

論説



Paper

真空浸炭におけるエッジ部過剰浸炭の疲労強度に対する影響

森田敏之*¹, 松村康志*¹, 梅本 実*²

Effect of Excess Carburizing at Edge on Fatigue Strength of Vacuum-Carburizing Steels

Toshiyuki Morita, Yasushi Matsumura, and Minoru Umemoto

Synopsis

To study the effect of excess carburizing at edge on fatigue strength of vacuum-carburizing steels, the relationship between the apex angles and fatigue strength was investigated with the four-point bending tests loading maximum stress at top edge. It was found that the strength of atmosphere-carburized specimens hardly depends on edge angles. The strength of vacuum-carburized specimens with near 150 deg edge is higher than that of atmosphere-carburized specimen. However, decreasing apex angles significantly lowers the fatigue strength of vacuum-carburized specimen due to excess carburizing resulting in carbide precipitation. Fatigue strength of vacuum-carburized specimen with the same edge section profile. Excess carburizing at edge occurs in diffusion period which is one of the unavoidable phenomena in vacuum-carburizing.

1. 緒 言

浸炭焼入は鋼材の表面硬化熱処理の代表的なものであり、歯車・シャフトなどの高い疲労強度・耐摩耗性が必要とされる部品に用いられている。近年、従来のガス浸炭法に代わり真空浸炭法が普及し始めている。真空浸炭ではガス浸炭で生じる粒界酸化が生成しないため高強度な処理品を得ることができ、例えば円筒形状でエッジ部を持たない小野式回転曲げ試験ではガス浸炭対比 10 % 程度強度が向上することが認められている¹⁾。

しかし、真空浸炭では表面炭素濃度が表面形状の影響を受け、歯車の歯端・シャフトのキー溝部などのエッジ部では先端の炭素濃度が平面部と比較して高くなることが知られている²⁾。このため、真空浸炭において平面部の表面炭素濃度を焼入・焼戻し後に最も高い硬さを得られるようにした場合、エッジ部では平面部よりも炭素濃度が高い過剰浸炭された状態となり、残留オーステナイト（以下 γ_R ）の過剰生成、粒界への炭化物の析出による不完全焼入組織の生成などから、十分な硬さが得られず

強度が低下する。また粒界に炭化物が生成した場合、硬さの低下がなくとも炭化物に囲まれた領域が巨大な欠陥として作用し、強度を低下させる懸念がある³⁾。

このようなことから、真空浸炭した実部品ではエッジ部が最弱部となり、強度を律速することが考えられる。しかし、小野式回転曲げ試験などの従来の試験方法ではエッジ形状をもった試験片の評価が困難であり、真空浸炭におけるエッジ部過剰浸炭の強度に対する影響を定量的に解析した例は少ない。

本研究ではエッジ部を有する試験片を用い、エッジ部過剰浸炭の生成原因の解明と疲労強度への影響について調査を行った。

2. 実験方法

本研究では Fig.1 に示す 60°、90°、120°、150° のエッジを持った試験片を用いた。60° ははすば歯車の歯元歯端を 90° はシャフトのキー溝部を模擬した形状である。平面に対応する 180° は肩部からの破壊が懸念されるため、150° を最大の角度とした。各々の試験片につい

2008 年 1 月 10 日受付

* 1 大同特殊鋼株式会社研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 豊橋技術科学大学生産システム工学系、工博 (Dr., Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology)

て過剰浸炭状況を調査し、油圧サーボ式引張圧縮試験機により応力比0、繰返し速度10 Hzにてエッジ頂部に最大応力が作用するよう4点曲げ疲労試験を行った。

供試材成分をTable 1に示す。供試材はJIS SCr420に相当し、試験片は圧延素材を1223 K、3.5 ks保持後空冷した後、圧延方向に切り出し作製した。平面部の表面炭素濃度が0.8 mass%となるガス浸炭処理と真空浸炭処理を行い、453 K、3.6 ksの焼戻し処理を施した。浸炭条件をFig.2に示す。ガス浸炭にはオリエンタルエンジニアリング(株)製のメタノール滴注式ガス浸炭炉を用い、エンリッチガスとしてプロパンを使用した。真空浸炭は大同特殊鋼(株)

製プラズマ浸炭炉を用い、浸炭ガスとしてプロパンを用いた。浸炭期にはプロパンガスを400 l/h供給してプロパンガス雰囲気中で保持し、拡散期には真空排気のみを行って真空中で保持している。浸炭処理を施した試料を4点曲げ疲労試験、EPMAを用いた炭素濃度分布測定、硬さ分布測定、および光学顕微鏡組織観察に供した。

3. 実験結果および考察

3. 1 ミクロ調査結果

Fig.3～5に試験片のエッジ頂部組織観察結果、硬さ分布測定結果および炭素濃度分布測定結果を示す。組織観察

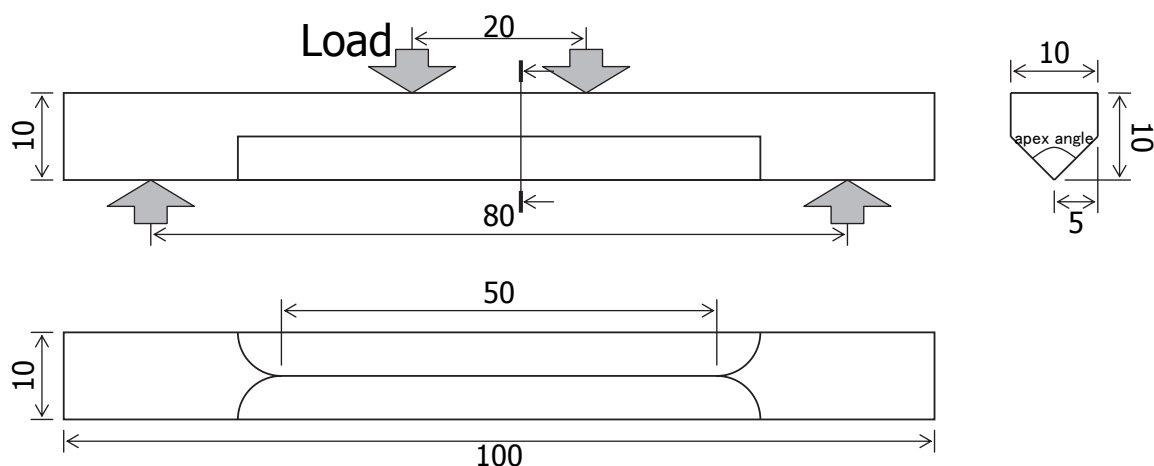


Fig.1. Schematic illustration of specimens and 4 point bending test.

