

## 審査の結果の要旨

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%)) のマルテンサイト結晶組織の硬度増加を実現するために、熱間の状態から急速に冷却し、温間の状態で塑性加工と焼入処理を行う「急速温間オースフォーム」を適用した。具体的には、(1) 低合金中炭素鋼のマルテンサイトに生じるラス型とバタフライ型の 2 種類を結晶学的に分析し、(2) 低合金中炭素鋼に適する急速温間オースフォームの最適加工条件を求めて硬度増加を実証し、(3) 硬度増加の原因として、組織内の転位密度が増える「転位強化」と、組織が形態の変化を伴いながら微細化して粒界が増える「形態強化」の 2 つのメカニズムを提案した。次に結論を詳説する。

(1) 一般に、焼入れ後の低合金中炭素鋼のマルテンサイト組織には、基地になるブロック (結晶粒よりも小さい、結晶学的構造が同じ塊) の幅が 1  $\mu\text{m}$  以下の緻密なラス型 (転位起源) と、散在する幅数  $\mu\text{m}$  と粗大なバタフライ型 (転位と双晶起源) の 2 種類が観察されるが、従来の研究では、バタフライ型はラス型よりもブロックが粗大である、というような限定的な知見しか得られていなかった。そこで両マルテンサイトについて、ナノインデンタで機械的に結晶内の硬度を測定し、また TEM や EBSD で結晶学的に結晶方位を求めた。その結果、粗大なバタフライ型は平均で 8.7 GPa と、緻密なラス型の 10.3 GPa に比べて、硬度が小さく柔らかいことがわかった。また、バタフライ型の双晶は、両翼の形のブロックにおいて、翼の幅方向と長手方向の両方向に積層するが、硬度は同じであることがわかった。この結果から、粗大なマルテンサイトを含まない一様に緻密な組織を作ること为目标にプロセスを設計した。

(2) 低合金中炭素鋼にいわゆるオースフォーム (オーステナイト結晶組織の状態での塑性加工と焼入処理を行うこと) を適用すると、予備実験の結果から、プロセスが数秒以上と長くなると、オーステナイトがマルテンサイトではなく、低硬度のパライトやベイナイトに変態すること、または、1000°C 付近の熱間

で塑性加工してから冷却を始めると、約 300°C でマルテンサイトに変態するまでに結晶欠陥が熱分解されて、高硬度のマルテンサイトが得られないことがわかった。そこで、熱間状態で結晶を均一にオーステナイトに変態させたのち、素材を急速に冷却し、パーライト・ノーズ (TTT 線図上に鼻の形で示された、パーライト変態曲線の最短時間条件) に抵触させないまま、ノーズ下でマルテンサイト変態温度直上の約 400°C の温間状態を保ち、その後で直ちに急速にオースフォームした。すなわち、最適化された基本条件は、初期のオーステナイトの結晶粒径: 30  $\mu\text{m}$ 、熱間から温間への冷却速度: 110 K/s、塑性加工開始温度: 673K、塑性加工時のひずみ速度: 10  $\text{s}^{-1}$ 、加工開始から焼入れ完了までの時間: 0.1 s、である。その結果、相当塑性ひずみ 0.58 程度に強加工する急速温間オースフォームの場合、一般的な焼入れ後のマルテンサイトの硬度が約 740 HV であるのに対して、約 800 HV に増加することがわかった。また、素材のオーステナイト結晶を大きくすると、または熱間状態でオーステナイトに含まれる結晶欠陥の密度を低下させると、パーライト・ノーズが 2 秒程度、長時間側に移行し、上記の基本条件は徐冷へと緩和できることがわかった。また、金型内で拘束して焼入れすると圧縮応力下で変態することになるが、無応力に比べて硬度が変化しないことがわかった。

(3) 急速温間オースフォームで硬度増加したマルテンサイトでは、転位密度が 30% 程度増加した「転位強化」と、ブロックの平均幅が無加工の 0.5  $\mu\text{m}$  程度から 0.3  $\mu\text{m}$  程度へと微細化されて粒界が増加した「形態強化」とが観察された。前者のマルテンサイトの転位は、塑性加工で生じたオーステナイトの転位が引き継がれたものであり、局所的に塑性ひずみが大きくなった場所ほど、硬度は大きくなる。また、後者の微細化した組織は、塑性加工で生じる結晶欠陥が誘発したものであり、ラス型もバタフライ型もブロックの成長が阻止された。その結果、(1) で述べた緻密なラス型と粗大なバタフライ型の混合組織は、一様に緻密な組織へと、大きく組織形態的に変化した。オーステナイトからマルテンサイトへと形態を変えながら組織が強化されたので、本論文では「形態強化」という概念を提案した。

以上のように、申請者は膨大な実験と観察を実施し、完結した結論を導き、審査においても論理的に発表・議論できた。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。