

フェライト鋼における降伏点の発現機構に関する研究

荒木, 理

<https://hdl.handle.net/2324/2236179>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 荒木 理

論 文 名 : フェライト鋼における降伏点の発現機構に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

鉄鋼材料の中でも、BCC 構造を有するフェライト鋼においては、微量の炭素・窒素を添加することで不連続な降伏点現象を示すことが知られている。このような降伏点現象が発現する原因としては、Cottrell らが提唱したコットレル固着機構が最も一般的な発現機構として認知されている。これは転位の周囲にある応力場の存在により、固溶している炭素や窒素などの侵入型元素が転位周囲に偏析することで転位の運動が抑制され、転位が固着から外れる際に降伏点が現れるというものである。その他には Johnston と Gilman らが提唱した可動転位の運動を考慮した機構が代表的な考え方である。しかしながら、両理論ともに実際に発現する現象をすべて説明できる完全なものではない。コットレル理論では降伏点に及ぼす固溶炭素・窒素や結晶粒径の影響についてはよく説明できているが、IF 鋼での降伏点現象をうまく説明できない。一方、ジョンストン・ギルマン理論は上降伏点から下降伏点への降伏点降下現象をうまく説明しているが、降伏点の結晶粒径依存性を説明することができていない。さらに、上降伏点と下降伏点のそれぞれの発現機構の明確な区別がなされておらず、降伏点の発現機構について十分な理解が得られていない。本研究では、結晶粒界での応力集中の観点から上・下降伏点それぞれの発現機構について再検討し、炭素・窒素の粒界偏析、粒内転位固着、可動転位密度などの影響を総合的に評価して降伏点現象を見直し、降伏点に及ぼす炭素・窒素の影響と降伏点の発現機構について調査した。

第 1 章では、本研究の背景および目的について述べた。

第 2 章では、約 60 ppm 炭素・窒素を単独にそれぞれ添加したフェライト鋼(C60 および N60)を用いて、Hall-Petch 係数に及ぼす時効処理の影響を調査した。両鋼種ともに時効処理を施すことで下降伏点は上昇したが、炭素と窒素の影響は同等ではなく、常に C60 の方が高い下降伏点を示した。Hall-Petch の関係で整理すると両鋼種とも時効時間にともなって Hall-Petch 係数 (k_y)が上昇した。一方で、時効処理による上昇量は C60 と N60 は同程度であった。3 次元アトムプローブを用いて粒界偏析量を測定すると、窒素よりも炭素の方が多量に粒界偏析し、時効処理に伴う粒界偏析量の増加と k_y の上昇傾向が対応していることが明らかとなった。したがって、下降伏点は結晶粒微細化強化に起因した強度であり、同一の時効処理条件で C60 の k_y が N60 よりも大きな値を示すのは、炭素の粒界偏析傾向が窒素よりも大きく、いずれの時効処理時間においても炭素が窒素よりも高い偏析量を維持していたためであると結論できる。

第 3 章では、約 50 ppm 炭素を添加したフェライト鋼(C50)と IF 鋼を用いて、粒界直上でナノインデンテーション試験を行うことで粒界強度（臨界粒界強度）を測定し、炭素の粒界偏析と粒界強度の関係について検討した。ナノインデンテーション試験での pop-in 現象に着目すると、両鋼ともに粒内よりも粒界直上での pop-in 荷重の方が低く、粒界の方が転位放出しやすい。粒界での pop-in 荷重から降伏に必要な臨界粒界せん断応力 τ_{indent}^* を求めると、IF 鋼では時効処理を施しても変化しな

いが、C50 では τ^*_{indent} が徐々に上昇した。これは炭素の粒界偏析量が増加することで粒界を安定化させたためである。さらに、測定した k_y から $\tau^*_{tensile}$ を算出し、 τ^*_{indent} と $\tau^*_{tensile}$ を比較すると、どちらも時効処理に伴い上昇しており下降伏点の上昇と対応していた。時効処理により k_y が上昇するのは炭素の粒界偏析によって臨界粒界せん断応力が上昇するためである。すなわち、下降伏点は結晶粒界からの転位放出に起因して発現し、臨界粒界強度の大きさに依存する。

第4章では、C60、C50、N60 および IF 鋼を用いて、上降伏点の発現機構について検討した。C60、N60 両鋼種とも 443 K で時効処理を施すことにより顕著な降伏点降下が生じ、明瞭な上降伏点が発現した。下降伏点に対して、上降伏点の上昇量は著しく大きく、下降伏点と同様に Hall-Petch の関係が成立した。また、固溶炭素・窒素を極限まで低減させた IF 鋼では、焼鈍後に水冷すると上降伏点は現れないが、空冷することで明瞭な上降伏点が発現し、C60 と同様に結晶粒径依存性を示した。リラクゼーション試験により可動転位密度を測定すると、上降伏点の発現と可動転位密度の低下が対応していた。以上の実験事実から上降伏点の発現機構について次のように考察した。可動転位密度が高い場合は、外部応力の負荷によって十分な数の転位が粒界にパイルアップすることができるため、粒界に働くせん断応力が容易に臨界せん断応力に達し、低応力で降伏に至る。ところが、可動転位密度が低い場合は粒界にせん断応力を与えるためのパイルアップ転位数が少ないため応力集中の程度が小さくなるが、より高い応力負荷（結晶粒の弾性異方性による応力集中）が付加されることで臨界せん断応力に達すると考えれば現象をうまく説明できる。上降伏点に達した後は、粒界からの急激な転位の増殖により局所的な塑性変形が生じ、転位が伝播する際に粒界が障壁となるため下降伏点が現れる。すなわち、上降伏点、下降伏点どちらも粒界からの転位放出に起因した現象であり、粒界への応力集中機構の相違によって降伏点現象が変化する。

最後に、第5章で各章の研究成果を総括した。