

ピーニング施工 600 系 Ni 基合金の 高温・応力負荷条件下での X 線残留応力その場測定

三菱重工 ○湯村友亮 前口貴治

In-situ X-ray Residual Stress Measurement of a Peened Alloy 600 Weld Metal at Elevated Temperature under Tensile Load

Tomoaki YUNOMURA and Takaharu MAEGUCHI

1 緒 言

加圧水型原子力プラントの一次系環境下で 600 系 Ni 基合金が使用されている部位では、応力腐食割れ (PWSCC : Primary Water Stress Corrosion Cracking) の懸念があり、この予防保全対策として、超音波ショットピーニング、ウォータージェットピーニングをはじめとした各種の残留応力改善技術が適用されている^{1),2)}。残留応力は機械的・熱的エネルギーの付与により減少(緩和)する。これは塑性変形やクリープ変形の結果、初期の弾性歪が非弾性歪に変換されるためである^{3),4),5)}。ウォータージェットピーニング(WJP : Water Jet Peening)を施工した箇所においても、熱時効や変動応力によって施工後の応力緩和が想定されるが、SCC 抑制の観点から、プラント寿命に相当する期間中において十分な残留応力改善効果が持続することが必要である。

そこで本研究では WJP を施工した 600 系 Ni 基合金溶接金属を対象とし、高温保持・一定応力負荷の条件下で実験室 X 線によって表面応力(残留応力及び負荷応力)のその場測定を行い、表面応力緩和挙動の確認を行った。

2 実施内容

2.1 試験片

供試材は、600 系 Ni 基合金である 132 合金の溶接金属とした。化学成分を Table 1 に示す。試験片形状は Fig.1 に示す板状試験片とし、試験片中央部には、加圧水型プラント炉内溶接部と同条件で WJP 施工を行った。なお、本試験片は平行部の幅が 4mm と小さく、WJP 施工した表面の塑性変形の拘束が実機施工部よりも小さいことから、WJP による残留応力改善効果は小さい。

Table1 Chemical composition of alloy 132 specimen(mass%).

C	Si	Mn	P	S
0.04	0.21	2.80	0.004	0.003
Cu	Ni	Cr	Nb+Ta	Fe
0.02	71.4	14.43	1.86	8.88

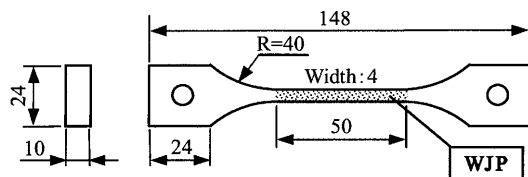


Fig.1 Dimensions of specimen.

2.2 試験機

本実験のために製作した応力負荷試験機を Fig.2 に示す。実験室 X 線装置での表面応力測定を可能とするため、試験片を水平に設置・負荷できる構造とした。試験片加熱用ヒータには、Fig.3 に示すように、測定部の直上部分に $4 \times 4 \text{ mm}^2$ の開口部を設け、さらに入射 X 線および回折 X 線を妨げないための必要最小限の切欠を設けた。また、試験片固定治具への熱伝導による温度低下を防ぐため、試験片両端の固定治具にも別途ヒータを設置した。実験室 X 線装置にはリガク製 PSPC-MSF2M を用いた。

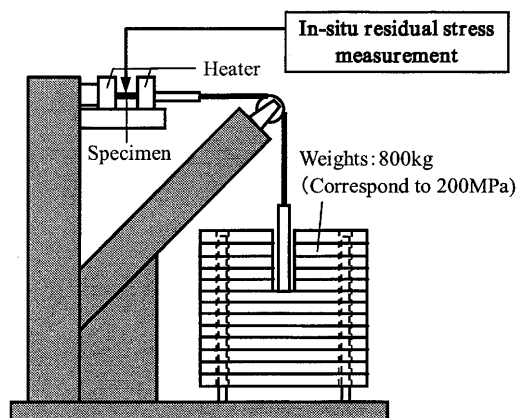


Fig.2 Schematic illustration of loading equipment.

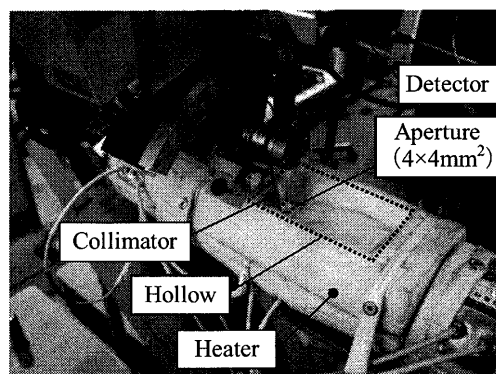


Fig.3 X-ray residual stress measurement fixture.

