

特性を温度 1100~1200 K, 引張応力 4~50 MPa の範囲で調べ, bcc 固溶体においても高温クリープ挙動に明瞭な遷移が存在することを確認した。低応力域におけるクリープ挙動は溶質雰囲気を引きずって粘性的なすべり運動をしている転位挙動によって支配されており, 定常クリープ速度は $\dot{\epsilon}_S^M = 1.21 \times 10^{-2} (Gb/kT) D_{Mo}(\sigma/G)^{3.45}$ で記述できる (G は剛性率, b はバーガースベクトル, D_{Mo} は Mo の拡散係数)。高応力域における定常クリープ挙動は低応力域におけるものとは異なり, $\dot{\epsilon}_S^H = 5.7 \times 10^7 (Gb/kT) D_{Fe}(\sigma/G)^{5.3}$ となる (D_{Fe} は Fe の拡散係数)。通常の引張試験においてもクリープ試験と同様の定常状態が出現する。高応力の下では溶質雰囲気はある位置で破られ, 転位の一部は孤立溶質原子がランダム分布しているマトリックス中を裸の転位として移動可能となるものと考えられる。本研究で認められた遷移条件は Al-Mg (fcc), α -Ti-Al (hcp) 合金のべき乗則クリープにおける上部遷移条件と同じものである。

Deformation Structures in a Work-hardened Austenite [RA]

By Hideyuki OHTSUKA *et al.*

室温でも安定なオーステナイト一相である Fe-Ni-C 合金, および市販の Nb-V 低合金高張力鋼を用いて, 熱間で加工硬化させたオーステナイト中の変形組織の形態の種類とそれらに対する加工条件の影響を調べた。まず, 変形組織は形態およびその結晶方位から遷移帯, マイクロバンドおよび粒界近傍の変形組織の三種類に分類できた。さらに加工条件およびオーステナイト粒径が変形組織の密度や形態に及ぼす影響について明らかにした。変形組織の密度は加工度が増加するとともに増加し, 加工度・加工温度・歪み速度によらず遷移帯の密度はマイクロバンドの密度よりも高いことが分かった。また, 遷移帯は低加工度の時でも明瞭に観察されるが, マイクロバンドは比較的高加工度で明瞭に観察されるようになる。オーステナイト粒径が小さくなると, 粒界およびその近傍で歪みが担われるため, オーステナイト粒内で変形組織は発達しにくくなることが分かった。

Deformation Behavior of a Superplastic Zn-Al Eutectoid in Tensile Tests of Constant Strain Rate [RA]

By Norio FURUSHIRO *et al.*

Zn-Al 共析合金の定歪み速度試験における応力-歪み挙動が定速試験の場合と比較しつつ検討された。その結果, 473 K で適当な歪み速度の定歪み速度試験において顕著な加工硬化の生ずることが明らかとなった。また, 異なつた温度での試験での最大応力の値を用いて活性化エネルギーを算出したところ, Regions I, II および III でそれぞれ 121.6, 61.3 および 111.2 kJ/mol となつた。ここで Regions I および III の活性化エネルギーの値は Zn もしくは Al の体積拡散のそれと対応し, Region II の場合は Zn もしくは Al の粒界拡散の活性化エネルギーの値に近かつた。これらの活性化エネルギー, Q , の歪み依存性を検討したところ, Region I では変形の進

行につれて Q は低下し, Regions II と III では変形中の Q の変化の大きくないことがわかつた。このことは Regions II および III では変化初期から破断直前まで同様の過程で律速され, 一方, Region I では変形の律速過程が変形中に変化する可能性を示唆している。

Mathematical Model of Hot Deformation Resistance in Austenite-Ferrite Two Phase Region [RA]

By Yoshiyuki SAITO

Si-Mn 鋼の変形抵抗に及ぼす変形条件と変態の影響を明らかにするため, フェライト (α) + 準安定オーステナイト (γ) 域および ($\gamma + \alpha$) 二相域において一段および多段引張試験を行つた。“フェライト” (92% α + 8% 準安定 γ) 域における変形応力は γ 域と同一形式の式で表現できる。“フェライト”域の加工硬化係数は γ 域よりも小さいが, ひずみ速度依存指数は“フェライト”域の方が大きい。 $(\gamma + \alpha)$ 二相域における変形抵抗は γ と α の変形抵抗の混合則で近似的に表せる。 γ における静的復旧過程を記述する式に, 変態にともなうひずみの回復効果を表す式を追加することにより, $(\gamma + \alpha)$ 二相域圧延中の静的復旧過程を定式化できる。実験結果にもとづき, γ と α の変形抵抗の差 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態にともなうひずみの回復効果を考慮することにより, 実操業厚板圧延における $(\gamma + \alpha)$ 二相域での圧延荷重を精度良く予測できる。

