

の開発目標、開発過程、極低温での機械的特性およびその応用について解説する。

Effect of Phosphorus and Boron on Cryogenic Mechanical Properties of a Sensitized 17Cr-12.5 Ni-2Mo-0.05Nb-0.2N Steel

By Masao SHIMADA

鋭敏化した 17Cr-12Ni-0.05Nb-0.2N 鋼の極低温での機械的性質に及ぼすリンとボロンの影響を明らかにするために、研究を行った。供試鋼は 923-993 K の温度で 270-720 ks の鋭敏化を施し、低温、特に 4 K での実験を行った。

りん・ボロンの添加は時効中の粒界析出挙動に影響を及ぼした。りんは粒界析出を促進させ、ボロンはその効果を抑制している。しかし、鋭敏化材の 4 K での引張特性には両元素とも明瞭な影響を示さなかった。りんの多い供試鋼では、Cr NbN, $M_{23}C_6$, Cr_2N と Nb(CN) 以外に Fe_2Mo が析出し、粒界破壊を引き起こした。したがって、りん量の増加とともに鋭敏化材の破壊靱性値は顕著に劣化した。他方、ボロン添加により粒界破壊は抑制され、高い破壊靱性値が維持できている。

粒界偏析したりんが析出の核発生を促進するとともに、析出物、特に Fe_2Mo 、の界面の結合力を弱めると推定される。この仮定により、りんとボロン添加が鋭敏化材の 4 K での機械的性質に及ぼす影響を説明することができる。

Development and Production of 18Mn-18Cr Non-magnetic Retaining Ring with High Yield Strength

By Katsutoshi ORITA *et al.*

発電機に用いられるリテーニングリング材は、タービン発電機軸材の両胴端部に焼ばめされ、発電機の遠心力によるコイルエンドの変形を防止する部材である。そのため、リテーニングリング材に要求される材料特性は、非磁性であること、高速回転体として各種機械的性質に優れていること、並びに十分な環境強度を有することなどがあげられる。従来より、この非磁性リテーニングリング用材料として 18%Mn-5%Cr オーステナイト鋼が使用されてきた。しかし、近年、耐応力腐食割れ特性の改善を目的とし、種々の材料開発がされてきており、炭素の代替として高窒素量を添加した 18%Mn-18%Cr オーステナイト鋼が開発され、使用され始めている。本報は 18%Mn-18%Cr 鋼のよりいっそうの高強度化と高靱性化を目的に、化学成分および冷間加工に関する基礎的な研究結果と、耐力 1400 MPa 級のリングを試作し、そのリングについて、機械的性質、疲労強度、破壊靱性および応力腐食割れ特性等について調査した結果を報告する。

Development of Low Cost Non-magnetic Stainless Spring Steels

By Hakan HOLMBERG *et al.*

In the present paper, the microstructure of recently developed non-magnetic austenitic spring steels of high strength is described and correlated to mechanical behaviour. It is possible to combine a high strength with a low magnetic permeability. This is achieved by a balanced alloying with strong austenite forming elements such as Ni, Mn, and N.

Further strengthening occurs as a result of precipitation hardening during tempering. The strong tempering response in Si-rich alloys is ascribed to enhanced precipitation, which is in part explicable by the ability of Si to increase the activity of C. In V-rich steels, the strong tempering effect is most likely caused by VN precipitation. A low magnetic permeability is achieved essentially by alloying with the strong austenite stabilizing elements Ni, Mn, and N. Owing to the suppression of magnetic α' -martensite a low magnetic permeability is maintained even after severe cold working.

