高周波表面焼入鋼硬化深さの非破壊測定法の研究*

上 田 太 郎** 田 中 政 夫** 山 下 芳 美**

Taro Ueda, Tanaka and Yoshimi Yamashita : Study on the Measurement of Hardened Depth in Induction Surface Hardened Steels. In order to measure the hardened depth in induction surface hardened steels easily and non-destructively, we investigated the same electro-magnetic method as already reported as a method for case depth measurement in carburized steels. [See T. Ueda, M. Tanaka, A. Nishimura, J. Jap. Inst. Metals, 16(1952), 626]. The method consists in that surface hardened steel specimens are excited by alternating current and the induced voltages in the secondary coil are read by valve voltmeter. The hardened depth is obtainable from the relation curve between hardened depth and induced voltage. To make the most sensitive measurement, we changed the frequency of exciting current according to the hardened depth. The following two kinds of induction surface hardened carbon steels with various hardened depth were tested: of 0.7% carbon content, 21mm dia., 120 mm length and of 0.5% carbon content, 50 mm dia., 100 mm length. The experimental results obtained by this method were as follows: (1) When the exciting current was large, sensitive results were obtainable. (2) The frequency of exciting current must be adjusted to the hardened depth. For example, by using 200~300 c/s in about 1 mm depth, 100 c/s in about 2 mm depth, below 60 c/s in about 3 mm depth and below 30 c/s in about 4 mm depth, better results could be obtained. (3) The two kinds of test-specimens with different carbon contents and dimensions showed similar results.

(Received June 5, 1953)

I. 緒 言

鋼の高周波表面焼入の方法は従来の滲炭、窒化、焰焼入などの表面硬化法に比し操作が簡便なことを始め、種々の優れた特長を有するので近年その利用がますます盛んになって来た。しかしながらこの操作簡便なことは一方では同一処理製品でも不揃品を生じ易いという欠点を有し、加熱時間、加熱電力などの僅かの大小が表面焼入硬化深さに相違を與え、ひいては機械的性質にも大きな影響をおよぼすことになる。従つて高周波表面焼入をした製品は焼入後、硬化深さが最適になっているか否かを検査して使用することが望ましい。

さて従来焼入せる鋼の硬化深さ測定法⁽¹⁾としては、焼入せる試片を切斷してその破面より簡単に大略測定するとか、あるいは切斷面を研磨腐蝕してその腐蝕模様より測定するとか、または焼入マルテンサイト層の深さを顯微鏡で検査する方法、あるいは切斷面の直徑方向の硬度分布を測定してこれより硬化深さを求める方法などが用いられてい

る。しかしかかる方法で高周波焼入鋼の硬化深さを求めるときは、抜取り検査となり多数製品の中には不良製品を含む恐れが多分に存在し、しかも測定に對しても相當の手數と時間を要し甚だ不便である。そこでこれらを解決するためにさきに發表した肌焼鋼の滲炭深さの外周測定法⁽²⁾と同じ電気磁氣的方法で簡単に非破壊的に高周波焼入をした個々の製品の硬化深さを求める方法を研究した。

II. 供 試 材 料

實驗に供した材料としては直徑 21mm, 長さ 120mm の 0.7% C 炭素鋼棒と直徑 50 mm, 長さ 100 mm の 0.5% 炭素鋼棒各 10 本を高周波連續移動焼入法にてそれぞれ移動速度を變えて表面硬化を行つたものを用いた。Table 1 は測定後、試験片を切斷して腐蝕試験により求めた硬化深さを示す。高周波焼入をした鋼の切斷面の硬度は表面が硬く内部は軟かくその間の硬度分布の變化がゆるやかであるので、従つて硬化深さの決定に當つては種々異つた解釋が行われている。Grossmann⁽³⁾ は鋼の焼入硬化能の測定に當つてマルテンサイト組織が 50% 含まれているところまで

** 大阪大學工學部精密工學教室

* 1952 年 4 月本會東京大會に發表

(1) E. C. Bain(梶山譯), 鋼中の合金元素の機能, 194 頁。

(2) 上田, 田中, 西村, 本誌, 16(1952), 626.

(3) G. A. Grossmann, Metal Progress, 33(1938), 373.

の深さを焼入硬化深さとし、50% マルテンサイト組織の硬度を算定して試料の硬度測定より焼入深さをきめてい

Table 1 Hardened Depth by Induction Surface Hardening.

