

論文の内容の要旨

論文題目 急速温間オースフォームによる低合金中炭素鋼マルテンサイトの
転位強化・形態強化手法の構築

氏 名 仁保 隆嘉

本論文は、低合金中炭素鋼(Fe-0.56C-0.20Si-0.71Mn (mass%) 合金) のマルテンサイト組織の硬度を増加させる方法として、急速温間オースフォームとよばれる加工熱処理プロセスを提案し、①実プロセスとして成立する条件が存在すること、②マルテンサイトの強化機構が転位強化、およびマルテンサイトの微細化に伴う形態強化であることを、組織学・結晶学的な観点で調査・議論した内容をまとめたものであり、全6章から構成される。

第1章では、本研究の背景と目的を示している。鉄鋼材料のマルテンサイト組織は、高い硬度を有していることから、動力伝達部品の表層部に形成させて、部品の耐摩耗性を高めることなどに用いられてきた。近年、省エネルギー化や省資源化の要求が高まっており、転じて、マルテンサイトの硬度を増加させる必要性が高まっている。機械部品用素材として広く普及している低合金中炭素鋼は、素材の価格や加工性を含めて考慮すると、マルテンサイトの硬度が最高の部類の鋼であり、素材変更以外の方法で硬度の増加を目指す必要があった。本研究では、熱間から温間に冷却する過程で、準安定オーステナイト状態の素材を塑性加工して焼入れする、オースフォームと呼ばれる加工熱処理手法を対象の素材に適用することを考えた。その際、先行研究からは自明でない点が存在したため、研究課題として解明に取り組んだ。

1つ目は、バタフライマルテンサイトの硬度である。低合金中炭素鋼のマルテンサイトは、ブロックが緻密なマルテンサイトとブロックが粗大なバタフライマルテンサイトの混合組織となる。ブロックが緻密であるほど組織の硬度が大きくなるため、粗大なバタフライマルテンサイトを生成させないことが硬度の増加につながると考えられるものの、そもそも当該のマルテンサイトが低硬度であることを確認した研究は存在しない。2つ目は、オースフォームのプロセス条件である。対象の素材では準安定オーステナイトが数秒程度しか存在しないため、従来のオースフォームよりも熱間から温間までの冷却速度を早め、温間での加工時間を短縮した、“急速温間オースフォーム”を行う必要がある。原理的には可能であり、実プロセスとしても実現可能であることを確認する必要がある。また、プロセスを短時間化するために、金型で被加工物を拘束したまま焼入れすることも想定される。この場合、焼入れ時に被加工物に圧縮応力がかかることになるが、硬度に対する影響がないことを確認する必要がある。3つ目は、マルテンサイトの強化機構である。オースフォームでは、塑性加工でオーステナイトに導入された転位がマルテンサイトに引き継がれて、マルテンサイトが転位強化されることが知られている。加えて、低合金中炭素鋼の場合は形態強化も期待される。オースフォームによってラスマルテンサイトが微細化した例がある。粗大なバタフライマルテンサイトが同様に微細化するならば、緻密なブロックと粗大なブロックの混合組織が一様に緻密な組織になる、という組織形態の変化を伴いながら、マルテンサイトの硬度が増加するはずである。このような変化が実際に起こることを確認する必要がある。なお、微細化に伴う強化の場合、粒界強化という語が一般的に用いられている。本研究では、マルテンサイトの組織形態が変化することを考慮して、形態強化という語を用いることにした。

第2章では、第4章で調査する急速温間オースフォームのプロセス条件、およびマルテンサイトの強化機構に関して、1章で説明した仮説を補足している。

プロセス条件に関する1つ目の仮説は、所要時間に関するものである。フルマルテンサイト組織を作るには、オースフォームを行う間、素材の組織を準安定オーステナイトに保っておく必要がある。このためには、CCT・TTT線図のノーズにかからないように熱間から温間まで冷却し、温間のベイ内部で塑性加工を完了させればよいことを説明した。プロセス条件に関する2つ目の仮説は、焼入れ時の被加工物の拘束方法に関するものである。金型での拘束による圧縮応力で、特定のマルテンサイトバリエーションの割合が高まる可能性はあるものの、硬度に実質的な影響はなく、拘束方法に関する制約はないことを説明した。

強化機構に関する1つ目の仮説は、組織が転位強化されることである。塑性加工に伴ってオーステナイトに転位が導入されるのは明らかであり、加工後直ちに焼入れを行えば、転位はほとんど消失することなくマルテンサイトに引き継がれることを説明した。強化機構に関する仮説の2つ目は、組織が形態強化されることである。塑性加工された

