

溶接構造用 13%Cr-5%Ni マルテンサイト系 ステンレス厚鋼板の高強度化と超高速水中翼船への適用*

川崎製鉄技報
30 (1998) 3, 148-153

Strengthening and Toughening of 13%Cr-5%Ni Martensitic Stainless Steel for Welded Structure and Its Application to Foils and Struts of an Ultra-high-speed Hydrofoil



木村 達己
Tatsumi Kimura
技術研究所 厚板・条
鋼研究部門



岡 裕
Yutaka Oka
千葉製鉄所 管理部
主査(部長)



三代 祐嗣
Yūzi Mishihiro
水島製鉄所 管理部技
術サービス室 主査
(部長補)

要旨

溶接構造用 13%Cr-5%Ni マルテンサイト系ステンレス鋼への高強度化に及ぼす Nb, Mo ならびに製造プロセスの影響と海水中の疲労特性に及ぼす Mo の影響を調べた。Nb の少量添加と熱間圧延後、直接焼もどし処理を行うことにより、960 N/mm² 以上の引張強さと -100°C で 100 J の靱性が得られた。1% の Mo の添加により、海水中の疲労強度は向上した。板厚 5.5~205 mm の 13%Cr-5%Ni-1%Mo-0.06%Nb 鋼板を商用工程で製造し、十分な強度・靱性が得られることを確認した。同鋼は 75°C の予熱で溶接時の低温割れを抑えることができる。本開発鋼は、超高速水中翼船の水中翼および支柱用材料に採用された。

Synopsis:

The effect of Nb and Mo on the mechanical properties of 13%Cr-5%Ni martensitic stainless steel was studied to develop materials for an ultra-high-speed hydrofoil. A 13%Cr-5%Ni steel with the tensile strength of over 960 N/mm² and the toughness of over 100 J at -100°C can be obtained by satisfying the following two conditions. One is the addition of a small amount of Nb. The other is the adoption of tempering without normalization after hot rolling. An addition of 1% Mo to the steel improves the fatigue strength in sea water, because Mo suppresses pitting corrosion. Based on these results, 5.5~205 mm thick plates with the chemical composition of 13%Cr-5%Ni-1%Mo-0.06%Nb were produced by the commercial production process. The developed steel showed good weldability in the use for producing hydrofoils. This steel has been successfully used as the foils and struts of ultra-high-speed hydrofoils.

1 緒 言

旅客用超高速水中翼船(ジェットフォイル)の船体を支える支柱および水中翼には、船体浮上時に船体の重量が作用するため、高強度材料が用いられる。また、これらは波浪による繰り返し荷重が作用するので、船体設計上、海水中での疲労強度が求められるとともに、海水中を高速走行するため、塗装による防食の効果が期待できないので耐食性も重要である¹⁾。さらに、溶接により組み立てられるために優れた溶接性も求められる。このような理由により、支柱および水中翼には、従来は析出強化型の高強度ステンレス鋼(15-5 PH)が使用されてきた。このステンレス鋼は、溶接施工後、溶接部に所定の特性を得るための溶体化熱処理および時効熱処理が必要であり、精度の高い温度管理や歪対策などに課題があった¹⁻³⁾。

一方、マルテンサイト系ステンレス鋼は高い耐力を容易に得るこ

とができ、構造物の軽量化の点で有利であるとともに、溶体化熱処理を省略できるが、溶接性および靱性が劣る。しかし、13%Cr マルテンサイト系ステンレス鋼に C 量の低減と Ni の添加を行うことにより、溶接性が向上し、現在主に水車ランナーに用いられている。当社では、これまで水車ランナー用高強度 13%Cr-5%Ni マルテンサイト系ステンレス厚鋼板を開発しており⁴⁾、これを超高速水中翼船用の支柱および水中翼材料に適用するためには、特に高強度化と海水中の疲労強度の向上が求められた。

