
中径シームレス鋼管圧延用プラグミルプラグの成分検討

Composition and Life of Plugs for the Plug Mill Use

富樫 房夫(Fusao Togashi) 佐山 泰弘(Yasuhiro Sayama) 江島 彬夫(Akio Ejima)
相山 茂樹(Shigeki Aiyama) 新中 博昌(Hiromasa Niinaka)

要旨：

各種プラグのうち最も耐用度の低いプラグミル用プラグに焦点を絞り、実験室的に 1.4% C-(17~25)%Cr ステンレス鋼に各種の合金元素を添加した試料について、焼入れ硬度、熱間硬度、CCT 曲線、内部組織および表面スケール層の形態を調査した。また、実圧延機において数種類のプラグの耐用度試験を行い、プラグ耐用度に対するプラグ成分および圧延条件の影響について考察した。プラグ耐用度は、17%Cr+1.5~3%Ni の添加により、またプラグ表面に緻密なスケールを形成させることにより大きく改善されること、プラグ耐用度に対する圧延上の影響因子のいくつかは、プラグミルにおける圧延温度の変化分として評価されることなどを明らかにした。

Synopsis：

Metallographic examinations, hardness testing up to 800°C and the tests for assessing the life were made on the 1.4%-(17~15)% Cr stainless steel plugs. The microstructure of plug consists of retained austenite, martensite and alloy carbides at room temperature. The hot hardness of plug decreases at the temperatures near 600°C. The additions of Ni, Co and Mo are effective to retard the softening at higher temperatures, but Si and Al accelerate the softening. The life of plug is extended by alloying 1.5~3% Ni and by forming the tight oxide layer on its surface. The effect of rolling conditions on the life of plug is discussed. The influence of the factors such as heating temperature of billet, rolling speed in elongating mill and the size of shells are fully explained in terms of the change in the rolling temperature in plug mill.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

中径シームレス鋼管圧延用プラグミルプラグの成分検討

Composition and Life of Plugs for the Plug Mill Use

富 樫 房 夫*
Fusao Togashi

佐 山 泰 弘*
Yasuhiro Sayama

江 島 彬 夫**
Akio Ejima

相 山 茂 樹***
Shigeki Aiyama

新 中 博 昌****
Hiromasa Niinaka

Synopsis:

Metallographic examinations, hardness testing up to 800°C and the tests for assessing the life were made on the 1.4%–(17~15)% Cr stainless steel plugs. The microstructure of plug consists of retained austenite, martensite and alloy carbides at room temperature. The hot hardness of plug decreases at the temperatures near 600°C.

The additions of Ni, Co and Mo are effective to retard the softening at higher temperatures, but Si and Al accelerate the softening. The life of plug is extended by alloying 1.5~3 % Ni and by forming the tight oxide layer on its surface. The effect of rolling conditions on the life of plug is discussed. The influence of the factors such as heating temperature of billet, rolling speed in elongating mill and the size of shells are fully explained in terms of the change in the rolling temperature in plug mill.

1. 緒 言

知多製造所中径シームレス鋼管工場はマンネスマン・プラグミル方式による造管法を採用しており、ピアサー、エロンゲーター、プラグミル、リーラーの各ミルでそれ専用のプラグが使用されている。このように、プラグ圧延工程の多いことが上記造管法の特徴の一つである。それゆえに、プラグ耐用度は、特にシェル内面性状を健全に維持する観点から厳しく管理されている。

プラグ耐用度に対する材質、形状、圧延要因等の影響については、古くから多くの研究がなされている¹⁻⁵⁾。これらの報告を参考にすると、ピアサー用プラグとしてはCr-Ni 鋼、プラグミル用プ

ラグとしては高C 高Cr ステンレス鋼、そしてリーラー用プラグとしては特殊鉄が、それぞれ代表的プラグ材質として採用されている。当製造所小径シームレス鋼管工場では、ピアサー用プラグとして3%Cr-1%Ni 鋼が使用されている。この材質を中径シームレス鋼管用のピアサーおよびエロンゲーター用プラグに適用し、小径シームレス鋼管工場における同様に、良好なプラグ耐用度の操業成績をおさめている。リーラー用プラグとしては含Ni 鉄を使用している。リーラーでは、磨管作用を重視してプラグ交換時期を早目にしているが、リーラーでの減肉量は比較的小さいのが通例で、プラグ耐用度はピアサー用プラグのそれに近い実績を示している。一方、プラグミル用プラグの材質は、17%Cr 系および25%Cr 系を基本成

* 技術研究所知多研究室主任研究員・工博
** 知多製造所第2造管部シームレス管技術室
[昭和55年9月3日原稿受付]

