

論文

UDC 621.746.27.047 : 621.746.582

インライン・リダクション法に関する研究*

竹原 鋭郎**・山崎 大蔵***・角井 洵***
林 寛治***・秋田 秀喜***

Research on In-Line Reduction Process

Eirō TAKEHARA, Daizo YAMASAKI, Makoto TSUNOI,
Kanji HAYASHI, and Hideki AKITA

Synopsis:

In-Line reduction process is classified into two methods, one is reducing billet with liquid core and the other is reducing billet after complete solidification. For these two methods, the reduction mechanism and material quality have been investigated. An examination has also been made of shaped reduction with similar size to final shape by later method, and the characteristics of products have been made clear. Main results are as follows:

(1) In reducing process with liquid core, as the liquid in mushy zone which is enriched in some solute atom elements is squeezed by reduction, the center of billets after reduction has the tendency of reverse segregation and this tendency changes with the time after start of reduction. It is cleared that the inner cracks with rolling is prevented by enough reduction.

(2) It is shown that the center line shrinkage completely diminishes and cast structure is refined by the reduction after complete solidification, and the similar quality of reduced billet is obtained to that of the bloomed products. Surface cracks are completely prevented by the application of heating furnace and the choice of casting condition in the continuous casting process.

From the results of the shaped reduction test to reduce square billet to round, dog bone and twin bars by 1 or 2 pass, it is shown that the pass schedule of blooming will be simplified and the mill capacity will be compact.

(Received Nov. 27, 1973)

1. 緒 言

連鑄機内で鑄片を直接圧延するインライン・リダクション (In-Line Reduction, 以下 I.L.R. と呼ぶ) 法は連鑄機の欠点を補うつぎのような利点をもっている^{1)~4)}。

(1) 単一寸法のモールドから多種形状法の製品が得られるので連鑄機部品の取り替え時間および予備品数が低減する。

(2) 鑄片表面部、内質部とも品質向上が達せられ歩留り向上、対象鋼種拡大が計られる。

(3) 製品寸法に比べて鑄込み寸法が大きくとれ、このため連鑄機の操業性、生産性が向上するとともに、鑄込み不可能な小寸法の製品も製造可能となる。

(4) 鑄片の顕熱を利用できるので圧延時の加熱工数の低減により省エネルギーが達せられるとともに分塊圧

延工程の一部または全部が省略できる。

(5) 引け巣切り捨て、加熱による酸化損失を低減でき歩留りが向上する。

I.L.R. 法はいままで多く報告されているが鑄片内温度分布によつて液芯圧延法 (鑄片内部に未凝固の液相がある状態で圧延する方法) と凝固後圧延法 (鑄片中心部まで完全凝固後圧延する方法) に大別でき両者で製造されるリダクション材の性質は全く異なると言われて¹⁾。この報告では第一にこれら両法の原理を求めリダクション材の材質特性を明らかにすることを目的とした。

つぎに連鑄機の動向として、最終製品により近い寸法

* 昭和48年11月27日受付

** 三菱重工業(株)広島造船所

*** 三菱重工業(株)広島研究所

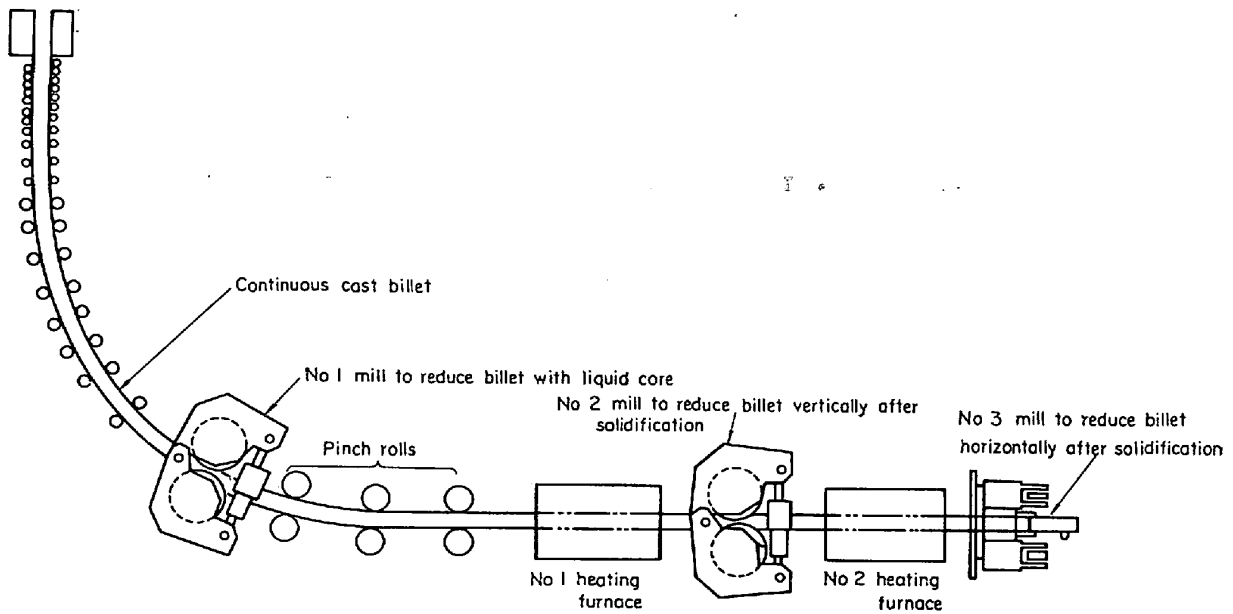


Fig. 1. Layout of continuous casting test machine with billet reducer.

