

塑性加工を利用した金属のハイブリッド表面改質プロセスに関する研究

慶應義塾大学 理工学部機械工学科
助教授 小茂鳥 潤
(平成 13 年度研究開発助成 AF-2001010)

キーワード：塑性加工，疲労，ハイブリッド表面改質

1. 緒言

WPC (Wide Peening Cleaning) 処理は、ショットピーニング処理に比べてより高硬度・小粒径の粒子を部材表面に高速で衝突させ、表面近傍に大きな圧縮残留応力を有する加工硬化層を形成する新しい表面改質法である。その有効性は、歯車などの機械部品において確認されているが、いまだ強化機構については解明されていない⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

前報⁽⁵⁾で示したように、WPC 処理によって形成される残留応力は、表面近傍に最大の圧縮残留応力が現れる分布型を有し、しかも繰返し負荷に対して安定であるため、表面に形成された微小な疲労き裂の進展を抑制する効果大きい。しかしながら、かかる圧縮残留応力が付与される表面層は非常に浅いため、進展を抑制することが可能なき裂深さの範囲が限られており、このため WPC 処理単独では、表面層の高硬さ組織ならびに大きな圧縮残留応力の存在などから期待されるほどには疲労強度が向上しないという問題点を有している。

したがって、WPC 処理による疲労強度の改善効果をより高めるためには、WPC 処理によって導入される前述の残留応力分布の特徴を維持したうえで、圧縮残留応力が部材内部により深くまで分布するような新たな表面処理法を開発する必要があると考えられる。そのためには、WPC 処理単独ではなく、WPC 処理と比較して表面部に深い圧縮残留応力層を付与しうる他の表面処理法と組み合わせた、いわゆる複合表面処理の導入が有効と考えられる。そこで本研究では、複合表面処理の具体例として浸炭焼入れ処理と WPC 処理との組み合わせを取り上げ、まず、かかる複合処理によっていかなる性状の表面改質層が得られるか調べた。さらに、複合処理鋼の疲労破壊特性を明確にすると共に、疲労過程での残留応力の変化挙動を調べた結果にもと

づいて、鋼の疲労強度・破壊機構に及ぼす浸炭焼入れ処理と WPC 処理との複合表面処理の効果について検討・考察を加えた。

2. 供試材および実験方法

供試材としては表 1 に示す化学成分を有するクロムモリブデン鋼 SCM420H を使用した。同材に 950°C 1 時間保持の焼準を施した後、図 1 に示す形状の平滑試験片および切欠試験片に機械加工した。その後、試験片の最小径部をエメリ紙、アルミナ粉および電解法により研磨仕上げし、図 2 に示す熱履歴で浸炭焼入・焼戻し処理を施した（以下、浸炭処理材と称する）。浸炭処理後の WPC 処理は表 2 に示す条件で浸炭処理材の最小径部に施した（以下、（浸炭+WPC）ハイブリッド処理材と称する）。

このようにして作製した試験片について、深さ方向にマイクロビッカース硬さ（荷重 50gf）分布の測定を行った。残留応力の測定は、Cr-K α 線の焼戻マルテンサイト (211) 面の回折を利用して $\sin^2\phi$ 法により行った。その際、応力定数はすべて鋼の弾性係数 206GPa を用いて求めた。表面層の残留オーステナイト量の測定は X 線回折装置を用い、焼戻マルテンサイト (200) 面と残留オーステナイト (220) 回折パターンの積分強度の比較により求めた。また、深さ方向の残留オーステナイト量、残留応力分布の測定は、X 線回折装置を用い、試験片表面の微小領域を逐次電解研磨によって除去することにより行った。

疲労試験は、小野式回転曲げ疲れ試験機を用い、室温大気中、繰返し速度 3000rpm で行った。破断後の試験片については、走査電子顕微鏡 (SEM) による破面観察によって破壊起点部の特定を行った。

3. 結果および考察

3-1 ハイブリッド表面処理材の表面性状と残留応力

まず、(浸炭+WPC) ハイブリッド処理によって、いかなる性状の表面改質層が得られるかを調べるため、表面から深さ方向の硬さ分布ならびに残留応力分布を調べた。

図 3, 4 にそれらの結果を示す。これらの図より、(浸炭+WPC) ハイブリッド処理を施すことによって、最表面近傍(表面から 50 μ m 程度の深さ)の硬さが浸炭材に比べて著しく上昇すると共に、かかる領域内では浸炭処理時に導入された圧縮残留応力の上にさらに大きな圧縮残留応力(最表面では-1200MPa 程度)が付与されていることがわかる。