そこで、本研究では 13%Cr-5%Ni 鋼の高強度化および海水中の疲労特性に及ぼす Mo および Nb の影響について、小型鋼塊を用いて調査した。さらに、機械的性質に及ぼす製造プロセスの影響についても明らかにし、水中翼材料としての成分、製造プロセスを導出した。次に、板厚 5.5 mm から 205 mm の厚鋼板を商用生産工程において製造し、母材の機械的性質、疲労特性、溶接性について確認し、960 N/mm² 級溶接構造用 0.03%C-13%Cr-5%Ni-1%Mo-0.06%Nb マルテンサイト系ステンレス厚鋼板を開発した。

* 平成10年6月10日原稿受付

Table 1 Specification of the materials for foils and struts¹⁾

0.2% P. S. (N/mm ²)	T. S. (N/mm ²)	El. (%)	R. A. (%)	E ₀ (J)
≧ 890	≧ 960	≧ 12	≧ 45	≧ 27

2 水中翼および支柱の要求特性

超高速水中翼船ジェットフォイルの水中翼および支柱に使用されるステンレス鋼の材料特性の要求値¹⁾を Table 1 に示す。使用鋼材の板厚は 5.5~205 mm であり、この広範な板厚範囲で要求特性を満足する必要がある。なお、溶接施工後、525°C の溶接後熱処理 (PWHT) が施されるため、PWHT 温度より高い 600°C の焼もどし処理後に機械的性質が要求値を満足する必要がある。

3 基礎実験

3.1 実験方法

供試材の化学組成を Table 2 に示す。供試材は、溶接性に優れた 0.03%C-13%Cr-5%Ni マルテンサイト系ステンレス鋼を基本組成として、Nb および Mo 量を変化させた鋼である。

これらの鋼は高周波真空溶解炉で溶製し 100 kg 鋼塊とした後、1200°C に加熱後、7 パスの圧延を行い板厚 25 mm にし、室温まで放冷させた。その後、400~650°C の焼もどし処理を行った。熱間圧延のままの鋼板および焼もどし処理を施した鋼板について引張試験および組織観察を行った。疲労試験は、平行部長さ 60 mm、直径 10 mmφ の丸棒疲労試験片について、25°C の 3.5%NaCl 水溶液中でサイン波の波形を繰り返し速度 1 Hz の条件で行った。

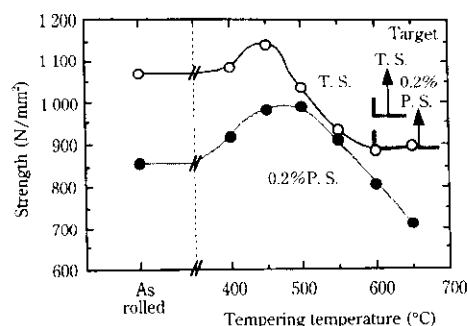


Fig. 1 Effect of tempering temperature on the mechanical properties of 13%Cr-5%Ni steel (steel A)

3.2 実験結果

3.2.1 基本組成鋼 (Steel A) の焼もどし軟化抵抗

13%Cr-5%Ni 基本組成鋼 (Steel A) の焼もどしにともなう 0.2% 耐力および引張強さの変化を Fig. 1 に示す。焼もどし温度が高くなるとともに 0.2% 耐力および引張強さは高くなり、450°C でそのピークを示す。600°C の焼もどし処理鋼の 0.2% 耐力および引張強さは目標を下回った。

熱間圧延鋼板と 550°C および 600°C の焼もどし処理鋼について炭化物をレプリカ法により抽出し、電子顕微鏡で観察した。Photo 1 に炭化物の分散状態を示す。焼もどし温度の上昇とともに炭化物が凝集・粗大化しており、0.2% 耐力および引張強さ低下の原因である。

