

技術報告

水車ランナー用 17Cr-5Ni-1Mo 铸鋼の耐食性と機械的性質

岩 瀨 義孝*・波多野隆司*・竹之内朋夫*
吉本 一夫*・宮本 剛汎*²

Corrosion Resistance and Mechanical Properties of 17Cr-5Ni-1Mo Cast Steel for Hydraulic Runner

Yoshitaka IWABUCHI, Takashi HATANO, Tomoo TAKENOUGH, Kazuo YOSHIMOTO, and Takehiro MIYAMOTO

Synopsis :

In order to develop a new hydraulic runner casting with a good corrosion resistance, studies have been carried out on some properties of several Cr-Ni martensitic stainless cast steels. The properties of a partial model runner casting of the developed 17Cr-5Ni-1Mo steel were investigated. The results are as follows.

1. Internal quality of this casting is superior and comparable with that of 13Cr-Ni type casting in terms of cavity and macrosegregation.
2. Excellent corrosion resistance is performed by higher chromium content and 1% molybdenum addition.
3. Charpy impact properties are almost same as those of 13Cr-1Ni casting. This is attributed to delta ferrite.
4. Enhanced fatigue strength stems from higher corrosion resistance and tensile strength.
5. This casting also possesses good weldability.

1. 緒 言

13Cr-1Ni (ASTM CA-15) および 13Cr-4Ni (ASTM CA6NM) で代表される低炭素 13Cr-Ni 系マルテンサイトステンレス铸鋼は、高強度、靱延性、キャビテーションエロージョン性能が得られることから水車ランナー材として広く用いられている^{1)~3)}反面、オーステナイト系ステンレス鋼よりも耐食性および腐食疲労強度は劣るものであつた。

一方、欧州において約 20 年前から使用されてきた 16.5Cr-4Ni 系マルテンサイトステンレス铸鋼は、Cr 量を高めたことによつて耐食性が向上すると報告^{4)~7)}されているが、日本国内ならびに米国における製造経験は極めて少ない。

そこで、本報では 16.5Cr-4Ni 鋼を基本に耐食性の優れたランナー材組成を決定するとともに、大型ランナー部分モデルを製造し、内部性状、機械的性質等水車ランナーに要求される品質を評価した。

2. 化学成分の選定

2.1 供試材および実験方法

2.1.1 供試材と熱処理

供試材は 16.5Cr-4Ni 鋼を基本組成に Cr, Cu, Mo を変動因子とし、他成分は工業的レベルで一定とした。このような鋼種は高周波誘導炉にてそれぞれ 50 kg 溶製して自硬性砂型に铸込んだ。得られた化学成分を Table 1 に示す。熱処理は铸造組織の均質化、炭化物の固溶ならびに結晶粒の微細化の点から、1050°C 焼鈍 + 950°C 焼準を行い、焼もどしは 600°C と 630°C で行つた。

2.1.2 ミクロ組織観察と機械試験

ミクロ組織は供試材を研磨後酸性ピクリン酸エッチし光学顕微鏡観察した。引張試験はインストロン型引張試験機を用い、10 mm dia., 50 mm G. L. 試験片で行つた。ここで歪み速度は 0.5% まで 0.3%/min で試験した。また、シャルピー衝撃試験は JIS 4号 2 mmV ノッ

Table 1. Chemical composition range of laboratory made castings (wt %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
0.04*	0.30*	0.75*	0.015*	0.020*	3.75	12.30	0.05	0.01
					6.10	17.50	1.10	1.00

* Mean value

昭和 58 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 10 月 18 日受付 (Received Oct. 18, 1983)

* (株)日本製鋼所室蘭製作所 (Muroran Plant, The Japan Steel Works Ltd., 4 Chatsu-cho Muroran 051)

*² (株)日本製鋼所室蘭製作所 工博 (Muroran Plant, The Japan Steel Works Ltd.)

シャルピー衝撃試験片を用い、 -100°C ～ 200°C で行った。

2.1.3 疲労試験

小野式回転曲げ疲労試験機を用い、平滑ならびに $K_t=2.5$ の切り欠き試験片により海水滴下条件、繰り返し速度 1500 rpm で行つた。

2.1.4 キャピテーションエロージョン試験

500 W 超音波エロージョン試験機(島田理工業製ニッケル積層ホーン形)を用い、振動数 6.5 ± 0.05 kHz、振幅 50～90 μm 、室温水道水中(液深: 110 mm、試験片浸漬深度: 3 mm)で 30 min ごと、4回 120 min 試験し重量減を測定した。

