

銅における単一/多重ピーク型動的再結晶後の静的回復と再結晶

徐 洲* 酒 井 拓**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 55, No. 11 (1991), pp. 1182-1188

Effect of Single/Multiple Peak Dynamic Recrystallization on the Static Recovery and Recrystallization of Copper

Zhou Xu* and Taku Sakai**

The effect of single and multiple peak dynamic recrystallization (DRX) on the static softening taking place in hot deformed copper was studied by means of the interrupted compression test at a temperature of 723 K and a true strain rate of $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. The softening curve after dynamic recovery consists of two stages followed by complete softening. In contrast, the softening curve after DRX consists of three distinct stages with the respective inflection plateaus, followed by incomplete softening. Under a single peak DRX, the softening curve changes monotonically with straining from a sigmoidal to three distinct stages. Under a multiple peak DRX, the softening behavior changes periodically with straining, which can roughly correspond to the appearance of multiple peak flow. It is concluded that the static softening after DRX is sensitively affected by not only the volume fraction of DRX structure in the deformed matrix, but also the distribution of three kinds of DRX grains, i. e. DRX nuclei, growing DRX grains and strain hardened DRX grains.

(Received July 9, 1991)

Keywords: hot deformation, static softening, copper, single and multiple peak dynamic recrystallization, metadynamic recovery and recrystallization

I. 緒 言

鉄鋼における動的再結晶オーステナイトの静的復旧に関する最近の著者らの研究では⁽¹⁾⁻⁽³⁾, 通常の古典的回復と再結晶に加えてメタダイナミック回復と再結晶の計4種類の復旧機構が働くことが明らかにされている。メタダイナミック回復は、再結晶の前駆段階で働く通常の回復とは異なり、再結晶核の形成には連がらぬ回復現象を⁽⁴⁾, メタダイナミック再結晶は動的再結晶核が潜伏時間無しに連続して成長する現象を指す⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これらの機構は焼きなまし中重複しながら働くため、静的軟化におよぼす各機構の影響を分離解析することは困難であり、また鉄鋼ではオーステナイト組織の詳しい観察は困難なこともあって、未解明の問題が多く残されている。

本研究では、相変態の無い高純度(OFHC)銅[†]をモデル材として選び、高温変形後の静的軟化挙動を圧縮による中断再負荷試験と復旧組織の観察によって調査検討した。単一ピークと多重ピーク型動的再結晶の静的軟化におよぼす

影響を調査することによって、動的再結晶後に働く上記4種類の復旧過程の特徴と軟化におよぼす役割の大きさを明らかにし、かつそれらの機構について検討した。なお、静的軟化と復旧組織との関係については、別に報告することにする。

II. 実 験 方 法

供試材の無酸素銅丸棒材並びにそれを55%冷間スエージ加工したものから、直径8 mm、高さ12 mmの円柱状試験片を切り出し、その両端面に潤滑剤(グラファイト)を保持するため深さ0.1 mmの同心円状の溝をつけた。それらを923 Kで1.8 ks真空中で焼きなましすることにより、それぞれ84 μmと52 μmの2種類の初期粒径を有する試験片を作成した。

真ひずみ速度を一定に制御できる試作の高温圧縮試験機⁽⁷⁾を用いて、試験温度の723 Kに前もって加熱保持した装置に試験片を挿入し、約 10^{-1} Pa の真空下で1.2 ks保持後真ひずみ速度 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で中断再負荷試験を行っ

* 電気通信大学大学院生(Graduate Student, The University of Electro-Communications, Chofu)

** 電気通信大学機械制御工学科(Department of Mechanical and Control Engineering, The University of Electro-Communications, Chofu)

† OFHC-Cuの純度は99.997質量%。主な不純物は、Fe:7, Ni:1, Ag:9, O₂:8各質量ppm。

た. 所定の各ひずみまで圧縮変形後除荷し, 任意の時間焼なまし後再圧縮する際に得られる降伏応力の変化から次式を用いて軟化率 X を求めた⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

$$X = \frac{\sigma_e - \sigma_{Y2}}{\sigma_e - \sigma_{Y1}} \quad (1)$$

ここで, σ_{Y1} , σ_{Y2} は最初と再試験時の0.005塑性ひずみのオフセット応力⁽¹⁾⁻⁽³⁾, σ_e は除荷直前のひずみ ϵ における変形応力である.