Table1. Chemical composition of materials (mass%).

Grade	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SCr420	0.2	0.19	0.81	0.006	0.008	0.1	0.05	1.13	—

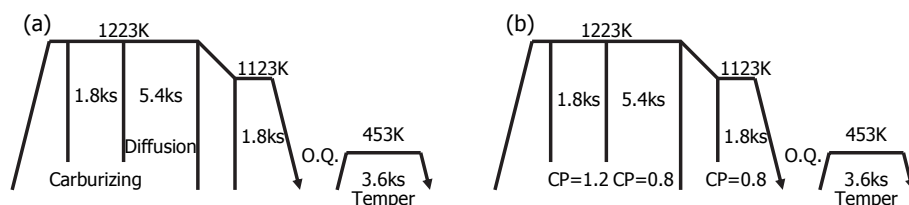


Fig.2. Carburizing conditions. (a) Atmosphere-carburizing, (b) Vacuum-carburizing.

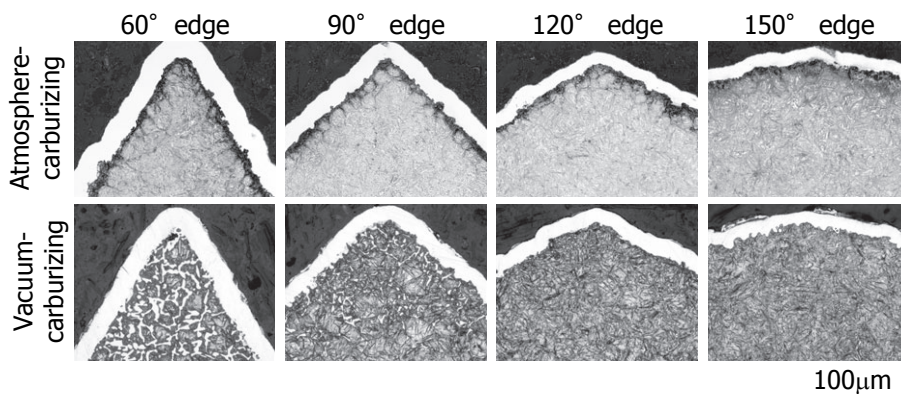


Fig.3. Microstructures of atmosphere-carburized and vacuum-carburized specimens.

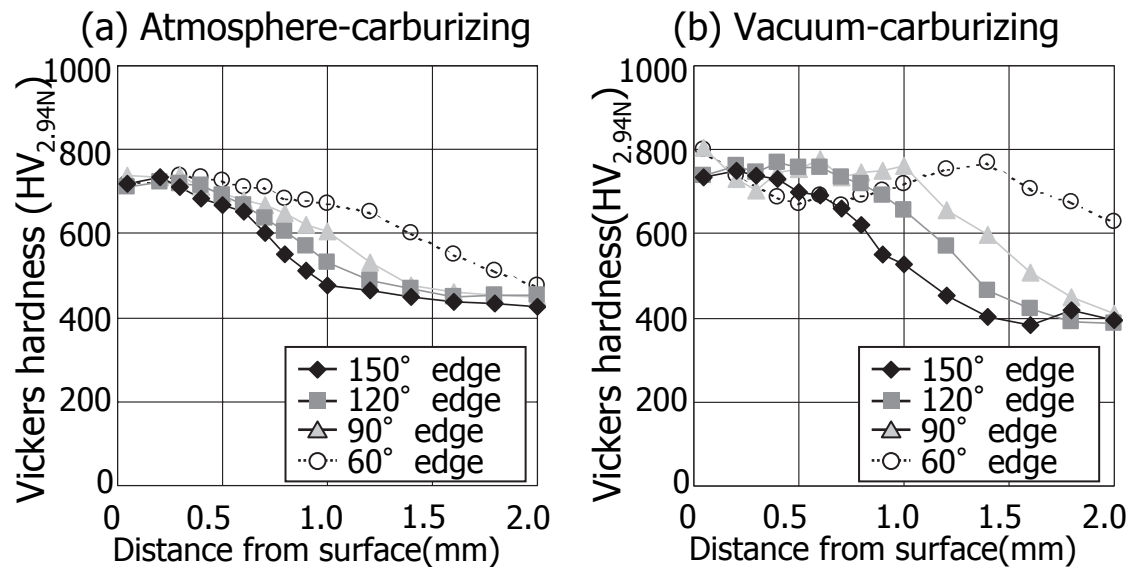


Fig.4. Vickers hardness profile for atmosphere-carburized and vacuum-carburized specimens.

