ニッケル基超合金 *Alloy706* のレーザピーニングによる応力改善*

千田 格^{*1}, 角谷 利恵^{*1}, 吉岡 洋明^{*1}, 斎藤 大蔵^{*2}, 澤 徹^{*2}
小林 大輔^{*3}, 伊藤 明洋^{*3}, 宮部 正道^{*3}, 鍵谷 幸生^{*3}

Residual Stress Improvement of Nickel Base Superalloy *Alloy 706* by Laser Peening

Itaru CHIDA^{*1}, Rie SUMIYA, Yomei YOSHIOKA, Daizo SAITO, Tetsu SAWA,
Daisuke KOBAYASHI, Akihiro ITO, Masamichi MIYABE and Yukio KAGIYA

^{*1} Toshiba Corporation
8 Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8523 Japan

Some cracks were found at the first stage discs of gas turbine rotors made of Ni-base superalloy. There were inter-granular cracking and observed to be highly stressed and damage sensitive locations with less potential for oxidation, which is thought to occur due to hold-time cracking. In this study, laser peening technology was developed to improve fatigue properties of Ni-base superalloy *Alloy 706*, and the effects on the material properties were examined. Laser peening is a novel process to induce compressive residual stress on material surface by irradiating focused high-power laser pulses. Several durability tests, such as thermal aging treatment test and stress aging test, were performed under thermal power plant operation conditions, and the effectiveness of laser peening treatment was confirmed.

Key Words : Gas Turbine, *Alloy706*, Laser Peening, Thermal Aging

1. 緒 言

ガスタービンロータは高い信頼性を要求される部材であり、運転中の温度や負荷される応力に対応するため Ni 基超合金などの高強度材が適用されているが、1300℃級ガスタービン初段動翼植込み部(材質: *Alloy706*)において劣化損傷事象の発生が確認された⁽¹⁾。原因は負荷応力によりき裂先端の粒界酸化が加速される粒界脆化現象(ホールドタイムクラッキング)に起因すると考えられているが、その詳細については明らかにされていない。材料疲労強度を向上させる 1 つの方法としてレーザピーニング(Laser Peening, 以下 LP)があり、東芝では 12Cr 鋼製の低圧蒸気タービン翼フォーク部への適用を開始している⁽²⁾。本研究では、ロータ材の疲労強度向上を目的として Ni 基超合金 *Alloy706* に LP 施工を行い、ピーニング効果の確認と耐久性評価を行ったので、以下に報告する。

2. レーザピーニングの基礎プロセス

LP の基礎プロセスを図 1 に示す。レーザのパルス時間幅を数 ns まで短パルス化し、数 GW/cm² という高い出力で材料に照射すると、材料の表層がプラズマ化して表面に高圧の金属プラズマが発生する。水中では、水の慣性でプラズマの膨張が妨げられて狭い領域にレーザのエネルギーが集中するため、プラズマの圧力は空気中の 10~100 倍となり瞬間的に数 GPa に達する。発生した金属プラズマの圧力により衝撃波が発生し、材料表面で衝撃波による動的な応力によって塑性変形が生じ、周囲の未変形部から拘束を受けることによって材料の表層に高い圧

* 原稿受付 2012 年 8 月 28 日

^{*1} 正員, (株)東芝 (〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8)

^{*2} (株)東芝

^{*3} 中部電力(株)

E-mail: itaru.chida@toshiba.co.jp

縮残留応力が形成される．LP の光源には，水に吸収されにくい Nd:YAG レーザの第 2 高調波(波長 532nm)のパルスレーザを用いることで，水中の構造物への適用を可能とした⁽³⁾．LP は，ショットピーニングやウォータージェットピーニング等の他のピーニング技術に比べ，高压の気体や液体の噴流を伴わないために，装置先端の小型化が容易で光ファイバによるレーザ伝送と組み合わせることで狭隙部への施工性に優れている．また，レーザ光は時間的，空間的な制御性に優れるため，施工範囲すべての応力改善を確実に行うことが可能であり，施工対象部以外の周囲の構造物に対して影響を与えることがない．東芝では，原子炉炉内構造物の応力腐食割れ予防保全のほか，疲労強度向上を目的として低圧蒸気タービン翼フォーク部についても LP 施工実績があり，ガスタービンロータへの適用も可能と考えている⁽³⁾⁽⁴⁾．

Fig.1 Schematic diagram of laser peening process

3. 供試材及び試験方法

供試材は，Ni 基超合金 *Alloy706* を用いた．化学成分を表 1 に示す．LP 施工材の材料評価として，図 2 に示すような形状の試験片を用いて熱時効試験及び応力時効試験を実施した．