III. 実験結果

1. 高温変形曲線

723 K, $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ での圧縮変形曲線におよぼす初期粒径 D_0 の影響を Fig. 1 に示す. $D_0 = 52 \mu\text{m}$ の試験片では明瞭な多重ピーク型, $84 \mu\text{m}$ の場合には単一ピーク型の変形が現れるが, 高ひずみ域では両者の曲線はほぼ一致し, ひずみによらずほぼ一定応力の変形すなわち定常状態変形が現れる. 動的再結晶に対する相対的粒径モデルに従えば⁽⁸⁾, 変形前の粒径 D_0 と高ひずみ域の動的再結晶粒径 D_S との間に次式が成立する際に動的再結晶過程とともに変形曲線の形状は変化する.

$$D_0 = 2D_S \quad (2)$$

すなわち, 変形に伴い細粒化する試験条件下すなわち $D_0/2 > D_S$ の関係が成立する際に単一ピーク型曲線が, 逆に $D_0/2 < D_S$ の場合は多重ピーク型曲線が現れる⁽⁸⁾. Fig. 1 の試験条件下で生ずる D_S は $41.7 \mu\text{m}$ であったので, 変形曲線の形状が変化する際の臨界の初期粒径は, 式(2)を用いて $83.4 \mu\text{m}$ と求まる. これより, $D_0 = 84 \mu\text{m}$ の変形曲線は式(2)が成立する臨界の試験条件下で現れる曲線とはほぼ同じであると考えられる.

$D_0 = 84 \mu\text{m}$ の試験片の中断ひずみは0.12, 0.18(= ϵ_p)と定常状態変形下の0.26と0.50の4種類, $D_0 = 52 \mu\text{m}$ の試

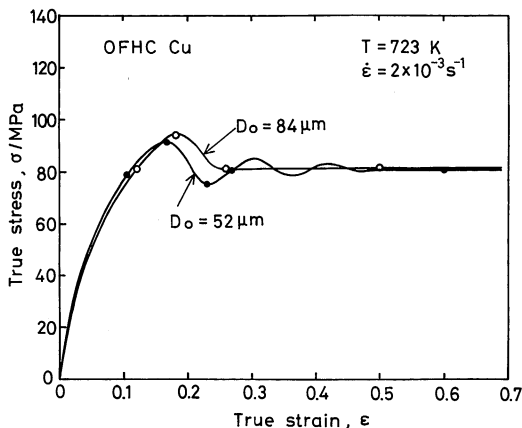


Fig. 1 Effect of initial grain size D_0 on the true stress vs. true strain curve for copper deformed at 723 K and at $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. The interrupted test was carried out at each point indicated by the symbols, \circ and \bullet .

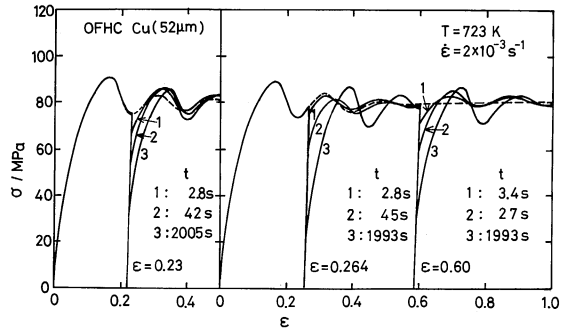


Fig. 2 Effect of holding time on the interrupted flow curve of copper ($D_0 = 52 \mu\text{m}$) deformed at 723 K and $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. At the prior strains interrupted, 0.23, 0.264 and 0.60, is completed dynamic recrystallization.

験片では0.10, 0.165(= ϵ_p)と動的再結晶が完了している0.23(= ϵ_{min}), 0.264, 0.60の5種類とした. ここで, ϵ_p はピークひずみ, ϵ_{min} は最初の応力極小点が現れるひずみである. ϵ_p におけるピーク応力 σ_p と ϵ_{min} における応力 σ_{min} を除けば, 他のひずみにおける変形応力はほぼ同じ値 $78 \pm 2 \text{ MPa}$ であった.

$52 \mu\text{m}$ の試験片に対する中断再負荷曲線の代表的結果の1例を Fig. 2 に示す. 再負荷曲線の焼なましに伴う変化は, 動的再結晶が完了している $\epsilon = 0.23$ 以後のひずみによって異なる. 降伏応力に注目すれば, ひずみ0.264における短時間と長時間中断後の再負荷曲線1, 3は, 他の2つのひずみ(0.23と0.60)に対するそれらと比較して明らかな違いが認められる. Fig. 2の結果を含めた静的軟化挙動について, 次節以降では式(1)の X を用いて定量的に評価し, 検討することにする.

