VC 被覆鋼の疲労強度に及ぼす平均応力の影響[†]

猿 木 勝 司* 堀 田 昇 次** 新 井 透**

Influence of Mean Stress on Fatigue Strength of VC-Coated Steels

by

Katsushi SARUKI*, Shoji HOTTA** and Tohru ARAI**

The effect of mean stress on the endurance limit of thin hard coatings has been studied by utilizing bending fatigue tests on SCM440 and ASP30, and axial loading fatigue tests on SKD11 and SKD61. The fatigue tests have been made on the specimens VC-coated by the thermo-reactive deposition and diffusion method, namely the molten salt bath immersion method, and the quenched-and-tempered specimens for reference.

The experimental results indicated that the endurance limit σ_w was predicted by treating the mean stress σ_m and the substrate residual stress σ_r in equivalence. The endurance limit was not influenced by the existence of a coating layer, even when the coating layer was cracked by high compressive stress under the first cyclic loading. This can be explained by the fact that the cracks, formed on the coating layer by compressive stress, do not play the role of trigger in the fracture of substrate because they have an obtuse angle ($>120^\circ$).

The equations, obtained over the Vickers hardness of substrate Hv 300, are as follows:

At $\sigma_m + \sigma_r \geq 0$,

$$\sigma_w = \{(Hv/10) + 20\} \times 9.8 - (1.04Hv/1000) \times (\sigma_m + \sigma_r)$$

Hv: Substrate Vickers hardness (kgf/mm²), σ_w , σ_m , σ_r : (MPa)

However, in the case of steels containing a large inclusion,

$$\sigma_w = 1.56 \times (Hv + 120) / \sqrt{area}^{1/2} - (1.04Hv/1000) \times (\sigma_m + \sigma_r)$$

area: Projected inclusion area (μm^2)

At $\sigma_m + \sigma_r < 0$, irrespective of the existence of inclusion,

$$\sigma_w = \{(Hv/10) + 20\} \times 9.8 \times \{1 - (\sigma_m + \sigma_r) / \sigma_T\}$$

σ_T : True strength of fracture (MPa)

Key words: Molten salt bath immersion method, Thermo-reactive deposition and diffusion method, Carbide coating, Thin hard coating, Surface treatment, Fatigue strength, Endurance limit, Mean stress, Residual stress, Inclusion

1 緒 言

耐摩耗性, 耐焼付性に秀でた薄硬質被覆鋼を, 耐疲労性をも要求される部品に用いる場合, 疲労強度についても十分な把握が必要である。筆者らは, この観点に立つて TRD (Thermo-Reactive Deposition and Diffusion) 法により被覆した VC 被覆鋼を中心に研究を始め, これら被覆鋼の疲労強度には被覆層直下母材の硬さと残留応力が影響を及ぼすことを明らかにし, 耐久限度を推定する実験式を導出した。^{1), 2), 3)}

本報では, このような被覆鋼にさらに平均応力が作用する場合の疲労強度について検討した。また, その場合, 平均応力と上に述べた残留応力とを等価に扱って, 疲労強度を推定することができるか否か等についても, 検討を加えた。なお, PVD, CVD 法により TiN を S35C に被覆したものについての引張側完全片振り疲労の結果は, 一部報告があるが, 工具等への適用を考慮し, 高硬

度な母材でしかも圧縮側に平均応力を負荷した場合の疲労強度については, 現在まで報告はなく, 推定法等も不明である。本報告では主としてこの領域での検討を行った。

2 実験方法

2・1 試験片

Table I に用いた材料の化学成分を示す。素材はいずれも丸棒で, その直径は 13 mm~19 mm である。素材のうち, SKD11 (j) は (e) に比べ大きな介在物を含有している。これらの素材より, Fig. 1 に示す形状の試験片を製作し, 被覆処理を施したものと, 比較のため単なる焼入れ焼もどし処理を施したものを準備した。なお, 被覆処理の方法は既報でも述べた溶融塩 (V_2O_5 と B_2C の添加された硼砂浴) に試験片を浸漬することにより行う TRD 法である。Table II には被覆処理および熱処理条件と試験片の表面粗さ, 被覆鋼の場合は被覆層の厚さと

[†] 原稿受理 平成 6 年 7 月 21 日 Received July 21, 1994

* 正 会 員 (株)豊田中央研究所 〒480-11 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道, TOYOTA Central Res. & Development Labs., Inc., Aichi-gun, Aichi, 480-11

** (株)豊田中央研究所 〒480-11 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道, TOYOTA Central Res. & Development Labs., Inc., Aichi-gun, Aichi, 480-11

Table I. Chemical compositions of substrate steels.

