

加工性と高温強度に優れた溶融Alめっき鋼板の開発

藤原 進・近藤 敏洋

日新製鋼株式会社
日新製鋼技報 No. 83 別冊
平成14年12月

技術資料

加工性と高温強度に優れた溶融Alめっき鋼板の開発

藤原 進* 近藤 敏 洋**

Development of Hot-Dipped Aluminum-Coated Steel Sheet with Excellent Formability and High Strength at Elevated Temperatures

Susumu Fujiwara, Toshihiro Kondo

Synopsis:

"Alstar" is a hot-dipped aluminum-coated steel sheet with excellent heat resistance, thermal reflection, and corrosion resistance. This paper introduces a new type Alstar that has been developed with excellent formability and high strength at elevated temperatures. The steel substrate has a chemical composition of extra-low C-0.15% Ti-0.1% Nb. The addition of Nb is more effective for increasing tensile strength at elevated temperatures without decreasing elongation at room temperature as compared with the addition of Si, Mn, P, or Mo. The newly developed Alstar has excellent antioxidation property over 600°C and excellent formability equivalent to those of Ti-Cr Alstar, as well as high strength at elevated temperatures equivalent to that of High-Temperature High-Strength Alstar. This newly developed Alstar is suitable for automotive exhaust systems such as front pipes and exhaust-manifold covers.

1. 緒言

アルスターは、Al-8~10%Si合金を溶融めっきした溶融Alめっき鋼板であり、耐高温酸化性、熱反射性および熱的安定性に優れた表面処理鋼板として、自動車の排ガス系部品、ストーブの熱反射板、その他家庭用電気機器などに広く使用されている。アルスターは、めっき母材の化学成分によって、機能および用途が大きく異なっている。一般の用途には、低炭Alキルド鋼を母材とするアルスター¹⁾が、また優れた熱・光反射性と熱的安定性が要求される用途には、低炭リムド鋼を母材とする耐加熱黒変性アルスターが適用される。しかし、これらのアルスターを600°C以上に加熱すると、冷却後にAlめっき皮膜が剥離し酸化増量が増大する場合がある^{2),3)}。これは、侵入型元素であるCやNが固溶状態で存在すると、母材鋼板へのAlの拡散が妨げられ、合金化反応が母材鋼板からAlめっき層側へのFeの一方拡散により進行し、合金化に伴う体積膨張により皮膜

と母材の界面密着力が著しく低下するためと考えられている³⁾。

母材鋼板へのAlの拡散に有害な侵入型固溶元素であるCやNをTiで十分に固定して母材鋼板へのAlの拡散を容易にすれば、Alめっき皮膜の剥離を防止することが可能である^{2,7)}。したがって、フロントパイプやセンターパイプなど、600°Cを超える温度域に繰返し加熱されるような自動車排ガス部材などの用途には、極低炭-Ti-Cr添加鋼を用いた耐高温酸化性アルスター^{3,5)}や極低炭-Si-Mn-Ti添加鋼を用いた高温高強度アルスター^{6,7)}が製品化されている。耐高温酸化性アルスターは、高温域での耐高温酸化性に優れるほか、室温での加工性にも優れており、プレス成形により製造されるコンバーターシェルなどの用途に採用されている。一方、高温高強度アルスターは、Si, Mn添加による固溶強化により、高温強度に優れており、高温疲労が問題となるフロントパイプ用途に採用されている。今回は、耐高温酸化性アルスターと高温高強度アルスターのそれぞれの長所である高加工性と高温強度をあわせ持つ新しいアルスターの開発を

*技術研究所 研究企画チーム 主任部員 **技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム

目指した。

本報告では、耐高温酸化性アルスターをベースに、室温での加工性および高温強度に及ぼす添加元素の影響を実験室的に検討した結果ならびにこの実験室的検討結果をもとに実機製造した新しいアルスターの品質特性について報告する。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材の化学成分範囲を表1に示す。供試材は、極低炭-0.2%Ti鋼をベースとして、高温強度の向上に有効