以上より、浸炭焼入れ処理と WPC 処理を組み合わせることによって、期待通り、浸炭焼入れによって形成された部材表面部の深い圧縮残留応力層を維持したまま、最表面にさらに大きな圧縮残留応力を付与しうることが明らかになった。

WPC 処理による最表面層の大きな圧縮残留応力の形成要因としては、微粒子の衝突による表面の強塑性加工、加工時の発熱による自己焼入れ効果⁽⁶⁾、浸炭鋼などにおける残留オーステナイトの加工誘起マルテンサイト変態にともなう表面の体積膨張⁽¹⁾などが挙げられている。これらのうちで特に残留オーステナイトの変態に起因する残留応力の増加が大きいものと考えられており、WPC 処理による大きな圧縮残留応力の形成要因を検討するためには、残留オーステナイトの変化挙動を調べる必要がある。そこで、WPC 処理前後の表面層の残留オーステナイト量の測定を行った。

その結果を図 5 に示す。同図より WPC 処理を施すことによって浸炭焼入れ処理時に生じた残留オーステナイトは、表面近傍 40 μ m 程度の領域で明らかに減少していることがわかる。かかる残留オーステナイト量に変化が生じた表面層厚さは、図 4 の圧縮残留応力の増加領域に対応しており、かかる領域で残留オーステナイトが加工誘起マルテンサイト変態を生じる結果、圧縮残留応力の増大が起こるものと考えられる。

そこで次に、表面層の残留オーステナイトがマルテンサイト変態を起こすことによって、どの程度の残留応力が生じうるのかについて考察を行った。考察にあたっては、半無限体において表面の薄い層が一様に体積膨張を生じるモデルを考え、かかる膨張を生じる表面層内の応力を求めることにより残留応力の推定を行った。

かかるモデルを用いると、残留オーステナイトの変

態によって生起する残留応力は、オーステナイトのマルテンサイト変態時の比容積変化率(γ'/γ)を用いて、次式のようにあらわされる(APPENDIX 参照)。

$$\sigma_R = -\frac{mE}{m-1} \cdot \left[\sqrt[3]{1 + \frac{\alpha}{100} \left(\frac{\gamma'}{\gamma} - 1 \right)} - 1 \right] \dots (1)$$

E:ヤング率

m:ポアソン数 (=1/ ν , ν :ポアソン比)

α :変態するオーステナイト量 (vol.%)

γ'/γ :変態による比容積変化率

なお、表面層で変態を生じる残留オーステナイト量 α としては、深さ 40 μ m までの領域中の変化量の平均値である 7% (体積割合) とし、また、オーステナイトからマルテンサイトへ変態する際の比容積変化率 (γ'/γ) としてはオーステナイト中の炭素量が 0.81% である場合の 4.04%⁽⁷⁾ を用いた。

このようなモデルにもとづくと、7%の残留オーステナイトの変態によって生じる圧縮残留応力は約 290MPa と推定される。また、1000MPa の圧縮残留応力の増加をもたらす変態量を計算すると、約 24%の残留オーステナイトの変態が必要となる。

今回のモデルから算出された圧縮残留応力の増加量は、X 線回折による測定結果に比べて少ないが、WPC 処理を施すことによって 20%程度の残留オーステナイトが変態することも報告されており⁽⁴⁾、残留オーステナイトの変態が WPC 処理による大きな圧縮残留応力の生起に対して大きな役割を果たしていると考えられる。したがって、(浸炭+WPC) ハイブリッド処理材では、微粒子衝突による表面の強塑性加工に加えて残留オーステナイトの変態に起因した残留応力がさらに加わることによって、大きな圧縮残留応力が表面にもたらされていると考えられる。

3-2 疲労強度・破壊機構に及ぼす WPC 処理の影響

(浸炭+WPC) ハイブリッド処理材では、残留応力分布が深い位置まで圧縮となるため、WPC 単独処理の短所である圧縮残留応力層の浅さを補うことができ、さらに、表面の高硬さに加えて表面の大きな圧縮残留応力の生起によって著しい疲労強度の向上が期待される。そこで、浸炭処理材および(浸炭+WPC) ハイブリッド処理材について疲労試験を行い、疲労強度におよぼす複合処理の効果について検討した。

