

超音波ショットピーニングを施した SUS304 の 300°C における内部疲労き裂発生機構

岐阜大学

○柿内利文

岐阜大学

植松美彦

岐阜大学

長谷川典彦

岐阜大学[院]

近藤英介

Subsurface Fatigue Crack Initiation Mechanism in Ultrasonic Shot Peened Type304 at 300°C

Toshifumi KAKIUCHI, Yoshihiko UEMATSU

Norihiro HASEGAWA and Eisuke KONDO

1. 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼は優れた耐食性を有するため、原子炉配管部材に利用されている。原子炉配管には 300°C 程度の冷却水が流れており、振動等により疲労損傷が生じることが懸念されている。オーステナイト系ステンレス鋼の疲労試験は過去に多く行われているが、原子炉配管の実働温度領域である 300°C 程度で行われた疲労試験データは非常に少ない。また、配管にはショットピーニングが施されることがあるが、300°C においてショットピーニングが疲労挙動に及ぼす影響も十分に解明されていない。

そこで、本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の室温および 300°C での回転曲げ疲労試験を行い、中高温領域における疲労強度について検討するとともに、ピーニング材で 300°C において発生した内部き裂発生機構についても検討した。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材は、原子力プラントで主として配管として利用されるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。その化学成分は、C: 0.05, Si: 0.35, Mn: 1.47, P: 0.026, S: 0.001, Ni: 9.21, Cr: 18.25, Fe: bal. である。また、室温と 300°C における機械的性質を Table 1 に示す。試験片形状は、最小断面直径が 8mm の砂時計型試験片である。最小断面部をエメリー紙で順次研磨し、バフ研磨を施した後、試験に供した。ショットピーニング処理は、試験片の最小断面部を研磨後に施工した。施工条件を Table 2 に示す。以降、ショットピーニングを施した試験片を SP 材とする。

2.2 試験方法 疲労試験には、高温炉を具備した小野式回転曲げ疲労試験機を用いた。室温および 300°C 大気中にて、繰返し速度 $f=60\text{Hz}$ で試験を行った。試験終了後、走査型電子顕微鏡 (SEM) にて破面観察を行った。疲労試験前後において、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて硬さ測定を行った。また、TEM 試料作成用の小型ホッププレートにマイクロビッカー

ス硬さ計に組み込み、疲労試験温度である 300°C にて硬さ測定を行った。

3. 実験結果

3.1 疲労強度 Fig.1 に $S-N$ 曲線を示す。未処理材については、300°C では疲労限度が室温よりも約 100MPa 低下する。また、 10^6 回を超えるような高サイクル疲労領域では破壊が生じなかった。一方、ショットピーニングを施した材料では、疲労限度が室温で約 80MPa、300°C で約 60MPa 向上する。300°C では若干効果が減少するが、ショットピーニングが中高温域での疲労強度向上にも有効であることがわかる。また、300°C では高サイクル領域で疲労破壊が生じた。

3.2 破面様相 破面観察を行ったところ、未処理材では全て表面におけるすべり変形によりき裂発生した。SP 材についても、室温では表面起点型のき裂発生のみであった。しかし、SP 材の 300°C では Fig.1 中の * 印で示すように、長寿

Table 2 Conditions of ultrasonic shot peening process.

Peening machine	Ultrasonic shot peening
Peening media	SUJ2 $\phi 3.0\text{mm}$
Amount of media	136
Distance	25mm
Sonotrode amplitude	50 μm
Sonotrode frequency	20kHz
Work revolution	12r.p.m.
Peening time	180sec
Arc height	0.14mmC(0.35mmA)

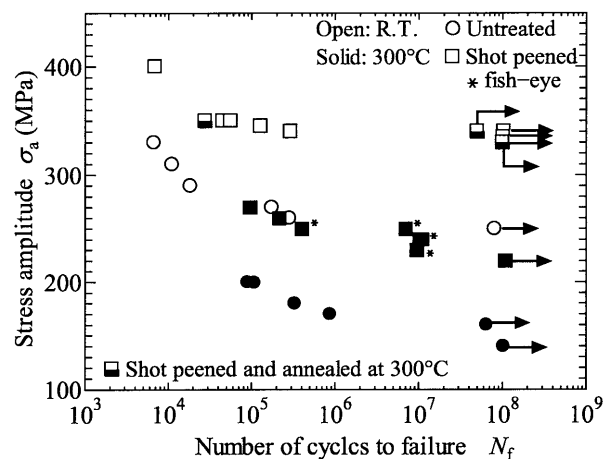
Fig.1 $S-N$ diagram.

Table 1 Mechanical properties of materials.

Temperature	0.2% proof Stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile Strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Vickers hardness HV
R.T.	246	594	80	158
300°C	150	423	46	121

命側で破断した4本の試験片について、フィッシュアイを伴う内部起点型のき裂発生が認められた。内部起点型き裂発生の破面様相を Fig.2, 3 に示す。起点部を反射電子像 (BEI) で詳細に観察したところ、中心部に介在物が認められたのは4本中1本のみ (Fig.3) であった。このように SUS304 では、SP 材の 300°C でのみ内部起点型のき裂発生が認められ、き裂は主として母材から発生していた。

4. 考 察

4.1 酸化皮膜の影響 SP材では、300°Cでのみ内部起点型のき裂発生が認められたが、300°C では試料表面に非常に薄いものの、硬い酸化膜が形成されるため、その影響でき裂発生起点が内部に遷移したことが考えられる。そこで SP 材を 10^7 回に相当する時間 300°C の高温にさらして表面に酸化膜を形成し、その後室温で疲労試験を行った。その結果を Fig.1 中に併記しているが、酸化膜のない SP 材と同程度の強度であり、高サイクル疲労領域での破壊は生じなかった。すなわち、300°C で形成される酸化膜は非常に薄く、き裂発生起点の遷移に対する寄与は小さいと考えられる。