表1 供試材の化学成分範囲

Table 1 Chemical compositions. (mass%)

C	Si	Mn	P	Ti	Nb	Mo
\leq 0.005	0.01 ~ 0.65	0.15 ~ 1.00	0.001 ~ 0.063	0.20	0 ~ 0.23	0 ~ 0.58

と考えられるSi, Mn, P, NbおよびMoの添加量を変化させた。溶製は、30kg高周波誘導真空溶解炉にて行い、板厚30mmまで熱間鍛造した。一旦室温まで冷却後、1250℃まで再加熱し熱間圧延に供した。熱間圧延における仕上温度は920℃とし、板厚4.5mmまで熱延後、直ちに500℃に加熱したソルトバス炉に1h浸漬し、実機熱延ラインにおけるコイル巻取をシミュレートした。その後、板厚1.5mmまで冷間圧延を施し、850℃に加熱したソルトバス炉に1min均熱後空冷し、めっきラインにおける焼鈍をシミュレートした。なお、実験室的検討においては、調質圧延を施さずに各添加元素の影響を調べた。

2.2 実験方法

室温での引張試験は、JIS5号引張試験片を用いた。高温引張試験は、JISG0567に準拠して、平行部幅10mm、標点間距離50mmの試験片を用い、所定温度まで加熱して15min間均熱後、実施した。室温における加工性は、引張試験における伸びによって評価した。高温強度は、600℃、700℃における引張強さにて評価した。

得られた強度および伸びに関して、各成分の添加量に基づき重回帰分析を行い、それぞれ添加量1%当りの強度上昇量および伸び低下量を算出した。また、この計算結果から、各添加元素ごとに700℃でTSを10N/mm²増加させるのに必要な添加量およびその時の室温におけるEI低下量を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 室温および高温強度に及ぼす添加元素の影響

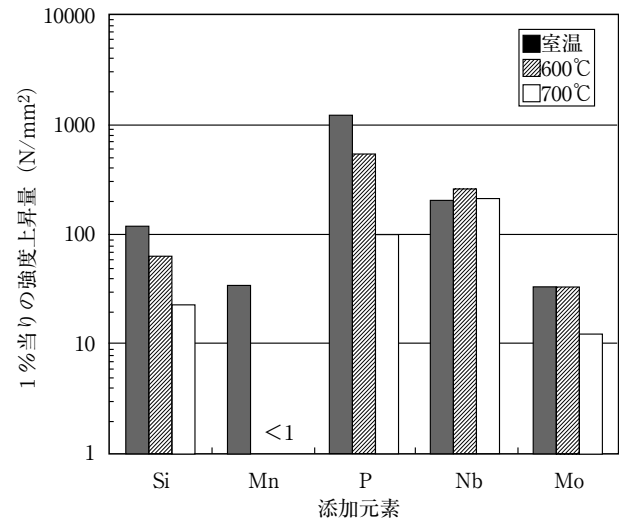


図1 室温および高温での添加元素1%当りのTS上昇量

Fig. 1 Increase of tensile strength with 1% addition of each alloying element at room and elevated temperatures.

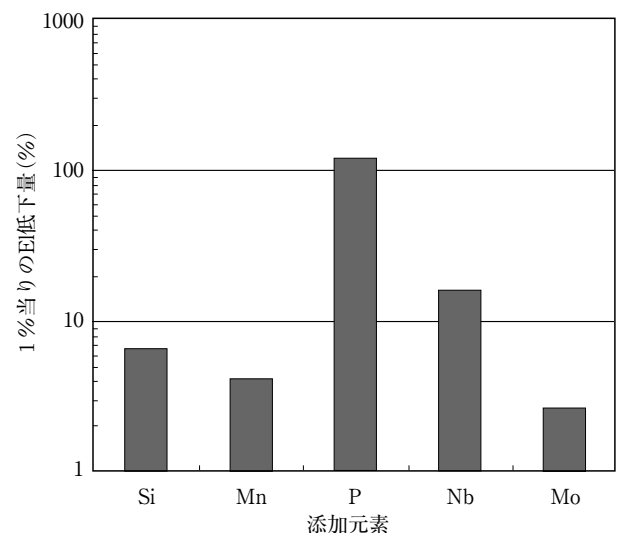


図2 添加元素1%当りのEI低下量

Fig. 2 Degrease of elongation with 1% addition of each alloying element at room temperature.

