

通電加熱を利用した金型の局所焼入れ法の開発

三重大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

教授 牧 清二郎

(平成 22 年度一般研究開発助成 AF-2010005)

キーワード：熱処理, 通電加熱, 焼入れ

1. 緒言

プレス成形用金型では局所的に耐摩耗性が要求されるものが多い。金型全体を焼入れすれば要求を満たせるが、経済的とは言えない。既存の局所焼入れ法として、火炎焼入れやレーザー焼入れがある。火炎焼入れでは熟練した技術が必要であるが、「若者の理科離れ、ものづくり離れ」による後継者不足で、技術の継承もおぼつかない。レーザー焼入れも、安全のための作業区画の確保、高い設備コストのため、中小の金型製造業では導入に二の足が踏まれる。このような背景から、熟練した技術を必要とせず、設備投資が安価に済む焼入れ技術の開発が望まれる。これに応え得る一つの方法として、加熱に通電加熱を応用する方法が考えられ、予備実験によってその高い実現の可能性が確認されている¹⁾。

本研究では、本法の実現に向け、それに不可欠な通電加熱の加熱特性と焼入れ特性の詳細を明らかにし、最適処理条件の探索とともに、具体的実施方法の確立を目指した。

2. 通電加熱局所焼入れ法

通電加熱は、被加熱体に電気を直接流し、ジュール発熱を利用して加熱する方法²⁾であり、流す電流の密度にもよるが1秒程度の短時間通電で目標とする加熱を達成できる、急速加熱が可能な方法³⁾である。

本法はアルミニウム合金の半熔融成形でのアルミニウム合金ビレットの均一通電加熱⁴⁾や円筒容器の温・熱間スプライン成形のための側壁通電加熱⁵⁾における電極接触部の加熱の問題を解決する過程において見出された電極接触部の加熱特性に着目して考案された。

ここで被加熱体の電極接触部での加熱状態について考えてみる。通電加熱における被加熱体と電極の接触状態は全面接触ではない。電極と被加熱体の接触面積率を ε とし、接触部に公称電流密度 i の電流が流れたとすると、公称電流密度は電極の公称接触面積 S と流れた電流 I により $i=I/S$ で与えられるので、被加熱体の電極接触部での単位体積、単位時間あたりの平均発熱量 q は次式で与えられる。

$$q = \frac{r i^2}{\varepsilon} = \frac{r}{\varepsilon S^2} I^2 \quad (1)$$

ここで、 r は電気抵抗率である。接触面積率 ε は、電極と被加熱体のいずれかの低い降伏応力の関与のもとで、電極接触圧力 p_c によって大きく変化するので、電極接触部の発熱量は

電極接触圧力によって大きく支配される。

鋼の焼入れでは、焼入れ部分をオーステナイト化温度にまで加熱してオーステナイト化する必要がある。本法では上記の電極接触部の加熱特性を利用して、電極接触部を焼入れに必要なオーステナイト化温度にまで通電加熱する。一般に、熱伝導率の高い銅をベースとする電極と接触する部分は電極に熱が逃げて高温に加熱できないのではないかと捉えられており、斯く言う筆者も、材料加工への通電加熱の応用研究において気付くまでは、そのように考えていた。

図1に、本法のイメージ図を示す。焼入れしたい部分に接触させる電極Aに対し対極である電極Bは広い接触面積にて被処理材に接続する。このように電気回路を構成すると、密度 i の電流が流れている部分の単位時間、単位体積あたりのジュール発熱は $r i^2$ で与えられるので、電流密度が高くなる電極Aの接触部付近において大きなジュール発熱が期待できる。一般に電極は熱伝導率の高い銅をベースにして作製されているので、電極への熱の散逸は相当に大きい。この部分を鋼の焼入れに必要なオーステナイト化温度にまで加熱するには、大電流を流す必要があり、電流密度にして $100\text{A}/\text{mm}^2$ 以上が必要である。しかし電流密度を過度に大きくすると、電極との接触部でスパークが発生したり、溶融が生じ、被処理材の表面を傷つけることになる。本法の適用においては、このような表面損傷は絶対に避けなければならない。

