

Cu 添加高強度薄鋼板

Copper Added High Strength Steel Sheets

岸 田 宏 司^{*(1)}
Koji KISHIDA

抄 録

金属組織をフェライト単相組織とし、かつ温度制御による Cu の相分解を活用することにより、加工性と高強度を両立させた新たな熱延鋼板と冷延鋼板が開発された。これらの鋼板は極低炭素鋼に 1 mass% を超える Cu が添加されており、熱延鋼板では SAPH440 と同等以上の加工性をもち、加工後の短時間熱処理で強度が約 200N/mm² 上昇する特徴を有する。冷延鋼板では r 値が 1.90 と極めて高い 590N/mm² 級鋼板となる。熱処理条件を変えることにより強度を大幅に変化させた本鋼板中の Cu 析出相を、高分解能分析電子顕微鏡とアトムプローブ電界イオン顕微鏡で観察した。最高強度を示すとき、鋼中には大きさが約 3 nm のほぼ純 Cu の組成をもつ析出物が観察される。

Abstract

A hot-rolled steel sheet and a cold-rolled steel sheet have been newly developed which have both workability and high strength consisting together, by making the metallographic structure a ferrite single phase and in addition by practically applying copper phase decomposition by means of temperature control. These sheets constitute characteristic features of having copper added more than 1 mass % in extra-low-carbon base steel, of hot-rolled steel sheet having workability equal to or higher than that of SAPH440 and its strength after working and short-time heat treatment being increased by about 200N/mm², and of cold-rolled steel sheet having an extremely high r -value, 1.90, which is of 590N/mm² class steel sheet. The strength of the steel can be changed widely by varying heat treatment condition. In our study, observation of copper precipitation phase in the sheet was carried out by using the high resolution analytical electron microscope and the atom-probe field ion microscope. When the steel indicated the maximum strength, the precipitation of almost pure copper with 3nm in size was observed in its metallographic structure.

1. 結 言

鋼中の Cu は析出硬化を起こすことが知られており、これを利用した高強度鋼板はステンレス鋼や厚板で実用化されている。しかし厳しい冷間加工性を要求される薄鋼板については、Cu の析出硬化は加工性不足のためにほとんど利用されていなかった。この欠点を解決すべく炭素量を減らし、金属組織をフェライト単相組織とすると同時に、温度制御による Cu の時効析出を活用することにより、加工性と高強度を両立させた新たな熱間圧延(以降、熱延と略記する)鋼板と冷間圧延(以降、冷延と略記する)鋼板が開発された。本報では、これらの鋼板の強度と深絞り加工性の指標である r 値、及び強度の大幅な変化を引き起こす Cu 粒子の時効析出の観察結果を報告する。

2. 熱処理強化型熱延鋼板

薄鋼板の一つの理想は加工時は軟質で加工性が良好で、加工が終了した後にその加工品の強度が高くなる鋼板である。このような考え方に立ち、短時間の熱処理により降伏点のみならず引張強度が上昇する鋼板の開発を Cu 添加による方法で検討した。

2.1 Cu 添加熱延鋼板の加工性の確保

極低炭素鋼及び Ti 添加極低炭素鋼に Cu を 0~1.4mass% (以降、%と略記する) 添加した鋼を真空溶製し、熱延後室温まで空冷した鋼板の引張試験値を図 1 に示す。Cu 量の増加とともに引張強度は

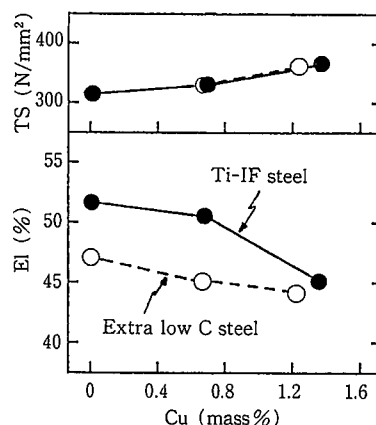


図 1 極低炭素熱延鋼板の機械的性質に及ぼす Cu 添加量の影響

^{*(1)} 広畑製鐵所 生産技術部 部長代理 工博

ほぼ直線的に上昇するが、その上昇量 ΔTS は1%Cu 当たり40~50 N/mm²と小さい。強度の増加に伴い伸びは低下するが、1.4%までCuを添加した鋼板でも40%以上の伸びがあり十分な加工性が得られている。Tiの添加により伸びが向上するのはInterstitial Free 鋼（以降、IF鋼と略記する）となるためである。

