

ショットピーニング処理による超強力鋼の高疲労強度化

都城工業高等専門学校 機械電気工学専攻

准教授 永野茂憲

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009009)

キーワード：疲労，ショットピーニング処理，マルエージング鋼

1. 緒言

マルエージング鋼は高強度鋼の中で最も高い強度と靱性を有し、しかも加工性や熱処理が容易であること等の実用上の優れた特性を持つ材料である。著者らは超強力鋼であるマルエージング鋼にショットピーニングを施すと著しく疲労強度が向上することを報告してきた^{(1)~(5)}。そこで明らかとなったのは、塑性加工で生成される圧縮残留応力と逆変態オーステナイトの生成が疲労強度向上に有効であるということだった。これら成果は、強度レベルの低い 300 grade マルエージング鋼のものである。しかし、強度レベルが上がる程、靱性は低下し、衝撃破壊、切欠靱性、疲れ強さ、環境脆化の機械的性質に注意が必要となり、更なる強度レベルの上がる 350 grade マルエージング鋼の諸性質を明らかにすることは、大変重要である。

そこで本研究では、実用鋼のバルク材中で最も強度の高いマルエージング鋼(350 grade)を用いて時効条件を変えることにより、素材硬さを変えた試験片を準備し、その試験片にショットピーニング処理を行い、ショットピーニング処理材の回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度に及ぼすショットピーニング処理の影響を検討する。

2. 材料および実験方法

2.1 供試材料および熱処理

用いた材料は、市販の 350grade マルエージング鋼である。その化学成分を表 1 に示す。素材に真空中で 1123K で 5.4ks 保持後の空冷の溶体化処理を行ってから、所定の時効処理を行った。図 1 に試験片の形状と寸法を示す。表 3 に本研究で行った時効処理における機械的性質を示す。このうち疲労試験には硬さレベル HV≒660 と HV≒720 の二種類とし、それぞれで逆変態オーステナイトのない条件の時効材と逆変態オーステナイトのない条件の時効材と逆変態オーステナイトが生成される時効材の合計 4 条件で行った。

2.2 ショットピーニング処理条件

時効処理した後、ショットピーニング処理を施す。そのショットピーニング条件を表 2 に示す。ショット材は普通鋼球としては、Φ0.3mm 粒(HV700)を用い、カバレッジ 300%、投射方式は空気式(0.3MPa)を用いた。

Table 1 Chemical composition (mass%)

Grade	Composition, mass%										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Fe
350	0.001	0.01	0.01	0.001	0.001	17.89	4.27	12.36	1.30	0.08	Bal

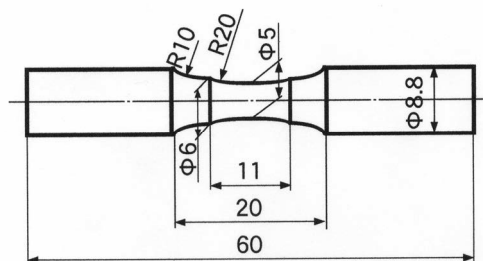


Fig.1 Shape and dimensions of specimen

Table 2 Shot peening treatment condition

Blasting Equipment		Air Type	
shot	Size (mm)	Material	Hardness
	Φ 0.3	Steel	HV=700
Blasting		Φ 0.3mm	
	Almen Intensity	0.23mm A	
	Time (sec)	6	
	Distance (mm)	180	
	Pressure (MPa)	0.3	
	Coverage (%)	300	

2.3 疲労試験および表面性状測定

疲労試験は、小野式回転曲げ疲労試験機を用いて室温で行った。疲労破面の観察は SEM で行った。

き裂の発生とき裂の伝ば過程を観察するためにレプリカ法を用いて観察した。

ショットピーニング効果を判定するため、表面からの深さ方向の硬さを微小ビッカース硬度計で測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 S-N 曲線

図 2 に HV720 (γ=1%, 0%) の両材へ Φ 0.3mm, 0.3MPa のシ

Table 3 Mechanical properties

grade	Aging condition	HV	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
350	570°C-2ks ($\gamma=3\%$)	HV660	2190	2105
	540°C-2ks ($\gamma=0\%$)	HV660	2200	2140
	540°C-23ks ($\gamma=1\%$)	HV720	2300	2230
	540°C-150ks ($\gamma=0\%$)	HV720	2310	2260

