アルミニウムの加工軟化現象について*

寺井 士郎** 馬場 義雄**

Shiro Terai and Yoshio Baba: On the "Work Softening" Phenomenon of Aluminium. As a result of studying the effects of the purity of aluminium and the heat-treatment on the "Work Softening" phenomenon of aluminium, it was found that this phenomenon was observed in the special state of the commercially pure aluminium.

For example, 99.2% aluminium sheet annealed at 240°C after cold rolling, increased the elongation from 16 to 25% and decreased the proof stress from 12.0 to 10.6 kg/mm² and the tensile strength from 12.5 to 11.8 kg/mm² with reduction of 1% by cold rolling, after the annealing.

This "Work Softening" phenomenon was observed in the half hard sheet of 99.2% and 99.8% aluminium annealed at the final temperature of about 240°C when cold rolled with reduction of 1 to 5%, if the ingot had been preheated at 500°C for 24 hrs. It was also observed that this phenomenon had no connection with the intermediate annealing and the anisotropy of the sheets.

"Work Softening" phenomenon was not observed in 99.99% aluminium and the commercially pure aluminium obtained from the ingot not preheated.

(Received May 31, 1962)

I. 緒 言

本報でとりあげた加工軟化現象とは、Al および Al 合金多結晶体の冷間圧延材を、ある特殊な熱処理後加工することにより軟化することをさす。従来、金属および合金の加工軟化については、種々の報告^{(1)~(6)}がなされているが、著者らのいう加工軟化とは現象的に異なっており、また実際の工業材料にとつて比較的縁の少ないものと思われていたが、著者らが市販純度のアルミニウムの焼鈍条件について種々の実験を行なつていたところ、ある温度範囲で焼鈍した材料にわずかの圧延加工を加えた後引張り試験を行なつたところ、焼鈍直後の状態より強度は低下し、伸びの増加が顕著に認められた⁽⁶⁾。そこで、この加工軟化現象について Al の純度、第 2 元素添加の影響および焼鈍前の熱処理、

組織の問題などを種々検討してきた。本報告では市販純度の Al を主体として、著者らのいう加工軟化の現象について述べることにする。

II. 実 験 方 法

純度 99.2% および 99.99% の Al について小型チル鑄型にて 2 kg の板状鑄塊を作成し、鑄造のままおよび予備加熱を行なつたものについて Table 1 の要領で 1 mm 板を作成し、最終焼鈍後 1, 3, 5, 7 および 10% の圧延加工を施した後引張り試験を行なつた。純度 99.2% および 99.8% の Al については工場製半連続鑄塊を使用し、Table 1 の要領で 1 mm 板を作成し、焼鈍温度ならびに板の方向性と加工軟化現象の関係について調査した。なお、引張り方向は最終の弱圧延加工と同方向である。使用した材料の分析結果を Table 2 に示した。

III. 実 験 結 果

Fig. 1 は工場製半連続鑄塊の予備加熱を行なつた 99.2% Al 試料を最終 240°C で焼鈍後 1~10% 圧延加工した場合の加工度と引張り強さおよび伸びとの関係である。これによると 240°C 焼鈍のままの状態では引張り強さ 12.5 kg/mm²、耐力 12.0 kg/mm² および伸びが 16% であつたものが 1% の冷間圧延をすることにより引張り強さ 11.8 kg/mm²、耐力 10.6 kg/mm² に減少し、逆に伸びは 25% に増加する。すなわち 1% の加工により著しい軟化現象が認められる。これ以上の加工によつても同様な軟化現象が

** 住友軽金属工業研究部 (Research Laboratory of the Sumitomo Light Metal Industry Ltd., Nagoya)

* 1959 年 4 月本会東京大会に発表

- (1) N.H. Polakowski: J. Iron Steel Inst., **162** (1951), 337.
- (2) N.H. Polakowski: J. Iron Steel Inst., **170** (1952), 106.
- (3) G. Masing: Z. Metallk., **17** (1925), 268.
- (4) R.L. Woolley: Report of Conference on Strength of Solids, (1947), 51.
- (5) S.N. Buckley and K.M. Entwistle: Acta Met., **4** (1956), 352.
- (6) A.H. Cottrell and R.I. Stokes: Proc. Roy. Soc., **A 233** (1955), 17.
- (7) A. Seeger, J. Diehl, S. Macler and H. Rebstock: Phil. Mag., **2** (1957), 323.
- (8) 松原, 寺井: 特許公報, 昭 35-7357.