図2にCu量を1.3%一定とし、C量を変えた熱延板の硬さに及ぼす熱延巻取相当温度の影響を示す。1 053K及び823K巻取相当材は、熱延後の冷却過程において各々の温度に1h保持後室温まで炉冷した。室温巻取相当材は熱延後室温まで空冷した。図中の○は熱延ままの硬さを示し、●は熱延板に873Kで600s保持後空冷の熱処理を行った鋼板の硬さを示す。巻取温度により熱延ままの硬さ及び熱処理による硬さ上昇量が大きく変化し、室温巻取材が最も軟質で且つ熱処理による硬さ上昇量が大きい。又、C量が高くなると熱延板の硬さが高くなるとともに、熱処理による硬さの上昇量が低下する傾向が認められる。

2.2 強度に及ぼす熱処理条件の影響

Cu添加極低炭素熱延鋼板の熱処理による強度上昇量は、Cu量と熱処理条件によって変化する。図3は1.6%Cu添加鋼の引張強度に及ぼす熱処理温度と熱処理時間の影響を示した図である。供試材は熱延後573K以下の温度で巻き取った熱延鋼板であり、その引張試験

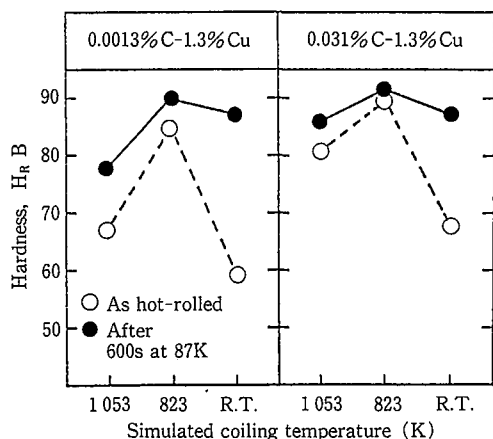


図2 1.3%Cu添加熱延鋼板の硬さに及ぼす炭素量と巻取温度の影響

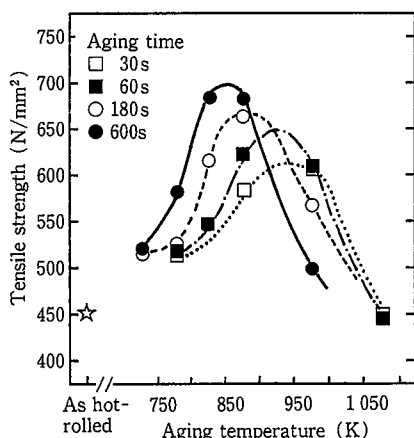


図3 1.6%Cu添加熱延鋼板の引張強度に及ぼす時効温度と時効時間の影響

値を表1に示す。強度が極大となる熱処理温度が存在し、その温度は熱処理時間によって変化する。熱処理時間が長いほど低温側に移行し、且つ強度の極大値が高くなる傾向が認められる。823Kで600sの保持による ΔTS は230N/mm²と極めて大きい。この強度の変化はCuの時効析出によるものであり、その観察結果については後述する。

3. 高 $\bar{r}$ 値を有する590N/mm²級冷延鋼板

深絞り性の優れた高強度冷延鋼板を製造する方法として報告されているものの多くは、鋼板の強度が390N/mm²級以下であり、440N/mm²級以上の鋼板に深絞り性を付与する方法についてはほとんど報告されていない。そこでCuを利用して、生産性の高い連続焼鈍でこの鋼板を生産する方法の検討が行われた。検討すべき課題は、急速加熱焼鈍時の再結晶集合組織と鋼板強度に及ぼすCuの影響を明らかにすることである。

3.1 再結晶集合組織に及ぼすCuの影響

連続焼鈍したTi-IF鋼板の $\bar{r}$ 値に及ぼすCu添加の影響を図4に示す。Cu添加による $\bar{r}$ 値の変化の程度は熱延時の巻取温度によって異なり、1 053K巻取材と823K巻取材ではCu添加量が1%を越えると $\bar{r}$ 値が顕著に低下する。これに対して室温巻取材ではCu添加による $\bar{r}$ 値の変化は比較的小さく、Cu添加量が1%を超えても $\bar{r}$ 値の低下はわずかである。