** 技術研究所知多研究室室長
**** 知多製造所鍛造部鍛造管理室主査(掛長待遇)

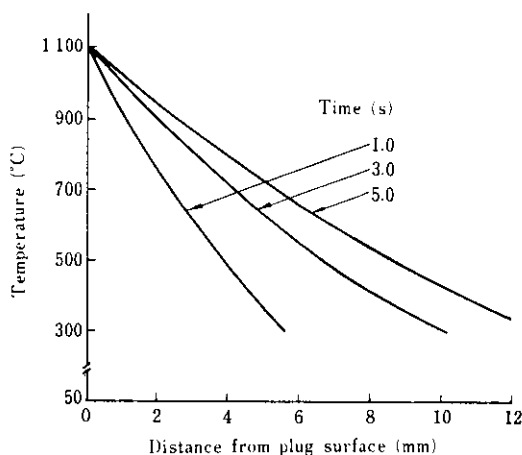


Fig. 2 Calculated temperature distribution in a plug

伝導を、半無限厚さのそれにおける x 方向への熱伝導と近似して、次式で推定した。

$$\frac{T_x - T_0}{T_1 - T_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_1 : プラグ表面温度

T_0 : プラグ内初期温度

T_x : 外表面より x の距離における温度

κ : 温度伝導度

t : 時間

である。Fig. 2 の計算にあたっては、 $T_1 = 1100 + 273$ (K), $T_0 = 50 + 273$ (K), $\kappa = 0.12 \text{ cm}^2/\text{s}^{6)}$ と仮定した。この図より、 800°C 以上に昇温する範囲は表面より約 3mm の深さまで達すること、 500°C くらいまでの熱影響部は約 6mm まで及ぶことが推測される。

(4) プラグ循環使用

4 個のプラグが順次圧延に使用される。圧延を

終えたプラグはロール直下に落下し水冷される。その後、回転ドラム中に収納され再び圧延に供される。こうした水冷による急冷と圧延時の急熱の繰り返しに対して熱亀裂の発生および進展の少ないことが望まれる。この性質は、また、改削してサイズダウンする際の再生加工代の減少に対しても有効となろう。このように、プラグの使用条件は酷しく、材質的に具備すべき特性もまた多面にわたる。ここで、実操業におけるプラグ取り替え状況を参考にすると、プラグ表面の摩耗あるいは局所的なエグレの深さが約 0.5mm 程度を交換基準にしている。こうした摩耗やエグレなどは、プラグの硬度、組織形態、表面性状などと密接な関係にあると思われる。この観点から、本報告では下記の項目を調査の重点対象とした。すなわち、

- (a) プラグ材の室温および高温硬度
- (b) 熱処理条件と組織形態
- (c) 実体プラグの寿命テスト

である。

3. プラグ材質の実験室的予備調査

3.1 実験方法

3.1.1 供試材

プラグ材の溶製は主に小型タンマン電気炉により、約 3kg の試料を溶解し、これを砂型に鋳込んだ。これより約 20mm 角の試片を切り出し、各種実験に供した。なお、CCT 図作成用の試片は 3mm ϕ 丸棒であって、これは熔融鉄合金を減圧した石英管中へ吸引して準備した。主要な溶製材の化学組成を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical compositions of plugs tested (wt %)

Symbol	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Others
H 180	1.45	0.73	0.72	18.1	0.18	1.01	—	
H 182	1.50	0.63	0.45	18.1	1.63	1.03	—	
H 182 W	1.40	0.55	0.55	17.8	1.46	0.84	—	W/3.34
H 183	1.43	0.65	0.67	18.1	3.20	0.90	—	W/0.96
H 186 C	1.88	0.71	0.53	17.5	6.10	0.71	—	Co/2.96
H 180 S	1.41	1.99	0.53	17.4	0.28	0.99	1.05	
H 180 A	1.40	1.24	0.63	17.4	0.21	1.04	2.15	
H 253	1.55	0.68	0.66	25.5	3.40	1.03	—	
H 253 S	1.93	2.66	0.77	26.3	3.10	1.62	—	

3・1・2 硬度試験

室温硬度はピッカース硬度計で荷重 10kg, 荷重時間 30s のもとに測定した。その際の試料は、溶製材をあらかじめ $1200^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ で溶体化しておき、これをさらに $700 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ の各温度に 4h 保持後空冷したものである。

熱間硬度の測定にはウィルソン型ロックウェル硬度計 (荷重 60kg) を用いた。このときの試料は、後述するように室温では最高硬度の得られる処理 ($1200^{\circ}\text{C} \times 2\text{h} \rightarrow 900^{\circ}\text{C} \times 4\text{h} \rightarrow \text{A.C.}$) を終えたものを充当した。試験温度範囲は室温から 800°C までとした。

3・1・3 連続冷却変態実験

CCT 図作成のための実験には富士電波工機製の formator-F を用いた。試験片寸法は $3\phi \times 10\text{mm}$ である。試料は鑄放し材を充当したが、これを装置内で $1150^{\circ}\text{C} \times 2\text{min}$ あるいは $900^{\circ}\text{C} \times 15\text{min}$ の熱処理を施してから、所定の冷却速度で変態挙動を調査した。