形状の鑄片を得る方向がありこの点異形モードを使用する連鑄法⁵⁾も発達しつつあるが、生産性、操業性の面で問題があり、品質の面でも分塊圧延工程を省略するにいたっていない。このような観点に立ち本報告の第二の目的をこれまでの連鑄機技術で確立されている正方形モードの鑄片を 1~2 パスで異形に圧延して最終製品形状に近づける試験から現状の分塊圧延工程を低減する可能性においた。

2. 試験装置

試験装置は当社広島造船所設置の I.L.R. ミル付ローヘッド型連鑄機でそのレイアウトを Fig.1 に示す。前報⁶⁾の双子リダクション法で使用した I.L.R. ミルは Fig.1 の No 2 ミルである。I.L.R. 法では装置の構成は連鑄機、I.L.R. ミル、加熱炉より成っているが、連鑄機は I.L.R. ミルの関係で切断位置が後方にずれている以外通常と全く同様の機器構成より成っている。I.L.R. ミルはピンチロール前方に No 1、ピンチロール後方に No 2、No 3 と設置し No 1 と No 2 は垂直方向に No 3 は水平方向に圧延可能で No 2 と No 3 はタンデム圧延が可能である。No 2 ミルと No 3 ミルの直前には圧延中の表面クラック防止のためバーナー加熱式のコーナー加熱炉が Fig.1 のとおり設置されている。

3. 試験方法

連鑄機の操業は通常の場合と同様であり 120 mm² に鑄込まれた鑄片は実験を通じて引抜速度 1.8~2.2 m/



Photo. 1. Meseasurement of solidified shell thickness by driving pin method at the point of No 1 mill.

min, スプレー比水量 0.8~1.6 l/kg の範囲で鑄片内部の温度分布を制御した。すなわち鑄片内部の温度分布は電算機による数値解析法、放射性同位元素による実測法、ピン打込み法による実測法⁷⁾⁸⁾⁹⁾によつて求めこれらを総合して鑄込み条件を設定した。液芯圧延法では No 1 ミルにおける鑄片内部の未凝固域（完全液相域と固液共存域）が 30~50 mm² になるよう引抜き速度、スプレー水量を制御し、凝固後圧延法の場合は No 2 ミルにおいて鑄片中心部温度が 1250~1380°C の範囲になるよう鑄込み条件を設定した。液芯圧延条件の鑄片の No 1 ミル位置における凝固状態をピン打込み法により測定した一例を Photo. 1 に示すが、Photo. 1 より完全液相域 30 mm² の外側に約 8 mm の固液共存域があるので、

Table 1. Contents of in-line reduction test.

Test series	Size of mold	Method of I.L.R.	Mill No	Number of pass	Shape of products	Used steel in JIS
1	120 mm square	With liquid core	No 1	2	Rectangular	S25C, S40C, SWRH6
2	"	Completely solidified	No 2, No 3	2	Square	S25C, SCM23, S30C
2'	"	"	No 2	1	Rectangular	"
3	"	"	No 2, No 3	2	Round	S15C, SCM23
3'	"	"	No 2	1	Oval	"
4	"	"	No 2, No 3	2	Dog bone	S15C
5	"	"	No 2	1	Twin	S23C, S43C, SWRH 4

鑄片内部に 46 mm \square の未凝固域が存在することが明らかで液芯圧延の設定条件が適正であることを示している。

鑄込まれた鑄片のリダクション条件は Table 1 に示すように、液芯圧延の場合には No 1 ミルのみ使用する 1 パス圧延であり、凝固後圧延の場合には No 2 ミルのみ使用する 1 パス圧延と No 2, No 3 ミルの両者を使用する 2 パス圧延とに分けられる。圧延されたリダクション材の断面形状は Table 1 のように、長方形、正方形、2 連角型 (双子)、丸、ドッグボーン (Dog Bone) の 5 種類であり、これらの実験は圧延ロールカリバー (Roll Caliber) を取り替えることにより行なつた。

圧延時のリダクション材の特性を求めるため各ミルでの圧下量を変える試験および圧延中に引抜きを一時停止し、圧延ロールを開放後鑄片を再引抜きする試験 (以下圧延過程試験と呼ぶ) を行なつた。

試験に使用した鋼種は Table 1 に示すように JIS 規格成分のものである。

鑄片、リダクション材および圧延過程試験片について、縦、横断面のマクロ組織サルファプリント、5 mm ϕ キリによりサンプリングした化学成分分布、ビッカース硬度、ミクロ組織、表面検査の試験を適宜行なつた。

