

1121 浸炭されたオーステナイト系ステンレス鋼SUS316の疲労挙動

Fatigue Behaviour of Carburized Austenitic Stainless Steel SUS316

正 ○秋田正之 (岐阜大工) 正 戸梶恵郎 (岐阜大工) 神山 圭 (岐阜大院)

Masayuki AKITA, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193
Keiro TOKAJI, Gifu University
Kei Kohyama, Graduate Student, Gifu University

The fatigue behaviour and fracture mechanism of carburized austenitic stainless steel, SUS316, were studied under rotary bending in laboratory air and in 3%NaCl aqueous solution using smooth specimens with two different carburized case depths. A modified carburizing was performed at a temperature below 500°C in a CO and H₂ gas mixture. Fatigue strength was evaluated and fracture mechanism was discussed on the basis of observation of crack initiation and small crack growth and fracture surface analysis. In laboratory air, the carburized specimens showed considerably higher fatigue strength than the untreated specimens. The fatigue strength in 3%NaCl aqueous solution was the same as that in laboratory air, indicating excellent corrosion resistance of the carburized specimens. Regardless of environment, cracks initiated underneath the carburized case at a very early stage of fatigue life and grew predominantly into the core material with a fish-eye like pattern.

Key words: Fatigue, Austenitic stainless steel, Corrosive environment, Carburizing, Crack initiation, Small crack growth, Fracture mechanism

1. 緒 言

機械・構造物の長寿命化、延命化や有効利用の要求に対して、近年各種表面処理の応用が関心を集めている。オーステナイト (γ) 系ステンレス鋼は周知のとおり優れた耐食性を有するが、必ずしも高硬度とは言えず、また耐摩耗性も十分ではない。したがって、それらの特性を表面処理によって改善することは実用的に重要であり、特に構造材料として用いる場合、疲労特性の評価は不可欠である。

本研究では、浸炭処理を施した 2 種類の浸炭層深さの γ 系ステンレス鋼 SUS316 平滑試験片を用いて、室温大気中および 3%NaCl 水溶液中において片持ち回転曲げ疲労試験を行い、疲労挙動に及ぼす浸炭の影響について検討した。

2. 材料および実験方法

2.1 材料

供試材は直径 16mm の γ 系ステンレス鋼 SUS316 丸棒材であり、その化学成分 (wt.%) は、C 0.05, Si 0.35, Mn 1.35, P 0.033, S 0.025, Ni 10.1, Cr 16.9, Mo 2.11 である。納入材に 1080°C・油冷の溶体化処理を施した。その後、最小断面直径 5.5mm の砂時計形の疲労試験片に機械加工した。試験部をエメリー紙で研磨したのち、次に述べる浸炭処理を施した。

2.2 浸炭処理

用いた浸炭処理はパイオナイト処理と呼ばれるガス浸炭法を改良したものである。500°C 以下の温度で一酸化炭素と水素から成る混合雰囲気中において処理を行った。異なる浸炭層深さを得るために、処理時間 t_p を変化した。 t_p は 15h および 35h である。以後処理時間から、それぞれの浸炭材を 15h 材および 35h 材と呼ぶ。

2.3 実験方法

試験には片持ち回転曲げ疲労試験機を用い、繰返し速度 19Hz で室温大気中と 3%NaCl 水溶液中において実験を行った。3%NaCl 水溶液中の実験では、溶液をリザーブタンクからポンプを用いて試験部を被った腐食槽に導き、試験片直上から滴下させた。き裂発生および成長の観察にはレプリカ法を用いた。また実験後、破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により詳細に観察した。

3. 実験結果

3.1 組織

組織写真を図 1 に示す。未処理材は γ 結晶粒から成る組織である。一方浸炭材では、表面近傍に内部とは明らかに異なる層が認められる。この領域が炭素固溶拡散層である。その深さは 15h 材および 35h 材に対してそれぞれ 20 μ m および 40 μ m 程度である。

3.2 硬さ分布

硬さ分布を図 2 に示す。15h 材および 35h 材では、表面

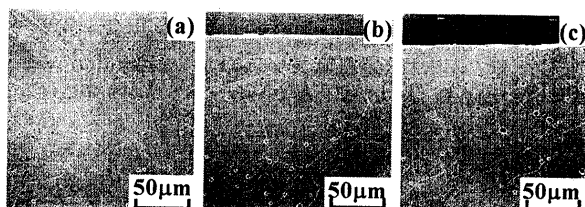


Fig.1 Microstructures: (a) untreated, (b) $t_p=15h$, (c) $t_p=35h$.

