

焼なまし処理された結晶粒微細化熱延鋼板の回転曲げ疲労強度におよぼすショットピーニング加工の影響

生水 雅之¹・関 勝博²・後藤 昌英³・広瀬 幸雄⁴

要旨：本研究においては、結晶粒微細化組織を有する溶接構造用熱延鋼板に着目し、1073K および 1423K の各温度で焼なまし処理を行った試験片に対して、エア式のショットピーニング加工を施し、室温・大気中で回転曲げ疲労試験を実施し、疲労強度におよぼすショットピーニング加工の影響について検討を行った。その結果、ショットピーニング加工を行った試験片は焼なまし温度によらず受入材とほぼ同等以上の疲労強度が得られた。また 10⁶ サイクル未満で破断した試験片は、き裂が試験片表面から発生していたのに対して、10⁶ サイクル以上については試験片内部を起点とするき裂の発生が認められた。さらに内部破壊の起点はショットピーニング加工により試験片表面に生じた塑性変形層よりやや内部であることが明らかになった。

キーワード： 微細粒溶接構造用熱延鋼板、焼なまし処理、ショットピーニング加工、回転曲げ疲労試験

1. はじめに

結晶粒微細化鋼は省資源の観点からリサイクル性・長寿命・高強度を兼ね備えた次世代の鋼材として期待されており、近年研究が盛んに行われている^{1)~4)}。金属材料の結晶粒の微細化には様々な方法が考案されているが、なかでも鉄鋼材料の微細化は大圧下率圧延および強冷却を繰返すことで実現されている^{5)~10)}。その結果、降伏強度および引張強度はHall-Petch の関係より明らかなように合金元素の添加にほとんど依存せず向上し、優れた強度と被加工性を鋼材に与えることができる。また微細化鋼をこれまでの鋼材と置き換えることで部材の軽量化設計が可能であり、同時に材料コストを抑制することもできる。しかしこのような鋼材は市場に登場したばかりで、現在のところ小ネジや構造部材の一部で用いられているにすぎず、今後様々な分野で使用されることが予想される。特に部材同士の接合においては一般的にアーク溶接等が考えられるが^{11), 12)}、このような部位においては溶接熱に起因したHAZ(Heat Affected Zone)軟化や引張残留応力により、結晶粒同士の結合力が弱まり硬度低下を招くことにより表面からのき裂が生じやすくなり、疲労強度の低下を招くことが知られている¹³⁾。その対策としてショットピーニング(以下 S.P.)加工が考えられる。S.P.加工は表層を加工硬化させるとともに圧縮残留

応力を付与する処理である。材料依存性が少ない表面改質法であり、バネや歯車の疲労強度の改善に適用されている。しかし結晶粒微細化鋼の溶接材を対象としたS.P.加工に関する研究事例は、これまでほとんど報告されていない。

本研究では、微細化鋼に溶接を施すことによってHAZ軟化した部位にS.P.加工を行った際の疲労強度特性について基礎的な知見を得ることを目的に、結晶粒微細化鋼に対して2種類の温度で焼なまし処理によりフェライト粒径を粗大化させた後、S.P.加工を施し回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度におよぼすS.P.加工の影響について基礎的な検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

試験片には(株)中山製鋼所製の結晶粒微細化組織を

Table I Chemical compositions (wt.%).

	C	Si	Mn	P	S
NFG600W	0.17	0.36	1.30	0.011	0.007

Table II Mechanical properties.

	Yield stress, σ_Y , MPa	Tensile strength, σ_B , MPa	Elongation, ϵ_L , %	Grain size d , μm
NFG600W	433	587	31.3	4
Annealed at 1073K	362	503	37.2	30
Annealed at 1423K	277	472	34.4	70

- 1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 教授
- 2 金沢大学大学院自然科学研究科 学生
- 3 金沢大学大学院自然科学研究科 特任准教授
- 4 金沢大学大学院自然科学研究科 特任教授

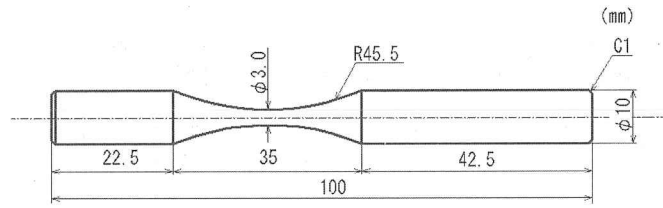


Fig.1 Shape and dimension of specimen.

