アルミニウム熱間圧延および押出し材の組織におよぼす 加工温度および加工度の影響*

小川 豊** 後藤公美*** 田中英八郎****

Yutaka Ogawa, Kimiyoshi Gotô and Eihachirô Tanaka: The Effect of Temperature and Degree of Working on the Structure of Hot-Rolled and Extruded Aluminum.

The flow in deformation at high temperature and the microstructures of hot worked aluminum have been studied. Working temperatures were 260° and 450°C in the hot rolling and 200° and 400°C in the extrusion. The specimens were quenched in water within 0.5 to 2.0 sec after the completion of working in each experiment. The results obtained are as follows:

(1) Hot rolling (mean strain rate, 3~25/sec; reduction, 10~90%)

The phenomena of center buckling and crown in the rolled plates become remarkable as the rolling temperature and reduction are raised, and finally the wave pattern appears in the central part of the plates. It found that these are caused by the rapid increase in friction coefficient.

(2) When rolling temperature is 450°C, the recrystallized grains are observed in the quenched specimens rolled at high reduction ratio, but not observed at low reduction ratio.

(3) Extrusion (mean strain rate, 4.4/sec; working degree, 98.4%)

The microstructures of quenched and annealed states of the specimens extruded at 200°C are the same as those obtained by cold working. In the specimens extruded at 400°C, recrystallization has occurred in the quenched state, and it seems that there are some differences in the recrystallization process by subsequent annealing between the surface and the middle layers of the specimen.

(Received January 6, 1966)

I. 結 言

高温における金属の加工は工業的に広く行なわれているが、その歪み速度および加工率は高い場合が多い。しかし

ながらこのような条件における高温加工の研究は比較的少なく、従来は低歪み速度かあるいは低加工率の場合における変形機構、結晶粒の挙動などに関する研究⁽¹⁾が主であ

*** 東北大学大学院学生、現在、日本原子力研究所 (Student of Graduate School, Tohoku University, Sendai and now, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai)

*** 東北大学金属材料研究所、現在、東北大学科学計測研究所 (The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku University, Sendai and now, The Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University, Sendai)

**** 東北大学金属材料研究所 (The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku University, Sendai)

* 1960年4月本会東京大会、1961年4月本会東京大会に発表

(1) たとえば大日方、畑：本誌，**6**(1942)，258；W. A. Wood, G. R. Wilms and W. A. Rachinger: J. Inst. Metals, **79**(1951), 159; D. McLean: J. Inst. Metals, **80**(1951~52), 507; 作井、佐藤：本誌，**20**(1955), 35, 281.

る。著者らは高い歪み速度をもつ高温加工としてアルミニウムの自由鍛造の実験を行ない、その結晶組織の観察結果を報告した⁽²⁾。本報においては加工法を変えて圧延と押し出しを行ない、加工の際の材料の流れおよび組織について検討した結果を述べる。

II. 試料および実験方法

1. 熱間圧延

試料は普通純度のアルミニウムを素材として Table 1 に示した過程により 100×40×9 mm に仕上げ、500°C×1 hr

Table 1 Preparation of specimens for hot rolling.

Casting→Soaking, 500°C×16 hr→Hot rolling, 450°C, 30~50%→Annealing, 450°C×2 hr→Cold rolling, 44%→Machining, 100×40×9 mm→Annealing, 500°C×1 hr

の熱処理を行なったものである。実験に使用した圧延機はロール径 250 mm, ロール周速 20 m/min の 2 段圧延機でロールの形状はフラットである。圧延機の入口側に試料の加熱電気炉をおき、加熱された試料を取り出し、1 回のパスで 10~90% まで圧延した。圧延機の出口側には焼入れ水槽を設け、圧延終了後 0.9~2.0 sec 以内に試料を水冷し、加工状態における組織が加工後の温度の影響を受けないように努めた。圧延温度は圧延開始時における試料の温度とし、260° および 450°C を選んだ。本実験においてはロールを加熱していないので圧延中に試料は冷却される。試料の圧延開始時の温度および終了時の温度は接触型表面温度計によつて測定した。その結果、圧延終了時の温度は開始時の温度が 450°C の場合、圧延率 30% では 382°C, 60% では 330°C, 90% では 271°C であった。試料の平均歪み速度⁽³⁾は 3~25/sec である。圧延後 300°~630°C×30 min の熱処理を行ない、光学顕微鏡により組織を観察した。また試料の圧延圧力を抵抗線歪み計をはりつけたロードセルを用いて測定し、Ekelund の式⁽⁴⁾から摩擦係数を求めた。圧延の際には潤滑剤としてケロシンおよびグラファイトグリースを使用した。

2. 押し出し

試料の作製過程を Table 2 に示した。鑄造法として S. A. C. 法⁽⁵⁾を採用したため、鑄造材の粒度は均一かつ微細であり、圧延の場合のように鑄造組織の破壊および粒度調

Table 2 Preparation of specimen for hot extrusion.