圧延時の表面割れの生成原因を調査するため、通常鑄込み鑄片 (S15C) 表面部から試験片を採取して JIS G. 0567 に準じて高温引張り試験を行なつた。

4. 液芯圧延法に関する試験結果と検討

4.1 圧延開始初期のリダクション材特性

液芯圧延法ではリダクション材性状は経時変化するがここでは圧延開始後数分以内に得られたリダクション材について性状試験した。

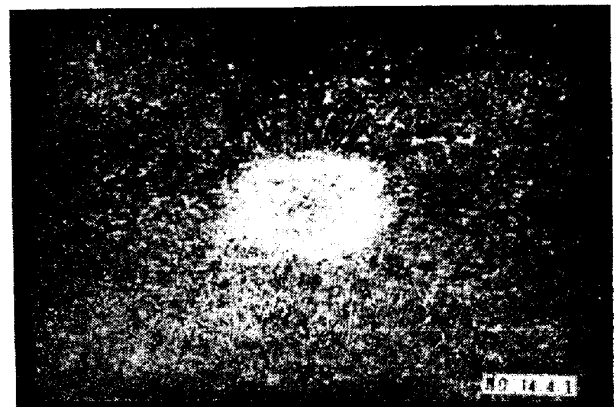
(a) Sulfur print $\times 1/2.5$ (b) Macro structure $\times 1/2$

Photo. 2. Macro structure and sulfur print of cross section of in-line reduced billet with liquid core (S25C).

Photo. 2 は S25C について圧延開始約 2 分後のリダクション材横断面マクロ組織とサルファプリントを示す。リダクション材中心部では Photo. 2 (a) のように S が白抜けし Photo. 2 (b) のようにマクロ組織も特異である。このようなリダクション材中心部の白抜けはいずれの鋼種にも発生している。Fig. 2 は液芯圧延開始約 1.5 min 後の SWRH 4 リダクション材の成分分布を求

めたもので、C, P, S, Mn いずれも中心部で負偏析している。Photo. 3 は通常鑄込み鑄片と液芯圧延材の拡大マクロ組織を示すが、液芯圧延材では中心部組織が著しく

微細化している状況が明らかである。Fig. 3 は圧延開始直後のリダクション材断面の硬度分布を求めたもので、中心白抜け部分の硬度はその近辺に比べて高く、Fig. 2 から明らかなようにこの部分が C, Mn など硬度を上昇させる元素が少ないことを考慮すると中心部は非常に密な構造になっていることを予測させる。

以上のように液芯圧延開始初期のリダクション材中心部はマクロ的な欠陥もなく強腐食されがたく硬度も高いことから非常に密な構造になっているものと考えられる。

4.2 液芯圧延の機構

液芯圧延の開始初期には中心部分が負偏析するので横断面内の化学成分のバランスが崩れ、成分上のマスバランスを保つためには、他の部分に正偏析箇所が存在するはずである。Photo. 4 は SWRH 6 材につき液芯圧延開始約 10 分後の圧延過程試験片縦断面のサルファプリントを示す。未圧延部分では未凝固部分に S が異常に濃化し黒く認められ、この部分の S 量は化学成分分析の結果約 0.15% と取鍋分析値の約 10 倍の濃度に達した。また既圧延の部分すなわちリダクション材では S の白抜け現象は起こっていないものの未圧延部分に比べて中心付近の S 量は少なく、このことより液芯圧延によつて S の絞り出しが連続的に行なわれていることを示している。この絞り出しは Fig. 2 から予想されるように S のみでなく C, P, Mn についても同様に起こっていると考える。

Photo. 5 は液芯圧延中にリダクション材中心部成分の経時変化を求めるため試験片採取時期の異なるリダクション材横断面のサルファプリントを示す。圧延開始後の時間経過につれ中心部白抜けの大きさ、様相が異なつてきておりこの傾向はいずれの鋼種でも同様であつた。

以上のように液芯圧延中には複雑な凝固現象が起こつ

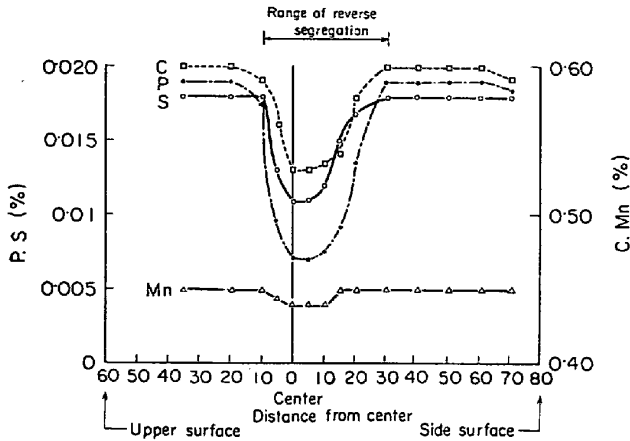


Fig. 2. Composition distribution in test series 1 sample at 1.5 minute after the start of reduction (SWRH 4 Steel).

