論 文

熱間加工の基礎的研究* (第3報)

作井 誠太** 佐藤 公子** 佐々木悦男**

S. Sakui, K. Sato and E. Sasaki: Fundamental Study on Hot Working of Metals (3rd Report).

Specimens of α brass wires were elongated at various temperatures of the rate of working of 1200%/sec. With the apparatus illustrated in our first report, each specimen was quenched in a very short time of 0.01~0.04 seconds after working. The microscopic structures of the specimens thus obtained were studied with special reference to recrystallization and grain growth. The microstructure of hot-worked specimens differed from that of cold-worked ones in several points. At the working temperatures below 820°, recrystallization occurred partially and mixed with the cold-worked matrix, thus showing the nonexistence of hot-working in the real sense of the term. The rate of recrystallization during hot-working seemed to be maximum at the intermediate temperatures of hot-working. The rate of grain growth during hot-working is higher than that during simple heating at the same temperature without working.

(Received June 17, 1955)

I. 緒 言

第2報において α 真鍮およびアルミニウムの高温加工では、加工温度が高くなると加工後に加工硬化が残留しないことを述べた。その加工温度が眞の熱間加工温度であるかどうかは、試料の組織変化を調べた後でなければ断定できない。本報では顕微鏡により α 真鍮についてこの調査を行った結果を述べる。

高温加工の際の變形機構を調べるには、試料の研磨した表面での送り線、cellなどの發生状況を観察すべきであるがこれは目下實驗中である。本報では試料の針金の中心における顕微鏡組織の變化を報告する。表面観察にくらべて結晶粒の形状および寸法の變化、再結晶の有無を知るに便利である。用いた試料は第1報、第2報の試料と同一の直徑0.6mmの α 真鍮の針金である。

II. 顕微鏡組織の變化

1. 加工温度と顕微鏡組織の變化

Fig. 1 a は試料の組織で70%の線引加工後、450°で20 min 間塩浴槽で加熱したものである。

(a) (235°, 20%, 0.027 sec)⁽¹⁾

Photo. 1 b, c は加工後に水冷および空冷した場合の組織を示す。再結晶のしるしはなく冷間加工組織と同様に見える。

(b) (375°, 20%, 0.018 sec)

Photo. 1 d, e は加工後水冷および空冷した場合である。いずれも再結晶していない。(d)の各所に彎曲した送り線に似た組織を見る(矢印)。高温加工の特長の一つといわれる wavy wide slip band であろう。結晶粒境界がなめ

らかさを失つて凹凸を帯びている。双晶境界も少しく彎曲している。空冷試料では粒界がふたたびなめらかになっている。空冷中に粒界移動が行われて粒界エネルギーを少くしたのであろう。

(c) (430°, 20%, 0.014 sec)

Photo. 1 f, g は水冷および空冷した場合である。粒界双晶境界の凹凸がさらに顯著だが再結晶の傾向はない。

(d) (430°, 30%, 0.018 sec)

寫眞は省くが(c)と同様の特長がある。また水冷では再結晶していないが、空冷では所々に小さな再結晶粒が見られる。水冷の場合は粒界が凹凸を生ずるほかに、粗雑になり荒れて来たように見える。

(e) (560°, 30%, 0.017 sec)

Photo. 1 h, i は水冷および空冷した場合である。水冷の場合は第1報では再結晶していないとした。この寫眞には見られないが、各所に wavy wide slip band が見られて、この温度においても送り變形が行われていることを示している。粒界の凹凸はこの邊りの温度で最も著しいようである。注意して見ると粒界には再結晶の核の如き微細な結晶が多数見られる。たゞしX線廻折線には再結晶のしるしがあらわれないし、第1報の如き冷間加工材の再結晶からの推論では再結晶しない温度なので第1報では再結晶してないことにした。1725倍という大きな倍率では顕微鏡の方がX線よりも再結晶に敏感と考えられるし、またモネル・メタルのクリープ破壊試験では同一の加工度の場合、冷間加工材をクリープ温度で加熱した場合よりも低い温度で再結晶することも知られているので⁽²⁾ここでは再結晶してい

** 東京工業大學

* 1955年4月本會東京大會に發表

(1) 温度は加工温度、% は伸び、時間は加工後に水冷開始までに経過した時間を示す、以下同様。

(2) N. J. Grant, A. G. Bucklin, Trans. ASM, 45 (1953), 151.

