

Title	Zu den Faktoren Welche die Adhasion Lichtbogengespritzter Schichten Beeinflussen(Welding Physics, Process & Instrument)
Author(s)	Arata, Yoshiaki; Ohmori, Akira; Kawase, Ryoichi
Citation	Transactions of JWRI. 13(2) p.193-p.199
Issue Date	1984-12
oaire:version	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/12589
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

Zu den Faktoren Welche die Adhäsion Lichtbogengespritzter Schichten Beeinflussen[†]

Yoshiaki ARATA*, Akira OHMORI** und Ryoichi KAWASE***

Auszug

Die Adhäsionskraft lichtbogengespritzter Schichten (F) wird durch Temperatur, Geschwindigkeit und Partikelgröße des Schmelzmetalles beeinflusst. Die Schmelzmetalltemperaturen werden in zwei Stufen des Flugprozesses ermittelt. Eine von ihnen (T_c) wird in der Adhäsionsstufe mit einem Silikonölkalorimeter und die andere (T_i) in der Schmelzstufe durch die Kalkulation des Wärmeeinganges veranschlagt. Die Schmelzmetallgeschwindigkeit (v) und die Partikelgröße wurden in der Flugstufe in der Luft durch eine Hochgeschwindigkeitskamera gemessen.

(T_c), (T_i), (v) und (D) mit mehreren Drahtvorschubgeschwindigkeiten wurden untersucht, wobei Aluminium und rostfreier Stahl als Spritzmaterial verwendet wurden. Dann wurde der Zusammenhang zwischen den Faktoren, die die Adhäsionskraft der lichtbogengespritzten Schicht beeinflussen, erstellt.

Die so erreichten Schlußfolgerungen werden folgenderweise zusammengefaßt:

- (1) (F), (T_c), (T_i) und (D) variieren entsprechend dem Verhältnis der Vorschubgeschwindigkeit der positiven und negativen Drähte $v_+/(v_+ + v_-)$ und sind auf dem Maximum, wenn $v_+/(v_+ + v_-) = 0.4 - 0.5$.
- (2) (F) wird mit zunehmendem (T_c), (T_i) und (D) größer.
- (3) Es wird angenommen, daß (T_c) der wichtigste Faktor in der Beeinflussung von (F) ist, und daß (T_c) durch das Verhältnis des Drahtvorschubes oder (T_i) oder den Wärmeeingang pro Einheitgewicht (Q_i) kontrolliert werden kann. Deshalb wird (F) maximal unter den Bedingungen, die ein maximales (T_i) und (Q_i) ergeben. Zusätzlich dazu wird (D) ebenfalls maximal.

KEY WORDS: (Arc Spraying) (Adhesion Strength) (Fused Metal Temperature) (Fused Metal Velocity) (Particle Size)

1. Einleitung

Lichtbogenspritzung ist ein Verfahren, bei dem eine Beschichtung geformt wird, indem ein Lichtbogen zwischen zwei Metalldrähten erzeugt wird, die geschmolzen und mittels Preßluft auf die Oberfläche eines Grundmaterialies gespritzt werden. Es wird daher angenommen, daß Temperatur, Geschwindigkeit und Partikelgröße des Schmelzmetalles die Schichteigenschaften beeinflussen werden.^{1)–3)}

Der Prozeß der Lichtbogenspritzung wird in vier Stufen unterteilt, wie in Abb. 1 dargestellt (nämlich Stufe I: Drahtschmelzstufe, Stufe II: Schmelzmetallflugstufe im Lichtbogen, Stufe III: Schmelzmetallflugstufe in der Luft, Stufe IV: Schmelzmetalladhäsionsstufe).⁴⁾

In dieser Studie wurden Temperatur, Geschwindigkeit und Partikelgröße des Schmelzmetalles mit mehreren Drahtvorschubverhältnissen untersucht, wobei Aluminium und Rostfreistahl als Spritzmaterial verwendet wurden. Zusätzlich wurde der Zusammenhang von Faktoren, welche die Adhäsionskraft der Spritzschicht beeinflussen

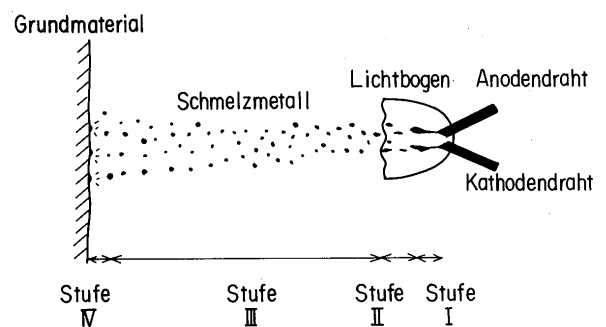


Abb. 1 Lichtbogenspritzprozeß

nachgewiesen.

