

討15 ステンレス鋼の変形抵抗

新日鐵(株) 第2技術研究所 ○瀬沼武秀, 矢田 浩, 竹下哲郎
 第3技術研究所 松村義一
 浜渦修一

1. 緒 言

高合金鋼の熱間変形抵抗は、普通鋼で一般に使われている実験式の諸係数を変えて適用しても、高精度の予測をすることは難しい。そのため、今までにそれぞれの合金鋼について様々な予測式が実験的に求められてきたが、普遍性に乏しく、特に連続熱間圧延のような加工間隔の短い多段加工では、合金元素の影響のため材料の加工後の復旧が遅れ、前段の加工による材料の状態の変化が次段の変形抵抗に大きく影響し、1段加工によって得られた実験式では後段における変形抵抗を精度良く予測することができない。

このような前段加工の影響は、ホットストリップの仕上圧延のような高速連続加工では普通鋼にも現われ、著者らは⁽¹⁾、これらの影響を考慮した予測式を金属物理の立場で検討し、転位密度を媒介に、連続熱延工程中の冶金現象と変形抵抗の関係を定量的に把握した新変形抵抗式を開発し、ホットストリップミルで普通鋼のオーステナイト域圧延に適用したところ、変形抵抗の予測精度の著しい向上を確認した。

本報では、新変形抵抗式の基本構成を第2章で述べ、第3章以後で、その予測式のステンレス鋼への適用について検討した結果を報告する。

2. 熱間変形応力の金属物理に基づく数式化

熱間加工の変形抵抗の特徴は、加工硬化と同時に、熱的活性化過程に基づく軟化現象が起ること、このような現象を金属学的に理解するには、変形の基礎である転位の挙動を知る必要がある(図1)。すなわち、材料挙動を考慮した変形抵抗式の作成上の基本的考え方として、転位密度を媒介に変形抵抗と諸影響因子の関係を検討するのが最適と考えられる。

転位論によると、変形応力 σ と転位密度 ρ の間には式(1)のような関係が成り立つ。

$$\sigma = a_0 \rho^{1/2} + a_1 [Q_0 - RT \ln \frac{a_2 \rho}{\dot{\epsilon}}] + a_3 d^{-1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $a_0 \sim a_3$ は定数、 Q_0 は熱的活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は温度(K)、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 d は粒径をそれぞれ表す。一般に、高温域では式中の第2項と第3項は第1項に比べて無視できることが多い。

一方、加工中に起る転位の増殖および回復、再結晶による転位密度の減少を、2, 3の仮定に基づき定式化すると⁽²⁾、加工条件 ϵ 、 $\dot{\epsilon}$ 、 T などにより転位密度を表すことができる。式(2)は1例として、加工中に $\rho = C \cdot \epsilon^m$ の関係で転位密度がひずみの増加に従って大きくなると同時に、 $d\rho = -b\rho d\epsilon$ の関係で動的回復により転位密度が減少する状態を定式化したものである。

$$\rho_n = \rho_0 + m \cdot C \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_{i-1}}{C}\right)^{\frac{m-1}{m}} \Delta\epsilon - b \sum_{i=1}^n \rho_{i-1} \cdot \Delta\epsilon \dots \dots \dots (2)$$

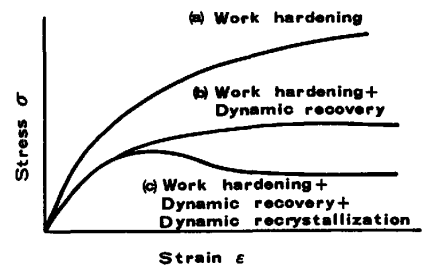


Fig. 1. Influence of metallurgical phenomena on the stress-strain-curves

ここで、 ρ_n はひずみが $\epsilon = n \cdot \Delta\epsilon$ の時の転位密度であり、 ρ_0 は初期転位密度を表す。 b は動的回復速度を表す係数で、温度とひずみ速度に依存する。

ステンレス鋼では、後記するように、通常の圧延条件では動的な再結晶は比較的起きにくいので、基本的には式(1)と(2)で熱間変形抵抗を算出することができる。

一方、多段加工の場合、図2に模式的に示すように、加工直後 ρ であった材料内の転位密度がパス間時間 t 秒後に復旧過程により ρ_0 に減少したとすると、次段の加工時の変形抵抗は、この転位密度を式(2)の ρ_0 に代入することにより、前段の加工の影響を考慮した予測値を求めることができる。

このように、本変形抵抗式は転位密度を媒介に考えることにより、加工中およびパス間の材料の状態を連続的に把握できる、今までの予測式にはない特徴があり、連続熱延の変形抵抗の算出に適している。

