

溶湯直接圧延法による Al 合金薄板の製造

大阪大学 工学部 材料物性工学科

助手 辻 伸泰

(平成6年度奨励研究助成 AF-94035)

1. 緒言

溶湯直接圧延法とは、熱間圧延板相当の組織を持つ薄板を熔融金属から直接製造するプロセスである。Fig. 1 に示すように、溶湯直接圧延法 (Fig. 1(b)) は双ロール式ストリップ連铸法 (Fig. 1(a)) と類似のプロセスであるが、ストリップ連铸法との違いは、凝固完了位置を入り口側に移行させることにより材料に大きな塑性変形を加える点にある。この方法は熔融金属を出発材とすることから、難加工材のニアネットシェイププロセスとして期待できるだけでなく、比較的大きな冷却速度と大圧下圧延によって微細な加工組織が形成され、材料の機械的性質そのものを改善できる可能性を持っている。実際これまでに筆者らは工業用純アルミニウム薄板の溶湯直接圧延に成功し、直接圧延板が比較用の熱間圧延板に比べて引っ張り強さ・伸びともに優れた値を示すことを明らかにした^{1,2)}。

本研究の目的は、鑄造合金として知られる Al-Si 合金薄板の溶湯直接圧延を試み、その機械的性質を明らかにすることにある。また、直接圧延板に簡単な熱処理を施すことにより、機械的性質の更なる改善が可能か否かの調査も行った。

2. 実験方法

Fig. 2 に溶湯直接圧延機の模式図を示す。その詳細はすでに示したりとおりであるが、本圧延機の特徴は上下ロールにカラーとカラーホールを設けて閉式孔型を構成し、圧延時の溶湯の幅方向への流出を防ぐとともに、大圧下圧延を可能にした点にある。

Fig. 2 の圧延機を用いて、Al-0~17mass%Si 合金の溶湯直接圧延を試みた。ロールギャップは1.0mm に固定し、注湯温度 (タンディッシュ先端の湯温) は各合金の状態図における液相線温度からの加熱度 (ΔT) が40℃または90℃となるようにし、ロール周速 (V_R) は4~18m/min の範囲で変化させた。

機械的性質の測定と組織観察を、主に Al-6%Si, Al-12%Si 合金直接圧延板について行った。試験に供したそれぞれの板の製造条件は、 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 、 $V_R=10\text{m/min}$ (Al-6%Si), 4m/min (Al-12%Si) である。これらの製造条件のもと、直接圧延板の板厚はそれぞれ1.4mm (Al-6%Si), 1.6mm (Al-12%Si) であり、噛み止め試験により求めた実質圧下率はそれぞれ67% (Al-6%Si), 75% (Al-12%Si) であ

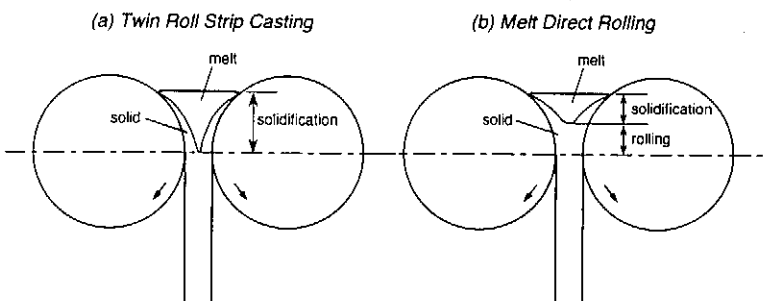


Fig. 1 Schematic illustrations showing principle of the twin-roll strip casting method and the melt direct rolling method.

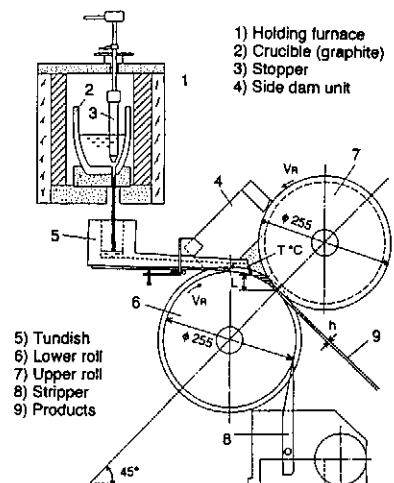


Fig. 2 Schematic illustration of the direct rolling equipment.

