

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560899

研究課題名(和文) 小型モーター高性能化のための超微細粒非磁性高強度オーステナイトステンレス線の開発

研究課題名(英文) Development of ultrafine grained nonmagnetic high strength austenitic stainless wire for a high performance small size motor

研究代表者

鳥塚 史郎 (Torizuka, Shiro)

独立行政法人物質・材料研究機構・その他部局等・材料創製・加工ステーションステーション長

研究者番号：60354271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：温間加工によってマルテンサイト変態が抑制された状態で、高降伏点化できることを明らかにした。500℃で圧延を行った材料の透磁率は1.015であり、非磁性といえた。また、結晶組織も極めて微細であった。圧延方法は、我々が開発した連続温間圧延機を用いて、本線材は、初期直径6mmから約直径3mmまで圧延された。磁石に着くことなく非磁性であった。TS=1020MPa、全伸び18%、絞り74%を得た。この結果、通常のSUS304鋼の3倍の降伏強さを得たことになる。以上のことより、温間強加工によって、非磁性・高降伏点SUS304オーステナイト線材開発の可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Warm deformation which can restrain an occurrence of martensitic gives materials a high yield stress. The sus 304 steel which was rolled at 500C had the magnetic permeability of 1.015. The value was less than 1.02 which indicates nonmagnetic. Therefore, the warm rolled sus 304 steel was nonmagnetic and its microstructure was very fine. Warm rolling was our originally developed continuous warm multidirectional rolling. Sus 304 austenitic stainless steel wire with the diameter of 6mm was a starting material. It was rolled to the wire with the diameter of 3mm. This wire was nonmagnetic. Regarding mechanical properties, Tensile strength was 1020MPa, total elongation was 18% and reduction in area was 74%, which means that mechanical properties were excellent. Consequently, It was shown that ultrafine grained SUS304 austenitic steel with high yield stress was obtained by warm deformation (Warm multidirectional rolling), leading to the possibility of producing high performance motor shaft.

研究分野：金属生産工学

科研費の分科・細目：組織制御

キーワード：SUS304 準安定オーステナイト 結晶粒微細化 温間加工 高降伏点化

1. 研究開始当初の背景

低炭素化へ向けて強化・加速すべき研究課題として、高性能モーターの開発があげられる。世界の電力需要の50%以上を各種モーターが消費していると言われており、さまざまな製品に使用されているモーターのエネルギー効率を高めることで、消費電力を減らし、環境負荷低減に貢献できる。

モーターの高性能化の方法には、磁石の性能をあげる、高性能の電磁鋼板を用いるなどがあるが、小型化も重要な方法である。

小型でも高トルクを出力できるモーターが開発されれば、モーター自体の軽量化が可能となり、省エネルギー、CO₂削減につながる。小型化のための方法としては、部材の高強度化による小型化・薄肉化がある。特に、モーターシャフトが小型化、細径化ができれば、それが、駆動部分であるだけに、効果は大きい。

シャフトは、モーターで発生させた動力を伝達する部品であるが、外径が小さくなる部分であり、強い負荷がかかるため、強い強度(曲げモーメント、ねじれモーメント)が要求される。同時に、モーターシャフト材料には、磁石の影響を受けシャフトが磁性を帯びることにより回転性能に影響が出ないようにするため、非磁性材料であることが望ましい。

現在、オーステナイト組織の非磁性ステンレス鋼が主に使用されている。その代表例であるSUS304CuやSUSXM7は、耐食性や被削性に優れるという特徴もあってシャフト用材料としてよく用いられている。しかし、SUSXM7は、Cu以外にも価格が高騰しているNiを含むためコストアップにつながり、元素戦略上も問題である。磁性の問題を無視した場合、シャフトの材質としては、ステンレスSUS420J2があげられる。これはマルテンサイト系ステンレスで、熱処理(焼入・焼戻し)が施してあり、高強度、高硬度である。しかし、磁性を持ってしまうという決定的弱点を持つ。一方、非磁性のSUS304CuやSUSXM7は、降伏点が低いことが大きな問題点である。降伏点は、SUS304(310MPa)よりも低く、280MPa程度である。降伏点は、設計強度を左右するため、できるだけ高い方がよい。したがって、非磁性でなおかつ高降伏点であることが、シャフト材料として理想である。