2. 単一ピーク型動的再結晶後の静的軟化曲線

$D_0 = 84 \mu\text{m}$ の試験片に対する静的軟化率 X と保持時間 t との関係とそれにおよぼす前ひずみの影響を Fig. 3 に示す. $\epsilon = 0.12$ の軟化曲線 a は時間とともに徐々に増加しながら, 10^2 s 付近から急増して完全軟化に至るいわゆる S 字型の形状を示す. これに対し, 完全な動的再結晶組織となる $\epsilon = 0.26$ と 0.50 の軟化曲線 c と d の形状は $\epsilon = 0.12$ の結果とは明らかに異なり, 3段階からなる特徴的形状を呈し, また Fig. 4 の $D_0 = 52 \mu\text{m}$ の $\epsilon = 0.60$ の軟化曲線 e と実験誤差内で一致している. 軟化曲線は短時間焼なましによる急速軟化後棚が生ずるステージ I ($X < 0.18$), そこから約0.8まで大幅に軟化し 100 s 付近で再び停滞するステージ II, その後0.92までわずかに軟化後ほとんど停滞し, 完全軟化に至らぬステージ III の3段階に分けられる. 3つの棚と不完全軟化を含む3段階からなる軟化挙動は炭素鋼⁽¹⁾⁻⁽³⁾やニッケル⁽⁴⁾の動的再結晶後のそれらと酷似する.

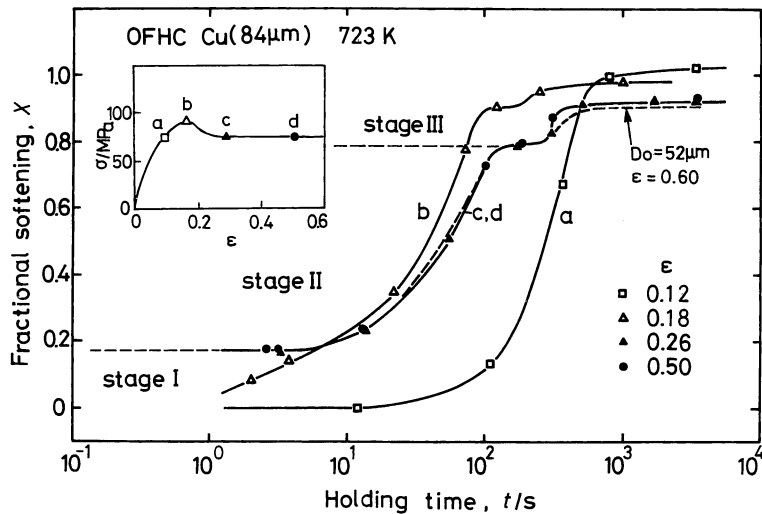


Fig. 3 Effect of prior strain on the static softening curve for copper with an initial grain size of 84 μm . Note the three-step and incomplete softening after dynamic recrystallization.

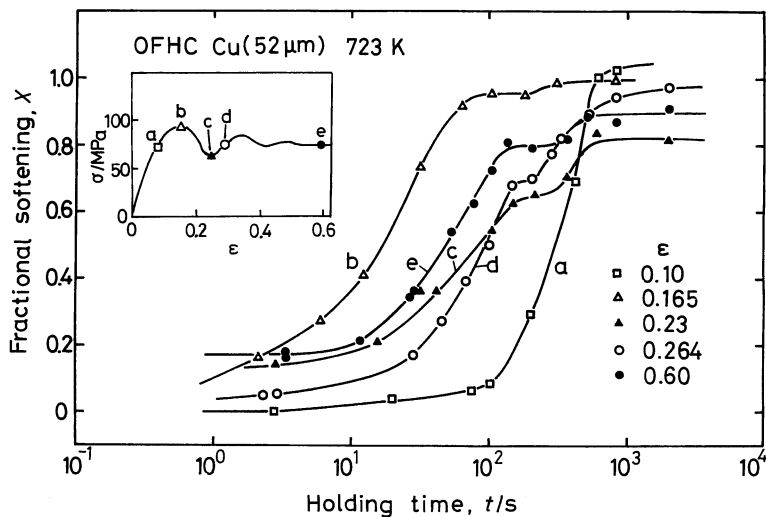


Fig. 4 Effect of prior strain on the static softening curve for copper with an initial grain size of 52 μm . Note the complicated softening behaviors after full dynamic recrystallization taking place at above 0.23.