認められるが、加工度を順次増加して行くに従いこの加工軟化の程度が少なくなり、10%以上加工すると通常の加

Fig.3 は予備加熱を行なった純度 99.2% Al の加工軟化と焼鈍温度の関係で、加工のままおよび各焼鈍温度で焼鈍

Table 1 Preparation of test specimens.

Aluminium	Ingot	Preheating	Hot rolling	Process annealing	Cold rolling	Final annealing	Light rolling
99.2% Al	Semi-continuous	500°C × 24 hrs	500°C 250→6 mm	No	6→1 mm	R.T. - 400°C × 30 min	1~10%
	Chill	No	500°C 25 → 6 mm	No	〃	〃	〃
		500°C × 24 hrs	500°C 25 → 6 mm	No or 400°C × 1 hr	〃	〃	〃
99.8% Al	Semi-continuous	500°C × 24 hrs	500°C 250→6 mm	No	〃	〃	〃
99.99% Al	Chill	500°C × 24 hrs	500°C 25 → 6 mm	No	〃	〃	〃

Table 2 Chemical compositions of test specimens.

Aluminium	Chemical compositions (%)							
	Cu	Fe	Si	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
99.2% Al	0.031	0.56	0.16	0.004	0.017	tr.	0.019	0.006
99.8% Al	0.002	0.082	0.061	0.002	tr.	tr.	0.007	0.005
99.99% Al	0.002	0.002	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.

工硬化現象が認められる。

Fig.2 はN型チル鋳型で製造した純度 99.3% Al の焼鈍曲線である。図によると鋳塊を 500°C で 24 時間予備加熱したものは鋳造のままの試料に比較して軟化の開始が低

した後、1~10% 圧延加工した場合の加工軟化現象を示し、横軸に焼鈍温度を、縦軸には焼鈍のままの引張り強さ、耐力および伸びの値と、それを1, 3および10% 圧延加工した場合のそれぞれの値との差を示した。図によると

Fig.1 Effect of reduction of rolling on the mechanical properties of 99.2% aluminium sheet annealed at 240°C × 30 min.

温側にずれ、220°~260°C の温度範囲での引張り強さと耐力の値の差が非常に少なくなっていることが認められる。

Fig.2 Annealing curve of 99.2% Al.

加工のままおよび 200°C で焼鈍したものはその後の弱加工によってもほとんど機械的性質の変化を示さないが、220°C で焼鈍したものでは約 3% の圧延加工によつて耐力

および引張り強さが 1 kg/mm^2 程度減少し、伸びが 4 % 増加し加工軟化現象が認められる。この場合の加工軟化の程度は 240°C で焼鈍した場合に最も著しく、1~3 % の圧延

加工により引張り強さが 1 kg/mm^2 、耐力で 1.5 kg/mm^2 減少し伸びが 7~8 % 増加している。焼鈍温度が 260°C の

Fig. 3 "Work softening" of 99.2% Al, preheated at 500°C 24 hrs.

$\sigma_{B,0}$: tensile strength of as-annealed steels
 $\sigma_{B,r}$: tensile strength of the sheets rolled lightly by r % after annealing
 $\sigma_{0.2,0}$: proof stress of as-annealed sheets
 $\sigma_{0.2,r}$: proof stress of the sheets rolled lightly by r % after annealing
 δ_0 : elongation of as-annealed sheets
 δ_r : elongation of the sheets rolled lightly by r % after annealing

Fig. 4 "Work softening" of 99.2% Al not preheated.

Fig. 5 Effect of process annealing on the "Work softening" of 99.2% aluminium preheated at $500^\circ\text{C} \times 24$ hrs.

ものは焼鈍後の圧延加工によって機械的性質はほとんど変わらず、これ以上の焼鈍温度で焼鈍した材料は焼鈍後の加工により硬化を示す。

Fig. 4 に予備加熱を行なわない純度 99.2% Al の加工軟化と焼鈍温度の関係について示したが、ほとんど加工軟化

Fig. 6 Annealing curve of 99.99% Al.

の傾向は認められず、いずれも加工硬化を示している。

Fig. 5 は予備加熱を行なつた純度 99.2% Al の加工軟化

におよぼす中間焼鈍の影響を示した。これによると、中間焼鈍の有無にかかわらず、240°C 前後の温度で焼鈍後加工

に取りあげた加工軟化現象は、Al 中の不純物と考えられる鉄およびケイ素の存在、ならびに Al 中におけるそれら

Fig. 7 Effect of the light rolling on the mechanical properties of 99.99% Al sheet annealed at various temperature.