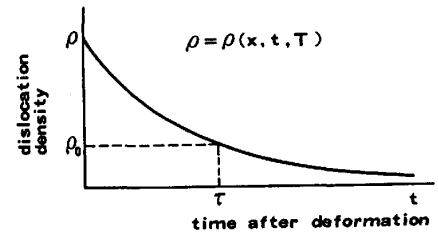


Fig. 2. Change of dislocation density after deformation

3. 実験材料と実験装置

実験で用いたステンレス鋼は、加工温度域でオーステナイト1相のSUS304、フェライト1相のSUS430D、そしてオーステナイトとフェライトの2相が共存するSUS430を用いた。

実験は主に図3に基本構成を模式的に示した高速連続熱間加工シミュレーターを用いて行った。詳しい仕様については、すでに報告⁽⁸⁾しているのので、ここでは概要だけにふれておく。

図中のプログラム装置に実験条件を入力することにより、連続熱延のシミュレート実験を行うことができる。変形応力を求めるには加工時のデータをマイコンに伝送して、圧下荷重とシリンダの移動距離より応力-ひずみ曲線として算出している。

4. 実験結果と考察

写真1は図中の実験条件で連続熱延をシミュレートした時のSUS304の組織変化を各パスごとに示したもので、この条件下では、加工後即水冷した組織内に

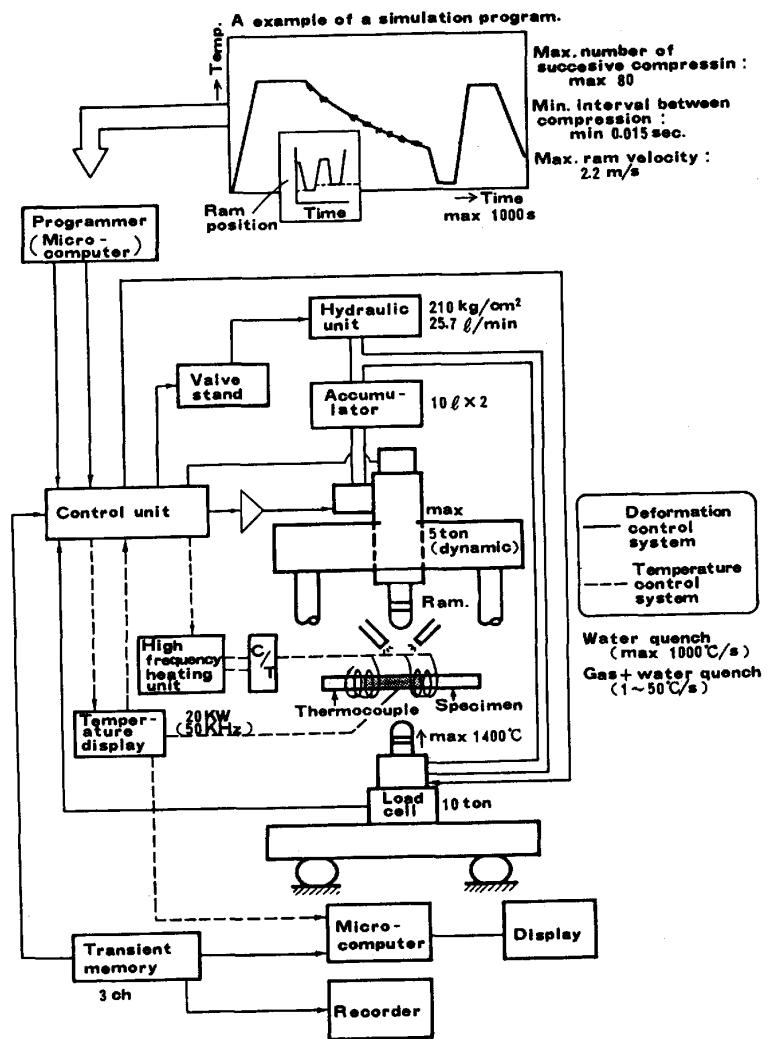


Fig. 3. Block diagram of the hot deformation simulator

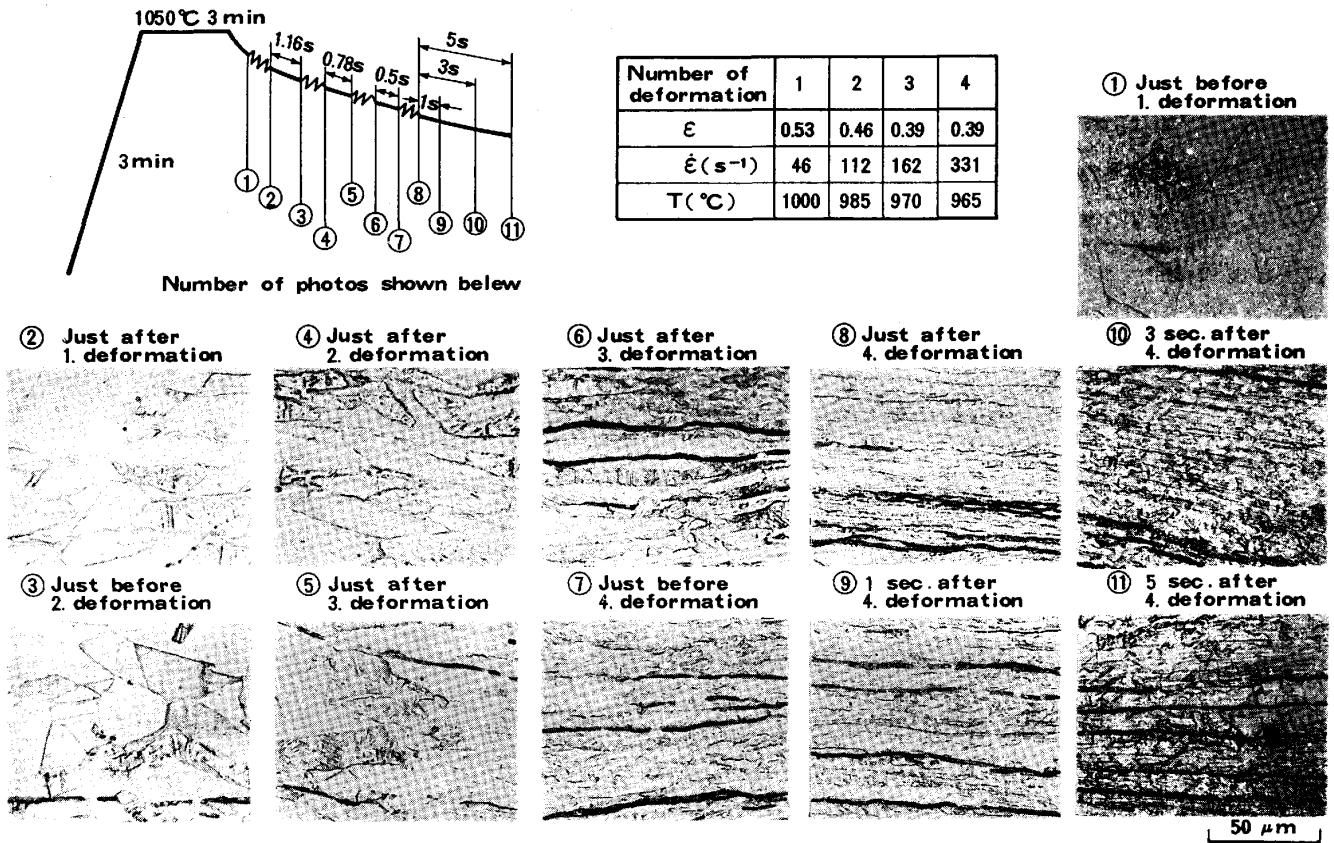