Specimen Number	Hardened Depth (mm)	
	0.7% C Steel	0.5% C Steel
1	0.5	1.1
2	1.0	1.4
3	1.5	1.6
4	2.1	2.0
5	2.3	2.7
6	3.1	4.4
7	3.3	4.5
8	4.3	5.4
9	6.4	6.8
10	10.5	8.0

Dimension of Specimen	Dia., 21 mm Length, 120 mm	Dia., 50 mm Length, 100 mm.
-----------------------	-------------------------------	--------------------------------

る。寺前、牧野氏⁽⁴⁾はこの方法で高周波表面焼入深さを測定している。しかしながら腐蝕試験による方が簡単に焼入硬化せる部分としからざる部分とが區別出来るので、著者等はこの方法を採用して5% ピクリン酸酒精溶液で腐蝕し、腐蝕されぬ部分の深さを測定して焼入硬化深さの標準値とした。

III. 測定方法

測定方法は滲炭深さの外部測定⁽⁵⁾を行つたと同様の方法

Fig. 1 Measuring Apparatus.

検査體の誘起電壓の大きさをくらべることによつて硬化深さを測定するものである。しかしてこの場合、測定の感度を良好ならしめるため、硬化深さに應じて勵磁電流の周波數を變えて測定するようにした。Fig. 1 は測定装置の配線圖である。試料を勵磁する交流電源はその周波數が 10~

300 cycle/sec に任意に變化せしめることが出来る。測定線輪としては Fig. 2 に示す如き構造のものを使用し、こ

Fig. 2 Measuring Coils.

のベークライト圓筒の中央に試料を挿入した。二次線輪に誘起される電壓は真空管電壓計を用いて読み取つた。この電壓計の目盛は 0~1 を 100 V 分割してあり、1 目盛が 0.01 V に相當し目分量で 0.001 V まで讀むことが出来る。また 1 V 以上の電壓に對しては倍率器により目盛を 2, 5, 10, 20, 50, 100 および 200 倍に切り換えて測定することが出来る。

IV. 實驗結果

Fig. 3 は勵磁電流の大きさの測定感度におよぼす影響

Fig. 3 Relation Curve between Induced Voltage Ratio of No. 1~9, 0.7% Carbon Induction Surface Hardening Steel Specimens to No. 10 and Magnitude of 60 cycle/sec Exciting Currents.

を見るために Table 1 に示す 0.7% C の高周波表面硬化鋼について周波數 60 cycle/sec の普通電源で勵磁電流の大きさを種々變えて測定した各試料の誘起電壓を示したものである。なお Fig. 3 の縦軸は各試料の誘起電壓と中心部まで硬化せる No. 10 の試料の誘起電壓との比をとつて勵磁電流の大きさの影響を比較し易くした。これを見ると焼入硬化深さの小なるほど、電壓比が大、すなわち誘起電壓の大きいことがわかる。従つてこの結果から逆に誘起電壓の大きさを比較測定することにより硬化深さを求め得ることがわかる。しかも勵磁電流の大きさは 0.8 A 位までその大きさが大なるほど、誘起電壓比

(4) 寺前、牧野、日立評論, 32 (1950), 967.

が大となり測定感度のよいことがわかる。しかし試料を測定線輪の中へ入れて 0.8 A 位で永く保つ時は試料が多少加熱される悪影響がある。それ故この結界から試料が加熱されない程度に勵磁電流を大きくした方が測定感度のよいことがわかった。そこで著者等は以下の実験において 0.3 ~ 0.5 A で測定を行った。なお Fig. 3 において上述の結果は No. 1~7 の 3 mm 位までの硬化深さ小なる試料に適用すれば誘起電圧の大きさより硬化深さを感度よく求め得るのであるが、硬化深さがそれぞれ 4.3, 6.4, 10.5 mm の No. 8~10 の試料では No. 10 に対する各誘起電圧比が 1 に近いのがわかる。すなわち No. 8~10 の試料の誘起電圧がほとんど等しく、従つて誘起電圧の大きさよりこれらの硬化深さを判定することは困難である。これはさきに滲炭深さ測定法⁽²⁾において述べた如く試料を交流にて磁化した場合、鋼中の磁束分布が断面につき一様ではなくいわゆる表皮効果の現象を呈するためであると考えられ。しかして勵磁電源の周波数が高いほど、その表皮効果は大である。従つて高い周波数で測定した誘起電圧の大きさは磁束が大部分通過する試料表面層の磁氣的性質に大に影響される。以上のことから Fig. 3 の No. 8~10 の誘起電圧がほとんど等しくなる理由を推察すれば、かゝる 60 cycle/sec の周波数の勵磁電源では磁束の大部分が表面層 4 mm

Fig. 4 Relation Curve between Induced Voltage Ratio of No. 1~9 Induction Surface Hardening Steel Specimens to No. 10 and Magnitude of Frequencies of Exciting Current.