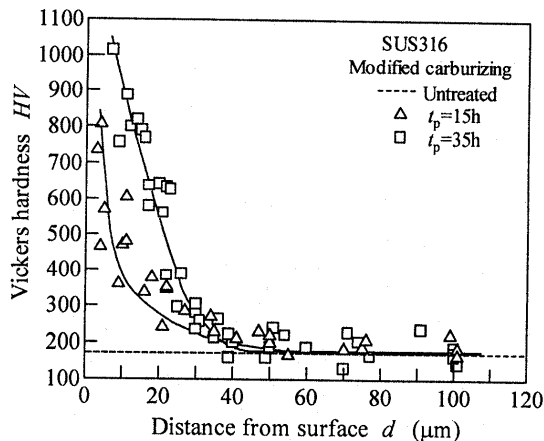


Fig.2 Vickers hardness profile.

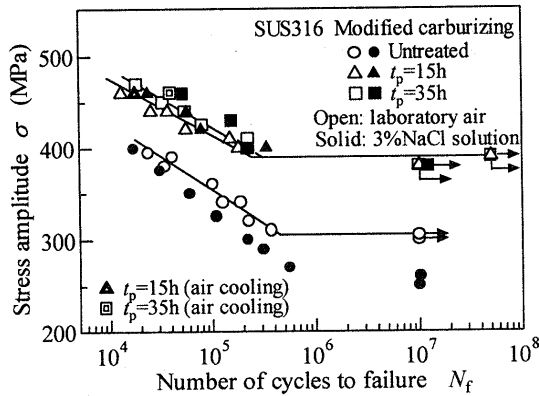


Fig.3 S-N diagram.

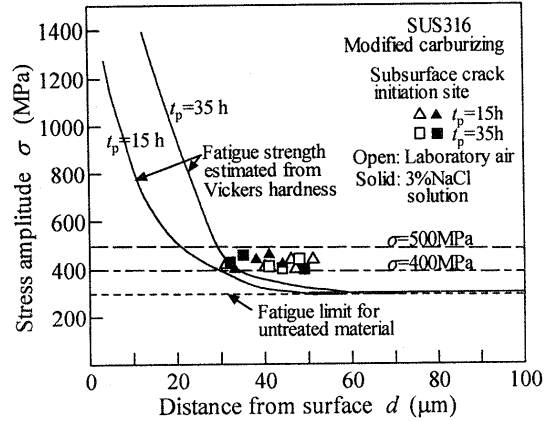


Fig.6 Relationship between strength of carburized specimen and applied stress

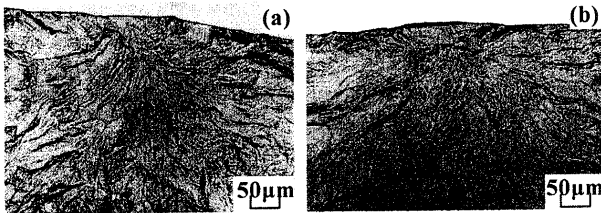


Fig.4 Typical examples of SEM micrographs showing crack initiation site in laboratory air: (a) $t_p=15h$ ($\sigma=440MPa$), (b) $t_p=35h$ ($\sigma=410MPa$).

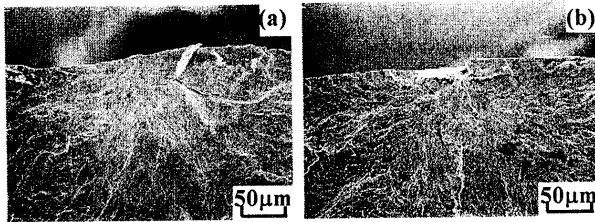


Fig.5 Typical examples of SEM micrographs showing crack initiation site in 3%NaCl aqueous solution: (a) $t_p=15h$ ($\sigma=440MPa$), (c) $t_p=35h$ ($\sigma=410MPa$).