Casting, S. A. C. process, 70 mmφ×125mm→Soaking, 500°C×1 hr

(2) 後藤, 小川, 田中: 本誌, **30** (1966), 498.

(3) E. C. Larke: *The Rolling of Strip, Sheet and Plate*, Chapman and Hall LTD. (1957), 258.

(4) E. C. Larke: *ibid.*, 304.

(5) 大日方, 栗原, 竹内, 川西: 本誌, **21** (1957), 349, 353.

整のための熱間加工は不必要であつた。試料の分析値を Table 3 に示す。実験には 300 t 押し出し機を使用し、逆押

Table 3 Chemical composition of specimens for hot extrusion (wt%).

Fe	Si	Mg	Cu
0.12	0.087	0.005	0.001

出しを行なった。本実験においても圧延におけると同様に加工直後に水冷する方法をとり、その概略を Fig. 1 に示す。押し出し温度に加熱されたコンテナ内つアルミニウムはダイスを通つて押し出され、プッシンググラム内に備えつけられた水冷管から噴出する冷却水により冷却される。材料が加工されてから注水されるまでの時間は 0.5~1.0 sec であった。押し出し温度は 200° および 400°C とし、押し出し加工率は 98.4%, 平均歪み速度⁽⁶⁾は 4.4/sec である。押し出し材には 300°~600°C×30 min の熱処理を行ない、光学顕

Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus for extrusion.

微鏡により組織を観察した。なお潤滑剤としてはグラファイトグリースを用いた。

III. 実験結果

1. 熱間圧延

(1) 圧延板の形状

熱間圧延であるために特有な板の形状が見られた。その典型的な例として圧延温度 450°C, 圧延率 89.8% の場合を Photo. 1 に示す。圧延板の幅方向における中央部に高低の波状模様が見られ、かつ板は明らかに中伸びであつた。この圧延板の幅方向における厚さの測定結果を Fig. 2 に示す。この図から明らかのように中央部は厚く、いわゆる中高の現象を示し、中高率は 7~9% に達している。

一般に冷間圧延板においては、中伸の場合幅方向における厚さ分布は中央部で薄く(中薄)、中伸びかつ中高ということとは起こらない。熱間圧延においてこのような現象が生じることは Fig. 3 と Fig. 4 とからつぎのように説明する

(6) J. M. Alexander: *J. Inst. Metals*, **90** (1961~1962), 196.

ことができる. Fig. 3 は圧延方向と圧延時における材料の流れの方向となす角度の平均値 θ を $\tan \theta = \Delta b / \Delta l$ として

Photo. 1 Surface appearance of the wave pattern of hot rolled specimen. Rolling temperature, 450°C; reduction, 89.8%; lubricant, kerosene.

求めたものである. ここに Δb は圧延による試料の幅の増加であり, Δl は試料の長さの増加である. 図に見るように θ は圧延率とともに増加するが, 圧延率 60~70% 付近で飽和し 80% 以後は減少する傾向を示す. すなわち圧延率が 60% 程度以上になると, 材料の幅方向への流れは抑制されることを示している. Fig. 4 は圧延圧力の測定値から計算した摩擦係数 μ と圧延率との関係を示したものであるが, この図から明らかに, 圧延率が 60% 以上になると μ は急激に上昇している. このことは Fig.

3 において θ が圧延率 60~70% 付近で増加しなくなること支持している. すなわち圧延率がこの程度になると μ が非常に増大するため, 材料の幅方向への流れは極度に妨げられるので θ は増加しない. この際, 冷間圧延において

Fig. 2 Thickness distributions along the perpendicular direction to rolling direction of the specimen. Rolling temperature, 450°C; reduction, 89.8%.

は幅方向へ流れるべき材料の一部は圧延方向に流れて中伸びを示し, 他の一部は中央部に残存したまま圧延を完了

するので中高を示す. さらに μ が増加すると極端な場合となり, 材料の移動はますます困難となるので圧延板は局所

Fig. 3 Mean angle between the rolling direction and the flow direction of material. Rolling temperature, 450°C.

Fig. 4 Relations between friction coefficient and reduction ratio in the hot rolling experiment. Lubricant, Oil-dag.

的に上下に彎曲し波状模様が現われると考えられる. 圧延温度が 260°C の場合は波状模様は見られなかったが, 中伸び中高現象は明らかに認められた.

(2) 光学顕微鏡組織

Photo. 2 には圧延温度 450°C, 圧延率 79.6% の場合, 圧延材の表面付近(表層部)と厚さの 1/2 の部分(中層部)について水冷状態および以後の熱処理を加えた場合の組織の変化を示した. 水冷状態 (a) においてはいずれの層にも微細な再結晶粒が観察される. これは自由鍛造の実験結果⁽²⁾と一致しない. 表層部と中層部の組織には若干の差異が認められるが, これは加工の際のロールによる冷却のため両層間に温度差が生じたことによると思われる. 300°C 焼鈍によつては組織は余り変化せず (b), 熱処理温度が 350°C 以上になると両層間の組織の差異はなくなる. Photo. 3 は

圧延温度は同じ 450°C であるが低圧延率 30.1% の場合である。Photo.2 における組織とは異なり、水冷状態 (a) および

以後の焼鈍 (b), (c), (d) において微細な再結晶粒が認められない。この原因は不明であるが、低圧延率においては圧

(a) as quenched

(b) annealed at 300°C for 30 min

(c) annealed at 630°C for 30 min (200×2/3)
surface layer middle layer

Photo.2 Microphotographs of the surface layer (the left) and of the middle layer (the right) of hot rolled specimens. Reduction, 79.6%; rolling temperature, 450°C.