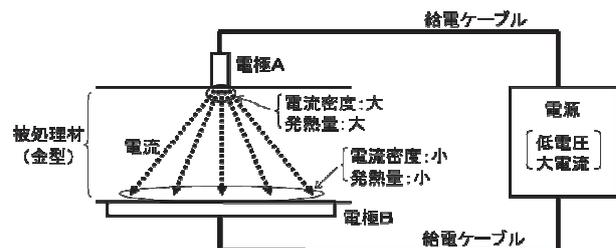


図1 通電加熱を利用した局所焼入れ法のイメージ

3. 通電加熱局所焼入れ実験

3.1 実験方法

被処理鋼材には、オーステナイト化温度から空冷しても焼入れが可能なダイス鋼SKD11の丸棒($\phi 32$)を用い、これを長さ20mmに切断し、円柱状試験片として実験に供した。試験片の切断面にラップ仕上げを施し、その面に局所焼入れを行った。電極には耐久性を考慮して銅タングステン(C30A2、

日本タングステン(株製)を用いた。

図2(a)に、実験方法を模式図にて示す。事前に行った予備実験¹⁾では、被処理材である試験片への電極の押し付けにはバネを利用していたが、本実験では、本法の実用化時での装置をイメージして、エアシリンダーを用いる機構とし、エアの圧力調整によって電極の接触圧力を変化できるようにした。準備した試験片(φ32×20h)のラップ仕上げ面に、先端部の直径が5mmの電極(図2(b))を押し付け、所定の圧力を付加した状態で、通電加熱を行った。なお実験では、通電加熱条件として、通電電圧(無負荷) E 、通電時間 t 、電極接触圧力 p_c を変化させた。そして通電完了後も5s以上、電極を試験片に押し付けたまま保持し、試験片の加熱部を自然冷却させた。その後、電極を後退させて試験片を取り出し、試験片の電極接触部を目視観察するとともに、電極接触部の硬さをビッカース硬さ試験によって測定し、焼入れ状態を調べた。なお、通電加熱用電源には出力電圧(無負荷)を0~10Vの範囲で変化できる交流電源を用いた。電源の出力インピーダンスは図2(a)に示す上部および下部の銅板間での負荷に対して約2.5mΩである。

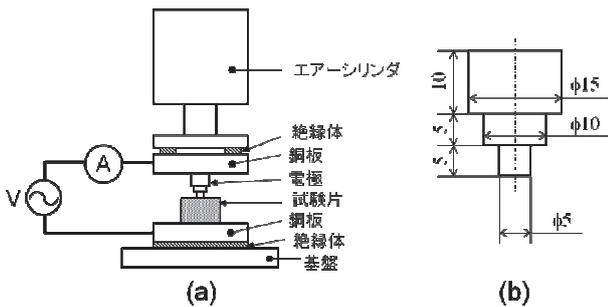


図2 (a)通電加熱を利用した局所焼入れ実験の模式図、
(b)電極の形状と寸法

3.2 実験結果および考察

3.2.1 通電加熱条件による処理表面の状態変化

電極接触圧力 $p_c = 21.8\text{MPa}$ 、通電時間 $t = 2\text{s}$ にて通電電圧 E を変化させて局所焼入れを試みた試験片の電極接触部の写真を、後述する電極接触部の硬さ分布の測定結果から判断した焼入れ状態の分類結果とともに、図3に示す。加熱部の大気酸化による発色により通電加熱によって加熱された領域がよくわかる。円形の接触形状が反映されて加熱領域も円形を呈している。通電加熱では、通電電圧の増加によって入熱量が増加するが、それを示すように、通電電圧の増加により加熱領域が拡大している。入熱が過多となった電圧7.0Vでは、電極の一部が熔融し、試験片表面に移着している。本法では、その目的から、表面に損傷を与える、このような処理条件は不適當である。