位のところを通過し、しかもその磁束通過部分の鋼の組織が No. 8~10 の試料では何れも焼入硬化組織で同一磁氣的性質を示すためである。よつてこれらの硬化深さを誘起電圧の大きさを測定して判別可能にするには勵磁電源の周波数をなお低くして磁束が試料の中心部まで通過するようにし、焼入硬化してない部分の磁氣的性質の影響も誘起電圧に現われるようにすればよいと考えられる。そこで次に勵

磁電源の周波数を種々變えて測定した。Fig. 4 は 0.7 % C の高周波表面硬化鋼について勵磁電流の大きさを 0.5 A 一定にして勵磁電源の周波数を 10~300 cycle/sec に

Fig. 5 Relation Curve between Induced Voltage and Hardened Depth for Constant Frequency Exciting Current.

變えて測定した場合の No. 10 に対する他の試料の誘起電圧の比を示す。この結果からわかる如く何れの周波数においても Fig. 3 と同様硬化深さの小なるほど、誘起電圧比は大となつてゐるが、しかし周波数が高くなるにつれて硬化深さの大なるものより順次電圧比が小となり、ある周波数で 1 になつてゐるのが見られる。すなわち No. 9, No. 8, No. 7, No. 6, No. 5, No. 4 と硬化深さが小となるにつれて大體 40, 60, 80, 100, 180, 200 cycle/sec 位の周波数において電圧比が 1 となつてゐる No. 1~3 の硬化深さのさらに小なる試料では未だ 300 cycle/sec の範囲内では電圧比は 1 となつてゐないが、もう少し高い周波数になればやはり 1 になることがこの曲線の傾向からうかがえる。これらの事柄は上述の如く全く磁束の表皮効果によるものである。

さて 4 mm 以上の硬化深さを持つ No. 8~10 の試料は前述の如く 60 cycle/sec の周波数では皆電圧比がほとんど 1 となつて誘起電圧の大きさよりこの三者を區別することが出来なかつたが、Fig. 4 より 20 cycle/sec 位の周波数で測定すれば、No. 8 および 9 の No. 10 に対する電圧比がそれぞれ 1.07, 1.03 となつてこれらを誘起電圧の大きさより判別することが可能となる。しかし硬化深さが 1 mm 前後の No. 1~3 の試料の場合にはかゝる低い周波数でも測定が出来ないことはないが測定感度の悪いことがわかる。これは試料中の磁束通過部分における硬化層の占める面積が小さいためで、かゝる場合には表皮効果を利用して磁束

もつと硬化層近くに集中して測定するようにせねばならぬ。すなわち Fig. 4 でわかる如く 200 cycle/sec 位の周波数で測定するならば硬化深さ 0.5, 1.0, 1.5 mm の No. 1, No. 2, No. 3 の試料は誘起電圧比がそれぞれ 1.39, 1.16, 1.05 で、その差異が大きく、非常に感度よく 1 mm 前後の硬化深さを判別することが出来る。また硬化深さが 2 mm 程度の No. 4, 5 の試料を 1.5 mm の No. 3, 3.1 mm の No. 6 の試料に對して感度よく識別するには Fig. 4 より 100 cycle/sec 位の周波数が適當である。従つて以上よりわかる如く今求めんとする硬化深さ附近で最良の感度を得るにはその硬化深さにより種々周波数を變えて測定することが大切である。Fig. 5 は Fig. 4 において勵磁電流の周波数を 29, 60, 292 cycle/sec と一定にした場合の硬化深さ（腐蝕試験より求めた値）對誘起電圧の關係を示した曲線である。この圖からも硬化深さの小なところでは周波数高くなれば、曲線の傾斜は大となり測定感度がよくなることがわかる（縦軸の各周波数に對する誘起電圧の目盛はその同一分割に對しては、電壓計の指針が同じ振れ間隔を示す如くとなつてある。Fig. 7 も同様である）。すなわち 292 cycle/sec のものでは 1 mm 前後の硬化深さに對する誘起電圧の變化は他のものにくらべ最も大である。しかしながらこの場合には硬化深さが 2 mm 以上になると各試料ともはや誘起電圧は同一となり誘起電圧の大きさより硬化深さを判別し得なくなることがわかる。次に周波数がこれより低い 60 cycle/sec のものでは判別感度は少し落ちるが Fig. 3 で述べた如く 4 mm 位の硬化深さまで誘起電圧の大