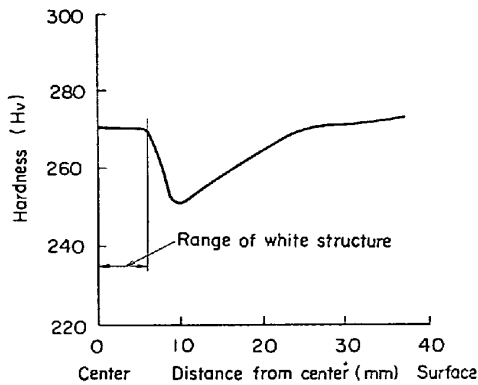
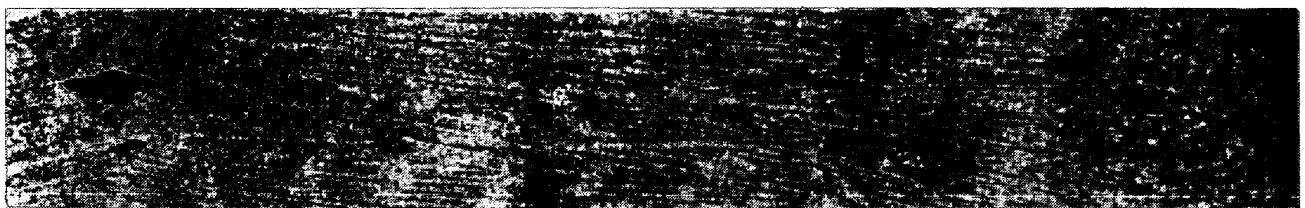
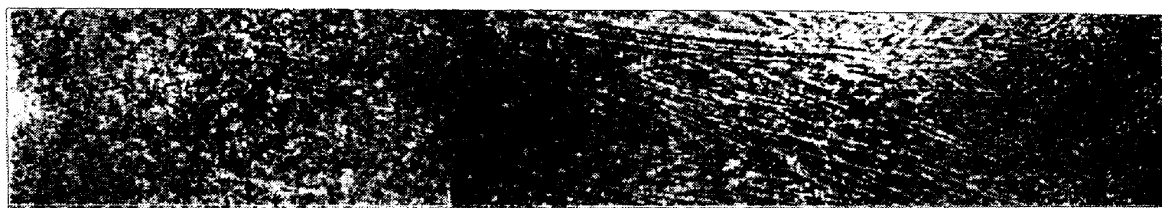


Fig. 3. Distribution of hardness in the billet reduced with liquid core.



(a) As cast billet



(b) Billet in-line reduced with liquid core

Photo. 3. Enlarged macro structure (S25C). $\times 2$

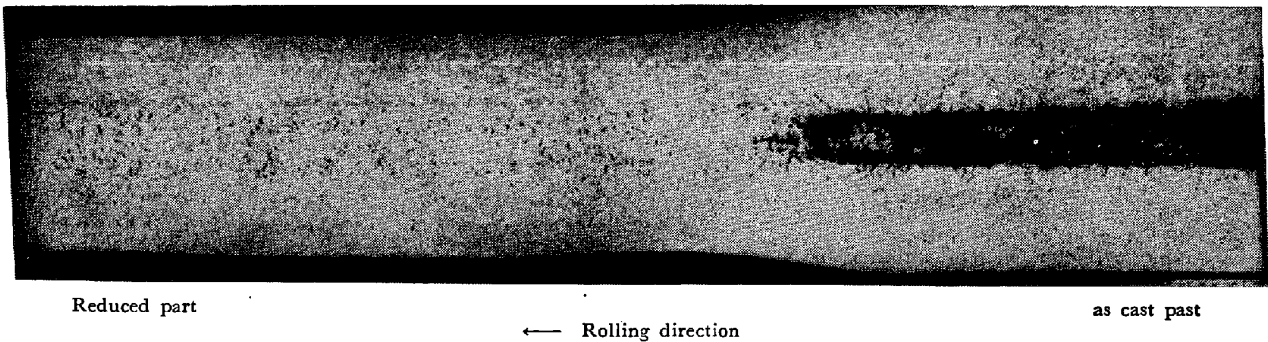
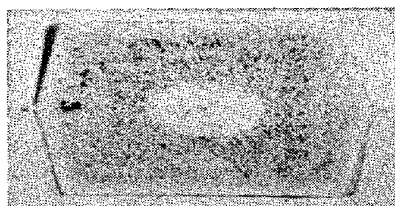
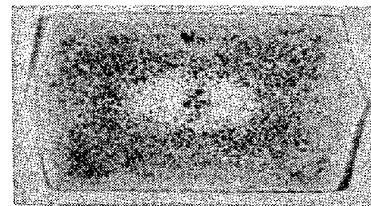


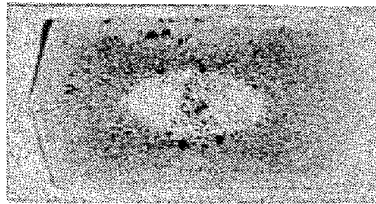
Photo. 4. Sulfur print of longitudinal cross section of in-line reduced billet with liquid core (SWRH 4). $\times 1/4$



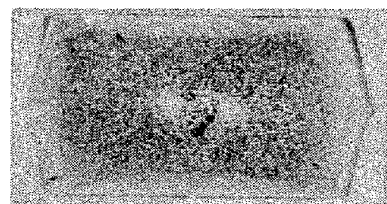
(a) 2 min after the start of reduction



(b) 4 min after the start of reduction



(c) 6 min after the start of reduction



(d) 10 min after the start of reduction

Photo. 5. Sulfur print of in-line reduced billet with liquid core at various time after the start of reduction (SWRH 6). $\times 1/4$

ているが、液芯圧延開始初期には Fig. 4 のような模型が考えられる。すなわち鋳片内の未凝固部分のうち固溶元素を濃化した液相部分は No 1 ミルでの圧延によつて絞り出され圧延されていない鋳片内未凝固部分に混合するので時間が経つにつれ、この部分に固溶元素が濃化してくる。一方固溶元素の少ない固相部分は圧延によつてそのままリダクション材中心部分となるのでこの部分は白抜けの現象を呈する。このような機構は、圧延開始直後のリダクション材中心部分の C 濃度が S25C の場合に約 0.10% となり Fe-C 二元系状態図から予測される初晶の C 濃度と非常に近い値となることから確認できる。このように液芯圧延の機構を考えると圧延直前の鋳片内液相中には固溶元素が逐次濃化していきこのため液相部分の凝固温度はしだいに低下することとなる。この結果固溶元素の濃化している領域では凝固の進行が遅れてくるとともに、凝固する固相部分の固溶元素量も変わってくるので、リダクション材中心部分の成分は経時変化することになる。