2.1.5 アノード分極測定

供試材はエメリー紙で # 800 まで研磨し、 10×10 mm の試験面以外は樹脂で被覆した。電解液は $\text{1NH}_2\text{SO}_4+20000$ ppm Cl^- で、照合電極は甘こう電極を用いた。アノード分極測定は -0.7 V で 2 min カソード還元したのち、電位掃引速度 100 mV/min で行つた。

2.2 結果および考察

Photo. 1 に各供試材のマイクロ組織を示す。いずれも基地は焼もどしマルテンサイトであるが、13Cr-4Ni 以外は数%～20% のデルタフェライトを含んでいる。このようなデルタフェライト量と化学成分との関係については多くの報告があり、オーステナイト系ステンレス鋳鋼の場合は SCHAEFFLER の状態図⁹⁾により、デルタフェ

ライト量は比較的良好な精度で求めることができる⁹⁾。一方、マルテンサイトステンレス鋳鋼ではデルタフェライト量を化学成分から定量的に推測することは難しいが、Fig. 1 に示すように Ni 当量の低下または Cr 当量の上昇により、デルタフェライトが増加することが SCHNEIDER¹⁰⁾ 図から明らかである。

各試料の引張りおよび衝撃性質を Fig. 2 に示す。強度および延性は Cr, Ni, Mo 量にあまり依存せず、約 80 kg/mm² の引張強さレベルで十分な延性を有しているが、衝撃値は Cr 当量の高い試料ほど低くなる傾向が認められる。これは Fig. 3 の衝撃値とデルタフェライト量の関係で示されるように、衝撃値の低下はデルタフ

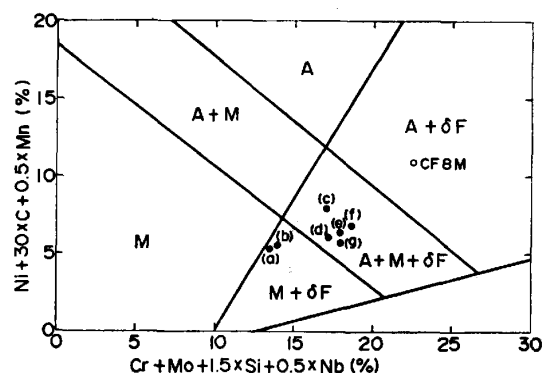


Fig. 1. Schneider diagram for showing the effect of chemistry on the phase, (a) 13Cr-4Ni-0.45Mo (b) 13Cr-4Ni-0.5Mo-1Cu, (c) 16.5Cr-6Ni, (d) 16.5Cr-4.5Ni, (e) 16.5Cr-4.5Ni-1Mo, (f) 17Cr-5Ni-1Mo, (g) 17Cr-4Ni-0.45Mo-1Cu.

