

SUS 304ステンレス鋼の疲労特性向上に及ぼす表面 塑性加工と段階的漸増負荷の効果

大 島 聡 範*・林 忠 夫**・
清 水 宏 朗***・長 門 茂 明****

Improvement in the Fatigue strength of SUS304 Stainless Steel
by means of Surface Plastic Deformation Followed by
Gradually Increased Loading

Toshinori OHSIMA, Tadao HAYASHI,
Hiroaki SHIMIZU and Shigeaki NAGATO

Abstract

Improvement in the rotating bending fatigue strength of SUS304 stainless steel by means of surface rolling and burnishing processings followed by gradually increased loading utilizing “coaxing” effect are studied. The results are interpreted on the basis of strain induced martensite and residual compressive stress produced by the processings. Burnishing has proved superior to rolling for the improvement in the fatigue strength.

1. 緒 言

表面に最大応力の発生する曲げ、ねじりなどの負荷条件における構造材料の疲労強度を向上させるために、各種の表面強化法が行われているが、材料の表面に塑性変形を与えて加工硬化層を形成する表面塑性加工法は、比較的簡便で低コストの方法として効果を上げている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。表面塑性加工による疲労強度向上は、主として塑性加工にともなう加工硬化層の形成と、圧縮残留応力の発生によってもたらされるものであるから、被加工材の加工硬化特性と密接に関係している。熱処理による強化の期待できないオーステナイト系ステンレス鋼は、加工誘起マルテンサイト変態の発生による加工硬化性が大いなので、表面塑性加工による強化が有効であり疲労強度の向上が期待される。さらにこの種の材料は降伏比が小さいことから、疲労限度付近で多数回の繰返し負荷を与えることによって、いわゆるコーキシング効果が発生

し、疲労強度がさらに向上することも期待される⁽⁴⁾。しかしながら、オーステナイト系ステンレス鋼の疲労特性向上のために表面塑性加工を適用した例は少なく、さらにコーキシング効果を利用してその改善を図った例はほとんど見当たらない。本報では以上の観点から、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304対象に、円盤状ロール工具による表面ロール加工、および丸棒状工具による表面バニシ加工を行い、さらに表面塑性加工後に応力を段階的に増加させたつつ繰返し負荷を与えた場合の、コーキシング効果にともなう疲労特性の向上について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

供試材は市販のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304の丸棒であり、旋削によって図1に示す寸法形状の環状切欠回転曲げ疲労試験片を製作した。切欠部の形状係数は $\alpha = 1.33$ 、切欠係数は $\beta = 1.16$ である。表面の塑性加工は図2に示す(a)表面ローラ加工工具および(b)表面バニシ加工工具を旋盤の刃物台に固定し、旋盤のチャックと回転センターによって保持されて回転している試験片の環

* 教授 機械工学科
** 技官 機械実習工場
*** シチズン時計(株)
**** スガノ農機(株)

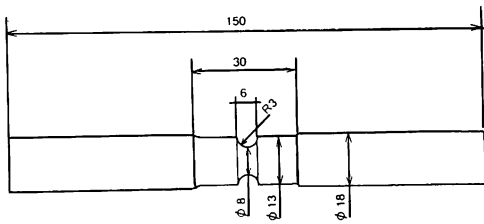
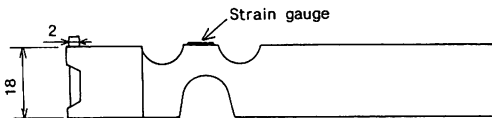
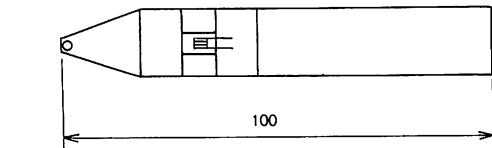
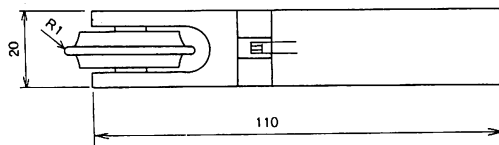