Substrate steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Co
SCM440	0.43	0.22	0.83	0.020	0.013	0.97	0.16	—	—	—
SKD61	0.36	1.03	0.45	0.022	0.006	5.12	1.25	0.71	—	—
SKD11 (e)	1.40	0.33	0.41	0.025	0.002	11.76	0.82	0.22	—	—
SKD11 (j)	1.44	0.29	0.38	0.024	0.005	12.11	0.85	0.25	—	—
ASP30	1.27	0.3	0.3	—	—	4.2	5.0	3.1	6.4	8.5

Fig. 1. Fatigue specimens.

残留応力並びに被覆層直下母材の硬さと残留応力, 焼入れ焼もどし鋼の場合は表面の硬さと残留応力を示した. なお, 表中の VC は VC 被覆鋼を, QT は焼入れ焼もどし鋼を表す.

2・2 疲労試験および硬さ, 残留応力測定

疲労試験は, 回転曲げ, 平面曲げ, 軸荷重の 3 種類を

Table II. Treatment conditions and states of specimens.

Substrate steel	Notation	Treatment condition	No.	Roughness $R_{\max}$ (μm)	Coatings		Substrate		Shape of specimen
					Thickness (μm)	Residual stress (MPa)	Hardness Hv (kgf/mm^2)	Residual stress (MPa)	
SCM440	QT	1173K $\times$ 1/3 hr O. C., 873K $\times$ 1 hr $\times$ 2	74	0.3	—	—	335	-57	(a) $\phi 7$, $l=10$
	VC	1173K $\times$ 4 hr ^(VC) O. C., $\uparrow$	75	0.3	5	—	305	-27	$\uparrow$
SKD61	QT	1293K $\times$ 1/3 hr N. C., $\uparrow$	76	0.2, 2	—	—	500	80	(d) $\phi 5$, R15
	VC	1293K $\times$ 6 hr ^(VC) A. C., $\uparrow$	77	0.2, 2	6	-1340	500	250	$\uparrow$
SKD11 (e)	QT	1293K $\times$ 1/3 hr N. C., 453K $\times$ 1 hr $\times$ 2	78	0.3	—	—	780	343	(b) $\phi 5$, R25
	VC	1293K $\times$ 4 hr ^(VC) A. C., $\uparrow$	79	0.3	9	-1610	710	265	$\uparrow$
SKD11 (j)	VC	1293K $\times$ 4 hr ^(VC) A. C., $\uparrow$	80	0.3	9	-1370	760	255	(c) $\phi 6$, R25
ASP30	QT	1298K $\times$ 1 hr N. C., 823K $\times$ 1 hr $\times$ 2	21	0.3	—	—	815	29	(a) $\phi 7$, $l=10$
	QT	$\uparrow$ 853K $\times$ 1 hr $\times$ 2	81	0.3	—	—	760	25	$\uparrow$
	QT	$\uparrow$ 923K $\times$ 1 hr $\times$ 2	82	0.3	—	—	530	-11	$\uparrow$
	QT	$\uparrow$ 1073K $\times$ 1 hr $\times$ 2	83	0.3	—	—	355	-9	$\uparrow$
	VC	1298K $\times$ 1 hr ^(VC) A. C., 823K $\times$ 1 hr $\times$ 2 Reheating hardening (1298K $\times$ 4 hr N. C., 823K $\times$ 1 hr $\times$ 2)	25	0.3	4	-1023	860	85	$\uparrow$

O. C.: Oil cooling, N. C.: Nitrogen cooling, A. C.: Air cooling,
^(VC): VC coating by immersing in a molten borax bath.

行った. それぞれの試験に用いた試験機は, 118 N $\cdot$ m 容量の小野式回転曲げ疲労試験機, 196 N $\cdot$ m 容量のシェンク式曲げねじり疲労試験機, 98 kN 容量の電磁共振式軸疲労試験機である. また, 前節で表中に示した硬さはマイクロビッカース硬さ計により荷重 4.9 N または 1.96 N で測定, 残留応力は X 線法 [Cr-K α , Fe(211) 面および VC(311) 面] により測定したもので, その詳細は既報に述べたのでここでは省略する.

3 実験結果と考察

3・1 硬さと耐久限度の関係

高硬さ域 ($H_v > 300$) における VC 鋼および QT 鋼の耐久限度 σ_w は, 既報において種々の材料について検討した結果, 前者の場合は被覆層直下母材の, また後者の場合は表面の硬さ H_v と残留応力 σ_r によって, 次式

$$\sigma_w = \left(\frac{H_v}{10} + 20 \right) \times 9.8 - \frac{1.04 H_v}{1000} \times \sigma_r \quad (1)$$

のように表されることを明らかにした.