図1は、重回帰分析結果から見積られた室温および600℃、700℃における各添加元素1%当りのTS上昇量を示す。室温ではP, Nb, Si, MnおよびMoの順に

大きな強化能を示す。600℃や700℃では、固溶強化元素であるSi, MnおよびPの強化能は大きく低下し、とくにMnは、600℃や700℃では強度上昇に寄与しないことがわかる。一方、NbやMoは600℃での強化能の低下は認められず、とくにNbは700℃においても1%当り約210N/mm²と大きな強化能を示す。

図2は、重回帰分析結果から見積られた室温における各添加元素1%当りのEI低下量を示す。室温での強化能が大きい順にEI低下量も大きいことがわかる。

図3は、700℃でTSを10N/mm²上昇させるのに必要

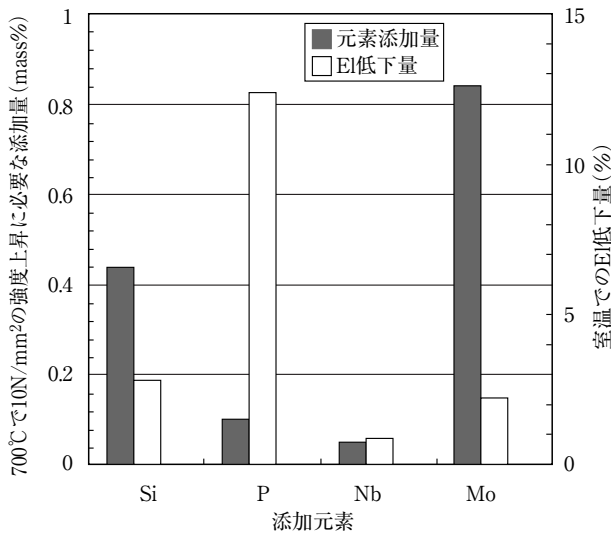


図3 700℃で10N/mm²のTS上昇に必要な添加元素量および室温でのEI低下量

Fig.3 Contents of each alloying element for increasing tensile strength 10N/mm² at 700℃ and decrease of elongation at room temperature.

な各元素の添加量およびその際の室温でのEI低下量を示す。この図から明らかなように、Nbは微量の添加によって高温強度を上昇させることが可能であり、単位添加量当りのEI低下量が比較的大きいにもかかわらず、室温でのEI低下量が最も少ない。SiやMoも比較的EIの低下量は少ないが、同一の強度を得るためには、Nbの約10