動的再結晶組織が一部含まれる $\epsilon_p=0.18$ の軟化曲線 b は、動的回復組織に対する曲線 a と動的再結晶組織に対する曲線 c, d の両方の特徴を有し、それらの中間的挙動を呈する。その焼なまし初期の軟化は曲線 c, d におけるステージ I, II のように明瞭には分けられず、軟化は時間に対して連続しながら大きく進むが、100 s 付近で一時的に停滞してから若干軟化しわずかな不完全軟化を生ずる挙動は、曲線 c, d のステージ III での挙動と対応するようである。このように、軟化の動力学は加工組織の違いすなわち動的回復、動的再結晶組織、両者の混合組織によって大きく変化することが分かる。

3. 多重ピーク型動的再結晶後の静的軟化曲線

Fig. 4 に示す $D_0=52 \mu\text{m}$ の試験片に対する $X-t$ 曲線の前ひずみに伴う変化は、 $D_0=84 \mu\text{m}$ に対する Fig. 3 の結果と比較してかなり異なっている。しかし、動的回復組織 ($\epsilon=0.10$) に対する曲線 a と高ひずみの動的再結晶組織 ($\epsilon=0.60$) に対する曲線 e は、Fig. 3 のそれらに対応する曲線 a と曲線 c, d とにそれぞれ実験誤差内で一致している。また、 $\epsilon_p=0.165$ に対する軟化曲線 b の形状は Fig. 3 の ϵ_p に対する曲線 b のそれと酷似するが、微細粒初期組織の影響を受けてその曲線全体は短時間側に移動している。

動的再結晶組織は応力極小点を示すひずみ $\epsilon_{\min} = 0.23$ 以後試験片の全域で生ずるが⁽⁸⁾⁽¹¹⁾、その後の軟化挙動は前ひずみに伴い複雑に変化している。 ϵ_{\min} に対する軟化曲線 c は高ひずみの曲線 e と同じく 3 段階からなる過程を示すが、そのステージ II と III での軟化量は小さく押さえられ、したがって不完全軟化量は大きく現れる。これに対し、 ϵ_{\min} より少し加工硬化したひずみ 0.264 に対する軟化曲線 d では、焼なまし初期の軟化量は小さく、逆にステージ III に相当する焼なまし後期では完全軟化状態に近づいている。高ひずみの 0.60 に対する軟化曲線は典型的な 3 段階からなる過程を示す。このように、静的軟化の動力学は同じ動的再結晶組織でも前ひずみによって大きく変化することは興味深い。

4. 静的軟化時間の前ひずみに伴う変化

$X=0.1$ から 0.92 までの各軟化に要する焼なまし時間 t_x を Fig. 3, 4 から求め、それと前ひずみとの関係をそれぞれ Fig. 5(a), (b) に示す。 t_x は ϵ_p までの加工硬化段階ではひずみに伴い急速に減少するが、動的再結晶が顕著に起こり出す ϵ_p 以後は単一ピークか多重ピーク型変形かによって大きく異なる挙動を示す。単一ピーク型動的再結晶下では (Fig. 5(a)), $X=0.1$ の軟化に要する時間は ϵ_p 以後もひずみに伴い著しく減少するが、 $X=0.2$ から 0.8 の軟化中期に要する時間ではひずみに対して一定か若干増加後一定となり、 $X=0.92$ ではひずみに対し逆に著しく増加する。

これに対し、多重ピーク型動的再結晶下では (Fig. 5(b)), 各軟化に要する時間は ϵ_p 以降の変形に伴い大きく変化するが、高ひずみ域では Fig. 5(a) の結果と同じくほぼ一定となる。Fig. 5(b) の ϵ_p と ϵ_{\min} の位置に注目して t_x のひずみに対する変化を見れば、それは多重ピークが現れる周期と大体対応して起きているようである。以上の Fig. 5(a), (b) の t_x - ϵ 関係は動的再結晶組織に起因する特有なものであり、動的回復後の静的軟化に関する結果⁽¹⁰⁾ では観察不可能である。

IV. 考 察

1. 単一/多重ピーク型変形下の動的再結晶組織

動的再結晶組織は、転位をほとんど含まぬ動的再結晶核 A と、粒界近くでは転位を含まず粒中心部で高密度の転位を有する成長途中の動的再結晶粒 B、そして後者が成長して互いに衝突し、ほぼ均質で高密度の転位組織を有する動的粒 C の 3 種類から構成される⁽¹¹⁾。これらの動的再結晶粒は高ひずみではある一定の比率で分布するため、そこではほぼ一定の大きさの動的粒径 D_s と定常状態変形が現れる⁽¹¹⁾。これは $84 \mu\text{m}$ の試験片における前ひずみ 0.26 と $0.50, 52 \mu\text{m}$ の場合は $\epsilon=0.60$ における組織に当てはまり、その結果、それらの静的軟化挙動は実験誤差内ではほぼ一致すると考えられる (Fig. 3)。