3.2.2 硬さ分布に及ぼす通電電圧の影響

図4に、図3に示した試験片の電極接触部におけるビッカース硬さ分布を示す。通電電圧の低い4.5Vでは焼入れによ

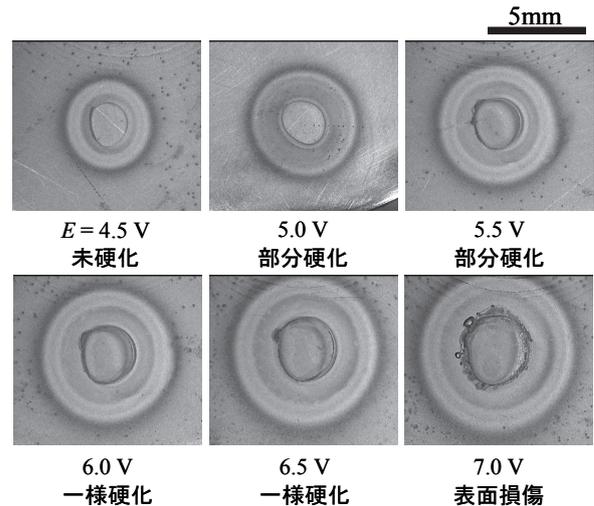


図3 通電電圧 E を変化させた局所焼入れ試験片の電極接触部と焼入れ状態(電極接触圧力 $p_c = 21.8\text{MPa}$ 、通電時間 $t = 2\text{s}$)

る硬化域はまったく認められない。加熱温度がオーステナイト化温度にまで達していないと考えられる。電圧が増加して5.0Vになると焼入れによる硬化域が一部認められるようになる。しかし硬化域は中心ではなく、中心から少し離れた位置に環状に発達している。さらに電圧が増加して5.5Vになると中心部も硬化し始める。しかし、電極中心直下の硬さはその周囲に比べると低い。電圧が6.0V以上になると電極中心直下でも600HV₁以上の硬さが得られるようになる。600HV₁を境に、それ以上の値を示す焼入れ硬化域について見てみると、電圧が6.0Vでは中心から電極半径2.5mmの約70%までの範囲であるが、電圧が6.5Vでは約90%までの範囲に拡大している。電圧が7.0Vの結果は図には示していないが、この条件では入熱が過多で、図3に示したように、試験片の処理表面に損傷を与える結果となった。金型の局所焼入れ処理への本法の応用を考えると、無傷であることが要求されるの

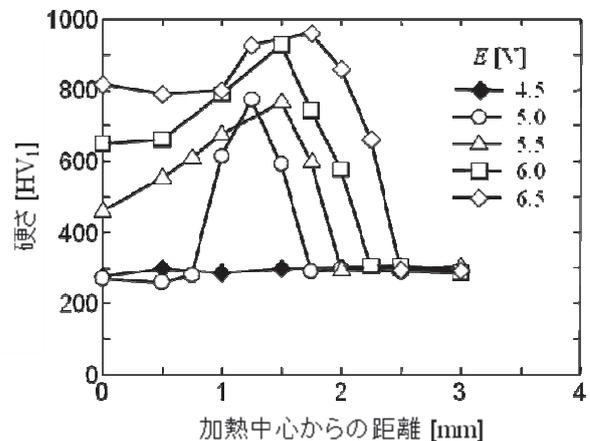


図4 通電電圧による硬さ分布の変化(電極接触圧力 $p_c = 21.8\text{MPa}$ 、通電時間 $t = 2\text{s}$)

で、このような損傷の発生は絶対に避けなければならない。この観点において、電圧 7.0V は不適当と言える。電極接触圧力 $p_c = 21.8\text{MPa}$ 、通電時間 $t = 2\text{s}$ の条件では通電電圧 $E = 6.0 \sim 6.5\text{V}$ が適当であると言える。本実験により、直径 3.5mm の電極を用いた予備実験では観察できなかった硬化域の進展状況、すなわち硬化域が中心からではなく、中心から少し離れた位置に環状に発生し、それが発達して中心部に進展していくという状況が明らかになった。

3.2.3 硬さ分布に及ぼす電極接触圧力の影響

図 5 に、通電電圧 $E = 5\text{V}$ 、通電時間 $t = 2\text{s}$ にて電極接触圧力 p_c を変化させた場合の電極接触部における硬さ分布の変化を示す。接触圧力が大きい 30.1MPa では焼入れによる硬化がまったく認められないが、接触圧力を 21.8MPa に減少させると、加熱中心から 2.5mm の位置にある電極接触外周境界より内側にて中心部が未硬化の環状の硬化が認められるようになる。さらに接触圧力を減少させ 13.5MPa にすると、未硬化であった中心部が硬化し始めるが、この条件では一様な焼入れ硬化を得るには至らない。接触圧力をいまま少し減少させると一様な硬化が得られると期待されるが、図には示していないが接触圧力の減少が過度であった 5.2MPa では、試験片の一部に電極の溶着をとまう表面損傷を引き起こした。前節でも述べたが、直径 3.5mm の電極を用いた予備実験¹⁾では、実験に用いた試験片と電極の材料が異なるが、このような環状の硬化は観察されなかった。一様な焼入れ硬化を得る観点から、今一度、電極直径の影響について調べてみる必要がある。