しかし, その場合ほとんどの検討材料には, 残留応力が発生していた. そこで今回は, まず介在物も少なく, 焼入れ焼もどしによって残留応力も発生しにくい ASP30 を用い, Table II に示した 4 種類の焼もどし

Fig. 2. S-N relations obtained by rotating bending fatigue test on ASP30.

Fig. 3. Relation between Vickers hardness and endurance limit in high hardness range.

(No. 21, 81, 82, 83) を行い、回転曲げ疲労試験（試験片 a）によって式 (1) の第 1 項の関係を確認した。結果を、S-N 線図の形で Fig. 2 に、硬さと耐久限度の関係で Fig. 3 に示す。Fig. 3 において実験点はいずれも

$$\sigma_w = \left(\frac{Hv}{10} + 20 \right) \times 9.8 \quad (2)$$

の線上によくのっていることがわかる。図には参考のために各研究者の実験結果もあわせ記した。この領域では、介在物、残留応力等が効く領域なので、各研究者の報告の結果はかなり幅をもっている。

3・2 曲げによる引張平均応力下での疲労強度

つぎに、曲げによる引張平均応力下での疲労強度を、SCM440 (No. 74, 75) と ASP30 (No. 21, 25) についてシエンク式平面曲げ疲労（試験片 a）によって検討した。結果は、S-N 線図の形で Fig. 4 に、耐久限度線図の形で Fig. 5 に示す。なお Fig. 5 の横軸は単なる機械的平均応力 σ_m のみではなく、平均応力 σ_m + 残留応力 σ_r を取った。図中の破線は、式 (1) の σ_r に $\sigma_m + \sigma_r$ を入れて求めた関係線

$$\sigma_w = \left(\frac{Hv}{10} + 20 \right) \times 9.8 - \frac{1.04Hv}{1000} \times (\sigma_m + \sigma_r) \quad (3)$$

Fig. 4. S-N relations obtained by plane bending fatigue test on SCM440 and ASP30.

Fig. 5. Relation between mean stress + residual stress and endurance limit (plane bending).

Fig. 6. Relation between Vickers hardness and gradient of endurance limit diagram.

である。結果は、大略この直線と一致している。また、試験片別に図中で求めた勾配を、硬さとの関係で表すと Fig. 6 のようになった。図には、既報の結果および児玉が整理した各研究者の結果もあわせ記した。今回の結果は、高硬さ領域で求められた吉武らの結果にも比較的近い。

3・3 軸荷重による平均応力下での疲労強度

つぎに、軸荷重による平均応力下での疲労強度を、SKD11 を用い電磁共振式軸荷重疲労試験によって調査する。まず、大きな介在物を含まない材料 (e) (介在物直径平均 12.1 μm) について検討した (No. 78, 79, 試験片 b) 試験結果は、両振の S-N 線図を Fig. 7 に、耐久限度線を Fig. 8 に示した。横軸は Fig. 5 と同様、平均応力 σ_m + 残留応力 σ_r を取った。図中の黒印で示したものは、疲労試験の過程で残留応力が変化したもので、

Fig. 7. S-N relations obtained by axial loading fatigue test on SKD11.

Fig. 8. Relation between mean stress + residual stress and endurance limit (axial loading). [SKD11 (e), Inclusion 12.1 μm].

その場合黒印でプロットしたものが初期残留応力で、矢印の先に二重印でプロットしたものが試験後の残留応力で整理した結果を示している。また、図中の直線のうちの1本は式(3)、他の1本は縦軸の σ_{w0} と横軸の σ_T (真破断力)を結んだもの、すなわち

$$\sigma_w = \sigma_{w0} \left(1 - \frac{\sigma_m + \sigma_r}{\sigma_T} \right) = \left(\frac{Hv}{10} + 20 \right) \times 9.8 \times \left(1 - \frac{\sigma_m + \sigma_r}{\sigma_T} \right) \quad (4)$$

である。なお、この場合の図(b)の σ_T は、被覆層直下母材の真破断力を用いる必要があるが、ここでは便宜的にQT材と同じ値とした。図より、実験点は $\sigma_m + \sigma_r \geq 0$ では推定線式(3)上にあるが、 $\sigma_m + \sigma_r < 0$ ではこの推定線より低くなりむしろ式(4)の上ののっていると考えられる。なお、軸荷重疲労であるにもかかわらず、曲げ疲労で求めた式(3)がそのまま成り立つことや、式(4)の σ_{w0} に曲げ疲労で求めた値がそのまま適用できることは、高硬さ域における特徴として理解でき、このことは筆者らが別途検討した切欠き材の耐久限度の低下割合が、切欠き底表面の応力集中度で説明できることも対応している。

ついで、大きな介在物を含む材料(j)介在物直径平均

Fig. 9. Inclusion of fracture origin (SEM Photo).