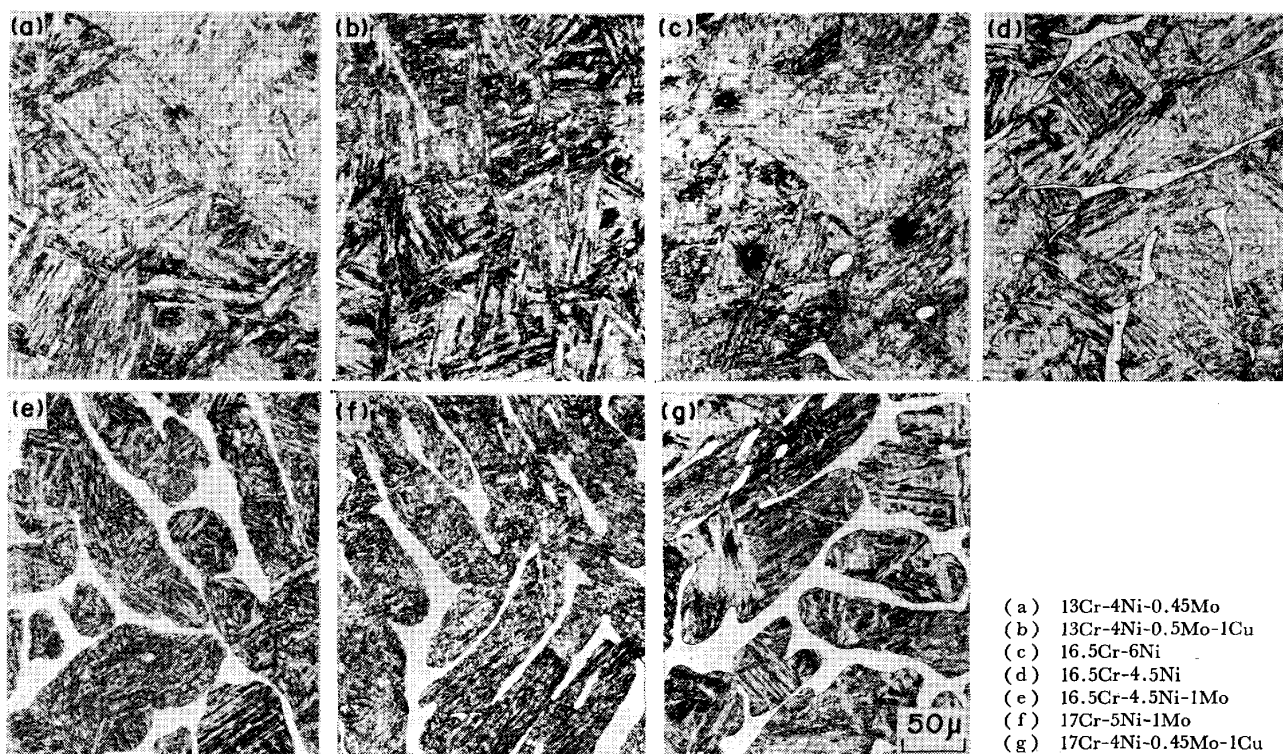


Photo. 1. Microstructures of different martensitic stainless cast steels normalized and tempered.

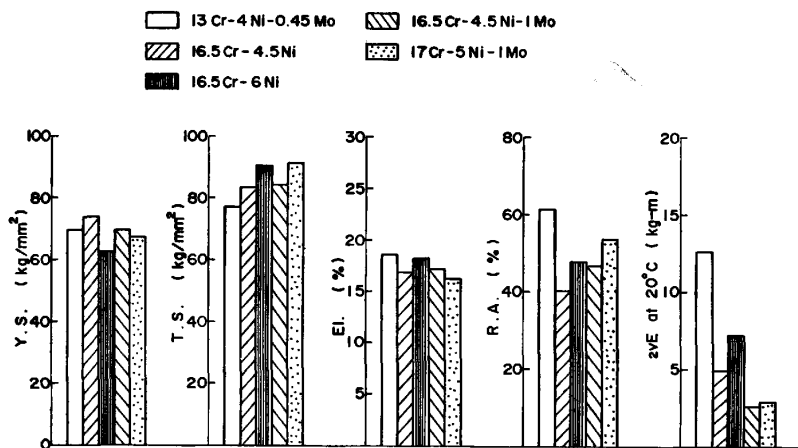


Fig. 2. Comparison of mechanical properties.

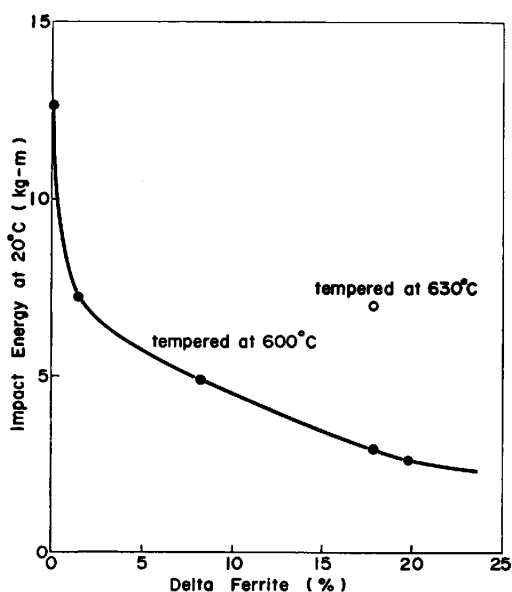


Fig. 3. Effect of delta ferrite on impact energy.

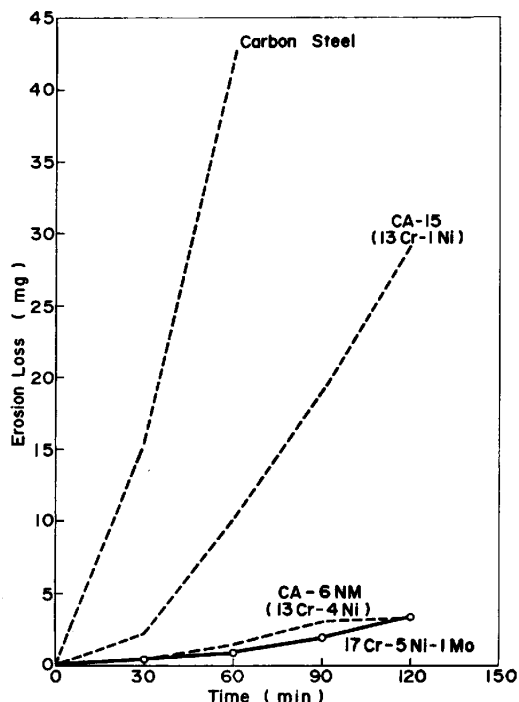


Fig. 5. Cavitation erosion loss vs. elapsed time.