Recrystallization

Formulation of Static Recrystallization of Austenite in Hot Rolling Process of Steel Plate [RA]

By Atsuhiko YOSHIE *et al.*

厚鋼板の制御圧延を想定して小型熱間加工シミュレーターを用いた二段圧縮実験を行い, 測定された加工応力の軟化挙動をもとに鋼の熱間加工時における加工組織の復旧過程 (オーステナイトの回復・再結晶) を予測する数学的モデルを構築した。従来オーステナイトの再結晶の進行は, 組織観察, 軟化率あるいは潜伏期を無視したモデル化等によつて定量的な取扱いが試みられてきた。本論文は潜伏期をモデルに取り込み, 回復および再結晶の進行をオーステナイト中の平均転位密度の変化量を用いて統一的に表現することを試みたものである。これにより多パス連続圧延中のオーステナイトの静的再結晶限界温度域およびオーステナイト中に累積される歪み量を定量的に予測することが可能となつた。

Effect of $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ Partial Transformation on Recrystallization after Hot Deformation in 17%Cr Stainless Steel [RA]

By Tetsuro TAKEISHITA *et al.*

圧縮型の熱間加工シミュレーターを用いて, 17%Cr ステンレス鋼を高温変形後 (900~1250°C) 恒温で保持した時の再結晶挙動を調査した。特に α 母相の再結晶に

及ぼす部分変態 ($\alpha \rightarrow \gamma$) の影響に関しては、加工前の γ 相量を変化させて調査した。その結果、再結晶に及ぼす部分変態の影響は極めて大きいことを見出した。該鋼を α 単相域より冷却して「 $\alpha + \gamma$ 」二相域で加工を与えると、加工前に γ 相の析出 ($\alpha \rightarrow \gamma$ 部分変態) が完了した時の再結晶と比較して、加工後に γ 相の析出が生じた時の再結晶は著しく遅延された。また、該鋼に γ 相を析出させた後冷却して「 $\alpha + \text{炭化物}$ 」二相域で加工を与えると、加工前に γ 相の分解 ($\gamma \rightarrow \alpha + \text{炭化物}$) が完了していた場合に比べて、加工後に γ 相の分解が生じた時の再結晶は著しく遅延された。

以上の $\alpha \rightarrow \gamma$ 部分変態による再結晶遅延現象は、加工により促進された部分変態が α 母相の再結晶核生成サイトを喪失させたためと結論される。

Computer Modelling of Microstructural Change and Strength of Low Carbon Steel in Hot Strip Rolling [RA]

By Masayoshi SUEHIRO *et al.*

低炭素熱延鋼板の強度をその成分、製造条件から予測するモデルを開発した。本モデルは熱間加工組織予測モデル、変態予測モデル、組織から材質を予測するモデルからなる。熱間加工組織予測モデルおよび変態予測モデルはすでに開発され詳細に報告されている。この二種のモデルを結合し熱延鋼板の組織を予測する総合モデルを作り上げるため、変態に及ぼす熱間加工時の残留ひずみの影響および変態予測モデルを用いたフェライト粒径の予測に関する検討を行いモデルに取り入れた。さらに組織と硬さの関係の調査を行い、混合組織を持つ鋼の個々の組織の硬さがそれぞれの組織の変態温度で決定されることを見出し、組織から材質を予測するモデルに取り入れた。本モデルを熱延鋼板の組織と引張強度の予測に用いたところ計算値と実測値は良い一致を示し、本モデルの熱延鋼板への適用性が確認された。

Effect of Alloying Elements on Recrystallization Kinetics after Hot Deformation in Austenitic Stainless Steels [RA]