Strengthening and Hardening

Effect of Thermo-mechanical Control Process on Strengthening of a 22Mn-13Cr-5Ni Austenitic Stainless Steel Plate for Cryogenic Use

By Souichi IKEDA *et al.*

極低温用 22Mn-13Cr-5Ni 系非磁性鋼板の強化に及ぼす加工熱処理 (TMCP) の影響を、熱間加工シミュレーターを用いて調査した。最終圧下温度、冷却速度および冷却開始温度は再結晶オーステナイト粒径を制御する因子である。再結晶領域で、最終圧下温度が低くなればなるほど、冷却速度が大きくなればなるほど、また、冷却開始温度が高いものほどオーステナイト粒は微細化し、それらはすべて、本鋼の強化に有効に作用する。この結果に基づき、適正な TMCP 条件で板厚 70 mm の鋼板を製造し、機械的性質を調べた。その結果、 $-269^{\circ}C$ の極低温で、TMCP 材は、溶体化処理材に比べ破壊じん性値がわずかに低下するものの、より高い 0.2% 耐力を得ることができた。

Effects of Alloying Elements and Thermomechanical Treatments on Mechanical and Magnetic Properties of Cr-Ni Austenitic Stainless Steel

By Toshihiko TAKEMOTO *et al.*

Cr-Ni オーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質および磁気的性質に及ぼす合金元素と加工熱処理の影響を調査した。N と Si は冷間圧延後のひずみ時効硬化を増大させ、高強度化に寄与するが、Si は高含有量で

その寄与が著しい。α' 変態に対する γ 安定度の指標として Ni_{eq} を得、高強度を得るため付与する冷間圧延率に応じて Ni_{eq} を制御することで非磁性を維持できる。Si は変形モードを転位の増殖から積層欠陥の生成へと変化させる。Si によるひずみ時効硬化の増大には導入される内部ひずみ場の強化と析出強化が寄与しているものと考えられる。また、Si による γ 安定度の低下は Si が ε 変態を促進させ、ε 相を介して α' 変態が促進されるためと考えられる。

Effect of Alloying Elements on Hardening and Restoration Behavior of 15Cr-15Ni High Hardness Non-magnetic Stainless Steel

By Byung-Ha CHI *et al.*

高硬度非磁性鋼開発の基礎研究として、15Cr-15Ni-1.5Mn 鋼を用い、固溶硬化、加工硬化、歪み時効、析出硬化、再結晶挙動等に及ぼす合金元素 (C, N, Si, P, Mo, B) の影響を調べた。

硬度測定、引張試験、TEM 観察、磁気測定、X 線回折、電気抵抗測定、抽出残渣の同定および重量測定、B¹⁰ のオートラジオグラフィ等の実験結果に基づいて、溶体化処理のままの状態、冷間加工状態およびその後の再加熱による硬度の変化、再結晶挙動に及ぼす合金元素の影響を考察した。また、これら合金元素の複合添加による合金成分間の相互作用効果についても考察した。

結果として、①P は溶体化処理状態で硬度の上昇に大きく寄与すると共に炭化物の析出を微細化かつ促進する、②Si, P は冷間加工による硬度上昇に N とはマイナス、C とはプラスの複合作用を示す、③B は大きな再結晶遅延効果を有するが、Mo を除いて他の合金元素と複合添加するとマイナスの複合作用を示す等が得られた。

Observations of Interstitial (C, N)-substitutional (Cr) Configurations in Austenitic Stainless Steels through X-ray Absorption Fine Structure

By Katsuro ODA *et al.*

炭素、窒素、シリコンを単独または複合添加した 15Cr-15Ni ステンレス鋼における Cr 原子周辺の局所原子状態を X 線吸収端近傍構造 (XANES) および X 線吸収微細構造 (EXAFS) より観察した。吸収端の肩に見られるピークのへこみの程度は、炭素、窒素、シリコン無添加鋼で大きく、これらの元素の添加で小さくなる。低サイクル変形、引張変形を加えてもこのへこみの程度はあまり変化しない。溶体化処理 (水冷) 状態の炭素、窒素あるいはシリコン添加鋼では、EXAFS 関数をフーリエ変換して得られる動径分布曲線の第一ピークの高さが低い。低サイクル変形、引張変形を与えると、炭素あるいは窒素添加鋼のこの第一ピークの高さが増加する。シリコン添加鋼では変化が小さい。これらの結果は、Cr 原子と C, N 原子との結合体 (I-S 結合体) が、溶

