アルミニウムの押出し

岡庭 茂*

Extrusion of aluminum alloys

Shigeru OKANIWA*

1. はじめに

イギリスの John Bramah が1795年に水圧プレスを発明、2年後に「あらゆるディメンジョンで、接合面のない、必要に応じた長さの鉛あるいは軟質金属のパイプをつくるためのプレス」として特許を取得した。その後、鉛および銅のパイプ押出しを中心に押出機の改良が進み、19世紀終わりに Alexander Dick は、今日の押出プロセスの基となる方法で、ロンドン、バーミンガムそしてデュッセルドルフにおいて黄銅と他の銅合金の押出工業を確立した。Dick の方法は、水平プレスを用いて、熱間加工に適した温度に加熱したビレットをコンテナに入れて押出しするものであり、このプロセスがアルミニウムの押出しに応用された¹⁾。1930～40年にヨーロッパで航空機用アルミニウム合金の製造が大型プレスの開発とともに可能となり、また押出用合金のビレット鑄造技術も発達し、量産化、品質向上へと向かっていく。

日本においても、1938年頃1500～4000トン級の押出プレスで航空機用構造材を大量に生産したが、終戦後10年間は押出技術は空白の時代となる。その後、住宅サッシ用の Al-Mg-Si 合金 (6063) の生産ブームに伴い、圧延とならびアルミニウム産業の中核となるのは1970年以降である。

表1にアルミニウムの押出技術に関係した重要な開発項目を整理した。プラーの実用化以降画期的な開発は少なく、現在は生産設備、管理、設計等へのコンピュータの利用に重点がおかれている。

2. 押出加工の原理

押出加工においては、一段の変形で複雑な断面形状の製品が得られる。ビレット (被加工材) はコンテナ (円筒状容器) 内でラム (押し棒) により圧縮され、ダイス孔から押出されて製品となる。ビレットには高い静水圧が作用し、延伸が進み、同時に内部の組織が押出方向に

延ばされる。その変形・流動によって押出されてくる製品の力学的および金属学的特性が異なる。このような特性は多くの因子に影響されるが、押出方法もその一つである。

図1から図4に現在おもに利用されている押出方法の原理と概略を示す²⁾。製品の形状と材質 (合金) に適した方法が選択されるが、アルミニウムの押出しには、直接法、間接法がほとんどであり、静水圧押出法は一部で利用されている。また、コンフォーム押出法が連続押出しの一つとして実用化されている。

(1) 直接押出法 (図1²⁾)

合金に適した温度に加熱したビレットをコンテナに装入し、ラムでダイス方向に圧縮してダイス孔を通して押出していく。静水圧に加えて、コンテナとビレット間に摩擦が生じる。このため、押出しに要する力は、摩擦力が押出開始から終了まで減少するとともに図1(b)のように変化する。そして、(c)のようなビレット内に不均一な変形 (メタルフロー) を生じさせる。

(2) 間接押出法 (図2²⁾)

この方法は図2(a)のように、ホースステムの先端に取付けられたダイスの方向にコンテナとビレットが一体となって移動するため、コンテナ内壁とビレットとの間には摩擦がなく、ダイス近傍の材料のみがダイス出口に向かって連続的に流動し、残りの部分は非変形状態のままである。このため、メタルフローは(c)のように均一であり、押出荷重も一定である。

(3) 静水圧押出法 (図3²⁾)

この方法は、ビレットと押出工具との間に高圧の圧力媒体を介して変形を生じさせるため、摩擦を除去し、潤滑性のよい押出しが可能である。静水圧による加工材の延性増大を利用して Mg, Zn, Mo 等の脆性材料を比較的容易に押出すこともできる。

(4) コンフォーム押出法 (図4)

回転ホイールと固定シューで構成された装置を用い

* 日本軽金属㈱ (東京都)。Nippon Light Metal Company, Ltd. (Minato-ku, Tokyo)。

受理日: 平成7年3月9日

表1 アルミニウム押出技術の歴史

1797	パラマ	プレス特許	鉛（溶融）
1820	パー	水圧押出機 マンドレル法	鉛管（溶融）
1863	ショー	中空ビレット（固体）	
1870	ヘインズ	間接押出法（堅型プレス）	溶融鉛
1883	アレクサンダーディック	熱間押出加工方法 （大型プレスの開発） （実用的押出方法の開発）	黄銅ビレット
1897		継目無管押出方法の特許，ブリッジダイスの設計	
1888	ホール	アルミニウム電解方法：生産 1895年生産量 250トン/年	
1907		アルミニウム押出し（溶融—凝固—押出）	
1918		アルミニウム横型押出法，ビレット使用	
1920～1930		押出機の大型化，作業能率・生産性の向上	
1939～		6063，6061開発 DC 鋳造法の特許	
1950～		独立押出メーカ，大型プレス計画（米国）	
1960～		需要拡大（ヨーロッパ，日本） プレス製作技術進歩，水圧駆動方式⇒油圧方式 静水圧押出法工業化（日本）	
1970～		コンフォーム押出法開発 間接押出機の普及 プラーの開発，ストレッチャの改良 自動化（PLC の利用）	
1989～		120万トン以上の押出材生産（日本）