Table 1 Chemical composition of *Alloy706*

wt%				
Ni	Cr	Fe	Nb	Ti
41.37	16.37	Bal	2.9	1.66
Al	C	S	P	B
0.2	0.015	<0.005	0.006	0.0039

(a) Thermal aging treatment

Test Temperature: 450°C

Test Temperature: 450°C

(b) Thermal and stress aging test

Fig.2 Shape and dimension of the specimens

熱時効及び応力時効試験条件を表 2, 3 に示す. 尚, 試験温度として選定した 450℃は実機ガスタービンプラントで想定される最も高い運転温度であり, 加速試験として 500℃についても試験を実施した. また応力時効試験については, 試験片形状を丸棒階段状とすることで一度に異なる応力を負荷した状態で応力時効試験を行えるようにした.

Table 2 Thermal aging test condition

Temperature (°C)	Aging time (hrs.)
450	100,1000,3000
500	

Table 3 Thermal and stress aging treatment test condition

Temperature (°C)	Aging time (hrs.)	Stress (MPa)
450	11746	800, 900, 1000
500	11747	700, 800, 900

LP 施工条件を表 4 に示す. LP 施工部位は図 2 に示すように平板及び丸棒形状試験片表面である. LP 施工後の試験片について, 熱時効試験及び応力時効試験前後の外観観察, 断面組織観察, ならびに X 線回折を用いた残留応力測定を実施し, 実機と同等の温度と応力を負荷した場合の残留応力変化について評価を実施した.

Table 4 Laser peening condition

Pulse Energy	200mJ
Spot Size	φ 0.6mm
Pulse Number Density	45 pulses/mm ²

4. 試験結果

LP 施工材の熱時効試験前後の外観観察及び断面組織観察結果を図 3 に示す. LP 施工面は, 熱時効処理により表面の色が変化しているものの, 特異な変化は認められなかった. また断面組織については, 熱時効処理温度及び時間の影響は認められなかった.

熱時効処理前後の LP 施工部の表面残留応力測定結果を図 4 に示す. いずれの試験温度でも熱時効処理により圧縮残留応力は低下する傾向が認められたが, 3000 時間経過後も -500MPa 以下の圧縮残留応力が維持されることが確認された.

熱時効処理後の LP 施工部の内部残留応力測定結果を図 5 に示す. 図 4 に示した表面残留応力測定結果と同様に, いずれの試験温度でも熱時効処理により深さ方向の圧縮残留応力は低下する傾向が認められたが, 3000 時間経過後も深さ 500 μm まで圧縮残留応力が維持されていることが確認された.

Fig.3 Appearance and microstructures of peened specimens after thermal aging test

Fig.4 Relationship between residual stress and aging time

Fig.5 Effect of thermal aging temperature on residual stress distribution beneath the surface (Aging time: 3000h)

応力時効試験後の LP 施工材について、表面の軸方向残留応力測定結果を図 6 に示す。表面の軸方向残留応力に負荷応力依存性が認められ、1000MPa では引張となったが 900MPa 以下では試験温度によらず圧縮残留応力が維持されることが確認された。

Fig.6 Surface residual stress after thermal and stress aging treatment test

5. まとめ

Alloy706 に LP 施工した試験片を用いて材料評価を実施し、実機運転温度より高い 500°C においても圧縮残留応力が維持されること、また応力負荷状態でも 900MPa まで圧縮残留応力が保たれ、ピーニング効果と材料の耐久性向上効果が確認された。尚、本論文に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があるので、予め御承知置き願います。

文 献

- (1) D. Kobayashi, Akihiro Ito, M. Miyabe, Y. Kagiya, Y. Yoshioka, "Crack Initiation Behavior and Its Estimation For a Gas Turbine Rotor Based on the EBSD Analysis", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012*, GT2012-68226, Copenhagen, Denmark (2012).
- (2) I. Chida, K. Hirota, Y. Sano, H. Sasaki, R. Sumiya, T. Inukai, I. Murakami, H. Nomura, "Development of laser peening technology for low pressure turbine blades", *Proceedings of the 19th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE19-43291, Makuhari, Chiba, Japan (2011).
- (3) 佐野 雄二, 依田 正樹, 向井 成彦, 小畑 稔, "レーザーピーニング現象の観察とモデル化", *レーザー研究*, Vol.26 No.11 P793-799(1998).
- (4) I. Chida, M. Yoda, N. Mukai, Y. Sano, M. Ochiai, T. Miura, R. Saeki, "Laser based maintenance technology for PWR power plants", *Proceedings of the 13th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE13-50334, Beijing, China (2005)