3.2.4 通電加熱条件と焼入れ状態の関係

図 6 に、通電時間 $t = 2\text{s}$ の処理で表面損傷が認められなかった試験片について、通電電圧 E による加熱中心部の硬さの変化を、電極接触圧力 p_c をパラメータとして示す。いずれの接触圧力においても電圧の増加により硬さの増加が認められるようになる。しかし、硬さが増加し始める電圧のしきい値は、接触圧力が高いほど高くなっている。電圧がしきい値を超えてはじめて、試験片加熱中心部の加熱温度がオーステナイト化温度を超えるようになると解釈できる。接触圧力が高いほど電極と試験片の接触面積率は増加するので、通電加熱によって試験片をオーステナイト化温度に加熱するためには、電極と試験片の接触面積率が高い条件では通電電圧を高く設定する必要があると言え、逆に、接触面積率を低くすれば通電電圧を低くできると言える。

図 7 に、通電時間 $t = 2\text{s}$ の処理での通電加熱条件と焼入れ状態の関係を示す。ここで、×印は焼入れ硬化が認められなかった場合、△印は環状の焼入れ硬化が認められた部分的な焼入れ状態にあった場合、○印は一様な焼入れ状態にあった場合、+印は一様な焼入れ硬化が得られるもの入熱過多で表面に損傷を生じた場合を示す。なお、ここでは硬さの値が 600HV₁ 以上を示した場合を焼入れによる硬化が認められたと判断した。この結果から、一様な焼入れ硬化が得られる理想

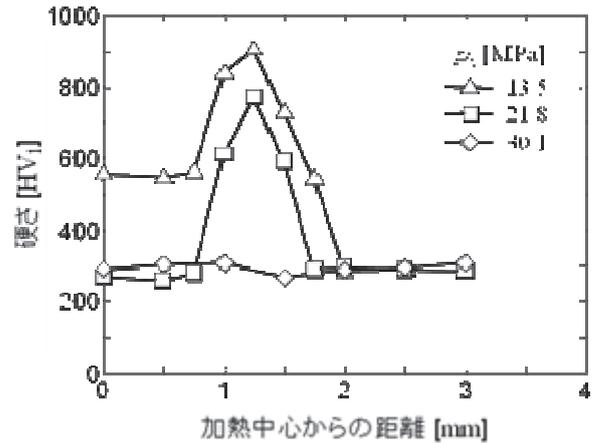


図 5 電極接触圧力による硬さ分布の変化 (通電電圧 $E = 5\text{V}$ 、通電時間 $t = 2\text{s}$)

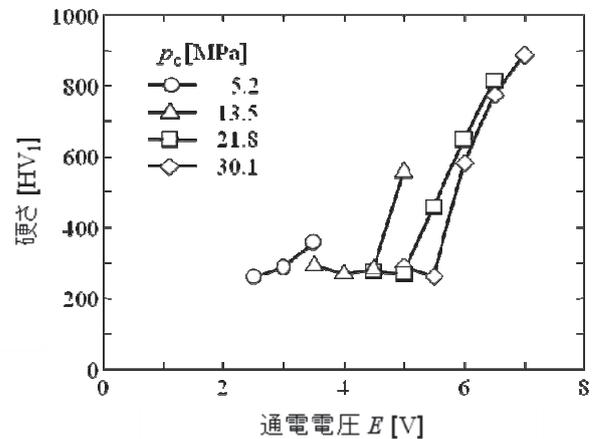


図 6 異なる電極接触圧力 p_c における通電電圧による加熱中心部の硬さの変化 (通電時間 $t = 2\text{s}$)

