

231 FCC金属におけるひずみ履歴-ひずみ速度履歴重畳効果

同志社大学 正 ○長谷部忠司
同志社大学 学 中元 均
同志社大学 正 今井田 豊

1. 緒言

高ひずみ速度下においてひずみ経路, ひずみ速度が変化する場合, あるいは多軸応力が作用する場合は, ひずみ履歴, ひずみ速度, およびひずみ速度履歴の諸効果が重畳することになり, 諸効果間に何らかの相互作用が生じる場合, FCC金属においてその硬化挙動に著しい変化が生じることが予想される。しかし, こうした条件下での系統的な研究は, 実験技術の困難さと関わってほとんど行なわれていない。

本研究では, ひずみ履歴効果とひずみ速度効果が重畳した場合の両者の相互作用について調べることを目的とする。積層欠陥エネルギーの異なる2種のFCC金属, AlとCuを用いて, 静的予ねじりを与えた後衝撃圧縮試験を行ない, 上記重畳効果を実験的に調べ考察を加える。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材としてAl(A-1050)およびCu(C-1100)を採用した。両材の積層欠陥エネルギー(SFE)は, それぞれ約200および40mJ/m²である¹⁾。熱処理として, それぞれ400℃×1hrおよび450℃×1hrの焼鈍を施した。静ねじり試験に用いた試験片は, 径φ10mm×標点間距離100mmの中実丸棒であり, ねじり予ひずみ量(γ)_{pre}を0, 2.5, 5, 7.5および10%とした。ねじり試験後, 標点部から所定の長さで切り出した円筒を圧縮試験に供した。なお, 圧縮に用いる試験片の寸法は, φ10mm×20mm(静的), φ10mm×長さ10mm(衝撃)とした。

2.2. 実験装置および手順

静的圧縮試験でのひずみ速度は $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ とし, 20%まで圧縮を行った。衝撃圧縮試験では, ホプキンソン棒方式に基づいた試験を実施し, 試験片の応力については透過波を用いて評価した²⁾。ひずみ速度の範囲は $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ とし, 5%まで圧縮を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ひずみ速度効果

Fig.1に各(γ)_{pre}に対する応力-ひずみ関係を示す。代表例として, Al, Cuに対してそれぞれひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 700 \text{ s}^{-1}$ および 500 s^{-1} の場合を示した。ねじり予ひずみの導入に伴う応力上昇は, Alと比べてCuでは大きいことがわかる。これは定性的には静的圧縮の場合と同じ傾向である。Fig.2にひずみ速度と流動応力の関係を示す。ここで, オフセットひずみを $\epsilon = 3\%$ とした。Al, Cu両材とも, いずれの(γ)_{pre}に対しても, ひずみ速度の上昇に伴い流動応力(以下, 単に応力と記す)はほぼ直線的に上昇していることがわかる。Alでは(γ)_{pre}によらず傾きはほぼ等しく, 一方Cuでは(γ)_{pre}の増加に伴う応力の上昇傾向は著しくなっている。図示しないが, オフセットひずみ

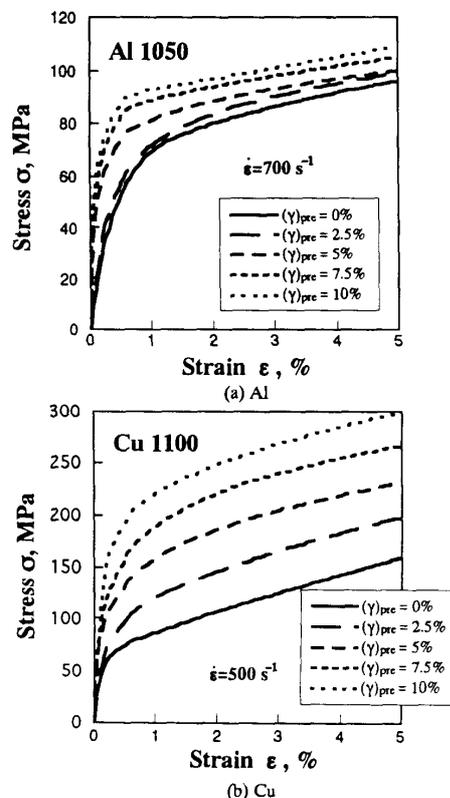


Fig.1 Stress-strain curves comparing effect of pre-torsion strain on flow stress for (a)Al and (b)Cu.

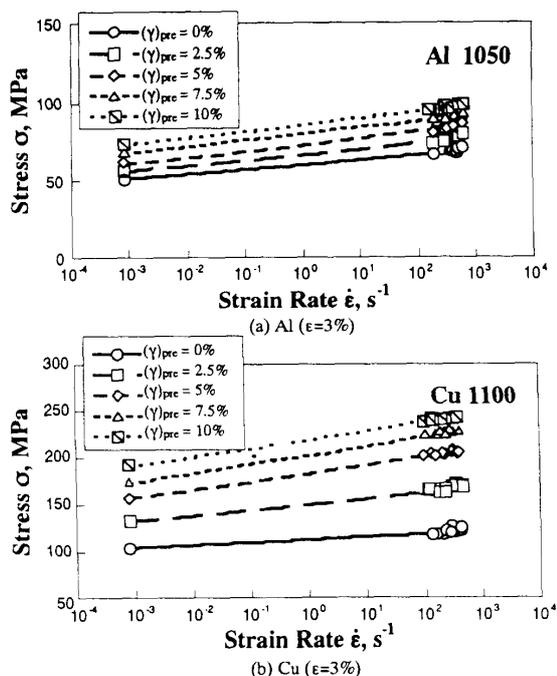


Fig.2 Correlation of flow stress with strain rate for (a)Al and (b)Cu with offset strain $\epsilon = 3\%$.

