

高濃度窒素鋼の組織と機械的性質 (1)

窒素含有オーステナイト鋼における固溶強化と結晶粒微細化強化

Solid Solution Strengthening and Grain Refining Strengthening in Nitrogen Bearing Austenitic Steel

九州大学 大学院工学研究院 講師 土山聡宏 Toshihiro Tsuchiyama

九州大学 大学院工学研究院 教授 高木節雄 Setsuo Takaki

1 はじめに

近年、加圧式ESR法¹⁾、固相吸収法²⁾、メカニカルアロイング法³⁾等の特殊な製造法により1 mass %以上の高濃度の窒素を固溶させた各種オーステナイト系ステンレス鋼が開発され、その特性に強い関心が寄せられている。特にメカニカルアロイング法は、鋼中の窒素濃度を任意に制御できだけでなく、オーステナイト粒径を数ミクロン程度に微細化できるという特長も有しており、本手法によって窒素の固溶強化と結晶粒微細化強化を複合させた極めて強度の高いオーステナイト鋼の製造も可能になっている。このように異なる強化機構が重畳している鋼の強度を議論するには、各強化機構をそれぞれ単独に評価し、それらの加算則について検討してみると良い。本稿では、主に固相吸収法とメカニカルアロイング法を用いて製造した窒素濃度と結晶粒径が種々異なる鋼の引張試験結果を整理し、高濃度窒素域までの固溶強化の挙動、ならびにHall-Petchの関係に及ぼす窒素の効果について明らかになった結果を概説する。

2 オーステナイト鋼における窒素の固溶強化

図1は種々の窒素含有オーステナイト鋼について0.2%耐力を原子分率で表わした窒素濃度 [N] の2/3乗で整理した結果を示す。結晶粒径はいずれも100 μm程度であり結晶粒微細化強化の寄与は無視できる。窒素濃度の増加に伴い固溶強化は顕著となり、置換型合金元素の種類や濃度によらず0.2%耐力と [N]^{2/3}の間には良好な直線関係が成立している

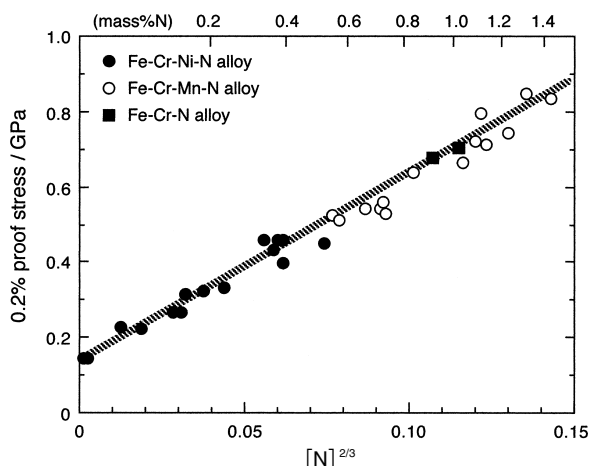


図1 オーステナイト鋼における窒素濃度と0.2%耐力の関係
ここで [N] は窒素の原子分率を示す。

ことがわかる。一般に固溶強化は、溶質原子が低濃度の場合には1/2乗則に従うことが知られているが⁴⁾、溶質原子が高濃度になると個々の溶質原子の周りの弾性応力場が重なり合い、一回の転位運動の素過程に複数の溶質原子が関与するようになるため、臨界せん断応力が溶質原子の2/3乗に比例するというLubuschの理論⁵⁾で説明されることが多い。窒素鋼の場合、約0.6 mass % N以上の領域で1/2乗則からずれ始めることが確認されている。本結果から、窒素鋼 (N < 1.4 mass %) における固溶強化の寄与は以下の関係式で与えられることが明らかとなった。

$$\sigma_{0.2} = 0.14 + 4.8[N]^{2/3} \text{ (GPa)} \dots\dots\dots (1)$$

3 窒素含有オーステナイト鋼における結晶粒微細化強化

金属材料における結晶粒微細化強化が以下のHall-Petchの関係式で表されることはよく知られている。

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + k d^{-1/2} \text{ (d: 結晶粒径)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Hall-Petch 係数と呼ばれる直線の傾きkは材料の剛性率⁶⁾や温度⁷⁾に依存して変化するが、鋼においては窒素濃度によっても大きく変化することが明らかとなっている。図2は窒素濃度とHall-Petch係数kの関係を示す。kの値は約0.4 mass % Nまでは急増し、その後緩やかに上昇する傾向にある。このようなkの窒素濃度依存性のため、窒素鋼の結晶粒微細化強化を議論する際には、そのときの窒素濃度に応じたHall-Petchの関係を用いなければならない。図3は、図2から見積もられるkの値を用いて、種々の窒素濃度のオーステナイト鋼におけるHall-Petchの関係における