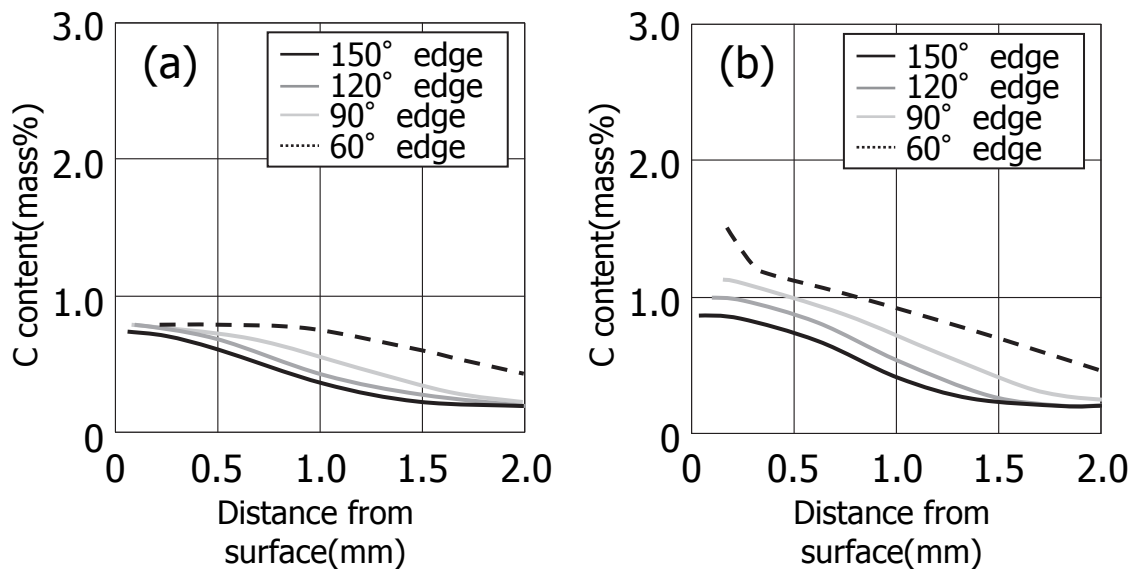


Fig.5. Measured carbon concentration profiles for atmosphere carburized and vacuum-carburized specimens. (a) Atmosphere-carburizing, (b) Vacuum-carburizing

はNiメッキにて試料表層を保護した状態で研磨を行い、ナイトール腐食後に光学顕微鏡を用いて行った。硬さ分布はエッジ頂部からエッジ角を2等分するように、ビッカース硬さ試験機を用いて荷重2.94 Nで測定した。炭素濃度分布も同様にエッジ頂部からエッジ角を2等分するように測定した。

ガス浸炭材は全てのエッジ角度で表面炭素濃度が0.8 mass%程度である。また組織観察から、表層から10 μ m程度には粒界酸化に伴う不完全焼入組織が存在し、エッジ頂部では平面部よりも粒界酸化層が厚く、エッジ角の鋭角化に伴って厚くなる傾向が見られる。これは、エッ

ジ部では両辺からの粒界酸化層の成長が重なるため粒界酸化が深くなり、その効果がエッジ角の鋭角化とともに顕著となったものと考えられる。硬さは全てのエッジ角度において表面付近で最高値である750 HV程度となり、エッジ角度に依存しない。

真空浸炭材の150°試験片では表面炭素濃度が0.8 mass%程度であり、組織中に炭化物が存在せず硬さも表層付近で最高値を示し単調に減少する分布を示す。120°試験片では表面炭素濃度が1.0 mass%程度であり、 γ_R の増加が観察されるが炭化物は析出していない。硬さは150°試験片と同じく表層付近で最高値を示し単調に減

少する分布を示す。90°試験片では表面炭素濃度が1.2 mass% 程度となり、粒界炭化物が90 μm まで観察される。硬さ分布は表層付近で最高値を示し内部で極小値と極大値を持つ分布となる。表層付近では過剰な炭素の導入に伴う γ_R の過剰生成により硬さが低下するが、最表面ではさらにセメンタイトが生成したため硬さが上昇したと考えられる。60°試験片では90°試験片では見られない、表面付近での炭素濃度の立ち上がりが観察され、粒界での炭化物生成が320 μm まで観察される。このことから90°試験片では1223 Kでの拡散終了時には炭化物が存在せず、1123 Kへの降温時に析出し、60°試験片では1223 Kでの拡散終了時にすでに炭化物が存在していたと考えられる。また、90°試験片と同様に表層付近で最高値を示し内部で極小値と極大値を持つ硬さ分布であるが、より傾向が顕著となっている。

本実験では過剰浸炭に伴う不完全焼入組織の生成は観察できなかった。不完全焼入組織は、過剰浸炭に伴い炭化物が生成する際に炭化物生成元素であるCr, Mnなどが炭化物中に濃化し、オーステナイト中の濃度が低下して焼入性が低下することで生成する。本実験においては、試験片が小さく冷却速度が十分大きいために、焼入性が低下しても不完全焼入組織が生成しなかったと考えられる。

3. 2 エッジ部過剰浸炭生成機構

真空浸炭におけるエッジ部過剰浸炭の原因を明らかにするため、前報⁴⁾で用いた平面に対する炭素濃度分布予測手法を応用し、エッジ部の炭素濃度分布の予測を検討した。

真空浸炭のシミュレーションは式(1)に示すFickの第2法則を差分法にて解くことにより行う。Cは炭素濃度を、Dは拡散定数を表す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

①浸炭期の表面は黒鉛と平衡する状態にあるものとし、平衡相・平衡組成はThermo-Calcを用いて算出する。

②内部では炭素が炭化物と γ 相に分配され、平衡相・平衡組成はThermo-Calcを用いて算出する。炭化物の成長・収縮が起こるが反応に要する時間は極めて短いとして無視する。

③炭化物中の炭素は固定され γ 相中の炭素のみが拡散する。また、炭化物を拡散経路とみなさない。

④拡散定数はC.Wells⁹⁾らの測定値を温度と炭素濃度のみに依存する形で回帰した以下の近似式を用いる。Cは

炭素濃度 (mass%), Tは浸炭温度 (K) を表す。

$$D(C) = \exp \left\{ 18.5 - 1.5C + \frac{546C^2 + 2316C - 19410}{T} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ガス浸炭のシミュレーションは以下の条件の下に式(1)に示すFickの第2法則を差分法にて解くことにより行う。