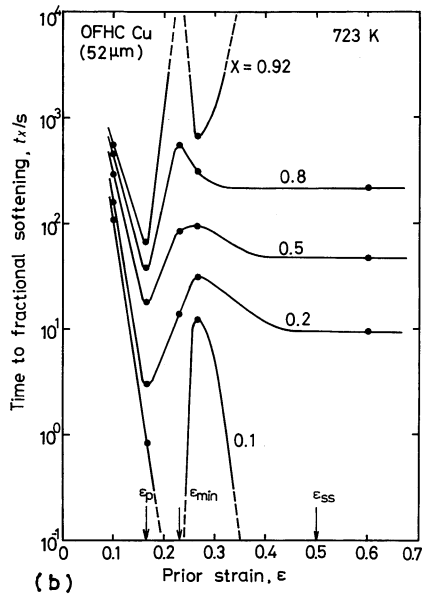
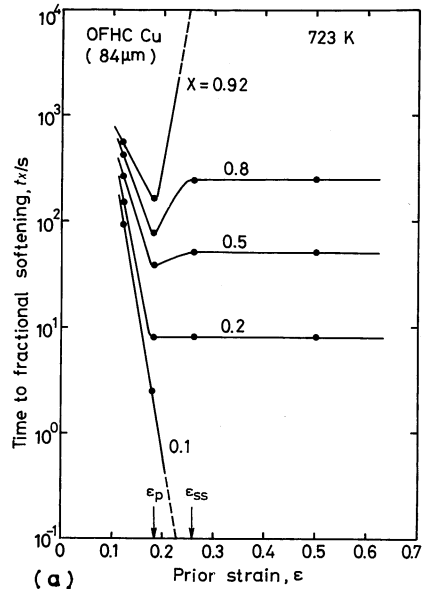


Fig. 5 Prior strain dependence of the holding time for 10-92% static softening taking place in hot deformed copper at 723 K. ϵ_p , ϵ_{\min} and ϵ_{ss} are the strains to the initial peak stress, to the minimum flow stress and at the start of the steady state flow, respectively. (a) $D_0=84 \mu\text{m}$ and (b) $D_0=52 \mu\text{m}$.

単一ピーク型変形下で細粒化する場合(すなわち $D_0 > 2D_s$)は、ピークひずみの約 1/2 から生ずる動的再結晶組織の比率がひずみとともに単調に増加し、高ひずみ域では完全な動的組織に置き変わる⁽⁸⁾。したがって、動的組織を構成する 3 種類の結晶粒 A, B, C の体積率は、このような場合ひずみとともに単調に増加または減少することになる⁽⁸⁾。これに対し、多重ピーク型変形下で粗粒化する場

合(すなわち $D_0 < 2D_S$)は、ピークひずみ付近で過剰に生ずる動的粒は応力極小点付近(ϵ_{\min})で粒同士の衝突を起こすため、前述の相対的粒径モデルによれば、そこでは D_S より小さい準安定な動的粒径 D'_S が生まれることになる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。この準安定組織は動的核 A を含めて成長途中の動的粒 B により大部分が構成され、動的粒 C が占める領域は極めて小さいと考えられる (Fig. 6(b)の①を参照)。

一方、粒衝突を起こした動的粒 B の粒界では粒間の連続性を保つように多重すべりが速やかに起こり、その粒内転位密度は変形に伴い均質化するとともに次の再結晶核形成のための臨界値 ρ_c へ向けて増加することになる (Fig. 6(b)の②を参照)。したがって、そこでは動的粒 A, B の体積率が激減し、全体としてはピークひずみ前の組織と類似する均質な転位下部組織が発達することになる。 D'_S は第 2, 第 3 の再結晶を繰返しながら最終的安定粒径 D_S に近づくと、その際に現れる応力振動は次第に小さくなって高ひずみで定常状態変形が現れることになる (Fig. 6(c)の③を参照)⁽⁸⁾。結局、多重ピーク型動的再結晶下では、

組織を構成する動的粒 A, B, C の各体積率は応力振動に対応するようにひずみとともに変化し、高ひずみである一定値に近づくものと考えられる。

2. 動的再結晶後の静的復旧過程

動的再結晶組織を構成する上記の 3 種類の結晶粒 A, B, C を含む各領域では、それぞれ異なる復旧機構が働くことを著者は他で詳しく検討している⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。それを要約すると、動的核 A を含む領域では変形直後からメタダイナミック再結晶が起こる。粒界付近で転位密度が小さい動的粒 B 内では再結晶核の形成は不可能であり、粒中心部の高密度転位はメタダイナミック回復により減少する。均質な転位組織を有する結晶粒 C を含む領域では、焼なましに伴い通常の静的回復に続き再結晶が起きると考えられる。

