参考文献

- 1) 村田, 加藤, 田村: 応力緩和におよぼす変態膨張と変態超塑性の割合—変態超塑性による応力緩和(第1報)—, 溶接学会論文集, vol. 8-2 (1990), 249
- 2) 佐藤, 上田, 藤本: 溶接変形・残留応力, 86-99, (産報)
- 3) 田村, 加藤ほか: 鋳鉄のエレクトロスラグ溶接(第3報)—変態と超塑性を利用した溶接割れ防止に関する一考察—, 溶接学会誌, 43-8 (1974), 44
- 4) 小林, 西川, 加藤: 鋼の熱収縮応力に対する相変態及び拘束の影響について, 講概27集 (1980)
- 5) 加藤, 石川, 田村, 村田: 硬化肉盛溶接の割れ防止, 講概43集 (1988), 254
- 6) C. Y. Kung, J. J. Rayman: Metal. Trans. A, 13 A, 2 (1982), 328
- 7) F. W. Chinard, O. D. Sherby: Acta Met., 12 (1964), 911
- 8) F. E. Underwood: J. Metals, 14 (1962), 914
- 9) M. De Jong, G. W. Rathenau: Acta Met., 7 (1959), 246
- 10) G. W. Greenwood, R. H. Jonson: Proc. Roy. Soc. 283 A (1965), 403
- 11) 加藤: 内部応力による超塑性現象(1)超塑性研究会会報(1984), 111
- 12) 加藤, 田村, 荒田: 内部応力による超塑性現象(2)超塑性研究会会報(1984), 120
- 13) 加藤, 田村ほか: 変態超塑性による応力緩和が鋳鉄の溶接割れにおよぼす影響, 溶接学会誌, 47-12 (1978), 35
- 14) 加藤, 小林ほか: 溶接角変形と超塑性の関連についての一考察講概17集(1975), 118
- 15) 田村, 加藤, 佐野: 変態超塑性現象の基礎的研究, 講概15集 (1974), 60
- 16) 加藤, 田村, 沢村: 不均一膨張による超塑性現象講概21集(1977), 14
- 17) 田村, 加藤, 石川: 溶接部の塑性変形を考慮したCCT線図, 講概21集(1977), 16
- 18) 田村, 加藤: 再加熱された再現溶接熱影響部の高温延性におよぼす引張速度の影響, 溶接学会誌, 41-10 (1972), 21

引張り型ピンテストによるプラズマ溶射皮膜の界面強度評価法*

—応力特異場の大きさに着目した皮膜—素材接合界面強度評価法の提案(第1報)—

井上好章**, 小野豊明***, 納富 啓**, 出羽昭夫****, 豊田政男*****, 塚本光夫*****

Adhesive Strength Evaluation of Plasma Sprayed Coatings by Tensile Pin Test*

—Applicability of Stress Singularity Parameter for Evaluating Adhesive Strength of Coating Film (Phase I)—

by Yoshiaki Inoue**, Toyooki Ono***, Akira Noutomi**, Akio Izuha****, Masao Toyoda***** and Mitsuo Tsukamoto*****

Selecting the tensile pin test from among the test procedures for evaluating the adhesive strength of sprayed coatings, the authors devised an adhesive strength evaluation technique.

The results obtained are summarized as follows;

- 1) The fracture net stress (σ_{net})_{cr} obtained by the pin test is influenced by the coating thickness and pin diameter, and thus does not necessarily use as an index of the adhesive strength.
- 2) In the vicinity of the coating edge of the pin test, the stress σ_y in load direction is inversely proportional to the square root of the distance x from the coating edge to the center of pin.

This stress singularity is expressed as follows;

$$\sigma_y = \frac{\kappa}{\sqrt{x}} = \frac{F_T \times \sigma_{net}}{\sqrt{x}}$$

in which κ is an index representing the size of the field of singular stress.

- 3) The pin test results, when sorted out using the stress singularity parameter κ_{cr} , universal values were given regardless of changes in coating thickness and pin diameter, suggesting that employing κ_{cr} enables the adhesive strength to be quantitatively evaluated.