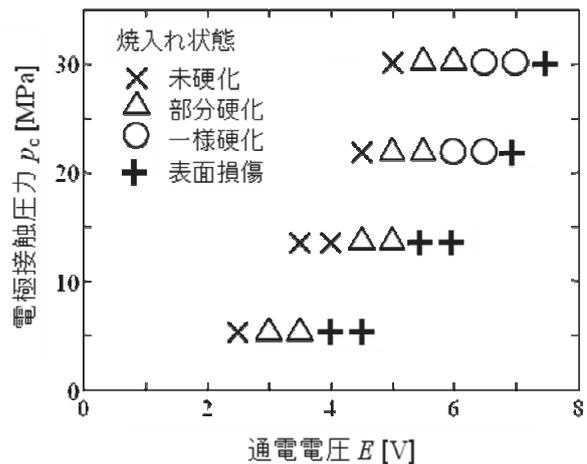


図 7 通電加熱条件と焼入れ状態の関係 (通電時間 $t = 2\text{s}$)

的な局所焼入れ条件は、表面損傷を引き起こす通電条件より少し低い入熱条件になっており、表面損傷を引き起こす条件領域に隣接して存在し、その領域は比較的狭いことがわかる。

なお通電時間 $t = 1\text{s}$ での処理についても調査したが、結果

は通電時間 2s の処理と同様の傾向を示した。ただし、通電電圧に関して少し高圧側への移行が見られた。

4. 通電加熱の数値シミュレーション

通電加熱による電極接触部の加熱と通電完了後の冷却の様子を把握するため数値シミュレーションを行った。計算は軸対称モデルとし、 r - z 面の電極と試験片の接触部およびその近傍は 1 辺が 0.5mm の正四角要素に分割し、接触部から離れる部分では要素分割を指数関数的に粗くした。シミュレーションには実験に用いた装置の諸元（電極の寸法（図 2 (b)）、電源の出力インピーダンス 2.5m Ω ）と試験片の寸法（ $\phi 32 \times 20$ h）を反映させた。試験片 SKD11 の電気抵抗率と比熱については焼鈍材に対する実測値、熱伝導率については精度よく測定できなかったため、焼入れ材に対する公表値⁶⁾を温度の 1 次式で近似して用いた。なお、電極 (C30A2) の熱物性値⁷⁾については、温度変化は無視した。計算では、電極接触圧力によって変化する電極と試験片の接触状態の影響を反映させるべく、電極と試験片の接触面積率 ϵ を仮定し、接触境界をはさむ電極と試験片の要素については、その z 方向の電気抵抗率には接触面積率の逆数 $1/\epsilon$ を乗じ、熱伝導率には接触面積率 ϵ を乗じる補正を行った。なお、接触面積率 ϵ は高温に加熱される試験片の降伏応力の温度による変化によって温度変化すると考えられるが、本シミュレーションでは一定と仮定した。初期温度はすべて 25 $^{\circ}\text{C}$ 、計算における時間ステップは 0.0005s とし、通電時間が 2s を超えた時点で計算を停止した。一部のシミュレーションでは、多くの場合において最高温度を示した電極中心直下の試験片の要素の温度が 1000 $^{\circ}\text{C}$ を超えた時点で計算を停止した。なお、前述の接触面積率の補正については、計算結果に要素サイズ (z 方向) が影響するので、本シミュレーションによって得られる情報は定性的な域を出ない。

図 8 に、電極中心直下の試験片要素の温度が 1000 $^{\circ}\text{C}$ に達した時点における電極接触部近傍の温度分布を示す。図には通電条件の異なる 3 例を示すが、加熱時間が短い場合（図(a)）は、時間の長い場合（図(b)および図(c)）に比べ、加熱が電極接触部近傍に集中し、加熱領域が狭くなっている。通電時間が長くなり加熱時間が長くなると加熱領域が拡大していく様子が見えてくる。

図 9 に、通電時間 $t=2$ s の通電加熱で得られる要素の最高到達温度 T_{\max} の通電電圧 E と電極接触面積率 ϵ との関係を示す。同じ通電電圧の条件のもとで最高到達温度を見ると、接触面積率が小さいほど到達温度が高くなっている。電極の接触圧力を下げると接触面積率は減少するので、図 5 において、同じ通電電圧でも接触圧力を下げた場合に焼入れが可能になった理由が、この結果から理解できる。

図 10 に、図 8 に温度分布を示した 3 例における電極中心直下の要素の 1000 $^{\circ}\text{C}$ からの冷却過程での温度の時間変化を示す。図には、通電完了後も試験片に電極を接触させて冷却さ