オーステナイト鋼の降伏点を高くする簡単な方法は、冷間加工である。冷間加工によって、強度は約2倍以上になる。しかし、冷間加工を加えた場合、図1に示すように、加工誘起マルテンサイト変態が生じ、磁性を持つようになってしまうことである。したがって、いったん生じた磁性を消すためには、逆変態を起こす700℃以上に加熱する必要がある。この場合、せっかく上げた降伏点は、再び低下してしまう。磁石につかない透磁率の基準は1.02である。オー

ステナイトステンレス鋼は、1.00であるが、冷間加工(伸線、鍛造、圧造、切削)によって、マルテンサイト変態するために、透磁率が上昇する。50%以上の減面を材料に加えられることは、部品製造工程において日常的に生じることであり、非磁性にするためには、成分添加だけでは解決できないのである。

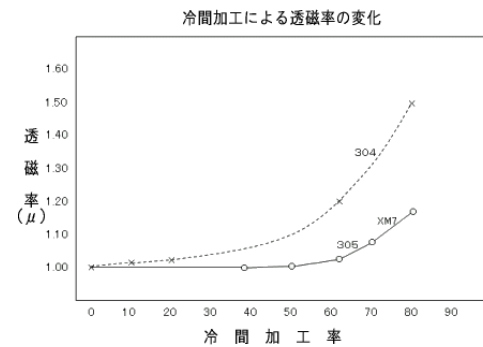


図1 オーステナイトステンレスにおける冷間加工率と透磁率の関係

2. 研究の目的

高性能モーターを実現するため、シャフト材に用いられる非磁性・高降伏点ステンレス線材開発の基礎研究を行う。降伏点を上げる最も単純な方法は結晶粒の微細化である。微細化は温間温度域の強加工によって行われるが、温間温度域では、加工誘起マルテンサイト変態は著しく抑制される可能性がある。結晶粒微細化過程で、加工誘起変態を抑制できれば、高降伏化と非磁性維持を達成できる。過去我々は、炭素鋼(フェライト鋼)線材の温間圧延による結晶粒微細化と高強度化を達成してきた。その技術を、オーステナイトに適用し、非磁性・高降伏点のオーステナイトステンレス線材にいて起用する。基礎検討にもとづき、温間連続多方向圧延での組織微細化技術を検討し、超微細組織をもった線材を製造する。

オーステナイトであるにも関わらず、降伏点が1GPaを突破し、なおかつ、非磁性である線材の作製を試みた。このようにして得られた非磁性・高強度線材を、メーカーの協力のもと、非磁性・高強度シャフト製造の基礎を完成することを目的とした。

3. 研究の方法

SUS304鋼、SUSXM7鋼の常温～温間温度域で、引張試験を行うことで、変形時の加工誘起変態発生温度、ひずみを把握した。同時に、加工誘起変態の生じない温度を明らかにする。次に、温間加工時に生成する微細オーステナイト粒の粒径と加工条件の関係を定式化する。これらの基礎検討にもとづき、温間連続多方向圧延での組織微細化技術を検討し、超微細組織をもった線材を製造する。オーステナイトであるにも関わらず、降伏点が1GPaを突破し、なおかつ、非磁

