der größte Säulendurchmesser und die höchste Lichtbogentemperatur in Argon, der kleinste Säulendurchmesser und die niedrigste Temperatur in Kohlendioxid.
- Die maximalen Lichtbogentemperaturen liegen in der Mitte und nehmen zum Rand hin ab.



Wärmeeffekte des Bogens

- Beim Schweißen mit einer beschichteten Elektrode liegt die Lichtbogentemperatur zwischen $4200\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $6400\text{ }^{\circ}\text{C}$, beim Schweißen unter einem Fluss von $6200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $7800\text{ }^{\circ}\text{C}$, in einer WIG-Schutzatmosphäre von $6500\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $9000\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die MIG / MAG-Schweißtemperaturen liegen zwischen $8000\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $15000\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Wärmeeffekte des Bogens

- Beim Schweißen der Schmelzelektrode ist der thermische Wirkungsgrad des Prozesses immer höher als beim WIG-Verfahren, da die an der Elektrode erzeugte Wärme nicht verloren geht, sie wird verwendet, um das Zusatzmaterial, das in Form von Tropfen in das Schweißgut gelangt, zu schmelzen.



Mechanismen, die an der Übertragung von Lichtbogen-Energie in Schweißgut beteiligt sind

- direkte Wärmezufuhr auf dem Basismaterial,
- Wärmeübertragung durch den Fluss des heißen Plasmas und Absorption eines Teils der Bogenstrahlungsenergie,
- Wärmeübertragung von der Elektrode zum Schweißbad durch Metalltropfen,
- die Wärme, die durch Umwandlung der kinetischen Energie fallender Metalltröpfchen entsteht.



Mechanische Auswirkungen des Bogens

- Die mechanischen Wirkungen des Lichtbogens haben eine erhebliche Auswirkung auf das Schmelzbad und lassen somit die Annahme einer tiefen Naht zu.
- Die wichtigsten Einflüsse sind :
 - Die Kraft des Plasmastroms des Lichtbogenbogens, der einen Druck bildet, der senkrecht zur Oberfläche des Schweißbades ist, drückt sein Zentrum zusammen und trägt zur Vergrößerung des Verhältnisses von Tiefe und Breite des Schweißwulstes bei (der höchste Druck wird beim Schweißen in CO₂ erreicht, der niedrigste in He),
 - kinetische Energie von Tröpfchen aus geschmolzenem Zusatzmaterial, die durch den Plasmastrom übertragen und beschleunigt werden,
 - der reaktive Dampfdruck entweicht aus dem aktiven Bereich der heißen Schmelze und der Metaldampfdruck von der überhitzten Elektrodenoberfläche.
- Der Fluss des geschmolzenen Metalls im Schweißbad ist weiterhin auf die elektromagnetischen Kräfte zurückzuführen, die durch den durch das Schmelzbad fließenden elektrischen Strom, die Kraft der Oberflächenspannung und die mit der unterschiedlichen Dichte des geschmolzenen Metalls verbundene Auftriebskraft verursacht werden.



