

# 強磁場環境における軟磁性材料の熱処理

## Heat Treatment of Soft Magnetic Materials in High Magnetic Field

(株)ケーヒン 保科 栄宏<sup>1</sup>, 原川 俊郎<sup>1</sup>  
東北大・金研. 高橋 弘紀<sup>2</sup>  
H. Hoshina<sup>1</sup>, T. Harakawa<sup>1</sup>, and K. Takahashi<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Keihin Corporation

<sup>2</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

### 1. はじめに

磁気エネルギーを利用した新しい材料組織の制御については近年注目され[1]、産業への応用が検討されている。特にヘリウムフリーの超伝導マグネットの開発をきっかけに、研究、報告が多くなされるようになった。

たとえば配向組織形成プロセスとしては、Bi-Mn 合金において、急冷凝固組織の粗大化過程で強磁場を印加する事により、BiMn 化合物を配向できる事が報告されている。[2] [3] また、同様の組織配向制御に関するものでは、“鉄系スーパーメタルプロジェクト” [4]において、炭素鋼を強磁場中で逆変態させることで、磁場の印加方向に配向した特異な組織が得られることが報告されている。ここで得られた組織をもとに、超微細粒鋼の創製につながるなどの報告がある。

我々はこれまでに、磁場による組織制御をおこなうために、高真空・高温の環境下において安定した磁場中熱処理が行える装置を製作して、材料特性に対する磁場の影響を調査してきた。本報では軟磁性体の熱処理、とくに一次再結晶段階における磁場の作用について調査した結果を報告する。

### 2. 装置概要

今回、熱処理に供した試料は Fe-Si 系の材料であるため、高温での熱処理においては、表面の酸化を防止する必要がある。そのため、次に示す構成として、真空雰囲気中で熱処理を行った。

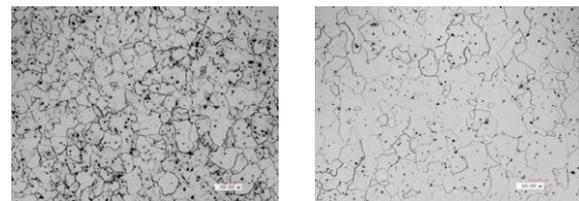
熱処理設備は、既存の磁場中熱処理炉として構成されている、内径 100mm φ を有する超伝導マグネット (10T-CSM) と外径 50mm φ、内径 22mm φ の電気炉をベースに真空熱処理炉の部位を製作した。真空熱処理炉は、外径 14mm φ、内径 12mm φ の石英ガラス管の一端を閉じたものを用い、ターボ分子ポンプを用いる事で、熱処理に際し安定した処理が行える程度まで減圧できる機構としている。

試料は窒化ホウ素 (BN) で作製した試料固定部を用いて固定されるようにした。試料設置時には、磁場中心、

電気炉の温度中心と試料中心位置が一致するように配置しており、また、試料付近の雰囲気温度は Pt-Rh 熱電対を用いて測定され、処理炉内の温度変化を把握可能である。

### 3. 試験方法

歪の再結晶過程に磁場を作用させるために、まず、市販のケイ素鋼棒にロール圧延によって塑性歪を導入した。歪が導入された試料の断面組織を Fig.1(a)に示す。こうして得られた鋼棒を切削によって外径 5.5mm、高さ 4mm の寸法の円柱状に切り出し、熱処理に使用した。



(a) As Roll

(b) Annealed at 973K

Fig. 1 Microstructure of (a) an as-rolled and (b) an annealed (at 973 K) sample.

また、磁場中の熱処理を実施する前に無磁場の焼鈍によって事前に再結晶温度を確認した。再結晶温度は、873K~1023K の範囲で 50K おきに焼鈍温度を変量させ、試料が軟化完了した温度を測定して求めた。

次に、前述の磁場中熱処理装置にて 10T の磁場強度中と無磁場で熱処理を行った。このとき、焼鈍する際の保持温度の時のみに磁場が印加されるよう、Fig.2 の磁場印加パターンを設定した。

熱処理後の試料については、保磁力を測定して軟磁特性の変化を確認した。保磁力は、東北特殊鋼製の保磁力計 (K-HC1000) を用いて測定し、その際、Fig.3 に示すように、熱処理時に磁場を印加した方向に対して角度を変えて測定して磁場方向と保磁力の大きさの相関を確認した。

