

表面処理による金型鋼の機能性向上に関する研究（第1報）

八代浩二, 佐野正明, 倉元眞實*1, 堀越康弘*2, 金子 亮*3, 中田七生*4

Study on Increase of the Function for Die Steel by Surface Treatment (1st report)

Koji YATSUSHIRO, Masaaki SANO, Makoto KURAMOTO,
Yasuhiro HORIKOSHI, Makoto KANEKO, Nanao NAKATA

要 約

熱疲労試験により、熱間金型鋼（JIS-SKD61, AISI-H13）へのレーザーピーニング処理の適用性を検討した。

熱疲労試験前、レーザーピーニング処理面の残留応力は、約-1000MPaであった。また、付与された圧縮残留応力の深さは約1700 μ mであった。試験過程において、レーザーピーニング処理部は非処理部に比べて圧縮残留応力が高い状態で推移した。試験後、レーザーピーニング処理部の圧縮残留応力は、ほとんど消失した。クラック測定の結果、レーザーピーニングによるクラック成長の抑制効果が示された。

Abstract

Application of laser peening for hot work die steel (JIS-SKD61, AISI-H13) was investigated by thermal fatigue test. Before the test, residual stress on the specimen of laser peened surface was about -1000 MPa. And the depth of produced compressive stress was about 1700 μ m. During the test, compressive residual stress of laser peened area was higher than that of not laser peened area. After the test, compressive residual stress on laser peened area was almost disappeared. The increase of crack growth resistance by crack measurement.

1. 緒 言

素形材産業は、近代の工業製品の製造において不可欠なものである。その中でも工具である金型の製造、使用および管理技術は非常に重要である。近年の慢性化した景気低迷の中でも、これらの技術力の向上は、製品の製造コスト削減、品質向上ならびに安定生産に大きく寄与できる。

表面処理技術の金型への適応は日本国内が先行しており、安価な労務費で生産を行うアジア近隣諸国への対抗策として、有効な技術になるものと考えられる。

本研究は、金型鋼への種々の表面処理技術の適用により、金型表面の耐熱衝撃性、焼付き性、摺動摩耗、耐酸化性等を改善することを目的とする。これにより、金型表面の機能性が向上し、工業製品の製造コストを低減させることが可能となる。

本年度は、熱間金型を対象に表面処理による耐熱疲労特性の改善を試みた。表面処理は、国内でも研究事例が

少ないレーザーピーニング処理¹⁾（以下「LP処理」と呼ぶ）を対象にした。

レーザーピーニングは、試料表面の水膜にレーザーを照射し、発生したプラズマの衝撃波で表面近傍に残留応力を付与する方法で、近年工業的な応用事例が報告され始めた技術である。現在、国内では原子力発電所におけるステンレス配管の応力腐食割れ対策への応用例²⁾が報告されているのみである。

LP処理は、従来の機械的なショットピーニングより深い領域まで残留応力の付与が可能であり、常温における疲労強度の向上も報告されている³⁾。よって、熱間金型における熱疲労特性の向上が期待できるが、これに関する研究は報告されていない。

本研究では、熱間金型用合金工具鋼（JIS-SKD61、以下「熱間金型鋼」と呼ぶ）試験片に、LP処理を施した。そして、熱疲労試験を行い、X線応力測定および試験後のクラック測定等により、LP処理の熱間金型への適用性を検討した。

2. 実験方法

2-1 試験片

実験に用いた素材は、熱間金型鋼である。素材を試験

* 1 職業能力開発総合大学校

* 2 (株)カナック

* 3 (株)京三製作所

* 4 (株)ワカイダエンジニアリング

圧縮残留応力を示した。残留応力は、表面から内部へ深さが増加するとともに徐々に減少し、約1800 μm で0MPa近傍へ収れんした。

NLP部において、最表面には機械加工に起因した-500MPa程度の圧縮残留応力が存在した。しかし、初回の電解研磨により50 μm 程度除去すると、残留応力はほぼ0となった。

Fig. 4 は、熱疲労試験前におけるLP部およびNLP部のX線回折プロファイルを示す。

両者ともに αFe のみが観察された。測定に用いた αFe211 回折を比較すると、どちらも同様なピーク形状であった。これらの半価幅はLP部で約2.6, NLP部で約2.4であり、LP部の方がやや大きな値を示した。

熱間金型に多く適用される窒化処理は、不均一ひずみの付与でピークがブロードニングし、半価幅値が大きくなることが多い(例えば、前報⁹⁾では約5.5)。

しかしながら、LP部とNLP部を比較すると半価幅の差は小さい。よって、窒化処理と比較すると、LP処理により付与されるひずみは均一ひずみに近いと考えられる。このように、LP処理と窒化処理で残留応力の付与されるメカニズムは異なるものと考えられる。