Fig. 1 Specimen geometry



(a) Burnishing tool



(b) Rolling tool

Fig. 2 Surface processing tool

状切欠表面に押しつけ、工具に貼付したひずみゲージで押付け力を測定して行った。ローラ工具は直径35mm、先端部半径1mmの円盤、パニシ工具は直径2mmの丸棒であり、いずれも高炭素工具鋼の焼入れ、低温焼戻しである。加工条件は、押付け力300 N、送り0.102mm/rev、試験片の回転数は65 rpmとした。疲労試験は容量30kg-mの回転曲げ疲労試験機を使用し、疲労試験中の試験片のたわみはダイヤルゲージで、また、表面温度は熱電対表面温度計で測定した。加工表面の粗さは触針式の粗さ測定機で測定し、また、表面の残留応力および加工誘起マルテンサイト量は自動X線回折装置によって測定した。

3. 実験結果および考察

図3は表面ローラ加工および表面パニシ加工を行った試験片の疲労試験結果を示す。

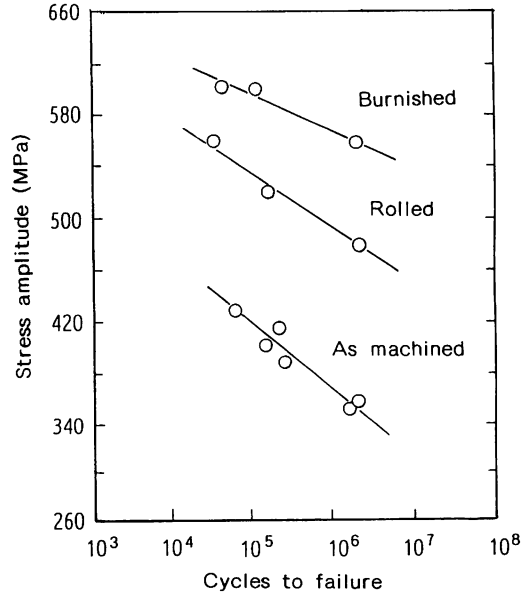


Fig. 3 S-N curves of burnished, rolled and as machined specimens.

ローラ加工材およびパニシ加工材の両者ともに疲労強度は大幅に増加し、表面塑性加工による疲労特性の改善効果が認められる。ここで 2×10^6 回における時間強度を指標として、未加工材に対する疲労強度の増加比を求めれば、ローラ加工材の1.33に対してパニシ加工材は1.55となり、疲労特性改善に対する表面パニシ加工の優位性が明確に認められる。図4は表面塑性加工をおこなった

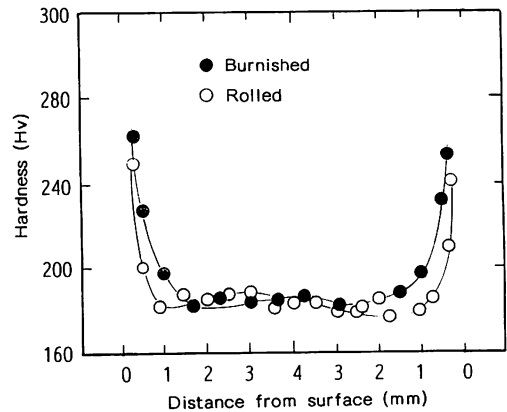


Fig. 4 Hardness distribution of burnished and rolled specimens.

試験片の断面硬さの分布を示す。パニシ加工材はローラ加工材に比べて表面附近において硬さの増加が著しい。したがって、パニシ加工の優位性は硬さ以外の、圧縮残留応力などによるものも含まれると考えられるが、図3における疲労強度増加は表面の塑性加工に伴う加工硬化によるものであり、SUS 304がオーステナイト系ステンレス鋼であることから、その主因はオーステナイトの塑性変形によって発生した加工誘起マルテンサイト変態であると考えられる。なお、加工表面におけるマルテンサイトの形成および残留応力の発生はX線回折によって確認されているが、これについては後述する。