Key Words: Plasma sprayed coating, Adhesive strength, Pin test, Fracture mechanics, Stress singularity

1. 緒言

表面処理技術の一つである溶射法は、構成品材表面に優れた性能(遮熱, 耐熱, 耐摩耗など)をもたせることのできる有力な手段である。近年では、プラズマ熱源の利用技術が進歩し、セラミックスのプラズマ溶射の適用も各種機器に広がってきている。

その場合、溶射材料の選定、溶射条件の最適化、さらには各種機器の皮膜の耐久性などを評価する場合、皮膜と母材の界面強度を把握しておくことは重要である。

*原稿受付 平成2年5月18日 平成2年3月溶接構造研究委員会で発表

**正 員 三菱重工業㈱長崎研究所 Member, Nagasaki R & D Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD

*** 三菱重工業㈱長崎研究所 Nagasaki R & D Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD

****正 員 三菱重工業㈱広島研究所 Hiroshima R & D Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD

*****正 員 大阪大学 Member, Osaka University

一般に、溶射皮膜の界面強度は、JIS H 8666¹⁾で規格化されている引張試験法が用いられている。この手法は皮膜と治具の接合に接着剤を使用しているため、(1)接着剤が溶射皮膜に浸透する、(2)接着部で破断することがある、(3)接着部の高温域における強度が極端に小さいため、高温での試験が実施できないなどの問題点を有している。

また、母材と皮膜の界面など異材接合界面の強度試験に共通した問題であるが、有限寸法の試験片を用いる場合、異材接合界面端部は力学的特異点^{2,3)}となり、その近傍では、界面に垂直方向の応力が非常に大きくなり無限大に近づく特異性を有する。したがって、有限要素法(FEM)などを用いた数値解析で求める最大応力を指標として用いることは、要素分割の粗さの影響を受け、そのようにして求めた最大応力で界面強度を評価するには問題が残る。また、破断時の荷重を断面積で除した平均応力も、界面強度を代表する指標とはいえず、そのような手法では普遍的な強度評価ができない。界面端部の特異性に注目すべきであるとの指摘はすでになされているものの⁴⁾、溶射皮膜などを対象とした実験的検証がなされているものはほとんどない。

本報では、このような界面端部近傍での特徴を考慮して接合界面強度評価法の仕方に従来の線形破壊力学のアプローチ⁵⁾から新しい評価の手法を提案する。まず、①溶射皮膜の界面強度を測定する手法として、高温でも試験が行える利点を考え、従来の手法を改良した引張り型のピンテスト(ピンに皮膜を成膜後、ピンを引き抜く)を対象として取り上げ、そして、②それを用いて溶射皮膜接合界面端部近傍の応力特異場を考慮した指標の提案とその有効性を検討する。すなわち、

(1) ピンテストにおける界面端部近傍の応力特異性に着目し、応力特異場の大きさを指標とした界面強度パラメータ κ_{cr} を定義し、

(2) 同一条件で溶射された溶射接合界面の評価に対して、パラメータ κ_{cr} の有効性を膜厚、ピン直径などを变化させたピンテストの試験結果を基に検討する。

なお、本報は金属及びセラミックスの溶射を取り上げ、それらの母材と溶射材料の組み合わせは、FCD 45/80 Ni-20 Cr, FCD 45/CoNiCrAlY, 及び SUS 304/ZrO₂-8 Y₂O₃ (母材/皮膜) の3種類である。

2. ピンテストにおける界面端部近傍の応力特異性と κ_{cr} 一定条件

2.1 界面端部近傍の応力分布

Fig. 1 に示すピンテストは、ピンに溶射皮膜を成膜し

た後、ピンを引き抜き、その時の破断荷重を測定することにより界面強度を求める手法である。このピンテスト試験片の溶射皮膜界面における界面に垂直方向の応力(σ_y)の分布に注目して FEM 解析を行った。