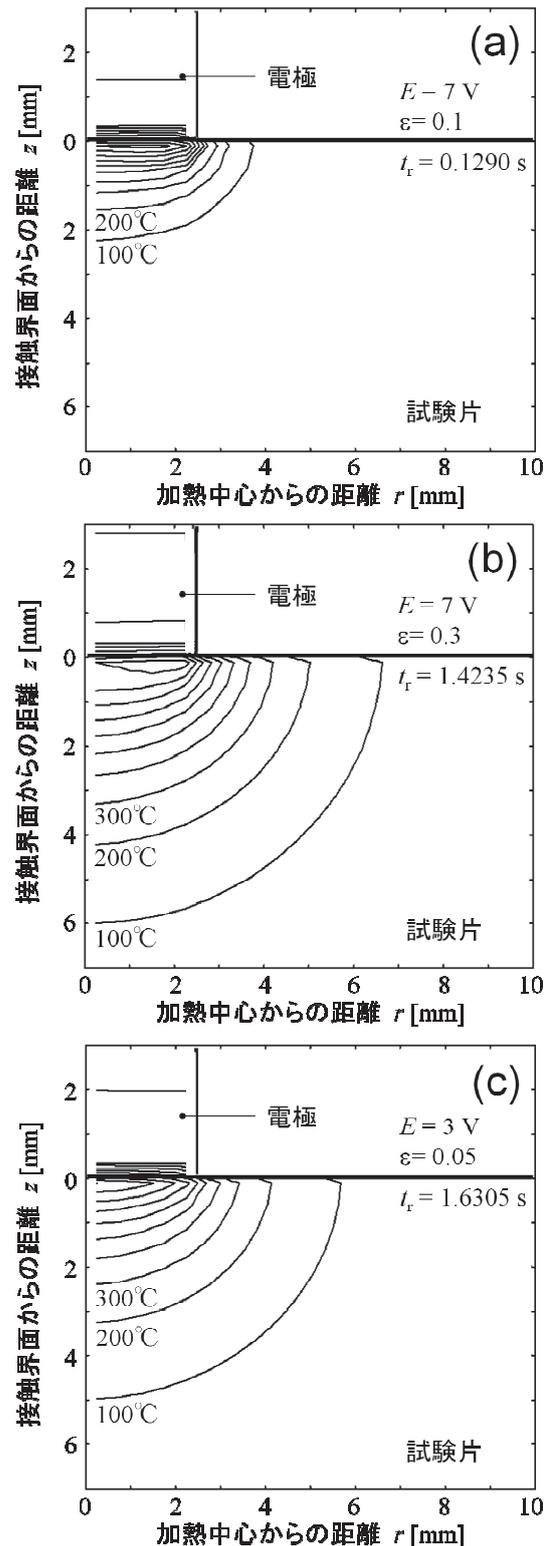


図 8 所要通電時間 t_r を含む異なる通電電圧 E および接触面積率 ϵ での電極中心直下の要素が 1000 $^{\circ}\text{C}$ に達した時点における計算による温度分布

せた場合と通電完了と同時に試験片から電極を離して冷却した場合について、それぞれ、実線と破線で示す。この結果からは、冷却速度は短時間で加熱が行われた場合の方が大きい

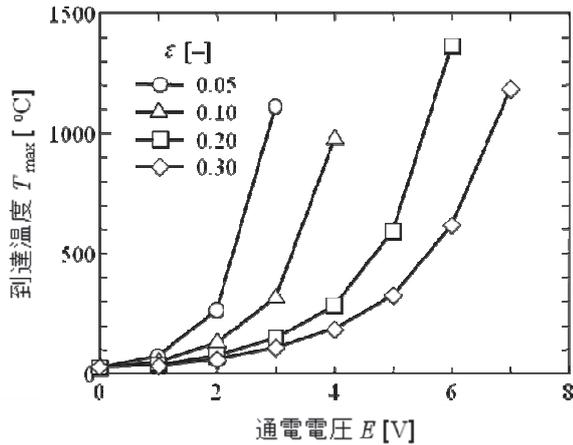


図9 接触面積率 ϵ と通電電圧 E による最高到達温度 T_{\max} の変化 (通電時間 $t=2\text{s}$)

こと、また、通電完了後も電極を試験片に接触させて冷却した方が冷却速度が大きいことがわかる。図に示した結果では、冷却速度が接触の有無で2倍ほど異なる場合も見られる。しかしながら、通電加熱を利用する局所焼入れは、レーザー焼入れと同様に、被処理材の非加熱領域への熱の移動、放散によって行われるので、この意味において、冷却過程での電極の接触の有無が焼入れ状態を大きく左右するといったことはないであろう。

