2相ステンレス鋼線の疲労特性に関する基礎的研究*

方 蘇春**, 山田雅夫**, 山岡幸男**

Basic study on fatigue properties of duplex stainless steel wire

Suchun FANG, Masao YAMADA and Yukio YAMAOKA

In this study, mechanical and fatigue properties of the duplex(austenitic-ferritic) stainless steel wire(SSW) after drawing were investigated and compared with SUS304 SSW.

Further, the notch samples were made with the duplex SSW after drawing, and a fatigue crack generated at the notch root was observed by means of SEM after interruption of test at halfway.

The main results are as follows:

- 1) The duplex SSW after drawing shows the excellent fatigue and toughness properties as compared with SUS304 SSW.
- 2) Stress concentration at the fatigue crack tip is relaxed by the α phase that has low strength when fatigue crack propagate and propagation of fatigue crack is arrested by the γ phase that has high strength. From this result, maximum fatigue strength of the duplex SSW might be attained, if it has proper volume fraction as a microstructural component.

Key Words : Duplex stainless steel, Fatigue, Mechanical property, Work harding, Wire drawing, Volume fraction of austenite.

1. 緒 言

海に囲まれている島国の日本においては自動車部品から構造用材料まで広範囲にわたり、塩害をはじめとして腐食に対する対策が要求されている。このような背景で優れた耐食性を持つ2相ステンレス鋼は注目されている。しかし、従来のオーステナイト系やフェライト系のステンレス鋼に比べ、2相ステンレス鋼に関する研究はまだ相対的に少なく、特に線材について未だにJISの規格が確立されていないのが現状である。

そして2相ステンレスの疲労特性に関する研究をみると、そのほとんどが焼鈍材に関するものである^{1)~9)}。一方、当社のタフデュアルという2相ステンレスロープの開発に当たって、伸線加工した2相ステンレスの優れた耐疲労性が発見された^{10), 11)}。

しかし、塑性加工後の2相ステンレス鋼の疲労特性に関する研究は少なく、不明な点が多く残されている。そこで、本研究は伸線加工後の2相ステンレス鋼線を用い、SUS304鋼線を比較材として、伸線後の機械的特性や疲労特性を調査し、疲労特性と機械的特性の関係や、疲労特性に影響する組織学的な因子などについて明らかにした。

2. 実験方法

本研究で用いた供試材の成分はTable 1に示す。2相ステンレス鋼線の成分はJIS4303 SUS329J1相当で公称24%

Cr-5.5%Ni-1.0%Moである。

2相ステンレス鋼線について、線径5.5mm ϕ の供試材を一旦4.0mm ϕ まで伸線した後、 γ 相の量を調整するためにそれぞれ1303Kと1423Kで熱処理を行った。ポイントカウンティング法を用いて測定したところ、1303Kで熱処理の場合、 γ 相の量は約33% (以下329J1-Aと記す)、1423Kで熱処理の場合、約22%であった (以下329J1-Bと記す)。一方、同じく5.5mm ϕ から4.0mm ϕ まで伸線した比較材であるSUS304ステンレス鋼線の熱処理温度は1423Kで行った (以下304と記す)。熱処理後の各供試ワイヤは酸洗い、コーティングなどの処理を施して、4.0mm ϕ から1.0mm ϕ まで伸線しながら各段サンプリングを採取し試験に供した。引張試験はインストロン型引張試験機を用いて行った。一方、疲労試験には線径1mmを超えるものは中村式回転曲げ疲労試験機、1mmのものはハンター式回転曲げ疲労試験機を用いた。そして疲労クラックの伝播経路に関する詳細な調査は走査型電子顕微鏡を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 機械的特性

329J1-A, Bの熱処理後の光学顕微鏡組織をFig. 1に示す。両者の組織を比較すればわかるように、329J1-A (Fig. 1 (a))の γ 相の量は329J1-B (Fig. 1 (b))より多くなっており、結晶粒径もAの方がやや小さくなっている。

原稿受付日 1994年9月26日

* ばね技術研究会 1994年度春季講演会にて一部発表

** 神鋼鋼線工業 (株) (Shinko Wire Co., Ltd.)

Table 1 Chemical composition of alloys.

