

7075-Al 合金の不連続変形時の応力緩和挙動*

斉藤勝男** 木原諄二*** 乙黒靖男**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 53, No. 8 (1989), pp. 759-763

Stress Relaxation Behaviour of 7075-Al Alloy during Discontinuous Deformation

Katuo Saitou**, Junji Kihara*** and Yasuo Otoguro**

Information about the dislocation behaviour is necessary for the investigation of the discontinuous deformation, and the stress relaxation test is one of the method to obtain it. This study is intended to provide the stress relaxation behaviour of 7075-Al alloy, which exhibits nearly regular load drops in the stress-strain curve. The stress relaxation tests are done at the positions just before (Max position) and after (Min position) the load drop. The relaxed stress ΔR at each position is discussed. In addition, a strain gauge is attached to the specimen in order to keep the specimen strain constant during the relaxation for the sake of obtaining the true relaxation properties of the specimen.

The main results obtained are as follows:

- (1) In the case of the strain control, the ΔR is the value obtained when the stiffness of the machine is infinite, and corresponds to the effective stress.
- (2) The stress relaxation at a Min position is due mainly to the deformation band formed when the load dropped.
- (3) The stress fluctuations during the discontinuous deformation correspond to the internal stress fluctuations by the formation of the deformation band.

(Received January 18, 1989)

Keywords: discontinuous deformation, Portevin-LeChatelier effect, stress relaxation, effective stress, internal stress, deformation band, aluminum-zinc-magnesium-copper alloy

I. 緒 言

不連続変形中の荷重(応力)変動は従来 Cottrell 雰囲気気形成とそれからの離脱によるという考えが一般的であったが⁽¹⁾, その場合に期待される転位運動は, 転位運動のその場観察⁽²⁾の例とは著しく異なっているように考えられる. 転位運動がどのような様であるかを推測する一つの方法として応力緩和試験が考えられる. 不連続変形中に応力緩和を行い, その挙動を調べた例は静的ひずみ時効測定の場合を除くと数例しか見当たらない. Noguiera と Fortes⁽³⁾は Al-0.11(mass)%Mg-0.1%Cu 合金の type A 変形[†]で, 再引張り後の変形帯通過に対する障害物が応力緩和により試料中に形成されることを示した. さらに, 除荷と応力緩和とによる再引張り後の降伏点は応力緩和の場合の方が大きいこ

とから, 溶質の雰囲気気形成は運動転位と林転位との接触により密である応力緩和状態で著しいと論じている. また, Korbel と Dybiec⁽⁵⁾は Al-5(mass)%Mg-0.8%Mn 合金の type C 変形[†]の応力緩和で, 荷重降下する直前での応力緩和量 ΔR は荷重降下した直後での場合の値よりも大きいことを示した. しかしながら, その理由については何も触れていない.

不連続変形は荷重-伸び曲線上の荷重降下によって示されるが, 荷重が降下する直前と直後で転位運動がどのように異なるかを検討することは不連続変形機構解明のために有用である. すなわち, 応力降下が Cottrell 雰囲気気からの離脱であれば応力下での熱的活性化過程であることが期待される. 従って, 応力降下直前と直後での応力緩和挙動は現象的に全く異なったものであることが期待されよう. 本報告は荷重効果が比較的規則的である type B[†]の不連続変形中に応力緩和試験を行い, 荷重降下の直前と直後での転位挙動の比較検討を目的としている.

理想的な応力緩和試験ではクロスヘッド間隔一定の応力

* 1988年11月日本金属学会吹田大会に発表

** 群馬大学工学部機械工学科(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Gunma University, Kiryu)

*** 東京大学工学部金属工学科(Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Technology, The University of Tokyo, Tokyo)

† type A, B, C の定義は Brindley と Worthington⁽⁴⁾によった.