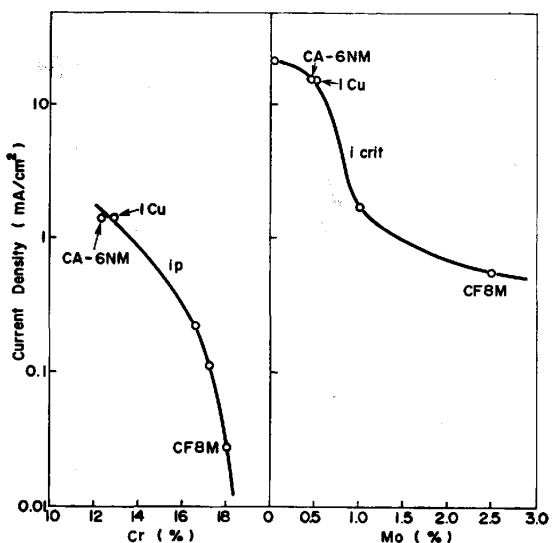


Fig. 4. Effect of Cr and Mo content on passivity.

エライト量の増加に起因するもので、衝撃歪みが軟質層であるデルタフェライト界面に集中し、へき開破壊単位が大きくなるためと考えられる。

次に本試験における最大の関心事である耐食性については電気化学特性により評価した。Fig. 4 は定電位法で測定したアノード分極曲線から得られる不働態化臨界電流密度 (i_{crit}) および不働態化保持電流密度 (i_p) と Cr 量または Mo 量との関係を示した。これから、 i_p は Cr 量の増加とともに顕著に低下し、また i_{crit} は 1% Mo までは添加量による低下が大きく、それ以上では緩慢であることがわかる。さらに、不働態電位域も Cr ならびに Mo 量の増加とともに広くなり、CF8M (19Cr-9Ni-2.5Mo) に近くなるが、一方、Cu はアノード分極曲線をほとんど変えず、耐食性に及ぼす効果は小さいと判断される。

したがって、不働態化を容易にしかつ不働態状態における腐食速度を小さくするためには、Cr 量の増加ならびに 1% 程度の Mo 添加が必要であることがわかつ

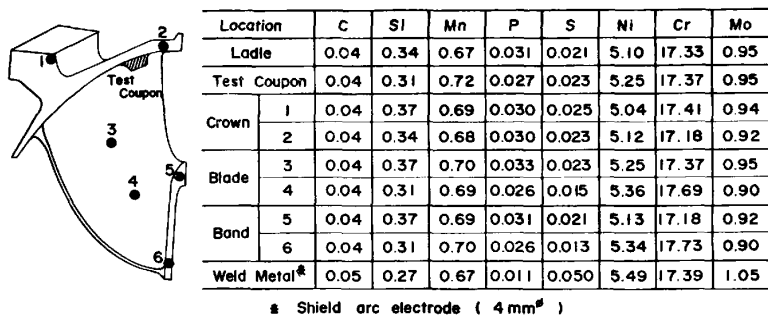


Table 2. Chemical composition of a model casting (wt %).

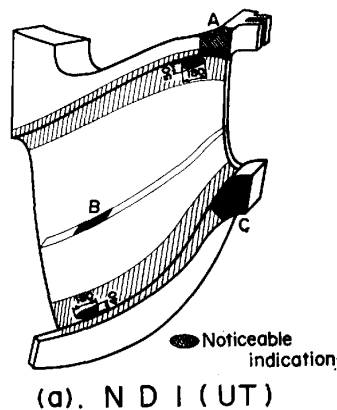
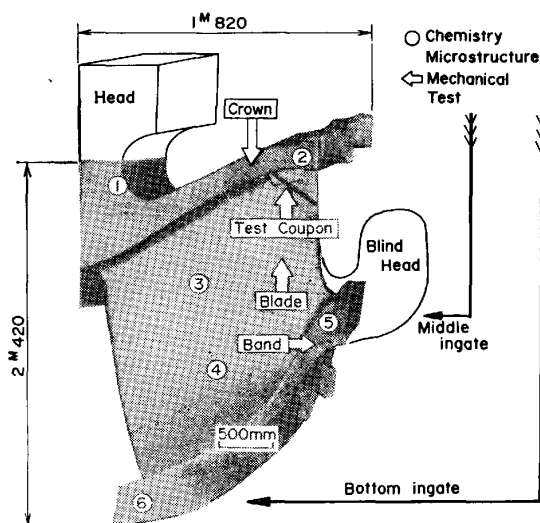


Photo. 2. Casting design and general view of a partial model runner casting.

