焼入鋼の表面き裂と焼もどし時におけるその成長*

伊 藤 篤**

Hair-Cracks on the Surface of Hardened Steel and their Growth during Tempering

by

Atsushi ITO

(Railway Technical Research Institute, JNR)

Network-like hair-cracks were found on the surface of hardened high-carbon steel (SUP3) which was water-quenched from high quenching temperature (higher than 1050°C). As the causes of such cracks, embrittlement due to grain boundary oxidation and residual tensile stress in the decarburized surface-layer were considered.

These cracks grew by low tensile stress (over 4 kg/mm²) during tempering and transformed into cracks like heat-checks.

(Received Jan. 16, 1962)

1. は し が き

1) 前報において、焼入鋼に表面き裂等欠陥がない場合には、焼もどし時の粘性的変形能のために鋭角度の曲げ加工が可能であることを述べた。反対に表面き裂を有する焼入材に荷重を掛けながら焼もどすときは、小さい荷重によってもこれらのき裂を起点として、亀甲状のきずが発達することが判明したのでこれについて報告する。

2. 試 験 方 法

試験に用いた材料はばね鋼第3種 (SUP3) であって、その化学成分を Table 1 に示す。

(I) 表面き裂試験

厚さ 5 mm、幅および長さ 15 mm の試験片の表面を鏡可能な程度にバフ研磨仕上げの後に、水銀柱 1 mm 以下に排気できる電気炉中で加熱し、加熱条件をいろいろ変化して水焼入れあるいは油焼入れを行なった後、表面を軽くバフ研磨して顕微鏡によりき裂の有無を検査した。

(II) 焼もどし時き裂成長試験

厚さ 5 mm、幅 15 mm、長さ 150 mm の試験片をいろいろの条件で焼入れた後に、前報²⁾と同じ方法により

変温曲げクリープを測定し、測定後に試験片表面のきずの状況を肉眼観察した。

3. 試 験 結 果

(I) 表面き裂の発生に対する焼入温度の影響

焼入温度保持時間を一定の 10 min として 1 mmHg 以下に排気した 炉中で 850°C、1000°C および 1150°C に加熱した後焼入れた場合に、1000°C より水焼入れしたものの表面にヘヤークラックが認められた。Photo. 1 にその一例を示す。このき裂は肉眼的には試験片が水冷されて水温 (25°C) に達した後に発生し進展するのが認められた。Photo. 2 (a)~(e) は顕微鏡観察の結果である。き裂はオーステナイト結晶粒界に沿って進展する結果亀甲状を呈し、焼入温度の高いほどき裂の程度のはなはだしいこと、および焼入温度が

Photo. 1 Hair-cracks on surface of specimen. Water-quenched from 1000°C

Table 1 Chemical analyses of specimens

Element (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Material								
SUP3	0.88	0.30	0.50	0.027	0.036	0.8	0.11	0.23

* 原稿受付 昭和37年1月16日、日本金属学会第49回講演会にて講演 (昭36.10)

** 正員 国鉄鉄道技術研究所

同じ場合には油焼入れに比べて水焼入れの場合に著しいことがわかる。

(II) 表面き裂の発生に対する加熱温度の影響

焼入温度の影響と加熱温度の影響とを区別するために 1 mmHg 以下に排気した炉中で一度 1 000°C あるいは 1 150°C に加熱後、850°C まで冷却し、次いで水焼入れした場合の表面き裂の状況を調べた。その結果は Photo. 3 (a), (b) のとおりであって、Photo. 2

($\times 100 \times 1/2$)

Photo. 2 (a) Water-quenched from 850°C

($\times 100 \times 1/2$)

Photo. 2 (b) Water-quenched from 1 000°C
(cf. Photo. 1)

($\times 100 \times 1/2$)

Photo. 2 (c) Transverse section of specimen. Water-quenched from 1 000°C

($\times 100 \times 1/2$)

Photo. 2 (d) Oil-quenched from 1 000°C

($\times 100 \times 1/2$)

Photo. 2 (e) Water-quenched from 1 150°C

($\times 100 \times 1/2$)

Photo. 3 (a) 10 min-held at 1 000°C, then cooled to 850°C in furnace evacuated to less than 1 mmHg, then water-quenched [cf. Photo. 2 (b)]

($\times 100 \times 1/2$)

Photo. 3 (b) 10 min-held at 1 150°C, then cooled to 850°C in furnace evacuated to less than 1 mmHg, then water-quenched [cf. Photo. 2 (e)]

(b), (e)と比較すればわかるように、表面き裂の発生に対しては焼入温度の影響が強い。

(III) 表面き裂の発生に対する表面酸化の影響

焼入温度の高いほど表面き裂の発生しやすいことが判明したが、その理由の一つとして焼入操作に際しての表面の酸化が考えられる。すなわち、炉から試料を取り出して焼入液中に投入するまでに 30 sec~1 min を要し、これは大気中で行なわれるために試片温度の高いほど表面の酸化も著しくなる。そこで 1 mmHg 以下に排気した炉中で試験片を 1000°C に 10 min 加熱後、大気圧の空気を試片表面に導入して 2 min 保持後、再び排気して 1 mmHg 以下の状態で 750°C まで炉冷し、次いで水焼入れした。その結果は Photo. 4 のとおりであって、明らかに表面き裂が認められる。