Cu添加量が1%を超える鋼板の $\bar{r}$ 値が巻取温度によって変化する原因は、熱延板中のCuの存在状態が変化するためである。すなわち室温巻取材ではCuがフェライト中に過飽和に固溶しているのに対して、1 053K巻取材及び823K巻取材では、後述するように熱延板中に微細な析出物が存在している。これらの析出物がすべり系の選択に関与し、冷延時に圧延方向から60度傾いた<110>軸を中心にして{554}<225>近傍の方位が{211}<011>方位に向かって回転した小領域が発達する。その小領域は{111}圧延集合組織に比べて、蓄積エネルギーが高いという再結晶核となりうる条件を備えており、その核の方位をもった再結晶集合組織が発達した結果、 $\bar{r}$ 値が低くなると考えられる。したがって、 $\bar{r}$ 値を高くするためにはCuの析出が起らない低温で巻き取ることが肝要である。

表1 熱延鋼板の機械的性質

Steel	YP(N/mm ²)	TS(N/mm ²)	El(%)
Copper added	361	436	35.5
SAPH440	320	456	35.6

t=2.0mm

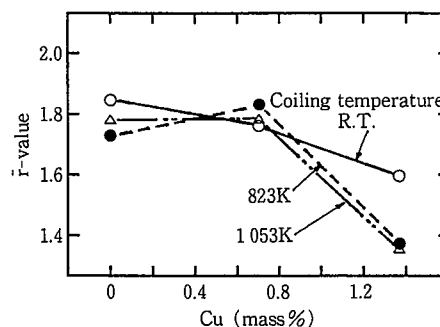


図4 連続焼鈍したTi-IF鋼板の $\bar{r}$ 値に及ぼすCu添加量と熱延巻取温度の影響

3.2 再結晶後の鋼板強度の上昇

再結晶焼鈍後に Cu 粒子を析出させて鋼板強度の上昇を図る。この析出処理は950K 以下の温度で行うために、集合組織の変化や $\bar{r}$ 値の変化は起こらない。析出処理条件の一例として、Ti-Nb-IF 鋼に 1.7%Cu を添加した鋼板の、引張強度に及ぼす析出処理温度と時間の影響を図5 に示す。この図に示すように、600s 以下の極短時間の処理でも大きな強度上昇が得られる。これらの強度データから、Cu 粒子の析出の活性化エネルギーを求めると204kJ/mol となる。この値はフェライト中の置換型固溶元素の拡散の活性化エネルギーよりかなり小さい。これは Cu 粒子の核生成がゾーン等の準安定相の形成によって起こり、核生成の活性化エネルギーが小さくなったのが原因と考えられる。この推定は IF 鋼中の Cu 粒子の相分解初期過程において析出するのは、FCC 平衡相の ϵ -Cu ではなく、BCC 構造をもった非平衡相であると解釈される中性子小角散乱実験の結果¹⁾とも

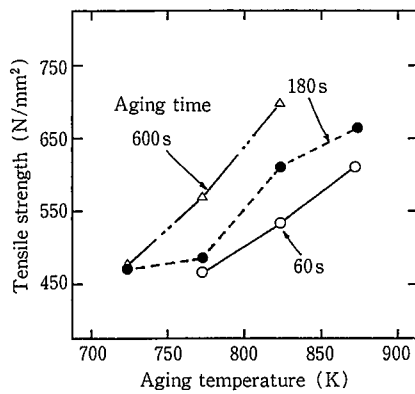


図5 連続焼鈍した1.7%Cu添加Ti-Nb-IF鋼板の引張強度に及ぼす時効温度と時効時間の影響

表2 供試冷延鋼板の化学組織 (mass %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	sol. Al	Ti	B	Cu	Ni
Copper added	0.0038	0.01	0.25	0.013	0.003	0.049	0.050	0.0005	1.26	0.44
Conv. 590N/mm ²	0.10	0.23	2.09	0.013	0.005	0.039	0.084	—	—	—
Conv. 370N/mm ²	0.0020	0.02	0.72	0.085	0.011	0.053	0.045	0.0009	—	—

表3 供試冷延鋼板の機械的性質

Steel	YP(N/mm ²)	TS(N/mm ²)	El(%)	$\bar{r}$ -value
Copper added	507	610	24.4	1.90
Conv. 590N/mm ²	429	610	23.9	1.10
Conv. 370N/mm ²	236	403	37.6	1.54