倍以上多量に添加する必要がある。

なお、Nb添加による高温強度の上昇は、Nb系炭窒化物による析出強化および固溶強化によるものと考えられる。

3.2 0.1%Nb鋼と既存鋼の比較

前述の結果から、700℃における高温強度を約20N/mm²上昇させることが可能な成分系として、0.1%Nb鋼を抽出し、高温強度や室温での延性を既存鋼と比較した。

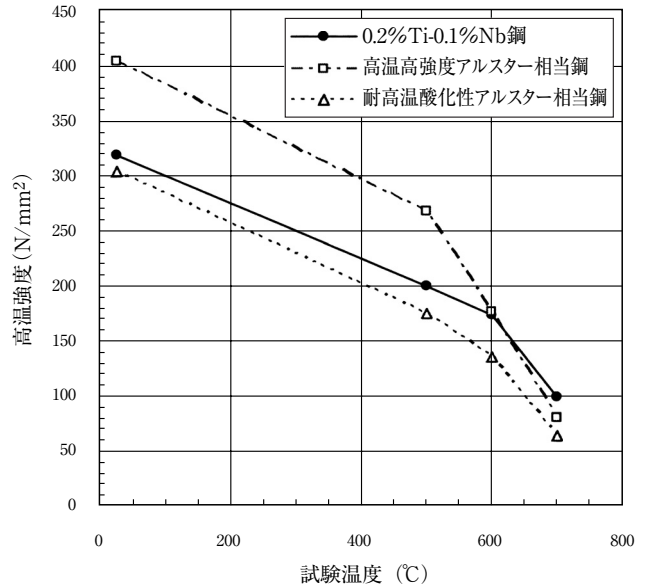


図4 0.1%Nb添加鋼と既存製品相当鋼との高温強度の比較

Fig.4 Comparison of tensile strength at elevated temperatures between 0.1% Nb steel and existent products.

図4は、0.1%Nb鋼の高温強度を、耐高温酸化性アルスター相当鋼および高温高強度アルスター相当鋼と比較して示す。また、表2には、それぞれのサンプルの化学成分と室温での引張性質を示す。500℃以下の温度域では、室温での強度に比例した強度を示し、高温高強度アルスター相当鋼の強度が最も大きい。600℃以上の温

表2 0.1%Nb鋼、既存製品相当鋼の化学成分および室温での引張性質 (ラボ溶製材)

Table 2 Chemical compositions and tensile properties of 0.1% Nb steel and existent products.

種類	板厚 (mm)	主な化学成分 (mass%)					YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EI (%)
		C	Si	Mn	Ti	Nb			
0.1%Nb鋼	1.5	0.002	0.01	0.15	0.20	0.10	130	319	49
高温高強度アルスター相当鋼	1.6	0.005	0.61	0.98	0.25	—	212	405	42
耐高温酸化性アルスター相当鋼	1.6	0.003	0.01	0.15	0.20	—	119	304	51

度域では、高温高強度アルスター相当鋼の強度が大きく低下するのに対して0.1%Nb鋼の強度低下は少ない。その結果、600℃では0.1%Nb鋼は高温高強度アルスター相当鋼と同等の高温強度を示し、さらに700℃では、0.1%Nb鋼の方が高い強度を示すようになる。一方、0.1%Nb鋼の室温でのEIは、耐高温酸化性アルスター相当鋼よりも約2%低下するものの50%近い延性を保持している。

0.2%までの範囲でNb添加量を増加すればより高い高温強度が得られることは別途確認しているが、今回は600℃以上では高温高強度アルスターと同等以上の高温強度を有し、かつ室温での延性は耐高温酸化性アルスターと同等のレベルを保持可能な必要最小限の添加量に止めるとの観点から極低炭-0.15%Mn-0.2%Ti-0.1%Nbを選定し、実機製造を試みた。

4. 実機製造材の品質特性

4.1 実機製造条件の概要

表3に前記の結果をもとに実機製造を行った0.1%Nb

表3 開発材の化学成分

Table 3 Chemical composition of newly developed Alstar. (mass%)

C	Si	Mn	P	Ti	Nb
0.0014	0.03	0.16	0.008	0.15	0.09

添加鋼の化学成分を示す。板厚1.2および1.5mmの冷間圧延鋼板とし、連続式溶融Alめっきラインにて850℃の高温焼鈍後、両面で80g/m²の溶融Alめっきを施した。その後インラインで約0.5%の調質圧延を施して製品とした。また、一部については、高周波造管を行い、外径寸法：48.6mmの電縫鋼管を製造した。

4.2 機械的性質

4.2.1 鋼板

表4は、0.1%Nb添加実機製造材（以下開発材）の引張性質の例を示す。耐高温酸化性アルスターの引張性質

表4 開発材（鋼板）の引張性質

Table 4 Tensile properties of newly developed Alstar.