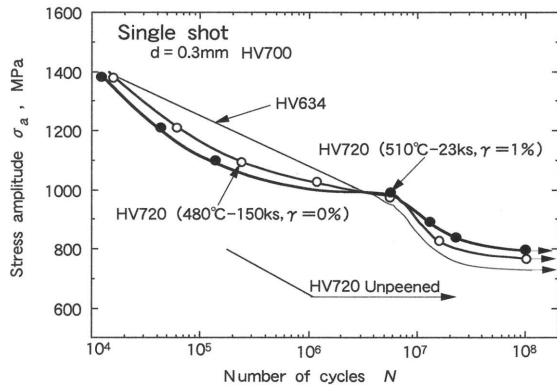


Fig.2 S-N curves.(HV=770)

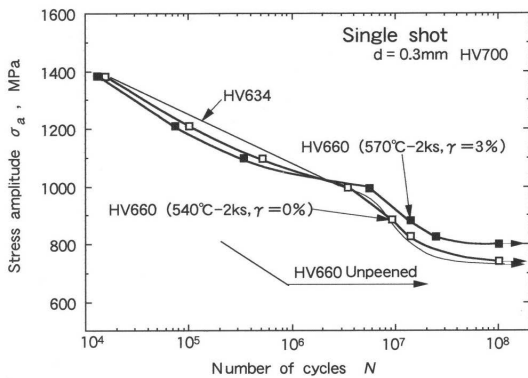


Fig.3 S-N curves.(HV=660)

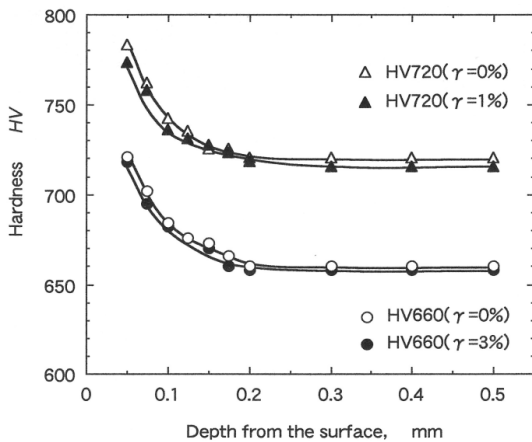


Fig.4 Change in hardness as a function of the from surface

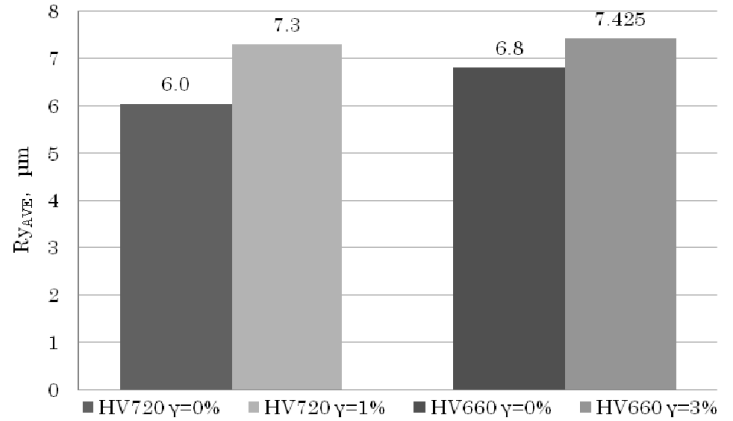


Fig.5 Roughness of the surface

ットピーニング処理材の S-N 曲線を示す。S-N 曲線は全領域において、300grade の結果 (HV634)⁽⁴⁾ と比較すると、極端な強度低下がみられる。これは、硬度の上昇のため、高硬度である今回の条件のものの方が、高い切欠き感度の為に強度が低下したためと考えられる。また、逆変態オーステナイト γ があると $N=10^6$ 以前の「高応力短寿命側」では疲労強度が低下し、 $N=10^7$ 付近の「低応力長寿命側」では疲労強度が上昇した。短寿命域において逆変態オーステナイトの方が疲労強度を低くした原因は、表面粗さの影響が出たためである。図 5 に粗さ平均値を示す。

図 3 に HV660 ($\gamma=3\%$, 0%) の両材へ $\phi 0.3\text{mm}$, 0.3MPa のショットピーニング処理材の S-N 曲線を示す。こちらでも HV720 と同様に γ があると $N=10^6$ 以前の「高応力短寿命側」では疲労強度が低下し、 $N=10^7$ 付近の「低応力長寿命側」では疲労強度が上昇した。ただし短寿命域において HV660 では、HV720 ほどの大きい強度低下は起こしていない。図 2 と比較すると内部破壊領域においては、硬さレベルの上昇に伴い、疲労強度も上昇している。