ここで、コーキシング効果による疲労強度の向上を目的として、段階的に負荷を増加させる負荷漸増試験を行った。図5はその方法の概念を示す。すなわち、第一段階として疲労限度をわずかに下回る応力をかけて、破断の生じない範囲で出来る

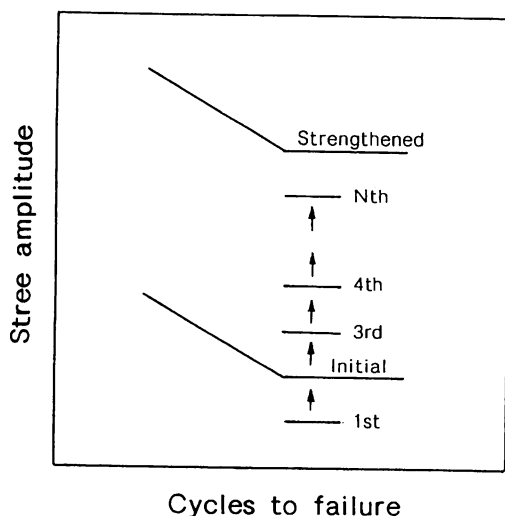


Fig. 5 Schematic representation of coxing effect.

だけ多くの繰返し負荷を与える。次に、第二段階として応力を増加して同様に繰返し負荷を与える。このようにして、第三、第四と負荷を増加させてゆくことによって、疲労限度の増加が得られる。本実験では、各段階の応力増加幅を40 MPaとして 2×10^6 回の繰返し負荷を与えた。表1は負荷漸増による疲労強度向上の結果を示す。未加工材、ローラ加工材およびパニシ加工材において、いずれもコーキシング効果による疲労強度の増加が認められるが、パニシ加工材における疲労強度の増加は前二者と比べて大きく、 2×10^5 時間強度に

Table 1 Improvement in fatigue strength of SUS304 by coxing effect compared with conventional surface plastic deformation

	Fatigue strength (MPa)	
	Conventional	Coxing
As machined	360	400
Surface rolled	460	510
Surface burnished	560	680

において、最高強度は680 MPaに達した。

図6は未加工材、パニシ加工材およびパニシ加工+段階負荷強化材における断面硬さの分布を示す。パニシ加工後の段階負荷によって硬化深度が著しく増加している。段階負荷による疲労強度の増加は、負荷の増加につれて表面から内部に向かって塑性変形域が拡大し、加工誘起マルテンサイト変態にともなう硬化層の深度が増加したことによるものと考えられる。ここで、図6の硬さ分布曲線について、未加工材の硬さを基準値とした硬さの積分値を求め、これを硬さ増加量として定義し、疲労強度の増加量との関係を示せば図7のように直線関係となる。したがって、疲労強度の向上は硬化層の増加によるものであることがわかる。

図8は段階負荷による強化機構の概念を示す。未加工材においては、曲げモーメントによる引張

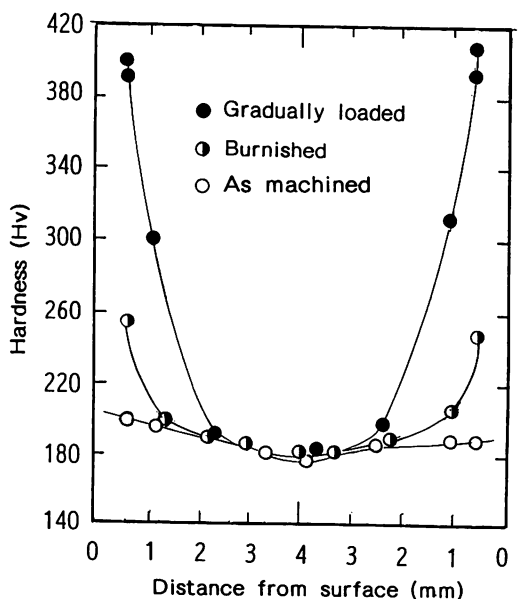


Fig. 6 Hardness distribution of coxing strengthened specimens.