種類	板厚 mm	YS N/mm ²	TS N/mm ²	EI %	n値 (10~15%)	r̄値
開発材	1.2	196	317	44	0.20	1.9
	1.5	193	310	48	0.21	1.8
高温高強度アルスター	1.6	267	431	37	0.17	1.4
耐高温酸化性アルスター	1.6	202	314	46	0.20	1.5

と比較すると板厚1.5mm材で48%と同レベルの優れたEIを示すと同時に、r̄値は約1.8を示し、耐高温酸化性アルスターと同等以上の加工性が得られた。

図5は、室温~800℃におけるTSの変化を既存鋼と比較

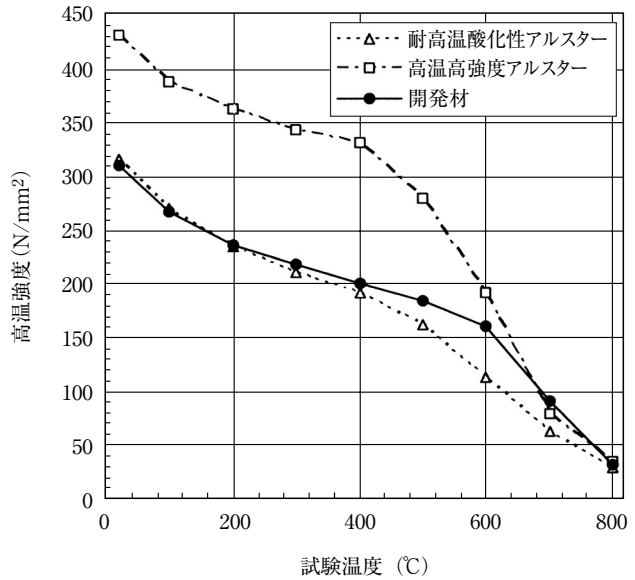


図5 開発材と既存鋼の高温強度の比較

Fig. 5 Comparison of tensile strength between newly developed Alstar and existent products at elevated temperatures.

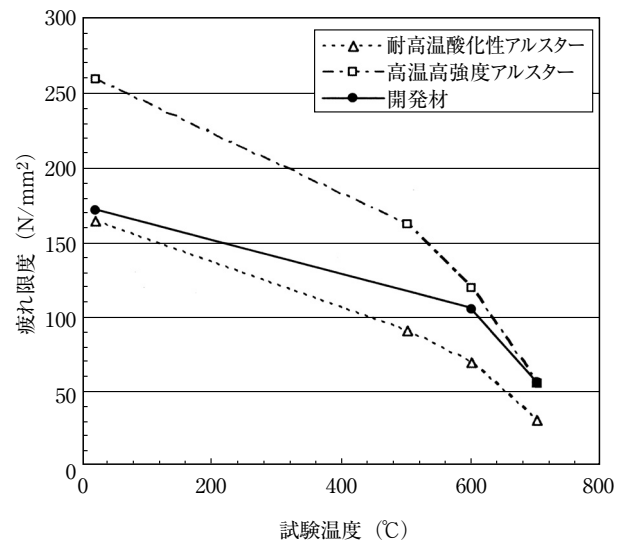


図6 開発材と既存鋼の平面曲げ疲労特性の比較

Fig. 6 Comparison of plane-bending fatigue properties of newly developed Alstar and existent products at elevated temperature.

較して示す。開発材のTSは、室温~400℃までは、耐高温酸化性アルスターとほぼ同等であるが、500℃~700℃

の範囲では約30~50N/mm²高い値を示す。とくに700℃では、高温高強度アルスターよりも高い値を示し、実験室での結果とほぼ同様な特性が得られた。なお、800℃においては、TSの値に大きな差は認められなかった。

図6は、室温~700℃における平面曲げ疲労試験結果を示す。疲れ限度は、各試験温度でのTSに応じた値を示し、600℃~700℃における開発材の疲れ限度は、高温高強度アルスターに匹敵する優れた値を示した。