図 4 は、各ショットピーニング処理材の断面における硬さ分布を示している。いずれの材料でもショットピーニング処理により表面は硬化し、その硬化深さは両材におおきな違いは見られない。逆変態オーステナイト γ が存在すると極表面層において若干の硬度低下がみられる。これは、逆変態オーステナイト γ は面心立方格子であり、bcc と fcc 2つのすべり面の存在のため硬度上昇につながらなかったと考えられる。ここで、逆変態オーステナイト γ を有しているものが低応力、長寿命域で常に強度が高くなっていることをき裂伝ば曲線から考察してみる。

3. 2 き裂伝ば曲線

図 6 にき裂伝ば曲線を示す。

800MPa でのき裂伝ば曲線から γ の生成によってき裂の発生が遅れ、伝ば速度が抑制されているが、その効果は非常に小さいものであることがわかる。よって、 γ によるき裂の発生と伝ば速度の抑制効果は、高応力下ではあまり期待できないものといえる。

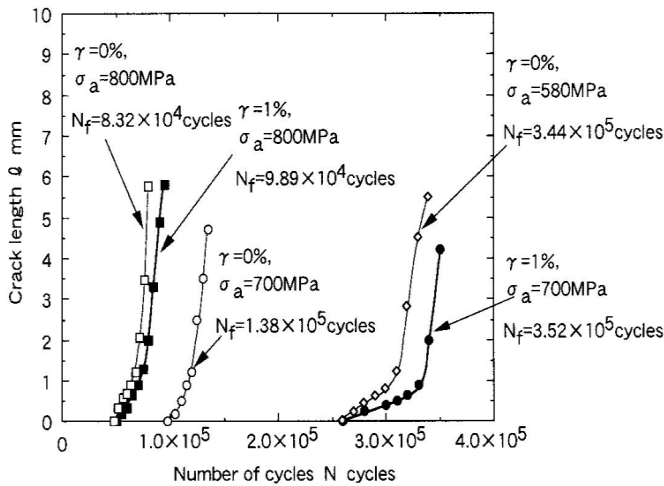


Fig.6 Crack growth curves.

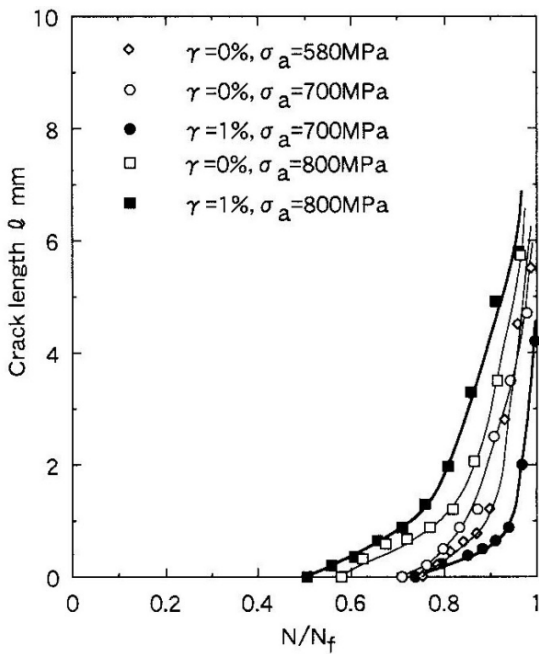


Fig.7 $l-N/N_f$ curves.

$\gamma=1\%$ の曲線の疲労限付近の応力 700MPa でのき裂伝ば曲線から γ の生成によってき裂の発生が大幅に遅れていることがわかる。また、初期のき裂発生過程においてグラフの傾きが緩やかなことから γ によってき裂の伝ば速度が抑制されていることもわかる。

疲労限付近の応力 700MPa でのき裂伝ば曲線、 $\gamma=0\%$ の疲労限付近の応力 580MPa でのき裂伝ば曲線からも γ による初期き裂の伝ば速度の抑制効果が確認できる。しかし、き裂発生自体の抑制効果はみられない。

3.3 $l-N/N_f$ 曲線

図 7 に、き裂伝ば曲線の横軸の繰返し数を破断繰返し数で基準化した $l-N/N_f$ 曲線を示す。この図からも逆変態オーステナイト γ によるき裂の発生と伝ば速度の抑制効果が確認できるが、高応力下での $l-N/N_f$ 曲線は図 6