3・1・4 組織観察

各種熱処理材の内部組織および表面スケールの付着状況について検鏡した。腐食液には王水を使い、必要に応じて村上試薬を用いた。なお、試料の加熱は大気中雰囲気下での電気炉による。

3・2 実験結果および考察

3・2・1 室温硬度

Fig. 3 は、溶体化材に $700 \sim 1200^{\circ}\text{C} \times 4\text{h} \rightarrow \text{A.C.}$ の熱処理を施した後の硬度測定結果である。高 Cr 鋼は、大気中放冷によっても十分硬化することはよく知られている。しかしながら、Fig. 3 において、焼入れ硬度は加熱温度の上昇とともに増加するが、約 1100°C を超えると硬度低下が生じる。この理由は、後述するように、温度の上昇につれてオーステナイトへの C 固溶量が增大して焼入れ硬度が増加することと、反面、オーステナイトがそれだけ安定化されて、冷却に際してそのままの状態、すなわち残留オーステナイトとして存在する傾向が強まることによる。

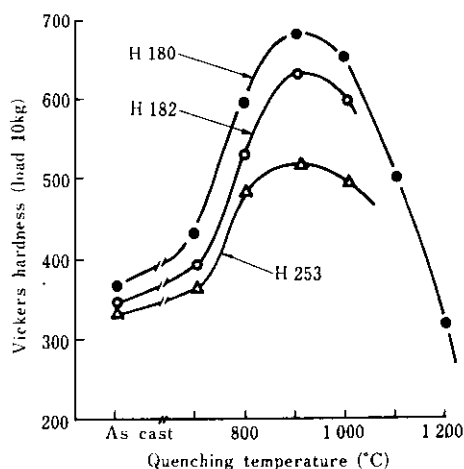


Fig. 3 Dependence of hardness on the quenching temperature

Fig. 3 の結果は小型試験片についてであって、実体プラグの熱処理に際しては質量効果による冷却速度の違いについて配慮する必要がある。この点についての実験結果の一例を Fig. 4 に示す。冷却速度は $150^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ($9000^{\circ}\text{C}/\text{h}$) の急冷から $0.52^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ($31^{\circ}\text{C}/\text{h}$) の徐冷程度まで変化させた。加熱温度 900°C からの冷却では、冷却速度 $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ですでにマルテンサイト変態が生じ、焼入れ硬度は $H_V \approx 600$ と高い。この冷却速度では、 900°C から室温までの冷却時間は 17 分程度とかなり短い。実体プラグの熱処理操業ではこれ以上の冷却時間を要するから、プラグはマルテンサイト変態を生じ十分硬化していると考えられる。一方、 1150°C の高温からの冷却に際しては、極端に緩慢な冷却速度の場合を除いて、残留オーステナイト組織になることが明らかとなった。このことは、また、鑄放しのプラグは残留オーステナイト組織になっていることを意味する。

以上の結果より、プラグの室温硬さを高くする観点からすれば、加熱温度を $800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ に選定することにより、通常の実空冷操作でプラグは十分に硬化することがわかる。

