

二相系ステンレス鋼の靱性に及ぼす相組成の影響

Effect of Phase Composition on Toughness of Duplex Stainless Steel

美谷 章生*

Akio Mitani

Synopsis: With the object of realizing well-balanced strength and toughness of duplex stainless steel, mechanism that controls toughness should be clarified. In this paper, the influence of alloy distribution in ferrite and austenite phase on Charpy impact value was investigated with SUS329J1 duplex stainless steel by heating at different temperatures before hot working. Higher Charpy impact value was obtained when heated at higher temperature. Major factor for this improvement was due to high Ni concentration in ferrite phase. Propagation paths of crack by impact fracture were mainly through ferrite phase regardless of heating temperature. This indicates that ferrite phase is poorer in toughness than austenite phase and controls the entire toughness of duplex stainless steels such as SUS329J1. In addition, the impact values of ferritic stainless steels whose chemical composition was similar to that of SUS329J1 were improved with increasing of Ni concentration. Above-mentioned fracture behavior and strengthening mechanism indicates that increasing Ni concentration of ferrite phase in SUS329J1 duplex stainless steel improves toughness.

Key words: duplex stainless steel, heating, Charpy, alloy concentration, distribution

1. 緒言

フェライト (α) 相およびオーステナイト (γ) 相から成る二相系ステンレス鋼は、比較的多量のCr, MoおよびNを含有し、優れた強度と耐食性を有することから、化学プラント用配管、油井環境用部材、船舶用シャフトの海水機器など、様々な形状で広範な用途に使用されている。また二相系ステンレス鋼は、耐孔食性指数PRE ($\text{Cr}\% + 3.3\text{Mo}\% + 16\text{N}\%$) の高いスーパー二相系ステンレス鋼に代表されるように、合金元素量の増加によって耐食性向上を図ることの他に、オーステナイト生成能の高いNiなどの添加量や熱処理条件を調整することによって α/γ 相比率の制御を行うなどの、二相共存の特徴を活用した耐食性を向上させる試みも行われている¹⁻⁴⁾。さらにはWやCuなどの固溶強化元素の添加により、耐食性のみならず強度を向上させたASTM UNS S32760に代表される二相系ステンレス鋼が規格化されている。しかし熱処理条件や製造プロセスが適切でない場合、粗大な析出相が生成し特性の低下を招くことがある。たとえば、冷却過程においてフェライト相の分解によって析出する σ 相や、凝固過程または熱処理時に生成する(Al, Cr) Nや $\text{Cr}_2(\text{C}, \text{N})$ などが、フェライト相およびオーステナイト相のマトリックスと異なって破壊の起点となり、衝撃特性を悪化させることが報告されている⁵⁻⁶⁾。

これらは溶質元素の拡散及びこれに伴う析出に起因して生じるものであり、フェライト相またはオーステナイト相中における溶質元素の存在状態が衝撃特性へ影響を及ぼすものと考えられる。

そこで本報告では二相系ステンレス鋼SUS329J1を用いて、相中溶質元素の存在状態とそれらが衝撃特性に及ぼす影響について調査した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材として用いた二相系ステンレス鋼JIS SUS329J1の化学成分をTable 1に示す。供試材はVIM炉にて100kgのインゴットを溶製した後、溶質元素の存在状態を変化させるため加熱温度を1175~1300℃と変化させ、熱間加工により幅60mm×厚さ35mmの板材を作製した。さらに1050℃-20分保持後水冷の条件で固溶化熱処理を行ったものを供試材とした。

Table 1 Chemical composition (mass%)

Grade	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS329J1	0.02	0.56	0.82	0.028	0.002	4.75	24.79	1.50

* SSSU (元 研究・開発センター 高合金鋼グループ)

2.2 フェライト量測定

固溶化熱処理後の供試材について、電磁誘導法を利用したフェライトスコープ（フィッシャー・インストルメンツ社製,MP30）を用いて、任意に5箇所フェライト相体積率を測定し、その平均値をもってフェライト量とした。

2.3 衝撃特性評価

固溶化熱処理後の供試材を用い、常温にてシャルピー衝撃試験を行った。試験片はJIS Z 2242に従い幅10mm、2mm-Vノッチの形状とし、Fig.1に示すL方向ノッチとなるよう採取した。また、衝撃試験による破壊形態を調査するため、試験後の破面観察を行った。観察用の試料は樹脂に埋め込み後、1μmバフにて鏡面研磨を行い、シュウ酸エッチングを施し、光学顕微鏡を用いて観察を行った。