性である線材の作製を試みたものである。加工誘起変態を抑制しつつ、非磁性・高強度シャフト製造の基礎を完成する。

4. 研究成果

市販の SUS304 線材 (6mm) を素材とし、はじめに、室温から 500 の範囲で引張り試験を行い、基本的特性を把握した。

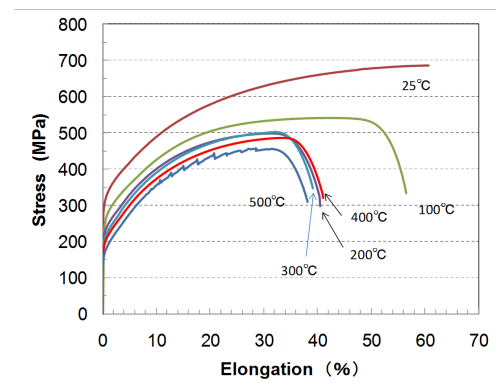


図2 SUS304 鋼の応力ひずみ曲線の温度依存性

図2に示すように、引張強さ、伸びは、室温がもっとも大きく、温度の上昇とともに強度、伸びともに低下する。特に室温から 100 引張変化が大きい。この強度・伸びの低下は加工誘起マルテンサイト変態と密接に関連していると考えられ、200 以上では、変形中に加工誘起変態は生じなくなるとされる。したがって、200 以上で加工を行えば、マルテンサイトは生じないと考えてよい。

結晶粒の微細化は、温間温度域での強加工であるが、強加工条件下でもマルテンサイトが生ぜず、オーステナイト粒が微細化することを実験的に確かめた。強加工に用いたのは、オーバル孔型、スクエア孔型を用いたコンパクト溝ロール圧延機である。



図3 多方向圧延によって製造されたオーステナイト線材

図3に、多方向圧延によって製造されたオーステナイト線材の概観を示す。直径6mmの線材をスタート材とし、素材径6mmから3mmまで、オーバル・スクエア孔型で、1工程ごとに線材を巻き取り、再び再加熱して圧延を行う工程を3回繰り返した。3工程での総減面率は75%である。線材の加熱温度は表面温度で室温から500とした。

EBS D解析が明らかにしたところによれば、200 以上では、多方向圧延のような強加工を材料に加えても、マルテンサイト変態が生じないことが明らかとなった。また、図4に示すように、圧延温度400 以上では、伸張粒と等軸粒の混じった微細組織となった。

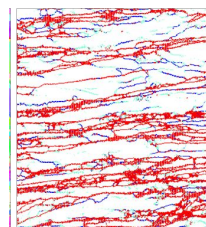


図4 温間多方向圧延材の組織

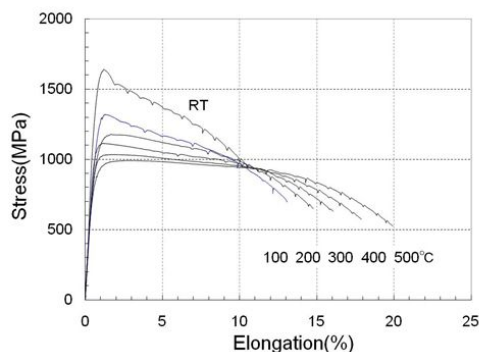


図5 温間多方向圧延で得られた材料の応力 - ひずみ曲線

図5に温間多方向圧延で製造された直径3mm材の引張試験結果を示す。すべての圧延条件の材料で降伏点(0.2%耐力)900MPa以上が得られている。温間加工が降伏点上昇に効果的であることが明らかである。どの応力 - ひずみ曲線も加工硬化は見られない。RT、100 圧延では、圧延中にマルテンサイト変態が生じ、高強度化しているが、200 以上の圧延では、よく似た応力ひずみ曲線となっている。

これらの材料が、非磁性であるかを確認するために、SQUID(超伝導量子干渉計)を用いて、最大5テスラまでの磁場をかけ、B-Hの測定を行い、透磁率を求めた。

SQUIDの測定結果から得られた透磁率であるが、室温で溝ロール圧延を行った材料の透磁率は5を超えており、強い磁性を有していたのに対し、500 で圧延を行った材料の透磁率は1.015であり、ほぼ非磁性といえた。また、結晶組織も極めて微細であった。以上のことより、温間強加工によって、非磁性・高降伏点 SUS304 オーステナイト線材開発ができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

