電子ビーム変態焼入れ*

岩 田 篤**

Transformation Hardening by Electron Beam

Atsushi IWATA

The transformation hardening method is experimentally proved to be practicable, and the fundamental characteristics of the method are investigated. Defocused and deflected by triangular wave in Y direction, the electron beam is directed over the surface of S 45 C (JIS) plate moving uniformly toward X direction. The plate is heated by the electron beam, and then self-quenched through conduction of heat. As a result, the hardened (Hv 600 or more) layer of 0.6 mm thickness and 10 mm width is obtained. The surface roughness of the

layer is found to increase after hardening process. The average hardness of the hardened layer reaches maximum when the surface melts slightly. The transformation hardening mechanism by electron beam is explained by determining the temperature distribution in the uniformly moving semi-infinite medium with still and square heat source on it. The hypothesis is that isothermal line of 900°C shows the boundary of heat affected layer. The calculation with the hardening model shows good agreement with the experimental results.

Key words: electron beam, transformation hardening, S 45 C, hardness, surface roughness, hardening model.

1. 緒 言

機械部品の表面を硬化させて使用する時、機能的にはその表面全体を硬化させる必要のない場合がある。硬化法として変態焼入れをとるならば、必要部分のみを局所的に硬化させることは、焼入れに要するエネルギーを節減する効果及び部品全体として焼入れひずみが減少し、後加工が不要または軽減されるという効果をもたらす。局所的な変態焼入れを施すには、材料の熱伝導特性によって硬化必要部分以外の温度上昇が材料の変態点を越さぬよう、時間的かつ空間的に高密度にエネルギーを投入して加熱し、更に急速に冷却する必要がある。このことは焼入れを急速に行えるという効果をもたらす。従来からの局所的焼入れ法としては、火炎焼入れ及び高周波焼入れがあるが、いずれも極めて小さい局所、あるいは精密な焼入れ形状の制御といった点に問題を有する。これに対し、近年高出力のビームの開発が進み、これを局所的焼入れに用いることが可能となってきた。現在適用可能なビームは、電子ビーム及びレーザービームであり、いずれも局所的加熱に十分なパワー密度を有し、ビームの制御を精密に行える。この結果、総投入熱量を小さくでき、熱伝導による自己冷却効果が利用でき、外部冷却手段が不要である。レーザービームを用いた焼入れを含む熱処理については既に多数の報告がある。しかし、電子ビームを用いた焼入れについては詳細な報告はほとんど無く、

断片的な報告¹⁾があるのみである。例えば、アメリカ合衆国において実用化されたとされるものは、パルス化された電子ビームと偏向によるビームの移動との組合せによって、点状の硬化部を密に多数作り硬化面を得ている²⁾。また本邦においても、溶融焼入れを行った例³⁾があるが、詳細は全く知られていない。

以上のごとく、種々の利点を有すると考えられるにもかかわらず、まだ明らかにされていない電子ビーム変態焼入れ法について、その可能性の実証及び基礎的な特性の解明を行うことが本報の目的である。

本報において用いた焼入れ形態は、デフォーカスした連続電子ビームを偏向振動させ、移動する被処理材に照射して加熱し、熱伝導による自己冷却によって変態硬化を起こさせるものである。

2. 実験材料及び方法

2.1 実験材料

実験に用いた材料は S 45 C で、その成分分析(%)の結果は次のとおりである。

C	Si	Mn	P	S
0.44	0.19	0.62	0.019	0.030

試験片は、板厚 12 mm, 50 mm×70 mm の板とし、上下面は研削仕上とする。表面粗さは、研削方向で 0.13 μmRa , 研削方向に垂直な方向で 0.29 μmRa である。研削後、真空炉にて焼きなましする。焼きなまし条件は、800°C にて 0.5 h 保持後、100°C/h で炉冷却、210°C より空冷である。

2.2 電子ビーム

* 原稿受付 昭和 56 年 6 月 22 日。昭和 56 年度精機学会春季大会学術講演会(昭和 56 年 3 月 29 日)にて発表。

** 正 会 員 機械技術研究所(茨城県新治郡桜村並木 1-2)

Fig. 1 Schematic diagram of machine for heat treatment by electron beam

電子ビームは電子ビーム溶接機(日本電気株式会社製)で発生させる(図1)。

電子銃のフィラメントは通常のリボンフィラメントより幅の狭い変形リボンフィラメントを用いる。電子ビームの加速電圧は150 kV一定とし、電子ビーム電流は12 mAから22 mAの範囲で変化させることにより、試験片への投入パワー(加速電圧×電子ビーム電流)を変化させる。電磁レンズに1.1 Aのレンズ電流を流す。この状態では電子ビーム焦点は試験片上方にあり、試験片表面位置では電子ビームはデフォーカスされている。Y方向偏向コイルに三角波の電流を流し、電子ビームをY方向に偏向振動させる。振動周波数は100 Hzで、偏向コイル電流(ピーク・ピーク値)は250 mAである。デフォーカスと偏向振動の結果、試験片表面位置における電子ビームは、あたかもY方向に長く伸びたビーム横断面形状を示すかのごとくなる。これを等価的ビーム形状とする。