た。他方, Fig. 3 に示されているように, Cr ならびに Mo 量の増加は Cr 当量を高めデルタフェライト量を増加させ衝撃性質が低下するので好ましくないが, 靱性は焼もどし温度を 630°C にすることにより改善され (Fig. 3), 本試験では耐食性を向上させ CF8M 相当にすることを最大のポイントに置き, 17Cr-5Ni-1Mo 鋳鋼を選定した。

なお, 17Cr-5Ni-1Mo 鋳鋼のキャビテーションエロージョン性質は Fig. 5 に示すように CA-6NM に匹敵するものであり, ランナー材料として十分満足するものである。

3. 水車ランナー部分モデルの評価

3.1 製造要領および試験

供試鋳鋼は 200 MW 級大型フランシスランナーのブレード 1 枚分を分割した形状で, Crown, Blade, Band とともに実機サイズを有する部分モデルであり, 10 t 塩基性電気炉にて溶製しクロマイト砂自硬性砂型に鋳込んだ。得られた化学成分を Table 2 に示す。Photo. 2 は供試部分モデルの概略鋳造方案と熱処理後の外観を示し

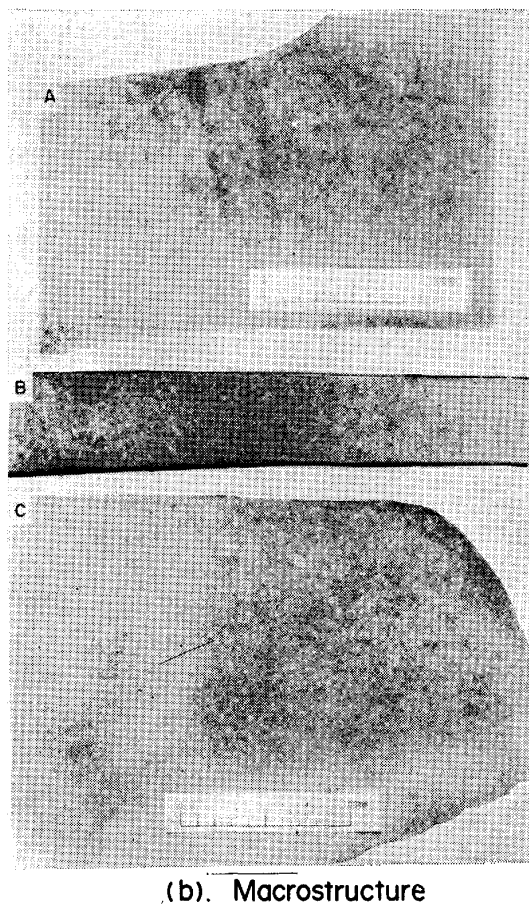


Photo. 3. UT indication and macrostructures at the cross sections of crown, blade and band in a model runner casting.

たもので、シュリンケージキャビティを低減する目的から Crown 上部と Blade に押湯を設けるとともに、鋳込速度を一定に保つため下段、中段、2 箇所のをせきから鋳込³⁾¹²⁾だ。熱処理は 2・2 の結果に基づき押湯をガス切断除去した後に、1050°C×10h→炉冷→950°C×10h→衝風冷却→630°C×10h→炉冷を施した。次いで、実機における補修溶接後の SR を考慮し、さらに 600°C×10h→炉冷を行い試験に供した。

試験は超音波探傷試験 (UT)、マクロ腐食試験を行った後各部より採取した試験片を用いて、化学分析による偏析調査、組織観察、引張試験、衝撃試験、アノード分極測定、小野式回転曲げ腐食疲労試験および斜め Y 型拘束溶接割れ試験を行った。ここで、各試験方法の詳細は 2・1 に述べたとおりで、試験位置および試験片採取位置は Photo. 2 に併記した。なお、超音波探傷試験は B2SN, MB2SN と MWB45N2 探触子を用い、2MHz で垂直ならびに斜角により行った。また、斜め Y 型拘束試験は JIS Z 3158 に準拠し、Table 2 に示した 4 mmφ 共金溶接棒を用い、25°~75°C の予熱条件で試験ビード溶接を行った。

