

博士論文

残留オーステナイト相を含む低合金鋼の
低温変形における加工誘起マルテンサイト変態

Deformation Induced Martensitic Transformation
in Low Alloy Steels Containing Retained Austenite
under Low Temperature Deformation

横浜国立大学大学院

工学府

山下享介

Takayuki Yamashita

2018年3月

論文要旨

残留オーステナイトの変態誘起塑性(Transformation induced plasticity: TRIP)による伸び改善効果を利用した低合金 TRIP 鋼が自動車用構造部品鋼材として実用に至っている。この TRIP 効果は、残留オーステナイトが軟質な母相フェライトの変形を緩和するように加工誘起マルテンサイト変態を生じることで発現し、残留オーステナイトの相安定性がその制御に重要となる。残留オーステナイトの相安定性に影響を及ぼす因子として、残留オーステナイトの体積率、炭素濃度、存在形態、形状、試験温度、ひずみ速度および組織間の変形能差に起因する内部応力などがあり、様々な研究がなされてきた。しかしながら、これらの研究は室温や温間加工を目的とした温度域で行われており、母相フェライトが脆化かつ高強度化するとともに残留オーステナイトの相安定性が低下し、各相の変形能差も変化すると考えられる低温域での研究例はほとんど見当たらない。そこで本研究では、低温域における相間の相対強度差の変化と残留オーステナイトの役割に着目する。そして残留オーステナイトの相安定性に及ぼす因子について調査することで、低温域における低合金 TRIP 鋼の変形挙動と残留オーステナイトの加工誘起マルテンサイト変態挙動について検討する。

供試鋼は残留オーステナイト量の異なる板厚 2.5 mm の低合金 TRIP 鋼:Low- γ 材(0.15%C-1.7%Si-1.5%Mn)および High- γ 材(0.3%C-1.7%Si-1.5%Mn)である。冷間圧延後、フェライト+オーステナイト二相域の 790 °C で 300 s 保持し、その後オーステンパ処理(400 °C-600 s)を施した。得られた組織はフェライト母相と残留オーステナイトおよびベイナイトを含む第二相の複合組織鋼であった。残留オーステナイトはフェライトの粒内および粒界上に分散しており、残留オーステナイトは母相フェライトと Kurdjumov-Sachs(K-S)関係を有していた。X 線回折により得られた残留オーステナイト量は、それぞれ体積分率が 9.4%と 17.2%である。なお 2 鋼種の残留オーステナイト中の固溶 C 量はほぼ等しく(約 1.3%)、炭素濃度の違いによる安定性への影響は極力排除してある。引張試験を室温(293 K)、冷却アルコール中(233 K, 193 K)、液体窒素中(77 K)で実施した。また変形途中の変態挙動を調査するため、1%から 11%までの任意の塑性ひずみを付与する中断試験(293 K, 233 K, 193 K, 77 K)および同領域の変態挙動を見るために変形前から 4%ずつ 12%まで塑性ひずみを付与する中断試験(293 K, 193 K)をそれぞれ実施した。各試料に対し、FE-SEM-EBSD 法による結晶方位解析を行い、引張・中断試験前後における残留オーステナイト量および結晶方位の変化を調査した。また同視野の組織観察から SEM 組織を取得し、デジタル画像相関法を用いてひずみ分布状態を調査した。

両鋼ともに 193 K から 293 K において高延性を示し、温度の低下に伴い引張強度も上昇した。77 K では降伏応力および引張強度ともに上昇したが、伸びは減少し、早期破断を呈した。High- γ 材において降伏応力は逆温度依存性を示した。これは温度の低下による加工誘起マルテンサイト変態の促進によるものと考えられる。EBSD 測定より得られた初期残留オーステナイト量は Low- γ 材および High- γ 材で 10.3 %および 16.9 %であり、XRD より得ら

れた値とほぼ同等であることから局所領域における値であるが妥当な値が得られた。High- γ 材について加工硬化挙動と残留オーステナイト量の変化には相関性が見られた。293 Kでは、残留オーステナイトは変形後期に加工硬化率を維持すると考えられる。一方、低温域では、残留オーステナイトの加工誘起変態が変形初期の高い加工硬化率に寄与していると考えられるが、伸び改善効果としての寄与は小さいと示唆される。

EBSD法による結晶方位解析から、293 Kでは変形後でも一部の残留オーステナイトが残存しており、変形に対し安定な残留オーステナイトの存在が示唆される。多くの残留オーステナイトが引張軸に対し $\langle 111 \rangle$ が平行な方位を有していた。193 Kおよび233 Kにおいても同様の傾向が見られた。これは引張軸に対し $\langle 111 \rangle$ が平行なオーステナイトのSchmid因子が小さく、変形に対し安定であるためと考えられる。また変形後でも母相フェライトと残留オーステナイトはK-S関係を保持しており、多くの母相フェライトは引張軸に対し $\langle 110 \rangle$ へと結晶回転していたことから、母相フェライトと残留オーステナイトは協調的に変形し、オーステナイトはK-S関係を維持しながら $\langle 111 \rangle$ へと結晶回転を生じたと考えられる。

DIC解析によるひずみ分布の解析より、193 Kの4%引張変形により形成するひずみ分布は他の条件と比較して均一にひずみが分布していた。193 Kにおいて4%引張変形までに10%以上の残留オーステナイトが加工誘起マルテンサイトに変態することを考慮すると、マルテンサイト変態に伴う体積膨張がひずみ分布の均一化に寄与したと考えられる。また引張ひずみを階級分けし、各階級のひずみの領域の残留オーステナイト量を調査した結果、4%引張ひずみ以下の領域の残留オーステナイトの割合が変形に伴い増加したことから、残留オーステナイトは高ひずみ領域において優先的にマルテンサイト変態を生じており、ひずみ分布状態が加工誘起マルテンサイト変態挙動に影響することが示唆された。

個々の残留オーステナイトの変態挙動を調査した結果、二次電子像では、フェライト粒内のオーステナイトがマルテンサイトへと加工誘起変態した領域が認められたが、同視野の結晶方位マップではその存在が確認できず、マルテンサイトが周りの母相フェライトとほぼ同じ方位へと変態していた。このようなマルテンサイトのバリエーション規制について調査した結果、一般的なバリエーション規制は受けていなかった。そのため、母相フェライトと同一方位を選択することで、結晶粒界を新たに生み出す必要がなく、エネルギー的に安定なバリエーションが優先されたと考えられる。この現象はある特定の部分や試験温度のみで生じているわけではなく、複数のフェライト粒内および各試験温度において確認された。