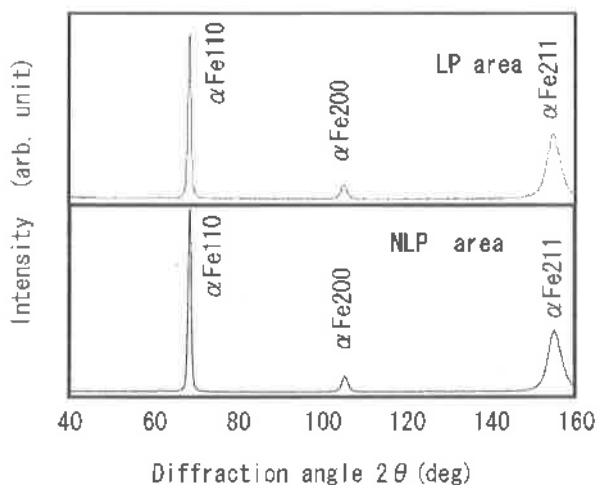


Fig. 4 X-ray diffraction profiles

3-2 試験過程の変化

Fig. 5 は、熱疲労試験サイクル毎の残留応力変化を示す。LP部において、試験前に存在した約-1100MPaの高い残留応力は、101サイクルの試験後で-600MPa程度まで急激に低下した。その後、残留応力値は試験サイクル数の増加とともに徐々に低下し、-400MPa近傍へ収れんした。

一方、NLP部は試験前に約-500MPaの残留応力が存在し、試験サイクル数の増加とともに徐々に減少する傾向を示した。

10⁴サイクルの試験以降は、両者ともに同様な傾向を示

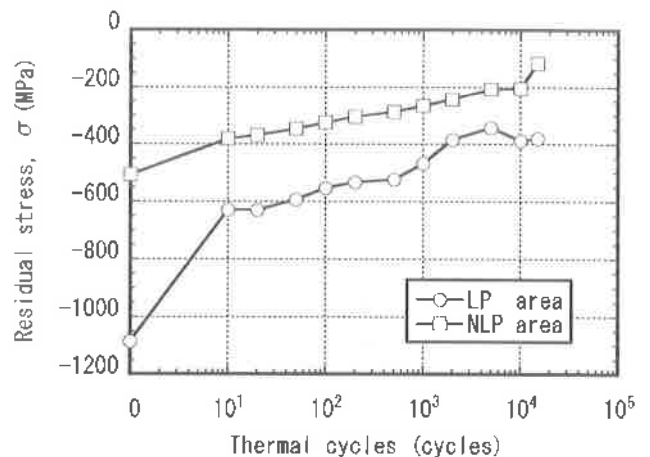


Fig.5 Changes of residual stress during the thermal fatigue test

したが、LP部の方が試験全域において200MPa程度大きな圧縮応力で推移した。

3-3 試験後の評価

Fig. 6 は、熱疲労試験後における試験片表面の外観を示す。図中において、白枠内部がLP照射部である。なお観察は、バフ研磨により表面に形成した酸化物を一部除去して行った。

NLP部では、クラックが亀甲状に形成され、いわゆるヒートチェックとなっている。それに対し、LP部では明確なクラックは観察されなかった。

これらの表面状態をより詳細に検討する目的から、#600のエメリー紙で酸化層を除去し、金属顕微鏡による観察を行った。その結果をFig. 7 (a), (b) に各々示す。

LP部 (a) において、開口部が10 μm 程度の微細なクラックが、約50 μm の間隔で格子状に形成している状況が観察された。NLP部 (b) では、開口部が200 μm 程度の大きなクラックのみが観察され、LP部に存在したような微細なクラックは認められなかった。

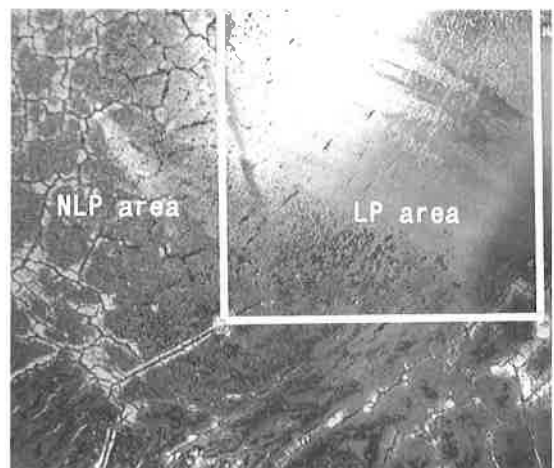
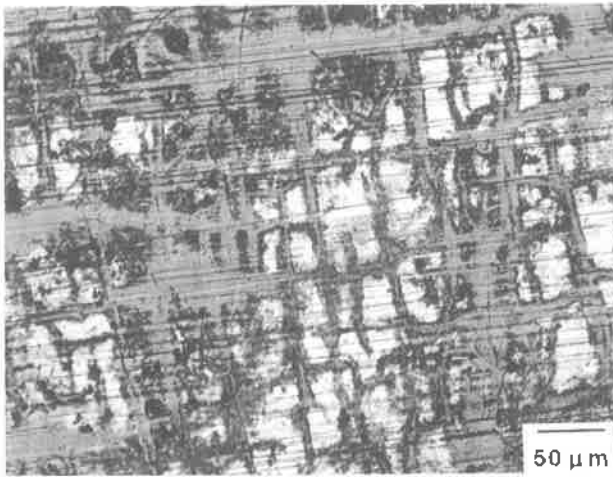