った。比較材として、Al-6%Si, 12%Si合金の金型鑄造板も用意した。機械的性質の測定は室温での引張試験により行った。板の組織は光学顕微鏡、または走査電子顕微鏡(SEM)により行った。

さらに、直接圧延板に対して400℃または550℃で種々の時間保持後、水冷又は炉冷する熱処理を施した。熱処理板に対しても引張試験と組織観察を行った。

3. 実験結果および考察

直接圧延板の表面性状を Table 1 にまとめる。本実験機を用いた溶湯直接圧延では、全板幅にわたって良好な表面性状の板を得るためには、十分な圧下が必要である。他の圧延条件が同じ場合、ロール周速が増すと凝固殻の厚みが減少して圧下率が小さくなることから、Table 1 においていずれも高ロール周速側に圧延限界点があることが理解できる。また、注湯温度(加熱度)の上昇は同様に凝固殻厚みの減少を招くことから、 $\Delta T=90^\circ\text{C}$ の場合の方が $\Delta T=40^\circ\text{C}$ の場合よりも限界ロール周速が低ロール周速側となる。限界ロール周速に与える合金組成の影響は、Si量が少ない範囲では小さいが、Si量が12%を越えると良好な板の製造が困難となる。これはSi量の増加によって材料がより脆性的になり、圧延時に耳割れや破断が起こるためである。

Al-6%Si, Al-12%Si直接圧延板の縦断面のSEM写真を Fig. 3 に示す。SEM像において、共晶Si相は白く、Alマトリクスは黒く現出される。Fig. 3 より、板表面近くほどSi相が多い様子が見て取れる。直接圧延板における板厚方向のSi量分布をSEM/EPMA法により測定した結果を Fig. 4 に示す。板表面近傍ほどSi量の多い、いわゆる逆偏析が明瞭に観察される。こうした逆偏析はAl-Cu合金

の直接圧延でも観察されており³⁾、筆者らはその原因として、Si濃化融液の圧延作用に伴う逆方向への絞り出しと表面への回り込み、および凝固殻のクラックを通した表面への滲み出しによる機構を提案している。こうした板厚方向に不均一な組成・組織の形成は、均質な材料の製造という観点からは好ましくないが、逆に、例えば耐摩耗性に優れた傾斜機能材料的な板が直接圧延により製造可能であることを示唆している。

上記のような不均一な組織にも関わらず、直接圧延板は比較用の金型鑄造板に比べて引っ張り強さ・伸びともに優れた値を示した (Table 2)。Fig. 5 には、直接圧延板(上側表面近傍)および金型鑄造板のSEM組織を示す。金型鑄造板のSi相が粗大で、マトリクスとの界面にポイドが見られる場合もあるのに対して、直接圧延板中のSi相は急冷凝固作用と大圧下圧延により微細に分断されて

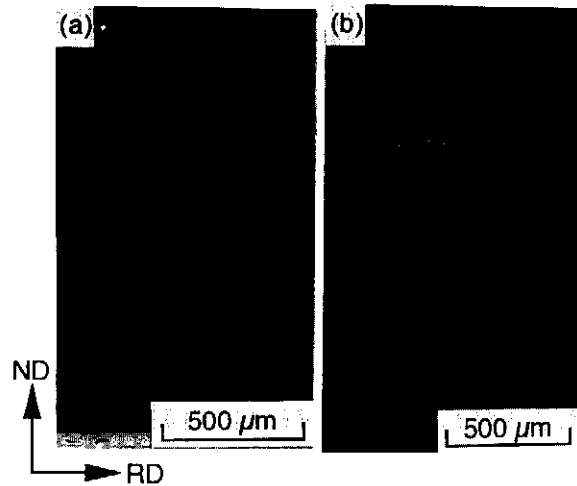


Fig. 3 SEM micrographs of the Al-6%Si (a) and Al-12%Si (b) direct-rolled strips.

Table 1 Surface quality of the direct-rolled strips.