Die Veranschlagung der Schmelzmetalltemperatur wurde an zwei Stellen vorgenommen; an einem Punkt gerade vor der Adhäsion des Schmelzmetalles auf dem Stahlblech (nämlich Stufe IV) und an einem Punkt gerade nach der Drahtschmelzung (nämlich Stufe I). Die Temperatur im ersteren Fall (im weiteren "T_c" genannt) wurde unter Verwendung eines speziellen Kalorimeters, das

* Professor

** Außerordentlicher Professor

*** Forscher, Hitachi Zosen Corp.

Silikonöl als wärmeabsorbierendes Material benutzt, gemessen. Die Temperatur im letzteren Fall (im weiteren "Ti" genannt) wurde aus den Wärmeeingangsbedingungen veranschlagt.

Die Messung der Schmelzmetallgeschwindigkeit und der Partikelgröße wurde in der Flugstufe in der Luft (nämlich Stufe III) mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera gemacht.

2. Versuchsmethode

2.1 Ausrüstung, Materialien und Bedingungen für das Spritzen

Abbildung 2 zeigt die Lichtbogenspritzausrüstung, die für diesen Versuch verwendet wurde. Diese Spritzausrüstung beinhaltet eine Gleichstromquelle mit konstanten Spannungskennlinien und eine separate Vorschubkontrollleinheit für die positiven und negativen Drähte. Der Lichtbogenstrom und die Lichtbogenspannung wurden unter Verwendung eines Schreiboszillographen gemessen...

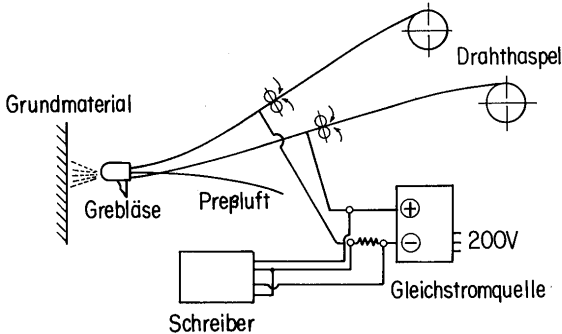


Abb. 2 Schema der Lichtbogenspritzausrüstung

Tabelle 1 zeigt die bei diesem Versuch verwendeten Spritzmaterialien. Für jeden Versuch wurde Draht mit einem Durchmesser von 1.6 mm verwendet.

Tabelle 1 Spritzmaterialien

Material	Zusammensetzung
Aluminium (Al)	Rein Al (mehr als 99.7%)
Rostfreistahl (SUS308)	10~12%Ni, 19~21%Cr

Tabelle 2 zeigt die Lichtbogenspritzbedingungen. Unter Verwendung von Aluminium und Rostfreistahl (SUS 308) als Spritzmaterialien wurde die Vorschubgeschwindigkeit des Kathodendrahtes (v_-) variiert, während die mittlere

Lichtbogenspannung (V_{av}) und die Vorschubgeschwindigkeit des Anodendrahtes (v_+) konstant gehalten wurde.

Tabelle 2 Spritzbedingungen

Spritzbedingung	Spritzmaterial	v_+ (m/min)	v_- (m/min)
A	Al	8	3
B			6
C			8
D			12
E			16
F	SUS 308	6	4
G			6
H			8
I			10
J			12

2.2 Veranschlagung der Schmelzmetalltemperatur⁵⁾

(1) Schmelzmetalltemperatur (T_c) in Stufe IV

Die Wärmemenge des Schmelzmetalles wurde mittels eines Kalorimeters gemessen, und die Schmelzmetalltemperatur (T_c) wurde vom Meßwert veranschlagt.

Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung des zur Messung der Wärmemenge des Schmelzmetalles verwendeten Kalorimeters. Das Kalorimeter besteht aus einem "thermisch isolierten zylindrischen Behälter gefüllt mit Silikonöl, das als Wärmeabsorbionsmaterial dient", einem "Rührer für das Silikonöl", einem "zylindrischen Kupferbecken zum Sammeln des Schmelzmetalles", den "Kupfer-Konstantan-Thermoelementen (α) und (β) zum