4.2 硬さ分布 Fig.4 は、SP 材の表面から内部方向への硬さ分布である。室温および 300°C における疲労試験後の硬さ分布を測定し、試験前との比較を行った。試験前の状態では、硬さはショットピーニング処理により表面から約 0.6mm まで上昇し、最大値は表面近傍で 324HV であった。一方、試験後には、試験条件によらず加工硬化によって試験片内部の硬さが上昇している。ばらつきはあるものの、室温と 300°C では内部硬化の程度に大きな差はなく、試験中の硬さの変化がき裂発生起点の遷移の主因ではないと考えられる。しかし、実際の温度 300°C での硬さ分布が異なることが考えられるため、300°C で硬さ測定した結果を Fig.5 に示す。図

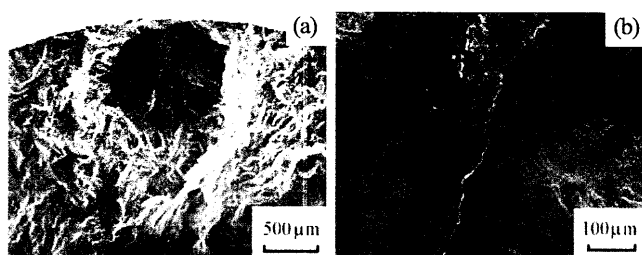


Fig.2 Fracture surfaces of SP material at 300°C ($\sigma_a=250\text{MPa}$, $N_f=7.0 \times 10^5$): (a) Fish-eye, (b) Magnified view at crack initiation site.

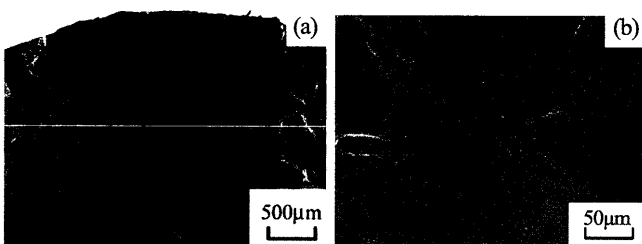


Fig.3 Fracture surfaces of SP material at 300°C ($\sigma_a=240\text{MPa}$, $N_f=1.0 \times 10^7$): (a) Fish-eye, (b) Magnified view at crack initiation site.

より、300°C での硬さは低下するが、表面近傍と内部との硬さの差は 180HV となり、室温の 158HV より硬さの差が大きくなる。このために、300°C ではき裂発生起点は内部に遷移しやすくなると考えられる。またこれに加えて酸化皮膜や動的時効なども関与した複合的な要因により内部への起点の遷移が生じたものと考えられる。

5 結 言

本研究では、超音波ショットピーニングを施した SUS304 を用いて室温と 300°C で疲労試験を行い、300°C で発生した内部起点型のき裂発生機構について検討した。その結果、昇温による軟化、酸化皮膜、動的時効などにより、内部でき裂は発生すると考えられる。(参考文献省略)

本研究は、九州電力㈱、北海道電力㈱、東北電力㈱、東京電力㈱、中部電力㈱、北陸電力㈱、関西電力㈱、中国電力㈱、四国電力㈱、日本原子力発電㈱、電源開発㈱からの受託研究として(社)日本溶接協会 原子力研究委員会 GCF3 小委員会で行われたものの一部である。ここに記して感謝の意を表します。

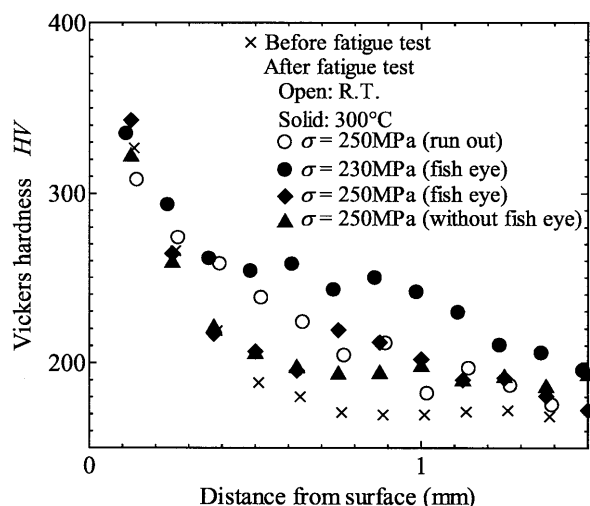


Fig.4 Vickers hardness of SP material as a function of distance from surface before and after fatigue test.

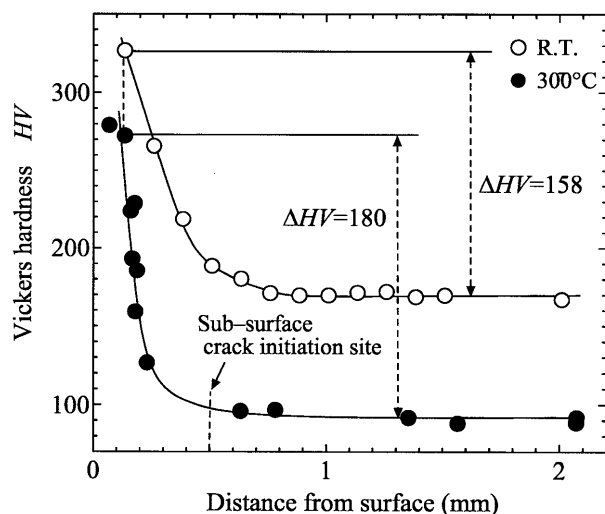


Fig.5 Vickers hardness of SP material as a function of distance from surface at R.T. and 300°C.