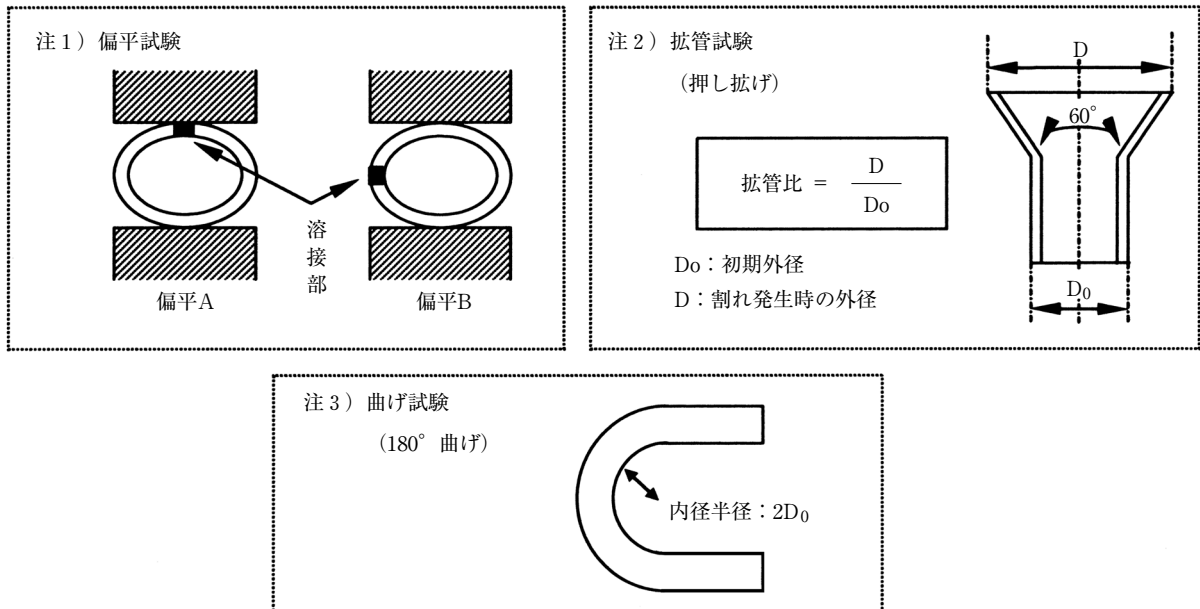
4.2.2 電縫鋼管

電縫鋼管の機械的性質の一例を表5に示す。電縫鋼管では造管時わずかに塑性歪が付与されるため、鋼板に比べて強度の上昇が認められる。鋼管での伸びは、66%と高温高強度アルスターと比較して非常に良好な値を示した。偏平試験ではA偏平、B偏平とも密着可能であり、拡管試験では1.7D₀までの加工が可能であった。また、曲げは内側半径2D₀までの180°曲げが可能であった。

表5 開発材（電縫鋼管）の機械的性質

Table 5 Mechanical properties of newly developed Alstar weld tubes.

種類	寸法 mm	引張特性 (JIS11号試片)			偏平試験 ^{注1)}		拡管試験 ^{注2)}	曲げ試験 ^{注3)}
		YS N/mm ²	TS N/mm ²	El %	偏平 A	偏平 B		
開発材	φ48.6 ×1.2t	276	324	66	密着	密着	1.7D ₀	Good
	φ48.6 ×1.5t	258	316	66	密着	密着	1.7D ₀	Good
高温高強度アルスター	φ48.6 ×1.6t	397	446	52	密着	密着	1.5D ₀	Good