t=0.8mm

表4 供試冷延鋼板の限界絞り比

Steel	L.D.R.
Copper added	2.28
Conv. 590N/mm ²	2.05
Conv. 370N/mm ²	2.25

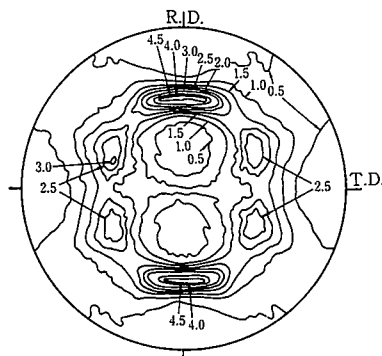


図6 開発鋼の{100}極点図

矛盾しない。

3.3 成形性

成形性を評価した実機製造材の化学組成を表2 に示し、引張試験値を表3 に示す。開発鋼の引張強度は610N/mm²と従来の590N/mm²級鋼板と同等であるにもかかわらず、 $\bar{r}$ 値は1.90と極めて高いのが特徴である。開発鋼の集合組織の主方位は、図6 に示す{100} 極点図からも明らかのように、{554} <225>, {111} <112>及び{111} <110>である。深絞り性の評価結果を表4 に示す。開発鋼の限界絞り比は2.28であり、従来の590N/mm²級鋼板と比べ、はるかに良好であり、370N/mm²級鋼板と同等以上の深絞り性を有する。この結果は $\bar{r}$ 値とよく対応している。

4. Cu 析出相の観察

熱処理条件を変えることにより強度を大幅に変化させた1.6%Cu 添加鋼中の Cu 析出相を、高分解能分析電子顕微鏡(HR-TEM)とアトムプローブ電界イオン顕微鏡(AP-FIM)により観察した。写真1 は強度が極大値から低下した過時効状態にある鋼板中の Cu 析出相を HR-TEM で観察した例である。析出物は大きさが約20nm の ϵ -Cu であり、この大きさ以上の ϵ -Cu では大きな強度の上昇は望めない。

図7 は強度が極大となる条件で、析出処理を行った鋼板中の析出物を AP-FIM で観察及び分析した例である。(a) は FIM 像であり、矢印で示す暗い部分が Cu-rich な析出物に相当し、その大きさは約3nm である。この析出物の組成を AP-FIM で分析した結果を(b) に示す。この場合、母相の Fe 原子はほとんど認められず、Cu²⁺と Cu⁺のみが検出されていることが分かる。このことから、その組成はほぼ純 Cu になっている。

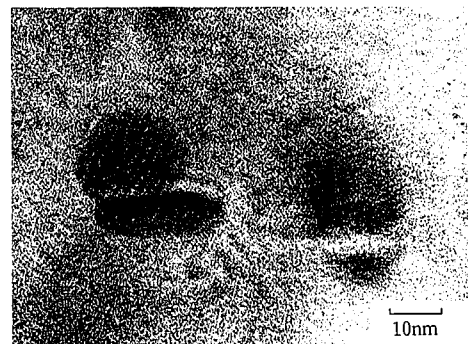


写真1 1073Kで30s時効した1.6%Cu添加Ti-IF鋼のHR-TEM観察結果

5. 結 言

Cuの相分解を活用することにより、加工時は440N/mm²級で加工性に優れ、加工後の短時間の熱処理により強度が200N/mm²程度上昇する熱延鋼板と、500N/mm²級以上の高強度でありながら高い r 値をもつ冷延鋼板を開発した。

参 照 文 献

- 1) 浅野和夫 ほか：日本金属学会秋期大会講演概要，(1991)，p.260

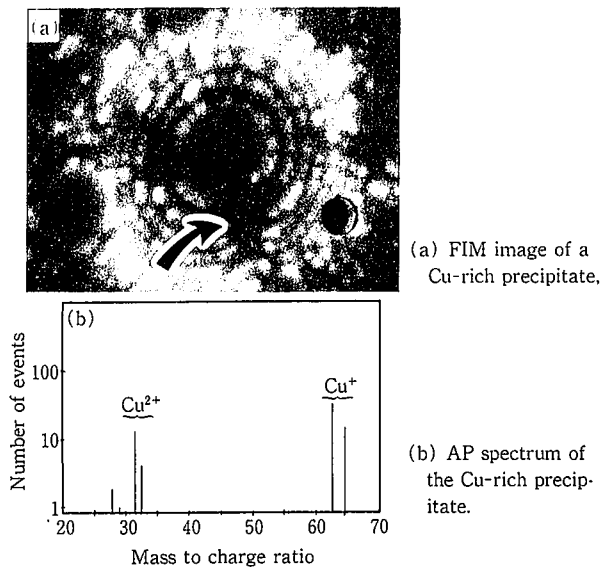


図 7 823Kで600s時効した1.6%Cu添加Ti-IF鋼のAP-FIM観察結果