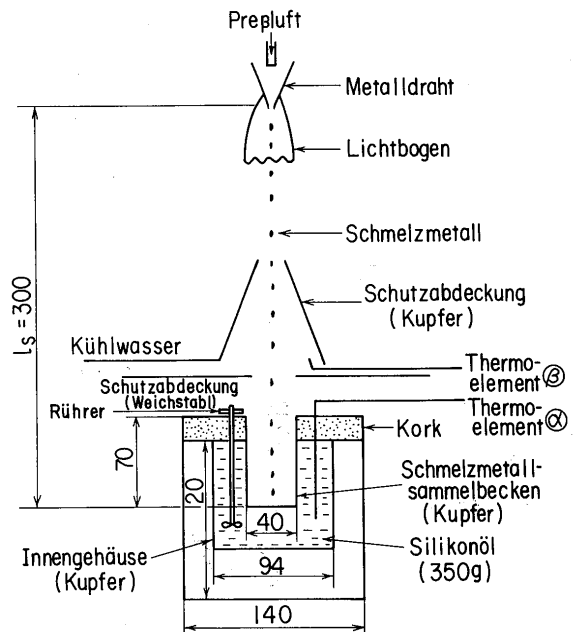


Abb. 3 Schematische Darstellung des Kalorimeters

messen der Temperatur des Silikonöls bzw. der Preßluft" und "wassergühlter konischer Schutzabdeckung und Weichstahlschutzabdeckung."

Das Spritzen wurde senkrecht über dem Kalorimeter während 5 Sekunden ausgeführt, wobei der Spritzabstand (l_s) = 30 cm und der Preßluftdruck (P) = 490 kPa war. Das Schmelzmetall, das durch die zwei Schutzabdeckungen gefallen ist wurde durch das zylindrische Kupferbecken aufgefangen. Die Wärmemenge des Schmelzmetalles wurde durch das Kupferbecken an das Silikonöl übertragen. Die Silikonöltemperatur (T_o) wurde kontinuierlich gemessen, während das Öl ausreichend umgerührt wurde. So wurde die Zunahme der Silikonöltemperatur (ΔT) durch die dem Kalorimeter vom Schmelzmetall (H_c) aufgeführte Wärme erhalten. (H_c) kann ausgedrückt werden als:

$$H_c = J \cdot \Delta T \quad (1)$$

Die Schmelzmetalltemperatur (T_c) wird durch die folgende Gleichung bestimmt.

$$T_c = T_m + [H_c/M - C_1 \cdot (T_m - T_o) - Q_m]/C_2 \quad (2)$$

wenn, J: Die notwendige Wärmemenge ist, um die Temperatur des Silikonöls pro Grad Celsius zu erhöhen ($J/^\circ C$)

T_m : Schmelzpunkt des Spritzmaterials ($^\circ C$)

M: Das Gewicht des aufgefangenen Schmelzmetalles (g)

C_1 : Mittlere spezifische Wärme des Spritzmaterials unter dem Schmelzpunkt ($J/g \cdot ^\circ C$)

C_2 : Mittlere spezifische Wärme des Spritzmaterials über dem Schmelzpunkt ($J/g \cdot ^\circ C$)

Q_m : Latente Wärme des Schmelzungsspritzmaterials (J/g)

(2) Schmelzmetalltemperatur (T_i) in Stufe I

Da die Schmelzmetalltemperatur (T_i) in Stufe I nicht direkt messbar ist, wurde eine Veranschlagung vom Wärmeeingang gemacht. **Abbildung 4** zeigt einen Schmelzungszustand des Drahtes an der Spitze des Spritzgebläses.^{2), 4)}

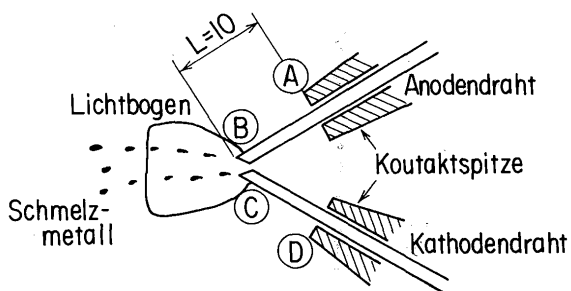


Abb. 4 Schematische Darstellung des Lichtbogenspritzens

Der gesamte Wärmeeingang Q_i (J/g) pro Einheitgewicht, der an Stellen (B) und (C) zugeführt wird, um Anoden- und Kathodendraht zu schmelzen, wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt:⁵⁾

$$Q_i = Q_1 + Q_2 = V_m \cdot I_{av}/M_w + 2R \cdot I_{av}^2/M_w \quad (3)$$

wenn, Q_1 : Der Betrag der durch Anoden- und Kathodendraht erzeugten Wärme ist (J/g)

Q_2 : Joule-Wärme zwischen (A) und (B) sowie (C) und (D) ist (J/g)

V_m : Gleich Schmelzspannung (V)

M_w : Drahtvorschubswert (g/s)

R: Elektrischer Widerstand wegen Drahtausdehnung (Ω)

Die Schmelzmetalltemperatur (T_i) kann mit folgender Gleichung erhalten werden.⁵⁾

$$T_i = T_m + [Q_i - C_1 (T_m - T_r) - Q_m] C_2 \quad (4)$$

wenn, T_r : Drahttemperatur vor dem Spritzen ($^\circ C$)

Tabelle 3 zeigt die physikalischen Eigenschaften des Spritzmaterials (Aluminium und SUS308), das für die Berechnung verwendet wurde.