図1 直接押出法の原理とメタルフロー²⁾ 図2 間接押出法の原理とメタルフロー²⁾

図3 静水圧押出法の原理とメタルフロー²⁾

図4 コンフォーム押出法

て、小物の形材、管、棒を連続的に押出しする方法である。溝付きの回転ホイールとシュールとの間に設置したダイスの前に供給素材を置き、ホイールを回転させることにより、ホイール溝と素材の摩擦力で素材はダイス方向に押出される。この装置に連続な素材を供給すれば、連続押出しが行われる。現在は、装置の改良、新しい材料の押出しなどの開発が進められており、巻込み欠陥を生じやすい、工具寿命が短い等の欠点を解決できれば、工業的製造技術として広く利用されるものと考えられる。

表2に各種押出方法の特徴と長所、欠点等を比較して示す。

3. 押出しの基礎と理論

押出加工の理論展開は、押出材の加工特性を知ることおよび押出技術の体系化を目標としているが、塑性変形の理論、摩擦現象の解明、熱的現象の解明そして金属組織の変化等について相対的に体系化して現象を推測することは困難である。しかし、形材の形状・寸法を精度よく得るために、また、押出しの生産性を高めるために、メタルフローの解析、ダイスおよびプロセスの熱的、力学的研究が最近のコンピュータ解析技術を用いて行われ

る等、異なる押出対象に対する実験的解析によるデータの蓄積とともに基礎的研究が行われている。

3.1 メタルフローの特性

押出加工で生じる塑性流動（メタルフロー）は、前章で比較したように押出方法で異なるが、基本的にはアルミニウムとの摩擦面積、すなわち摩擦仕事量を変化させるダイス開口形状とダイス構造因子（ベアリング、ホローダイスでの各部形状、寸法）によって生じる。実際のメタルフローは、ダイスのほかに合金種、ビレット組織などの冶金因子やビレット温度、圧力負荷状態等によって変化する。

(1) メタルフローの調査方法（図5）

- ① ビレットにビレット成分と異なるピンをセットする方法
- ② グリッド法（格子線法）
- ③ クラッド・ビレット法（ディスク法）
- ④ 放射性同位元素法（同位元素をビレット端面、外周面もしくはグリッドに塗布）

以上の手法には各々長所、欠点を有しているので、目的に応じて選択する必要がある。

(2) 合金種によるメタルフロー

図6に6063（軟質）と5056（硬質）合金のメタルフローの差を示す。軟質合金は中央部と外周部における変形の不均一性が硬質合金に比較して大きい。すなわち、押出中の変形速度差の大きいことを示している（上記③の方法による）。

(3) ダイス面角度によるメタルフロー

図7にダイス面角度のフローへの影響を示す。Snによる格子線法での調査結果である。コニカルな角度が大きくなるほど、デッドゾーン形成が少なくなり、ダイス出口付近まで均一変形となっている。

(4) 押出条件によるメタルフロー

図8に押出温度の影響を示す。押出温度が高いほど、フローの不均一性は大きくなり、デッドゾーンの形成量（形状）が変化する。

14

表2 各種押出法の特徴と欠点およびその対策

押出方法	中空部形成方式	特徴と欠点	欠点に対する対策
直接押出法	ホローダイ	①熱間圧着部が存在する →圧着部は健全であれば母材強度と同等 →圧着部の組織が非圧着部と異なりアルマイト後にむら等発生する場合がある 高力合金管の製造はできない ②マンドレル法に比し、小径管の製造が可能 ③マンドレル管は1穴押出しであるが、多穴押出しが可能	適正押出比の選定 温度管理 特にダイス温度管理は重要 潤滑油・離型材の巻込みの防止 ダイス形状の適正化
	マンドレル	①熱間圧着部がない ②管精度（特に偏肉精度）はホローダイに比し悪い ③高力合金管の製造が可能（Al-Cu系、Al-Zn-Mg-Cu系等）	押出機の芯管理 工具（マンドレル・ダイス）の管理 冷間加工を施すことによる改善
間接押出法	ホローダイ	上記①～③に同じ	ビレット外皮の除去 ビレット製法の改善
	マンドレル	上記①～③に同じ。更に ④メタルフローが均一なこと、温度変化が少ないことから均一な組織の製品が得られる ⑤直接押出法に比し、押出管精度が高い ⑥直接押出法に比し、押出力は小さい →高力合金管の製造に有利 ⑦ビレット表層の製品への巻込みが発生する場合がある	
連続押出法 （コンフォーム法）	ホローダイ	①長尺管の製造が可能 ②製品中への酸化物巻込み・ブリスターが発生しやすい ③小径管の製造に適している	素線表面の改善 ホイール溝内かすのクリーニングの安定化