①表面炭素濃度は雰囲気と平衡するとし、炭素の活量係数 γ として式(3)に示すT.Wada^{6),7)}らの結果を用いる。

$$\begin{aligned} \gamma &= 10^{f_c} \\ f_c &= \frac{2300}{T} - 2.24 + \frac{18.6}{T} \times [C(\%)] + \left(\frac{62.5}{T} + 0.041 + \frac{8.9}{T} \times [C(\%)] \right) \\ &\times [Si(\%)] + \left(\frac{19.2}{T} + 0.0029 \right) \times [Ni(\%)] \\ &+ \left(-\frac{218}{T} \right) \times [Mn(\%)] + \left(-\frac{102}{T} + 0.033 \right) \times [Cr(\%)] + \left(-\frac{56}{T} + 0.015 \right) \\ &\times [Mo(\%)] + \left(-\frac{177}{T} \right) \times [V(\%)] \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

②炭化物の生成は考慮せず、鋼中に含まれる炭素は全て固溶しており式(1)に従って拡散する。

③拡散定数はC.Wells⁹⁾らの測定値を温度と炭素濃度に依存する形で回帰した近似式(2)を用いる。

Fig.6に炭素濃度分布測定結果および計算結果を示す。ガス浸炭では表面炭素濃度が雰囲気と平衡する値となるため、エッジ角度によらずエッジ先端の炭素濃度が一定となる。真空浸炭ではエッジ角度の鋭角化に伴いエッジの先端の炭素濃度が増加する。測定と計算の結果は非常に一致し、浸炭手法によらずこの計算手法を用いてエッジ部の炭素濃度分布を予測することが可能である。

Fig.7にシミュレーションを用いて求めた真空浸炭材のエッジ先端の炭素濃度の時間変化を示す。シミュレーションによれば浸炭期の表面炭素濃度は黒鉛と平衡する値となり、エッジ角度によらず一定である。拡散期には表面炭素濃度が低下するが、エッジ角度が鋭くなるほど炭素濃度の低下が遅く、拡散期終了時の炭素濃度が高くなる。これは、Fig.8に示すように平面部では一方向にのみ炭素拡散が起こるが、エッジ部では両辺からの炭素拡散場が重なり、表面炭素濃度の低下速度が平面部よりも遅くなるためである。ガス浸炭でも浸炭初期をカーボンポテンシャルの高い浸炭期とし、浸炭後期はカーボンポテンシャルの低い拡散期として処理を行っているため、浸炭後期にはエッジ部で両辺からの炭素拡散場が重なる。しかし表面炭素濃度が雰囲気との平衡で決まるため、過剰な炭素が雰囲気中に放出されエッジ部と平面部の差が存在しなくなる。

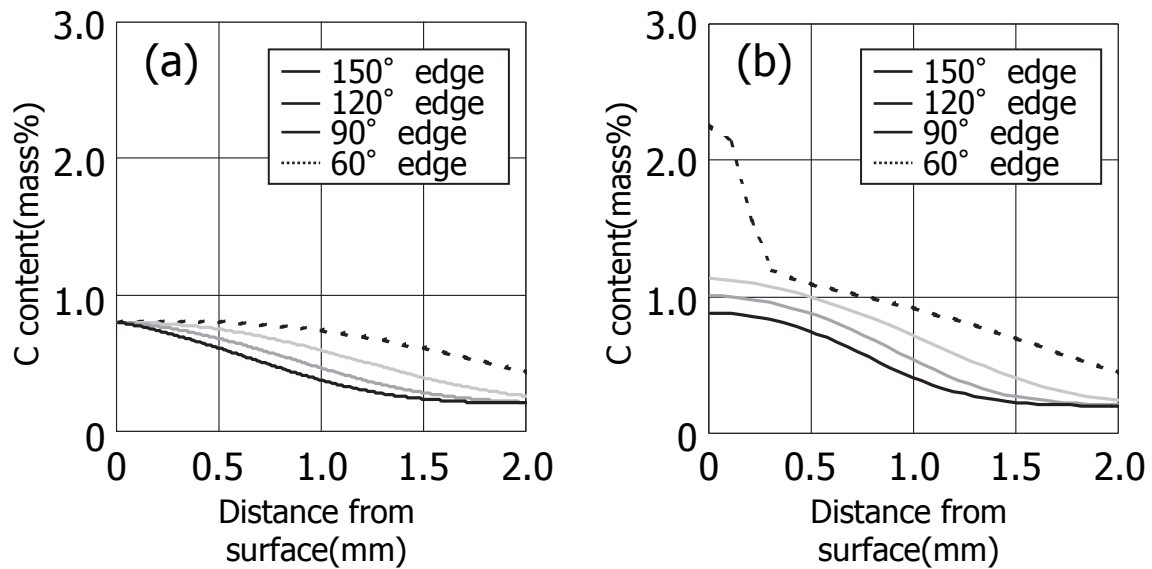


Fig.6. Calculated carbon concentration profiles for atmosphere carburized and vacuum-carburized specimens. (a) Atmosphere-carburizing, (b) Vacuum-carburizing

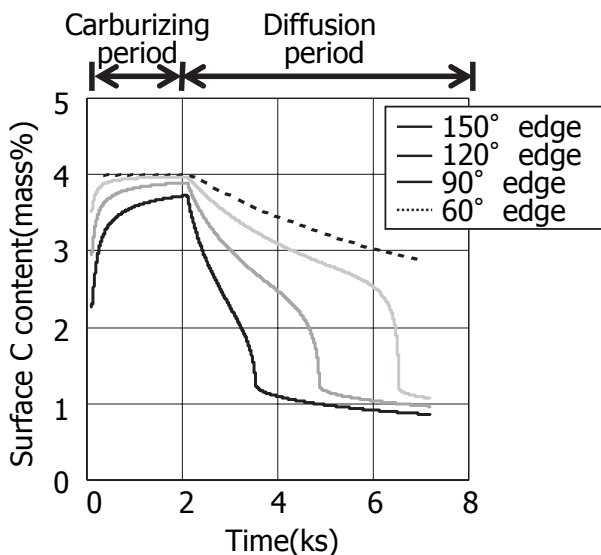


Fig.7. Changes of calculated surface carbon content of edge specimens.