By Sadahiro YAMAMOTO *et al.*

オーステナイト系ステンレス鋼の熱間加工における静的回復、再結晶挙動に及ぼす添加元素の影響を、パス間時間を広範囲に変化させた高温高速二段圧縮試験により検討した。304, 316 タイプステンレス鋼の再結晶は、Si-Mn 鋼のオーステナイト域での再結晶に比べ、著しく遅滞する。これは Cr の固溶に起因し、Ni の影響は見られない。304, 316 タイプステンレス鋼において、圧延まで完全再結晶組織を得られる圧延仕上り温度を、圧延実験により調べた。304 鋼では 975°C、316 鋼では 1050°C であった。添加元素による再結晶遅滞効果は、 $\text{Ni} < \text{Cr} < \text{V} < \text{Ti} < \text{Mo} < \text{Nb}$ の順に大きくなる。この溶質原子による再結晶遅滞効果は、溶質原子の添加による高温での格子定数変化と関連があり、格子定数を大きく変化させる元素ほど、再結晶遅滞効果が大きい。すなわち、再結晶遅滞効果は、溶質原子による格子の歪みと転

位との相互作用に起因する。

Microalloying

High Temperature Deformation and Thermo-mechanical Treatment of Low Carbon Steel and Vanadium-Niobium Microalloyed Steel [RA]

By Masanori Ueki *et al.*

低炭素鋼およびバナジウムとニオブで微量合金化された鋼が約 10^{-3} から 10 s^{-1} の真ひずみ速度そして 900 から 1200°C の温度にわたる条件の下でねじりによつて変形された。それらの変形応力挙動の決定およびその変形微視組織の観察を通して、動的再結晶挙動が解析された。

動的再結晶によるオーステナイト結晶粒微細化を認識することによつて、両方の鋼で、加工熱処理における二種類のシミュレーションがねじり試験機を用いて行われた。空冷された試片における最終の結晶粒径は、800°C での唯一の変形を含むスケジュールにおいて、そしてもちろん微量添加鋼において、より微細になった。それらの鋼の二相領域における動的レステーションの特徴的な微視組織形態が、特に微量添加鋼において示された。そこでは、オーステナイトは一部結晶粒界で再結晶したが、フェライトにおいては、結晶粒の分割 (サブグレインあるいは結晶粒の形成) が観察された。

Toughness of Welded Joint and Crack Arrestability of Base Plate in Ultra Low C-2.5% Ni Steel Produced by Thermo-mechanical Control Process [RA]

By Osamu FURUKIMI *et al.*

LPG 貯槽用 2.5%Ni 鋼について、MIG 溶接継手部の脆性き裂発生特性に及ぼす C 量の影響および制御圧延および冷却条件が母材の機械的性質に及ぼす影響を調べた。

継手部のき裂発生特性のばらつきは、C 量の低減に従い高位安定化した。一方、0.01%C-2.5%Ni 鋼の母材の脆性き裂伝播停止靱性は、フェライトの細粒化および固溶 Nb の減少により改善された。フェライト粒は、スラブ加熱温度を低温にし圧延後の冷却速度を増加することにより微細化された。圧延後の冷却速度を増加することによる細粒化は、たとえ固溶 Nb が増加しても脆性き裂伝播停止靱性を改善した。これらの知見を基に、母材の高脆性き裂伝播停止靱性および溶接継手部の高き裂発生特性を有する制御圧延、冷却型の LPG 貯槽用 0.01%C-2.5%Ni 鋼板の製造が可能になった。

Characteristics of Precipitates and Mechanical Properties in Ti Bearing HSLA Steels [RA]

By Shuji OKAGUCHI *et al.*

三種の Ti 添加 HSLA 鋼 (Ti, V-Ti および Nb-Ti) について、制御圧延材の引張強度と溶体化処理材のオー

ステナイト粒径に及ぼす加熱温度の影響を鋼中の析出物の組成と安定性に注目して調査した。その結果、Ti 鋼への 0.05 wt% の V 複合添加は強度を上昇させるが、オーステナイト粒成長に対してはほとんど影響を及ぼさないのに対し、0.03 wt% の Nb 複合添加は低温加熱した際の強度低下を引き起こし、オーステナイト粒成長を遅らせる効果があることが判明した。また、こうした Nb-Ti 鋼と V-Ti 鋼の挙動の相違は鋼中の析出物の溶解度の相違に起因していた。さらに、四元系析出物の熱力学モデルを用いて Ti 鋼中の析出物の溶解度を検討した結果、Nb-Ti 鋼と V-Ti 鋼中の析出物の溶解度の違いは析出物中の Nb と V の固溶度の相違で説明された。