Fig. 6 Observation of specimen surface after the test



(a) LP area



(b) NLP area

Fig 7 Microphotographic observation to specimen surface after the test

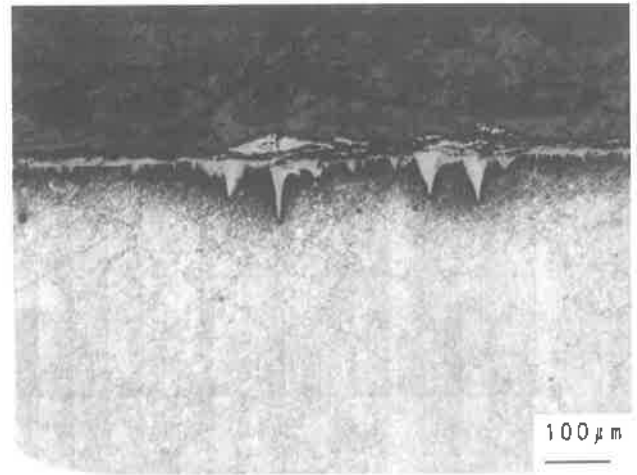
Fig. 8 (a), (b) は、熱疲労試験後の試験片断面写真を示す。なお、観察はナイトール液で腐食して行った。LP部 (a) において、開口部に酸化物を伴った長さ約 $100\mu\text{m}$ のクラックが数本観察された。また、これらのクラックの他に、 $10\text{--}20\mu\text{m}$ 程度の微細なクラックが多く観察された。

NLP部 (b) において、観察視野を越える深いクラックが観察された。このクラックは広い開口部を有しており、前述の表面観察の結果と対応を示した。

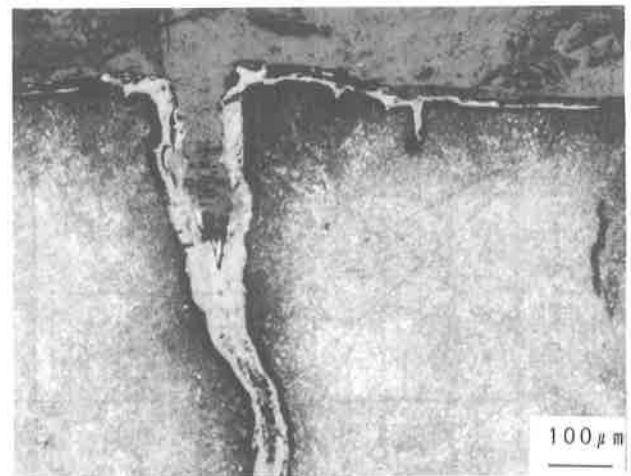
Fig. 9 は、試験後の断面に認められた最大クラック長さおよびクラック数を示す。

LP部およびNLP部における最大クラック長さを比較すると、前者の約 $170\mu\text{m}$ に対し、後者は約 $1700\mu\text{m}$ であり、LP処理によりクラック長さは約 $1/10$ となった。

また、同様に、両部位におけるクラック数を比較すると、前者が約200本、後者が約100本であり、LP照射によりクラック数は増加する傾向を示した。



(a) LP area



(b) NLP area

Fig. 8 Observation of sectional area of each specimen after the test

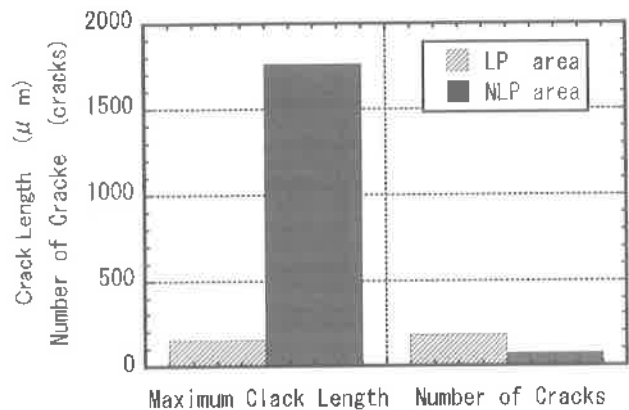


Fig. 9 Result of crack measurement

Fig.10は、測定されたクラック分布を示す。

両部位を比較すると、LP部は $50\mu\text{m}$ 以下の微細なクラックが多い。NLP部は、 $100\mu\text{m}$ 以上のクラックが多く、Fig. 8で示した断面観察の結果を良く反映している。