準安定オーステナイトでは、転位セルなどの形成に伴う機械的安定化と、転位壁やマイクロバンドなどの形成に伴うマルテンサイト生成サイトの増加が起こる。結果、無加工の場合よりも低温域で、オーステナイトのいたるところでマルテンサイトが同時に生成するようになり、マルテンサイトが互いに干渉し、粗大なバタフライマルテンサイトが生成しなくなると予想される。緻密なブロックと粗大なブロックの混合組織だったマルテンサイト組織が、一様に緻密な組織に形態変化して強化されることを説明した。

第3章では、粗大なバタフライマルテンサイトの領域は、粒界強化の効果が相対的に小さいことで、緻密なマルテンサイトの領域よりもナノ硬度で1.6 GPa程度、硬度が低いことを明らかにした。なお、組織の硬度に影響を与える因子は粒界強化以外にも存在する。本研究では素材の成分系を考慮したうえで、ナノインデンテーション法による硬度測定、軟X線発光分光法による炭素濃度分布、TEMによる転位密度測定を行い、先述の1.6 GPa程度の硬度差のうち、転位強化に起因する硬度差が最大0.5 GPaあることも確認した。

第3章ではもう1つ、バタフライマルテンサイト内部での双晶の積層方向について、それを特定する手法の提案と調査を行っている。提案手法では、バタフライマルテンサイトの羽角が、それぞれの羽の双晶面あるいは晶癖面同士のなす角であることに注目し、観察面上での羽角、2つの羽のバリエーションおよび観察方向の情報から、双晶の積層方向を特定する。この方法は、EBSD法の測定結果を用いることができ、試料の傾斜角を観察対象ごとに適正化するTEM観察よりも大量調査に向いている。調査の結果、双晶は羽の幅方向にも長手方向にも積層しうるものの、多くのバタフライマルテンサイトでは、片方の羽では幅方向、もう一方の羽では長手方向に積層していることを明らかにした。この知見は、4章にてラスマルテンサイトとバタフライマルテンサイトを識別する際に活用した。

第4章では、平金型を用いた1軸圧縮試験と、試験に則した有限要素法解析を通して、急速温間オースフォームのプロセス条件、およびマルテンサイトの強化機構を調査している。プロセス条件のうち時間的制約については、熱間からTTT線図のベイまで110 K/S以上で冷却を行い、ひずみ速度 10 s^{-1} 以上で加工してただちに焼入れを行えば、フルマルテンサイト組織を形成できることを明らかにした。焼入れ時に被加工物に発生する圧縮応力に関しては、マルテンサイトの硬度に影響を与えないことを明らかにした。ただし、圧縮応力によって、相変態に伴う結晶構造の変化が圧縮応力の補助を受けやすいバリエーションの割合が高まることが分かった。

マルテンサイトの強化機構に関して、転位強化の効果が存在することは、局所方位差の測定によって、オースフォームされたマルテンサイトの転位密度の増加が認められることから判断した。形態強化の効果が存在することは、塑性ひずみが大きくなるほど粗

大なマルテンサイトブロックが形成しなくなること、および平均のブロック幅が減少することから判断した。また、焼入れ中の試験片の温度低下の仕方から、塑性加工された試験片では特定の温度域でマルテンサイトが多く生成していることが予想され、仮説で説明したメカニズムによってマルテンサイトが微細化していると結論づけた。

本研究では、オーステナイトに0～0.58程度の相当塑性ひずみを与えた。転位密度は、ひずみが0.35程度を境に増加が飽和した。一方、組織はひずみが増加するほど微細化し、ひずみが0.58程度になると、粗大なバタフライマルテンサイトは生成しなくなった。硬度については、相当塑性ひずみを0.58与えることで、マルテンサイトの硬度を無加工の場合の740 HV程度から800 HV程度に増加させることができた。

第5章では、実際の鍛造金型を模した、先端部の幅が4 mm・底部の幅が8 mm・高さが4mmの凸金型を試験片に押し込む試験と、試験に則した有限要素法解析を通して、急速温間オースフォームの効果が金型の形状によらないことを確認した。具体的には、凹状に変形した面に沿って組織および硬度を調査し、塑性ひずみが増加していった場合の、マルテンサイトの微細化の程度と硬度増加の程度が、平金型と凸金型で同様であることを確認した。

6章は総括であり、本研究で得られた結果を要約している。