以上から、ガス浸炭では表面炭素濃度のエッジ角度依存性は存在しないが、真空浸炭ではエッジ角が鋭くなるに従い表面炭素濃度が増加し、 γ_R の増加や粒界での炭化物の生成が起これと考えられる。

3. 3 4点曲げ疲労試験結果

エッジ試験片を用いて行った4点曲げ疲労試験結果をFig.9に示す。この試験では負荷応力が単純な真直梁の曲げ問題で取り扱うことができ、中立軸からの距離に比例した応力が負荷されておりエッジ頂部に応力集中は存在しないことをFEM解析により確認しているため、縦軸にはエッジ先端の公称応力を用いた。ガス浸炭材ではエッ

ジ角度の鋭角化に伴いS-N曲線の傾きは変化しないが短寿命化する傾向がある。これは、エッジ角度が鋭くなるに従い、粒界酸化深さが増加したためであると考えられる。

真空浸炭材では150°、120°試験片の応力-寿命曲線には顕著な差がないが、90°試験片は大きく寿命低下し60°試験片ではさらに短寿命となる。Fig.10に代表値として10000回強度とエッジ角度の関係を示す。ガス浸炭材ではエッジ角度の鋭角化に従って強度が低下する傾向はあるものの顕著ではない。真空浸炭材ではエッジ角度の鋭角化に従って顕著に強度が低下し、150°試験片ではガス浸炭材より高い強度であるが、粒界炭化物が生成していた90°、60°試験片ではガス浸炭材と同等もしくはより低い強度となる。このことから粒界に生成した炭化物は疲労強度を大きく低下させるといえる。

3. 4 4点曲げ疲労試験の破面観察

Fig.11に4点曲げ試験の破面観察結果の例として真空浸炭材の150°試験片を示す。エッジ頂部(a)を除き、いずれの試験片もエッジ角度によらず浸炭層(b)(e)は粒界破面、非浸炭層(c)(d)はデンプル状の破面、最終破断部(f)は粒界破面が観察された。エッジ頂部(a)は起点および亀裂伝播部であり、(b)以降は急速破壊部である。

Fig.12にエッジ頂部の破面観察結果を示す。ガス浸炭材は表面から20 μm 程度が粒界破面となっており、その内側に疲労破面を呈す。真空浸炭材では起点であるエッジ頂部のみが粒界破面、その直下が疲労破面となっているが、60°および90°試験片では粒界破面の領域が広い。ガス浸炭材をより詳細に観察したFig.13より、ガス浸炭材

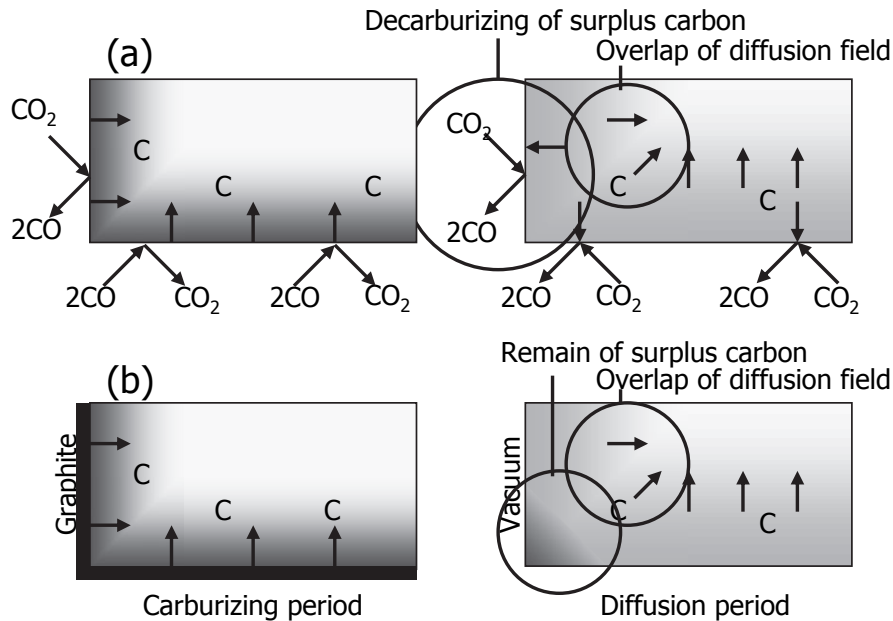


Fig.8. Schematic illustration for (a) Atmosphere-carburizing and (b) Vacuum-carburizing on edges.