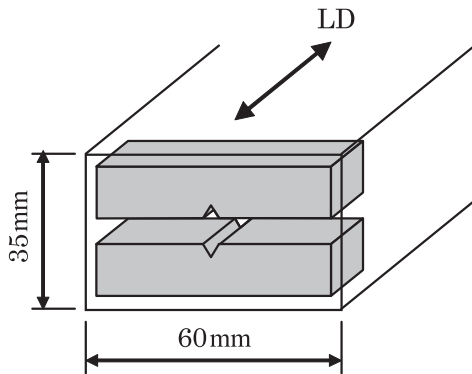


Fig.1 Schematic of specimens sampled for Charpy impact test

2.4 EPMAによる組成分析

各相中の溶質元素の存在形態を調査するため、固溶化熱処理後の試料を用いてEPMA（島津製作所製,EPMA 1600）による溶質元素の定量分析を行った。

3.実験結果

3.1 シャルピー衝撃試験結果

Fig.2にシャルピー衝撃値及び硬さに及ぼす熱間加工時の加熱温度の影響を示す。1100~1175℃では、ほぼ同等の衝撃値であったが、加熱温度をさらに上昇させた場合に衝撃値が上昇した。なお、硬さは加熱温度によらずほぼ同等であった。また、このときのフェライト量と衝撃値の関係を図3に示す。フェライト量は加熱温度が1100℃のとき、他の加熱温度のものと比較して僅かに多かったが、1175℃以上ではほとんど差異は見られなかつ

た。しかし加熱温度1250℃以上では衝撃値の上昇が見られたことから、フェライト量が靱性への直接的な影響因子ではないことが示唆された。そこでシャルピー衝撃試験後の試験片について光学顕微鏡観察を行い、衝撃値に影響を及ぼす加熱温度によるミクロ組織の変化を調査した。

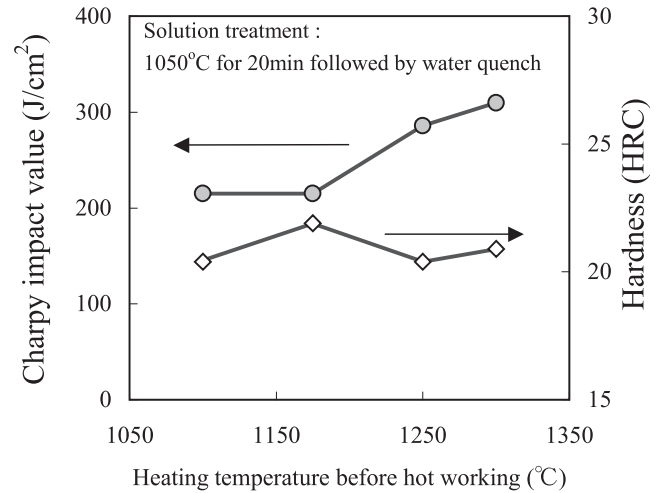


Fig.2 Effect of heating temperature before hot working on Charpy impact value

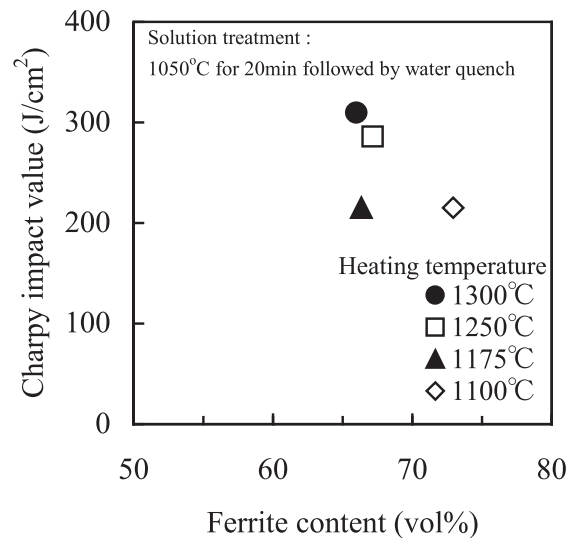


Fig.3 Effect of ferrite content and heating temperature on Charpy impact value

3.2 加熱温度による衝撃破断面のミクロ組織変化

Fig.4に各加熱温度によるシャルピー衝撃試験後の試験片における、破面起点部近傍のミクロ組織を示す。いずれの加熱温度においても破断面にはボイドが散見され、加熱温度の低いものほど大きなボイドが多数観察される傾向にあった。ボイドの生成・成長のしやすさと衝撃値