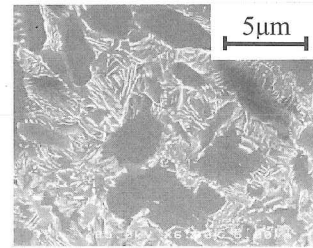
Table III Conditions of shot peening process.

Peening machine	Air type
Shot peening media	RCW06AC (HV131)
Peening time, sec	24
Distance, mm	100
Nozzle diameter, mm	φ 9.0
Arc height, mmA	0.27
Coverage, %	200

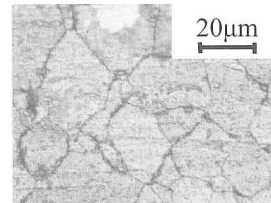
有する溶接構造用高強度熱延鋼板(以下NFG600W)を用いた¹³⁾. 受入材の結晶粒径について線分法を用いて測定したところ約4μmであった. Table I に化学成分を示す. 本鋼は市販の溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材SM490Aとほぼ同じ化学成分を有している. 本研究では空気炉を用いて1073K および1423Kの2種類の温度で2時間保持し, その後炉冷を行う焼なまし処理を行った. これらの温度設定は, 一般的に知られているアーク溶接時の熱影響部および溶接金属部の温度に基づき決定した. 受入材および各焼なまし材の機械的性質についてTable II に示す. 試験片はFig.1に示す砂時計型の形状に機械加工を行った後, 最小断面部に対してエメリ研磨を施した. さらに機械加工層の除去を目的に, 85%リン酸水溶液中において電解研磨を行い, 最小断面部の直径を約0.1mm以上除去した後, 疲労試験に供した. 実験は四連式の回転曲げ疲労試験機を用い, 回転速度は3150rpm, 応力比R=-1にて室温大気中にて行った.

2.2 ショットピーニング加工および硬さ試験

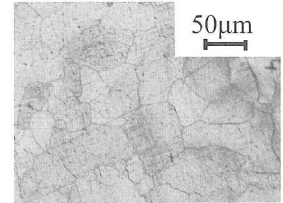
焼なまし処理によりNFG600Wのフェライト粒径を粗大化させた2種類の試験片に対してS.P.加工を行った. S.P.加工条件をTable IIIに示す. エアー式にてS.P.加工を行った理由は, 塑性加工領域の厚さが超音波ショットピーニングおよびレーザーピーニング加工に比べて厚く, 深さ方向に対する硬さの違いを明らかにすることを目的とする今回の実験に適しているためである. またS.P.加工による試験片表面から深さ方向に硬さの変化を観察するため, マイクロビッカース硬度試験機によりS.P.加工後の硬さ分布の測定を行った. 硬さ測定に際しては, 試験片採取時の切断加工層の影響を除去することを目的に, あらかじめ電解研磨によって測定面を約0.1mm研磨した. 測定位置は試験片断面の垂直方向から深さ方向への測定を行った. しかし本方法では最表面に関し



(a) As received



(b) Annealed at 1073K



(c) Annealed at 1423K

Fig.2 Microstructures of NFG600W.

て硬さ測定ができないので, 試験片円周方向からの硬さ測定を行った.

3. 実験結果および考察

3.1 焼なまし処理の影響

受入材および1073K, 1423Kの各温度で焼なまし処理を行ったそれぞれの組織写真をFig.2に示す. 両焼なまし材はともにフェライト粒径が粗大化している様子がわかる. 線分法により平均結晶粒径を測定したところ1073K焼なまし材では約30μmであり, 1423K焼なまし材については約70μmであった. さらに初期硬さについては受入材の硬さがHV=200であったのに対し, 1073Kおよび1423K焼なまし材でそれぞれHV=167, HV=153であった. Hall-Petchの関係式から予測できるように焼なまし処理による結晶粒径の変化と, それにともなう軟化が大きかったことがわかる.