5. 安定した焼入れ実現のための通電制御

実際には接触面積率 ϵ は電極接触部の温度上昇によって増加すると考えられるが、これを一定と仮定し、通電加熱が断熱的に行われるとすると、式(1)から、電極接触部の入熱量は電流 I の2乗の時間積分値(以下、 $\Sigma I^2 \Delta t$ と記す)に比例することになり、通電制御をこの量で行うことが有効であると示唆される。そこで電極接触圧力 $p_c=13.5\text{MPa}$ 、通電電圧 $E=7\text{V}$ の実験について、 $\Sigma I^2 \Delta t$ 値と焼入れ部の硬さの関係調べた。なお $\Sigma I^2 \Delta t$ 値は通電中にモニターした電流の時間変化のデータを用いて求めた。

結果を図11に示す。なお図には、比較の意味で、通電加熱完了後0.3s後に電極を後退させ試験片から離れた場合の結果も示した。同じ $\Sigma I^2 \Delta t$ 値で比較すると、通電完了直後に電極を離れた方が、高い硬さが得られているが、いずれの場合も $\Sigma I^2 \Delta t$ 値の増加により硬さが増加しており、両者の間には密接な関係がある。この結果から、通電完了0.3s後に電極を後退させて試験片から離す条件では $\Sigma I^2 \Delta t$ の値を $9.3\text{kA}^2\text{s}$ に設定して通電加熱を行えば、 700HV_1 の硬さが得られると考えられる。そこで、電極間負荷に対して投入電力量を制御する装置(図12)を電圧の入力端子(電圧 E)にも電流を入力するようにし、通電加熱局所焼入れを試みた。結果は、図11に示した状況がほぼ再現され、 $\Sigma I^2 \Delta t$ 値による制御の有効性が確認された。現段階では、電極接触圧力 $p_c=13.5\text{MPa}$ 、通電電圧 $E=7\text{V}$ の条件についてのみの検討であり、本法の具体的

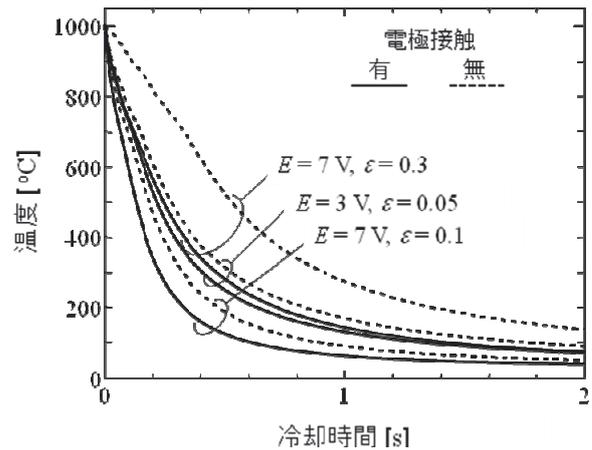


図10 図8での加熱に対する電極接触有無の冷却過程における電極中心直下の要素の温度の時間変化

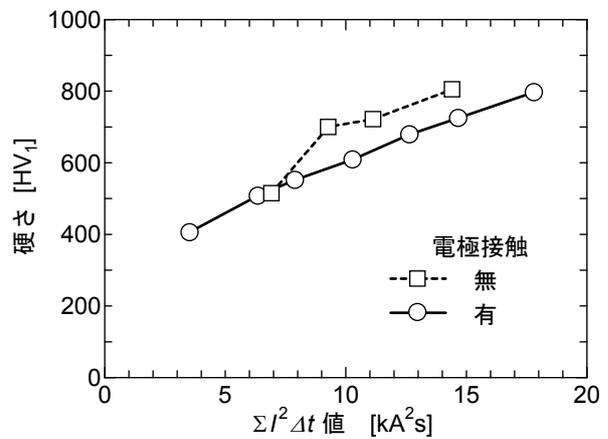


図11 通電電流の2乗の時間積分値 $\Sigma I^2 \Delta t$ と加熱中心での硬さ HV_1 の関係 (通電電圧 $E=7\text{V}$ 、電極接触圧力 $p_c=13.5\text{MPa}$)