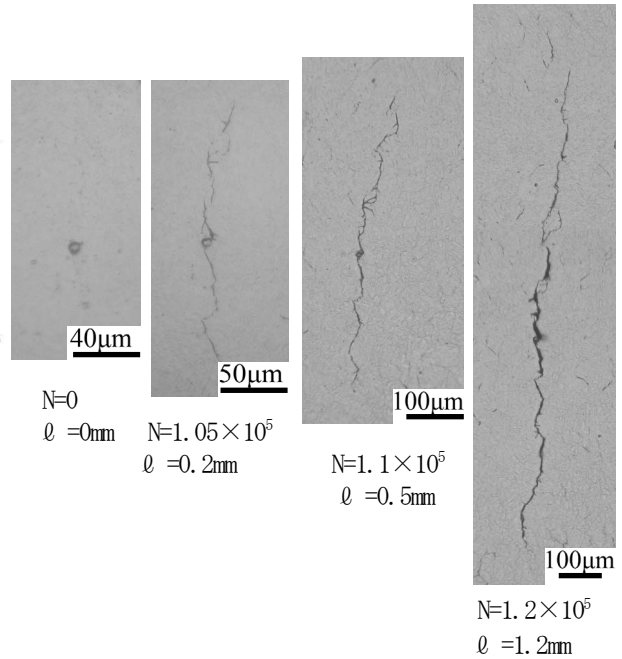


Fig.8 Change in surface state due to stress repetition.
($\gamma=0\%$, $\sigma_a=700\text{MPa}$)

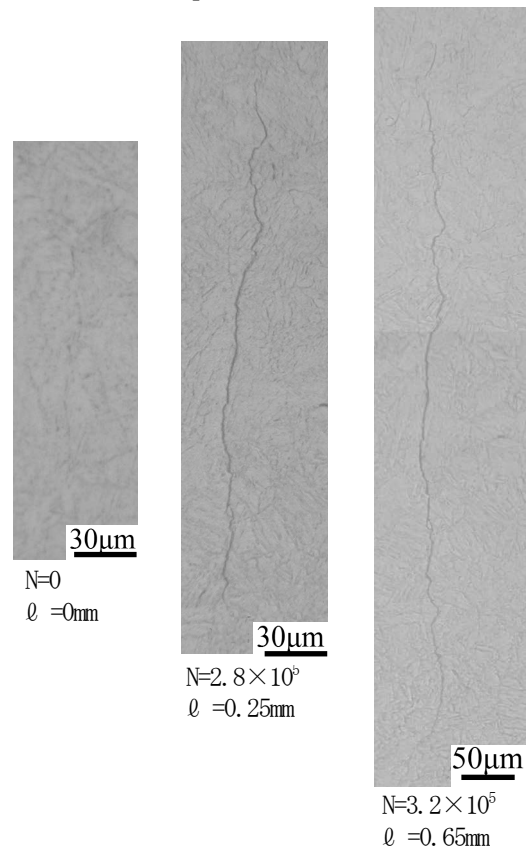


Fig.9 Change in surface state due to stress repetition.
($\gamma=1\%$, $\sigma_a=700\text{MPa}$)

とは異なり、基準化した寿命に対しては γ の有無の曲線が逆転している。

全寿命とはき裂発生寿命とき裂伝ば寿命を合わせたものだが、今回用いた試験片硬さは HV720 と高強度なため、

全寿命に対するき裂発生寿命が半分以上を占めていることがわかる。グラフから 800MPa の高応力下ではき裂伝ば寿命が 0.4~0.5 程度であるが、700MPa・580MPa の比較的応力下では 0.3 程度であり、高応力に比べ全寿命に対するき裂伝ば寿命が短い。

3. 4 レプリカ写真

図 8, 図 9 は 700MPa でのレプリカ写真である。γ=0% の場合、き裂はジグザグに伝ばしているように見える。これは旧オーステナイト粒界に沿ってき裂が伝ばしたためと考えられる。γ=1%では γ=0%の場合とは異なり、初期のき裂は直線的に、その後はジグザグに伝ばしているように見える。これは始めき裂が旧オーステナイト粒内で発生し、その後は旧オーステナイト粒界に沿って伝ばしたためと考えられる。

以上の結果から逆変態オーステナイトγのき裂発生、伝ばの抑制効果により、強度上昇が起こり、内部破壊の疲労強度が高くなっていると考えられる。

3. 5 ショット粒硬度を変化させた場合の S-N 曲線 (ショット粒硬度 HV700, HV800, HV900)

図 10 はショット粒硬度を変化させてショットピーニング処理を行った際の S-N 曲線である。ここでは、表面性状の最も影響の大きい表面破壊領域(=高応力短寿命域) 1300MPa, 1200MPa について検討した。