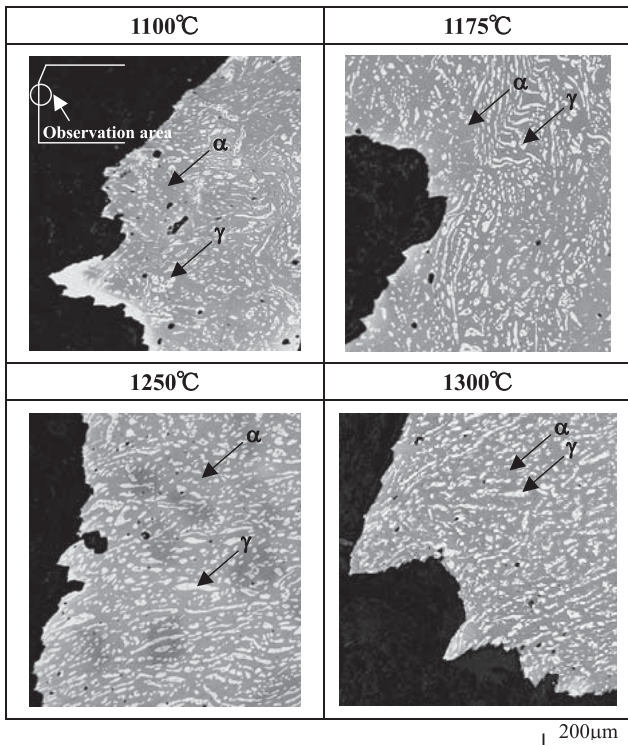


Fig.4 Cross-sectional microstructure near fractured surface of Charpy impact test specimen

には逆相関があると考えられる。また、いずれの加熱温度においても破断はフェライト粒内で生じており、フェライト相が衝撃負荷時の亀裂伝播経路となっていた。このことはすなわち、衝撃値の高低はオーステナイト相より靱性の低いフェライト相の強度に律速されていることを示唆している。

3.3 熱間加工前加熱温度による相中合金元素濃度の変化

加熱温度の差異により衝撃値が異なったが、衝撃負荷時の破壊形態は近似しており、加熱温度によらずフェライト粒内で亀裂が伝播していた。そこで相中合金元素濃度の差異を確認するため、衝撃値に差の見られた加熱温度1100°Cおよび1250°Cの試料においてEPMAによる元素マッピングを行った結果をFig.5に示す。この結果、Cr, Moについてはフェライト相への濃化が見られたが、加熱温度による差異はなかった。またC, Nの偏析は見られず、加熱温度による差異もなかった。一方でNiについてはオーステナイト相への濃化が確認されたが、加熱温度によってオーステナイト相およびフェライト相におけるNi濃度差が異なっており、衝撃値の高かった1250°Cではオーステナイト相とフェライト相間のNi濃度差は小さかった。そこで加熱温度による差異の見られたNiに着目し、線分析を行った結果をFig.6に示す。加熱温度1100°Cの場合、オーステナイト相中のNi濃度のピークが高く、フェライト相中のNi濃度が低くなっており、オーステナイト相へのNi分配率