3.2.2 引張特性に及ぼす Nb および Mo の影響

13%Cr-5%Ni-1%Mo 鋼の 600°C の焼もどし処理鋼の引張特性に及ぼす Nb の影響を Fig. 2 に示す。0.04~0.08% の Nb の添加により、0.2% 耐力および引張強さは目標値を上回り、一方、伸びおよび靱性の低下は認められなかった。次に、Nb を 0.06% 添加した

Table 2 Chemical compositions of steels used

Steel	(mass%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb
A	0.030	0.37	0.59	0.023	0.005	4.88	13.0	0.25	0.001
B	0.033	0.37	0.61	0.022	0.004	5.00	13.1	0.51	0.001
C	0.030	0.36	0.61	0.022	0.004	4.92	13.1	1.01	0.001
D	0.033	0.35	0.64	0.021	0.004	5.05	13.0	0.98	0.019
E	0.033	0.34	0.64	0.022	0.004	5.02	13.1	1.04	0.039
F	0.034	0.34	0.62	0.022	0.004	4.99	13.0	0.99	0.060
G	0.034	0.35	0.65	0.020	0.004	5.03	13.1	0.99	0.078
H	0.021	0.31	0.62	0.020	0.001	5.37	13.1	1.51	0.059
I	0.022	0.30	0.62	0.020	0.001	5.39	13.1	2.00	0.060

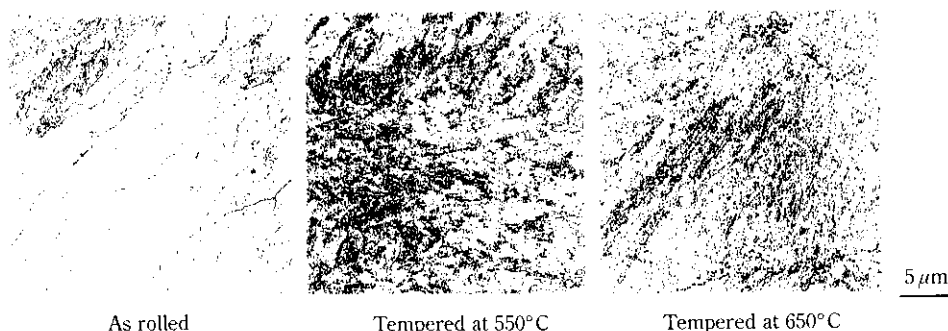


Photo 1 Distribution of carbides precipitated by the tempering at various temperatures for steel A

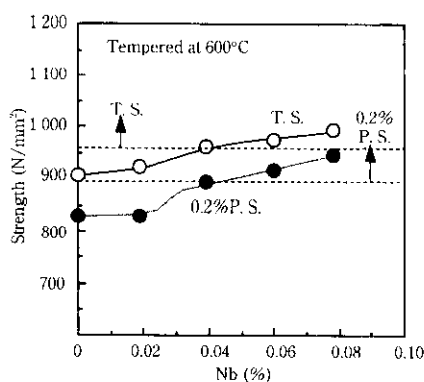


Fig. 2 Effect of Nb content on the mechanical properties of 13%Cr-5%Ni-1%Mo steels after tempering at 600°C

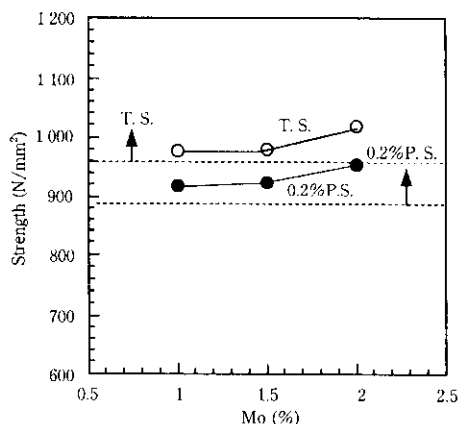


Fig. 3 Effect of Mo content on the mechanical properties of 13%Cr-5%Ni-0.06%Nb steels tempered at 600°C