等価的ビーム形状は次の方法により測定する。試験片表面位置と同一表面位置にあるナイフエッジをもつ鋼板を1000 mm/minの定速度で移動させて電子ビームを横切る。一方、鋼板の下で静止したファラデーカップにより電子ビームを捕え、鋼板による遮断によって生じる電流変化を記録して、鋼板のエッジが電子ビームを横切り始めた時点(電流の減少し始めた点)から完全に横切った時点(電流が流れなくなった点)までの時間を知る。これによって鋼板の移動距離すなわち移動方向の電子ビームの大きさが測定できる。電子ビームのパワー分布は実際にはすそをもつため、明確な電子ビーム電流の変化点が見い出せない。そこで、ゼロ及び全電流値から5%の増減のあった点をもってビーム端とする。測定方向はX及びYとする。

2.3 実験方法

試験片は長手方向をテーブルのX軸方向と一致させ、

Fig. 2 Test piece and measuring configuration

テーブル上の保持台にX方向からクランプしてセットする。試験片表面は加工室上部のヒートシールド下93 mmの位置にある。加工室は焼入実験中 7×10^{-2} Pa [5×10^{-4} Torr]より低い圧力に維持する。電子ビームは試験片表面に鉛直上方から照射される。電子ビーム照射と同時にテーブルを移動させることにより試験片をX方向に移動させる。移動距離は50 mmで、移動速度は200 mm/minから1000 mm/minの範囲で変化させる。この結果、試験片表面の一点をとって考えれば、室温状態から電子ビーム照射範囲に移動することによって加熱され、照射範囲から外れると冷却されることになる。焼入れされる部分は試験片のほぼ中央に位置するようにし、一実験ごとに加工室内を十分な時間大気中に放置し、室温状態から実験を開始するよう留意する。

試験片は焼入れ終了後、焼入れ部表面の硬度を荷重1.96 N {200 gf}のマイクロビッカース硬度計で測定する。測定点は焼入れ部中央に2点、それらから、±Y方向にずらして焼入れ部内の端部に2点ずつ、計6点である。

従来焼入れした材料は後加工を施すものと考えられていたが、電子ビーム焼入れは後加工無しに用いられる可能性がある。そこで、焼入れ部表面の表面粗さを触針式表面粗さ計で測定する。粗さは中心線平均粗さ(R_a)で表示し、粗さ曲線も記録する。カットオフ値は0.8 mm, 測定長さは4 mmとする。測定倍率は、 $R_a < 0.4 \mu\text{m}$ の場合20000倍、 $R_a \geq 0.4 \mu\text{m}$ の場合10000倍、粗さ曲線の場合10000倍である。

更に試験片を焼入れ部中央を通るように砥石切断機でY方向に切断し、切断面を研磨し、ナイトール液で腐食して熱変質層を現出させ、その深さ及び幅を測定する。幅については、試験片表面より0.1 mm深さ位置での変質層の幅をとる(図2)。この理由は、表面の薄層のみが変質した部分を変質層に含めることは实际的でないこと及び研磨だれのため試験片表面での幅測定が困難なことである。また研磨面上で深さ方向の硬度分布を荷重1.96

Fig. 3 Hardness of hardened area at the surface

N {200 gf} のマイクロビッカース硬度計で測定する。測定間隔は変質層内では 0.05 mm, 母材部では 0.1 mm とし, 表面溶融が起こらなかったか, わずかに溶融した試験片については荷重 0.49 N {50 gf} でも測定する。表面から深さ方向に測定し, Hv 600 以上を示した最後の深さを有効硬化深さと定義する*。

3. 実験結果

3.1 電子ビームの大きさ

電子ビーム電流を 5 mA から 25 mA まで変化させてビームの大きさを測定した結果, Y 方向については平均 13.5 mm で, 測定値は $\pm 3\%$ の範囲内に収まる。X 方向については電子ビーム電流値によってビームの大きさが変化し, 特に 5 mA の時大きくなる。この条件は焼入実験には用いられない条件なので除外する。10 mA から 25 mA までの電子ビーム電流においては, ビームの大きさは平均 7.0 mm で, 測定値は $\pm 8\%$ の範囲内に収まる。