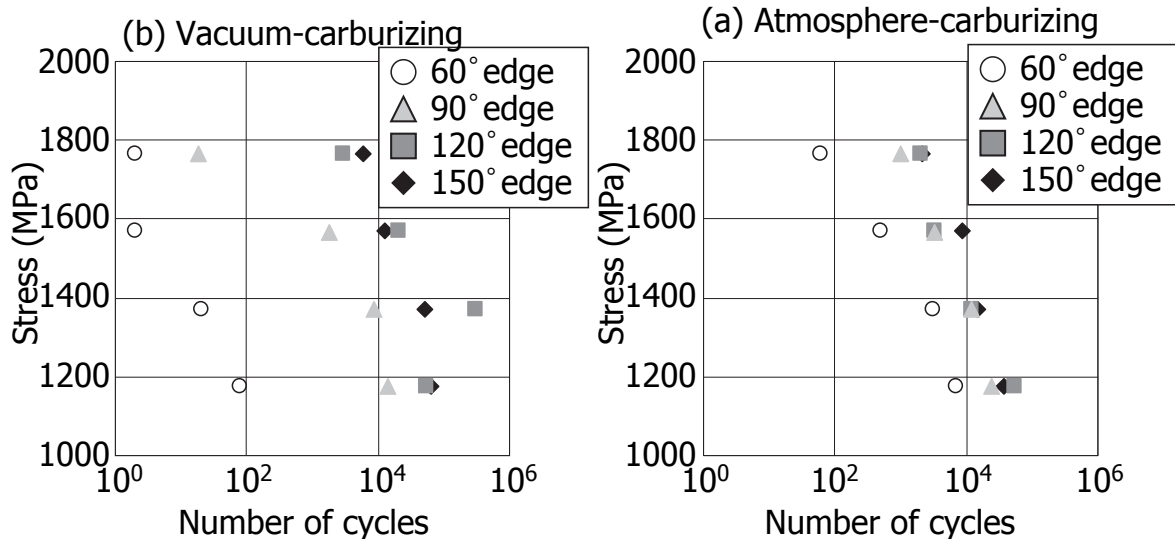
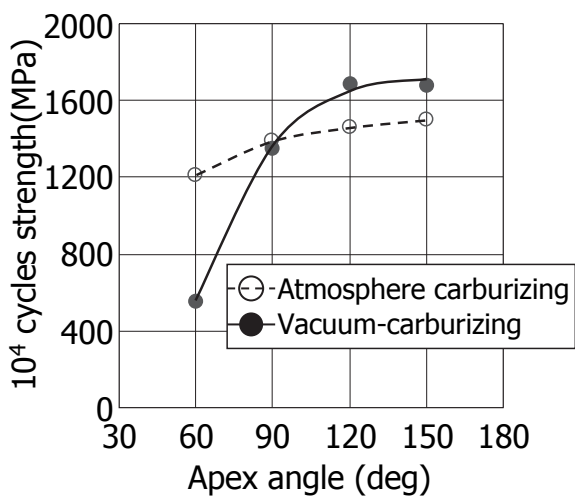


Fig.9. S-N diagrams of four points bending fatigue tests for atmosphere-carburized and vacuum-carburized specimens.

Fig.10. 10⁴ cycles strength for each apex angle.

のエッジ頂点部にはパーライトと考えられる縞模様が存在し、破面の両側が対応した模様となっている。従来、ガス浸炭材の回転曲げ疲労試験などでは、粒界酸化に伴う不完全焼入組織が強度を律速することが知られているが、今回の4点曲げ試験においても粒界酸化に伴う不完全焼入組織である脆弱なパーライトが起点として作用したと考えられる。

一方、過剰浸炭により粒界炭化物が生成している真空浸炭材の60°および90°試験片は粒界破面であるものの丸みを帯びた特徴的な形態であり、一部にプレート状のものが剥離した部分が存在する。Fig.14に示すEDX分析から、破面にはC,Crを高濃度に含有する炭化物と考えられる部分と比較的C,Crが低濃度なマルテンサイトと考え

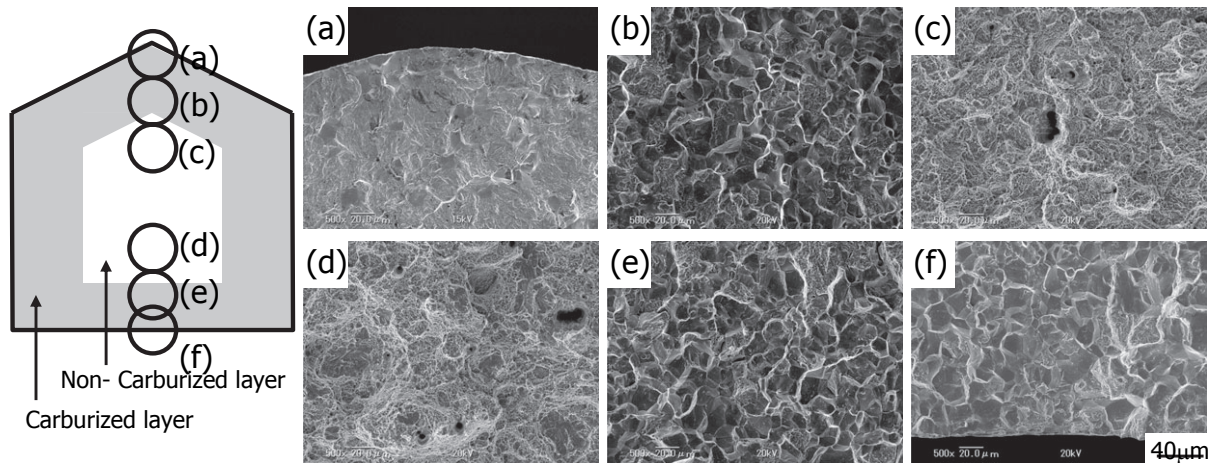


Fig.11. SEM images for fracture surface of vacuum-carburized 150° specimens.