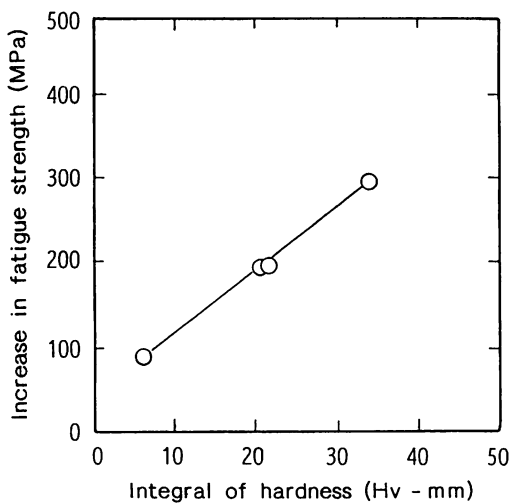


Fig. 7 Relationship between increase in fatigue strength and integral of hardness.

り応力 σ が材料の降伏強度 σ_y を越えると、応力の繰返しに伴う疲労損傷によってき裂が発生し破壊に至る。一方、表面加工材では、表面が強化されているので引張り応力 σ が材料表面の降伏強度 σ_y を越えなければ疲労損傷は生じないが、材料の強度は内部に向かって急激に減少するので、表面直下で引張り応力 σ がその部分の降伏強度 σ_y を越えると塑性変形域が形成される。ここで繰返し応力による微小塑性変形にともなって加工誘起マルテンサイトが発生し、硬化層が形成される。したがって段階的に応力を増加させてゆけば、硬化層の厚さは次第に増加してゆくことが理解される。

図9はローラ加工材とパニシ加工材における加工表面の粗さ曲線を示す。ローラ加工材は R_{max}

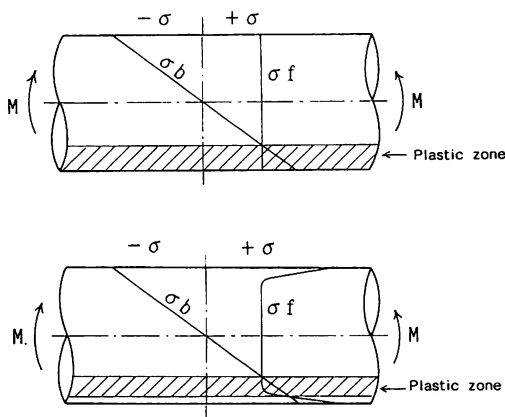


Fig. 8 Schematic representation of strengthen mechanism in coxing process.

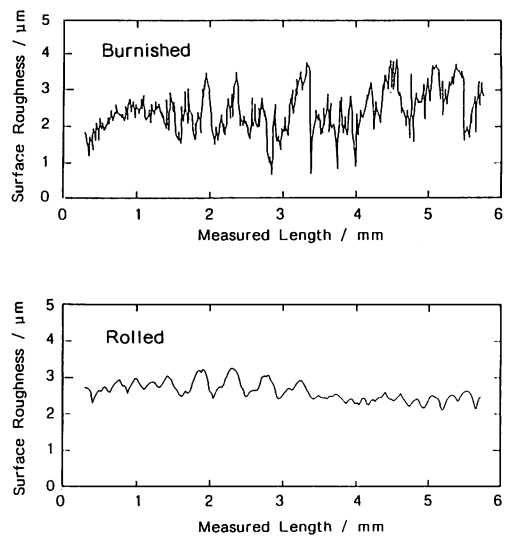


Fig. 9 Surface roughness of burnished and rolled specimens.

$\approx 1 \mu m$ であり、比較的良好な表面状態であるが、パニシ加工材は $R_{max} \approx 3 \mu m$ であり、曲線形状の凹凸も鋭くなっている。このようにパニシ加工材の表面状態が劣っているにもかかわらず、ローラ加工材と比べて疲労強度が高いことは注目に値する。これはオーステナイト系ステンレス鋼は疲労における切欠感度が比較的小さいことに関連しているものと思われるが、今後の検討課題であろう。