体化処理状態において存在し、変形により破壊することを示すものと考えられる。こうした I-S 結合体がオーステナイト鋼の固溶強化に寄与し、変形時破壊されて軟化要因となる。

Mechanical Properties at Cryogenic Temperatures

Effect of Si and Al Additions on the Low Temperature Toughness and Fracture Mode of an Fe-27Mn Alloy

By Setsuo TAKAKI *et al.*

Fe-27Mn 合金の低温靱性と破壊形式に及ぼす Si と Al 添加の影響について、組織・不均一変形および積層欠陥エネルギーの観点から検討した。Fe-27Mn 二元合金は、77 K では準安定オーステナイト (γ) と ε マルテンサイト (ε) の二相からなり、不均一変形に関連した粒界破壊のために、延性-脆性遷移が生ずる。この粒界破壊は、大きな ε 板が突き当たった粒界での応力集中によって引き起こされる。27Mn 合金への Si の添加は、ε 板の微細化に有効であり破壊形式を粒界から粒内での破壊へと変える。しかし、その破壊は ε 板に沿った擬へき開型であり、Fe-27Mn-Si 合金もやはり ε の形成に関連した延性-脆性遷移を示す。ε 板の交点での応力集中は、ε 板に沿った微小き裂を形成させ、擬へき開破壊を引き起こすことになる。ε を含む高 Mn 鋼の破壊形式は、組織と変形挙動に大きく依存しており、Si 添加は多分 ε の核形成だけでなく、積層欠陥エネルギーを下げて ε 板の交点での部分転位の交差すべりにも影響している。Al の添加は γ-ε 変態の抑制に有効であり、少量の添加で低温靱性を大幅に改善できる。

Effect of Cold Rolling on Mechanical Properties and Fracture Mode of a 32Mn-7Cr Steel at Cryogenic Temperatures

By Tetsumi YURI *et al.*

高マンガン鋼のひとつである 32Mn-7Cr 鋼に冷間圧延を施し、4 K における強度と靱性に及ぼす影響を調べた。4 K における降伏強さは、0% 冷間圧延材では 1118 MPa であるが、冷間圧延を行った 20% 冷間圧延材では 1379 MPa、さらに 40% 冷間圧延材では 1786 MPa と強化された。しかし、伸びおよび絞りは冷間圧延率の上昇とともに低下した。特に、伸びの低下が大きかった。また冷間圧延によりシャルピー吸収エネルギー (CVN) および破壊靱性値 (K_{IC}) も大きく低下した。靱性の低下は、Compact Tension (CT) 破面に観察される粒界サブクラックと CT 破面およびシャルピー衝撃破断面の一部に観察される平坦な脆性的破面の混入によるものである。サブクラックは粒界破壊によるもので、また平坦な脆性的破面は主に粒界破壊、一部双晶界面における破壊によるものと考えられる。

Suppression of Cryogenic Intergranular Fracture through Heat Treatments and Roles of Boron in High Manganese Non-magnetic Steels

By Hideki TANAKA *et al.*

高 Mn 非磁性鋼の機械的特性、とくに低温脆性に及ぼす、溶体化処理温度からの冷却速度および溶体化処理後の再加熱条件の影響を調べた。真空炉で溶解した、Mn, Cr, C, N, B, P 量の異なる、Fe-Mn 二元系、Fe-Mn-C 三元系および、Fe-Mn-Cr-N 四元系高 Mn 非磁性鋼を用いた。これらのすべての鋼で、溶体化処理温度から中間の速度で冷却すること、あるいは溶体化処理温度から水冷後 723-773 K で再加熱することにより、粒界破壊の抑制と靱性の向上がみられた。このような靱化熱処理をしても、電子顕微鏡で観察されるような微細構造の変化は見られず、また引張強度の減少もほとんど観察されない。熱中性子照射により生じた α 線の痕跡を用いたオートラジオグラフィによって、B の粒界偏析と熱処理による靱化がよく対応していることが示された。溶体化処理後急冷した高 Mn 非磁性鋼が、低温で粒界脆化しやすい原因について、熱処理による靱化のメカニズムとともに検討した。

