寄 書

熔融アルミニウムめっきした SUS316 ステンレス鋼のショートビーム 3 点曲げ試験

新開 康弘*† 大西 忠一* 西山 正敏**

*大阪府立大学工学部機能物質科学科

**アルマー工業株式会社

Short Beam Three Point Bending Test on Hot-Dip Aluminized SUS316 Stainless Steel

Yasuhiro Shinkai*, Tadakazu Ohnishi* and Masatoshi Nishiyama**

*Department of Applied Materials Science, College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai

**Alumer Kogyo Co., Ltd., Amagasaki

Keywords: hot-dip aluminum coating, SUS316 stainless steel, short beam three point bending test, bending strength, shear strength

鉄系材料の耐食性、耐熱性や耐摩耗性を改善するために、熔融アルミニウムめっきを施して利用することは以前より行われている。近年では、より高機能な材料を求めてステンレス鋼へのめっきも研究されるようになってきた。この種のめっきでは通常、アルミニウムの付着量と密着性についての規定(JIS H8642)を満足するようなめっき条件が選ばれ、めっきによって表面に形成される合金層の構造や強さ、あるいは破壊挙動などについては余り考慮されていない。

筆者らは先に、SUS316 ステンレス鋼に熔融アルミニウムめっきを施したときの界面に形成される合金層構造について報告したが⁽¹⁾、このめっき材をショートビーム 3 点曲げ試験したところ、合金層の破壊挙動はめっき条件によって異なることが認められた。合金層の破壊や剥離はめっきしたことと利点を喪失させるので、この点をも考慮しためっき条件の選択が必要となろう。そこで、種々条件で熔融アルミニウムめっきした SUS316 材のショートビーム 3 点曲げ試験を行い、合金層強さから見た最適めっき条件について検討した。なお当然ながら、薄板めっき材のようにその後大きな塑性変形を加えることが前提となるような部材と、厚肉部材に対する仕上げ処理としてのめっきのように、その後は基本的に弾性変形内程度の歪しか加わらない場合とでは、要求される特性は大きく異なる。本実験では後者を想定して、合金層の破壊強度を検討した。強加工の加わることが前提となる薄板めっき材などでの条件検討に当たっては、合金層の加工性が乏しいことから、全く異なる視点での検討が必要なことは言うまでもない。

用いた素材は市販の 2 mm 厚 SUS316 ステンレス鋼圧延材である。これを所定温度の純アルミニウム浴(99.99 mass%)にフラックスを介して所定時間浸漬し、熔融アルミニウムめっきを施した。これにより、界面には FeAl₃ および FeAl₂ の 2 層からなる合金層が形成され(条件にもよるが)、最外層に付着アルミニウム層を持つめっき層が生成する。めっき法およびめっき特性の詳細については前報⁽¹⁾を参照されたい。

界面に形成された合金層の破壊強さを調べるため、めっきした板材から 35 mm × 10 mm × 2 mm の試験片を切り出してシ

ョートビーム法による 3 点曲げ試験を行い、応力-変位曲線上における最初の荷重落下点より層間剪断破壊または曲げ破壊の起きる強さを求めた。支点間距離は 29 mm と 10 mm、曲げ変位速度は 0.1 mm/min とした。

ショートビーム 3 点曲げ試験の場合、支点間距離 L と板厚 h との比が $L < 4h \sim 5h$ であれば応力中立面での剪断破壊が優先し、剪断破壊応力 τ は

$$\tau = 3 P_{\max} / 4bh \quad (1)$$

で表される。ここで、 $P_{\max}$: 最大曲げ荷重、 b : 試験片幅、 h : 試験片厚さ、である。また、 $L > 4h \sim 5h$ であれば最外層での曲げ破壊が優先し、破壊応力 σ は

$$\sigma = 3 P_{\max} L / 2bh^2 \quad (2)$$

となる。本実験の場合、 $L=29$ mm または $L=10$ mm、 $h=2$ mm であるから、 $L=29$ mm の場合は合金層の曲げ破壊が、 $L=10$ mm の場合は素地/合金層界面での剪断が優先する範囲にある。もっとも、本実験試料は最外層にのみ薄い合金層を持つ構造であるので、後者の場合にも合金層の曲げ破壊が同時に発生し得る。また、微少な破壊は応力-変位曲線上で検知できない可能性もある。そこで、本実験では、荷重-変位曲線からの破壊荷重の計測とともに、断面観察による破壊発生の確認も行った。