が大きくなるとこれらの傾向はより顕著になる。

3.2 ひずみ履歴-ひずみ速度重畳効果

相当ひずみ基準でFig.1に示した応力-ひずみ関係を再整理した図をFig.3に示す。本実験で使用した試験片は中実丸棒であり、ねじりの際にせん断ひずみは半径方向に分布する。ここでは、断面積が互いに等しくなる平均半径位置でのひずみの値を代表値として採用した。同図より、Alでは、静的な場合³⁾に観察される一時的な降伏応力の上昇、すなわち交差効果は消失し、応力は $(\gamma)_{pre}=0\%$ の場合と一致、あるいは若干下まわっていることがわかる。一方、Cuに対しては、再負荷時において常に $(\gamma)_{pre}=0\%$ よりも大きな応力を示している。同傾向は静的圧縮の場合と同様であるが、応力上昇の度合いは静的な場合と比べより顕著になっている。

上記のひずみ履歴-ひずみ速度重畳効果を定量的に示すために、応力上昇率を比較した結果をFig.4に示す。両図とも縦軸は $(\gamma)_{pre}=0\%$ 、 $\epsilon=8.3 \times 10^{-3}$ (静的圧縮)の場合の流動応力を基準として示している。また同図中、左側は上記両効果を単純に重ね合わせた場合に対する計算結果を示し、右側は実験結果を示している。

Alの場合では、各 $(\gamma)_{pre}$ に対して応力上昇率は、実験結果と比べ計算結果の方が大きくなっていることがわかる。すなわち、ひずみ速度が大きい範囲では、負荷履歴効果は相対的に小さくなり、どちらかといえば速度効果の影響が支配的となる傾向を示している。

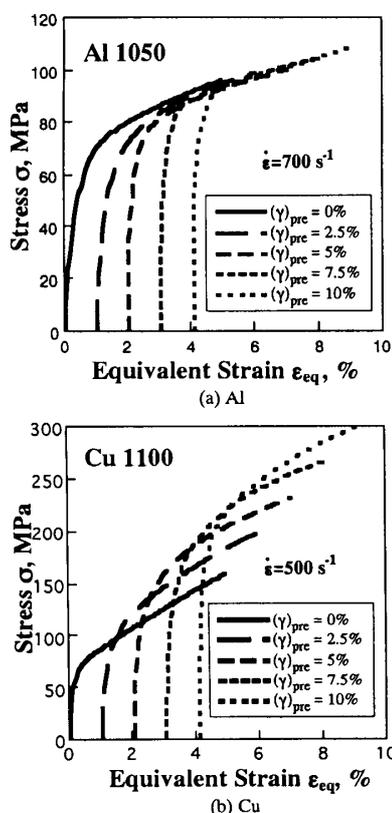


Fig.3 Stress-equivalent strain relations comparing effect of static pre-torsion strain on flow stress for (a) Al and (b) Cu.

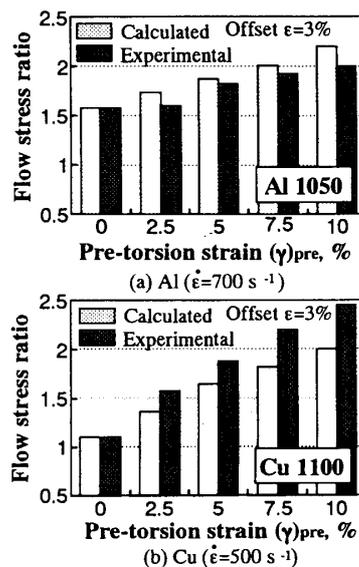


Fig.4 Comparison of flow stress ratio between calculated and experimental results as a function of pre-torsion strain for (a) Al and (b) Cu. Offset strain is $\epsilon=3\%$.

一方、Cuの場合では、ひずみ速度の大きい領域においてもひずみ履歴効果は顕著に生じている。また、Alと異なり、いずれの $(\gamma)_{pre}$ に対しても、実験による応力上昇率が計算結果を上回っている。この傾向は、 $(\gamma)_{pre}$ の増加に伴い顕著になっている。すなわち、Cuに対しては、ひずみ履歴-ひずみ速度の両効果間に何らかの相互作用が生じていると考えられる。

3.3 ひずみ履歴-ひずみ速度重畳効果の微視的解釈

上述のようなひずみ履歴-ひずみ速度重畳効果の材料依存性については、微視的観点からは以下のように解釈することができる。

Alでは、SFEが大きいため固着転位を形成しにくい。衝撃負荷下では転位が高速で運動するため、静的負荷の場合よりも一層固着反応を起こしにくくなり、その結果変形初期における交差効果が消失したものと考えられる。一方、CuではSFEが小さいため、衝撃負荷下においても容易に固着転位を形成し、高ひずみ速度に対してもひずみ履歴効果が顕著に現われる。

さらに、Cuにおいて、ひずみ履歴効果が高ひずみ速度域でより顕著になることとして以下のことが考えられる。FCC金属に対するひずみ速度履歴効果として、衝撃負荷下で生じた転位密度は、静的負荷下のそれよりも大きくなることが報告されている⁴⁾。したがって、衝撃負荷下では、転位密度が静的負荷下と比べて大きくなるため、林転位との固着作用に基づく転位運動に対する抵抗がより大きくなるものと考えられる。したがって、ひずみ速度が大きいほど固着転位の密度が増加することになり、上記傾向がより顕著になると考えられる。

4. 結言、参考文献 省略