4.3 耐高温酸化性

4.3.1 めっきま材の耐高温酸化性

図7には、600~800℃において20hの加熱と冷却の繰

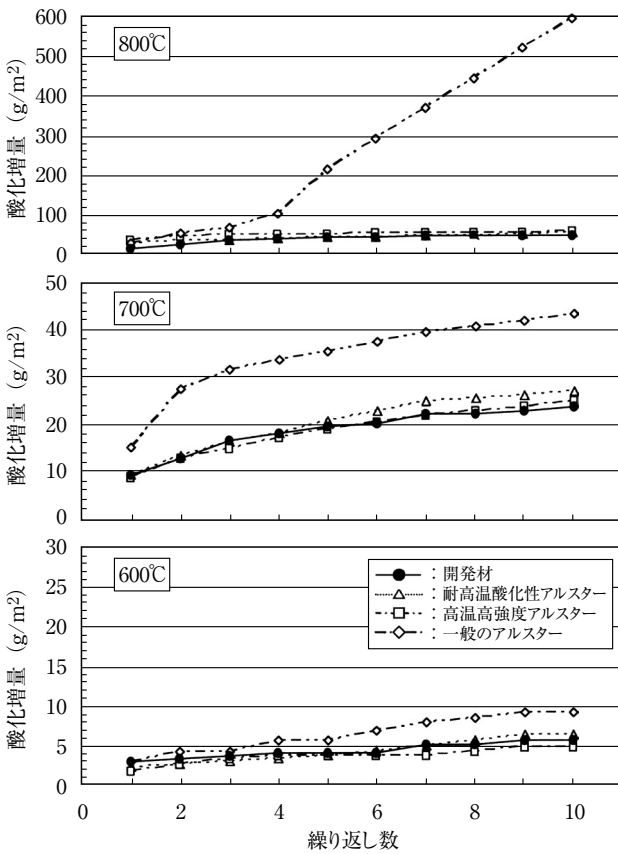


図7 開発材と既存鋼の600~800℃における酸化増量の比較
Fig.7 Comparison of oxidation weight gains between newly developed Alstar and existent products after cyclic heating at 600~800℃ for 20h in air.

返しに伴う酸化増量の変化を示す。なお、試験片は1.2t×25w×50lmmとし、酸化増量は、端面酸化分を含んだ値で示した。開発材の酸化増量は、既存の耐高温酸化性アルスターや高温高強度アルスターと同等であり、低炭素鋼を母材とする一般のアルスターと比較して非常に小さく優れた値を示した。これは、耐高温酸化性アルスターや高温高強度アルスターと同様に、極低炭-Ti添加鋼をベースとしたためであり、めっき皮膜から母材へのAlの拡散が容易に進行して濃度勾配の緩やかなAl拡散浸透層が形成されるため³⁾と考えられる。

4.3.2 加工部の耐高温酸化性

前述のように、開発材の耐高温酸化性は非常に優れているが、実際の部品を想定すると、加工後の耐高温酸化性を把握しておく必要がある。ここでは単純に、耐高温

酸化性に及ぼす引張歪の影響について検討した。

800℃における引張歪付与後の酸化増量変化を図8に

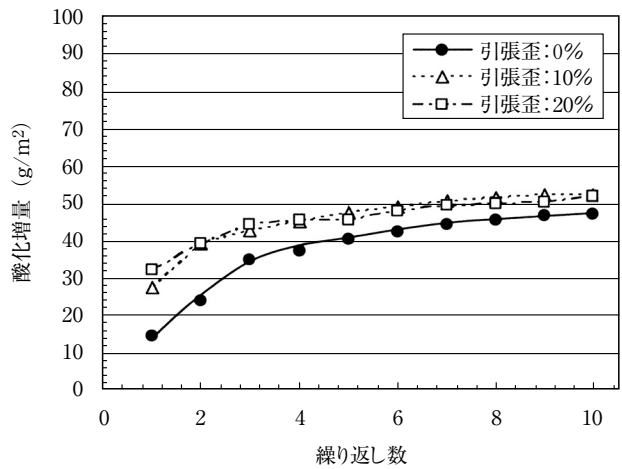
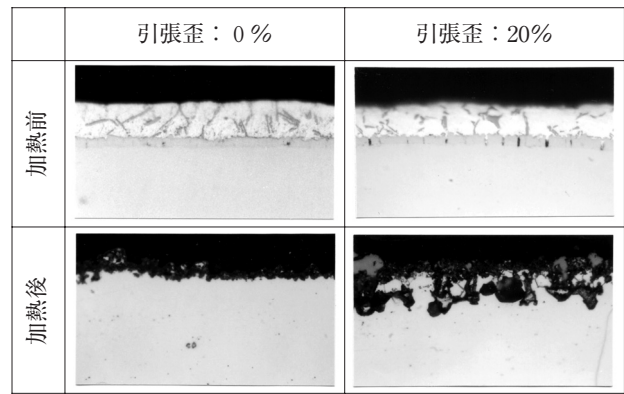