4.3 内部割れ防止

従来より凝固直後の材料は非常に脆く小さな引張り応力の作用により割れにいたることはホット・ティア (Hot Tear) として広く知られている¹⁰⁾¹¹⁾が、液芯圧延の場合には未凝固部分を有する状態で圧延するため内部割れの危険が非常に大きい。Fig. 5 は液芯圧延時のクラックの発生傾向を求めめるため、同一チャージの鋳込みで No 1 ミル圧下率を種々変えて内部横割れとの関係を求めた。Fig. 5 より圧下率が増えるにつれて割れ発生の程度は著しくなってくるが、圧下率が約 30% を越えると内部割れは突然消失する。圧下率約 20% で割れの著しい部分の縦断面マクロ組織を Photo. 6 に示すが、このとき鋳片中心部には白抜け現象も起こっていない。

以上のことから液芯圧延中の内部割れは No 1 ミルでの圧下率がある限度以内のとき発生し、このときリダクション材では液相の絞り出しが完全に行なわれていない。逆に Photo. 4 から液相の絞り出しが完全に行なわれれば内部割れ発生にはいたらないことが認められる。このように内部割れの発生は絞り出し現象と関連があり、

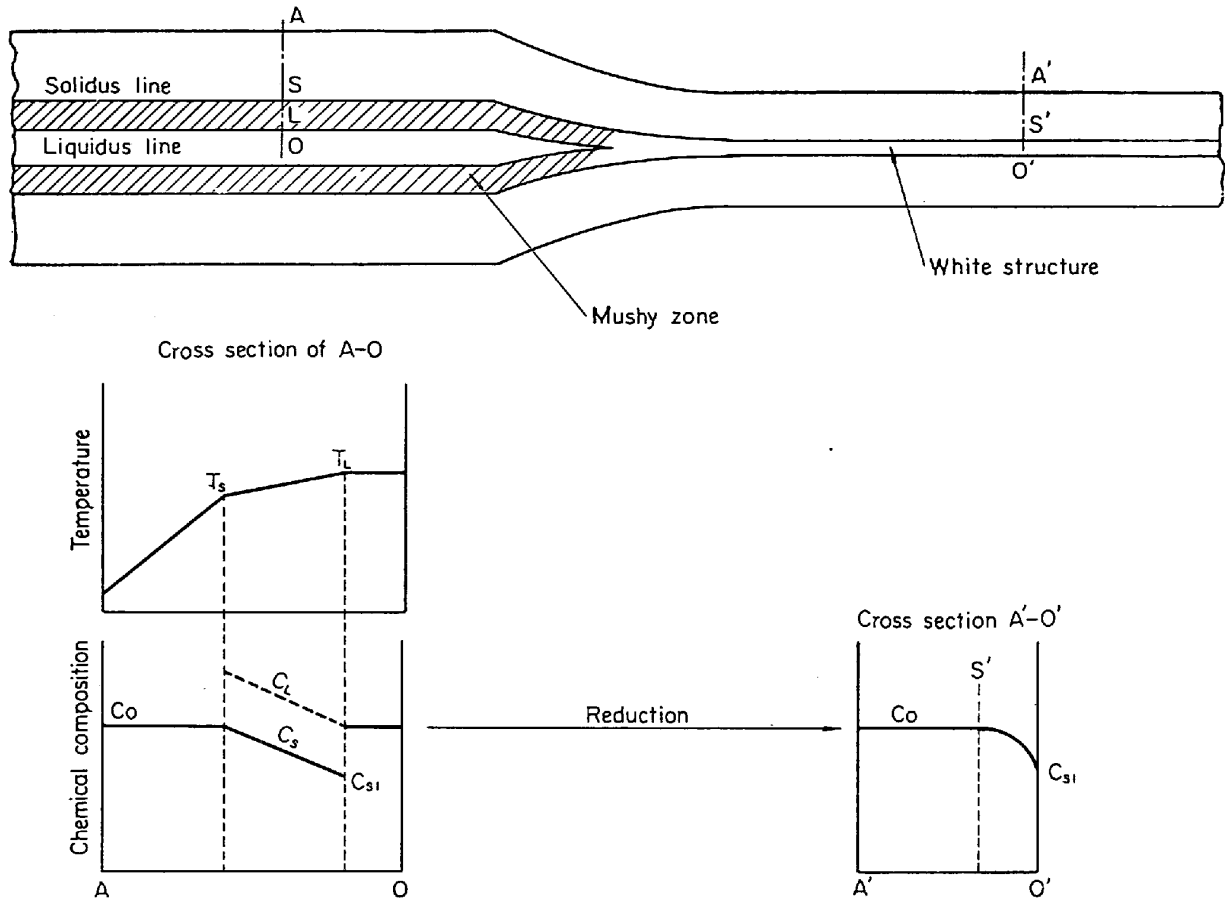


Fig. 4. Schematic picture of reducing billet with liquid core

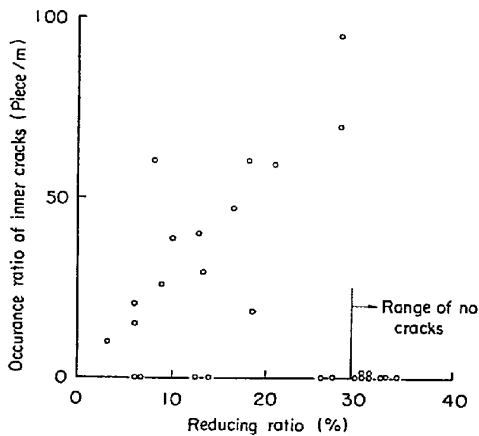


Fig. 5. Relation between reducing ratio and inner cracks.