Cleavage-like Fracture at Low Temperatures in an 18Mn-18Cr-0.5N Austenitic Steel

By Yo TOMOTA *et al.*

18Mn-18Cr-0.5N 鋼の低温脆化挙動を引張りおよび衝撃試験によって研究した。破壊挙動とそれに及ぼす結晶粒径、ひずみ速度、および予加工の影響に関する新しい知見が得られた。

脆化は $\{111\}$ 擬へき開 (Cleavage-like) に関連して起こる。破面の特徴やき裂発生に関する観察結果を示した。

結晶粒径の影響は通常のフェライト鋼における傾向と異なる。まず、衝撃試験による遷移温度 (DBTT) は粒径の減少に伴い若干上昇気味になる。ただし、破面単位は減少する。降伏強さをベッチの式で整理するとその係数 k が試験温度に大きく依存することがわかり、このような結果を基にして DBTT の粒径依存性を検討した。

引張試験において、ひずみ速度を $2.7 \times 10^{-1}/s$ へ増加させると 77 K で塑性変形は局在化し早期にネッキングを起こして破断した。破面は擬へき開からディンプルへと変化した。

室温での予加工は、77 K における破壊応力を少し増大させるが擬へき開を抑制することはできなかった。

このような特異な諸結果は窒素固溶強化に起因する。

Intergranular Fracture in Fe-Mn Austenitic Alloys at 77 K

(Note)

By Yo TOMOTA *et al.*

Phase Equilibrium and Phase Transformation

Effect of Transformation Cycling on the ϵ Martensitic Transformation in Fe-Mn Alloys

By Kaneaki TSUZAKI *et al.*

Fe-17%Mn および Fe-25%Mn 合金の $\gamma \rightarrow \epsilon$ 変態および $\epsilon \rightarrow \gamma$ 逆変態におよぼす $\gamma \rightleftharpoons \epsilon$ 繰返し変態の影響を研究した。Fe-25%Mn 合金の場合、繰返し変態による顕著な M_s 点の低下が観察された。305 K と 573 K 間での 7 回の熱サイクルによって M_s 点は 60 K 以上低下し、室温にてオーステナイト (γ) 単相となった。一方、 A_s および A_f 点は熱サイクルを重ねるごとに上昇した。繰返し変態による M_s , A_s および A_f 点の変化は、熱サイクルの最高加熱温度が高くなると減少した。Fe-17%Mn における繰返し変態による M_s の低下は Fe-25%Mn と比べて小さかった。 γ 中には、熱サイクルを行う前には転位はほとんど認められなかったが、273 K と 573 K 間の熱サイクル後では数多くの転位が観察された。573 K での γ の硬さは、273 K と 573 K 間の熱サイクルを行うことによって増加した。Microstructure memory (マルテンサイトが前回の生成位置と同じ位置に生成すること) は認められなかった。

Effects of Alloying Additions on Fe-Mn-Si Shape Memory Alloys

By Hiroaki OTSUKA *et al.*

Fe-Mn-Si 系形状記憶合金は、 $\gamma \rightarrow \epsilon$ の応力誘起マルテンサイト変態を利用している。本稿では、この合金の形状記憶効果 (SME) に及ぼす添加元素、特に Cr の影響について報告する。SME を支配する因子としては、 M_s 点、ネール温度 (T_N) と応力誘起で生成できるマルテンサイトの量の三つが挙げられる。これらの因子を最適化することにより、Fe-28Mn-6Si-5Cr, Fe-20Mn-5Si-8Cr-5Ni, Fe-16Mn-5Si-12Cr-5Ni 等の優れた SME を有し、かつ高い耐食性を持つ合金を見出した。また Fe-Mn-Si 基本合金系で有効であった加工熱処理が、これらの新しい合金系でも有効であることを見出した。