Tabelle 3 Physikalische Eigenschaften des Spritzmaterials

Spritzmaterial	Al	SUS 308
V_m (V)	11.0	17.25
R (Ω)	1.3×10^{-4}	5.5×10^{-3}
T_m ($^\circ C$)	660	1400
Q_m (J/g)	398	272
T_r ($^\circ C$)	20	20
C_1 (J/g $\cdot^\circ C$)	1.05	0.63
C_2 (J/g $\cdot^\circ C$)	1.13	0.63
ρ (g/cm 3)	2.7	8.0

2.3 Messung der Schmelzmetallgeschwindigkeit und Partikelgröße

Die Schmelzmetallgeschwindigkeit und die Partikelgröße wurden mit einer 16mm-Hochgeschwindigkeitsfilmkamera gemessen. **Abbildung 5** ist eine Darstellung der Filmmethode.

Die durch die Schutzabdeckungen fallenden Schmelzpartikel wurden durch die Hochgeschwindigkeitskamera (mit ca. 7,000 Rahmen/Sekunde) gemessen.

2.4 Messung der Adhäsionskraft der Spritzschicht

Ein Weichstahlblech von $4.5 \times 500 \times 300$ mm wurde von einem festen Spritzabstand auf einem Wage, der sich

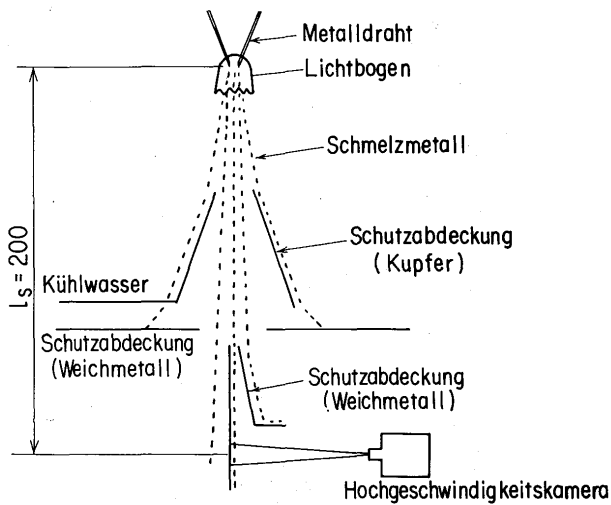


Abb. 5 Methode, mit der Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen des in der Luft fliegenden Schmelzmetalles gemacht wurden (Stufe III)

mit konstanter Geschwindigkeit bewegte, bespritzt. Sie Oberfläche des Weichstahlbleches war geblasen geworden, um ihr eine Rauheit von $50 \mu\text{m} R_z$ zu geben. Das Spritzen wurde vier Stunden nach dem blasen ausgeführt.

Mehrere Stücke von $40 \times 50 \text{ mm}$ wurden aus dem bespritzten Stahlblech ausgeschnitten und dem in Abb. 6 dargestellten Test der Abhäsionskraft unterworfen. Eine runde Zugstange mit einem Durchmesser von 25 mm wurde mit einem Epoxydharzklebstoff auf die Spritzfläche geklebt. Nachdem der Klebstoff getrocknet war, wurde die Spritzschicht entlang des Durchmessers der Stange durchgeschnitten und mit einer Geschwindigkeit von 3 mm/min durch den Spannungstester vom Instron-Typ senkrecht gezogen, bis Probestück und Zugstange sich trennten. Da der Bruch an der Grenze von Spritzschicht und Stahlblech erfolgte, wurde die Bruchkraft als die Adhäsionskraft der Spritzschicht angenommen.