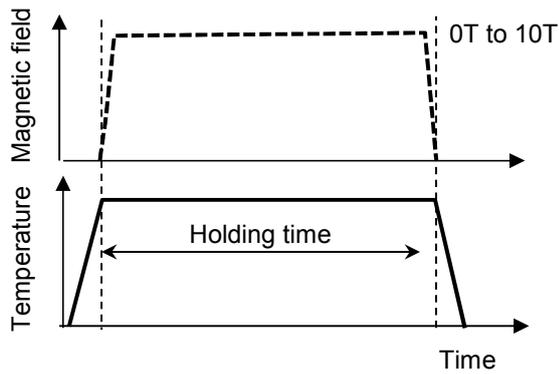


Fig. 2 Schematic diagram of heat treatment condition in magnetic fields.

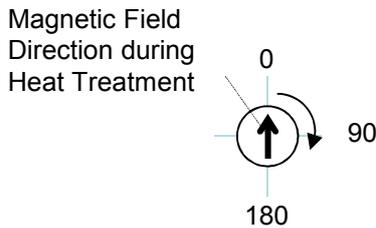


Fig. 3 Angle definition in coercivity measurements.

#### 4. 試験結果

無磁場中で再結晶温度を確認した結果を Fig.4 に示す。また、973K で焼鈍した試料の断面組織を Fig.1(b) に示したが、Fig.1(a)で見られたような歪は消失していることが確認できる。歪の消失過程と Fig.4 の軟化曲線から、973K が再結晶温度であると考えられる。

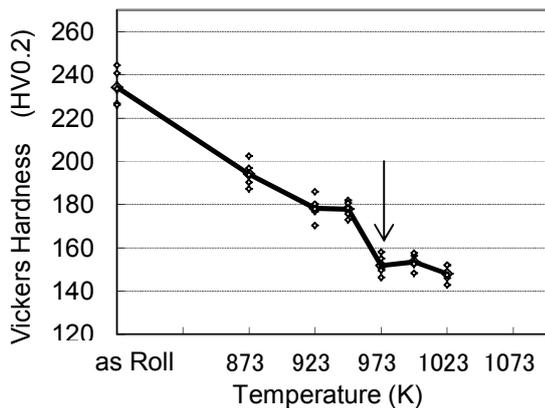


Fig. 4 Temperature dependence of the Vickers hardness.

Fig.5 に再結晶温度の 973K で、磁場を 10T 印加しながら焼鈍した試料を、角度を変えて保磁力を測定した結果を示す。無磁場中で熱処理したものは角度によっ

て保磁力の変化はないが、磁場を印加して熱処理した試料は、磁場の印加方向である  $0^\circ$  において保磁力が低くなっており、磁場の寄与が確認された。

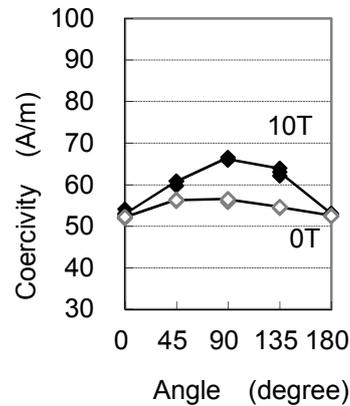


Fig. 5 Angle dependence of the coercivity.

このように磁場中で焼鈍すると磁場印加方向にのみ保磁力が小さくなる現象は、一次再結晶完了温度付近で確認され、さらに、歪の導入量との相関性があることも確認された。

#### 5. まとめ

Fe-Si 系軟磁性材料に歪を導入し、磁場中で焼鈍した場合、磁場印加方向に保磁力が低下することを確認した。この現象は、焼鈍時の再結晶過程に対して磁場が作用したことによって生じたと考えられる。

今回、磁場中での熱処理によって、軟磁特性が改善することが確認された。本プロセスを使用した材料を適用することによって、電磁弁、モータ等の各種磁気デバイスの性能向上が期待できる。

#### 参考文献

- [1] 浅井滋生:入門材料電磁プロセッシング,内田老鶴圃,東京,(2000)
- [2] H. Yasuda, et al., Mater. Trans., 44(2003)2207.
- [3] H. Yasuda, et al., Mater. Trans., 43(2003)2555.
- [4] 例えば JRCM NEWS No.191 2002.9 等