付加状態で弾性ひずみが転位運動により塑性ひずみに変化するが、通常の引張試験機では試験機の弾性エネルギーによる寄与が含まれている。荷重降下の直前と直後での応力緩和挙動を調べるにはその様な試験機剛性の影響が含まれないほうが望ましいため、実験はその様なことを考慮して行った。

II. 試料および実験方法

実験には7075-Al合金を試料として用いた。試験片寸法は平行部長さ20 mm, 幅5 mm, 厚さ1 mmとした。熱処理および引張試験方法等については前報⁽⁶⁾と同様である。

応力緩和中の試験片のひずみを検出するため、大ひずみゲージ(グリッド長さ5 mm, グリッド幅2 mm)を接着剤YC31で試験片中央部に貼り付け, コーティング剤KE48W(信越シリコン)を塗付し, 1800 s (30 min)室温放置した。

ひずみは動ひずみ測定器の出力をゼロサプレッションし, 拡大記録させた。緩和中のひずみを一定に保つには試験機を手動操作にし, ひずみゲージ出力が常に一定になるように調整する方法を用いた。

引張試験は初期ひずみ速度 $3.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ で行い, 温度は303 Kとした。応力緩和は荷重-伸び曲線上で荷重が急に降下する直前(Max位置と称する), および降下した直後(Min位置と称する)の二点で行い, 緩和時間は300 s (5 min)間とした。なお, 本文中で示す応力緩和量 ΔR は300 s経過後の値である。

III. 実験結果

1. 応力緩和前後の荷重-伸び曲線

Fig. 1 に変形前半におけるMax位置での緩和前後の荷重-伸び曲線の様子を示す。荷重-伸び曲線は変形の前半(ひずみ約5%以下)では, 緩和の位置がMax, Minに拘らず再負荷後では緩和開始前の荷重の最高値よりも高い荷重の最小値が現れるような遷移状態が続き, その後緩和前の荷重-伸び曲線の延長と一致するような傾向を示した。このことは応力緩和中に静的ひずみ時効が生じたことを示している。変形が後期(ひずみ約5%以上)になった場合での緩和では, 前期で認められたような遷移状態は認められず, 再負荷後の1個の荷重波形のみに影響があった。この時には緩和位置の相違による影響は認められなかった。

応力緩和を行ったことによるその後の変形挙動への影響を調べるために, 平均的な応力降下量 $\Delta\sigma$ とその平均的時間間隔 Δt を測定した。Fig. 2 に $\Delta\sigma$, Fig. 3 に Δt をひずみで整理した結果を示す。図中での記号Max, Minはその位置で応力緩和させたことを, また, 破線は応力緩和試験を全く行わない単純引張り試験での結果を表している。Figs. 2 および 3 より応力緩和試験を行った場合の $\Delta\sigma$, Δt

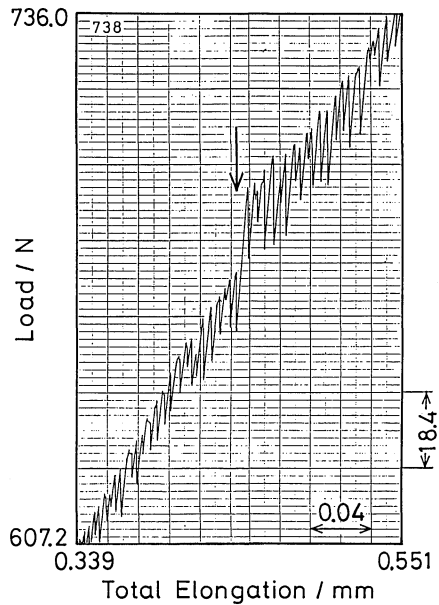


Fig. 1 Representation of the load-elongation curve. Stress relaxation has started just before the load drops. Arrow indicates the starting position of the relaxation.

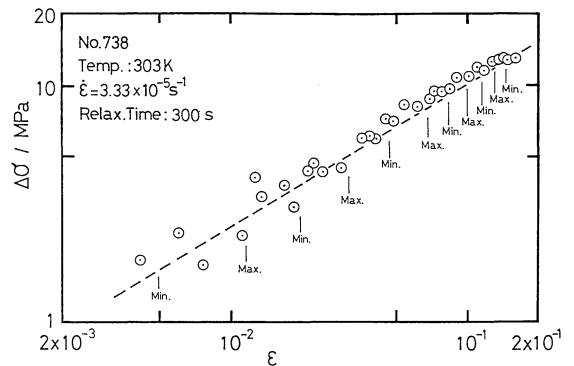


Fig. 2 Relation between the stress drop $\Delta\sigma$ and the true strain.