Fig. 10. Relation between mean stress + residual stress and endurance limit (axial loading). [SKD11 (j), Inclusion 49.5 μm].

49.5 μm)について検討した(No. 80, 試験片 c)。両振のS-N線図は前掲のFig. 7に示したが、(e)に比べて耐久限度がかなり低下していることがわかる。これは、Fig. 9に示したように大きな介在物が破壊起点となっているためである。耐久限度線図は前図と同様な表示方で、Fig. 10に示した。図からわかるように、 $\sigma_m + \sigma_r \geq 0$ の領域で実験点は式(3)よりかなり低い。これは、両振のところで述べたように、介在物による耐久限度の低下として説明できる。しかし、平均応力が圧縮側になると、実験点は式(4)の上ののるようになり、介在物の影響は顕著には現れなくなることがわかる。

Fig. 11は、毎熊らが高硬度鋼(Hv 584)について求めた人工欠陥(放電加工によりマイクロピットを導入)の寸法と耐久限度の関係図上に、今回の結果をプロットしたものである。硬さは今回の方が高いにもかかわらず、単純に両振($\sigma_m = 0$)の結果(Fig. 7)をプロットした場合は、毎熊らの関係線より低い位置にくる。しかし、 $\sigma_m + \sigma_r = 0$ のときの耐久限度をFig. 8では式(4)により、またFig. 10では実験点を内挿することにより求め、プロットすると、毎熊らの関係線より高くなり、妥当な結果を示している。また、右下がりの傾向も大略同程度となっている。

さらに、介在物サイズから耐久限度を推定するのに適用できる式として、村上らの式¹⁵⁾があるので、我々はこれ

Fig. 11. Relation between defect size and endurance limit.

Fig. 12. Correspondence between experimental and predicted endurance limit.

Fig. 13. Relation between mean stress + residual stress and endurance limit (axial loading 0 – Compression).

に残留応力や機械的な平均応力が存在する高硬度鋼の耐久限度推定法を付加することによって、今回の結果がどこまで推定可能かについて調査した。我々の提案式は、 $Hv > 300$, $\sigma_m + \sigma_r \geq 0$ の場合に適用することを条件に、村上らの式（第1項）に第2項を付加した次式

$$\sigma_w = \frac{1.56(Hv + 120)}{\sqrt{aera}^{\frac{1}{6}}} - \frac{1.04Hv}{1000} \times (\sigma_m + \sigma_r) \quad (5)$$

である。

この式により、 $\sigma_m > 0$, $\sigma_m = 0$, $\sigma_m + \sigma_r = 0$ の3つの場合について耐久限度を推定し、今回の実験結果と比較したのが Fig. 12 である。結果は大略 45° の線上にのっており、式 (5) が推定式として妥当なものであることがわかる。なお、この式の適用下限界は、今回の検討範囲より $\sqrt{aera} > 10 \mu m$ である。

最後に、ポンチ等に利用する場合のことを考え、SKD61 (No. 76, 77, 試験片 d) を用いて圧縮側の完全片振疲労試験を実施し、その場合の耐久限度を求めた。試験は完全片振のため、試験片は分離破壊しないので、応力はいずれも 10^7 回まで繰返し、その後試験片を観察することによって、破壊、未破壊の判断をした。また、試験片は表面粗さ $R_{max} 0.2 \mu m$ と $2 \mu m$ の2種類のものを用いたが、両者の結果に顕著な差は認められなかった。結果は Fig. 13 に示す。図中の黒印、二重印の意味、横軸を平均応力 σ_m + 残留

(a) $\sigma_{max} = 1180 \text{ MPa}$, $N = 10^7$.
(b) $\sigma_{max} = 980 \text{ MPa}$, $N = 10^7$.
(c) $\sigma_{max} = 785 \text{ MPa}$, $N = 10^7$, non-crack.

Fig. 14. Cracks observed on fatigue specimen tested for 0 – Compression loading (SKD61).