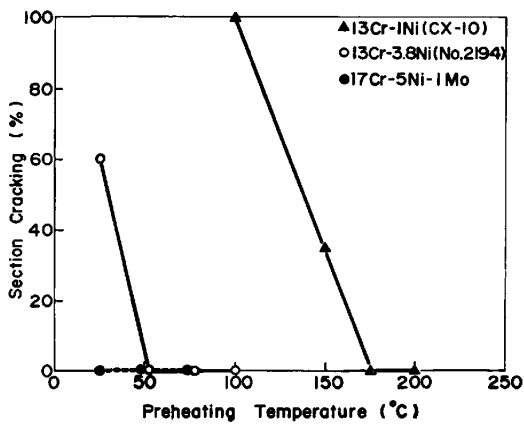


Fig. 6. Weldability of 17Cr-5Ni-1Mo cast steel.

3・2 結果および考察

3・2・1 モデルランナーの健全性と溶接性

モデルランナーの外観 (Photo. 2) から明らかなように、鋳造性低下に起因するような表面欠陥 (例えば湯じわ、砂かみ、ブローホール) は認められず、また各部位の化学成分は Table 2 に示したように、Crown, Blade, Band ならびに Test Coupon とも均一であり、合金成分の偏析は認められない。

Crown ならびに Band の付根部について行った UT の結果と各断面のマクロ腐食組織を Photo. 3 に示す。UT 欠陥はすべてマイクロキャビティであり付根の一部のみしか認められず、またマクロ組織は凝固冷却速度の遅い Crown 側では一次晶が幾分粗くなっているが、逆 V ならびに V 偏析やき裂は全く観察されず、健全なランナーであることが確認された。

Photo. 4 に各部より採取した試料の顕微鏡組織を示す。写真から明らかなように、デルタフェライトを 15% 前後含む焼もどしマルテンサイト組織であり、厚肉を有する Crown, Band からの試料ではデルタフェライトが粗く分布しているが大きな差異はなく、前述した UT ならびにマクロ組織の結果とともに健全なランナーであることがわかる。

次に、鋳鋼品として不可避免的に生じる鋳造欠陥の補修に対して要求される溶接性に関して、斜め Y 型拘束割れ試験結果を予熱温度と断面割れ率の関係で Fig. 6 に示す。従来ランナー材料として用いられている 13Cr-Ni 系鋳鋼¹²⁾では 1Ni³⁾ の場合 125°C 以下で、また 4Ni では 50°C 以下においては冷間割れが発生するが、本鋼では室温まで全く割れを生じていないことから溶接性の優れた鋳鋼であると言える。

3・2・2 モデルランナーの機械的性質と耐食性

モデルランナー各部より採取した試料の機械的性質を Fig. 7 に示す。引張強さならびに降伏応力ともほとんど

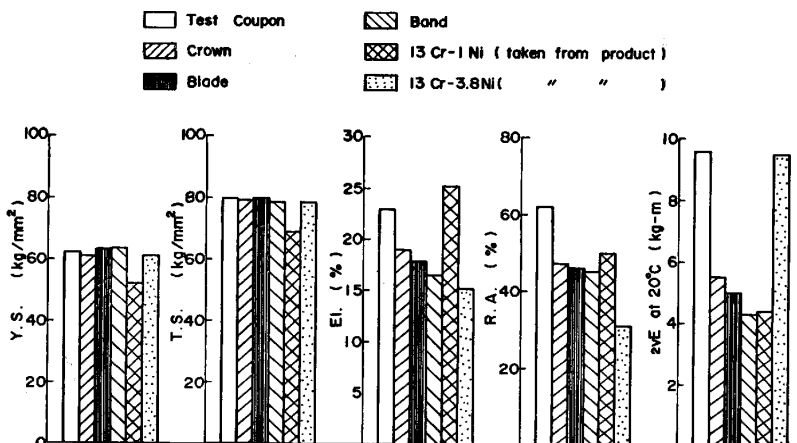


Fig. 7. Mechanical properties of the specimens taken from each location of a model runner casting.