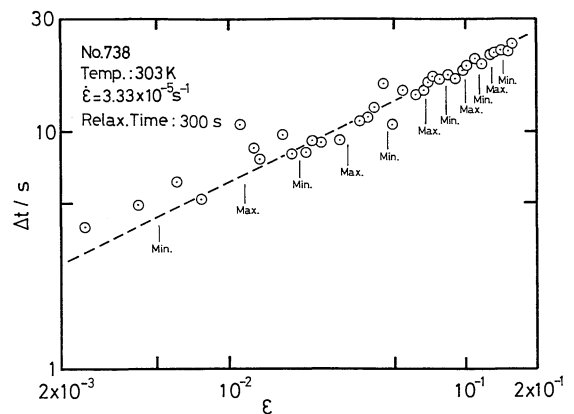


Fig. 3 Relation between the time interval Δt and the true strain.

は測定値のばらつきを考慮すると単純引張りによる $\Delta\sigma$, Δt とはほぼ一致していると見なせるので, 応力緩和試験は $\Delta\sigma$, Δt には影響を与えない.

2. 応力緩和挙動

通常の応力緩和試験はクロスヘッド間隔一定で試験を開始するが, 時間経過と共に試験片の弾性変形の一部が塑性変形に変化する. 同時にそれに相当する量だけの試験機の弾性ひずみが低下することになり, 結果として試験片には塑性伸びが生じることになる. しかし, 試験機の影響が入らない試験片本来の挙動を求めるにはこれを避ける必要がある. これは緩和中に試験片のひずみが一定となるように試験機のクロスヘッドの位置を制御することによってなされる.

応力緩和中に試験片に伸び(緩和ひずみ)が生じないように試験機を制御した場合の ΔR の測定結果を, Max 位置の場合について Fig. 4 に, Min 位置の場合について Fig. 5 に示す. 各々の図中の直線は最小二乗法により求めた.

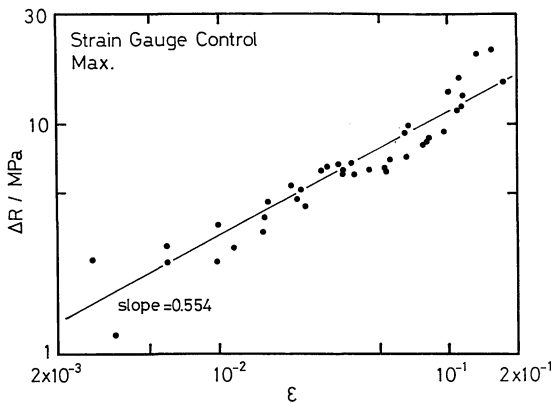


Fig. 4 Relation between the relaxed stress ΔR and the true strain. Relaxation has started just before the load drops. The strain is kept constant during the relaxation.

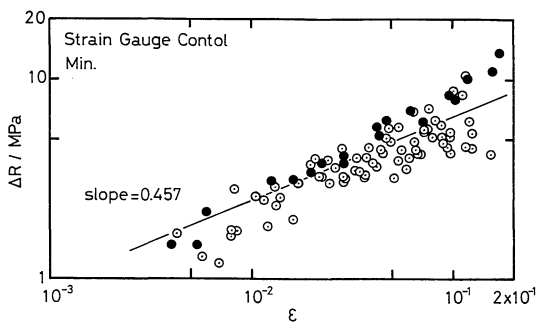


Fig. 5 Relation between the relaxed stress ΔR and the true strain. Relaxation starts immediately after the load has dropped. The strain is kept constant during the relaxation. Solid marks represent the cases that the deformation bands are formed at the position of strain gauge.