Photo. 1. Change in microstructure of austenite in a continuous hot deformation process

はほとんど新生の再結晶粒はみられなかった。最終段の加工で粒界に微細な再結晶粒が生成したが、この再結晶粒が加工中に生成したのか、冷却中に現われたのかについては明らかではないが、再結晶率は10%未満なので、変形抵抗に大きな影響を与えるとは考えにくい。

そこで、SUS 304の熱間変形抵抗の予測式として、式(1)及び式(2)を用いることにした。式中の諸係数を定めるに当たり、普通鋼で得られた値を参考に、固溶硬化や回復速度などの特性の相違を考慮して、ひずみ速度、加工温度などを変えた実験結果を基に決定した。

図4は、そのようにして得られた予測式より算出した結果と実測値の比較を、1例として加工温度をパラメーターとして示したものである。

一方、加工後の復旧の度合と、それが次段の加工の変形抵抗に及ぼす影響を調べるために、1段目のひずみ、加工温度、パス間時間を変えて実験を行った。図5は、その1例を示すもので、パス間2秒後でも、加工温度が950℃以下になると、ひずみ $\epsilon = 0.3$ の加工を行った場合、前段に比べ、次段の変形抵抗は20%以上高目の値を示すことがわかる。これは連続熱延工程のようなパス間時間の短い多段加工では、累積ひずみ効果が大きいことを実証している。