- : without surface defects
- △: with surface defects
- ×: impossible to produce strips continuously

Roll speed, $V_R / \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$		4	6	8	10	12	14	16	18
Superheat, $\Delta T / ^\circ\text{C}$	Alloy								
90	Al-6%Si	—	—	○	○	○	△	×	—
	Al-4%Si	—	—	○	○	○	△	×	—
	Al-2%Si	—	—	○	○	○	△	×	—
	Al	—	○	○	○	○	×	—	—
40	Al-17%Si	—	×	—	—	—	—	—	—
	Al-12%Si	○	×	×	—	—	—	—	—
	Al-10%Si	—	—	○	—	—	—	—	—
	Al-6%Si	—	—	○	○	○	○	△	×
	Al-4%Si	—	—	○	○	○	○	△	×
	Al-2%Si	—	—	○	○	○	○	△	×
	Al	—	○	○	○	○	×	—	

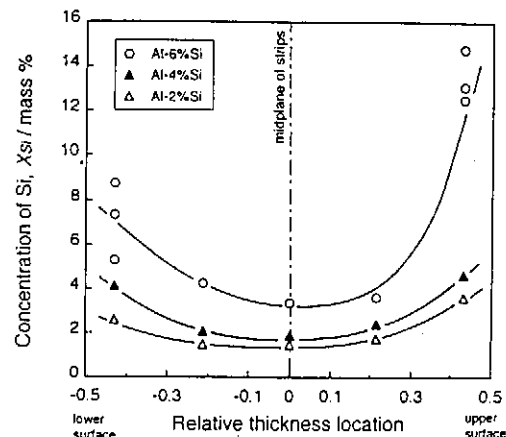


Fig. 4 Concentration of Si through thickness of the direct-rolled strips.

分散しており、ポイドも全く見られない。さらにマトリクス側も加工硬化（回復）状態にあることが、TEM観察により明らかとなった。こうした欠陥のない微細な加工組織の形成が、直接圧延板が優れた機械的性質を示した理由である。

400℃または550℃での熱処理により、直接圧延板の引張強さは低下するが、延性は大きく改善される。強度・延性の変化は熱処理時間の増加とともに一定値に近づき、特に550℃の場合は短時間の熱処理で機械的性質がほぼ一定値となる。一定値となった引張強さ・伸びに及ぼす熱処理温度の影響は小さい。直接圧延板およびその550℃熱処理板の強度と延性を、比較用金型鑄造板のそれとともにFig. 6に示す。550℃、15min熱処理後水冷された直接圧延板は、引張強さが圧延ままからやや低下するものの、伸びが向上する。550℃熱処理後炉冷した場合には、Al-6%Siの場合には22%まで、Al-12%Siの場合にも18%まで伸びが大きく向上する。熱処理後水冷するか炉冷するかによって機械的性質が異なるのは、Siの過飽和強制固溶の有無によると考えられる。

Fig. 7には、熱処理を受けたAl-6%Si直接圧延板のSEM組織を示す。熱処理後水冷された板においては、球状化したSi相の均一微細分散が実現されている。熱処理後炉冷された材料では、Si相は粗大化している。また、顕微鏡観察の結果、熱処理板におけるAlマトリクス相は粗大な再結晶組織となっていることが明らかとなった。こうした第2相Si相の球状化と加工硬化Alマトリクス相の再結晶が、熱処理板の延性を向上させた金属組織学的

Table 2 Mechanical properties of the direct-rolled strips and the cast strips.

alloy		Al-6%Si	Al-12%Si
cast strip	tensile strength [MPa]	112	157
	elongation [%]	5.0	1.8
direct-rolled strip	tensile strength [MPa]	184	242
	elongation [%]	8.3	3.1

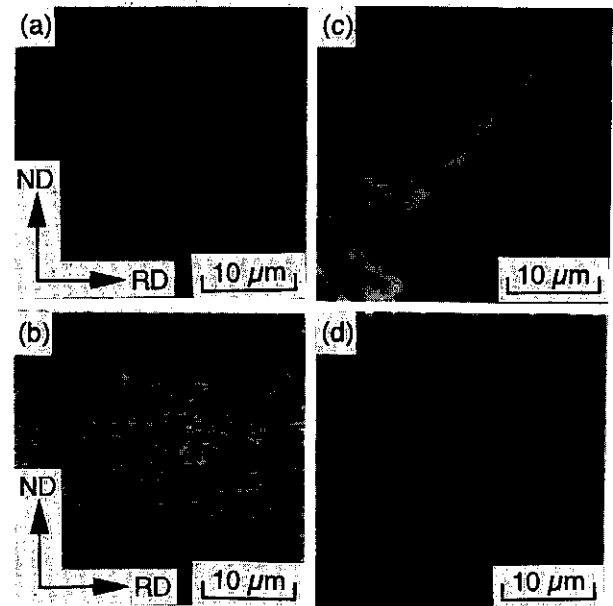


Fig. 5 SEM micrographs of the Al-6%Si (a,c) and Al-12%Si (b,d) strips. (a,b) Direct-rolled strips. Near upper surface. (c,d) Cast strips.