Fig. 5 中での黒丸印はひずみゲージ部に变形帯が形成された場合を表している. Fig. 4 と 5 より ΔR の値は Max 位置の方が大きく, 直線の勾配は Max 位置で 0.55, Min 位置で 0.46 であり, 勾配においても Max 位置の場合の方が大きいことが分かる.

IV. 考 察

1. 応力緩和挙動

Max 位置の場合には試験片はほぼ弾性変形に近い状態で引張り荷重を受けているため, 試験片のどの位置でも巨視的な応力緩和条件は同一であると考えられる. しかし, Min 位置では局所的な变形帯が形成された直後の状態であるため, 例えば变形帯の位置と他の位置とでは応力緩和条件が同一であるとは考えられない. 特に, 本実験で用いたひずみゲージは試験片平行部全長を覆っていないため, 变形帯がひずみゲージ部に形成された場合とそうでない場合とでは緩和ひずみに相違が生じる可能性がある. このため Min 位置ではいずれの場合が妥当であるかを検討し, それと Max 位置での結果とを比較することが必要である. この検討のために, 变形帯がひずみゲージから離れた位置に形成された場合におけるひずみの時間依存性の例を Fig. 6 に示す.

Fig. 6 は, 緩和開始後約 40 s までは負の緩和(ひずみゲージ出力の低下, 試験片が弾性的に縮小)を示し, その後正の緩和へと変化していることを表している. これは, 变形帯が形成された場所での緩和速度が最も大きいため, 变形帯が形成されなかった場所では負の緩和となり, その後弾性ひずみの均一化により, ひずみ制御している部分での塑性による緩和が現れ, 正の緩和への移行となることを意味している. この様に Min 位置で緩和させた場合の応力緩和挙動はひずみゲージ部と变形帯発生位置との位置関係に依存している. 更に, Fig. 5 で示した様に变形帯がひずみゲージ部に形成された場合, ΔR はそれ以外の位置に变形帯が形成された場合と比べて大きく, ばらつきの範囲が狭い.

以上のことから, Min 位置での ΔR は变形帯がひずみゲージ部に形成された場合のみを用いることにした.

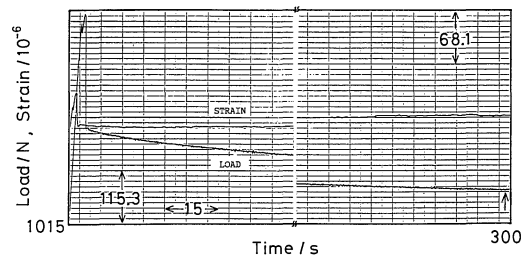


Fig. 6 Time dependence of the load and the strain. Relaxation position is immediately after the load has dropped. $\epsilon = 5.9\%$, $\sigma = 224$ MPa.

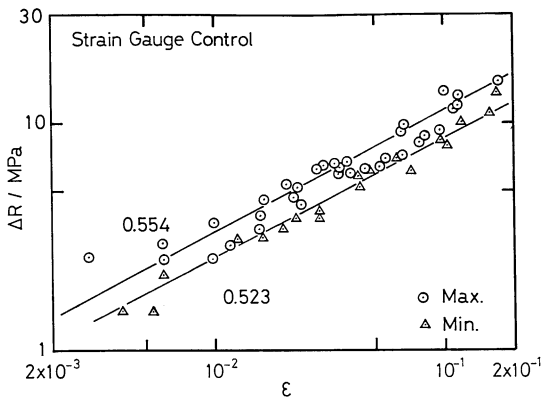


Fig. 7 Comparison between the relaxed stresses at the positions of Max and Min. The figures by the lines represent the slope of each lines.