図 6 に回転曲げ疲労試験の結果を示す。同図から(浸炭+WPC) ハイブリッド処理材の疲労強度は、浸炭処理材と比較して全寿命域にわたって上昇している

ことがわかる。ここで残留応力を平均応力 σ_m と等価と考え、疲労強度が $1/2\sigma_m$ にしたがって向上すると考えた場合⁽⁸⁾、500MPa程度の疲労強度上昇が予測されるが、本実験の場合のWPC処理による疲労強度の向上量は200MPa程度であり、表面近傍の1000MPaを超える大きな圧縮残留応力に見合うほどには疲労強度が向上していないと考えられる。そこで、この原因を調べるために、破壊起点部に注目してSEMによる破面観察を行った。

その結果、浸炭処理材では破壊が全て試験片表面から生じているのに対して(図7(a))、(浸炭+WPC)ハイブリッド処理材では破壊は試験片内部から生じていることが明らかになった(図7(b))。

以上のことから、(浸炭+WPC)ハイブリッド処理材では表面に大きな圧縮残留応力が生起しているにも関わらず、それに見合う程には疲労強度が向上しないのは、応力勾配の緩やかな平滑材では、疲労破壊は改質された部材表面から発生せず表面改質層よりも強度の低い内部から起こるため、表面層の強化が部材の疲労強度の改善に対して十分効果的に働かないからであると考えられる。

3-3 切欠材の疲労強度におよぼすWPC処理の影響

疲労強度に及ぼす(浸炭+WPC)ハイブリッド処理の効果を適切に検討するためには、疲労破壊が表面から発生する場合について調べる必要がある。そこで、表面から疲労破壊が発生するような応力集中を有する切欠材を用意し、平滑材と同様な実験を実施した。

切欠試験片に関する疲労試験結果を図8に示す。同図より切欠材では、ハイブリッド処理による疲労強度の向上割合はほぼ100%であって、先の平滑材の場合(向上割合25%)と比べてWPC処理による疲労強度の改善効果が著しいことがわかる。破面観察を行った結果、図9に示すように浸炭処理材、(浸炭+WPC)ハイブリッド処理材共に破壊した全ての試験片で切欠底表面から疲労破壊を生じており、この場合の(浸炭+WPC)ハイブリッド処理材における著しい疲労強度の改善は、表面改質効果が有効に働くことによってもたらされたことが明らかになった。

以上のような疲労強度の向上は、表面の高硬さ組織の影響に加えて、大きな圧縮残留応力が表面層の疲労強度を上昇させることによってもたらされるものと考えられる。しかしながら、多くの場合、残留応力は疲労過程に減衰し、疲労強度に与える効果に変化することが知られているため^{(9)・(10)}、本供試材についても疲労過程における表面残留応力の減衰挙動の測定を行った。なお、残留応力の測定にあたっては、本来、

切欠材を用いるべきであるが、切欠底の残留応力の測定が実際上不可能であるため、ここでは平滑材について行うこととした。その際、応力振幅としては、浸炭処理材の 10^7 回の疲労強度における切欠底の実応力($\sigma_a=420 \times 2.3=966\text{MPa}$)の大きさに対応させ、 $\sigma_a=950\text{MPa}$ を繰返した場合について残留応力の減衰挙動を調べた。

図10に表面の残留応力と繰返し数との関係を示す。同図より、(浸炭+WPC)ハイブリッド処理材では、-1000MPa以上の圧縮残留応力が 10^5 回の繰返し負荷後においても表面に存在し、同様の繰返し負荷を与えた浸炭処理材よりも著しく大きな圧縮残留応力が残存していることがわかる。この結果は、(浸炭+WPC)ハイブリッド処理材では圧縮残留応力が、表面におけるき裂の進展を抑制するのに効果的に機能することを示しており、かかる残留応力の効果によって浸炭処理材よりも疲労強度が大きく向上したものと考えられる。

以上の結果から、(浸炭+WPC)ハイブリッド処理材では、応力繰返し後においても表面改質層内に圧縮残留応力が高いレベルで維持されること、さらに、WPC単独処理に比べてき裂進展を抑制可能な深さ範囲が大きいと考えられることから、表面に形成された圧縮残留応力が高硬さ組織の影響と共に表面の微小き裂の進展を効果的に抑制し、部材全体の疲労強度を著しく向上させるものと考えられる。

4. 結論

本研究では、鋼の疲労強度改善にWPC処理を効果的に活用するための方法として、浸炭焼入れとWPC処理の組合せによる複合表面処理((浸炭+WPC)ハイブリッド処理)に注目し、かかる複合処理に伴う残留応力生成挙動ならびにその疲労強度・疲労破壊特性への影響を調べた結果にもとづいて、WPC処理による鋼の疲労強度改善機構について検討・考察を加えた。以下に得られた結果を示す。