13%Cr-5%Ni 鋼において、Mo を 2% まで変化させた 600°C 焼もどし処理鋼では、Fig. 3 に示すように Mo 量を 1.5% まで増加させても 0.2% 耐力および引張強さには変化がみられなかった。

3.2.3 耐海水疲労特性に及ぼす Mo の影響

25°C の 3.5%NaCl 水溶液中における 13%Cr-5%Ni 鋼の疲労強度に及ぼす Mo の影響について調べた。破断寿命 N_f が 1×10^6 回の時の疲労強度と Mo 量の関係を Fig. 4 に示す。疲労強度は Mo の添加量が 1.0% までは大きくなるが、1.0% を超えるとわずかに低下する傾向を示した。

3.2.4 引張特性に及ぼす製造プロセスの影響

マルテンサイト系ステンレス鋼の製造においては熱間圧延後、焼入れまたは焼ならし処理を行い、そののち焼もどし処理を行う製造工程が一般的である。焼ならし焼もどし処理鋼と本実験で採用し

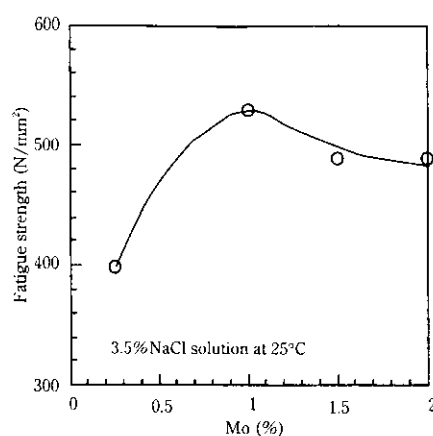


Fig. 4 Relation between the fatigue strength in 3.5%NaCl solution at $N_f = 1 \times 10^6$ cycles and Mo content

た熱間圧延—焼もどし処理鋼の強度比較を Steel F を用いて行った。930~1200°C における焼ならし処理後、600°C の焼もどし処理を施した鋼と、1200°C の加熱後、仕上げ温度 800°C の熱間圧延を行い、そののち 600°C に焼もどし処理を施した鋼の 0.2% 耐力および引張強さを比較して Fig. 5 に示す。焼ならし温度が 1100°C の場合に、0.2% 耐力および引張強さがピークを示した。この場合の 0.2% 耐力および引張強さを熱間圧延—焼もどし処理鋼のそれと比較すると、熱間圧延—焼もどし処理鋼の方が高くなった。両熱処理鋼のミクロ組織を Photo 2 に示す。熱間圧延—焼もどし処理鋼の組織の方が微細焼もどしマルテンサイト組織を呈していた。

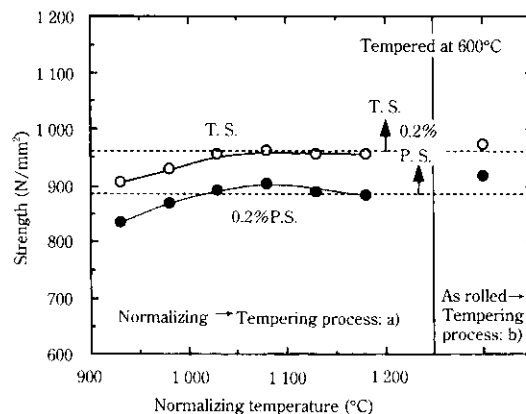


Fig. 5 Relation of mechanical properties between two processes of steel F: (a) Normalized at the temperature of 930~1200°C after rolling and tempered at 600°C, (b) hot rolled followed by tempering at 600°C