Einfluss von Magnetfeldern auf den Lichtbogen

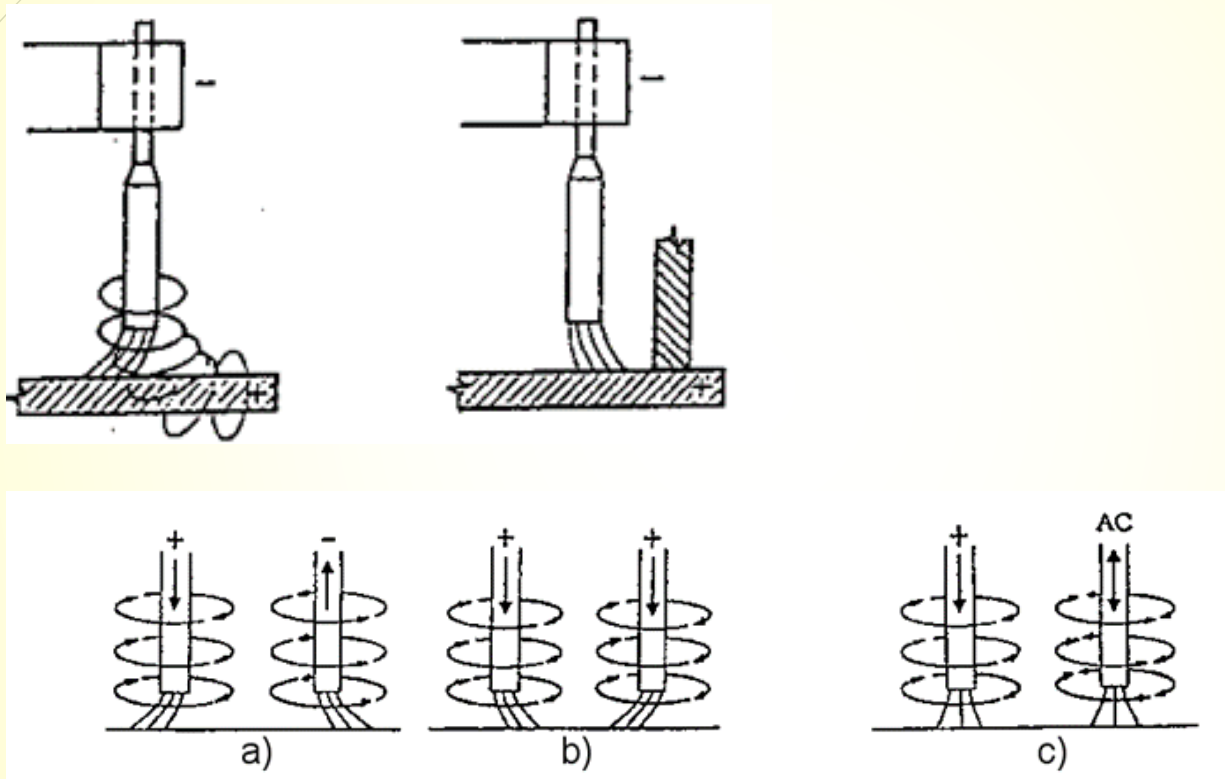
- Um jeden Stromleiter und damit einen Lichtbogen, durch den der elektrische Strom fließt, entsteht ein Magnetfeld, das sich durch seine Kraftwirkungen insbesondere im Bereich des Lichtbogens äußert.



Den Bogen durchbrennen

- Aufgrund der geringen Steifigkeit des Lichtbogens als gasförmiger und sehr flexibler Stromleiter können sie geringe Magnetfeldkräfte haben, was zu einer Ablenkung des Lichtbogens von der Achse der Elektrode in einem Bereich führt, der die Bildung der Schweißnaht nachteilig beeinflusst.
- Die Folge ist eine unansehnliche und minderwertige Schweißnaht.
- Dieses Phänomen wird als Bogenblasen bezeichnet. Ursache ist sowohl das um jeden Stromleiter erzeugte Magnetfeld als auch die ungleichmäßige Verteilung des Stroms im geschweißten Objekt und der Bruch der geschweißten Struktur. Eine Verringerung der nachteiligen Auswirkungen dieses Phänomens kann erreicht werden, indem die Versorgungsklemme so nahe wie möglich an der Schweißstelle angeordnet wird, wobei die Elektrode gegen die Richtung des Lichtbogens gebogen wird..
- Beim Wechselstromschweißen sind die Probleme beim Blasen des Lichtbogens wesentlich geringer als beim Gleichstrom.

Magnetischer Schlag des Bogens



- Beschreibung :
- a) Wenn dies nicht der Fall ist, schließen Sie das Erdungskabel an,
 - b) beim Schweißen in der Nähe von Rippen,
 - c) an zwei Bögen nebeneinander

KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011. s. 40.



Fragen zum Nachdenken

1. Erläutern Sie die Art des Bogens und seine Bedingungen.
2. Wie kann der Bogen gebogen werden?
3. Beschreiben Sie die grundlegenden Teile des Lichtbogens.
4. Wie beurteilen wir die Stabilität des Lichtbogens?
5. Beschreiben Sie die Arten der Metallübertragung durch Lichtbogen.
6. Welche Kräfte wirken wie auf die durch den Lichtbogen übertragenen Tropfen geschmolzenen Metalls?
7. Welche Faktoren beeinflussen die Richtung der elektromagnetischen Kraft im Lichtbogen?
8. Wie werden die Wärmeeffekte des Lichtbogens dargestellt?
9. Beschreiben Sie die mechanischen Auswirkungen des Bogens.
10. Was ist "weht der Bogen" und was verursacht das?



Empfohlene Literatur und Informationsquellen

- AMBROŽ, O. A KOL. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- KUBÍČEK, J. DANĚK, L. KANDUS, B. Technologie svařování a zařízení. Učební texty pro kurzy svařovacích inženýrů a technologů. Plzeň: ŠKODA WELDING, s. r. o., 2011, 242 s.