Fig. 6 Relation Curve between Induced Voltage Ratio of No. 1~9 Induction Surface Hardening Steel Specimens to No. 10 and Magnitude of Frequencies of Exciting Current.

きさより硬化深さを判別し得る。さらに 29 cycle/sec では感度は落ちるがその反面 6 mm 位の硬化深さまで判別可

能なことがわかる。従つてこれらの結果からわかる如く測定せんとする硬化深さに應じて勵磁電流の周波数を變えて、豫め Fig. 5 の如き曲線を作成しておくならば硬化深さ未知の高周波焼入試料の誘起電圧を測定することによりこの曲線から逆に硬化深さを簡単に感度よく測定することが出来る。Fig. 6 は Table 1 に示す 0.5%C の高周波表面硬化鋼について勵磁電流の大きさを 0.3 A に一定にして勵磁電流の周波数を 10~300 cycle/sec に變えて測定した場合の No. 10 に對する各試料の誘起電圧の比の値を示したものである。この場合には中心部まで焼きの入った試料がなかつたので硬化深さ 8 mm の No. 10 に對する誘起電圧比を取つた。Fig. 7 は Fig. 6 の中周波数 29, 69, 290 cycle/sec なる場合の硬化深さ（腐蝕試験より求めた値）對誘起電圧の關係曲線を示す。これらの結果から寸法、炭素量の異なる 0.5% C 鋼の場合にも上述の 0.7% C 鋼の場合とほとんど同様な結論が得られる。たゞ Fig. 6, Fig. 7 に

Fig. 7 Relation Curve between Induced Voltage and Hardened Depth for Constant Frequency Exciting Current.

においては誘起電圧比あるいは電圧計の読みが Fig. 3~5 のものに比べ小さいが、これは試料の寸法が大にして勵磁電流の大きさが小さいために、試料硬化の有効磁場が小さくなることに原因する。また電圧比については内部まで硬化していない No. 10 を標準にとつたことにも原因する。Fig. より勵磁電流の大なるほど測定感度がよくなることが結論されるので、この場合も勵磁電流を一層大きくして磁化磁界を大にしてやれば、なお一層良好な感度が得られるはずである。

V. 總 括

高周波表面焼入した鋼の硬化深さを、無破壊的に外部より簡単に測定する方法として、試料を交流で磁化し、その時二次側に誘起される電圧を読みとつて、豫め作成せる硬化深さ對誘起電壓曲線より硬化深さを求めんとした。この際測定の感度を良好ならしめるために硬化深さに應じて勵磁電流の周波を變えて測定するようにした。この結果實驗に供した直徑 21 mm, 0.7% C および 直徑 50 mm, 0.5% C の 2 種の高周波表面焼入鋼試料に關して、次の場合に良好な感度にて硬化深さが測定出来ることが判明した。

(1) 使用する勵磁電流の大きさは測定中試料が加熱されない程長まで大きくする方が測定感度がよい。

(2) 測定せんとする硬化深さにより、勵磁電流の周波數を變える。すなわち 1 mm 前後の硬化深さに對しては 200~300 c/s, 2 mm 前後では 100 c/s, 3 mm 前後では 60 c/s 以下, 4 mm 程度では 30 c/s 以下の勵磁電流で測定するならば最良の感度が得られる。

(3) 試料の大きさ、炭素量の異なる以上の 2 種の試料では全く同様な傾向の結果が得られたので、かゝる方法により一般、高周波表面焼入鋼の硬化深さを簡単に外部より測定することが出来る。

なお以上の本法は、高周波表面焼入鋼以外の表面硬化鋼の硬化深さを、外部より測定するのに、同じ考えで應用出来る。