この点はずつぎのように考えることができる。すなわち液芯圧延時に圧下率が小さく上下の凝固界面に圧延圧力が十分作用しないときには凝固界面近傍は引張り応力となり割れ発生するが、圧下率が大きく上下の凝固界面が噛み合つてこの部分に圧延圧力が十分作用する状態ではこの部分は圧縮応力となり絞り出しも十分行なわれることとなる。

5. 凝固後圧延法の試験結果と検討

5.1 表面割れについて

I.L.R 法では表面割れを防止するため圧延機前に加熱炉を置くことは一般化しておりこのことはつぎの理由によるものとする。

(1) 圧延速度が連鑄機の鑄込み速度によつて決定されるため分塊圧延などに比べ遅いので鑄片表面と圧延ロールとの接触時間が長く鑄片表面は過冷されて割れが発生しやすい。

(2) 凝固冷却中であるため表面温度むらを生じやすくこの点特にコーナー部と面中央部との温度差が大きいので変形むらに起因してクラックを生じやすい。

(3) 結晶粒界などの偏析がそのまま残つており脆い状態にあるにもかかわらず最初から圧下率が大きい。

以上の問題からバーナー加熱式のコーナー加熱炉を設置した結果 No 2 ミル位置を通過する鑄片のコーナー部表面温度は加熱炉がない場合に比べ 50~100°C 上昇し加熱炉出口では表面温度はほぼ均一な分布を示した。

Table 1 の角リダクション試験 (試験 No 2, '2') に

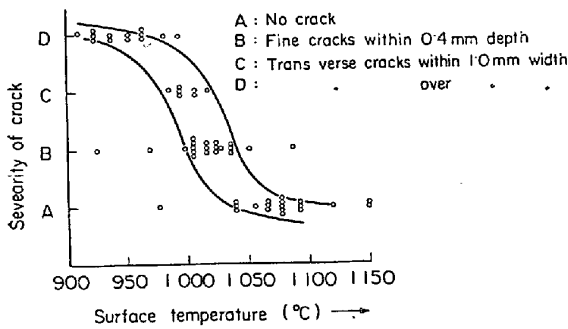


Fig. 6. Relation between surface cracks and surface temperature of billet at No 2 mill.

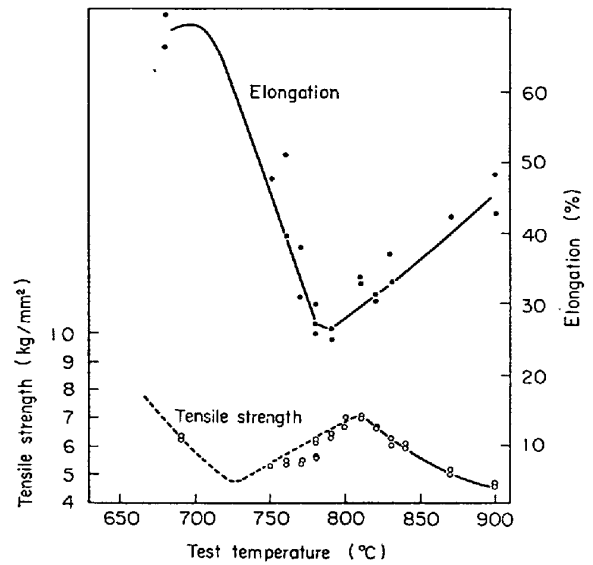


Fig. 7. Tensile test results at high temperature (S15C).

において連鑄機の鑄込み条件，加熱炉パワーを種種変えて No 2 ミル入口の鑄片表面温度と表面割れの関係を求めて Fig. 6 に示す。表面割れの厳しさを A (割れなし)，B (0.4 mm 以下の深さ，おもに亀甲割れ) C (1 mm 以下に開孔した横割れ)，D (1 mm 以上に開孔した横割れ) の 4 段階に分類した結果，Fig. 6 のように S25C 材では 1050°C 以上の表面温度であれば割れ発生はなく，1050°C より表面温度が下がると割れ発生が厳しくなることが明らかである。このようにある温度を境にして割れ発生が起こる傾向は鋼種が変わっても認められるがこの限界の温度は鋼種によって多少異なり，同一表面温度で比較すれば，低炭素鋼ほど割れは厳しい傾向を示した。また割れ発生の傾向は圧下量，孔型形状によっても変わり，これらは圧延によって表面温度が下がるほど割れは厳しくなる傾向が認められた。

圧延時の表面割れの生成原因を求めため高温引張り試験した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 から明らかなように，約 780°C の点で伸びは極小値を示しこの現象は温度から類推して $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態に関連するものと考えられる。No 2 ミルで圧延時の鑄片表面温度降下量は詳しくは不明であるが，1050°C で No 2 ミルに入った鑄片は圧延されてミル出口近傍では約 800°C と推定できるので，No 2 ミル入口での表面割れの限界温度と引張り試験による最脆化温度とが関係づけられ，圧延中に Fig. 7 の最脆化温度を割らないことが表面割れ防止上の一つの解決策と考える。