Phase Equilibria in Fe-Mn-Al-C Alloys

By Kiyohito ISHIDA *et al.*

Ni と Cr を含有しないステンレス鋼として注目されている、Fe-(20-30)wt% Mn-(0-10)% Al-C 系合金の 900-1200°C における相平衡を、X 線マイクロアナライザー分析および電子顕微鏡観察によって決定した。特に、 γ オーステナイト相とペロプスカイト構造の炭化物 x 相の存在範囲を明らかにし、さらに急冷凝固材では出現するとの報告のある Ll_2 構造 γ' 相がバルク材の安定相として存在するか否かに留意して実験を行った。その結果、 x 相は高 Al, 高 C の組成範囲に広く形成され、 $x/\gamma+x$

境界線は、逆行溶解度を呈することがわかった。また、900°C以上の温度から急冷した試料のオーステナイト相には規則反射が観察されたが、それ以下の温度から急冷した場合には規則反射は認められなかった。電顕組織お

よび回折強度より、900°C以上の規則反射は冷却中に析出した α 相によるものと考えられた。従ってパルク材においては、 $L1_2$ 構造の γ' 相は少なくとも600°C以上の温度範囲では安定に存在しないことがわかった。

会員には「鉄と鋼」あるいは「ISIJ International」のいずれかを毎号無料で配布いたします。「鉄と鋼」と「ISIJ International」の両誌希望の会員には、特別料金5000円の追加で両誌が配布されます。

新刊案内

「電磁気冶金の基礎研究部会報告書 第一分冊」

日本鉄鋼協会電磁気冶金の基礎研究部会編

定価 3,605 円 (消費税込, 送料別) 会員割引価格 2,575 円 (消費税込, 送料別)

本書は、電気および磁気のエネルギーを冶金プロセスに利用する電磁気冶金に関する主要な研究成果を収録したものである。(B5版, 138頁)

なお、研究成果を重要テーマごとに総括した第二分冊である第129・130回西山記念技術講座テキスト「電磁気力を利用したマテリアルプロセッシング」[B5版, 305頁, 定価6,180円(同上), 会員割引価格5,150円(同上)]と合わせてご活用いただくことをお勧め致します。第一および第二分冊一括購入の場合にはセット価格として、定価9,270円(同上), 会員割引価格7,210円(同上)と致します。

(目次)

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 1. 熔融金属フィルムの落下挙動 | 7. 回転磁界取鍋精錬炉の設備特性と冶金特性 |
| 2. 電磁気力による熔融金属の形状制御に関する基礎検討 | 8. 電子ビーム溶解における熔融金属表面温度測定上の2, 3の問題 |
| 3. 直流磁場による熔融金属表面波動の抑制 | 9. 水素-アルゴンプラズマによる溶鋼の脱炭・脱窒 |
| 4. コールド・クルーシブルの基礎的研究 | 10. 熱プラズマと凝縮相間の反応 |
| 5. 電磁気力による熔融金属の微粒化 | 11. 熱プラズマ噴流層による複合粒子の製造 |
| 6. 強磁場中の凝固現象 | 12. チタン合金の電子ビーム溶解に関する基礎的検討 |

申込法 お申込みいただくと同時に、次のいずれかの方法でご送金下さるようお願い致します。

送金方法 ・現金書留・郵便振替(東京7-193番)
・銀行振込(第一勧銀東京中央支店(普)No. 1167361)

申込先・問合せ先

〒100 東京都千代田区大手町 1-9-4 経団連会館 3階
日本鉄鋼協会庶務課 水野 電話 03-279-6021(代)