3.2 ショットピーニング加工の影響

Fig.3にS.P.加工を行った試験片の断面組織写真を示す. 表面より約5μmの極表層ではフェライト粒径が微細化している様子が観察される. またうねりはあるが, 表面より約15μmの深さまでS.P.加工により生じた塑性変形層(図中白点線)が確認できる. Fig.4にビッカース硬さ試験を行った結果を示す. 表面から約50μmまでの深さにおいて, 硬度は急激な変化を示している. 1073Kでの焼なまし処理を行いその後S.P.加工を行ったものに関しては, 約150μmで硬さがS.P.加工前の硬さに収束しており, 1423Kで焼なまし処理を行ったものに関しては更に30μm深い約180μmでS.P.加工前の硬さに収束している. この収束深さの違いは結晶粒径の大きさの違いが, 塑性変形能に影響をおよぼしたものと考えられる. また, 両材ともに塑性変形層の深さと比較して硬さ試験の収束深さが深いことから, 塑性変形層は試

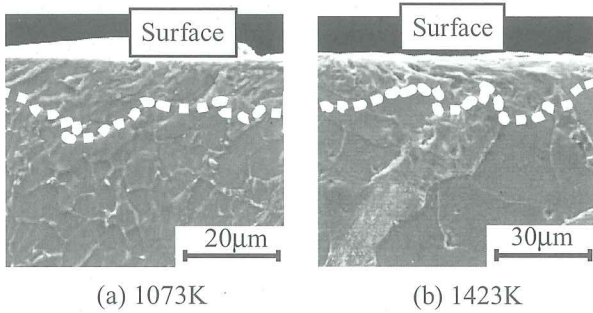


Fig.3 Microstructures of S.P. treatment material.

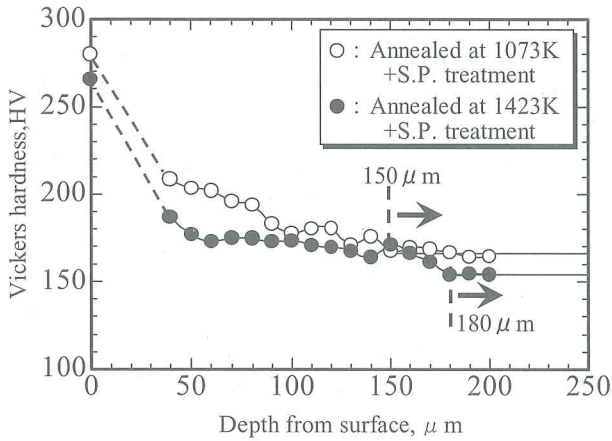


Fig.4 Distribution of hardness.

験片内部の組織にまで影響をおよぼしているものと
考えられる. Fig.5 に S-N 線図を示す. 焼なまし材
の時間強度は受入材より低下しているが, 焼なまし
温度の相違はあまり認められない. しかし疲労限度
に対する温度の影響は顕著に現れている. これは結
晶粒径の粗大化に伴い, 早い段階でしかも大きい単

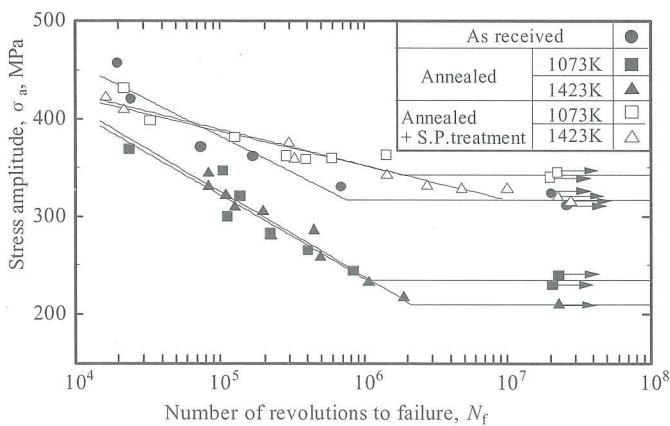
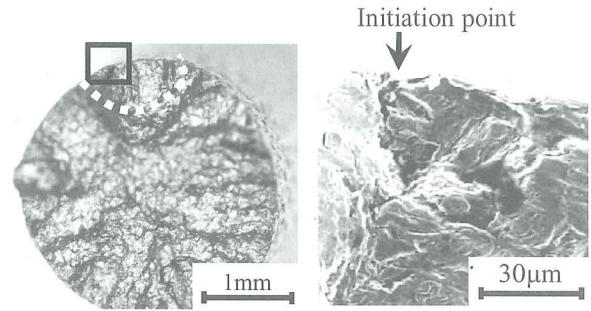