ここでは、評価する界面強度が比較的小さいこと、皮膜材が高強度であることから弾性解析を基本として応力解析を行った。

計算条件を Table 1 に示す。計算対象とした母材(ピン)/皮膜の組み合わせは、後に実験を行う FCD 45/80 Ni-20 Cr, FCD 45/CoNiCrAlY (Case A), 及び SUS 304/ZrO₂-8 Y₂O₃ (Case B) であり、それぞれの組合せに対して皮膜厚さとピン直径を2種類変えた解析を行った。そこで用いる母材と皮膜の縦弾性係数(E_B , E_C)は Table 1 に示す通りで、ポアソン比は、母材、皮膜とも0.3とした。

皮膜の縦弾性係数は、Ni-Cr 系及び ZrO₂ 系の溶射皮膜に対して行った3点曲げ試験から得られた値^{6,7)}を用いた。

皮膜の厚さ(t)は、0.5 mm と 1 mm、ピン直径(D)は、2 mm と 4 mm とし、各ケースについて σ_y の応力分布を求めた。

なお、本報では、高温域における界面強度は対象としていないが、著者らが別途行った高温試験での検討から、高温加熱時の酸化によりピンが治具にグリップされるのを防ぐため、ピンと治具のすきま(Δr)を、0.1 mm に設定することが妥当であるとの結論を得たので、その

Fig. 1 Shape and dimensions of pin test specimen

Table 1 Analysis conditions by FEM

Case	Substrate/Coating	E_B (GPa)	E_C (GPa)	Coating thickness (mm)	Diameter of pin (mm)
A	FCD45/80Ni-20Cr FCD45/CoNiCrAlY	100	50	0.5	2
				0.5	4
				1	2
				1	4
B	SUS 304/ZrO ₂ -8 Y ₂ O ₃	200	20	0.5	2
				0.5	4
				1	2
				1	4

Fig. 2 FEM division of pin test specimen

Fig. 3 Stress distributions in the vicinity of coating edge of pin test specimen

値を用いた。したがって、ここで提案するピンテスト法は高温試験にも適用できる新しいものである。

Fig. 2 に、FEM メッシュ分割図を示す。計算モデルは軸対称モデルとして取り扱い、計算コードは NAS-TRAN を用いた。使用した要素は、アイソパラメトリック要素である。ここでの評価は界面端部の応力特性について注目しているのが、皮膜とピンの界面端部近傍のメッシュを細かく分割し、最小メッシュ寸法は、0.005 mm とした。

Fig. 3 に、界面端部近傍の σ_y の分布を示す。本報では、界面に生じる σ_y に注目しているが、FEM 解析上、界面近傍に生じる 溶射皮膜の σ_y を代表値として取り扱った。

計算条件は、Table 1 の Case A の場合について求め

たものである。横軸は、界面端部からピンの中心方向への距離 (x) を示す。縦軸は、 σ_y を σ_{net} (荷重をピンの溶射面積で除した平均応力) で除した値である。Fig. 3 より、界面端部近傍では、ピン直径が大きくなる程、また膜厚が小さくなる程、近傍の応力の大きさが大きくなる様子がわかる。

2.2 応力特異場の大きさを表す指標 λ と λ_{cr} 一定条件

異材接合界面端部の応力特異性については、Bogy²⁾, Hein³⁾ らが、種々の形状、縦弾性係数の組み合わせに対し、(1)式に示す λ の解析解を求めている。

$$\sigma_{ij} \propto 1/X^\lambda \quad \dots\dots (1)$$

X : 界面端部からの距離

λ : 特異性の指数

彼らの解析解によれば、ピンテストのように母材と皮膜のなす角度が 90° であり、縦弾性係数の比が Table 1 に示した $E_B/E_C=2\sim 10$ の場合には、

$$\lambda \approx 0.5 \quad \dots\dots (2)$$

の解を得ている。

そこで Fig. 4 では、Fig. 3 の σ_y の分布を母材と皮膜のヤング率が異なる Case A, B の両場合について、縦軸、横軸ともに対数表示し、ピンテストにおける応力特異性を検討した。

Fig. 4 より E_B と E_C が Case A, B の範囲で変化す

Table 2 Calculation results of F_1 parameter

Coating thickness t (mm)	Diameter of pin D (mm)	F_1 ($m^{1/2}$)
0.5	2	0.018
0.5	4	0.038
1	2	0.013
1	4	0.026