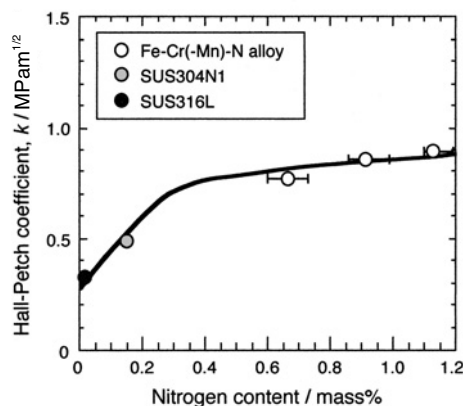


図2 オーステナイト鋼における窒素濃度とHall-Petch係数の関係

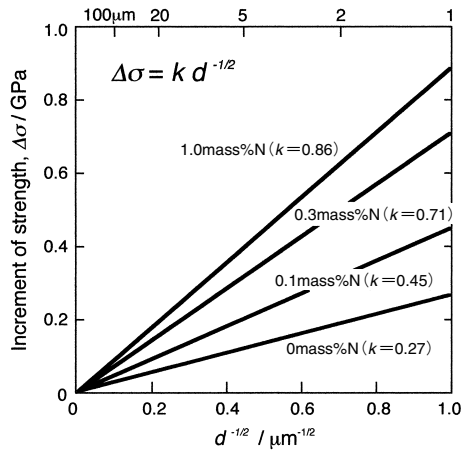


図3 オーステナイト鋼のHall-Petchの関係に及ぼす窒素濃度の影響
窒素濃度0, 0.1, 0.3および1.0mass%に対し、比例係数kの値は0.27, 0.45, 0.71, 0.86MPam^{1/2}

強化量 $\Delta\sigma = kd^{-1/2}$ を示した結果である。この図から明らかなように、窒素鋼は窒素無添加鋼に比べて著しく大きな結晶粒微細化強化を示す。言い換えれば、窒素鋼は結晶粒微細化が非常に有効な鋼種である。

4 窒素による固溶強化と結晶粒微細化強化の加算則

材料の耐力 $\sigma_{0.2}$ は一般に熱的成分 σ^t と非熱的成分 σ^a から構成される。つまりこれらの関係は次式のように表される⁸⁾。

$$\sigma_{0.2} = \sigma^t + \sigma^a \dots \dots \dots (3)$$

微細粒組織を有する高窒素鋼の場合は、 σ^t が窒素の固溶強化を含むオーステナイト母相の強度であり、 σ^a が結晶粒微細化強化量に対応する。したがって窒素含有オーステナイト鋼の強度は、(1) 式に図2で与えられるkの値を用いた結晶粒微細化強化量 $\Delta\sigma = kd^{-1/2}$ を加算した値となる。実際に引張試験で得られる耐力がこのような加算則によって説明される例は、本ミニ特集の「メカニカルアロイング法による高窒

素鋼の製造」にて示している。ただし、析出強化や転位強化も関与してくる場合において単純な加算則が成立するかは疑問であり、今後の検討を要する。

5 おわりに

これまで、鉄鋼材料における高窒素化の研究と結晶粒微細化の研究は独立して進められ、それぞれ大きな成果を修めてきた。今後、強度特性と耐食性をさらに改善し、かつ低温靱性にも優れた材料を開発していくには、高窒素化と結晶粒微細化による強化機構の複合化技術やその材料評価に関するさらなる研究が必要になってくるように思われる。

参考文献

- 1) Y. Katada, S. Sagara, Y. Kobayashi and T. Kodama : Proc. of First International Conference on Advanced Structural Steels (ICASS 2002), NIMS, Tsukuba, (2002), 317.
- 2) N. Nakamura and S. Takaki : ISIJ Int., 36 (1996), 922.
- 3) T. Tsuchiyama, H. Uchida, K. Kataoka and S. Takaki : Proc. of First International Conference on Advanced Structural Steels (ICASS 2002), NIMS, Tsukuba, (2002), 57.
- 4) M. F. Ashby and D. R. H. Jones : Engineering Materials 1, Butterworth-Hinemann, Oxford, (1980), 98.
- 5) R. Labusch : Phys. Stat. Sol., 41 (1970), 659.
- 6) 高木節雄：熱処理, 40 (2000), 292.
- 7) 川崎憲治, 土山聡宏, 高木節雄：材料とプロセス, 15 (2002), 1155.
- 8) K. Okazaki : J. Mater. Sci. : 31 (1996), 1087.

(2002年8月12日受付)