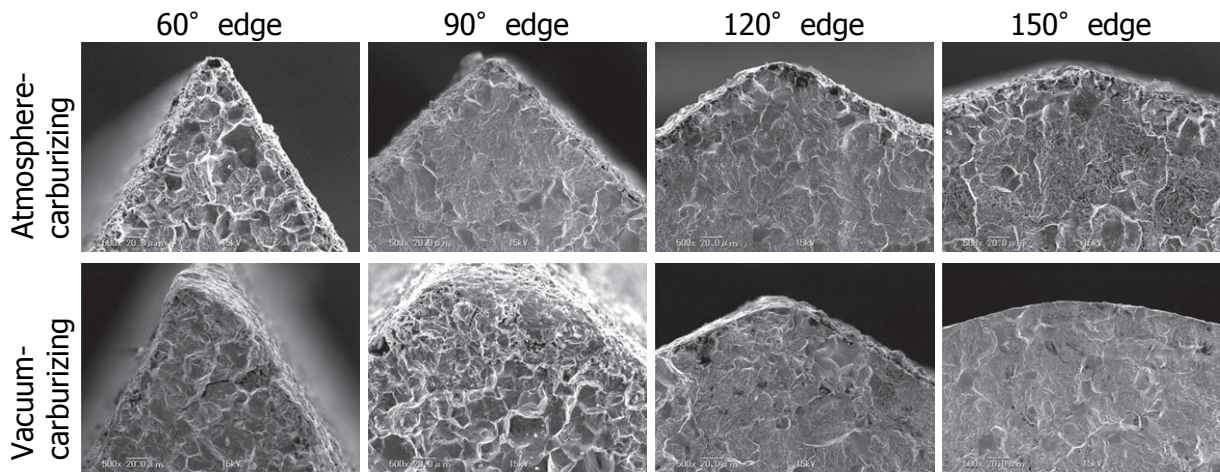


Fig.12. SEM images for fracture surface of atmosphere-carburized and vacuum-carburized specimens.

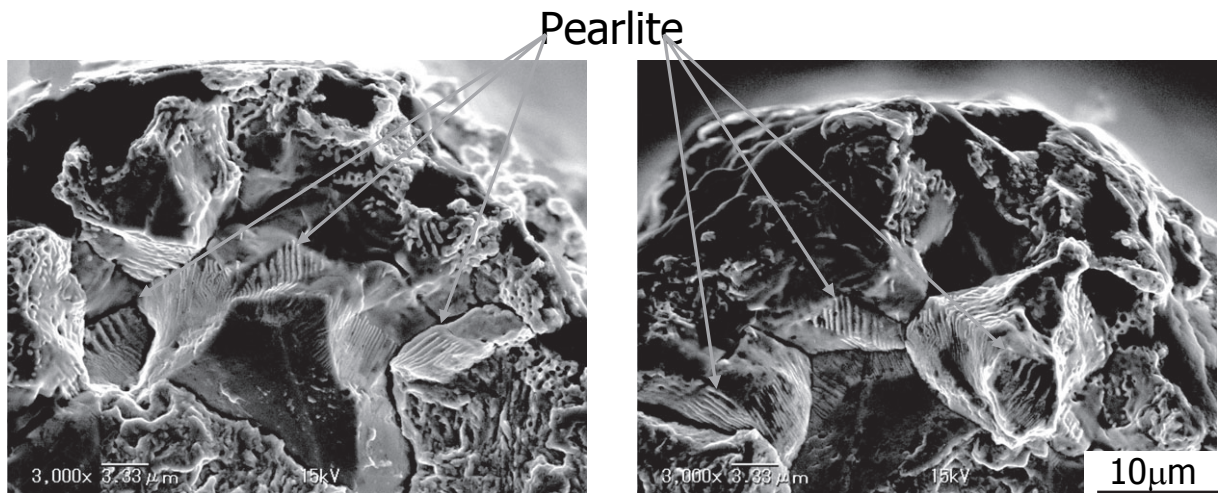


Fig.13. SEM images for each side of fracture surface of atmosphere-carburized 90° edge specimens.

られる部分があり、破面両側の対応する部分は片側が炭化物であれば、もう片側はマルテンサイトとなっている。下村ら²⁾は粒界に炭化物が析出していた場合、炭化物に囲まれた領域が巨大な欠陥として作用し起点となるため

に疲労強度が低下することを報告している。このことから、粒界に炭化物が生成している場合にはマルテンサイト-炭化物界面から亀裂が発生し、さらに亀裂の伝播経路となって破壊に至ったと考えられる。