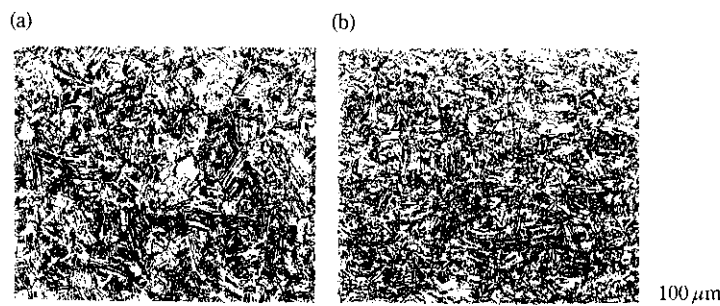


Photo 2 Comparison of microstructures between the two processes: (a) normalized at 925°C and tempered at 600°C, (b) hot rolled followed by tempering at 600°C

3.3 考 察

3.3.1 引張特性に及ぼす製造プロセスの影響

焼ならし焼もどしプロセスに比べて、熱間圧延焼もどしプロセスのほうが、0.2% 耐力および引張強さが高く、微細組織であった。熱間圧延過程では、オーステナイトの加工と再結晶が繰り返されるため、オーステナイトは細粒化する。この状態から冷却すると、細粒化したオーステナイトからマルテンサイト組織が形成されるので、微細マルテンサイト組織となり、この組織を直接焼もどすことから微細組織が維持され、焼ならし焼もどしプロセスよりも強度が上昇する。この挙動は、Nb を添加していない 13%Cr-5%Ni 鋼においても、報告されている⁶⁾。

3.3.2 炭化物析出に有効な Nb 量

Nb 添加によって 600°C 焼もどし処理後の強度は向上したが、この挙動を Nb(C, N) の析出に必要な有効 Nb 量の観点から検討した。C:0.035%, N:0.0080%, Nb:0.060% の場合の焼ならしあるいは圧延再加熱時の Nb の固溶量について、以下に示す溶解度式^{7,8)}を用いて計算した。

$$\log [\text{Nb}][\text{C}] = -3770/T + 2.26 \dots\dots\dots (1)$$

$$\log [\text{Nb}][\text{N}] = -10230/T + 4.04 \dots\dots\dots (2)$$

NbC および NbN の固溶に必要な温度を推定するとそれぞれ 1100°C および 1120°C になる。焼ならし焼もどし処理鋼の場合、処理前あるいは焼ならし昇温時に析出していた Nb(C, N) は、焼ならし温度が 1120°C より低い場合には十分に固溶せず、析出強化が少ないために強度が低下する。一方、熱間圧延焼もどし処理鋼の場合、スラブ加熱温度は Nb 析出物が十分固溶する 1200°C であることから、熱間圧延後の焼もどし処理で析出する Nb(C, N) が確保され、安定的に高強度を維持できる。

3.3.3 Nb 添加鋼の焼もどし軟化抵抗

13%Cr-5%Ni 鋼の A_1 温度はおよそ 550°C であり、600°C の焼もどし温度では、組織は焼もどしマルテンサイト相とオーステナイト相になっている。このオーステナイト相は焼もどし処理後の冷却時にその一部がマルテンサイトへ変態するため、最終組織は 60~80% の焼もどしマルテンサイトを主体として、少量のマルテンサイトおよび残留オーステナイトで構成されている。強度が、組織の混合則にしたがうと仮定することで、焼もどしにともなうマルテンサイトの硬さ変化を算出し、Nb 添加の効果を調べた。基本組成鋼 (Steel A) および 1%Mo-0.06%Nb (Steel F) の焼もどしにともなうマルテンサイトの硬さ変化を Fig. 6 に示す。Steel F では、Steel A よりも焼もどし軟化抵抗が増大しており、600°C の焼もどしマルテンサイトの硬さは、基本組成鋼よりもおよそ HV40 上昇した。

13%Cr-5%Ni 鋼に Nb を添加することによって、目標を満足する高強度が得られたが、これは、熱間圧延焼もどしプロセスの採用によって、Nb の析出強化が最大限活用でき、マルテンサイトの焼もどし軟化抵抗が向上したこと、加えて組織の微細化も同時に図られたことに起因している。