(a)

(b)

(c)

(d) (200×2/3)

Photo.3 Microphotographs of hot rolled specimens. Reduction, 30.1%; rolling temperature, 450°C.

(a) as quenched.

(b) annealed at 300°C for 30 min.

(c) annealed at 400°C for 30 min.

(d) annealed at 630°C for 30 min.

延終了時の温度が高く、II. で述べたごとく圧延率 30% のとき約 380°C であり、高圧延率の場合とは異なっている。このことが一因となつているのではなからうか。

ない。この原因は明らかでない。つぎに 200°C 押し材と 400°C 押し材とを比較すると、水冷状態においては後者の方が再結晶の進行度が速い (Photo. 4(a), Photo. 5(a)).

(a) as quenched

(b) annealed at 350°C for 30 min

(c) annealed at 550°C for 30 min (200×2/3)
surface layer middle layer

Photo. 4 Microphotographs of the surface layer (the left) and of the middle layer (the right) of hot extruded specimens. Extruding temperature, 200°C; reduction, 98.4%.

2. 押 出 し

押し出し加工は自由鍛造、圧延の場合より材料の流れに対する拘束度が高い。また押し出し加工率は本実験においては 98.4% で非常に大きい。Photo. 4 および Photo. 5 は押し出し温度がそれぞれ 200° および 400°C の場合の押し出し材の表層部および中層部における光学顕微鏡組織の変化を示したものである。Photo. 4 の 200°C 押し出し材では両層間の組織には差異がなく、かつ冷間加工材の組織変化とはほぼ一致している。すなわち水冷状態 (a) では微細な再結晶粒は存在せず、350°C 焼鈍 (b) において再結晶が全面的に進行し、550°C 焼鈍 (c) では結晶粒は粗大化している。

押し出し温度が 400°C の場合は、水冷状態の Photo. 5 (a) においてすでに再結晶粒が存在し、焼鈍温度の上昇にしたがつて再結晶が進行している。表層部と中層部の組織を比較すると若干差異が認められ、Photo. 5 (a), (b), (c) のいずれの組織においても中層部における再結晶の進行に表層部におけるより速い。600°C 焼鈍 (d) においては中層部では結晶粒が粗大化しているが、表層部では粗大化にいたつてい

以後の熱処理においては前者が速くなり、550°C 焼鈍の Photo. 4 (c), Photo. 5 (c) においては明瞭な差異が認められる。

IV. 総 括

比較的高い歪み速度、大なる加工率におけるアルミニウムの熱間圧延および押し出しを行ない、加工の際の材料の流れおよび熱処理による結晶組織の変化を観察した。試料はすべて加工後 0.5~2.0 sec 以内に水冷を行なった。結果はつぎのごとく要約される。

(1) 熱間圧延 (平均歪み速度 3~25/sec, 圧延率 10~90%) : 圧延温度が高くかつ圧延率が大になると圧延板は中伸び中高現象を示し、また幅方向の中央部に高低の波状模様が生じる。圧延圧力を測定し、圧延率と摩擦係数の関係を求め、また圧延時における材料の平均の流れの方向を推定した結果、これらの現象は摩擦係数の著しい増加により、圧延の際材料の幅方向への流れが抑制されるために起こることが明らかにされた。

(a) as quenched

(b) annealed at 350°C for 30 min

(c) annealed at 550°C for 30 min

(d) annealed at 600°C for 30 min

(200×2/3)

surface layer

middle layer

Photo.5 Microphotographs of the surface layer (the left) and of the middle layer (the right) of hot extruded specimens. Extruding temperature, 400°C; reduction, 98.4%.

(2) 圧延温度が 450°C の場合、高圧延率においては加工直後の水冷状態において再結晶が認められるが、低圧延率の場合は認められない。

(3) 押し (平均歪み速度 4.4/sec, 加工率 98.4%) : 熱処理による組織の変化を試料の表層部と中層部について観察した。200°C 押し材においては水冷状態で再結晶粒は存在せず、冷間加工組織と同様の再結晶過程を示す。400

°C 押し材は水冷状態で再結晶粒が認められ、また表層部と中層部の再結晶進行度には若干の差異がみられる。押し温度が高くなると再結晶の進行が遅れる傾向を示す。

終りに本実験について種々御協力いただいた福田武司助手、佐藤 宏氏、徳能裕巳氏、菊地隆士氏および阿部玲子嬢に心から感謝します。