Effects of Carbon Content, Rolling Condition and Cooling Rate on the Mechanical Properties of As-rolled High-strength Low Alloy Steel [RA]

By Shoji OKAMOTO *et al.*

引張強度 80~100 kgf/mm² 級の非調質鋼の開発のために、その機械的性質におよぼす炭素量、圧延条件および冷却速度の影響を調べた。

チタン、ボロン、ニオブを微量添加した 0.1%C-1.8%Mn 鋼が、熱間圧延後の 5~15°C/s の冷却速度で、80~100 kgf/mm² の高い強度と高い延性とを合わせもつ優れた特性を示すことがわかった。制御圧延は微細なアンキュラー・フェライト組織を生成させ、その結果、靱性に対する改善効果が、他のどの圧延条件よりも高い。

Effect of Thermo-mechanical Processing on Mechanical Properties of Copper Bearing Age Hardenable Steel Plates [RA]

By Takashi ABE *et al.*

Cu 時効析出強化鋼の機械的性質に対する加工熱処理の影響を調査した。制御圧延後の加速冷却あるいは直接焼入れは低炭素ベイナイト主体の組織を生成することにより強靱性の向上をもたらした。1% 以上の Cu の添加は ϵ -Cu による時効析出強化のみならず、焼入性の増大を通じた組織制御に有効に作用した。

加工熱処理における Cu の固有の影響について検討し、Cu には 1% 程度添加された場合再結晶抑制効果があること、また、空冷途中に生ずる ϵ -Cu の析出が加速冷却によって抑制されることが示された。これらは、いずれも機械的性質の向上に寄与した。

Grain Refinement

Microstructural Change of Austenite in Hot Working with a Very High Reduction [RA]

By Masakazu NIIKURA *et al.*

広範囲の熱間加工条件を再現できる 150 t 加工熱処理シミュレータを用い、18-8 ステンレス鋼と 42%Ni オーステナイト鋼において、ミクロ組織・高温変形挙動・機械的性質に与える大圧下加工の影響を系統的に調査した。

大圧下加工により、再結晶組織の得られる加工温度が低温側に拡大するとともに、低温域における大圧下加工により、再結晶 γ 粒が著しく微細化され、18-8 ステンレス鋼では 950°C において 10 μ m 以下の微細 γ 粒が得られることが明らかになった。大圧下加工は加工熱に基づく温度上昇を生じ、動的復旧とともに加工後の静的再結晶を促進していることが示された。

加工熱処理シミュレータにより得られた本研究結果を、熱間押出しされたシームレス鋼管におけるものと比較し、熱間押出しにおける新しい加工熱処理技術の可能性について検討した。

Evolution of Ultrafine-grained Ferrite in Hot Successive Deformation [RA]

By Yoshikazu MATSUMURA

普通炭素鋼に A_r 変態点近傍の温度域で大圧下加工を与えると粒度番号が 13 を越える超微細なフェライト組織が得られる。これは加工中にフェライト変態とそれに引き続くフェライトの再結晶が起こるためと考えられる。この現象を実機熱間圧延に適用する目的で 1 パス大圧下を多パス圧延で置換可能かどうか検討を行なった。その結果パス間時間が 2 s 以内の圧延ならば歪み累積効果により微細フェライトが得られる事が判明した。

連続熱間圧延による実機試作の結果、平均粒度番号 13.5 のフェライト組織が得られた。

Hot Workability

Stress Relaxation during Hot Deformation of Austenite [RA]

By Yasuhiro MAEHARA *et al.*

湾曲型連続鋳造機における多点矯正化がスラブ品質に及ぼす影響を明らかにするため、低合金鋼およびオーステナイト鋼を用いて 700~1300°C で低歪み速度変形によつて一定の歪みを与えた後 3 min 応力緩和させる間欠引張変形を行い、応力緩和現象と高温延性との関連について検討した。応力緩和は変形温度の低下に伴って大きく抑制され、特に Nb 添加鋼では NbC の析出によつてその効果がより顕著となる。間欠引張変形中に動的析出する炭・窒化物はその後の応力緩和過程に成長し粗大化するが、引き続き変形中に核生成し続けるので、連続変形の場合と同様に延性を低下させる。この結果は、矯正点数の増加は平均歪み速度を下げた動的析出を加速するのでスラブ表面疵の発生を助長することを意味している。高温域においては応力緩和が起こりやすくなるので、通常凝固点直下で生ずる内部われの抑制には多点矯正化が有効と考えられる。