3.3.4 海水疲労強度

13%Cr マルテンサイト系ステンレス鋼の海水中的疲労試験は鋳鋼品に関して、繰り返し速度の大きい条件下で多く行われており、繰り返し数が 1×10^6 における疲労強度は、250~350 N/mm² 程度である⁹⁻¹²⁾。一方、本実験材では繰り返し速度が小さいので、腐食の観点からは鋳鋼品の条件よりも不利であるが、Mo を 1~2% 添加した鋼では、490~535 N/mm² の高い疲労強度が得られた。疲労破壊後の破面の観察により、破壊は孔食を起点として生じていた。

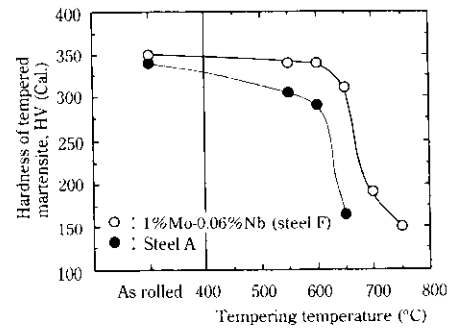


Fig. 6 Softening resistance of martensite during tempering for steels A and F

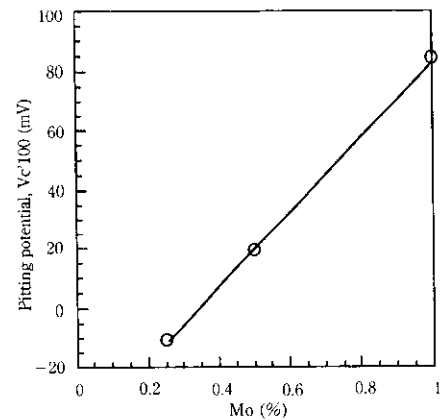


Fig. 7 Effect of Mo content on the pitting potential

そこで、Mo 量の異なる鋼について孔食電位を測定した。孔食電位に及ぼす Mo の影響を Fig. 7 に示す。Mo の添加により孔食電位が上昇しており、疲労破壊の起点となる孔食が抑制されている。Mo 量が 1% 以上になると疲労強度は飽和し、わずかに低下する傾向を示したが、これについては、今後さらに検討が必要である。

以上の基礎検討結果から、13%Cr-5%Ni-1%Mo-0.06%Nb 鋼を熱間圧延焼もどしプロセスで製造することにより、高強度でかつ海水中での高い疲労強度を得ることが可能となった。

4 厚鋼板の製造と諸特性

これまでの基礎研究結果に基づき、100t 転炉で溶製し、RH 炉で精錬を行ったのち、鋼塊にした。鋼塊をスラブに圧延した後、さらに、厚板圧延機により、板厚 5.5~205 mm の厚鋼板を製造した。これらの鋼板について 600°C の焼もどし処理を行い、機械的性質、溶接性や人工海水中における疲労特性について評価した。厚鋼板の実機製造に先立ち、同鋼の熱間加工性についても検討を行い、破断紋りや高温強度から、工程生産上問題のないことを確認した。

製造した 5.5~205 mm の鋼板の代表的な化学組成と機械的性質をそれぞれ Table 3 および 4 に示す。板厚 205 mm の厚鋼板においても引張強さ 1113 N/mm²、0.2%耐力 971 N/mm² となっており、目標を十分満足する高い強度が得られた。また、板厚 30 mm の鋼板のシャルピーフルカーブを Fig. 8 に示す。耐力が 1001 N/mm² という高い値を有するにもかかわらず、-100°C の低温においても吸収エネルギーは約 100J の高い値を示すことがわかる。

開発鋼の溶接性を、板厚 30 mm の鋼板を用いた斜め y 形溶接割れ試験により評価した。その結果を Fig. 9 に示す。開発鋼は 75°C

Table 3 Chemical compositions of 13%Cr-5%Ni-1%Mo-0.06%Nb steel plates produced by the commercial production process (mass%)