(1) 浸炭焼入れとWPC処理を組み合わせることによって、浸炭焼入れ時に形成された部材表面部の深い圧縮残留応力層を維持したまま、さらに大きな圧縮残留応力を最表面層に付加することができる。かかる大きな圧縮残留応力が生じる一つの要因は、WPC処理過程における残留オーステナイトの加工誘起マルテンサイト変態にともなう表面層の体積膨張である。

(2) 浸炭焼入れ・WPC複合処理材では、 10^7 回の疲労強度付近で応力繰返し後においても表面改質層内に圧縮残留応力が高レベルに残存する。かかる圧縮残留応力

が高硬さの影響と共に微小き裂の進展を効果的に抑制する結果、複合処理により改質された表面層の疲労強度を著しく向上させるものと考えられる。

(3) 繰返し曲げ応力のもとでの浸炭焼入れ・WPC 複合処理による部材の疲労強度の改善効果は、平滑材の場合に比べて切欠き材において顕著に現れる。その理由は、応力勾配の緩やかな平滑材においては、疲労破壊は改質された部材表面から発生せず、局所の疲労強度が低い内部の非硬化部から生じるため、表面層の強化が部材の疲労強度の改善に十分有効に働かないのに対して、切欠き材では疲労破壊の発生箇所が、応力集中の最大となる切欠き底表面となり、疲労強度の改善に表面改質効果がより有効に機能するからである。

謝辞

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団の助成のもとに行われた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- (1)加賀谷忠治, 他 2 名, ショットピーニング技術, 9-2(1997), pp.73-74
- (2)加賀谷忠治, 他 3 名, ショットピーニング技術, 9-2(1997), pp.75-76
- (3)加賀谷忠治, 他 3 名, ショットピーニング技術, 9-2(1992), pp.77-78
- (4)江上登, 他 4 名, 機論 66-650A(2000),pp.1936-1942
- (5)米倉大介, 他 4 名, 機論掲載予定
- (6)伊藤健一, 他 4 名, ショットピーニング技術, 11-2(1999), pp.52-53
- (7) 金属熱処理技術便覧編集委員会, 金属熱処理技術便覧 (1979), pp.352-354, 日刊工業新聞社
- (8)松本和明, 他 3 名, 日本機械学会材料力学講演会講演論文集, No.900-86(1990), pp.275-277
- (9) A. Wick, V. Schulze, O. Vohringer, Material Science and Engineering, A293, 2000, pp.191-197
- (10) H. Holtzapfel, V. Schulze, O. Vohringer, Material Science and Engineering, A248, 1998, pp.9-18

表1 試験片の化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni
0.21	0.30	0.74	0.017	0.015	1.04	0.15	0.14	0.09

表2 WPC 処理条件

	Particle diameter (μm)	Air pressure (MPa)	Shooting time (sec)
WPC	120-170	0.4	60
Shot peening	400	0.4	60