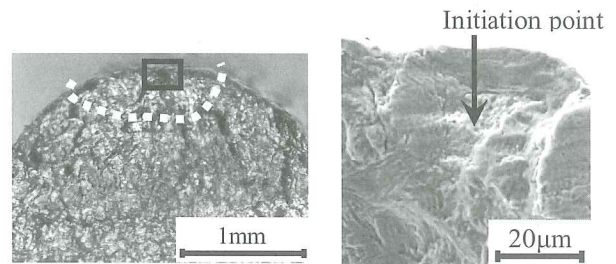
Fig.5 S-N diagram.

Table IV Results of σ_w and σ_w/σ_B .

	σ_w , MPa	σ_w/σ_B
As received	317	0.54
Annealed at 1073K	235	0.47
Annealed at 1423K	210	0.45
Annealed at 1073K + S.P.	343	0.68
Annealed at 1423K + S.P.	318	0.67



(a) Annealed (1073K) + S.P. treatment.
 $\sigma_a=431\text{MPa}, N_f=2.2 \times 10^4$



(b) Annealed (1423K) + S.P. treatment.
 $\sigma_a=363\text{MPa}, N_f=1.4 \times 10^6$

Fig. 6 Microstructures of fracture surface.

位のき裂が発生しやすいことに対応した結果である
と考えられる. また焼なまし材に対して, S.P.加工
を行うことにより受入材とほぼ同等以上の疲労強度
が得られており, S.P.加工が疲労強度の改善に有効
であることが認められる. TableIVに各試験片にお
ける疲労限度 σ_w および引張強度 σ_B に対する疲労限度
 σ_w の比(σ_w/σ_B)を併せて示す. いずれの S.P.加工材
の疲労限度も経験式 $\sigma_w \approx 0.5\sigma_B$ から期待される疲労
限度を上回るとともに, 受入材と同等以上の結果が
得られた. また 1073K および 1423K で焼なまし処理
のみを行った試験片およびそれらに S.P.加工を施し
た試験片は, いずれの場合においても 1073K より
1423K で焼なまし処理を行った方が, S-N 線図上の
折れ点は長寿命側に移動していることがわかる. 本
実験において停留き裂は観察されなかったが, 鹿毛
ら¹⁴⁾の低炭素鋼を用いた回転曲げ疲労試験において
結晶粒径が大きいほど折れ点が長寿命側に存在する
実験結果と一致する結果が得られた. Fig.6(a)および
(b)に疲労破面のき裂発生点近傍の様相について, マ
クロおよびミクロ観察を行った結果を示す. 両図に
おいて左側のマクロ写真中の黒枠部の拡大図がそれ
ぞれ右側の SEM 写真と対応している. いずれの破
面においても疲労破面特有のビーチマークがき裂発
生点より白破線の位置まで広がっている様子が認め
られる. また折れ点付近の破断までの繰返し数 N_f
に着目すると, 焼なまし処理のみを行った試験片で
は N_f によらず破壊の起点はすべて試験片表面であ
った. しかし S.P.加工を施した試験片においては,

Fig.6(a)に示すように $N_f < 10^6$ ではき裂は試験片表面から発生しているのに対し, Fig.6(b) に示すように $N_f > 10^6$ では試験片内部にき裂の発生点が認められた. さらに内部破壊の起点は塑性変形層よりやや内部の母材であった. これは S.P.加工により試験片表層に付与された圧縮残留応力ならびに表層に形成された加工硬化層が, 試験片表面からのき裂発生を抑制し, 内部破壊を招いたものと考えられる.

4. 結言

本研究では, 結晶粒微細化組織を有する溶接構造用高強度熱延鋼板 NFG600W に, 溶接を施した際に発生する HAZ 軟化部に S.P.加工を施した際の疲労強度特性について基礎的な知見を得ることを目的に, まずその鋼材に対して 1073K および 1423K の各温度で焼なまし処理を行った. 次にそれらの試験片に対して S.P.加工を施した後, 回転曲げ疲労試験を実施し S.P.加工が疲労強度におよぼす影響について, 走査電子顕微鏡による観察およびビッカース硬度試験を実施し, 以下の結果を得た.