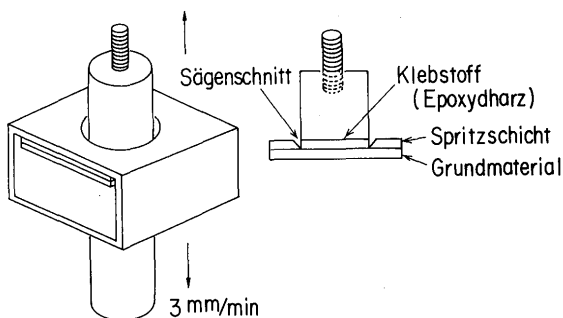


Abb. 6 Adhäsionstestmethode

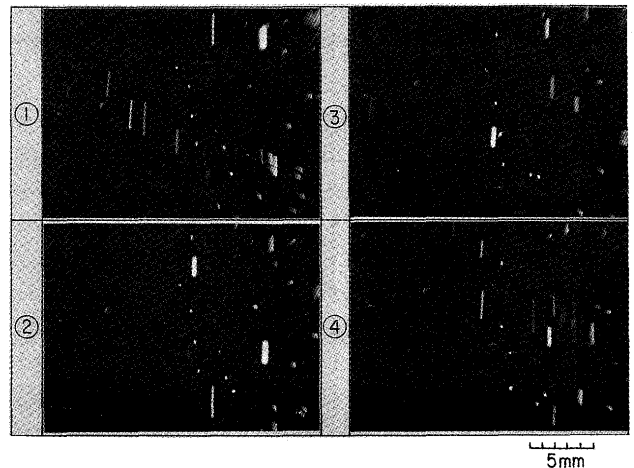


Abb. 7 Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen des in der fliegenden Schmelzmetalles (Stufe III), SUS308, $V_{av} = 30 \text{ V}$, $v_+ = v_- = 6 \text{ m/min}$

3. Versuchsergebnisse und Überlegungen

3.1 Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel von Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen von Schmelzmetallen, die in der Luft fliegen, wobei SUS308 als Spritzmaterial, eine mittlere Lichtbogenspannung (V_{av}) = 30 V sowie Anoden- und Kathodendrahtvorschübe von $(v_+) = (v_-) = 6 \text{ m/min}$ verwendet wurden. In dieser Abbildung repräsentieren die Nummern die (Aufnahme-) Rahmennummern in ihrer korrekten Reihenfolge. Der Abstand zwischen den Rahmen ist etwa $1/7000$ Sekunde. Obschon die Schmelzmetallpartikel fast vollständig kugelförmig sind,^{1), 2)} sind die Formen der Partikel in diesen Aufnahmen verlängert, weil die Partikelgeschwindigkeit zu hoch ist. Die großen Schmelzmetallpartikel sehen heller aus als die kleineren. Die Schmelzmetallgeschwindigkeit und Partikelgröße wurde auf diesen und vielen anderen Aufnahmen wie in Abb. 7 gemessen.

3.2 Drahtvorschubverhältnis und Schmelzmetalltemperatur, -geschwindigkeit und Partikelgröße

Um die Beziehung zwischen Drahtvorschubgeschwindigkeit und Adhäsionskraft (F), der Schmelzmetalltemperatur (T_i) in Stufe I, der Schmelzmetalltemperatur (T_c) in Stufe IV, der Schmelzmetallpartikelgröße (D_{av}), sowie der Schmelzmetallgeschwindigkeit (v_{av}) zu verstehen, wird folgende Erklärung gegeben; mit Aluminiumspritzung als erstes und Rostfreistahl (SUS308) als zweites:

(1) Aluminiumspritzung

Abbildung 8 zeigt die Beziehung zwischen dem Drahtvorschubgeschwindigkeits-Parameter $v_+/(v_+ + v_-)$ und der Adhäsionskraft der Spritzschicht (F), den Schmelzmetalltemperaturen (T_i) und (T_c), dem Durchmesser der