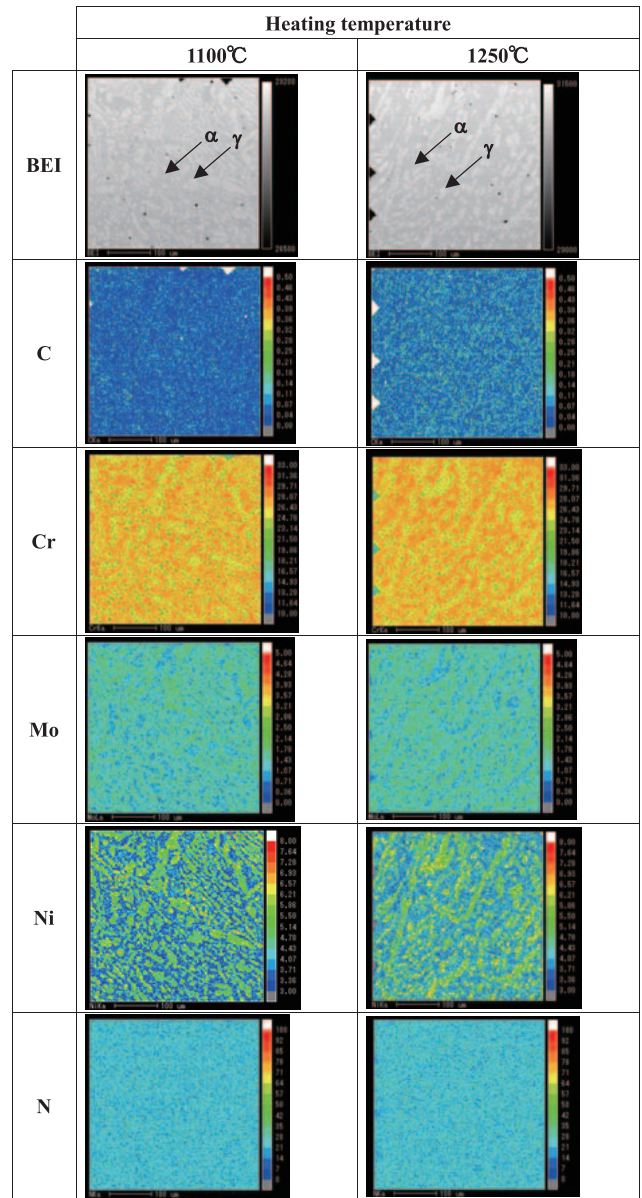


Fig.5 Elemental mapping by EPMA for the specimens heated at 1100°C and 1250°C followed by solution treatment

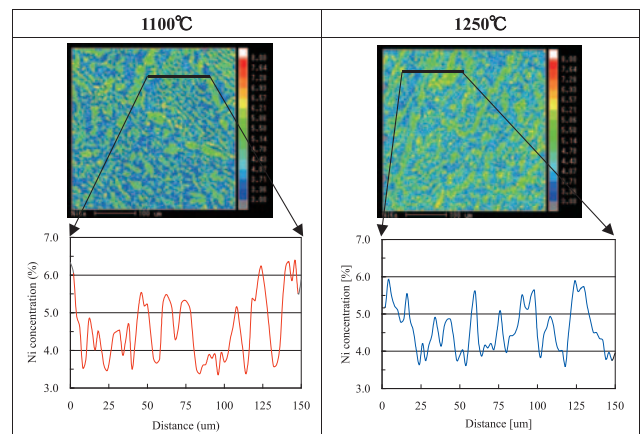


Fig.6 Line profile of Ni concentration

が高くなっていった。一方、加熱温度1250℃の場合は、1100℃の場合と比較するとオーステナイト相中のNi濃度のピークは低く、またフェライト相中のNi濃度下限が高くなっていった。すなわち加熱温度が高い場合フェライト相中のNi分配率が高くなり、これが靱性の上昇に影響を及ぼしている可能性がある。

4. 考察

熱間加工前加熱温度の上昇により靱性が向上した要因は、衝撃負荷時の亀裂伝播経路となったフェライト相における、Ni濃度の向上によるものと考えられた。そこで二相系ステンレス鋼におけるフェライト相中のNi濃度上昇により衝撃値が向上した現象について検証を行うため、Table 2に示すSUS329J1の化学成分に近似したフェライト単相鋼を用いて、フェライト相中のNi濃度と衝撃値の関係を調査した結果をFig.7に示す。この結果、Ni含有量の増加に伴い室温における衝撃値が上昇しており、特にNi量が2%

Table 2 Chemical composition of samples with varied Ni content (mass%)

Symbol	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Mo
0%Ni	0.003	0.01	0.01	0.001	0.01	27.43	1.74
2%Ni	0.002	0.01	0.01	0.001	1.98	27.42	1.75
3%Ni	0.005	0.01	0.02	0.001	3.04	27.16	1.78
4%Ni	0.001	0.01	0.01	0.001	4.05	27.34	1.77