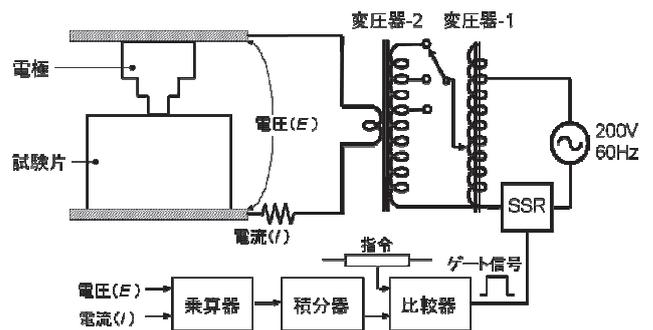


図12 $\Sigma I^2 \Delta t$ 値による通電制御装置の構成

実現には、適切な $\Sigma I^2 \Delta t$ 設定値への電極接触圧力と電極サイズ(通電部接触面積)の影響、さらに、処理位置による負荷の変動の影響、通電電圧を高くすると通電時間は逆に短くなるので、具体的には、通電電圧あるいは通電時間の影響について調査し、これを明らかにする必要がある。また、温度変化を無視して一定と仮定している接触面積率 ϵ と電極接触圧

力 p_c の関係についても処理する材料によって異なるので、被処理材の影響についても調査する必要がある。

6. 結言

通電加熱を利用した局所焼入れ法の開発を目的に、耐久性の高い銅タングステンを電極材料、冷間ダイス鋼SKD11を被処理材とした単発焼入れ実験を行い、焼入れ硬化が可能な通電条件を探索した。また、通電加熱および冷却過程での被処理材の電極近傍の温度分布の時間変化の様子を把握するため、電極と被処理材の接触面積率を仮定した数値シミュレーションを行うとともに、安定した焼入れ状態を確保するための通電制御方法について検討した。その結果、以下の知見を得た。

(1) 電極接触部の加熱状態には通電電圧と電極接触圧力が大きく影響し、電圧を高くすると接触圧力を低くすることは同じ効果を示し、いずれも加熱温度の上昇、加熱速度の増加すなわち加熱時間の短縮に有効である。

(2) 一定の通電時間に対して焼入れ硬化が可能な通電条件を通電電圧と電極接触圧力の2因子で表現すると、その領域は、処理表面に損傷を生じる入熱過多の領域に隣接しており、比較的せまい。

(3) 直径5mmの電極を用いた局所焼入れでは、直径3.5mmの純銅電極を用いた実験では観察されなかった部分的な環状の焼入れ状態が理想的な一様焼入れ状態への移行過程において観察された。

(4) 電極接触圧力と正の相関を有する接触面積率を仮定した被処理材の通電加熱過程と冷却過程の数値シミュレーションは、定性的ではあるが、実験結果をよく説明した。

(5) 通電時間が1s前後の通電加熱において安定した焼入れ

状態を得るには、電流の2乗の時間積分値による通電制御が有効である。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団（当時 財団法人天田金属加工機械技術振興財団）の一般研究開発助成（AF-2010005）と、一部、平成24年度科学研究費補助金（基盤（C）、No.24560877）により行われた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 牧清二郎・松田晋平・中西栄徳: 日本機械学会第18回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2010) CD-ROM 論文集 [No.10-29] (2010), 305.
- 2) F.V. Lenel, Trans. AIME 203 (1955), 158-167.
- 3) S. Maki, K. Mori: Proc. of 11th World Conference on Titanium (JIMIC5), Ti-2007 Science and Technology, edited by M. Niinomi, S. Akiyama, M. Hagiwara, M. Ikeda and K. Maruyama, 2(2007), 877-880.
- 4) 牧清二郎・柴田浩臣・森謙一郎・牧野泰育: 塑性と加工 46-536 (2005), 849-853.
- 5) 森謙一郎・牧清二郎・有澤直孝・上野完治・外園保治・山崎卓矢: 塑性と加工, 49-574 (2008), 1106-1110.
- 6) F-SKD11 テクニカルデータ, http://www.futaba.co.jp/dbps_data/_material_/localhost/precision/plate/PDF/tech_data_F-SKD11.pdf (2012.8現在)
- 7) 総合物性表, http://日本タングステン株式会社.com/goods/midasi/shousai/g_prd2001.htm (2012.8現在)