定常状態変形後に現れる明瞭な 3 段階からなる軟化過程 (Fig. 3) は、上記の各領域で起こる復旧機構と関連させて次のように説明できよう⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。軟化の第 1 段階で主に働くのはメタダイナミック再結晶である。均質下部組織を有する結晶粒 C では通常の回復に続いて再結晶が起こり、これがステージ II における大幅な軟化の原因となる。同時に動的粒 B 内ではメタダイナミック回復が重複して生ずるため、ステージ II での Avrami 指数は 1 以下、軟化のための活性化エネルギーは古典的再結晶に対するものより小さくなる⁽³⁾。メタダイナミック再結晶または通常の再結晶によって生じた新粒と、粒界に転位をほとんど含まぬ動的粒 B またはそれがメタダイナミック回復した結晶粒群とが衝突すれば、前者の成長が停止する可能性は大であり、このことがステージ I, II 後期で軟化の棚が生ずる原因と考えられる。ステージ III では、2 種類の新しい再結晶粒が転位を含むメタダイナミック回復粒を食って成長することになるが、両者の粒界付近における転位密度差はほとんど無いため新粒の成長速度は極めて小さくなる。その結果、高密度転位を含むメタダイナミック回復組織は長時間安定に存在し続け、これが不完全軟化の出現に連がると思われる[†]。

これらの各復旧機構の軟化におよぼす寄与率は 3 種類の動的粒組織 (A, B, C) が占める体積率にほぼ比例すると仮定すれば、Fig. 3, Fig. 4 の結果は次のように説明できよう。単一ピーク型変形下で細粒化する場合(すなわち $D_0 > 2D_S$)、A, B, C の各動的粒はひずみとともに単調に増加または減少しながらある一定値に近づくことから(前節)、各復旧機構の軟化におよぼす寄与率は Fig. 7 の破線で示すように、ひずみとともに単調に増加または減少することになる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。これに対し、多重ピーク型変形下で粗粒化する場合(すなわち $D_0 < 2D_S$)、ピークひずみ ϵ_p で生ずる過剰な再結晶粒の成長と衝突によって現れる応力極小点 ϵ_{\min} では、組織の大部分は動的粒 B と A が占めるこ

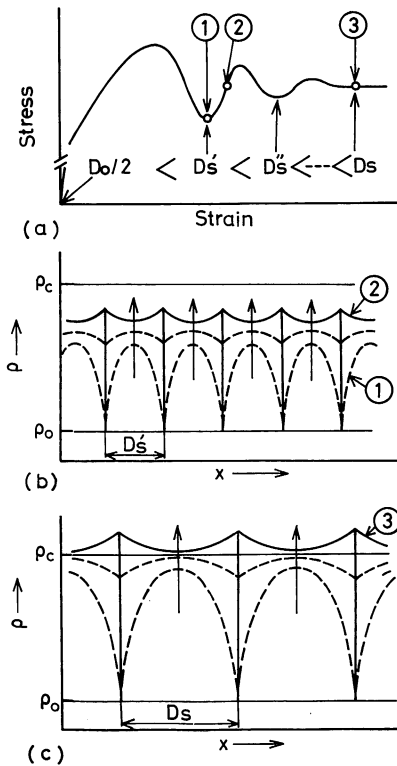


Fig. 6 Schematic representation of the strain dependence of DRX grain size (D'_S , D''_S , ..., D_S) as well as the dislocation density distribution developed under multiple peak dynamic recrystallization. ρ_0 is the initial (annealed) dislocation density and ρ_c is the critical value required for dynamic nucleation. The present state is represented by the full lines and one or more earlier states by the broken lines in (b) and (c).

† このことは別に報告する銅の静的復旧組織に対する電顕観察の結果で確認されている⁽¹⁶⁾。

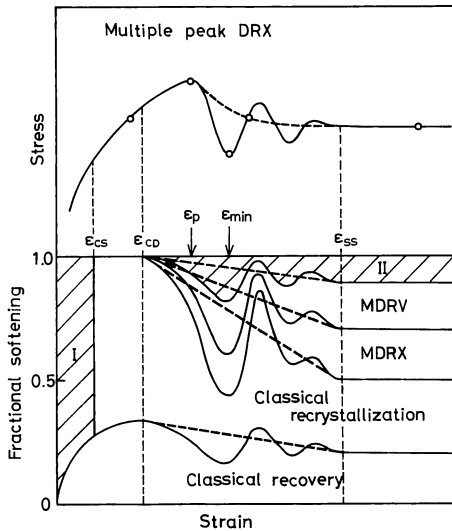


Fig. 7 Schematic representation of the relative contributions of the four softening mechanisms operated in hot deformed copper. The cross-hatched areas I and II indicate the zones of incomplete softening. MDRV and MDRX are metadynamic recovery and metadynamic recrystallization, and the full and broken lines indicate the results for multiple peak and single peak dynamic recrystallization, respectively.