	(wt%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS329J1	0.03	0.35	0.54	0.027	0.005	5.27	23.84	1.25
SUS304	0.07	0.37	1.24	0.030	0.001	8.44	18.52	0.18

(a)

(b)

Fig. 1 Microstructure of the duplex stainless steel wires after solution annealing at (a)1303K (329J1-A) and (b) 1423K (329J1-B) for 300s.

金属の疲労特性はその機械的特性と密接な関係を持っているので各試料の機械的特性を調べ、その結果を Fig. 2 と Fig. 3 に示す。Fig. 2 に示すように、304 に比べて 329J1 の引張強さは低くなっているが降伏比は逆に 329J1 の方が高くなっている。そして、329J1 において γ 相の比較的多い A の方が B より引張強さは高くなっている。また、Fig. 3 に示すように靱性値を表す捻回値と絞り値においても 329J1 の方は 304 より高い。

3.2 疲労特性

各試料の伸線加工度に伴う疲労限の変化を Fig. 4 に示す。

Fig. 2 Effect of drawing percent on the tensile strength and yield ratio.

Fig. 3 Effect of drawing percent on the torsion value and reduction of area.

329J1 において全体的に γ 量の多い A の疲労限が高くなっている。すなわち、 γ 相の比較的多い方が疲労特性に優れている。また、高い伸線加工度の領域では 329J1 の A、B とも 304 より疲労限が高くなっている。

Fig. 5 は各試料の耐久比（疲労限と引張強さの比）を示す。329J1 の耐久比においても γ 相の比較的多い A の方が高くなっており、また、329J1 の A、B 両方とも 304 より耐久比が高くなっている。

森田ら¹²⁾ は 2 相ステンレス鋼双結晶の繰返し変形におい

Fig. 4 Effect of drawing percent on fatigue limit.

Fig. 5 Effect of drawing percent on endurance ratio.

Fig. 6 Fatigue crack arrested by austenite phase of the two-phase stainless steel bicrystal(Rf.12).

Fig. 7 Scanning electron micrograph of the duplex stainless steel wire after 86.9% drawing.

て、 α 相から発生したクラックが γ 相によって止められていることを観察した (Fig. 6)。

Fig. 7 は86.9%伸線した 329J1A の走査電顕写真である。約 $1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 幅を持つ α/γ 相のファイバー組織は多くの細長い双結晶のようになっていることがわかる。Fig. 6 に示している双結晶の実験結果から推測すると、このような組織において、かりにある α 相に疲労クラックが発生しても、ほかの γ 相により止められる可能性がある。このため、クラックは非常に進展しにくいことが予想される。しかし、いまだ、変形した 2 相ステンレスにおける疲労クラックの進展状況に関する報告は見当たらない。

そこで、筆者らは約85%伸線加工した線径 4.4mm の 2 相ステンレス鋼線 (成分は Table 1 に示しているものと同じである) を用いて、ノッチ試料を作製し、疲労試験の途中で一旦止めて、クラックの進展する様子を観察した。Fig. 8 の (a) は試料のノッチ部分及びできたクラックの様子を示すもので、(b) はこのクラック先端部分を拡大したものである。Fig. 8 (b) でクラックは γ 相によって止められている様子がよくわかる。また、クラックの伝播経路をさらに詳細に見ると、Fig. 8 (c) のようにクラック幅がフェライト部で広くオーステナイト部で狭くなっている傾向も見られる。これらの現象は伸線加工した α/γ 相における強度の差に関係していると考えられる。すなわち、85%程度の伸線加工度では、加工硬化率の大きい γ 相の強度は α 相の 2 倍程度にもなると推定され、当然、疲労強度の絶対値も γ 相の方が高くなっているため、疲労クラックは進展につれて、強度の低い α 相でクラック幅が拡大してクラック先端半径は鈍化し、応力集中度が低くなり、そしてクラックが強度の高い γ 相に当たると、応力集中度低下の作用と相俟ってその伝播には停滞や遅延が生じるものと考えられる。Fig. 8 (d) にはクラックの枝分かれも認められ、クラックの進展が γ 相により途中で遅延していたことを示す間接的な証拠になるだろう。これらのことから、この材料の優れた疲労特性は伸線加工した α/γ 2 相組織と疲労クラックとの絶妙な相互