- (1) 10^6 サイクルを越える S.P.加工材の疲労試験において内部破壊が確認された. 内部破壊の起点は S.P.加工による塑性変形層よりもやや内部の母材であった.
- (2) S.P.加工を行った焼なまし材の疲労強度は受入材と同等以上であった. また S.P.加工の有無によらず結晶粒径が大きい方が S-N 線図上の折れ点は長寿命側にあった.

謝辞: 本研究の一部は, 平成 20 年度舞鶴工業高等専門学校機械工学科研究経費の配分を受けて行われたことを記し, 関係各位に謝意を表する. さらに結晶

粒微細化組織を有する溶接構造用高強度熱延鋼板 NFG600W は, 株式会社中山製鋼所よりご提供いただいた. 営業統括本部の兼重博氏はじめ関係各位に謝意を表する.

参考文献

- 1) 辻伸泰: 鉄と鋼, 88-7, pp.359-369, 2002.
- 2) 長井寿, 松岡三郎: 材料, 48-7, pp.723-732, 1999.
- 3) 超鉄鋼材料を活用した新構造に関わる課題の抽出調査報告書, (社)日本鋼構造協会技術・標準委員会, 超鉄鋼利用技術検討小委員会, p11, p56, 2003.
- 4) 新倉正和: ふえらむ, 8-10, pp.718-724, 2003.
- 5) XING Jie, YANG Xuyue, 三浦博己, 酒井拓: 軽金属, 56-12, pp.716-720, 2006.
- 6) 大竹祐輔, 北川和夫, 北和久, 高田尚記, 辻伸泰, 青木庄治: 銅と銅合金, 46, pp.142-147, 2007.
- 7) 中尾佳史, 三浦博己, 酒井拓: 日本金属学会誌, 72-6 pp.397-406, 2008.
- 8) 三浦博己, 丸岡正治, 酒井拓, 山口洋, 山崎周一: 銅と銅合金, 47, pp.23-28, 2008.
- 9) Y.Saito, N.Tsuji, H.Utsunomiya, T.Sakai and R.G. Hong: Scripta Materialia, 39-9, pp.1221-1227, 1998.
- 10) R.Z.Valiev, N.A.krasilnikov and N.K.Tesenev: Mater. Sci. Eng., A137, pp.35-40, 1991.
- 11) 大谷忠幸, 雀部謙, 溶接学会論文集, 21-2, pp.243-248, 2003.
- 12) 新富達也, 竹士伊知郎, 橋本義和, 大畑充, 望月正人, 豊田政男: 溶接学会論文集, 21-3, pp.397-403, 2003.
- 13) 竹士伊知郎: 自動車技術, 56-11, pp.82-83, 2002.
- 14) 鹿毛正治, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, 51-461, pp.3-9, 1985.

(2008. 11. 18 受付)

EFFECTS OF SHOT PEENING PROCESS ON ROTATING BENDING FATIGUE STRENGTH OF ANNEALED FINE-GRAIN STEEL

Masayuki SHOZU, Katsuhiko SEKI, Masahide GOTOH and Yukio HIROSE

ABSTRACT : In this study, we focused on rolled steels for welded structures having fine-grained structure at a new hot strip mill, and steel specimens annealed at 1073 K and 1423 K were subjected to air blast shot peening. Rotating bending fatigue tests were carried out in air at room temperature using these specimens in order to examine the effect of shot peening on fatigue strength. The results indicate that the fatigue strength of the annealed specimens subjected to shot peening is equivalent to or higher than that of the steel without shot peening, regardless of the annealing temperature. In a specimen that was broken after less than 10^6 cycles, cracks initiated from the surface; in contrast, in a specimen broken after 10^6 cycles or more, cracks initiated from the inner side of the specimen. It was also clarified that the latter type of crack originates from slightly inside the plastic deformation layer that is generated at the surface of the specimen as a result of shot peening.

Key Words : Fine-grain steel, Annealed treatment, Shot peening process, Rotating bending fatigue test