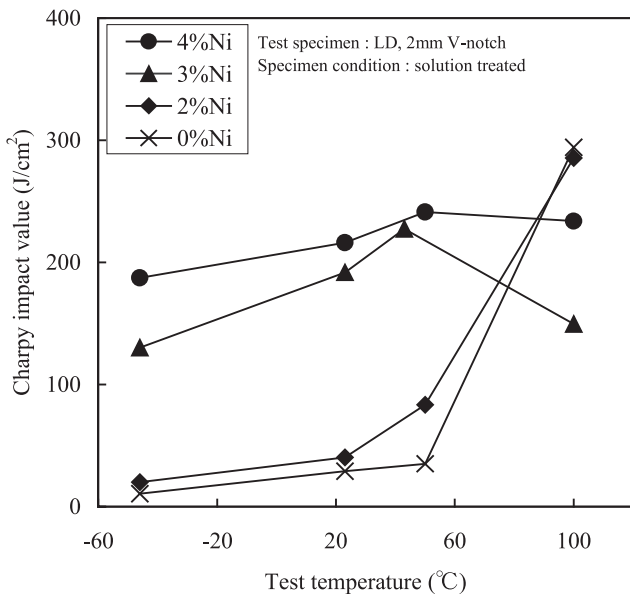


Fig.7 Effect of Ni concentration in Cr-Mo-Ni ferritic steels on charpy impact value

を超えると顕著な上昇が見られた。したがってフェライト相中Ni濃度の高い場合、衝撃負荷時の亀裂伝播経路でありかつ衝撃特性を律速するフェライト相の強化によって、二相系ステンレス鋼においても衝撃値が向上すると考えられる。

また、SUS329J1において加熱温度の上昇によりフェライト相中のNi濃度が向上した現象について考察するため、平衡状態におけるフェライト相およびオーステナイト各相中のNi濃度におよぼす温度の影響をThermo-Calcを用いて計算により求めた。Fig.8にその結果を示す。フェライト相中のNi濃度は、温度の上昇にともなって上昇している。これは温度の上昇にともなってオーステナイト相がフェライト相へ変態し、オーステナイト相に含まれていたNiがフェライト相に分配されるためと考えられる。実際に加熱温度を変化させた場合のSUS329J1の組織をFig.9に示す。温度の上昇にともない、凝固組織由来の樹枝状オーステナイト相のフェライト相への変態が進み、1275℃で120分以上または1300℃の加熱で完全に固溶する。しかし加熱温度の低い1175℃ではオーステナイト相が固溶せず、凝固組織に近い組織を呈していた。以上の結果から、加熱温度の上昇によってフェライト相中のNi濃度が高まるのは、オーステナイト相がフェライト相へ変態しNiがフェライト相に拡散した後、熱間加工後に析出するオーステナイト相へのNi濃度が低減されたためと考えられる。この結果、1050℃での固溶化熱処理後の状態においても、熱間加工前加熱温度が高い場合にフェライト相中のNi濃度が高くなり、衝撃値が上昇したと考えられる。

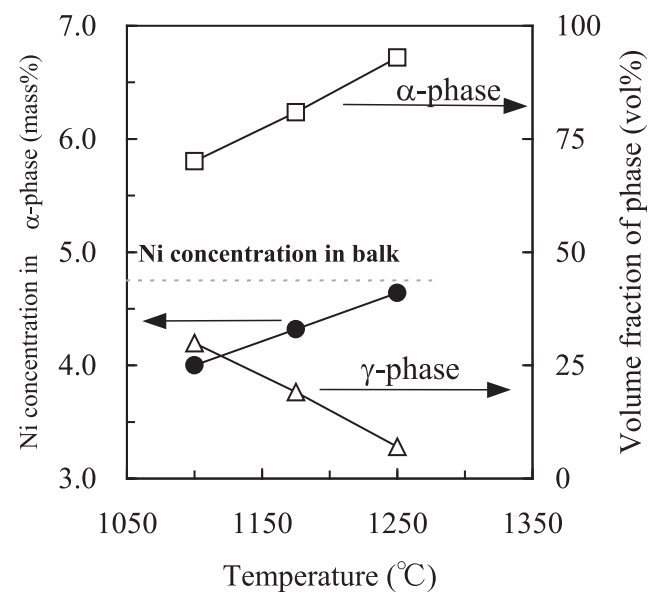


Fig.8 Changes of Ni concentration and the amount of ferrite and austenite phase with respect to temperature