図5 メタルフローの解析手法

(5) ビレット表層部のメタルフロー

6063ビレット外周に等間隔で溝を切り、トレーサーとして放射性同位元素 ^{59}Fe 液を塗布し、押出し後、ディスクカード断面において、ビレット表層部を想定したトレーサーからそのフローを推定した。結果を図9に示す。

ビレット表層部はディスクカード内に集積され、後端はダミー面を滑るようにダイス孔へと流出していく。ビレット先端付近の表皮は移動距離が短い。ディスクカードが

薄いほど、表皮部は形材へ流出していくことが予想される。

このように、メタルフローの実験的解析は押出欠陥の発生原因の調査およびメタルの位置による変形の差、組織等を直接知るうえで簡便であり、有効である³⁾。

3.2 押出加工の基本パラメータ

(1) 押出加工の圧力解析

押出圧力を算定する理論式および実験式が数多く提案されている。表3に理論式についてまとめて示す⁴⁾。

最も簡便に精度よく求める式として次式がある⁵⁾。

$$P = Y \log A/A_0 + \pi \cdot D \cdot L \mu \cdot Y$$

P : 押出圧力, Y : 耐力, A : ビレット断面積,

A_0 : 形材断面積, A/A_0 : 押出比,

L : ビレット長さ, D : ビレット直径, μ : 摩擦係数

右辺の第1項はビレットの変形に要する圧力であり、第2項はビレットとコンテナとの摩擦による圧力である。

図6 合金種によるメタルフロー³⁾ 図7 ダイス面角度とメタルフロー¹⁾

また、K. Ashcrofらは、 P （最高圧力）について実験的解析から、

$$P = a \ln A_0/A + b \quad a, b: \text{実験的定数}$$

そして押出温度に関係して、

図8 押出温度とメタルフロー³⁾（6063合金，押出速度：10 m/min，a：360°C，b：520°C） 図9 押出法によるメタルフロー³⁾

$$P = \alpha - cT$$

T ：押出温度， α, c ：実験的定数

を提案している⁶⁾。

(2) 押出加工の熱的解析

押出中の温度は、最も重要な押出しのパラメータの一つであり、押出変形抵抗はもちろん、表面欠陥そして材の内部組織にも影響を与える。しかしながら、予熱されたビレットがコンテナに入り押出しが始まると同時に複雑な熱的变化が生じる。

主要な熱的变化は以下のプロセスで生じる。

- ① ビレットのダイス面近くでの変形による熱発生
- ② ビレットとコンテナ間の摩擦熱とデッドゾーンでの剪断による熱発生
- ③ ビレットのコンテナ中での移動に伴う熱移動

表3 押出圧力算出の理論式⁴⁾

	理 論 式 名	押 出 圧 力 の 理 論 式
平面ひずみ	上界法	$\frac{p}{2k} = (\sin \alpha)^{-1} \left\{ (1 - \cos \alpha) + \ln \left(\frac{h_b}{h_a} \right) \int_{\alpha}^0 \left(1 - \frac{3}{4} \sin^2 \theta \right)^{1/2} d\theta \right\}$
	初等解析法	$\frac{p}{2k} = \frac{1 + \mu \cot \alpha}{\mu \cot \alpha} \left\{ 1 - \left(\frac{h_b}{h_a} \right)^{\mu \cot \alpha} \right\}$
軸	すべり線場解析法	$\frac{p}{2k} = 1.2 \left(\frac{\alpha}{90} \right) + \left\{ 0.74 + 0.22 \left(\frac{\alpha}{90} \right) \ln R \right\}$
	初等解析法	$\frac{p}{\bar{\sigma}_y} = \left\{ \frac{1 + \mu \cot \alpha}{\mu \cot \alpha} (R^{\mu \cot \alpha} - 1) + 1 \right\} \exp \left(\frac{2\mu L}{r_0} \right) - 1$
	Pugh の式	$\frac{p}{\bar{\sigma}_y} = 0.924 \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \ln R + \frac{\mu R (\ln R)^2}{(R-1) \sin \alpha}$
	Sachs の式	$\frac{p}{k} = \left\{ \frac{1 + \mu \cot \alpha}{\mu \cot \alpha} (R^{\mu \cot \alpha} - 1) + 1 \right\} \exp \left(\frac{2\mu L}{r_0} \right) - 1$
	Avitzur の式	$\frac{p}{\bar{\sigma}_y} = f(\alpha) \ln R + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cos \alpha \right) + m \cos \alpha \ln R$
対称	n 乗硬化材の式	$p = \frac{\sigma_0}{n+1} \bar{\epsilon}^{n+1} + \frac{\mu \sigma_0}{\sin \alpha} \left(\frac{\bar{\epsilon}^{n+1}}{n+1} + \frac{\bar{\epsilon}^{n+1}}{n+2} \right) + \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} (\epsilon_0^n + \bar{\epsilon}^n) \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right)$
	コンテナ面摩擦を考慮した場合の式	$p' = p_0 \left(1 + \frac{2\mu L}{r_0} \right)$