(IV) 高温加熱による試料の酸化

供試の材料の酸化状況がどのようなものであるかを知らるために、1 mmHg に排気した炉中で 1150°C に加熱して 10 min 保持後空中放冷したときの表面付近の顕微鏡組織を Photo. 5 に、また水焼入れした後の表面の顕微鏡組織を Photo. 6 (a), (b) に示す。オーステナイト粒界における酸化物の生成ならびに粒内酸化の状況が認められる。

(V) 焼もどし時におけるき裂の成長

1 mmHg 以下に排気した炉中で 1050°C に加熱し、10 min 保持後水焼入れして表面き裂の存在する試験片を変温曲げ試験装置に取りつけ、荷重を 40 kg として 500°C まで加熱する途中における変温クリープの状況を 830°C より焼入れたものの場合と比較して Fig. 1 に示す。曲げ荷重時に引張応力の作用する側の、試験後の表面状況を Photo. 7 (a) に、また側面の状況を Photo. 7 (b) に示す。引張応力の作用の下に表面に直角方向にき裂が進入し、また表面き裂が相互に接続して亀甲状を呈するのが認められる。このように明ら

($\times 100 \times 1/2$)

Photo. 4 10 min-held at 1000°C in furnace evacuated to less than 1 mmHg, then contacted with air having atmospheric pressure in 2 min, then evacuated again and cooled to 750°C, then water-quenched. [cf. Photo. 3 (a)]

かな亀甲ぎずを発生させるのに必要な条件は Table 2 のとおりである。

(Picral-etched, $\times 600 \times 1/2$)

Photo. 5 10 min-held at 1150°C in furnace evacuated to less than 1 mmHg, then air-cooled

(On an inclined plane to the surface of specimen)

(No-etched, $\times 600 \times 1/2$)

Photo. 6 (a) 10 min-held at 1150°C in furnace evacuated to less than 1 mmHg, then contacted with air having atmospheric pressure in 2 min, then evacuated again and cooled to 750°C, then water-quenched

(Nital-etched, $\times 600 \times 1/2$)

Photo. 6 (b) The same as 6 (a)

Table 2 Conditions necessary to obtain network-like-cracks

Quenching temp. (°C)	Higher than 1050
Coolant	Water
Applied tensile stresses during tempering (kg/mm ²)	More than 4

4. 考 察

鋼の高温における酸化については非常に多くの報告があるが、表面の均一酸化にとどまるか、あるいは粒界酸化が著しく進行するかは、鋼種・温度・ふんい気等に左右されるので複雑である。本試料においては粒界酸化が明らかに認められ、そのために粒界がぜい化していると考えられる。そうして表面付近が脱炭して

Fig. 1 Increase in deflections of specimen quenched from 1050°C due to growth of cracks caused by stressing during tempering

いるので、焼入れによってその部分に引張応力を発生し、これが表面き裂発生の原因になったものと思われる。油焼入れのときは水焼入れのときに比べて引張残留応力が小さいために表面き裂の程度も軽い。これらのき裂はいわゆる焼割れとか置割れを助長する一因となりうるので、注意が必要である。なお粒界ぜい化の原因としては酸化のほか、酸化層の下部におけるCu, Sn等の不純合金元素の富化現象、あるいはまた熱平衡にある原子空孔と粒界との関係等も考えられるので、これらの現象と加熱温度との関係は更に検討の必要がある。次に焼もどし時には粘性的変形能があるので、多少のき裂があってもその切欠効化は比較的少ないであろうと考えられないこともないが、実際には低い応力によっても表面き裂は成長して亀甲ぎずに発達することが判明した。その理由を明らかにするためには、き裂先端における応力こう配と焼もどし過程における格子欠陥の挙動との関係を解明する必要があると考える。

5. 総 括

ばね鋼第3種について、高温加熱後急冷した鋼の表面に酸化ならびに残留応力に起因するヘアークラックが発生し、これを焼もどすときに引張応力が作用していると比較的低い応力によってもき裂が発達して亀甲状のきずとなることを認めた。

参 考 文 献

- 1) 伊藤, 材料試験, **11**, 108, 548 (1962)
- 2) 伊藤, 材料試験, **11**, 102, 146 (1962)
- 3) たとえば, 大竹, 青木, 藤島, 日本金属学会誌, **24**, 92 (1960)
- 4) 岩瀬, 佐野, Memoir of the College-Science, University of Kyoto, Series A, Vol. XXV (1949)

(a) Surface view

(b) Side view

Photo. 7 Growth of hair cracks due to stressing during tempering

(×2.4)