図10は段階負荷過程における断面硬さ分布の変化を示す。応力繰返し数の増加にともなって硬さ

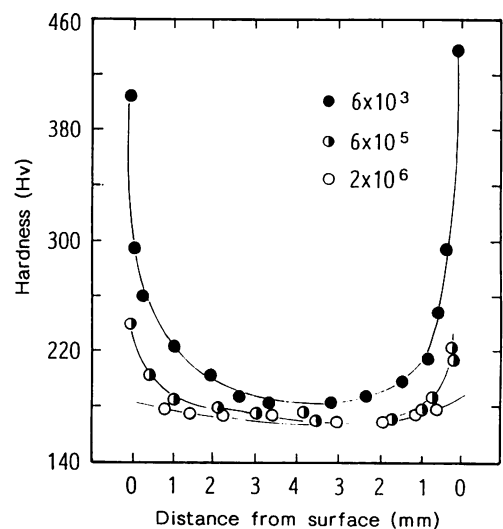


Fig. 10 Hardness distribution of burnished specimen during coxing process.

が増加し硬化層も深くなっていることがわかる。

表 2 は X 線回折による試験片表面のマルテンサイトおよび残留応力の測定結果を示す。切削仕

Table 2 X-ray Analysis results

Specimen	Residual Stress (MPa)	Martensite (%)
As Machined	- 1142.8 ± 23.4	33.62
Surface Rolled	- 863.6 ± 33.9	38.71
Surface Burnished	- 1605.1 ± 42.0	100
Surface Burnished & Gradually loaded	- 1060.3 ± 41.9	100

上げ状態の未加工材において、33.6%のマルテンサイトと1142 MPaの圧縮残留応力が検出されている。これは、切削に伴う塑性変形によって加工誘起マルテンサイトが形成されたためであると考えられる。表面ロール加工材ではマルテンサイトは38.7%と増加しているが、残留応力はやや減少し863 MPaとなっている。バニシ加工材ではマルテンサイトは100%に増加するとともに圧縮残留応力も1605 MPaとなって、ロール加工と比べて疲労強度向上に寄与する要因は著しく増加する。バニシ加工後に段階負荷を与えた場合は、マルテンサイト量は100%と変わらないが、圧縮残留応力は減少して1060 MPaとなっている。これは、疲労の進行過程で繰返し応力付加に伴う応力緩和現象が生じたことによるものと思われる。また、バニシ加工後の段階負荷によって、圧縮残留応力が減少するにもかかわらず疲労強度が向上するのは、段階負荷による硬化深度の増大が圧縮残留応力の減少を補った結果であると考えられる。以上により、表面塑性加工にともなう加工誘起マルテンサイト変態と圧縮残留応力の発生が確認され、また、疲労強度の向上に対するロール加工とバニシ加工

の有効性の相違も、これらの要因の相違を考慮することによって理解することができる。

4. 総 括

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304対象に、表面ロール加工、および表面バニシ加工を行い、さらに加工後に、コーキシング効果を利用して段階的に負荷を漸増させた場合の疲労特性の向上について検討し、次の結果を得た。

- (1) 表面塑性加工は SUS 304 ステンレス鋼の疲労強度改善に極めて効果的である。
- (2) 表面塑性加工における疲労強度の向上は加工誘起マルテンサイトによる加工硬化層の形成と、圧縮残留応力の発生によるものである。
- (3) 表面塑性加工を行ったのち、段階的に負荷を増加させると疲労強度はさらに向上する。
- (4) 疲労強度改善効果はいずれの場合も、ロール加工よりもバニシ加工のほうが優れている。

本研究における X 線回折のデータは(株)日本製鋼所室蘭研究所において測定されたものである。各位の御厚意に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 斎藤 葆, 小笠原 淳, 星野芳男, 高橋良治 塑性と加工, 14, 148 (1975) 392
- (2) Takeya, Y., Hayasaka, T., Suzuki, M. and Kameda, A. : SAE Technical Paper No. 820234 (SAE Pittsburgh, USA 1982)
- (3) Sinsino C. M., Muller, F. and Muller R. Int. J. Fatigue 14, No. 1 (1992) p3
- (4) 小田 明, 材料, 14, 247 (1975) 279
(平成 5 年11月30日受理)