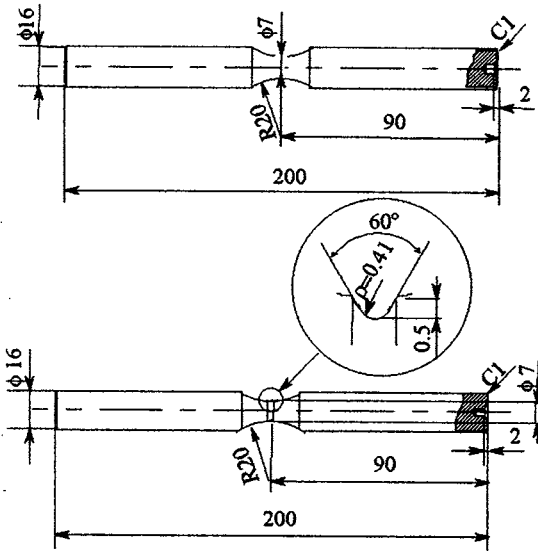


図1 試験片形状

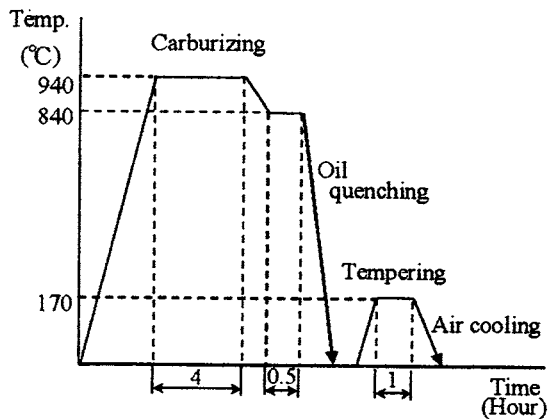


図2 熱サイクル

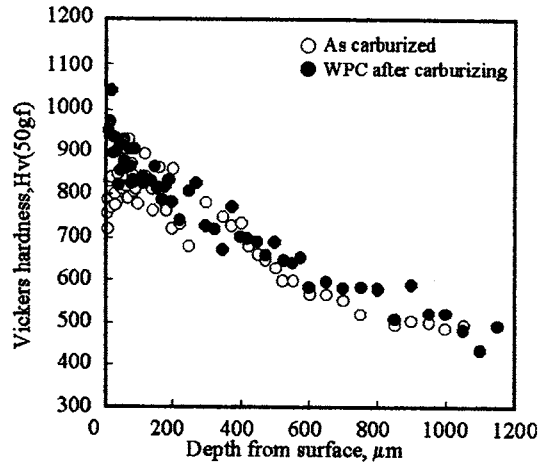


図3 ビッカース硬さ分布

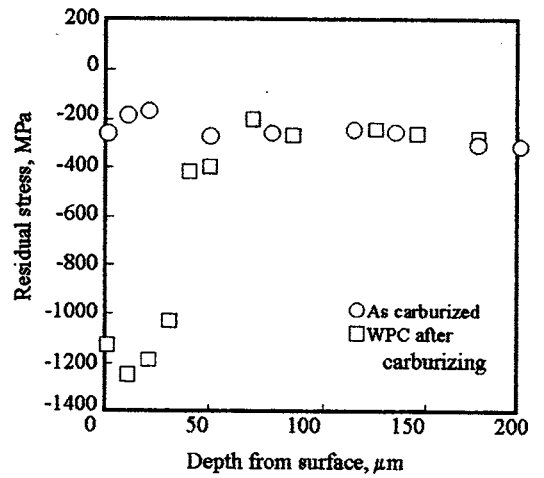


図4 残留応力分布

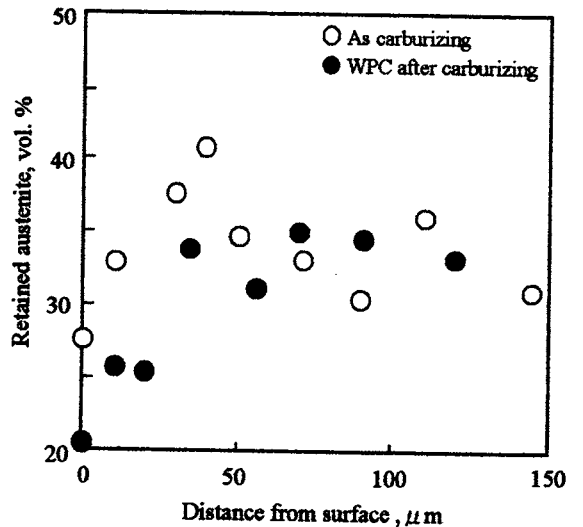


図5 残留オーステナイト分布

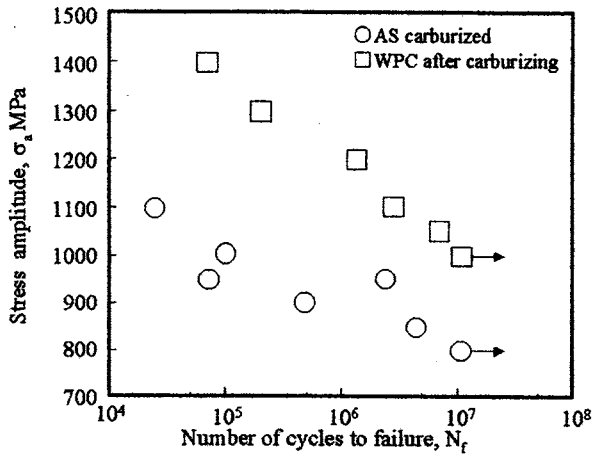


図6 疲労試験結果

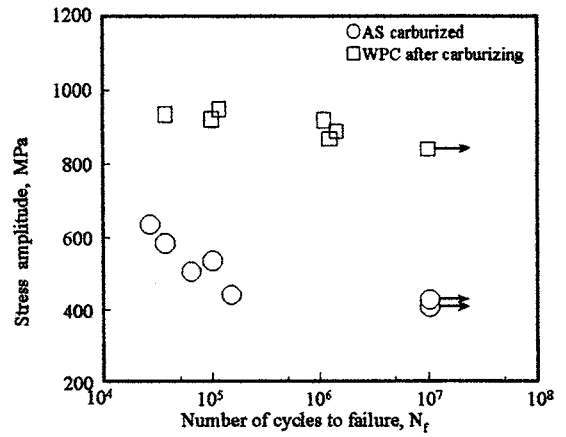
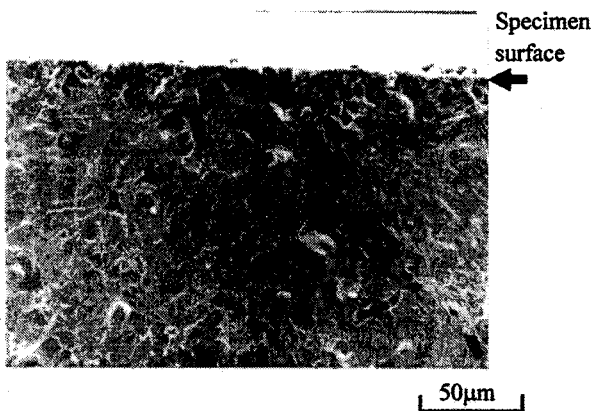