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 8 Fatigue crack generated from bottom of notch on the duplex stainless steel wire after 84.6% drawing.

作用によって発現しているといえる。

また、329J1のA、Bの疲労特性における差が生じる原因についても両者の組織の違いから説明できる。Fig. 9で示すように、同じ伸線加工度を持つ329J1-Bに比べてAの γ 相は多く、互いに連結するようになっている (Fig. 9 (a))。これに対して、Bの γ 相は少なく、断続的に分布している (Fig. 9 (b))。このためBにおいて、 γ 相におけるクラックの進展を阻止する確率は低下することが予想され、従って、329J1-Aの疲労特性はBより優れていることになる。

4. 結 言

本研究は伸線加工した2相ステンレス鋼線を用い、SUS 304鋼線を比較材として、機械的特性や疲労特性を調べ、得られた結果を組織学的な観点から考察し、次のように要約される。

(1) 伸線加工後の2相ステンレス鋼線はSUS304鋼線より

優れた疲労特性と強靱性を持つことが明らかとなった。

(2) 疲労クラックはその進展の際、先端の応力集中が主に強度の低い α 相によって緩和され、そして強度の高い γ 相によって阻止される。すなわち、この材料の優れた疲労特性は伸線加工した α/γ 2相組織の相互作用によるものと考えられる。このことから、2相ステンレス鋼線は最大疲労限を得るのに、適正な α/γ 2相混合比を持つことが不可欠と予想されるので、今後この点について検討を進めたい。

参考文献

- 1) H. W. Hayden and S. Floreen, Metall. Trans., 4 (1973), 561.
- 2) 友田 陽, 立花信好, 田名部菊次郎, 黒木剛司郎, 鉄と鋼, 63-6 (1977), 962.
- 3) 泉 久司, 砂田久吉, 篠田軍治, 日本金属学会誌, 35-4 (1979), 324.
- 4) 荻山博之, 佃等, 曾山義朗, 田村今男, 材料, 28-307

(a)

(b)

Fig. 9 Scanning electron micrograph showing fiber structure of the specimens after 86.9% drawing (a)329J1-A(with 33% austenite phase) and (b)329J1-B(with 22% austenite phase).

(1979), 52.

- 5) 石井 仁, 中川賢二, 日本材料強度学会誌, 16-1 (1981), 18.
- 6) 荻山博之, 佃等, 曾山義朗, 田村今男, 材料, 36-401 (1987), 129.
- 7) 小川武史, 戸梶恵郎, 加藤容三, 機械学会論文集 (A編), 56-524 (1990), 752.
- 8) 荻山博之, 白石哲郎, 佃等, 材料, 41-465 (1992), 926.
- 9) 荻山博之, 白石哲郎, 佃等, 日本材料強度学会誌, 27-2 (1993), 31.
- 10) 玉井鬼子雄, 山岡幸男, 榊谷博, 資源・素材'92秋期大会資料, (1992), p 8.
- 11) 玉井鬼子雄, 山岡幸男, 第35回日本塑性加工学会伸線分科会発表資料, (1992.6).
- 12) 森田陽子, 和田大志, 橋本敏, 三浦精, 材料学会第42期学術講演会前刷, (1993.5), P162.