とになる(前節). したがって, 軟化ステージ I と II の後期に現れる棚はより明瞭になるとともにステージ III での不完全軟化量はより大きく現れることになる. しかし, 第 2 のピーク応力へ向けての加工硬化段階では動的粒 A, B の割合が激減するため(前節), この場合の軟化は ϵ_p 後の軟化と同様にステージ I, II では連続して起こり, またステージ III では完全軟化へ近づくことになる.

以上の検討結果は, Fig. 7 の模式図の実線で示すようにまとめられよう. 各復旧機構の軟化におよぼす寄与率の前ひずみに伴う変化は, 動的再結晶の開始(ϵ_{cd})から完了(ϵ_{ss})までの間に生ずる応力振動に対応するように現れ, これらは動的再結晶組織を構成する 3 種類の結晶粒(A, B, C)の体積率の変化に基因して生ずると説明できる. 動的粒 A, B, C の分布が多重ピークに対応して変化することを電顕観察で定量的に実証することは困難であるが, このことは今回の静的軟化実験により間接的に証明できたことになろう.

3. 動的再結晶後の静的軟化に関する他の結果との比較

銅の動的再結晶後の静的軟化挙動が 3 段階からなり不完全軟化を生ずることは, 炭素鋼⁽¹⁾⁻⁽³⁾やニッケル⁽⁴⁾に関する結果と完全に一致する. しかし, 他の研究者による結果では, 動的再結晶直後の瞬間的軟化や後期における不完全軟化は報告されていない⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾. Fig. 8 は動的再結晶銅の静的軟化曲線に関する Petkovic ら⁽¹²⁾と今回の

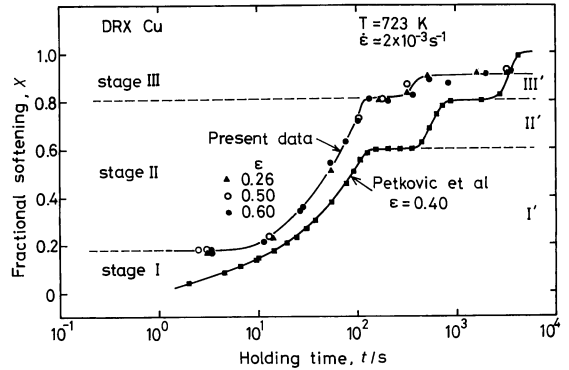


Fig. 8 Comparison of the present softening data with those measured by Petkovic *et al.*⁽¹²⁾ for dynamically recrystallized copper. The used an ETP copper with an initial grain size of 560 μm .

結果とを比較して示している. Petkovic らの結果でも 3 段階の軟化過程は認められるが, 彼らはステージ I' ではメタダイナミック再結晶, ステージ II', III' では通常の回復に続いて再結晶が起こると考えている. ところで, 彼らは純度 99.84 質量パーセントのタフピッチ銅の初期粒径を 560 μm とした試験片を用いて実験している. このような粗粒試験片を Fig. 8 の条件下で変形させた場合, 動的再結晶組織が完全に生ずるひずみは Blaz らの結果⁽¹⁵⁾を用いて推測すると 0.7 以上となる.

これより, 彼らが用いた中断ひずみ 0.40 では動的再結晶が完了していない可能性は大であり, したがって, 動的回復と再結晶の混合組織である点でピークひずみ ϵ_p での組織と類似する. ϵ_p 後の静的軟化挙動(III 2 節)から類推すると, Petkovic らの焼なまし初期の軟化(ステージ I') は今回のステージ I と II のように明瞭には分けられず連続して生ずることになる. 続いて, 彼らのステージ II' の軟化は今回のステージ III のそれと対応し, またステージ III' の軟化は未動的再結晶組織内で生ずる通常の静的再結晶に基づいて起こり, その結果 100% 軟化に達するのであろうと推察される. Petkovic らの 0.40 における軟化曲線では今回の ϵ_p に対する曲線(Fig. 3, 4 の曲線 b)と比べてより明瞭に軟化の棚が現れているが, そこでは成長途中の結晶粒 B からなる領域がより大きく発達しているからであろう.