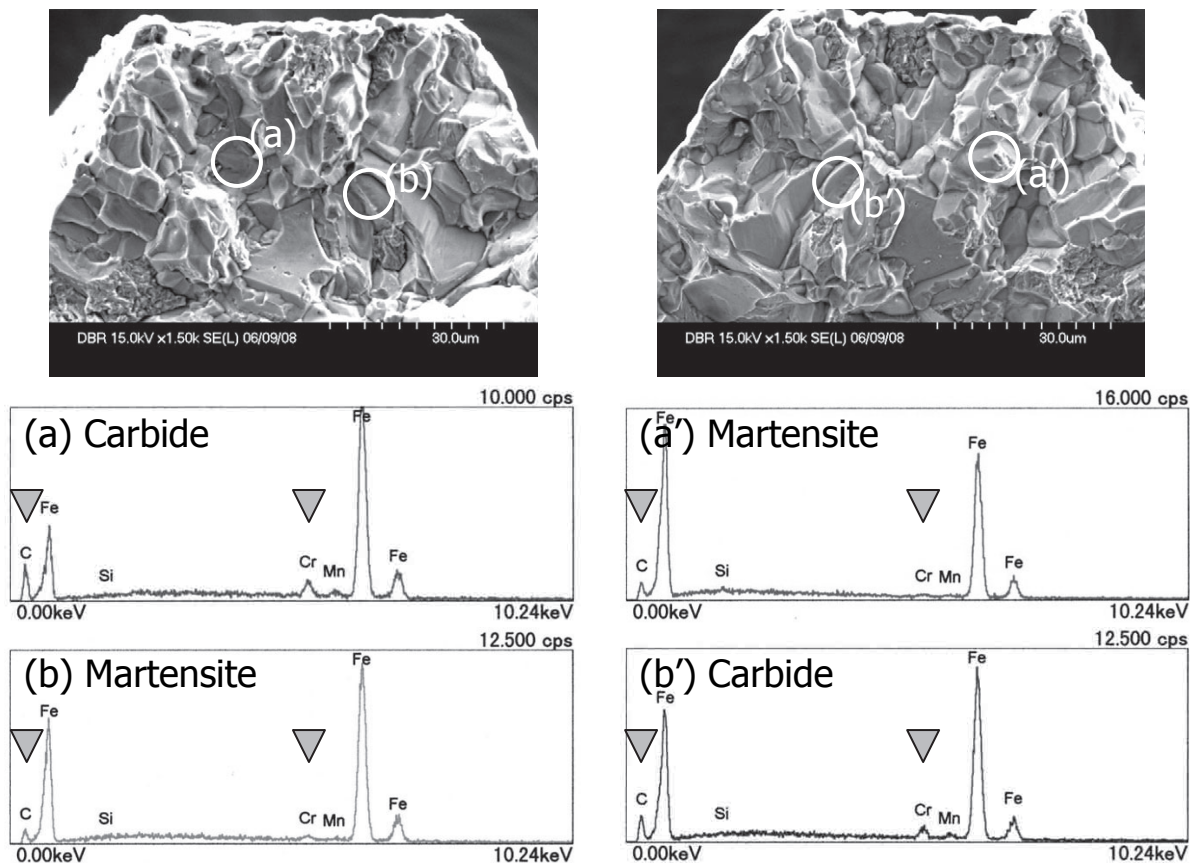


Fig.14. EDS analysis for each side of fracture surface of vacuum-carburized 60° edge specimens.

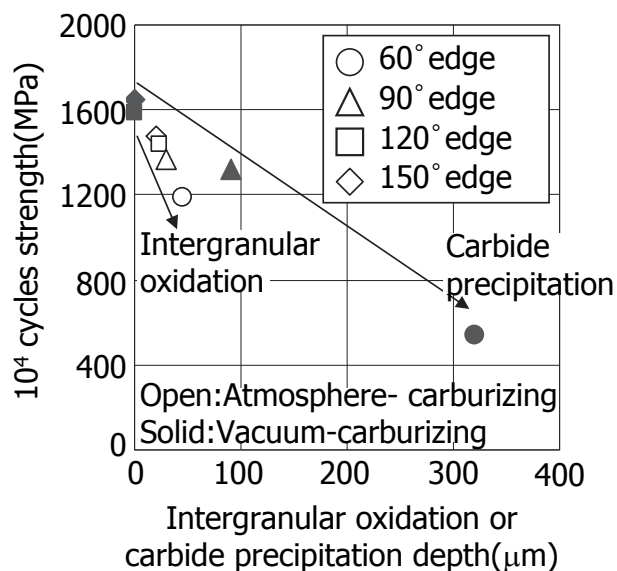


Fig.15. Relationship between intergranular oxidation or carbide precipitation depth and fatigue strength.

Fig.15 に粒界酸化深さもしくは炭化物析出深さと 10000 回強度との関係を示す。粒界酸化深さ・炭化物析出深さは、エッジ角の 2 等分線上で測定した粒界酸化層

の厚さ・炭化物析出層の厚さを表す。粒界酸化・炭化物の生成していない真空浸炭した 150° および 120° 試験片ではほぼ等しい強度が得られる。一方、90° および 60° 試験片では炭化物が粒界に生成しており、鋭角の試験片ほど深くまで炭化物が析出し強度が低下している。ガス浸炭された試験片では粒界酸化が存在し、粒界酸化・粒界炭化物が生成しない場合と比較し強度が低下する。またエッジの鋭角化に伴い粒界酸化深さは深くなり強度が低下する。

粒界酸化および粒界炭化物が疲労強度を低下させる原因としては以下が考えられる。本実験において粒界酸化もしくは炭化物が生成していた場合には、負荷によって開口した不完全焼入組織もしくはマルテンサイト-炭化物界面が初期亀裂となり、成長し破壊に至ると考えられる。森野ら⁸⁾は低サイクル疲労現象において初期亀裂長さがその後の亀裂伝播寿命を律速すると報告している。このことから、粒界酸化および粒界炭化物は早期に亀裂を発生させ、また初期亀裂を長くし亀裂伝播寿命を短くすることで強度を低下させていると考えられる。粒界酸化に対し炭化物析出が同じ深さでも疲労強度の低下が小

さいが、界面強度が異なり亀裂発生までの負荷回数が異なるとことと、粒界酸化が連続的に分布しているのに対し炭化物が塊状に存在し不連続に分布していることが影響していると考えられる。

4. 結 言

- (1) ガス浸炭では表面炭素濃度のエッジ角度依存性が小さいが、真空浸炭ではエッジ角度が鋭くなるに従い表面炭素濃度が高くなる。
- (2) 真空浸炭において、表面状態が黒鉛と平衡する状態であると、炭化物の存在を考慮して拡散方程式を解くことで、エッジ部の炭素濃度分布を精度よく計算することが可能である。
- (3) エッジ部過剰浸炭は真空浸炭に必須な拡散期にエッジ部において拡散場の重なりが発生するため起こる。ガス浸炭では表面炭素濃度が雰囲気との平衡から決まるためエッジ部過剰浸炭が起こらない。
- (4) ガス浸炭では疲労強度のエッジ角度に対する依存性が小さい。真空浸炭では平面に近い角度ではガス浸炭より高い疲労強度を示すが、鋭くなるに従い強度が低下しガス浸炭材以下の強度となる場合も存在する。

(文 献)

- 1) 内藤武志：浸炭焼入れの実際，日刊工業新聞社，1999，111.
- 2) K.D.Jones and G.Krauss: Heat Treat, **79** (1980), 188.
- 3) 下村哲也，森田敏之，井上幸一郎，羽生田智紀：電気製鋼，**77** (2006)，11.
- 4) 森田敏之，羽生田智紀：鉄と鋼，**92** (2006)，268.
- 5) C.wells, W.Batz and R.F.Mehl:Trans.AIME, **88** (1950), 553.
- 6) T.Wada, H.Wada, J.F.Elliott and J.Chipman: Met.Trans.,**3** (1972),1657.
- 7) T.Wada, H.Wada, J.F.Elliott and J.Chipman:Met.Trans.,**3** (1972),2865.
- 8) 森野数博，西谷弘信，西村太志：日本機械学会論文集（A編），**63** (1997)，657.