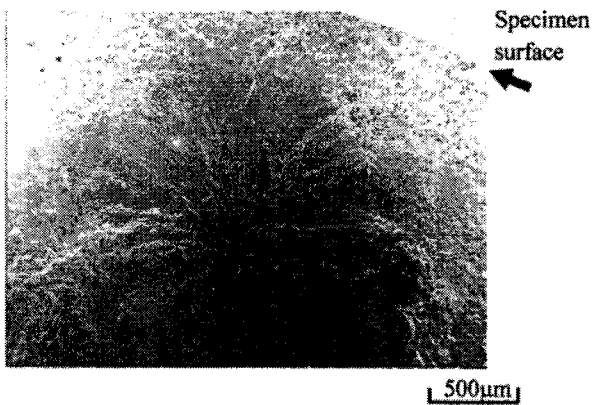


図8 切欠材の疲労試験結果



(a) 浸炭材
($\sigma_a=849\text{MPa}$, $N_f=4.24 \times 10^6$ cycles)



(b) 浸炭+WPC処理材
($\sigma_a=1050\text{MPa}$, $N_f=6.56 \times 10^5$ cycles)

図7 破断面の典型的様相

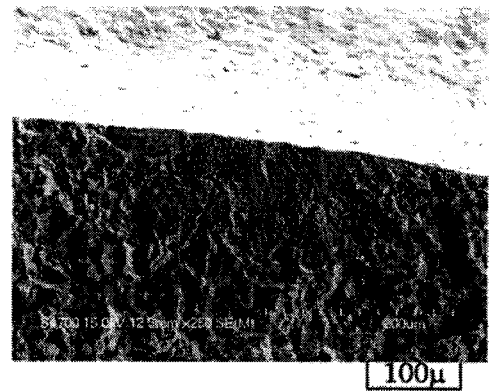


図9 切欠材の破壊基点部の様相
(浸炭+WPC処理材, $\sigma_a=950\text{MPa}$, $N_f=3.6 \times 10^4$)

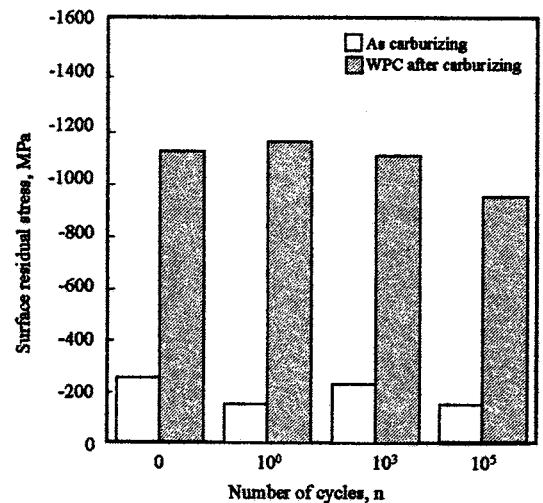


図10 残留応力開放挙動