Fig.11は、熱疲労試験後における表面から内部への残留応力分布を示す。なお、参考として、Fig. 3 に示した試験前の値を併記した。

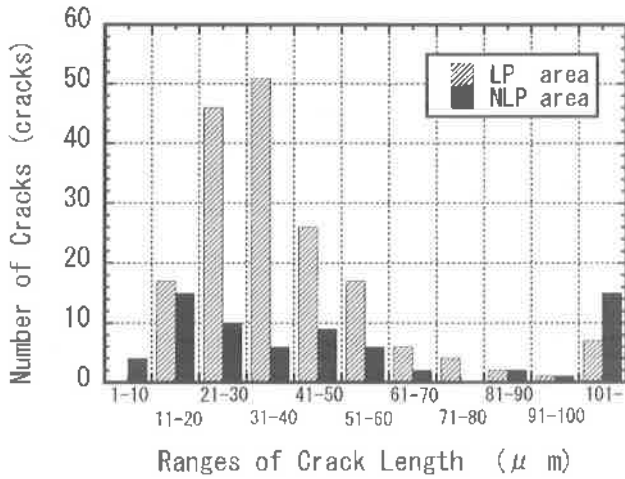


Fig.10 Distribution of crack length

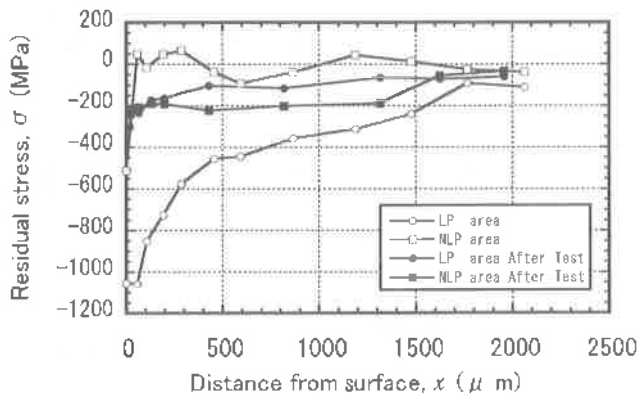


Fig.11 Distribution of residual stress for the specimens after test

LP部は、表面近傍で-200MPa程度の圧縮残留応力が存在し、内部への距離の増加とともに、緩やかに減少した。NLP部においても同様な傾向を示した。

LP部では表面から約400 μ mの深さで応力値が100MPaに収束したが、NLP部では、表面近傍から約1300 μ mの領域まで約-200MPaで推移した。これらの残留応力の存在深さは、各々の部位におけるクラックの存在深さと対応する。よって、試験後における残留応力は、発生したクラック内部に形成した酸化物によるくさび効果に起因したものと考えられる。

LP部においては、試験前に付与された残留応力が試験過程の加熱により、ほぼ消失した。しかし、写真観察およびクラック測定の結果からも明らかなように、LP処理のクラック抑制効果が確認された。

これは、Fig. 5 で示したように、試験過程において表面の圧縮応力が高い値で推移したことで、クラックの進展速度が抑制された結果と考えられる。

4. おわりに

熱疲労試験を行い、LP処理の熱間金型への適用性を検討した結果を以下に示す。

- 1) 試験片表面から内部方向への残留応力分布測定において、LP部では、最表面近傍は-1000MPaを越える高い圧縮残留応力を示した。残留応力の存在領域は、約1700 μ mであった。
- 2) 熱疲労試験過程の残留応力測定結果において、試験全域にわたりLP部が200MPa程度大きな圧縮応力で推移した。
- 3) クラック観察および測定から、LP照射によるクラックの抑制効果が確認できた。特に、LP部の最大クラック長さは、NLP部の1/10であった。
- 4) 熱疲労試験後における表面から内部への残留応力分布測定において、試験前に付与された残留応力が試験過程の加熱により、ほぼ消失していた。

最後に、本研究にあたり、試験片の作成に協力いただいた、TransPacific Connections社、内海和男氏に厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) B.P.Fairand, A.H. Clauer : Industrial Applications of High Power Laser Technology,86,pp.112-119 (1976)
- 2) 佐野雄二 他：日本原子力学会誌, pp.59-64 (2000)
- 3) J. K. Gregory, H. J. Rack, D. Eylon : Surface Performance of Titanium, pp. 217-230 (1996)
- 4) 八代浩二, 日原政彦, 佐野正明, 岡田勝藏, 倉元眞實：日本材料学会 第36回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, pp.59-64 (2000)