以上の検討結果と前節のそれとを合わせると, 動的再結晶の 3 段階からなる静的軟化過程は, 動的再結晶組織が全体に占める体積率だけでなく, 同じ動的再結晶組織でもそれを構成する 3 種類の動的粒分布の変化に伴い敏感に変化することが結論される. 動的再結晶後の静的軟化挙動を調べているこれまでの研究結果に不一致が見られるの

† このことは, ひずみ 0.40 で生ずる結晶粒組織が 60 μm と 170 μm 付近にピークを有する 2 重分布の混粒組織であることでも裏付けられよう⁽¹²⁾.

は、以上のことが1つの大きな原因になっているものと推察される。

V. 結 論

多結晶銅を用いて高温圧縮下で中断再負荷試験を行い、静的軟化におよぼす単一ピークと多重ピーク型動的再結晶の影響を調査した今回の結果は、次のようにまとめられる。

(1) 動的回復後の静的軟化曲線は、通常の回復と再結晶に基づく2段階過程を示して完全軟化に至るのに対し、高ひずみの動的再結晶後のそれは3つの軟化の棚を有する特徴的3段階過程を示し、完全軟化には至らなかった。

(2) 単一ピーク型変形下で組織が細粒化する場合、動的組織の形成に伴い軟化曲線は2段階からなるS字型から3つの棚を有する3段階の曲線へと単調に変化した。これに対し、多重ピーク型変形下で粗粒化する場合、軟化挙動は応力振動に対応するように加速または減速させられ、複雑に変化した。

(3) 動的再結晶組織を構成する3種類の代表的結晶粒、すなわち動的核、成長途中の動的粒、一様にひずみ硬化している動的粒、を含む領域では、主にメタダイナミック再結晶、メタダイナミック回復、通常の回復と再結晶がそれぞれ起こる。成長途中の動的粒とそこで起こるメタダイナミック回復の働きによって、3つの棚と不完全軟化の出現が主に支配される。

(4) 動的再結晶後の3段階からなる軟化過程は、動的再結晶組織が全体に占める体積率だけでなく、それを構成する3種類の動的粒の分布状態またはそれらの体積率に伴って敏感に変化することが結論される。

最後に、本研究は鉄鋼基礎共同研究会の「変形特性の子

測と制御」部会における分担研究の1部をなすものであり、吉永日出男部会長を始め各委員による有益な討議と助言を賜りましたことを深く感謝致します。本研究で用いた純銅丸棒は、藤倉電線(株)で製作され化学分析されたものであり、ここに厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) T. Sakai and Z. Xu: *Recrystallization '90*, Ed. by T. Chandra, TMS, (1990), 453.
- (2) 徐 洲, 酒井 拓: 鉄と鋼, **77**(1991), 462.
- (3) Z. Xu and T. Sakai: *Mater. Trans., JIM*, **32**(1991), 174.
- (4) T. Sakai, M. Ohashi, K. Chiba and J. J. Jonas: *Acta Metall.*, **36**(1988), 1781.
- (5) R. A. P. Djaic and J. J. Jonas: *Metall. Trans.*, **4**(1973), 621.
- (6) R. A. Petkovic, M. J. Luton and J. J. Jonas: *Can. Metall. Quart.*, **14**(1975), 137.
- (7) 井上栄治, 酒井 拓: 日本金属学会誌, **55**(1991), 286.
- (8) T. Sakai and J. J. Jonas: *Acta Metall.*, **32**(1984), 189.
- (9) 大橋正幸, 遠藤孝雄, 酒井 拓: 日本金属学会誌, **54**(1990), 435.
- (10) 例えば, C. M. Sellars: *Annealing Processes-Recovery, Recrystallization and Grain Growth*, Ed. by N. Hansen *et al.*, Risø National Lab., (1986), 167.
- (11) T. Sakai and M. Ohashi: *Mater. Sci. Tech.*, **6**(1990), 1251.
- (12) R. A. Retkovic, M. J. Luton and J. J. Jonas: *Acta Metall.*, **27**(1979), 1633.
- (13) M. J. Luton, R. A. Petkovic and J. J. Jonas: *Acta Metall.*, **28**(1980), 729.
- (14) P. D. Hodgson, R. E. Gloss and G. L. Dunlop: *Mechanical Working and Steel Processing Proceedings*, Iron and Steel Soc., AIME, (1990), 527.
- (15) L. Blaz, T. Sakai and J. J. Jonas: *Metals Sci.*, **17**(1983), 609.
- (16) 徐 洲, 酒井 拓: 日本金属学会誌, **55**(1991), No. 12 印刷中.