Fig. 7にMaxおよびMin位置における ΔR を示す。MaxとMin位置における比較をFig. 7を用いて行くと次のようになる。

(1) Min位置での場合よりもMax位置での場合の方が ΔR は一般に大きい、同じ場合もあり、Max位置とMin位置の ΔR の差は少ない。

(2) 最小二乗法を用いて求めた直線の勾配は0.55と0.52であり、これは互いに測定点数を増せばほぼ等しい値になるであろうと推測される。

試験片本来の応力緩和挙動を求めるにはひずみ制御が必要であることを述べたが、試験系の剛性の観点からはこれは次のように考えられる。緩和中のひずみが一定であることは、試験機の弾性による効果が無いことになるため、この方法による応力緩和挙動は試験機剛性無限大における試験片の挙動に相当する。従って、求めた ΔR がMaxとMin位置ではほぼ等しいことは、試験機剛性無限大、即ち試験片本来の挙動として考えると ΔR は荷重降下が生じる位置とは無関係に応力またはひずみによって支配されていることを示すものである。

応力緩和した状態から再荷重した場合に、応力緩和開始前のひずみ速度で塑性変形を再開するには ΔR だけの応力を付加しなければならないので、ひずみ制御した場合に得られる ΔR を転位に作用する有効応力と見なすことが可能である。従って、Max位置とMin位置ではほぼ等しい有効応力が測定されたことになる。 σ_a , σ_e , σ_i を各々負荷応力、有効応力、内部応力とし、 $\sigma_a = \sigma_i + \sigma_e$ と仮定すると、 $\sigma_i = \sigma_a - \sigma_e \approx \sigma_a - \Delta R$ となるため、負荷応力変動は変形帯における内部応力変動と見なせるであろう。

Min位置で変形帯がひずみゲージ部に無いときに ΔR が小さかったのは、ひずみゲージ部での内部応力が変形帯での内部応力より高いため有効応力がそれだけ小さかったことを意味している。また、Max位置での ΔR のばらつきがMin位置でのそれに比べて狭かったのは、変形帯を

形成する以前での試験片の内部応力状態が一樣であるためと考えられよう。つまり、不連続変形は試験片の各部がある硬化状態になると内部応力を支えきれず、動的回復を変形帯発生と共に引き、ある部分の内部応力を低減することに対応すると考えられる。そして、動的回復が転位の集団運動によるため熱的活性化過程とはなり得ないので、MaxおよびMin位置がその緩和挙動に対して相違を与えるものではないことも理解出来よう。このような理論は不連続変形における転位挙動の観察を行ったTabataら⁽²⁾の検討とも対応している。

以上の概念を模式図にするとFig. 8の様になる。求めた ΔR は応力量であるため試験片の部位には依存しない値であるが、Min位置では ΔR の生じた原因が変形帯の形成された位置にあるため、 ΔR は試験片全体の平均的なものを表すのではなく、変形帯およびその近傍での有効応力を表すものと考えられる。従って、type B変形では変形帯形成による応力降下量 $\Delta\sigma$ が生じる毎に内部応力は低下することになり、応力-ひずみ曲線はFig. 8の実線のように鋸歯の連続で示されることになる。しかし、変形帯の形成される位置は変形の進行につれて移動するため、1個の変形帯が形成された位置のみに注目すれば、そこでの負荷応力および内部応力はFig. 8中の破線(この場合のひずみは変形帯が形成される場所の長さを基としている)で示すように応力降下量 $\Delta\sigma$ が生じた場合のみに低下するだけであり、それ以外では著しい応力降下は生ぜず単調増加するものと考えられる。

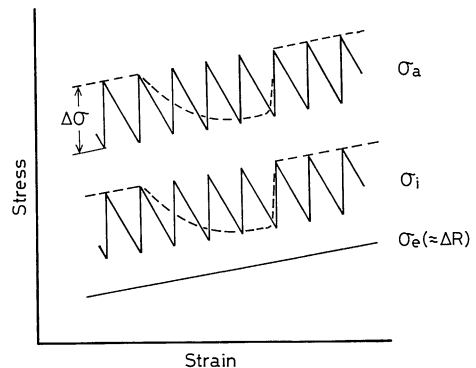


Fig. 8 Schematic representation of the stress-strain curves. Broken lines indicate the stress-strain curves in the region where one deformation band has formed.