2.3 試験方法

試験条件を Table 2 に示す。実機プラントの WJP 施工部位においては、最高約 320℃の温度となり、さらに内圧による引張応力(130MPa)の発生が想定されることから、この環境を加速模擬した条件を設定した。また、X線応力測定条件を Table 3 に示す。応力定数は、過去に 600 系 Ni 基合金を対象として実験的に測定した-316MPa を使用した。この応力定数は、表面を電解研磨した板状試験片を用いて、室温で応力を数水準に変化させた曲げ応力負荷を行い、負荷応力に対して $\sin^2\phi$ 線図の勾配をプロットした回帰直線の傾きから求めた値である。一般的に、高温になると応力定数は減少すると考えられるが、室温および 360℃において、ポアソン比をそれぞれ 0.3 と仮定し、応力測定での X 線回折角および機械的ヤング率にて応力定数を算出した場合には、両者はほぼ同等であった。本研究では高温での応力緩和挙動の把握を主眼に置いており、室温状態からのひずみの相対的な変化について確認できることから、室温の応力定数を使用することとした。360℃での測定では、試験片の測定位置直近部に R 熱電対を 2 箇所取り付け、試験片の表面温度が一定となるように温度調節器で制御を行いながら、無負荷または応力負荷中の表面応力をその場測定した。

Table 2 Test conditions.

Loaded stress	0, 200MPa
Temperature	Room temperature, 360℃
Heating time	1000hr maximum

Table 3 Conditions of X-ray stress measurement.

Characteristic X-ray	CrK β
Diffraction plane	Ni 311
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Method	Side-inclination
Collimator	2×2 mm ²
Diffraction angle 2 θ	152deg
$\sin^2\phi$	0~0.42
Oscillating angle	±3 deg
X-ray stress constant K	-316 MPa/deg
Peak determination	Full width at half maximum
Measurement direction	Loading direction

3 試験結果および考察

無負荷の場合と 200MPa の引張応力を負荷した場合の表面応力の緩和挙動を Fig.4 に示す。

無負荷の場合、温度を室温(R.T.)から 360℃へ昇温した際に若干の応力緩和が認められた。これは加熱による応力再配分、遷移クリープによる弾性歪の減少によって生じたと推定される。しかし、温度が 360℃に到達した後は、時間の経過に対して緩和はほぼ認められず一定の圧縮の表面応力を保持していた。

引張応力を負荷した場合には、負荷直後に圧縮の表面応力が減少した。この減少量は負荷応力 200MPa とほぼ等しい。その後、昇温や 360℃での保持中の応力緩和挙動は無負荷の場合とほぼ同様であり、明確な緩和がなく、ほぼ負荷応力分だけ表面応力が減少している結果であった。

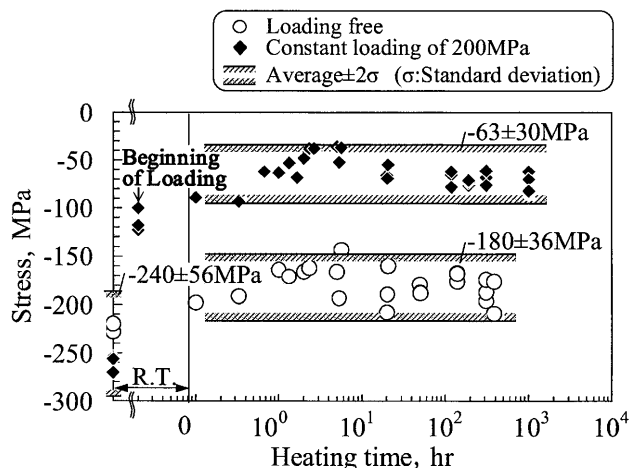


Fig.4 Result of surface stress measurement at R.T. and 360℃.

4 結 言

WJP を施工した 600 系 Ni 基合金の溶接金属(132 合金)を対象として、実験室 X 線による応力のその場測定により、高温引張条件下における表面応力の緩和挙動を以下の通り確認した。

- (1) 360℃の高温保持中においては、初期に圧縮の表面応力の有意な緩和が生じるが、その後は顕著な緩和が生じないことを確認した。
- (2) さらに、360℃で実機定常運転中の発生応力を模擬した弾性範囲内の引張応力(200MPa)を負荷した状態においても、圧縮の表面応力の緩和は認められなかった。

参考文献

- 1) 河野文紀, 大屋寿三, 沖村浩司, 名倉保身, 太田高裕: 材料力学部門分科会・研究会合同シンポジウム講演論文集, p.199 (2000).
- 2) 沖村浩司, 堀展之, 向井正行, 増本光一郎, 鴨和彦, 黒川政秋: 三菱重工技報 Vol 43, No.4 p.41 (2006).
- 3) O.Vohringer: Institut für Werkstoffkunde I, p.47 (1984).
- 4) H.Holzappel, V.Schulze, O.Vohringer, Macherauch: Conf Proc: ICSP-6, p.413 (1996).
- 5) P. Krull, Th. Nitschke-Pagel: Conf Proc: ICSP-7, p.318 (1999).
- 6) 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会: X 線応力測定法標準 (2002 年版) -鉄鋼編-, p.6 (2002).