Influence of Manganese and Sulfur on Hot Ductility of Carbon Steels at High Strain Rate [RA]

By Chihiro NAGASAKI *et al.*

連鋳や HDR で発生するクラックの機構を知るには広範囲なひずみ速度における高温の力学的性質を研究し

なければならない。従来低ひずみ速度引張試験で高温延性を調べた研究は多いが、高ひずみ速度試験に関する例は少ない。そこで、高速型熱間加工再現試験装置を用い炭素鋼の γ における高温延性を 200/s までのひずみ速度で調査した。Mn:S 比が 20 以下または S を 30 ppm 以上単独添加した炭素鋼では粒界脆壊脆化が起こるが、S を 10 ppm 以下にするか Mn:S 比を 50 以上にすれば、脆化はなくなる。Mn:S=19 の 0.19% 炭素鋼では破面に MnS の層状析出物が見られる。炭素量の脆化に及ぼす影響は明確でない。0.26 Mn, 0.019 S を含む低炭素鋼では、1573 K で溶体化処理した場合には、溶体化温度からの冷却速度の減少やひずみ速度の減少につれて延性は向上するが、溶体化温度を 1673 K まで上げると、冷却速度やひずみ速度を遅くしても延性は回復しない。一方、 α 域や $\gamma+\alpha$ 二相域におけるひずみ速度 10^{-2} /s での延性は良好である。

Preferred Orientation

A Simple Model Predicting Transformation Textures in Thermo-mechanically Processed Steels

By Ei-ichi FURUBAYASHI *et al.*

圧延したオーステナイト状態から変態したマルテンサイト鋼の変態集合組織のモンテカルロシミュレーションの研究を行った。ベイン歪みモデルと呼ぶバリエーションの選択則を新たに提案した。このモデルはマルテンサイト変態の現象論にあるベイン歪みが、圧延に付随する応力と相互作用することを取り入れた考え方をもとにしている。

この方法でシミュレートした変態集合組織は、他の著者が実験的に求めた典型的な Fe-Ni の集合組織をうま

く説明できた。すなわち、このモデルによつて、GREWEN らの加工誘起変態による集合組織は圧延中の(仮想)応力によつて、また圧延後に変態した阿部らの集合組織は圧延後の残留応力によつてのおのの説明できた。

このモデルの利点を他モデルと比べて述べるとともに圧延による加工熱処理で鋼の集合組織を制御する可能性を考察した。

Recrystallization and Texture Formation in High Speed Hot Rolling of Austenitic Stainless Steel [RA]

By Tetsuo SAKAI *et al.*

熱間圧延板に生じる板厚方向に不均一な変形が、再結晶挙動と集合組織の形成に及ぼす影響を調べた。SUS 304 ステンレス鋼を試料として、圧延温度 800~1100°C、圧延速度 15~37 m/s で無潤滑圧延を行った。熱延後急冷までの保持時間は、3.5~250 ms の範囲で変化させた。

ロール・材料間の摩擦により、熱延板の表面直下にせん断歪みが集中する領域(強せん断層)が生じる。圧下率が、圧延温度に依存するある値を超えると、強せん断層に、動的またはメタダイナミック再結晶による微細な再結晶粒が、層状に発生する。

強せん断層の変形集合組織の主成分は、 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 、 $\{111\}\langle 110 \rangle$ および $\{112\}\langle 110 \rangle$ であり、せん断歪みがほとんど生じない板厚中心部のそれは、 $\{110\}\langle 112 \rangle$ であつた。強せん断層の再結晶集合組織は、 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 以外の変形集合組織を受け継ぎ、その後の焼鈍によつてもほとんど変化しなかつた。強せん断層以外では、圧延後急冷までの間に静的再結晶が生じ、その集合組織は、再結晶の進行とともにランダム化した。

会員には「鉄と鋼」あるいは「Trans. ISIJ」のいずれかを毎号無料で配付いたします。「鉄と鋼」と「Trans. ISIJ」の両誌希望の会員には、特別料金 5,000 円の追加で両誌が配付されます。