3・2・2 熱処理温度と組織

組織写真の典型例を Photo. 1 に示す。鑄放し材では、粒界に網目状に晶出した合金炭化物と残留オーステナイトからなる組織を呈している。加

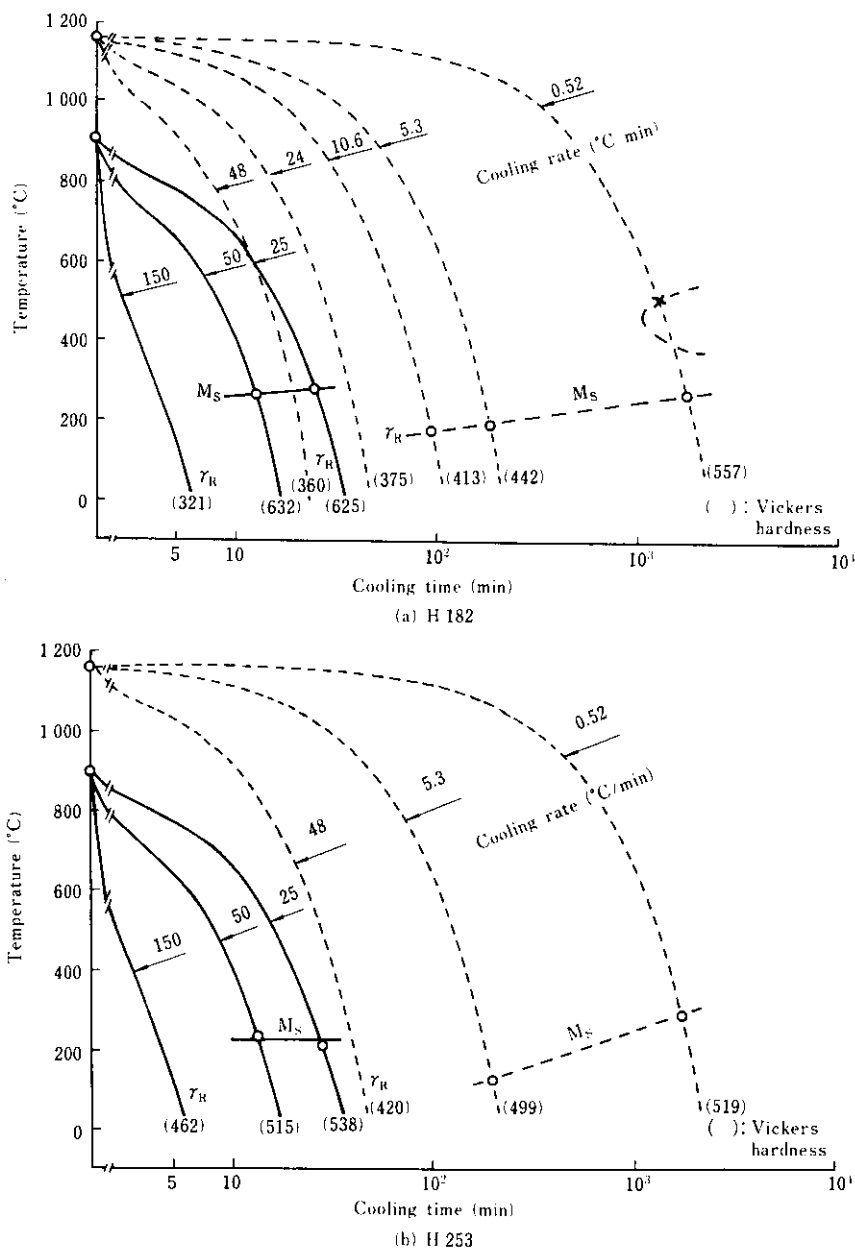


Fig. 4 CCT diagrams for (a) 1.4%C-18%Cr and (b) 25%Cr stainless steel plugs

熱温度が1200°Cでは、粒内に一部炭化物の析出を伴うが、その基地は依然として残留オーステナイトである。加熱温度をさらに下げて900°Cの場合には、粒内に微細な炭化物が多数分布し、基地はマルテンサイトに変態し、王水腐食により黒色を呈している。700°C加熱後空冷した試料ではフェライト基地になっている。こうした組織構成を知る資料としてFe-C-Cr系状態図⁷⁻¹⁰⁾をFig. 5

に示す。また、これに対する第4元素の影響を示す一例としてNiの場合¹⁰⁾を同図に掲げた。温度の上昇とともに、オーステナイトに対するC固溶量は増大すること、Niの添加はオーステナイトの出現する組成範囲を拡大することなどがわかる。このことは、焼入れ硬度と関連して前述したとおりである。