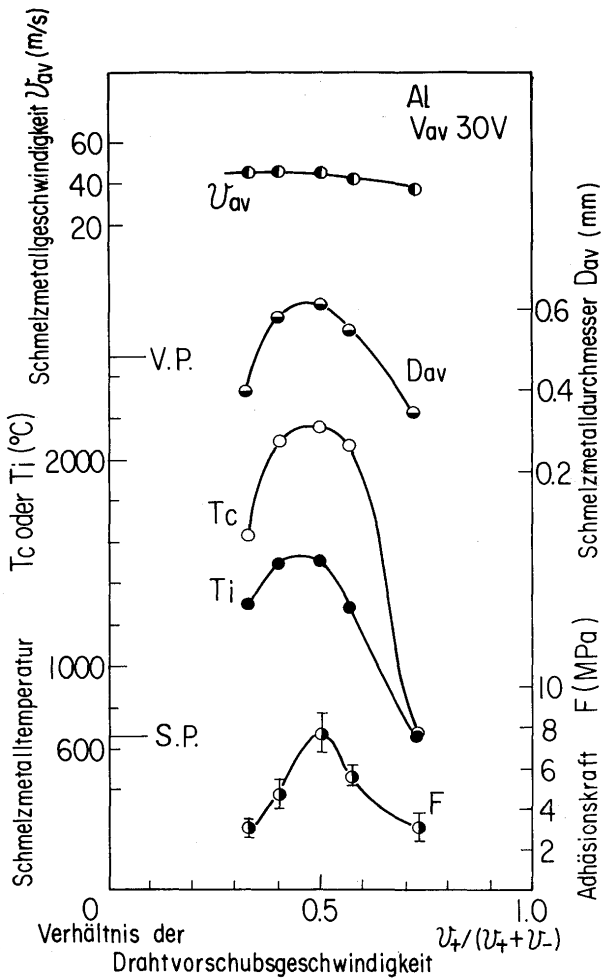


Abb. 8 Drahtvorschubverhältnis und Temperatur, Geschwindigkeit und Durchmesser des Schmelzmetalles (Al)

Schmelzmetallpartikel (D_{av}) sowie der Schmelzmetallgeschwindigkeit (v_{av}). (D_{av}) wurde in der folgenden Fleichung als der mittlere Zauter-Partikeldurchmesser gerechnet.^{6), 7)}

$$D_{av} = \Sigma D_i^3 \cdot N_i / \Sigma D_i^2 \cdot N_i \quad (5)$$

Da die Schmelzmetallgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Größe der Schmelzmetallpartikel variiert, ist (v_{av}) in dieser Abbildung die Schmelzmetallgeschwindigkeit bei mittlerem Zauter-Partikeldurchmesser. Folgendes kann aus dieser Abbildung ersehen werden.

(i) (F), (T_i), (T_c) und (D_{av}) variieren entsprechend dem Verhältnis der Drahtvorschubgeschwindigkeiten $v_+/(v_+ + v_-)$; sie sind auf dem Maximum, wenn $v_+/(v_+ + v_-) = 0.4 - 0.5$ ist. (v_{av}) ist konstant.

(ii) (T_c) und (T_i) variieren zwischen dem Schmelzpunkt (S.P. 660°C) und dem Verdampfungspunkt (V.P. 2500°C). (T_c) wird gewöhnlich größer als (T_i).

Diese Versuchsergebnisse werden nach den Versuchsergebnissen des Spritzens von Rostfreistahl (SUS308)

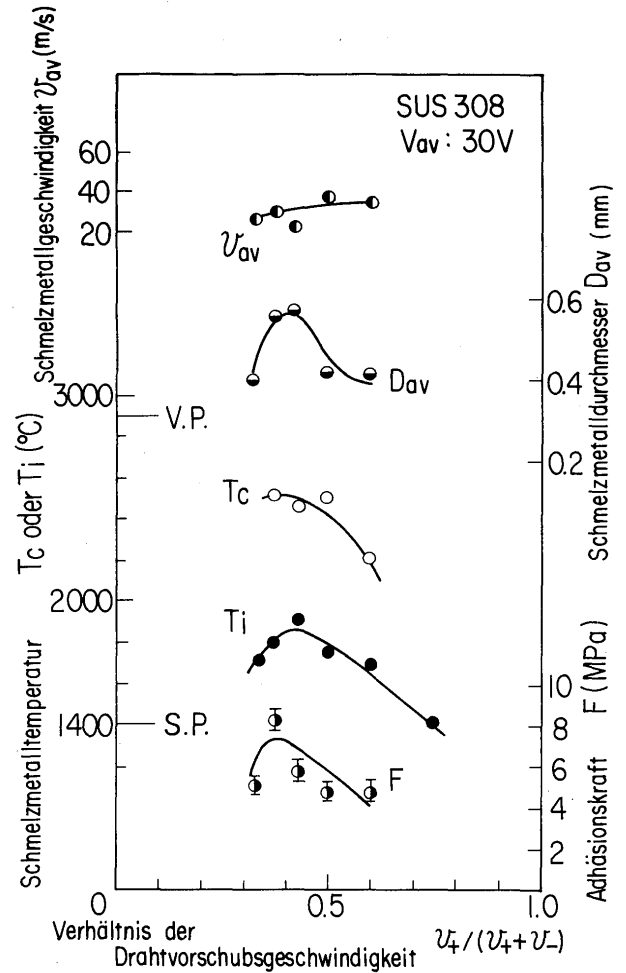


Abb. 9 Drahtvorschubverhältnis und Temperatur, Geschwindigkeit und Durchmesser des Schmelzmetalles (SUS308)

besprochen.