テーブル移動速度を変化させて行う焼入実験の電子ビーム電流値は 15 mA であるが, この時の電子ビームの大きさは, X 方向 7.1 mm, Y 方向 13.3 mm である。

3.2 試験片外観

焼入処理後, 加工室の真空を破った直後の試験片は, 入力が高すぎる場合は表面が溶融しているが, 適正な場合は電子ビームの照射された部分が金属光沢を呈する。各試験片は実験前には表面が若干酸化していたため, 焼入

れ部が明確に区別される。また試験片の温度は, 適正な入力の場合, 直ちに素手で触れることが可能な程度である。過大入力の場合, 真空を破ってから 1 min 後においても, 130°C を越す場合がある。

3.3 熱変質層

試験片表面から測定した焼入れ部硬度を図 3 に示す。投入エネルギーが最小の条件 (電子ビーム電流 12 mA, テーブル移動速度 1000 mm/min) を除いて, 測定位置, 焼入条件による特定の傾向は見られない。同一試験片を, 840°C から水冷という通常の焼入条件によって焼入れした場合, 表面の硬度は平均 Hv 880 である。なお, 焼入れ前の硬度は平均 Hv 173 である。

変態焼入れの影響を受けた部分と受けていない部分の表面粗さ曲線を図 4 に示す。図から影響を受けた部分, すなわち焼入れ部の表面粗さは大きくなっているのがわかる。図 5 にテーブル移動速度及び電子ビーム電流を変化させた場合の焼入れ部表面粗さの変化を示す。テーブル移動速度が遅くなり, また電子ビーム電流が大きくなるにつれ表面粗さはやや大きくなる。なお, 図中, 電子ビーム電流値 0 mA, 及びテーブル移動速度 “Ref.” の位置に示した表面粗さは, 熱影響を受けていない部分の表面粗さである。

腐食により熱変質層は肉眼で明確に区別できる。熱変質層の光学顕微鏡像は, 大きさは異なるが各条件の変化にかかわらず同様であり, 代表的な例を図 6 に示す。熱変質層の母材に近い部分にはフェライトの網目が残る, 網目はぼやけながらも表面近くまで及んでいる。この試験片についての硬度分布の測定結果を図 7 に示す。図から熱変質層内の硬度は母材部より高くなっているが, ば

* この有効深さは, JIS G 0559「鋼の炎焼入及び高周波焼入硬化層深さ測定方法」におおむね準拠しているが, 限界硬度を高くとっており, 測定荷重が低い点が異なる。

Fig. 4 Typical surface profiles of hardened and unaffected area

Fig. 5 Surface roughness of hardened area

* Surface roughness data at beam current "0 mA" and velocity of table "Ref." are those of unaffected area.

Fig. 6 Micrograph of section of hardened test piece

らつきが大きいことがわかる。Hv 600 に対して圧痕の対角長は約 $25 \mu\text{m}$ となり、 0.05 mm 間隔の測定では圧痕相互の干渉の可能性がある。そのため、荷重を 0.49 N {50 gf} とした測定も行ったが、荷重 0.98 N の場合よ

Fig. 7 Hardness distribution on sectional plane

りやや高めの硬度を示した。有効硬化深さ内の測定硬度平均値を、テーブル移動速度及び電子ビーム電流値を変化させた場合について図 8 に示す。同図には表面溶融の生起範囲をも注記する。ビーム電流を大きく、あるいはテーブル移動速度を小さくして行き、表面が溶融しただ直後に硬度の平均値は最大となる。実験条件内で得られた表面溶融を起こさない範囲での最大硬化深さは 0.6 mm である(電子ビーム電流 15 mA 、テーブル移動速度 700 mm/min)。表面溶融が起こらず、有効硬化深さの測定できた試験片において、有効硬化深さは、平均して熱変質層深さの 70% である。

テーブル移動速度を 1000 mm/min とし、電子ビーム電流値を変化させた場合、及び電子ビーム電流値を 15 mA としテーブル移動速度を変化させた場合の熱変質層の深さ及び幅を図 9 に示す。同図中の実線は熱伝導モデルによる計算結果であり、詳細は 4 章に述べる。