ることにしよう。

(d)における粒界の粗雑化も或いは再結晶の初期を意味

するのかも知れない。空冷試料では相當に再結晶が進んで細かい結晶粒が見られる。

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

(j)

(k)

(l)

(m)

(a) annealed sample	(h) 560° 30%	(w)
(b) 235° 20% (w)	(i) 560° 30%	(a)
(c) 235° 20% (a)	(j) 680° 30%	(w)
(d) 375° 20% (w)	(k) 680° 30%	(a)
(e) 375° 20% (a)	(l) 730° 30%	(w)
(f) 430° 20% (w)	(m) 730° 30%	(a)
(g) 430° 20% (a)		

Photo. 1 Microstructure of α -brass wire elongated at various temperatures. (elongation 20 or 30%) (w).....water cooled (a)air cooled

(f) (680°, 30%, 0.01 sec)

Photo. 1j, k は各々水冷および空冷の試料の組織であるが水冷でも相當に再結晶が進み、第1報の定義によれば熱間冷間加工温度範囲にあることを示している。空冷試料は殆んど再結晶を終了している。この試料を見る時は試料はあたかも純粋な熱間加工を受けたように感じることであろう。

(g) (730°, 30%, 0.034 sec)

Photo. 1l, m の意味は前と同様である。水冷の場合も結晶粒が成長していることについては後述する。この温度になると水冷試料でも再結晶が相當進んでおり、再結晶粒も大きい。ただ實驗の失敗で水冷までの時間が長くかゝり 0.034 sec も要しているので、粒界の平滑化が進行している。それでも X 線的には加工組織が残存していて、熱間冷間加工の領域にある。空冷の場合は顯微鏡でも X 線でも完全に再結晶していて、あたかも熱間加工を受けたように見える。

(h) (820°, 30%, 0.035 sec)

この場合の寫眞は後にかかげるが 820° の加工でも水冷の場合やはり熱間冷間加工と判断しなければならない。空冷では完全に再結晶している。

考 察

以上の顯微鏡寫眞の特長をあげると、

(i) 高温では粒界の凹凸がはげしく殊に中間の温度で最も甚しい。(ii) じり線も双晶も波状にまがっている。(iii) 高温では加工中に再結晶が一部分進行している。これは加工終了前に試料を水冷して確認することができる。(iv) 560° 水冷または 430° 空冷の試料では、第1報の冷間加工材の再結晶速度からの推察では到底再結晶が見られないはずであるが、実際には再結晶が進んでいる。すなわちこの附近の温度では高温加工の場合は、その加工温度で冷間加工材を焼鈍するときよりも再結晶速度が大きいことがうかがわれる。(v) 680°, 730° では30%の加工で加工中に相當に再結晶が進むに拘わらずさらに高温の 820° では 30% の加工では殆んど進行していない。

(i) については多くの人の觀察してい

るところで⁽³⁾、その原因は高温で結晶粒が cell に分割されるのが主であるとしている。cell の発生はクリープの變形機構としてよく知られているが、變形速度の大きい場合も加工温度が高いときはこの機構が働くとされている。cell の位置が變形の際に相対的に移動することおよび高温加工中に cell の成長が活潑に行われ、かつ cell ごとに著しく成長速度を異にするためのためもとの結晶粒境界は凹凸を生ずる。cell と周囲の結晶粒の間の方位の差が cell ごとに異なるため、cell の成長速度も異なるとされている。また高温では加工硬化の小さなことが、結晶粒周囲における變形の均一なる分布を妨げること、粒界における quasi-viscous flow (殊に固溶体合金では著しい) による粒界の攪亂もまたこの凹凸をたすける。比較的低温では cell への分割が起り難く、加工硬化も著しいので粒界は平滑を保ち易く又比較的高温では cell の大きさが結晶粒の大きさに近づくこと、また粒界の局部的移動による平滑化が大きな速度で進み得ることにより凹凸は観察し難くなり、結局中間の温度で著しいことになる。

(ii) は加工硬化の少ないことが結晶粒内の歪の不均一分布を起し易いこと、粒界または cell の境界の quasi-viscous flow による變形が結晶粒内部にも不均一な歪を波及せしめ、既存の双晶や入り線を波状に曲げることが考えられる。

(iii) 加工中に再結晶が起るが、再結晶粒は直ちに加工されるので、加工後の水冷中に再結晶の生じない限り再結晶粒はそれぞれ多少の歪を持っていて、焼鈍状態の試料とは異なる。その再結晶も加工中に部分的にしか進行しなかつた。

(iv) については上記の Grant らのクリープ破壊試験の實驗から見て、我々の實驗結果もあり得ることと思える。また Wood⁽⁴⁾ も普通の再結晶と stress-recrystallization は別の法則に従うと述べている。有効加工度の考え方からすれば高温加工の場合に同一の温度では冷間加工材より再結晶速度が大きいことはあり得ないが、顯微鏡的な原因たとえば粒界への變形の集中などの原因により、再結晶速度が大になることは考えられる。