ど採取位置による差はない。しかし、伸び、絞りおよび衝撃値は Test Coupon が最も高い値を示し、他はそれよりも低い傾向を示すが Crown, Blade, Band における差は小さい。このような Test Coupon と本体との靱延性の相違は凝固冷却速度に起因するもので、本体試料のマイクロポロシティ存在頻度ならびにデルタフェライト量が多く、また粗大であることが影響しているものと推測される。ここで、従来より水車ランナー材として使用

されている CA-15³⁾ ならびに CA-6NM²⁾¹²⁾ と機械的性質を比較してみると、Fig. 7 に示されているように、強度延性は CA-6NM と同等であるが、多量に含まれるデルタフェライトにより衝撃値は CA-15 に近い値を有していることがわかる。

Fig. 8 は各部より採取した試料のアノード分極曲線で、小型試料による結果同様、 i_p , i_{crit} は CA-6NM と CF8M の中間に位置するものであり、また各試料の差も小さく、優れた耐食性を有することが確認された。

ところで、水車ランナー材として重要な疲労強度については、本試験の場合腐食環境を考慮して海水滴下条件で行い、CF8M ならびに CA-6NM と比較検討した。この結果を Fig. 9 に示す。図から明らかなように切り欠き効果も小さく、また $K_t=2.5$ の切り欠き疲労強度は 10^7 サイクルで比較すると 13 kg/mm^2 以上あり、CF8M や CA-6NM に比べ $10\sim 20\%$ 高い疲労寿命を有していることが確認された。これは CA-6NM に対して Cr 量を増加し、かつ Mo を 1% 添加することによつて耐食性が向上し、またマルテンサイトステンレス鋼であることから CF8M よりもはるかに高い強度が得られることによるものと推測される。

4. 結 言

耐食性および腐食疲労強度の優れた水車ランナーの開発を目的に、小型試料で化学成分の選定を行い種々検討するとともに、17Cr-5Ni-1Mo 鋳鋼大型ランナー部分モデルを製造し、内部健全性、機械的性質等について調査検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 超音波探傷試験、マクロ腐食組織ならびに化学

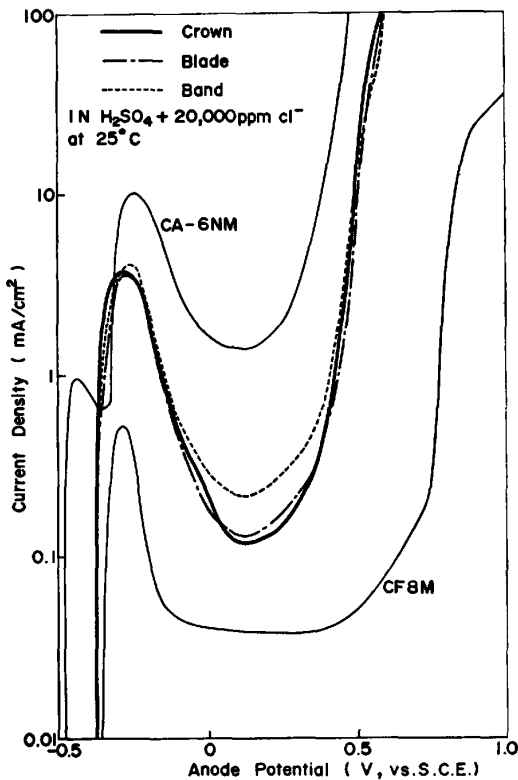


Fig. 8. Potentiostatic polarization curves of the specimens taken from each location of a model runner casting in $1\text{N H}_2\text{SO}_4 + \text{Cl}^-$ solution.