内部組織とは別に、高温加熱におけるプラグ表

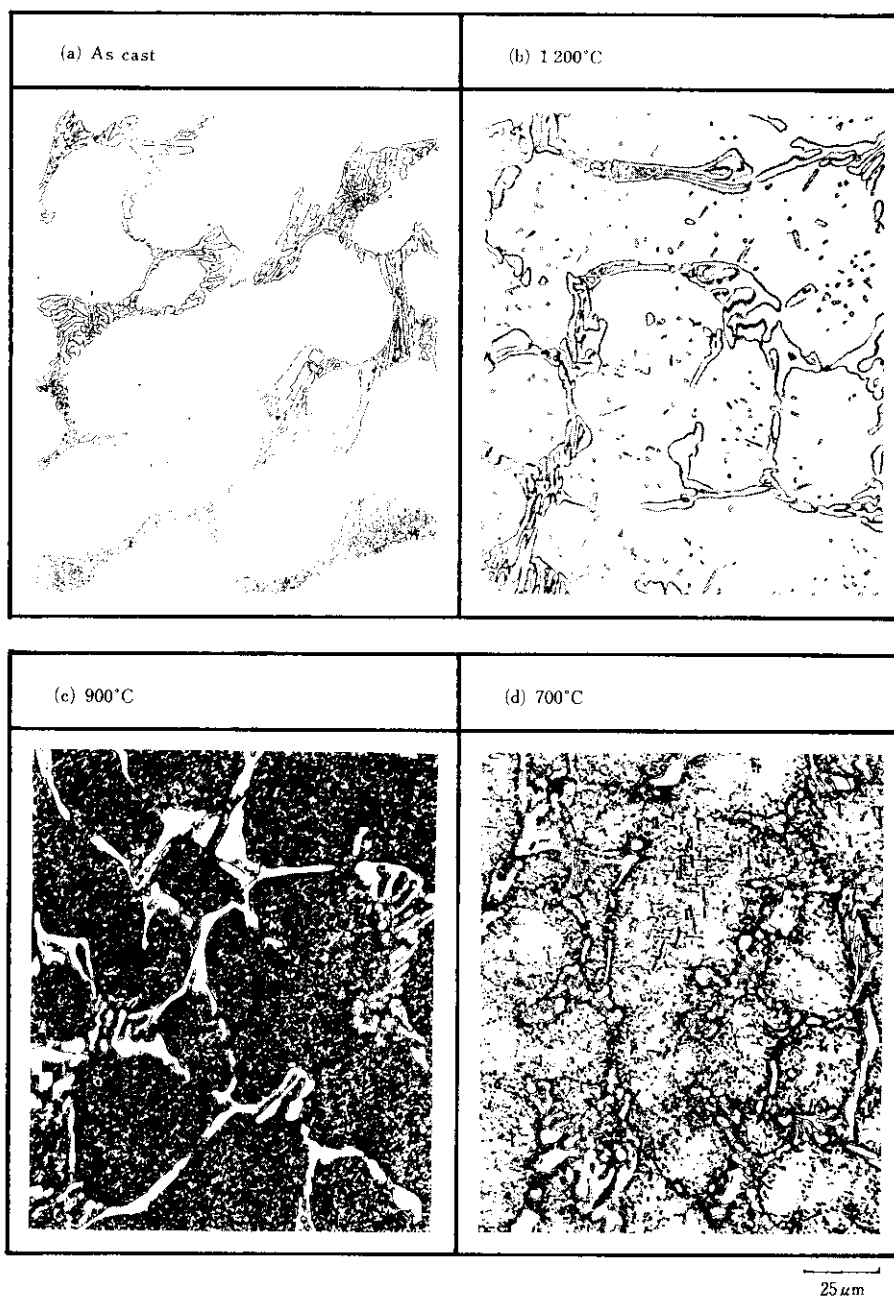


Photo. 1 Microstructure of plugs, as cast and air cooled from 1200, 900 and 700°C

面の酸化現象についても触れる必要があろう。各種試料を 900～1200°C で加熱したときのスケール層の厚みの実測例を Fig. 6 に示す。Ni や Co などの添加によるスケール厚みの差異はあまり顕著でないで、ここではこれらをまとめて基本成分系として一括して図示した。25%Cr 材ではスケール

の厚みは非常に薄く、1200°C×2h の加熱によってもわずか 30μm 程度であり、1150°C の加熱ではスケールの付着がまばらになる。一方、17%Cr 材では、1200°C×2h の加熱により約 150μm と比較的厚く成長する。こうしたプラグ表面のスケールの役割については、まだ十分に解明されていないが、