(v) 本實驗のわずかな測定値よりの推測は危険であるが一應次の如く考える。同一の加工度で加工しても、加工温度の高い時は加工中の自己焼鈍が甚しく⁽⁵⁾、有効なる加工度は減少しそれに伴って再結晶速度は小になる。他方では有効加工度が等しい時は高温ほど再結晶速度は大きくなる。このように高温加工における再結晶速度に対する温度の影響には相反する二つの因子があり、そのために中間の

また比較的高温で再結晶速度が極大を示すことがあり得る。820° 附近の加工で再結晶速度の小さいのはそのためであろう。極大の値がどの邊の温度であるかは觀察が少くて明らかでないが、700° 前後と推定される。

2. 高温加工と顯微鏡組織の變化

(820°, 10, 30, 50%; 0.005, 0.01, 0.01 sec)

Fig. 2 Microstructure of α -brass wire elongated at 820° with various elongation and water cooled after elongation.

820° で加工度を 10, 30, 50% に變化せしめた水冷試料の顯微鏡組織は Photo. 2 a, b, c に示す如くである。a では結晶粒は原形をとどめているが、b では結晶粒は分割され粒界の凹凸がはげしく、所々に微細な再結晶粒が見られる。加工度が大きく 50% にあると多数の再結晶粒が見られるが加工組織も残っている。加工度が進むと急に再結晶が活潑になるのは有効加工度が大になるためであろう。このように 820° の如き高温でも加工の進行につれて顯微鏡組織の變化が見られ、後報の如く、X 線により調べると加工歪が増大して行く。それに伴って加工硬化も見られるのは當然で、結局我々の實驗では 820° 以下の温度では純粋な熱間加工を経験せず、熱間冷間加工か冷間加工のみであった。

3. 高温加工と粒度の變化

高温加工した試料を加工後も加工温度に保持した場合の再結晶と結晶粒の成長とは、大型材の熱間加工では大切な問題であるが、その豫備實驗として本實驗における結晶粒の大きさの變化を調べて見た。

試料は 450° に 20 min 間焼鈍して比較的細かい結晶粒のものであるが、これを本實驗の方法で急熱および冷却するのみで全然加工を加えない時も、高温では Fig. 1 の曲線 (1) (2) に示す如く結晶粒は成長する。曲線 (1) (2) はそれぞれ加熱後に空冷および水冷したものである。650° 以後は成長は急速になり、空冷中にも結晶は相當に成長する。

次に加熱および冷却の條件は上と同じで、ただ加熱と水冷の間に加工をはさむと結晶粒は曲線 (3) の如く大になる。680° 以上の温度で急に曲線が下降しているのは再結晶のために小粒を混えるに到つたからである。ここで成長といつても普通に觀察した顯微鏡組織についてであつて、

(3) D. Mc Lean, J. Inst. Metals, **80** (1951-52), 507;

J. A. Ramsey, J. Inst. Metals, **80** (1951-52), 167.

(4) W. A. Wood, J. W. Suiter, J. Inst. Metals, **80** (1951-52), 501.

(5) A. F. Brown, J. Inst. Metals, **80** (1951-52), 115.

各結晶粒が cell または微結晶に分裂していることは第 4 報の X 線による調査から明らかである。曲線(4)は空冷の場

Fig. 1 Relation between working temperature and grain size. (1) Air cooled (2) Water cooled (3) Elongated 30%, water cooled (4) Elongated 30%, air cooled.

合で水冷の場合に比べて常に小さいのは再結晶のためで、720° 以上では水冷の場合より大きいのは成長のためである。曲線(3)が大きな結晶粒を示すのは Wood が cell について考察していると同様な stress recovery の現象が結晶粒の成長に見られるのであろう。高温加工による結晶粒の微細化と漫然といわれているが、再結晶を伴わない限り粒度が小になることは疑わしい。

Fig. 2 は 560°, 680°, 820° にて種々の程度の延伸を與

えて後に水冷したもので、加工温度が比較的低温、再結晶

Fig. 2 Relation between elongation of specimen and grain size. (1) α 真鍮を平均加工速度 1200% /sec で 30% 前後の高温延伸をする時は 820° 以下の温度では加工中に再結晶が終了することはない。820° 以下の温度では純粋な熱間加工は行われないことになる。

(2) 以上の条件で加工する時の再結晶速度は 700° 前後で最大で、それ以上の温度では却つて小になると推定される。

(3) 高温加工にて加工温度が比較的低い時の再結晶速度は、冷間加工材をその温度で焼鈍する時の再結晶速度より大きい。

(4) 高温加工では再結晶が伴わない限り、結晶粒は加工中に成長し、その速度は加工を伴わない単純な加熱の場合よりも大きい。

を伴わない時は加工度が高いほど結晶粒は大きくなっているが、比較的溫度が高くて再結晶を伴う時は、加工度の増大と共に粒度は減少している。

III. 要約