1. S. Torizuka and E. Miramatsu : High strength microscrew with ultrafine grained structure, Materials Science Forum, 783-786(2014), 2695-2700. (査読有)
2. T.Komatsu, H. Kobayashi, S. Torizuka and S. Nagayama : Micro hole piercing for ultrafine grained steel, Materials Science Forum, 783-786(2014), 2653-2658. (査読有)
3. H. Qiu, L. Wang, T. Hanamura, S. Torizuka : Physical Interpretation of Grain Refinement-induced Variation in Fracture Mode in Ferritic Steel, ISIJ International, 53, (2013), 382-384. (査読有)
4. T.Komatsu, H.Kobayashi, S. Torizuka and S. nagayama : "Micro hole piercing for ultra fine grained steel", International Journal of Automation Technology, 6, (2012), 802-808. (査読有)
5. 村山成仁, 鳥塚史郎, 花村年裕, 今輩倍正名 : 破断までの真応力 - 真ひずみ曲線取得のための画像計測引張試験法, 鉄と鋼, 98, (2012), 415-424. (査読有)

〔学会発表〕(計10件)

1. 2013/03/27-29: 鳥塚史郎, 村松榮次郎, 鈴木由幸, 森川勉 : "超微細粒マイクロねじの実用化とその特性" 日本鉄鋼協会第165回春季講演大会
2. 2013/03/27-29: 榎田翔平, 野田和彦, 鳥塚史郎, 花村年裕 : "画像計測引張試験法による超微細粒鋼の真破断応力-真破断ひずみの評価" 日本鉄鋼協会第165回春季講演大会
3. 2012/11/04-07 : 鳥塚史郎, 村松榮次郎, 鈴木由幸, 森川勉 : "超微細粒組織を持つマイクロねじの特性" 日本塑性加工学会 第63回塑性加工連合講演会
4. 2012/09/9-12 : 鳥塚史郎 : "鉄鋼材料最前線 - 超微細粒鋼の基礎と応用 - " 日本機械学会2012年度年次大会 M&P 最前線
5. 2012/08/09-10 : 鳥塚史郎 : "超微細粒組織をもつ長尺線材の製造とその成形性" 金属第52回鉄鋼第55回中国四国支部講演大会湯川記念講演
6. 2012/06/07-09 : 鳥塚史郎, 村松榮次郎, 小松隆史, 小林仁, 永山真一 : "超微細粒鋼のせん断特性における加工硬化能の効果" 平成24年度塑性加工春季講演会
7. 2012/03/28-30 : 鳥塚史郎, 村松榮次郎, 松下明行 : "温間加工を利用したSUS 304鋼の非磁性・高降伏点化" 日本鉄鋼

協会第163回春季講演大会

8. 2012/03/28-30 : 榎田翔平, 野田和彦, 鳥塚史郎, 花村年裕 : "In-situ引張試験片形状変化測定による超微細粒鋼の真応力-真ひずみ解析" 第163回春季講演大会
9. 2012/03/28-30 : 鳥塚史郎, 花村年裕, 村山成仁, 今輩倍正名 : "CCDカメラを用いた引張試験片形状変化のin-situ計測による破断までの真応力-真ひずみ曲線の取得法開発" 日本鉄鋼協会第163回春季講演大会
10. 2011/09/20-22 : 鳥塚史郎, 村松榮次郎, 松下明行 : "温間加工を利用したSUS 304鋼の非磁性・高降伏点化" 日本鉄鋼協会平成23年度第162回秋季講演大会

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況(計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者 独立行政法人物質・材料研究機構・材料創製・加工ステーション・ステーション長
鳥塚 史郎 (Shiro Torizuka)
研究者番号 : 60354271