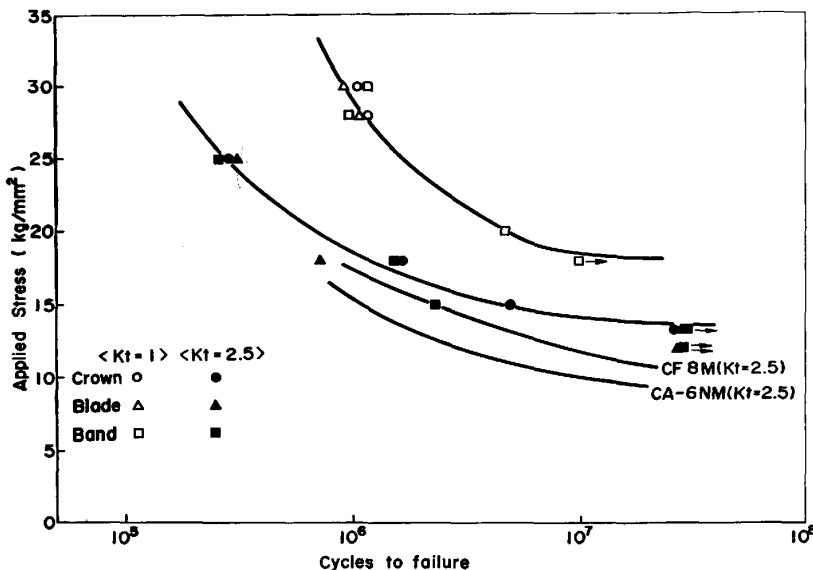
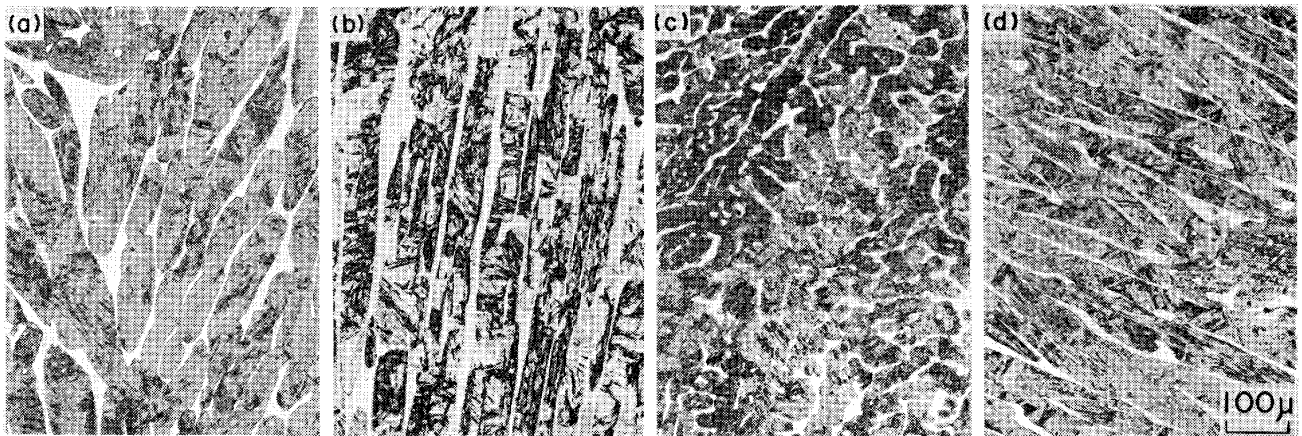


Fig. 9. S-N curves in sea water for the specimen taken from each location of a model runner casting.



(a) Crown, (b) Blade, (c) Band, (d) Test Coupon

Photo. 4. Microstructures at several locations of a model runner casting.

分析などの結果から、内部性状は 13Cr-Ni 系鋳鋼ランナー同様比較的良好であることが判明した。

(2) 質量効果は小さく、また 13Cr-4Ni と同程度の引張り性質が得られるが、デルタフェライトを約 15% 含む焼もどしマルテンサイトであるため、衝撃性質は 13Cr-1Ni なみである。

(3) 優れた耐食性は Cr 量の増加と Mo 添加により達成され、また高い腐食疲労強度は耐食性の向上と高強度により得られるものと推定される。

(4) 斜め Y 型拘束割れ試験から、予熱なしでも溶接冷間割れが起こらないことが確認された。

(5) 従来水車ランナー材として使用されている 13Cr-1Ni および 4Ni 鋳鋼に比較して、本実験の 17Cr-5Ni-1Mo 鋳鋼ランナーは製造性ならびに製造要領が同等であるのに対して、耐食性、腐食疲労強度が極めて優れていることから、腐食環境の厳しい河川などにおける水車ランナー材として、十分その使用が可能と考えられる。

文 献

- 1) 徳田 昭, 熊田有宏, 中川嘉一: 日本製鋼所技報, 21 (1970), p. 3142
- 2) Y. IWABUCHI and S. SAWADA: ASTM STP 756 (1982), p. 332
- 3) Y. IWABUCHI and K. SUZUKI: AFS Transaction, 41 (1982), p. 411
- 4) N. F. MOIT: Iron Age, 171 (1953) 24, p. 125
- 5) G. E. LINNERT: Welding J., 36 (1957) 1, p. 9
- 6) P. BREZINA: Escher-Wyss-Mitteilungen, 1 (1980) 2, p. 218
- 7) H. J. NIEDERAU: ASTM STP 756 (1982), p. 382
- 8) A. L. SCHAEFFLER: Metal Progress, 56 (1949), p. 680
- 9) 田辺潤平, 板垣純司: 日本製鋼所技報, 30(1979), p. 13
- 10) H. SCHNEIDER: Foundry Trade J., 108(1960), p. 562
- 11) 柴田俊夫: 防食技術, 18 (1969) 9, p. 415
- 12) N. HIRAOKA, K. WATANABE, T. MIYAMOTO, and S. JIN: JSW Technical Review, (1977) 13, p. 23