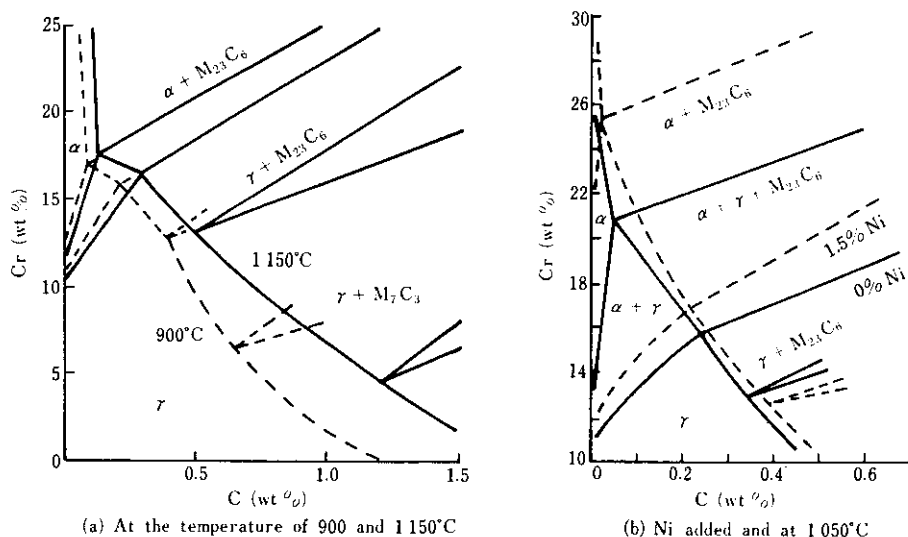


Fig. 5 Fe-C-Cr ternary phase diagram and the effect of Ni on it^{8,10)}

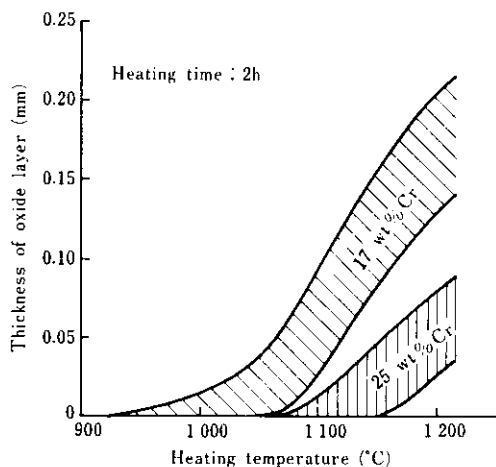


Fig. 6 Growth of oxide layer at elevated temperature

つぎのような効果が考えられる。一つは、スケールは熱伝導性が悪いので一種の断熱作用として働き、プラグ表面の温度上昇を少なくすることによってプラグ耐用度を向上させるとする考え方である。もう一つは、スケールが圧延鋼材とプラグ地肌との境界層として存在し、両者の直接的な接触を断つことにより焼付きや摩擦抵抗を軽減し、プラグ耐用度の延長に寄与するとする考え方である。このような効果に関して行った実機テストの結果については後述する。

3.2.3 熱間硬度

プラグの使用状況で説明したように、圧延時にはプラグ表面温度は約1100°Cに達すると推測される。したがって、高温硬度はプラグ耐用度を決定する重要な因子の一つであろう。Fig. 7は、室温から800°C付近までの熱間硬度の測定例を示す。約600°Cから硬度低下が認められ、それ以上の温度になるにつれ硬度は急激に減少するのが共通した特徴である。18%Cr材は室温硬度では他の合金に優るが、熱間硬度の低下が特に著しい。18%Cr-6%Ni-3%Co材は熱間硬度の低下は少ないが、反面、室温硬度において他に劣る。18%Cr-

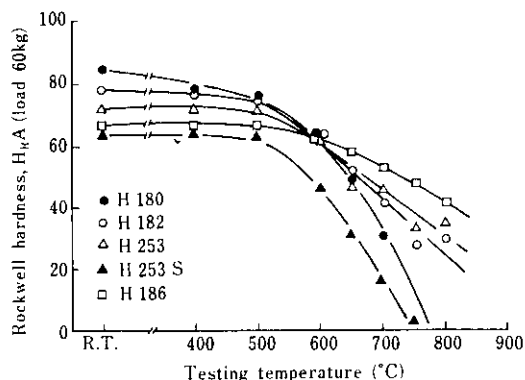


Fig. 7 Effect of alloying elements on the hot hardness of plug

2%Ni および 25%Cr 材はこれらのほぼ中間的特徴を呈している。実際のプラグ耐用度は、これら室温および高温硬度の両者の効果に依存すると考えられるので、これらの点を勘案して実体プラグの耐用度試験を進めた。

4. 実体プラグの耐用度試験

4.1 表面スケールの効果

4.1.1 実験方法

プラグ表面のスケール層のプラグ耐用度に対する効果を確認するために、比較的厚いスケールの生成される 17%Cr 材について実機テストを行った。プラグ径は機械加工仕上げで、250、250.4 および 250.8mm の 3 種類を用意した。これらを 1200°C × 2h → 900°C × 4h → A.C. の熱処理後に、後者 2 種のプラグについてはさらに表面を軽切削して、それぞれ約 250φmm ずつに仕上げた。すなわち、一つは片肉約 0.2mm、他の一つは片肉約 0.4mm 削除されたわけであり、それぞれは地鉄付近のスケールがわずかに残存したプラグおよび全くスケールの付着していない、機械加工仕上げのままのプラグに対応する。これらのプラグを以下ではスケール小およびスケール無しのプラグと呼ぶこととし、上記熱処理したままのプラグを比較材として、それぞれ実機テストに供した。

4.1.2 実験結果

実験結果を Fig. 8 に示す。スケールを全て削り落したプラグの耐用度が最も低く、比較材のその約 1/5 になっている。一方、スケールをわずかに残存するプラグの耐用度は比較材のそれとかなり近い成績を示した。この結果は、熱処理時に生成されたスケール層の大半は圧延に際して剥離してしまうのであるが、しかし、地鉄に密着して残存するスケール層がプラグ耐用度に大きな効果をもつことを示唆するものと考えられることができる。

4.2 試験プラグの耐用度

4.2.1 調査方法

プラグ耐用度試験は比較的大口ロットにおいて、

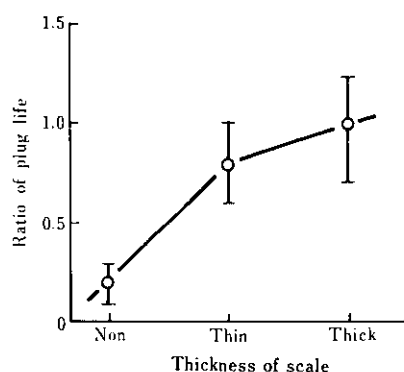


Fig. 8 Effect of the thickness of oxide layer on the life of plug in plug mill rolling