4. 熱伝導モデル

電子ビーム焼入れにおける電子ビームの役割を、単に熱源としてのみ考え、熱伝導モデルを用いて熱変質層の大きさを計算する。

試験片を半無限体 ($Z \leq 0$) とし、電子ビームが当たった表面部分が熱源となり、その形状は長方形とする (X 方向の大きさ $2b$, Y 方向の大きさ $2l$, 投入パワー W)。熱源は座標原点を中心として静止し、半無限体が X 方向に定速度 U で移動する時、定常状態での温度分布 $v(X, Y,$

Fig. 8 Average hardness in hardened layer

Fig. 9 Depth and width of heat affected layer

Fig. 10 Model for calculating temperature distribution

Z) は次のとおり与えられる⁴⁾ (図 10).

$$v = \frac{q\kappa}{2KU\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{z^2}{2u}} \left\{ \operatorname{erf} \frac{y+L}{\sqrt{2u}} - \operatorname{erf} \frac{y-L}{\sqrt{2u}} \right\} \times \left\{ \operatorname{erf} \frac{x+B+u}{\sqrt{2u}} - \operatorname{erf} \frac{x-B+u}{\sqrt{2u}} \right\} \frac{du}{\sqrt{u}} \quad (1)$$

ただし,

$$x = \frac{UX}{2\kappa}, \quad y = \frac{UY}{2\kappa}, \quad z = \frac{UZ}{2\kappa}, \quad B = \frac{Ub}{2\kappa}, \quad L = \frac{Ul}{2\kappa},$$

$$q = \frac{W}{4bl}, \quad \kappa = \frac{K}{\rho c}; \quad \text{温度拡散率, } K: \text{熱伝導率, } \rho: \text{密度, } c: \text{比熱}$$

熱変質層となる部分は、フェライトとセメンタイトからオーステナイトへの変態が始まった部分とする。その温度は平衡状態図では 727°C であるが、電子ビーム加熱のような急速加熱においては、変態温度が上昇すると言われる⁵⁾。そこで変態温度として、800°C 及び 900°C を仮定した。従って、800°C 及び 900°C の等温線が熱変質層の境界を示すこととなる。

以上のモデルに基づいて電子計算機による数値計算を行う。計算に用いた定数は次のとおりである。

熱伝導率 K 0.048 J/(mm·s·K)

比熱 c 0.649 J/(g·K)

密度 ρ 0.0079 g/mm³

熱源の大きさは測定したビームの大きさをを用いる。

$b=3.55$ mm, $l=6.65$ mm

(テーブル移動速度変化時)

$b=3.48$ mm, $l=6.76$ mm

(電子ビーム電流変化時)

計算の結果得られた熱変質層の深さ及び幅を図 9 中に実線で示す。変態温度を 900°C と仮定すると計算結果と実験結果とは、深さについて

は極めて良く一致しているが、幅についてはやや一致が悪い。

5. 考 察

5.1 表面粗さ

焼入れ部表面粗さが焼入れ前と比べ粗くなる理由について考察する。図 4 に示す研削方向の粗さ曲線によれば、焼入れ部表面では 100 μ m ないし 200 μ m 程度の周期の凹凸が増大している。これはオーステナイト結晶粒の大きさのオーダーである。そこで表面粗さが粗くなるのは、オーステナイトの変態したマルテンサイトが、体心正方晶で軸比が $c/a=1.02$ (炭素含有量 0.44%) であり、 c 軸方向に伸びた形であるためと考えられる。すなわち焼入れ前のフェライトは $c/a=1$ であり、 a はフェライトとマルテンサイトではほぼ等しい。従って焼入れ表面において c 軸が法線方向と一致した結晶は約 2% 凸となり*、 a 軸が法線方向と一致した結晶は同じ高さを保つ。この凹

* 結晶粒全体が一体として伸びるわけではなく、内部でせん断変形を伴っている。

凸が焼入れ前の表面の粗さに重ね合わされ表面粗さが増大する。以上の考察は、試料のオーステナイト結晶粒の大きさを測定し、粗さの存在する面に更に凹凸が加わった時の粗さ値の変化を明確にしなければ定量的なものではない。しかし、概算として、結晶粒の大きさを前述の $100\ \mu\text{m}$ とすれば、 c 軸方向の伸び量は $2\ \mu\text{m}$ となり、これが最大高さにそのまま加算されるとすれば、最大高さは $2\ \mu\text{m}$ 、中心線平均粗さにして約 $0.5\ \mu\text{m}$ 粗くなる。実験結果は中心線平均粗さで約 $0.2\ \mu\text{m}$ 粗さが増大しており、オーダとしては一致する。