図8 開発材の引張加工部における800℃での酸化増量
Fig.8 Oxidation weight gains of newly developed Alstar after expansion strained and cyclic heating at 800℃ for 20h in air.

示す。歪量：10%，20%で酸化増量がわずかに増加する傾向が認められるが、異常酸化は認められない。図9に0%歪材と20%歪材の加熱試験前後の断面を示す。引



20 μm

図9 開発材の加工部における酸化試験前後のAlめっき層断面(800℃×20h×10サイクル)
Fig.9 Microstructures of Al-coated layer before and after cyclic heating test at 800℃ for 20h in air.

張歪が20%の場合、加熱前のめっき層断面においてFe-Al合金層にはクラックが認められるもののAl-Siめっき層にはクラックは認められない。加熱後には加熱前にFe-Al合金層に生じていたクラックの一部でFeの酸化が生じるため、酸化増量が僅かに増加するものの、加熱時間の経過に伴い、酸化の進行よりもクラック周辺部のめっ

き層から母材鋼板へのAlの拡散が先行するため、母材の急激な酸化が抑制されたものと考えられる。

以上のように、開発材では、Fe-Al合金層にクラックを生じてもAl-Siめっき層に大きな割れが発生しない程度の加工であれば、無加工部とほぼ同等の優れた耐高温酸化性が期待される。

5. 結 言

耐高温酸化性アルスターおよび高温高強度アルスターは、極低炭-Ti添加Alキルド鋼を素材鋼板とした当社既存の耐熱性溶融Alめっき鋼板である。これらをベースに、両者の長所を合わせ持つ新しいアルスターの検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) Si, Mn, Pの固溶強化元素の添加は、600℃未満の温度域での高温強度の向上には効果があるが、600℃以上の温度域では比較的效果が小さく、一方で室温の延性を阻害する。
- (2) Si, Mn, Pの添加に比べて、Nbの添加は600～700℃付近の温度域での高温強度向上に有効であり、室温での延性低下も小さい。
- (3) 極低炭-0.15%Mn-0.15%Ti-0.1%Nb鋼を素材鋼板として溶融Alめっき鋼板を実機製造した。その結果、室温では耐高温酸化性アルスターと同等以上の加工性を有するとともに、600～700℃の温度域では高温高強度アルスターと同等以上の高温強度を有する鋼板が得られた。
- (4) 開発材は、既存の耐熱アルスターと同等の耐高温酸化性を有し、加工歪によって生じるAlめっき層の割れがあまり大きくない範囲であれば、加工歪付与状態においても局所的な異常酸化は認められなかった。

参考文献

- 1) 莊司健, 中川洋一, 宮武康夫: 日新製鋼技報, No.23 (1970), 1.
- 2) 伊藤武彦, 橘高敏晴: 日新製鋼技報, No.32 (1975), 81.
- 3) 築地憲夫, 浜中征一, 森田有彦: 日新製鋼技報, No.43 (1980), 40.
- 4) 浜中征一, 築地憲夫, 森田有彦: 鉄と鋼, 66 (1980), S378
- 5) 森田有彦, 築地憲夫, 内田幸夫, 浜中征一: 日本金属学会報, 23 (1984), 273.
- 6) 山田利郎, 川瀬尚男: 鉄と鋼, 72 (1986), 1021.
- 7) 山田利郎, 坂井法保, 川瀬尚男: 日新製鋼技報, No.56 (1987), 80.