Steel	Thickness (mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb
K	5.5	0.027	0.37	0.65	0.023	0.005	5.45	13.2	1.09	0.068
L	12.7	0.021	0.31	0.59	0.018	0.003	5.25	13.0	1.05	0.058
M	30	0.021	0.31	0.59	0.018	0.003	5.25	13.0	1.05	0.058
N	205	0.028	0.36	0.63	0.018	0.003	5.29	13.0	1.08	0.064

Table 4 Mechanical properties of 13%Cr-5%Ni-1%Mo-0.06%Nb produced by the commercial production process

Steel	Thickness (mm)	0.2% P. S. (N/mm ²)	T. S. (N/mm ²)	El. (%)	R. A. (%)	E ₀ (J)	√T _{IK} (°C)	√T _{IS} (°C)
K	5.5	984	1013	18	61	24*	—	—
L	12.7	985	1013	18	61	205	-100	< -100
M	30	1001	1029	18	66	212	-88	< -100
N	205	971	1113	18	60	135	-56	-68

Direction of specimen: L

*Thickness of specimen: 2.5 mm

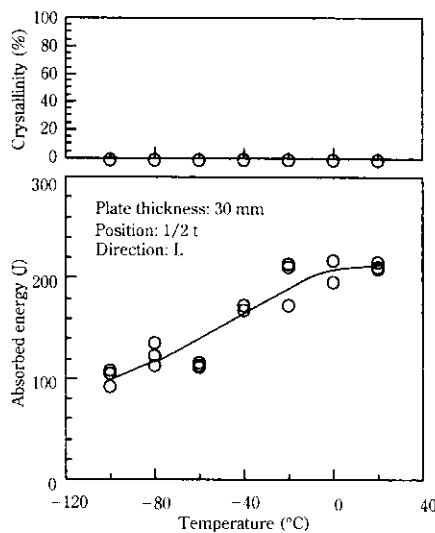


Fig. 8 Toughness of 13%Cr-5%Ni-1%Mo-0.06%Nb steel

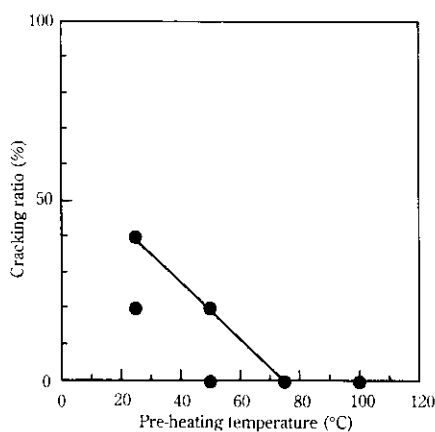


Fig. 9 Result of y-grooved cracking test of the developed steel

の予熱で低温割れを防止でき、従来のマルテンサイト系ステンレス鋼に比べて溶接性が優れている。この開発鋼は溶接方法として、SMAW, GTAW, GMAW, PAW, EBW などほとんどの溶接方法が適用でき、溶接施工後、525°C の PWHT 後の母材および溶接部の特性は十分満足できること、ならびに 525°C の PWHT により溶接継手

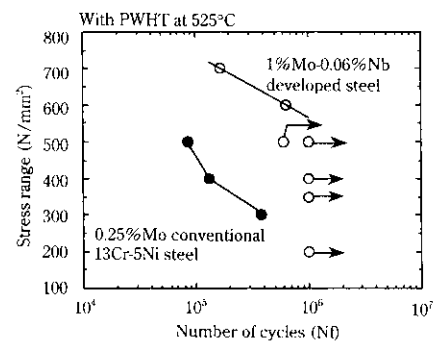


Fig. 10 Fatigue test results in 3.5%NaCl solution of 13%Cr-5%Ni steel

の残留応力を十分除去できることを確認した¹²⁾。

板厚 30 mm の開発鋼を用いた 3.5%NaCl 溶液中での疲労試験結果を Fig. 10 に示す。基本組成鋼に比べて、疲労強度が向上し、破断繰返し数 N_f が 1×10^6 回の場合、550 N/mm² の疲労強度が得られた。