2. 内部応力に対する ΔR の割合

不連続変形の機構を検討する上では ΔR の変化を調べるだけでは不十分である。 ΔR を有効応力と考えた場合にはいわゆるCottrell-Stokes law的な有効応力と内部応力との比について調べ、不連続変形が生じない純Alの結果と比較検討することが必要である。

ひずみ調整した場合における ΔR と応力緩和した時点での内部応力との比 $\Delta R/(\sigma - \Delta R)$ ($=\phi$) をひずみで整理し、Min 位置での結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 中には純 Al (純度 99.99%, 結晶粒径 37 μm) の結果も示した。なお、Max 位置での ϕ の傾向は Min 位置の場合と同様であった。

純 Al の ϕ の傾向はひずみが約 2% まではひずみの増加につれて低下するような傾向にあるが、それ以上のひずみではひずみの増加と共に増す。7075 合金の結果と比較すると、ひずみが約 2% までの結果を除くと両者ともそれ以上でのひずみでは ϕ の単調増加という点で一致するが、その増加率は純 Al のほうが若干小さい。また、 ϕ の絶対値は 2~4 倍ほど純 Al のほうが高い値を示している。

純 Al の ϕ に比べて 7075 合金の ϕ の値が低い理由は、定性的には次のように考えられる。純 Al の内部応力に寄与するものはおもに転位の相互作用であるが、7075 合金では転位の相互作用以外に溶質原子、析出物の存在が内部応力に寄与するため、結果的に ϕ の値は 7075 合金で低くなる。

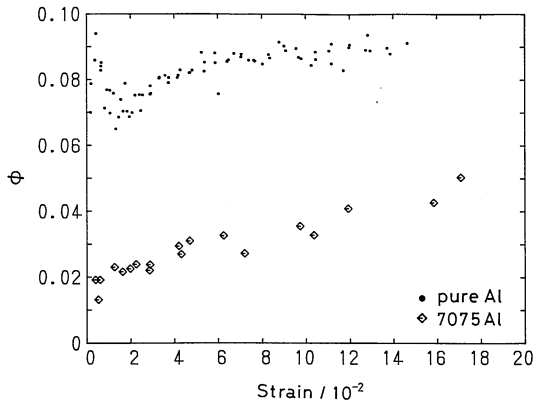


Fig. 9 Relation between ϕ , the ratio of the relaxed stress to the internal stress, and the true strain.

純 Al の低ひずみ側を除くと、 ϕ のひずみに対する増加率は 7075 合金で若干高いように見受けられるが大体の傾向は両者で一致していることから、不連続変形が起きている場合の変形機構は純金属でのそれとはまったく異なっているものではないであろうと考えられる。しかしながら変形の初期での傾向、および ϕ の増加率が若干異なることは、純金属での変形機構に相当するもの以外に別な機構が関係していることをも示唆していると考えられる。

V. 結 論

規則的な荷重降下が生じる 7075-Al 合金の不連続変形中に応力緩和試験を荷重降下直前 (Max 位置) と直後 (Min 位置) で行った結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 応力緩和中にひずみ制御した場合の ΔR は、試験機剛性無限大の挙動に相当し、緩和開始位置が Max 位置であっても Min 位置であってもそれには依存しない。得られた ΔR は有効応力に相当すると考えられる。
- (2) Min 位置での応力緩和には荷重降下時に形成された変形帯における塑性変形が主に寄与する。
- (3) 従って、不連続変形の負荷応力変動は変形帯形成に際し変形帯の部分に生じる内部応力の変動に相当すると考えられる。

文 献

- (1) 例えば P. G. McCormick: Acta Metall., 20(1972), 351.
- (2) T. Tabata, H. Fujita and Y. Nakajima: Acta Metall., 28(1980), 795.
- (3) M. T. Noguiera and M. A. Fortes: J. Mat. Sci. Letters, 5(1984), 544.
- (4) B. J. Brindley and P. J. Worthington: Metall. Rev., No. 145, (1970), p. 101.
- (5) A. Korbel and H. Dybiec: Acta Metall., 29(1981), 89.
- (6) 斉藤勝男, 細井吉一, 乙黒靖男: 日本金属学会誌, 51(1987), 616.