近傍でそれぞれ 800HV および 1000HV 以上のきわめて高い硬さに達する。硬さは表面から内部に向かって急激に減少したのちほぼ一定となり、未処理材の硬さ (172HV) と一致する。この硬さが増加した領域は処理時間にかかわらず約 40 μm である。しかし図 1 に見られたように、浸炭層深さは明らかに処理時間に依存していたので、本研究では組織から判断される深さを浸炭層深さ d_p とする。

3.3 機械的性質

未処理材に比べて、わずかに浸炭材の引張強さは増加し、逆に伸び、絞りは減少した。

3.4 疲労挙動

3.4.1 疲労強度 図 3 に S-N 線図を示す。大気中では、15h 材および 35h 材の疲労強度は未処理材と比較して全体的に大きく向上する。有限寿命領域では浸炭層深さの影響が認められ、35h 材が 15h 材よりもやや長寿命である。疲労限度はいずれの浸炭材も約 390MPa であり、本浸炭処理によって 30% の疲労限度の向上が達成される。一方 3%NaCl 水溶液中では、浸炭材の疲労強度は高応力では大気中よりもむしろ高く、低応力ではほぼ同程度であり、腐食環境中においても浸炭材の疲労強度は全く低下しない。

3.4.2 き裂発生 図 4 に大気中における浸炭材のき裂発生点近傍の様相を示す。浸炭層深さおよび応力にかかわらず、き裂は浸炭層と芯部の境界近傍で発生している。さらに注意深く観察すると、発生点の直上の浸炭層内に平坦なファセットの存在と発生点から内部方向に広がる fish-eye 状の様相が認められる。Fish-eye 状の様相の寸法は約 150 μm 程度である。図 5 は 3%NaCl 水溶液中におけるき裂発生点近傍の様相である。発生挙動は大気中と基本的に同様であり、浸炭層の下部でき裂が発生している。

3.4.3 微小き裂成長 環境にかかわらず、内部で発生したき裂は直ちに表面に現れ、き裂長さが 0.2mm~0.3mm 程度まできわめて緩慢かつ不連続に成長した。

4. 考察

硬さと疲労限度の関係から求められた浸炭材の内部方向の強度分布を図 6 に示す。また同図には、 $\sigma=500MPa$ と $\sigma=400MPa$ の負荷応力分布、および内部き裂発生箇所をその位置の応力に対してプロットした結果も併記している。図から明らかなように、浸炭材の表面およびその近傍の強度はきわめて高くなっているから、表面のすべり変形が阻止され、き裂発生が強度の低い境界近傍に移行したものである。負荷応力が強度を上回る深さは 20 μm ~40 μm であり、浸炭層深さと一致する。また、内部き裂発生箇所はそれよりやや深く 30 μm ~50 μm であるが、概ね一致していると考えられ、こうした単純なモデルによって本浸炭材のき裂発生挙動が理解できるように思われる。

浸炭層は高い応力に耐えうるが、き裂発生箇所の応力は応力勾配を考慮しても未処理材の疲労限度 (300MPa) はもとより、耐力 (299MPa) よりも高い。したがって内部でも、浸炭層の拘束に勝って繰返しの早期にすべり変形によりき裂が発生する。実際発生点には、高強度鋼などで観察される非金属介在物は一切見られず、すべり変形の痕跡を示す平坦なファセットが認められた。

5. 結 言

本研究では浸炭された γ 系ステンレス鋼 SUS316 の疲労挙動を調査した。その結果、浸炭材の疲労強度は未処理材に比べて大きく向上し、また腐食環境中においても大気中と同等の疲労強度を示すことがわかった。環境にかかわらず、き裂は浸炭層と芯部の境界近傍ですべり変形により発生し、fish-eye 状の様相を形成して内部方向に成長した。そのとき表面では緩慢かつ不連続に成長した。

最後に、浸炭処理にご協力いただいたエア・ウォーター (株) に感謝する。(参考文献省略)