実験プラグ 2 個および比較材プラグ 2 個の 4 個循環の組合せにして行った。しかし、これらの実機テストはいくつかの圧延ロットにわたって割りつけられたので、造管サイズ、鋼種あるいは圧延条件等の違いによって、プラグ耐用度の評価もまた異なることが予想される。それゆえ、まず、工程的に使用されているプラグについて、その耐用度に対する各種圧延要因の影響を明らかにする必要がある。そのためには、当工場に導入されたコンピューターコントロール・システムにより自動的に採取されている各種ロギングデータを解析に用いた。さらに、プラグ材質についての実験室的調査結果を参考として、いくつかの成分系の実体プラグを溶製し現場実験に供した。この実験では、試験プラグおよび工程品プラグの両方についての耐用度が評価されるので、これに圧延要因の変動による補正を加えることにより、各種試験プラグ間の耐用度を正當に比較できるようにした。

4.2.2 プラグ耐用度に対する圧延要因の影響

操業上、プラグの準備個数は圧延ロットの大きさ、造管サイズ、鋼種などを勘案して決定され、その圧延実績からプラグ耐用度は知られている。まず、そのデータを整理すると、Fig. 9 に示すように、プラグ耐用度は圧延素管の肉厚に最も強く依存することがわかる。これらは、いわゆる標準の圧延条件のもとでのプラグ耐用度の実績であって、たとえば圧延温度がその標準値よりも変動した場合についての実例を示せば Fig. 10 のように

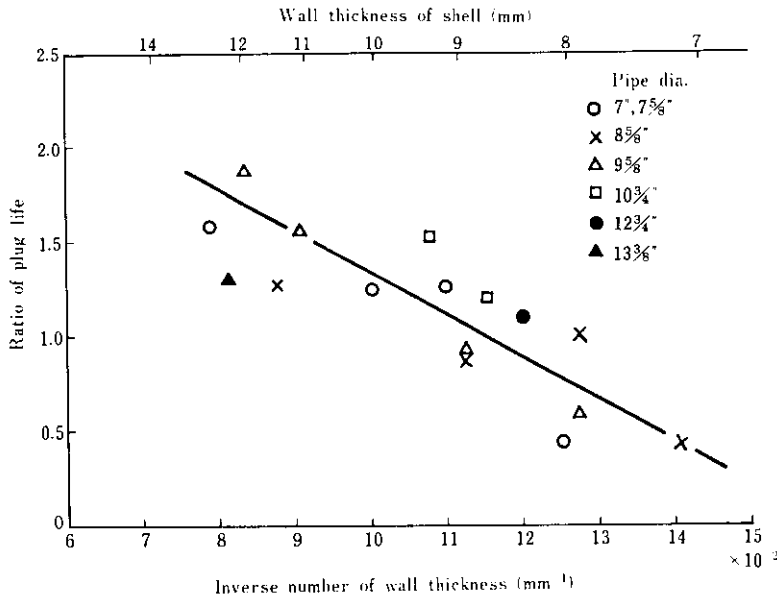


Fig. 9 Dependence of the life of plug on the wall thickness of shell

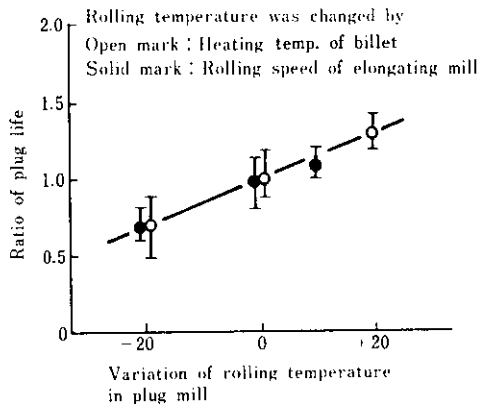


Fig. 10 Effect of rolling temperature in plug mill on the life of plug

なる。この図は、回転加熱炉の設定温度を標準値より $\pm 20^\circ\text{C}$ 変化させた場合のプラグ耐用度の変動を示したものである。ビレットの加熱温度が約 40°C 低下するとプラグ耐用度は半減することがわかる。回転加熱炉の設定温度は、鋼種や変形能の制約上、大幅に変動するものではないが、圧延温度のプラグ耐用度に対する影響を示す一例とした。これと同様のことがエロンゲーター圧延速度の影響としても認められる。すなわち、エロンゲーターの圧延時間が長びくほど素管の放熱による温度

低下が大きいからである。ここで、放熱による素管の温度低下を次式により近似して解析している。

$$\Delta T = T_1 \left[1 - \left\{ 1 + \frac{3\beta\epsilon\sigma}{c\rho t} \tau T_1^3 \right\}^{-1/3} \right]$$

$$\cong \left(\frac{\beta\epsilon\sigma}{c\rho} \right) \cdot \frac{1}{t} \cdot \tau \cdot T_1^4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T_1 : 初期温度