(2) Rostfreistahlspritzung

Abbildung 9 zeigt die Beziehung zwischen dem Drahtvorschubgeschwindigkeits-Parameter $v_+/(v_+ + v_-)$ und der Adhäsionskraft der Spritzschicht (F), den Schmelzmetalltemperaturen (T_i) und (T_c), dem Durchmesser der Schmelzpartikel (D_{av}) sowie der Schmelzmetallgeschwindigkeit (v_{av}). Folgendes kann aus dieser Abbildung ersehen werden:

(i) (F), (T_i), (T_c) und (D_{av}) variieren entsprechend dem Verhältnis der Drahtvorschubgeschwindigkeiten $v_+/(v_+ + v_-)$; sie sind auf dem Maximum, wenn $v_+/(v_+ + v_-) = ca. 0.4$ ist. (v_{av}) ist fast konstant.

(ii) (T_c) und (T_i) variieren zwischen dem Schmelzpunkt (S.P. 1400°C) und dem Verdampfungspunkt (V.P. 2900°C). (T_c) wird gewöhnlich größer als (T_i).

Diese zwei Trends (i) und (ii) sind beim Aluminiumspritzen gleich. Es wird deshalb angenommen, daß die Beziehung zwischen diesen Faktoren bei zwei verschiedenen Spritzmaterialien gleich ist.

3.3 Besprechung der Beziehung zwischen Drahtvorschubverhältnis und Adhäsionskraft, sowie Temperatur, Geschwindigkeit und Partikelgröße des Schmelzmetalles.

Abbildung 10 zeigt den Zusammenhang der Faktoren, die die Adhäsionskraft der Spritzschicht beeinflussen. Die Adhäsionskraft (F) variiert entsprechend dem Verhältnis der Drahtvorschubgeschwindigkeiten. Dieses Verhältnis beeinflusst jedoch (F) nicht direkt. Wenn das Verhältnis der Drahtvorschubgeschwindigkeiten variiert, variiert der Wärmeeingang pro Einheitgewicht (Q_i) oder die Schmelzmetalltemperatur (T_i) in Stufe I (Beziehung "a"), und die Lichtbogenstabilität (α) variiert (Beziehung "b")^{1), 4)}, die Schmelzmetallgeschwindigkeit (v) ist jedoch fast konstant. Wenn (Q_i) oder (T_i) variiert, wird die Schmelzmetalltemperatur (T_c) in Stufe IV beeinflusst (Beziehung "d"). (T_c) war in den Versuchsergebnissen höher als (T_i). Unter Erwägung dieser Tatsache wird angenommen, daß das Schmelzmetall während des Fluges im Hochtemperatur-Lichtbogenplasma erhitzt wird und durch Oxydation Wärme erzeugt.⁵⁾ Wenn (α) variiert, wird veranschlagt, daß der Durchmesser (D) des Schmelzmetallpartikels variiert^{1), 4)} (Beziehung "e"). Die Veränderung von (D) beeinflusst den Betrag der Wärmeabsorption im Lichtbogenplasma und den Betrag der Wärmeabstrahlung in die Luft. (T_c) wird deshalb durch (D) beeinflusst (Beziehung "f"). Es wird angenommen, daß keine Wirkung von "g", "j" und "h" auf (T_c) oder (F) in diesem Fall hat. Schließlich ist der (F) beeinflussende Faktor (T_c). Daher wird gedacht, daß (T_c) der wichtigste Faktor in der Beziehung zwischen (F) und dem Drahtvorschubverhältnis ist. In Abb. 8 und Abb. 9 nimmt (F) mit zunehmendem (T_c) beim Lichtbogenspritzen zu. Mit anderen Worten, (F) und (T_c) können mit dem Drahtvorschubverhältnis oder (Q_i) oder (T_i) kontrolliert werden. (F) wird deshalb maximal, wenn

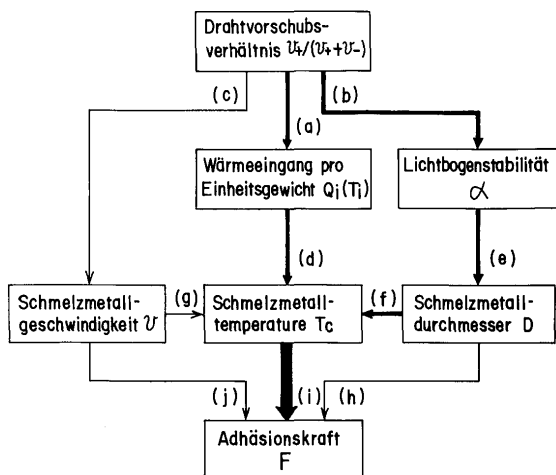


Abb. 10 Zusammenhang der die Adhäsionskraft der Spritzschicht beeinflussenden Faktoren

das Spritzen mit maximalen (T_i)-Bedingungen ausgeführt wird, nämlich mit einem Drahtvorschubverhältnis, das ein maximales (Q_i) ergibt. Zusätzlich wird (D) bei diesem Drahtvorschubverhältnis ebenfalls maximal.