することにより同程度の加工軟化が認められる。

Fig. 6 は純度 99.99% Al の焼鈍曲線である。この焼鈍曲線をもとにして各温度で焼鈍した後の加工による軟化現象の有無を検討したが、Fig. 7 に示したごとく純度 99.99% Al には加工軟化は認められない。

上述の加工軟化現象と板の方向性の関係を調べるために Fig. 8 に純度 99.8% の Al のタテ板 (冷間圧延方向に平行) およびヨコ板 (冷間圧延方向に直角) の焼鈍曲線を示し、Fig. 9 に焼鈍温度と加工軟化の関係を示した。これによるとタテ板、ヨコ板共に 240°C 前後の温度で焼鈍後 1~3% の圧延加工を加えた材料には著しい加工軟化が認められており、板の圧延方向と加工軟化の程度については若干ヨコ板の方が加工軟化の程度が大きいようである。

IV. 結果 に対する 考察

以上得られた結果について、Al の純度と加工軟化現象の関係をみると、純度 99.99% の Al にはこの現象は現われず、純度 99.8% および 99.2% の Al には現われている。さらに純度 99.2% の Al においても、鋳塊の際に十分予備加熱を行なったもののみ現われ、予備加熱をしない試料には現われていない。以上の諸点によつて、本論文

Fig. 8 Annealing curve of 99.8% Al, preheated at 500°C x 24 hrs.

Fig. 9 "Work softening" of 99.8% Al which was preheated at 500°C x 24 hrs.

の挙動が問題となろう。Photo. 1 に示した純度 99.2% Al 鋳塊の顕微鏡組織によると、予備加熱によつて結晶粒内に微細な第 2 相の析出が認められている。勿論予備加熱をしていない鋳塊のそれにはこのような微細な第 2 相の析出が認められていないことから、加工軟化現象の起因の一つは、これら微細な第 2 相の析出が関係していると考えられよう。

またこの加工軟化現象は、冷間加工後特定の温度範囲で

焼鈍した試料をさらに冷間加工した場合に認められる現象で、Photo.2 および Photo.3 に、上述の予備加熱を行

V. 結 言

Not preheated

Preheated at 500°C × 24 hrs

Photo. 1 Microstructure of 99.2% aluminium ingot. ($\times 400$)

As-rolled

Annealed at 240°C

Annealed at 340°C

Photo. 2 Microstructure of 99.2% aluminium sheet. ($\times 100$)

As-rolled

Annealed at 240°C

Annealed at 340°C

Photo. 3 X-ray diffraction pattern of 99.2% aluminium sheet.

なった 99.2% Al 試料の圧延のまま、加工軟化の顕著に認められた 240°C および認められない 340°C で焼鈍した場合の組織および X 線回折像を示したが、これらの写真からも明らかな如く、圧延のままおよび再結晶をほぼ完了したと考えられる 340°C で焼鈍した材料には加工軟化は認められず、240°C で焼鈍して再結晶組織は認められないが、再結晶寸前と思われる材料を加工した場合に認められることがわかる。従って本現象の起因の他の一つは加工組織から再結晶組織に移行する場合で、再結晶が開始する寸前の状態にある材料を加工した場合に認められる現象と考えられる。

なお Fig.9 では、タテ板よりもヨコ板に若干程度の大きな加工軟化が認められたが、特に板の方向性が加工軟化現象に影響を有するものとは考えられない。

著者らは冷間加工を行なった Al およびその合金を適当な温度で焼鈍した後、弱加工を加えることにより強度の低下、伸びの増加する現象を見出し、この加工による軟化現象について、Al の純度、鋳塊の予備加熱および板の方向性等の影響を調査した。その結果

- (1) 純度 99.99% Al には加工軟化現象は認められない。
- (2) 純度 99.2% および 99.8% Al は、鋳塊を予備加熱した場合にのみ加工軟化現象が認められる。
- (3) 鋳塊を予備加熱した場合、中間焼鈍の有無は加工軟化現象に影響しない。
- (4) 加工軟化現象は板の方向性には殆んど関係しない。
- (5) 以上の点より、本現象には Al 中の不純物、主として鉄およびケイ素の存在およびその挙動がもつとも影響あるものと考えられる。