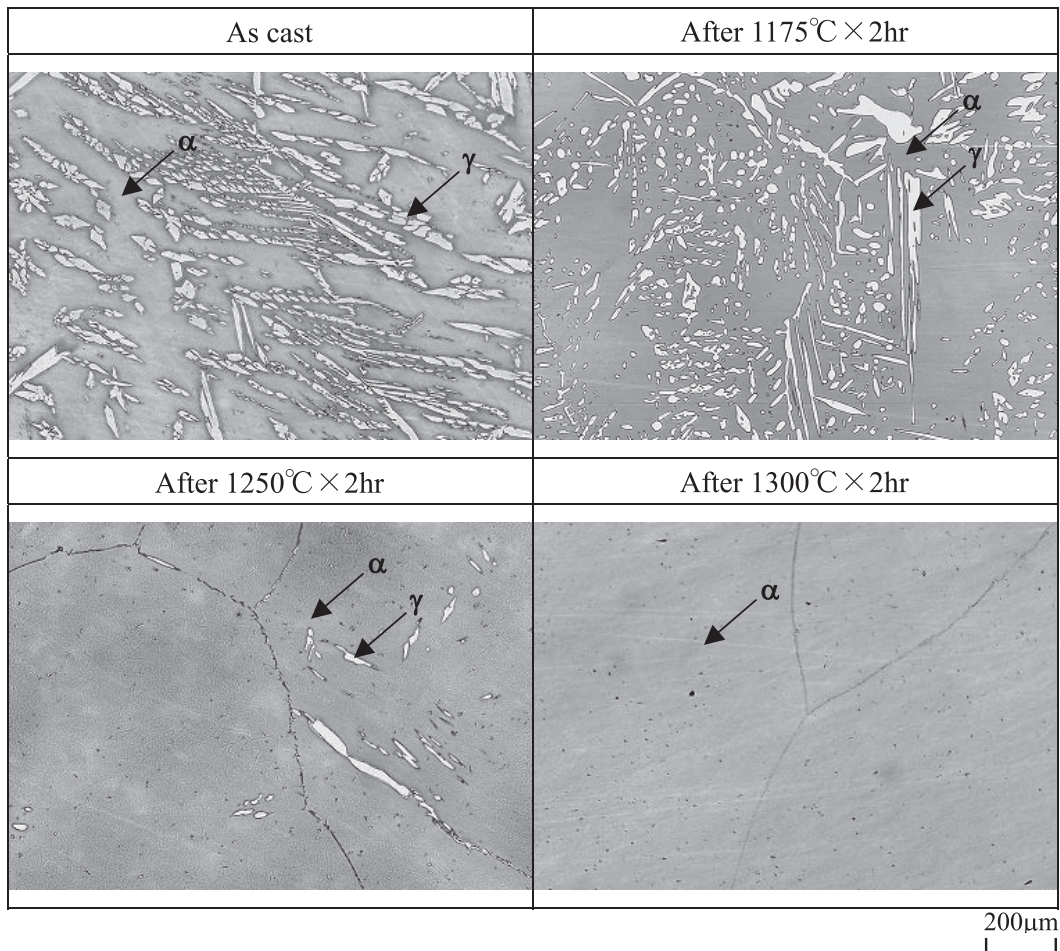


Fig.9 Change in microstructure after heat treatments on SUS329J1 as-cast specimen

5. 結言

SUS329J1の熱間加工前加熱温度を変化させ、靱性に及ぼす相中合金元素の影響を調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 熱間加工前加熱温度の上昇に伴い靱性は向上した。これは熱間加工前加熱温度の上昇により、フェライト相中へのNi分配率が増加したことによるものと考えられ、フェライト単相鋼へのNi組成増加による靱性向上と同様の傾向を示した。
- (2) シャルピー衝撃試験時の衝撃負荷による亀裂伝播経路はフェライト相であり、靱性を律速するものはオーステナイト相より靱性の低いフェライト相と考えられた。したがってフェライト相の強化により靱性は向上すると考えられた。

参考文献

- 1) 原 基, 品田 豊, 木村豪志, 橋浦広吉: 防食技術, 36 (1987), 650-656.
- 2) 藤原最仁, 佐藤昌男, 津田正臣: 鉄と鋼, 73 (1987), A91-94.
- 3) 橋爪修司, 千野 淳, 酒井潤一, 松島 巖: 鉄と鋼, 73 (1987), A95-98.
- 4) 庄篤史: 山陽特殊製鋼技報, Vol.10 (2003), 42.
- 5) 深浦健三: 2相ステンレス鋼の組織と強度特性に関する研究 (博士論文), (1985).
- 6) 大坪宏, 野原清彦, 中沢正敏: 2相ステンレス鋼の衝撃特性, CAMP-ISIJ, S482 (1985), 196.

■ 著者



美谷 章生