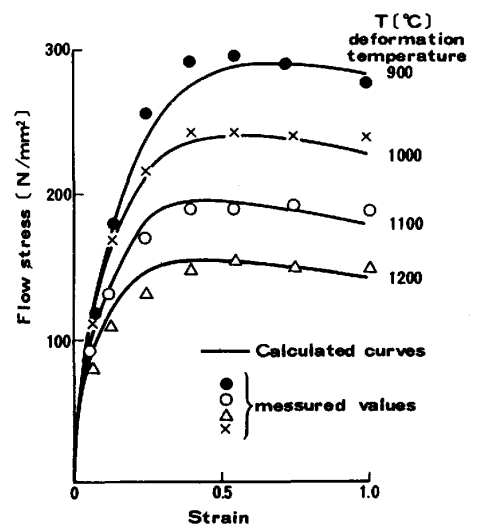


Fig. 4. Comparison of calculated stress-strain-curves of SUS 304 with measured values

これらの実験結果より、パス間の転位密度の減少を次式のような簡易モデルにより定式化することにより、式(1)、(2)と併わせて多段加工の SUS 304 の変形抵抗を求めることができる。

$$\rho_0 = \rho \cdot \exp(-b \cdot t^n) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、n は定数、b は加工温度、ひずみなどに依存する定数を表す。

図 6 は、このようにして求めた予測式を熱間加工シミュレーターと実際の圧延との変形挙動の相違に従い補正し、ホットストリップの仕上圧延に適用した結果を示す。このように、計算値は約±5%の精度で変形抵抗を予測しており、従来の予測式で顕著に見られた後段での誤差が激減した。

同様の方法でフェライト1相を示す SUS 430D の変形抵抗も本予測式の係数を変更することにより、十分な精度で予測できることを確認した。しかし、加工温度域で2相を示す SUS 430 については、加工中およびパス間で変態

が進行するため、現行のモデル式では十分な精度を持って変形抵抗を予測することは難しい。特に加熱条件により、2相比率が異なることが変形抵抗の予測をより難しくしている。

5. まとめ

普通鋼のオーステナイト域の連続熱延で高精度の予測を可能にした、熱間加工工程の冶金現象が変形応力に及ぼす影響を考慮した変形抵抗式を、式中の係数を一部変更することにより、ステンレス鋼に適用したところ、オーステナイトあるいはフェライト1相の鋼種については、普通鋼同様、高精度の予測ができることを確認した。

参考文献

1. 瀬沼, 矢田, 松村, 浜渦, 中島: 第 34 回塑性加工連合講演会 (1983)
2. 瀬沼, 矢田, 松村, 浜渦, 中島: 鉄と鋼 68 (1982) S 1067
3. Yada, H ; Matsuzu, N ; Nakajima, K ; Watanabe, K ; Tokita, H : Transa. ISIJ, vol. 23, (1983)

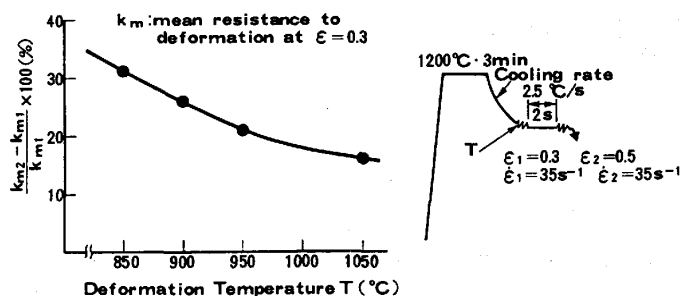


Fig. 5. Influence of a previous deformation on the resistance to hot deformation of SUS 304

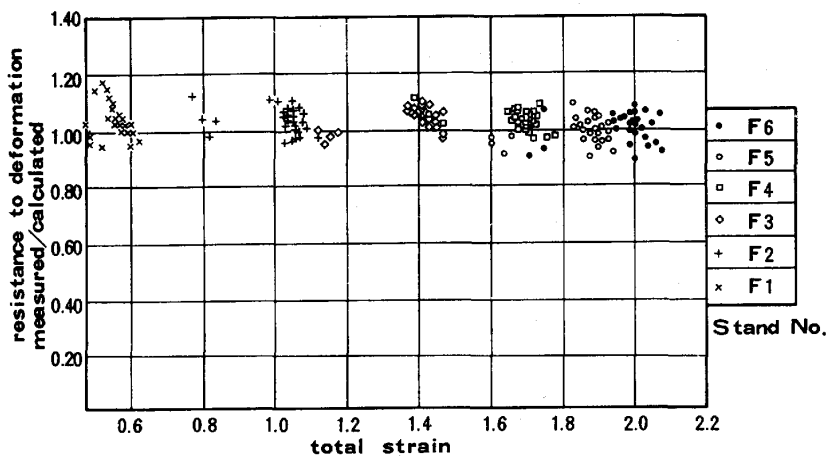


Fig. 6. A comparison of the resistance to hot deformation measured at a continuous hot strip mill with results calculated by the model developed here