5 結 言

13%Cr-5%Ni 系マルテンサイト系ステンレス鋼を超高速水中翼材料へ適用するための成分、製造プロセスを導出するとともに、板厚 5.5~205 mm の 13%Cr-5%Ni-1%Mo-0.06%Nb 鋼を商用工程で生産し、以下の結論を得た。

- (1) 13%Cr-5%Ni 鋼について、Mo を 1%、Nb を 0.06% 添加し、さらに熱間圧延焼もどしプロセスを行うことで、高強度でかつ海水中での高い疲労強度を得ることが可能となった。
- (2) 熱間圧延後、600°C の焼もどし処理を施す商用工程プロセスで、板厚 5.5~205 mm の厚鋼板を生産し、目標値である 890 N/mm² 以上の 0.2% 耐力、960 N/mm² 以上の引張強さ、12% 以上の伸び、45% 以上の絞りおよび 27J 以上の E_0 を満足することを確認した。
- (3) 板厚 30 mm の鋼板で実施した斜め y 形溶接割れ試験の結果、本開発鋼は 75°C の予熱で低温割れを防止できた。
- (4) 繰返し速度 1 Hz の条件で実施した 3.5%NaCl 溶液中での疲労試験の結果、破断繰返し数 N_f が 1×10^6 回の疲労強度は 500 N/mm² 以上であった。

(5) 本開発鋼はジェットフォイルの水中翼および支柱として使用するため、造船メーカーにおいて、溶接継手の海水中での疲労特性、耐キャビテーションエロージョン性、応力腐食割れ感受性および各種溶接試験が行われ、実船に十分適用できることが確認され、実船に採用された¹³⁾。

本開発鋼は、将来の貨物輸送の高速化のために運輸省が推進して

いるテクノスーパーライナー用の水中翼材料にも候補材となっており^{13,14)}、高強度で、靱性、耐食性および溶接性が優れ、しかも広い板厚範囲で対応可能という特徴を活かして、今後その適用分野の拡大が期待される。

終りに、本鋼の開発と評価にあたって、多大の御協力を頂いた川崎重工業(株)の関係各位に、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鴨井紀之、村上彰男、小島康弘、松村裕之、古賀信次、中沢 裕、仁瓶寛太、上田正樹、水田明能：川崎重工技報、(1991)111, 28
- 2) 村上彰男：日本造船学会誌、**813**(1997), 188
- 3) 長谷川康夫：溶接学会誌、**61**(1992)7, 581
- 4) 安保秀夫、野口 栄、山本広紀、岡崎 隆、木村 勲、牟田 徹：製鉄研究、(1977)292, 21
- 5) 北村紀夫、緑川正和、谷田正三、根元貞夫、岡 裕：溶接学会講演概要、**45**(1989)9, 300
- 6) 岡 裕、榎並領一、楠原祐司、三代祐嗣、西崎 宏：日本金属学会会報、**31**(1992)4, 333
- 7) T. Gladman and F. B. Pickering: *JISI*, **205**(1967), 653
- 8) R. P. Smith: *Trans. AIME*, **224**(1962), 190
- 9) H. J. Niederau: *ASTM STP*, **756**(1982), 382
- 10) 岩淵義孝、波多野隆司、竹之内朋夫、吉本一夫、宮本剛汎：鉄と鋼、**70**(1984)8, 882
- 11) J. D. Crawford, K. Rohing, and S. Becht: *ASTM STP*, **756**(1982), 355
- 12) W. Werchniak and J. P. Gudas: *Corrosion*, (1982), Paper No. 217
- 13) TSL 技術研究組合：日本造船学会誌、**785**(1994), 809
- 14) 遠藤久芳：溶接学会誌、**61**(1992)7, 567