応力 σ_r に取ること、縦軸上の σ_{w0} と横軸上の σ_r を結ぶ直線すなわち式 (4) を推定線とすること等は、先の図と同様である。完全片振りとはいえ、被覆層直下の母材には、引張の残留応力が存在し、しかもそれは繰返し負荷の過程で、さらに引張方向に変化するもので、実質は部分両振になっていると考えられる。試験後の残留応力で整理した実験点は推定線上にほぼのっている。なお、残留応力の引張方向への変化量は、負荷応力の圧縮の最大値と 0.2% 耐力の差の 30% 程度であった。き裂の入り方を試験片表面より観察した結果の一例を Fig. 14 に示す。主き裂は (a), (b) に示したようにマクロ的には試験片軸直角に入っている。また、負荷応力振幅が 882 MPa 以上のものには、主き裂のほか被覆層にも軸直角の圧縮型き裂¹⁶⁾ (応力の低い場合) や 45° 方向のせん断型き裂¹⁶⁾ (応力の高い場合) が認められたが、これは静圧縮試験で調査した結果、最初の負荷で生じたものであることがわかった。しかし、耐久限度はこれらのき裂の有無とは無関係に母材の性質で決まるのは、これらのき裂が母材の疲労き裂を誘発しないことを示している。これは耐久限度直上の応力で被覆層に入ったき裂は圧縮型であり、

その開き角は 120° 以上の鈍角で応力集中があまり生じないためと考えられる。

4 結 言

高硬度な母材に VC を被覆した鋼の平均応力下での疲労強度を明らかにするとともに、耐久限度の推定法について検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 薄硬質被覆の有無にかかわらず、高硬度鋼 ($H_v > 300$) の耐久限度は、式 (1) で表されることを既報^{2,3)}で示したが、ここで $\sigma_r \equiv 0$ の試験片を用い、第 1 項すなわち式 (2) が成り立つことを実験的に明らかにした。

(2) 平均応力 σ_m + 残留応力 σ_r が引張側に作用する場合の耐久限度は、上式の σ_r に $\sigma_m + \sigma_r$ を入れた式 (3) によって推定できることを明らかにした。

(3) $\sigma_m + \sigma_r$ が圧縮側となる場合の耐久限度は、従来の両振耐久限度と真破断力を結ぶ直線（この場合も横軸 $\sigma_m + \sigma_r$ をとる）すなわち式 (4) で推定できる。ただし、完全片振やそれに近い大きな平均応力が作用する場合は、残留応力の移動分を考慮する必要がある。

(4) 大きな介在物が存在する場合は、 $\sigma_m + \sigma_r \geq 0$ では耐久限度は、(2) の方法で推定した値より下がるが、耐久限度線図上の勾配はほぼ同じであった。したがってこの場合は、村上らの式に第 2 項を付加した式 (5) で推定ができる。一方、 $\sigma_m + \sigma_r$ が圧縮側になってくると、(3) の方法で推定が可能になってくる。

(平成 6 年 5 月 24 日 日本材料学会第 43 期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 猿木勝司, 堀田昇次, 藤田浩紀, 新井 透, 材料, **36**, 1381 (1987).
- 2) 猿木勝司, 堀田昇次, 藤田浩紀, 新井 透, 材料, **37**, 770 (1988).
- 3) K. Saruki, S. Hotta, H. Fujita and T. Arai, Thin Solid Films, **181**, 389 (1989).
- 4) 塩澤和章, 西野精一, 半田圭一, 日本機械学会論文集, A-**57**, 1687 (1991).
- 5) M. F. Garwood, Interpretation of tests and correlation with service, Metals park Ohio, 12 (1951) ASM.
- 6) F. Borik and F. R. D. Chapman, Trans. ASM, **53**, 447 (1961).
- 7) 大内田 久, 安藤司文, 日本機械学会論文集, **34**, 199 (1968).
- 8) 青山咸恒, Review of Toyota R. D. Center, **5**, 2, 3 (1968).
- 9) 西島 敏, 金属材料技術研究所疲れデータシート資料, 45 (1981).
- 10) 西谷弘信, 緒方隆志, 遠藤正浩, 日本機械学会論文集, A-**50**, 1104 (1984).
- 11) 児玉昭太郎, 日本機械学会誌, **75**, 1026 (1972).
- 12) 吉武博之, 早山 徹, 日立評論, **49**, 1239 (1967).
- 13) S. Hotta, K. Saruki and T. Arai, Surface and coating technology, **70**, 121 (1994).
- 14) 毎熊宏則, 清水真佐男, 川寄一博, 日本機械学会論文集, A-**53**, 11 (1987).
- 15) 村上敬宜, 児玉昭太郎, 小沼静代, 日本機械学会論文集, A-**54**, 688 (1988).
- 16) 猿木勝司, 堀田昇次, 新井 透, 材料, **38**, 77 (1989).