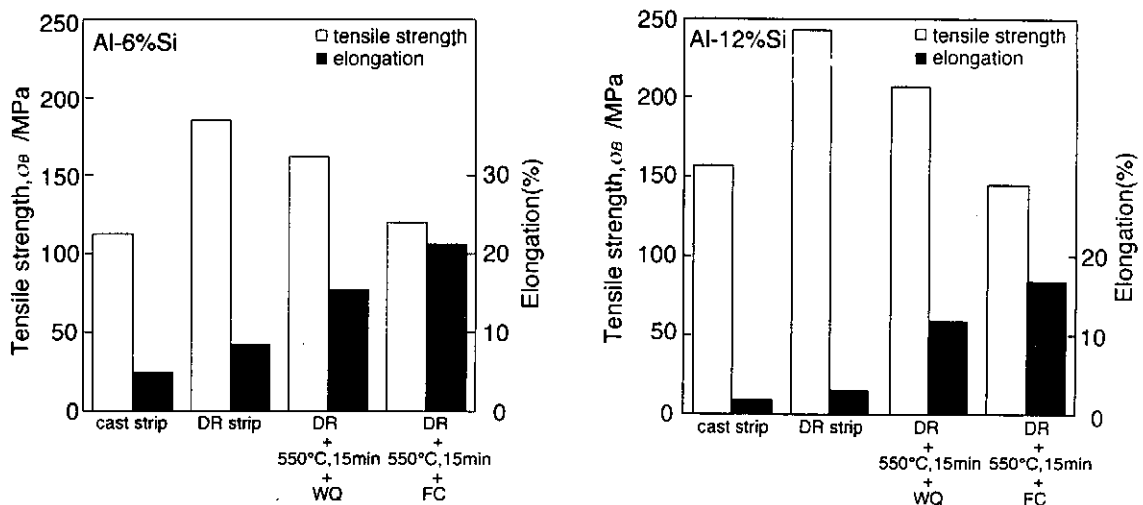


Fig. 6 Mechanical properties of Al-Si alloy strips.

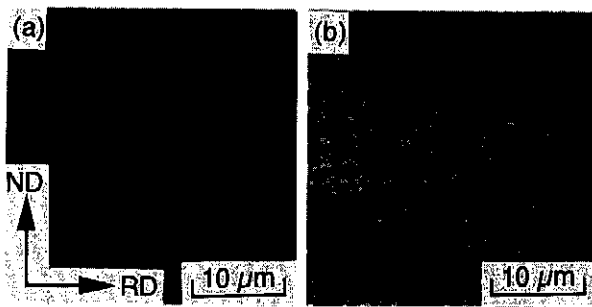


Fig.7 SEM micrographs of the direct-rolled and heat-treated strips of Al-6%Si. Near upper surface.
 (a) 550°C, 15min + water-quenching.
 (b) 550°C, 15min + furnace-cooling.

要因であり、組織変化を可能としたのは本プロセスにおいて材料に大きな塑性加工が加えられていることによる。

4. 結論

- [1] 溶湯直接圧延法によりAl-Si鑄造合金の良好な薄板を製造することに成功した。
- [2] 直接圧延板中において、Siは板圧方向に不均一な分布を示し、板表面近傍ほどSi濃度の高い逆偏析が観察され

た。しかし、こうした不均一な組織にも関わらず、直接圧延板は金型鑄造板に比べて優れた引張強さ・伸びを示した。これは、急冷凝固作用と圧延作用による組織の微細化に起因するものである。

[3] Al-Si直接圧延板の延性は、簡単な熱処理により大きく改善される。すなわち、溶湯直接圧延法は難加工材料の製造方法として優れているだけでなく、材料の組織制御を可能とすることにより、その材質改善にも有効である。

最後に、本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の助成を受けて行ったものであり、財団に謝意を表します。

参考文献

- [1] 齋藤好弘、池田利哉、辻 伸泰：塑性と加工、36 (1995), 1281
- [2] N.Tsuji, T.Sakai and Y.Saito : Proc. of the 5th Int. Symp. on Plasticity and Its Current Applications, (1995), 1043
- [3] 辻 伸泰、齋藤好弘、中村 節：平8春塑加講論、(1996), 270