5.2 凝固後圧延法の特徴

角リダクション試験から凝固後圧延法の特徴を求めた。Photo. 7 は 2 パスリダクション材の横断面マクロ組織を示すが，通常鑄込み鑄片と異なり中心引け葉は圧着し鑄造組織は微細化している。Photo. 8 は No 2 ミルにおける圧延過程試験片の縦断面マクロ組織を示すが中心ポロシティの圧着状況が明らかである。Photo. 9 は SCM

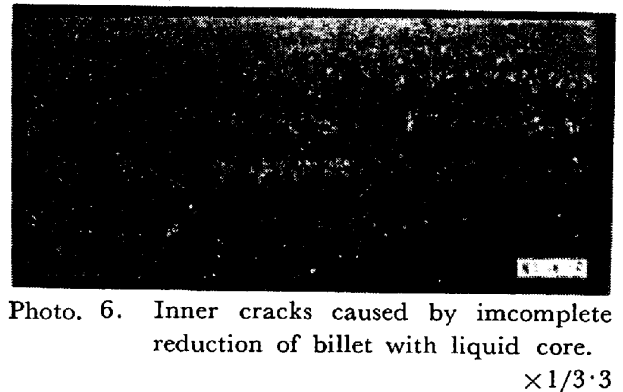


Photo. 6. Inner cracks caused by incomplete reduction of billet with liquid core. x1/3.3



Photo. 7. Macro structure of in-line reduced billet after complete solidification (S30C).

23 種についてリダクション時のミクロ組織変化を示す。Photo. 9 より鑄片時にはパーライト部分が多くこのパーライト中には鑄造組織特有のウィッドマン・ステッテン組織が認められるが No 2 ミルによる 1 パス圧延によりパーライトがフェライト化し結晶粒が微細化しさらに 2



Photo. 8. Macro structure of longitudinal cross section under reducing to square after complete solidification (S30C).

Position Sample	Surface	Middle	Center
As cast			
1 pass reduction			
2 pass reduction			

Photo. 9. Micro structure of as-cast and inline reduced billet (SCM23). ×50

パス圧延により結晶粒の微細化傾向は増大しパーライト部分は標準組織に近づいている。

以上のように I.L.R. 法では中心部ポロシティ、引け巣などは完全圧着し鑄造時のデンドライト組織が微細化するとともにマイクロ組織が著しく改善される。したがって引け巣の圧着により製品歩留りが向上しとくに引け巣発生が著しく鑄片長さ方向に欠陥が出やすい高速鑄込みなどでは I.L.R. の効果がいつそう発揮されるものと考え

える。また I.L.R. により組織的な改善がもたらされ、とくにマイクロ組織上鑄造組織が完全に消失することから、I.L.R. 法により分塊圧延材と同等の半製品が製造されることとなり、この点で設備、工数の低減が大きく期待できる。

I.L.R. 法では鑄片内部は高温にあるため圧延時の変形抵抗が小さくなることが予想されこの点は前報⁶⁾でも確認した。Fig. 8 は角リダクション時の平均圧延圧力と

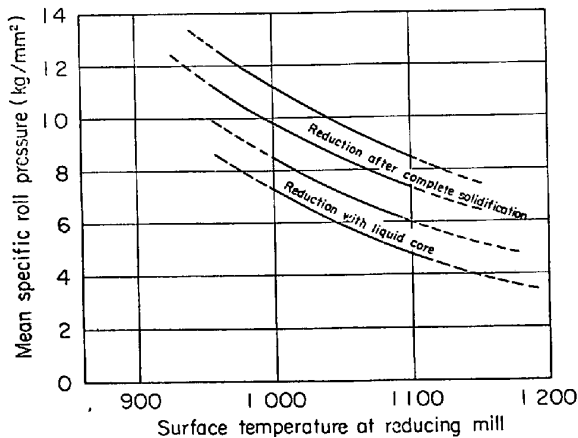


Fig. 8. Relation between surface temperature at reducing mill and mean specific roll pressure.

No 2 ミル入口の表面温度の関係を求めたもので参考のために液芯圧延時の値も示した。Fig. 8 より通常の圧延温度である 1100°C では凝固後圧延法の平均圧延圧力は約 8 kg/mm²、液芯圧延では約 5.5 kg/mm²である。一般に変形抵抗は歪速度の n 乗 ($n > 0$) に比例するので¹²⁾一般的分塊圧延に比べて圧延速度の遅い I.L.R. 法では変形抵抗も小さくなり、同一の孔型圧延を行なうとすれば I.L.R. 法の方が分塊圧延法に比べて小能力の圧延機で済み分塊圧延工程がコンパクト化される期待がある。

5.3 異形圧延について

最終製品に近い寸法、形状の製品を得ることは I.L.R. 法の大きな目標であるが、本試験では前報 6) に報告のとおり 120 mm□ 鋳片を 1 パスで 2 連角型 (双子) にする試験のほかに 2 パスで丸およびドッグボーンリダクション試験を行なった。これら異形圧延材の横断面マクロ組織を Photo. 10 に示す。