Fig. 4 Stress singularities in the vicinity of coating edge of pin test specimen

ると、Case B では多少応力が小さくなる傾向にあるものの、この範囲では界面端部近傍の応力分布は膜厚、ピン直径などの試験片形状に大きく支配されることがわかる。

また、Fig. 4 より、 $0.007\text{ mm} \leq x \leq 0.05\text{ mm}$ の範囲では、Bogy²⁾らの解析解と同様、 σ_y は x の平方根に反比例するという特異性を有していることがわかる。そこで、界面端部近傍の応力分布を

$$\sigma_y = \frac{\kappa}{\sqrt{x}} = F_I \times \frac{\sigma_{net}}{\sqrt{x}} \quad \cdots \cdots (3)$$

で近似することにする。ここで、今回(3)式で近似できる範囲を確認しているのは、Table 1 の計算条件、すなわち、膜厚が $0.5 \sim 1.0\text{ mm}$ 、ピン直径が $2 \sim 4\text{ mm}$ 、皮膜と母材の縦弾性係数の比 (E_B/E_C) が $2 \sim 10$ の範囲である。

なお、皮膜の縦弾性係数は、別途種々の溶射条件に対して求めているが^{6,7)}、上記範囲内にほとんど入ることから、本報では、この範囲内での計算及び後述するピンテストを実施した。また(3)式の F_I は、膜厚、ピン直径などの試験片形状から、計算により求まる値⁵⁾である。

Table 2 には、Fig. 4 の実線から求めた各膜厚、ピン直径における F_I の値をまとめて示す。

今回の計算条件の範囲では、 F_I 値は、 $0.013\text{ (m}^{1/2}\text{)}$ から $0.038\text{ (m}^{1/2}\text{)}$ の範囲である。

ここで、応力特異場の大きさに着目した溶射皮膜と母材の界面強度評価法を提案する。

均質材を対象とした線形破壊力学では応力特異場の大きさとひずみエネルギー解放率とは一対一の関係があることが知られ、エネルギー条件の観点から応力特異場の大きさを破壊限界指標としている。ここでのような不均質材接合界面では、必ずしも応力特異場の大きさがエネルギーパラメータと一義的に対応することはない。しかしながら、溶射皮膜と母材のように、材料の組み合わせを限定して評価することを考えると、応力特異場の大きさを一つの破壊指標とする評価は実用的に有効な評価手法となることが考えられる。

そこで本報では、応力特異場の大きさが界面強度を支配するものと考え、界面強度を表す指標として、(4)式で表される界面強度パラメータ κ_{cr} を定義した。ここでは、応力特異場の大きさのみに着目しているので、線形破壊力学で用いられる応力拡大係数 K と区別するために κ の記号を用いた。

$$\kappa_{cr} = F_I \times (\sigma_{net})_{cr} \quad \cdots \cdots (4)$$

κ_{cr} は、破壊時の応力特異場の大きさを表す指標である。すなわち、

$$\kappa = \kappa_{cr} \quad \cdots \cdots (5)$$

が界面破壊条件となる。

この考え方に立つとき、破壊試験において限界ネット応力 $(\sigma_{net})_{cr}$ を求めると、その試験片形状に対応する F_I の値を用いて、その接合界面に対応するパラメータ κ_{cr} が求められる。

以上のように、応力特異場の大きさに注目した破壊条件を提案したが、実用化するに当たっては、実験的検証が必要である。すなわち、パラメータ κ_{cr} が界面強度の普遍的な指標パラメータになるためには、同一条件で成膜された皮膜について膜厚やピン直径などの形状が変わっても、 κ_{cr} が同一の値になる必要がある。