5.2 焼入れ部組織

図6に示したように、母材近くの熱変質層内にはフェライトの網目が残っている。パーライト部分は変質しており、硬度からみてマルテンサイトに変態している。このようなマルテンサイトとフェライトの混合組織は、急速加熱・冷却組織として知られており⁵⁾、オーステナイト化したパーライト部分からフェライト部分への炭素の拡散よりも加熱冷却が速く行われることに起因している。拡散速度は温度上昇に伴い上昇するため、高温の試験片表面近くにおいてはフェライトの網目がぼやけてくる。

このような組織に対応し、硬度分布は、圧子がマルテンサイト部分にのみ当たった場合は $H_v\ 900$ を越す高い硬度を示し、フェライトが残留した部分を測定した場合は $H_v\ 500$ 台の硬度となる。図7に示した硬度分布のばらつきはこの理由による。一方、試験片表面から測定した硬度は、深さ方向の分布と比べばらつきが少なく、全体に高い硬度を示す。すなわち、表面近傍は比較的均一な焼入組織となっている。

このように内部に硬度のばらつきをもつ硬化層が、例えば耐摩耗性のような硬化層に対する要求にこたえられるものか否かは今後の検討課題である。しかし、本実験のごとく焼入れ前の処理を焼きなましとせず、焼きならしとする等の方法により、結晶粒の微細化を行えば、炭素の拡散が必要な距離が短くなり、組織及び硬度がより均一化されと考えられる。

5.3 冷却速度

電子ビーム焼入過程は、投入エネルギーが熱伝導によって試験片内に伝えられ熱変質を起こすというモデルによって説明されることを、実験と計算の一致が示している。

このモデルを用いることにより加熱及び冷却速度を計算することができる。すなわち、式(1)の位置座標系は静止しているが、半無限体は定速度で移動しているので半無限体に固定した座標系に変換できる。計算の結果、半

無限体表面で焼入れ部中央の点での 720°C (A_c 変態点) 近辺での冷却速度は、電子ビーム電流 $15\ \text{mA}$ 、テーブル移動速度 $1\ 000\ \text{mm/min}$ の場合で $2 \times 10^3\ \text{K/s}$ である。実験の範囲内では投入エネルギー量の大きい方が、 720°C 近辺での冷却速度は小さくなり、最も小さい値は $4 \times 10^2\ \text{K/s}$ (電子ビーム電流 $15\ \text{mA}$ 、テーブル移動速度 $200\ \text{mm/min}$) である。 $0.43\% \text{C}$ の炭素鋼に対し、臨界冷却速度は $220\ \text{K/s}$ とされている⁶⁾ ので、これは十分に大きな冷却速度である。

6. 結 論

デフォーカスした電子ビームを Y 方向に偏向振動させ、試験片を X 方向に移動させる構成で電子ビーム焼入実験を行った。その結果、

- (1) $S\ 45\ \text{C}$ 材にマイクロビッカース硬度 $H_v\ 600$ 以上の硬化層厚さが $0.6\ \text{mm}$ で、硬化層内平均硬度が $H_v\ 731$ の焼入れ層を形成させることができた。この時の電子ビーム電流は $15\ \text{mA}$ 、加速電圧は $150\ \text{kV}$ 、試験片の移動速度は $700\ \text{mm/min}$ であって、表面溶融は起こっていない。硬化層内の平均硬度は、表面溶融がわずかに認められる状態となる時最大となった。
- (2) 硬化層を含む熱変質層は、急熱・急冷の組織を示し、焼入れ前の組織の影響が大きい。
- (3) 定速度移動半無限体表面に静止長方形熱源があるという熱伝導モデルと、温度が 900°C 以上に達した部分が変質するという仮定による電子ビーム焼入れモデルは、変質深さにおいて実験結果とよく一致した。

謝 辞

機械技術研究所の前田龍太郎氏の有益な討論に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) V. L. Ettenreich: Die Oberflächenhärtung von Werkzeugen und Werkstücken aus härtbarem Stahl in extrem kurzen Zeiten, VDI-Z., 110, 8, März (II), (1968) 316.
- 2) D. R. Dreger: Pinpoint Hardening by Electron Beam, Machine Design, Oct. 26, (1978) 89.
- 3) 滝沢, 鈴木, 後藤: さまざまなニーズに適した電子ビーム溶接装置, 溶接技術 (1979-6) 45.
- 4) H. S. Carslaw & J. C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids, Oxford Univ. Press, (1959) 270.
- 5) 横田清義: 鉄鋼の急速加熱変態の研究, 産報 (1971) 13.
- 6) 日本鉄鋼協会編: 鋼の熱処理 (改訂5版), 丸善 (1969) 52.