応力 1300MPa, 1200MPa での疲労寿命はいずれもショット粒が高硬度であるほど遅延し、疲労寿命は大幅に改善されている。今回の 3 条件の中では HV900 のショット粒硬さでショットピーニング処理を施した試験片が最も疲労強度の上昇を示し、圧縮残留応力の高い順と同じ傾向である (図 11)。

4. 結 言

実用鋼のバルク材中で最も強度の高い 350grade マルエージング鋼を用いて時効条件を変えることにより、素材硬さを変えた試験片を準備し、その試験片にショットピーニング処理を行い、ショットピーニング処理材の回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度に及ぼすショットピーニング処理の影響を検討した。得られた結果は、以下のようになる。

- 1) ショットピーニング処理により、疲労強度は上昇した。
- 2) 逆変態オーステナイトを生成させることで、長寿命域において疲労強度は上昇する。
- 3) 1) と 2) の疲労強度上昇理由は、ショットピーニング処理による硬さ分布上昇のためと、逆変態オーステナイトによるき裂進展抑制効果のためである。
- 4) 逆変態オーステナイトの生成により、表面粗さ値が上昇する。
- 5) 最適ショット条件は、ショット粒硬度と被ショット材の硬度差を十分に確保することが重要である。

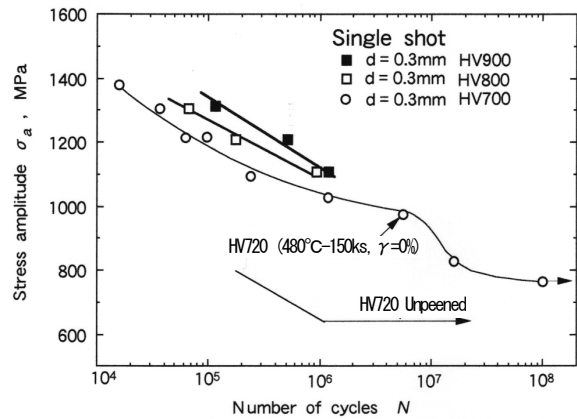


Fig. 10 S-N curves.

(Shot hardness ; HV700, HV800, HV900)

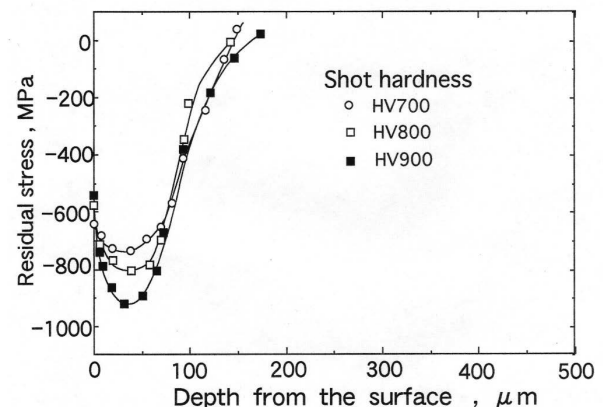


Fig.11 Change in residual stress as a function of the from surface. (Shot hardness ; HV700, HV800, HV900)

5. 謝 辞

本研究を行うにあたり、(財) 天田金属加工機械技術振興財団により一般研究開発助成 (AF-2009009) を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) T. Nagano, N. Kawagoishi, M. Moriyama, "Influence of reversion austenite initiation and propagation of fatigue crack of maraging steel", Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, A, Vol.69, No.679, pp.663-639(2003)
- 2) T. Nagano, N. Kawagoishi, M. Moriyama, H. Nisitani and E. Kondo, "Influence of reversion austenite on notch sensitivity of maraging steel", Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, A, Vol.68, No.676, pp.1724-1729(2002).
- 3) N. Kawagoishi, T. Nagano, M. Moriyama, Y. Ohzono and T. Uta, "Effect of Humidity on fatigue strength of maraging steel", Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, A, Vol.71, No.704, pp.600-606(2006).
- 4) M. Moriyama, T. Nagano, N. Kawagoishi, S. Takaki and E. Nagashima, "Effect of shot peening on fatigue strength of maraging steel", JSME Journal, Series A, Vol.44, No.2, pp.301-308 (2001).
- 5) N. Kawagoishi, M. Miyazono, T. Nagano and M. Moriyama, "Effect of humidity on fatigue strength of maraging steels with different hardness", Journal of the Society of Materials and Science, Vol.58, No.9, pp.787-792 (2009).