そこで、次に実験的に κ_{cr} 一定条件の妥当性を検討する。

3. ピンテストによる溶射皮膜界面強度試験

3.1 試験片製作手順と引張試験方法

Table 3 にピンテストによる常圧プラズマ溶射皮膜の界面強度の試験条件を示す。母材 (ピン)/溶射皮膜の組み合わせは、FCD 45/80 Ni-20 Cr, FCD 45/CoNiCr AlY, 及び SUS 304/ZrO₂-8 Y₂O₃ の3種類を選定した。膜厚は、 0.5 mm と 1 mm 、ピン直径は、 2 mm と 4 mm である。

溶射条件を Table 4 に示す。プラストは、20 mesh のアルミナグリッドを用い、圧力 0.5 MPa で実施した。

Fig. 5 に溶射中のピンの固定方法、及び引張試験方法を示す。溶射時は、ピンと治具を Fig. 5 に示すように、ロックナットで固定した。引張試験時には、このロックナットをはずす必要があるが、溶射中、溶射粒子がロックナットにまきこんではずれにくくなることがあるため耐熱テープを治具に巻くことによって、まきこみを防いだ。

Table 3 Materials and dimensions of pin test specimens

Substrate	Coating	t (mm)	D (mm)
FCD45	80Ni-20Cr	0.5	4
		1.0	2
		1.0	4
FCD45	CoNiCrAlY	0.5	2
		0.5	4
		1.0	2
		1.0	4
SUS304	ZrO ₂ -8 Y ₂ O ₃	0.5	2
		0.5	4

Table 4 Conditions of plasma spraying

Substrate	Coating	Pretreatment	Powder size (μm)	Current (A)	Distance (mm)	Plasma gas (m^3/s)	
						Ar	He
FCD45	80Ni-20Cr	Blasting (#20)	44 5 104	550	120	7.8×10^{-4}	1.5×10^{-4}
FCD45	CoNiCrAlY		44 5 104	600	130	11.1×10^{-4}	2.5×10^{-4}
SUS304	ZrO ₂ -8 Y ₂ O ₃		10 5 44	550	120	6.7×10^{-4}	1.2×10^{-4}

Fig. 5 Schematic illustration of device for the pin test

引張用治具は、ユニバーサルジョイントを用い、クロスヘッド変位速度は、0.0083 mm/sec. で試験を実施した。

3.2 界面強度試験結果

Fig. 6 に、ピンテストにおける代表的な荷重とクロスヘッド変位量との関係を示す。荷重とクロスヘッド変位量の関係は、他の試験片においてもほぼ直線の関係を示した。また、SUS 304 にセラミック系の $\text{ZrO}_2\text{-}8\text{Y}_2\text{O}_3$ を直接溶射した場合は、Ni-Cr 系の溶射皮膜よりもかなり低い破断荷重を示した。

Fig. 7, 8 に FCD 45/80 Ni-20 Cr のピンテスト後のピン中央断面でみた剝離破面近傍の状況及び EPMA 検査結果 (Ni と Cr の元素分析) を示す。Figs. 7, 8 より、

ピンの上面に Ni と Cr を含む粒子が一部存在していること、また剝離位置は、母材と皮膜の界面、及び界面近傍の粒子間で生じていることがわかる。なお、剝離状況

Fig. 6 Load-deformation curve of pin test

Fig. 7 Example of microstructure of cross section zone of pin after tensile pin test

Fig. 8 Example of EPMA image of Ni and Cr of cross section zone of pin after tensile pin test

Fig. 9 Pin test results versus coating thickness and diameter of pin (FCD/80Ni-20Cr)

Fig. 11 Pin test results versus coating thickness and diameter of pin (SUS/ZrO₂-8Y₂O₃)

Fig. 10 Pin test results versus coating thickness and diameter of pin (FCD/CoNiCrAlY)

と位置は、他の皮膜と母材の組み合わせについても同様であった。

Fig. 9(a) は、FCD 45/80 Ni-20 Cr の界面強度試験結果を、限界ネット応力 $(\sigma_{net})_{cr}$ で整理したものである。 $(\sigma_{net})_{cr}$ は、ピン直径、膜厚が変化すると大きく異なり、Fig. 3 で求めた界面端部近傍の応力の大きさが大きいほど、 $(\sigma_{net})_{cr}$ は、低い値を示している。