4. Zusammenfassung

In dieser Studie wurden unter Verwendung von Aluminium und Rostfreistahl als Spritzmaterial Temperatur, Geschwindigkeit und Partikelgröße des Schmelzmetalles beim Lichtbogenspritzen mit verschiedenen Drahtvorschubverhältnissen untersucht. Zusätzlich wurden der Zusammenhang der die Adhäsionskraft der Spritzschicht beeinflussenden Faktoren erstellt.

Die Ermittlung der Schmelzmetalltemperatur wurde an zwei Stellen ausgeführt; nämlich an einem Punkt gerade vor dem Anhaften des Schmelzmetalles an einem Stahlblech und an einem Punkt gerade nach der Drahtschmelzung. Die Temperatur (T_c) im ersteren Fall wurde mit einem kugelförmigen Kalorimeter, das Silikonöl als wärmeabsorbierendes Material verwendet, gemessen. Die Temperatur (T_i) im letzteren Fall wurde aus dem Wärmeeingang ermittelt.

Die Messung der Schmelzmetallgeschwindigkeit (v) und der Größe (D) der Schmelzpartikel wurden in Flugstufe in der Luft mit einer Hochgeschwindigkeitsfilmkamera gemacht.

Die so erhaltenen Schlußfolgerungen werden wie folgt zusammengefaßt:

- (1) Die Adhäsionskraft der Spritzschicht (F), (T_c), (T_i) und (D) variieren entsprechend dem Vorschubverhältnis der Anoden- und Kathodendrähte $v_+/(v_+ + v_-)$ und sind auf dem Maximum, wenn $v_+/(v_+ + v_-) = 0.4 - 0.5$ ist.
- (2) (F) nimmt mit zunehmendem (T_c), (T_i) und (D) zu.
- (3) Es wird angenommen, daß (T_c) der wichtigste Faktor in der Beeinflussung von (F) ist, und daß (T_c) durch das Verhältnis der Drahtvorschubgeschwindigkeiten oder (T_i) oder den Wärmeeingang pro Einheitgewicht (Q_i) kontrolliert werden kann. (F) wird deshalb maximal, wenn das Spritzen unter maximalen (T_i)-Bedingungen ausgeführt wird, nämlich mit einem Drahtvorschubverhältnis, bei dem (Q_i) maximal ist. Zusätzlich wird bei dieser Bedingung (D) ebenfalls maximal.

Literatur

- 1) R. Kawase: "Beziehung zwischen Lichtbogenspritzbedingungen und Adhäsionskraft der Spritzschicht" Vierteljährliche Zeitschrift der Japanischen Schweißgesellschaft, Band I (1983), Nr. 2, S. 119 - 124 (in Japanisch).
- 2) R. Kawase: "Beobachtung des Lichtbogenspritzphänomens mittels Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen", Journal der

- Hochtemperatur-Gesellschaft, Bd. 10 (1984), Nr. 4, S. 145 – 151 (in Japanisch).
- 3) H. M. Höhle: Ladenburg, H. D. Steffens und J. Weckowiak, Dortmund: 10. Internationale Thermospritzkonferenz (1983), S. 148 – 152.
 - 4) R. Kawase: "Lichtbogenphänomen und Drahtschmelzung beim Lichtbogenspritzen", Vierteljährliches Journal der Japanischen Schweißgesellschaft, Bd. 2 (1984), Nr. 2, S. 280 – 285 (in Japanisch).
 - 5) R. Kawase: "Schmelzmetalltemperatur beim Lichtbogenspritz-
 - en", Vierteljährliches Journal der Japanischen Schweißgesellschaft, Bd. 2 (1984) Nr. 3, S. 412 – 418 (in Japanisch).
 - 6) T. Kurebayashi: "Atomisierung von Flüssigkeiten mittels einer Rotationsdüse", Vereinsbericht der Japanischen Gesellschaft Mechanik-Ingenieure, Bd. 25 (1959), Nr. 160, S. 1259 – 1275 (in Japanisch).
 - 7) T. Sakai und M. Yamada: "Auswirkungen von Zusätzen auf die Atomisierungscharakteristiken von Resttreiböl" Journal der Chemischen Gesellschaft Japans, Bd. 65 (1962), Nr. 11, S. 1761 – 1766 (in Japanisch).