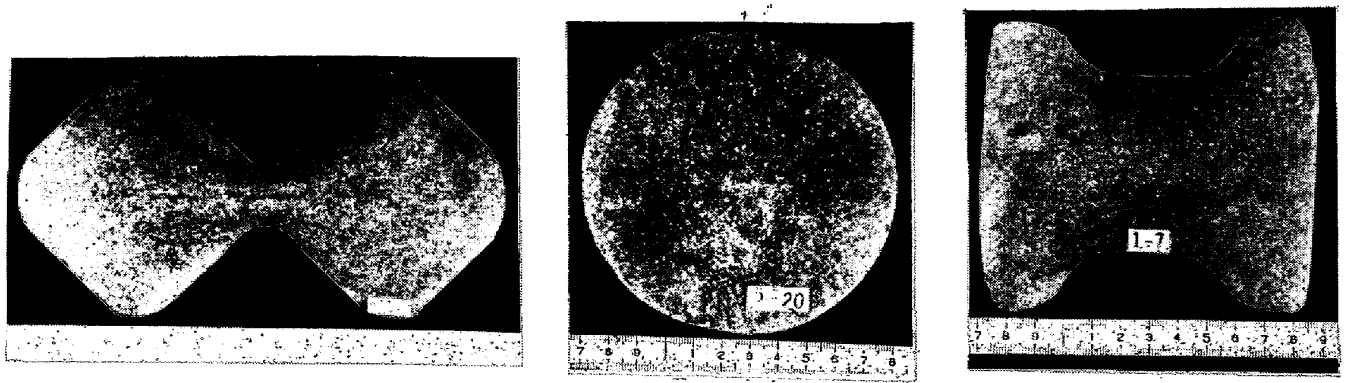
双子リダクションでは 120 mm□ 鋳片が実質的に 72

mm□ に 1 パスで圧延されたことになり通常の圧延では到底達せられないような効率的な圧延が行なわれたことになる。丸リダクションおよびドッグボーンリダクションでは通常に分塊圧延で数パス以上のパス回数を要する製品が Photo. 10 のとおり 2 パスで達せられたので半製品丸棒、引抜き鋼管用素材、H 型、I 型鋼素材などが分塊圧延工程なしに得られたこととなる。このように I.L.R. 法では通常に分塊圧延に比べて成型性よく圧延できることが予測されるが、この理由としては I.L.R. 法特有の現象すなわち鋳片内部が高温であることおよび圧延速度が遅いことが有利に働いていると考えられる。

以上のように凝固後圧延法では表面割れに十分な対策をたてれば、通常鋳込み鋳片に比べて鋳片品質は格段に向上しさらに分塊圧延材に匹敵することも考えられる。また異形圧延では効率的に圧延が行なわれ小断面鋳片や最終製品形状に近い鋳片の製造が可能となる。さらに鋳片の熱条件や連鋳機の特異性から I.L.R. 時の平均圧延圧力は通常に分塊圧延に比べ大幅に小さくとれる可能性があり、このことから従来の分塊圧延工程が著しくコンパクト化されこの面での設備費運転費の節減効果が期待される。

6. 結 言

連鋳機内で鋳片を直接圧延する I.L.R. 法は液芯圧延法と凝固後圧延法に大きく分けられ、これら両者の原理と材質上の特徴を明らかにした。また凝固後圧延法では最終製品に近い寸法形状の製品を得るため異形圧延の試験を行なった。以上のことから液芯圧延法では複雑な凝固現象により製品品質が安定せず実用化まで時間がかかると考えるが、凝固後圧延法ではリダクション材は分塊圧延材に匹敵する性状を示すとともにこれまで数パス以上要していた分塊圧延の工程が 1~2 パスの I.L.R. 法に



(a) Twin billet (SWRH 4) (b) Round bar (SCM 23) (c) Dog bone (S15C)

Photo. 10. Macro structure of shaped billet reduced after complete solidification.

置き変えうるので分塊圧延工程がコンパクトに簡略化される可能性が明らかとなつた。

また I.L.R. 法は連鑄機の生産性を上げ鑄片品質を向上するとともに広く鉄鋼生産体制の立場から省力、省エネルギーを達成させる方法であり今後ミニミルプラントなどに適用を計るとともに、技術的には連鑄と圧延を結合した結果生じる問題をさらに追求し改善していくことが必要であると考え。

文 献

- 1) H. G. BAUMAN: Draht-welt, 55 (1969) 10, S607
- 2) H. G. BAUMANN, et al.: Stahl u. Eisen, 91 (1971) 34, p. 139
- 3) H. SCHENCK, et al.: Stahl u. Eisen, 92 (1972) 17, p. 831
- 4) N. V. MOLOCHNIKOV, et al.: Stal in English, (1970) May, p. 353
- 5) F. C. MUTTIT, Iron Steel Eng., (1969) 1, p. 83
- 6) 竹原, ほか: 鉄と鋼, 59 (1973), 14, p. 1405
- 7) 特許公報: 昭 46-21092
- 8) 宇都, ほか: 鉄と鋼, 55 (1969), 11, p. 106
- 9) 根本, ほか: 鉄と鋼, 58 (1972), 4, p. 115
- 10) 沖: 鑄物, 39, No 9, p. 352
- 11) 沖: 鑄物, 30, 2, p. 83
- 12) 鉄鋼技術共同研究会編: 圧延理論と変形抵抗, 誠文堂新光社刊 (昭39年)