Fig. 1, Fig. 2 に結果を示す。 $L=29$ mm の場合(Fig. 1)、曲げ破壊強さおよび破壊が起きるまでの変位はめっき時間 2~3 min 程度にピークを持ち(700°C でめっきの場合)、めっき温度に関しては 760°C 以上で急減する変化となっていた。これは前報⁽¹⁾に示した合金層厚さの変化と非常によく対応している。また、破壊が生じるまでの変位量もほぼ同様の変化をしているが、めっき温度が低くなると変位量が減少する傾向にあった。一方、 $L=10$ mm の場合(Fig. 2)、剪断破壊強さは曲げ破壊の場合とほぼ同様の変化を呈していた。しかし、変位量はめっき時間 10 min 程度にピークを持ち、やや長時間側にずれる傾向にあった。

この原因を調べるため、3 点曲げ試験後における合金層の破壊様相を観察した。代表的な例を **Fig. 3** に示す。 $L=29$ mm の場合、本実験範囲のめっき条件においてはすべて、最初の荷重落下が観察されて以降においてのみ Fig. 3 (a) に示したよう

† 大阪府立大学大学院生

Fig. 1 Changes in the bending strength and displacement of the alloy layer of hot-dip aluminized SUS316 stainless steel obtained by the short beam three point bending test with span length 29 mm and sample thickness 2 mm.

Fig. 2 Changes in the shear strength and displacement of the alloy layer of hot-dip aluminized SUS316 stainless steel obtained by the short beam three point bending test with span length 10 mm and sample thickness 2 mm.

Fig. 3 Fracture features of the alloy layer of hot-dip aluminized SUS316 stainless steel.
 (a) bending fracture in 700°C-5 min aluminized sample; span length is 29 mm.
 (b) shear fracture in 700°C-5 min aluminized sample; span length is 10 mm.
 (c) bending and shear mixed fracture in 700°C-20 min aluminized sample; span length is 10 mm.

な合金層の曲げ破壊が生じていた。一方、 $L=10$ mm の場合、5 min 程度以下の短時間めっき材においては、荷重落下において予測されたように、Fig. 3(b)に示したような合金層/素地界面における剪断剥離破壊が生じていた。ところが、長時間側では Fig. 3(c)に示すように剪断破壊と曲げ破壊の混合形態となっていた。

そこで、試験途中における破壊発生状況を詳しく観察したところ、応力-変位曲線上での荷重落下として剪断破壊が検知されるよりかなり低変位(低荷重)で曲げ破壊が微細かつ頻繁に生じていることが認められた。こうした微細な曲げ破壊が生じる応力と変位をプロットしたところ、Fig. 2(a)中に破線で示したように、Fig. 1(a)と同じ傾向を示すことが分かった。すなわち、応力-変位曲線上では検知できない程度の微細な曲げ破壊がまず生じ、これが応力緩和をもたらし、検知可能な粗大剪断破壊が生じる変位を見かけ上増大させたものと推測された。

以上の結果から、熔融アルミニウムめっきされた SUS316 ステンレス鋼に変形が加わった場合、表面に形成されている合金層は曲げまたは剪断破壊を起こすが、その強さはめっき時間に関しては 2~3 min 程度にピークを持ち、めっき温度に関しては 760°C 以上で急減する変化となる。変位量もほぼ同様であるが、温度に関しては低温ほど漸減する、と結論できる。こう

した破壊強度の傾向は、形成されている合金層の厚さ変化⁽¹⁾と非常に良く対応している。したがって、合金層の破壊挙動からみて強固なめっき素材を得るには、合金層厚さが最大になるような時間条件(2~3 min)を選択することが望ましい。また、めっき温度に関しては低温ほど破壊発生までの変位量が漸減することから、760°C を越えない範囲で高いほど望ましいといえる。

この種のめっきで現在工業的に採用されている条件は、アルミニウムの付着量を増し密着性を確保する観点から、700°C 程度の低温めっきで 10 min 前後の時間をかけている場合が多いと推測される。しかし、少なくとも SUS316 の場合、合金層の破壊強度を考慮すれば、従来よりも幾分か高温短時間のめっき条件を採用することが望ましい。また、種々素材のめっき条件を検討するに当たっては、合金層の強度や破壊特性についての検討を行うことも肝要であろう。

文 献

- (1) 大西忠一, 野口泰彦, 西山正敏, 中山 強: 日本金属学会誌, 56(1992), 198.

(1993年 9 月 17 日 受付)