Fig. 10(a), Fig. 11(a) は、FCD 45/CoNiCrAlY、及び SUS 304/ZrO₂-8 Y₂O₃ の試験結果を同様に $(\sigma_{net})_{cr}$ で整理したものである。Fig. 9(a) と同様に、ピン直径、膜厚が変化すると $(\sigma_{net})_{cr}$ は大きく異なり、界面端部近傍の応力の大きさの程度の影響を受けていることがわかる。

4. κ_{cr} による界面強度試験結果の整理

界面強度パラメータ κ_{cr} は、前述したように、破断

時の応力特異場の大きさを表す指標である。本報では応力特異場の大きさ κ が κ_{cr} に達すれば破断するとする κ_{cr} 一定条件に基づいて、界面強度試験結果をパラメータ κ_{cr} で整理することを試みた。

Fig. 9(b) は、FCD 45/80 Ni-20 Cr の試験結果を κ_{cr} で整理したものである。 κ_{cr} は、Fig. 9(a) の $(\sigma_{net})_{cr}$ 及び、Table 2 で求めた F_I 値を用いて、(4)式より求めた値である。Fig. 9(b) に示すように、 κ_{cr} の値は、膜厚、ピン直径が変化しても同じばらつきの範囲にあり普遍的な値となっていることがわかる。同様に、Fig. 10(b), Fig. 11 (b) は、FCD 45/CoNiCrAlY、SUS 304/ZrO₂-8 Y₂O₃ の試験結果をパラメータ κ_{cr} で整理したものである。溶射材料が CoNiCrAlY、及びセラミック系の ZrO₂-8Y₂O₃ の場合においても、ピンテストから求めた限界値 κ_{cr} は普遍的な値を示し、界面強度の指標として κ_{cr} が有効であることがわかる。

このように、ピンテストのような試験で一定の寸法で求まる限界ネット応力 $(\sigma_{net})_{cr}$ は、試験片の寸法や皮膜厚さの影響を受け、工学的な比較指標としても問題があるが、ここで提案するパラメータ κ_{cr} を用いることによって界面強度の絶対的な評価が可能となる。

5. 結 言

本報では、溶射皮膜を対象とした界面強度試験法の一つである引張り型のピンテストを取り上げ、まず試験手法の詳細を決定し、そこで求められる溶射皮膜界面強度の評価手法として、界面端部近傍の応力特異場の大きさに注目した手法を提案した。

Ni-Cr 系、及び ZrO₂ 系の溶射皮膜を対象に膜厚、ピン直径をパラメータとしたピンテストと弾性有限要素法による応力解析を実施し、界面強度評価指標の検討を行った結果、以下の結論が得られた。

(1) 母材、溶射材料、溶射条件が同一であっても、ピンテストにおける限界ネット応力 $(\sigma_{net})_{cr}$ は膜厚、ピン直径の影響を受け、単に一定の寸法によって求めた $(\sigma_{net})_{cr}$ は、界面強度の比較指標とはかならずしもならない。

(2) ピンテストの界面端部近傍(本解析では, $0.007 \leq x \leq 0.05$ mm, x は, 界面端部から, ピンの中心方向への距離)の範囲において, 界面に垂直方向の応力 σ_y が, x の平方根に反比例する, いわゆる線形弾性き裂と同じ特異性を有して

$$\sigma_y = \frac{\kappa}{\sqrt{x}} = \frac{F_I \times \sigma_{net}}{\sqrt{x}}$$

と表される. この κ の値は応力特異場の大きさを表す指標であり, κ の値は膜厚, ピン直径の影響を受ける.

(3) ピンテストにおける界面端部近傍の応力特異性に注目し, 線形弾性破壊力学とのアナロジーから界面強度の指標として, 破断時の応力特異場の大きさを表す界面強度パラメータ κ_{cr} を定義した. この κ_{cr} の値は, 膜厚, ピン直径などから求まる F_I 値及び, ピンテストの限界ネット応力 $(\sigma_{net})_{cr}$ から,

$$\kappa_{cr} = F_I \times (\sigma_{net})_{cr}$$

で求められる.