τ : 放熱時間

t : 素管肉厚

ϵ : 放射率

σ : スティファンボルツマン定数

c : 比熱

ρ : 密度

β : 形状係数

である。

上式からわかるように、薄肉材ほど温度低下が大きいことになる。前掲の Fig. 9 で示した結果もこの点から解釈することができよう。

4・2・3 プラグ耐用度に対する プラグ成分の影響

各種成分のプラグ耐用度に及ぼす試験結果の一例を Fig. 11 に示す。この図では、実験プラグの耐用度を、これと同時に使用された比較材プラグの

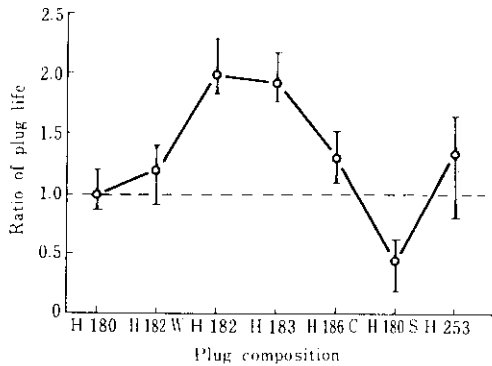


Fig. 11 Effect of plug composition on its life in the plug mill rolling

耐用度との比で表示した。これより、1.5～3%のNiの添加がプラグ耐用度の向上に効果的であることがわかった。添加元素の効果の機構についての詳細は明らかでないが、Niの添加により焼入れ硬度を減少させることなく熱間硬度の低下を抑制する効果 (Fig. 7 参照) ならびに、Niの影響としてよく知られているように、軟化抵抗の増大、密着性のよいスケールの生成、靱性の向上などの効果が考えられよう¹¹⁾。

5. 結 言

プラグミル方式の継目無鋼管製造においては、プラグを用いる圧延工程が大半であって、鋼管品質上、プラグ耐用度は厳しい管理項目の一つである。特にプラグミル用プラグは、圧延寸法精度の向上と素管内面擦りきずの防止の観点から、プラ

グ交換時期は比較的是やい。

本研究では、17～25%Cr系ステンレス鋼のプラグミル用プラグの材質に調査対象を絞り、実験室的には金属組織学的調査を、実機ミルでは実体プラグの耐用度試験などを行うことにより、当工場に適合したプラグ成分と熱処理条件を選定した。本研究で得られた結果を要約するとつぎのようである。

- (1) 鑄放し材あるいは1100℃以上で溶体化処理後空冷されたプラグ材の組織は、粒界の初晶合金炭化物と粒内の主に残留オーステナイトよりなる。
- (2) 溶体化温度を800～1000℃にすると、空冷によってマルテンサイト変態を生じ、十分な白硬性を示すと同時に、粒内に微細な炭化物が析出する。2～3%のNiの添加は焼入れ硬度をわずかに低下させる。
- (3) プラグ材の熱間硬度は約600℃以上から急激に低下するのが一般的傾向であるが、Ni, Co, Moなどの添加は熱間硬度の低下の度合いを抑制するのに効果的である。Si, Alの添加は熱間硬度を低下させる。
- (4) プラグ表面のスケール層はプラグ耐用度の延長に効果的である。均一で厚いスケールを生成するためには、17%Cr材では1150℃以上、25%Cr材では1200℃以上の高温加熱が必要となる。
- (5) プラグ耐用度に対する影響因子として、ピレット加熱温度、エロンゲーターにおける圧延速度と時間、圧延素管サイズ、鋼種などが評価された。
- (6) 実体プラグの耐用度試験では、1.5～3%Niを添加した18%Cr材が好成績を示した。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会共同研究会鋼管部会：わが国における最近の鋼管製造技術の進歩 (日本鉄鋼協会編), (1974), 130, [日本鉄鋼協会]
- 2) 日本鉄鋼協会共同研究会鋼管部会継目無鋼管分科会：鋼管部会第22回継目無鋼管分科会資料, S 2-3 (日本鉄鋼協会), (1978)
- 3) 橋本, 梅沢, 日下部：鉄と鋼, 46 (1960), 1256
- 4) T. Z. Blazynski: Metal forming, (1976), 309, [Macmillan Press]
- 5) 浜鍋, 大貫, 菊間, 柴田, 中島：昭和54年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1979), 469
- 6) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger: Conduction of heat in solids, (1959), 58, 497, [Oxford University Press]
- 7) K. Bungardt, H. Preisendanz and G. Lehnert: Arch. Eisenhüttenw. 35 (1964), 999
- 8) R. Benz, J. F. Elliott and J. Chipman: Met. Trans., 5 (1974), 2235

-
- 9) T. Nishizawa and B. Uhrenius: Scand. J. Metal, 6 (1977), 67
 - 10) K. Bungardt, E. Kunze and E. Horn: Archiv. Eisenhüttenw. 39 (1968), 863
 - 11) 藤田：ステンレス鋼の熱処理, (1970), 19, [日刊工業新聞社]