(4) ピンテストにおける $(\sigma_{net})_{cr}$ は, 試験片形状などの影響を受けるが, 界面強度パラメータ κ_{cr} で試験結果を整理すると, 本試験条件の範囲において, 膜厚, ピン直径が変化しても普遍的な値となることがわかった.

このように, 溶射皮膜を対象として検討した界面強度に対する本強度指標は, 溶射条件の最適化, 皮膜の耐久

性の評価において工学的に十分有効な指標になりうるものと考えられ, さらに, めっき層など, 他の表面処理層についても, 適用できる可能性がある.

参 考 文 献

- 1) JIS H 8666: セラミック溶射試験方法 (昭55)
- 2) D. B. Bogy: Two Edge-Bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles Under Surface Traction, Journal of Applied Mechanics vol. 38 p 377 (1971).
- 3) V. L. Hein, F. Erdogan: Stress Singularities in a Two-Material Wedge, International Journal of Fracture Mechanics, Vol. 7, No. 3 p 317 (1971)
- 4) 服部敏雄, 坂田荘司, 初田俊雄, 村上元: 応力特異場パラメータを用いた接着界面強度評価, 機械学会論文集, Vol. 54 No. 499 (昭. 63)
- 5) 佐藤邦彦, 豊田政男, 野原和宏, カルビー・リスト: 溶接低温割れへの力学的パラメータ F_I の適用に関する実験的検討, 溶接学会誌, Vol. 51, No. 2 (1982)
- 6) 納富啓, 児玉克, 小野豊明, 井上好章, 川野正和, 谷昇: プラズマ溶射皮膜の残留応力測定に関する研究, 溶接学会論文集, Vol. 6, No. 3 (1988)
- 7) 納富啓, 武田恭之, 児玉克, 北原繁: プラズマ溶射皮膜の機械的性質に関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, Vol. 3. (昭. 63)

中・高炭素鋼の溶接における硬化性評価のための 冷却時間の選択について*

松田福久**, 劉 悟玄***, 李 鍾麟****

Selection for Parameter of Cooling Time for Estimation of Hardenability in Welding of Medium, High Carbon Steels*

by Fukuhisa Matsuda**, Wu-Shyuan Liu*** and Zhong-Lin Li****

It is well-known that hardenability of HAZ is one of the important factors for estimating weldability of steels. Therefore the parameter of cooling time from 800 to 500°C ($dt_{8/5}$) has been usually used for estimation of the hardenability of lower carbon high strength steels. However it is not clear if for higher carbon steels $dt_{8/5}$ is also useful parameter for the estimation, because the M_s temperature of these steels is lower than usual lower carbon steels. For this purpose this paper has investigated the usefulness of application of $dt_{8/5}$ parameter for the HAZ of higher carbon steels. Conclusively, it was cleared that the $dt_{8/3}$ parameter is better than $dt_{8/5}$ for these steels. Then the authors have introduced a new equation for estimation of the HAZ hardness for higher carbon steels using $dt_{8/3}$ parameter.

Key Words: Heat-affected zone, Medium, high carbon steels, Cooling time, Hardenability

1. 緒 言

鋼材の溶接性を評価する因子の内, 熱影響部 (HAZ) の硬化性は重要な因子である. このため HAZ の硬

化性の推定に対して溶接冷却特性および CCT 図との関連を利用して, 二, 三の推定式が考案されている¹⁻³⁾. そしてそれらは一般に溶接部の 1073~773 K (800~500°C) の冷却時間 ($dt_{8/5}$) のパラメータによって推定されている. しかし, 炭素量が高く M_s 点が高い中, 高炭素鋼に対してもこの $dt_{8/5}$ が適切なパラメータであるかどうかに対する検討は行なわれていない. このため, 本研究では中, 高炭素鋼を使用し, HAZ の硬化性を検討するとともにこの硬化性を推定するパラメータとしては

*原稿受付 平成2年6月11日 平成2年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University

***学 生 員 大阪大学 Student Member, Osaka University

****非 会 員 大阪大学 (客員研究員) Non Member, Osaka University (Foreign Researcher)