p : 押出圧力, p' : コンテナ面摩擦を考慮した押出圧力, p_0 : ダイスイ入口の押出圧力 (各式の p に相当), k : セン断変形抵抗, $\bar{\sigma}_y$: 平均変形抵抗, μ : ダイスイ面の摩擦係数, μ' : コンテナ面の摩擦係数, m : 摩擦せん断係数, α : ダイスイ半角, h_b : 素材板厚, h_a : 押出材板厚, R : 押出比, r_0 : 素材半径, r_f : 押出材半径, L : ビレット長さ, L_b : ダイスイベアリング長さ, σ_0, n : $\sigma = \sigma_0 \epsilon^n$ の σ_0 および n , $\bar{\epsilon}$: ($= \ln R$)

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \{ 1 - \cos \alpha \sqrt{1 - (11/12) \sin^2 \alpha} \} + \frac{1}{\sqrt{11/12}} \ln \frac{1 + \sqrt{11/12}}{\sqrt{11/12} \cos \alpha + \sqrt{1 - (11/12) \sin^2 \alpha}}$$

④ 工具系 (コンテナ, ラム, ダイ等) への熱伝導

⑤ ビレットへの熱伝導

⑥ 押出材への熱伝導

⑦ ダイスイを通過する際の摩擦熱の発生

押出しによる熱的解析は多数報告されており, 近年は数値シミュレーションによる様々な研究結果とその応用が進められている。

図10に材形出口温度の実測とシミュレーションとの比較結果を示す⁷⁾。コンテナとビレット温度の関係によって計算値と実測値が大きく異なっているが, 近年のシミュレーションではかなりの改良が行われ, 温度に関しても精度の向上が著しい。

(3) 押出加工の速度

押出速度 (ラム速度) は, 他の二つのパラメータである圧力と温度によって規定されるが, 合金の熔融温度, 材形形状・寸法で最高速度が限定される。図11に計算で

求めた圧力負荷と最高速度との関係を示す⁸⁾。Al-Mg-Si 合金での結果であり, プレス能力を少し上げることにより最高速度を著しく増大できることを示している。たとえば, 10%の圧力増大で40%の最高速度の増大が可能となる。

4. 押出固有技術

アルミニウム合金の押出しは, 要求される形状・寸法, 表面状態を有する中実材および中空材を1回の熱間工程で得られることを最大の特長としている。これは, 押出しに関連する技術の中で, ビレット製造, ダイスイ設計・製作, 押出プロセス, 後工程 (矯正, 熱処理等), そして, 押出設備の各々の技術が組合わされて達成されている。

図12に押出工場内での工程を, 図13には熱履歴, 加工歴から見たフローを示す。

図10 形材温度の実測と計算値⁷⁾

(a) コンテナ温度>ビレット温度

(b) コンテナ温度<ビレット温度

図11 最高押出速度のプレス能力への依存性⁸⁾
(Al-Mg-Si, 算出図)D: コンテナ直径 (mm), K_f : 変形抵抗

アルミニウム押出工業がアルミニウム加工の主要な部門となっているのは、その生産性をあらゆる面から追求し、高生産性（高速）押出し、精密（小物）押出し、大型押出しを可能とし、多様なニーズに対応した結果である。そして、アルミニウム押出量の80～90%を占める6000系合金を直接押出しによって、建築用材料（住宅、ビル、内装材）と車両構造材等の大量の需要分野に供給しているからである。

一般に押出生産性は以下のように定義されており、生産性は、材料の歩留まりの増大と押出時間および機械的停止時間、むだな時間の短縮を、技術的にあるいは他の改善手法で追求する必要がある。

$$\text{押出生産性} = \frac{\text{使用ビレット重量} - (\text{ディスカード} * 1 \text{ 重さ} + \text{押出材屑量})}{\text{実押出時間} + \text{機械アイドル時間}} \times \text{稼働率}$$

(kg/h)

押出生産性向上に最も重要な方法は押出速度の向上であり、要求される形状・寸法の製品に対し、押出欠陥を生じることなく、押出材性質を損なうことなく、可能なかぎり高速で押出しできるか否かで、押出性のよしあしを表現する。押出性に影響する要因を図14に示す。これらの各固有技術に關係した因子は、作業時には単独で作用することではなく、相互に作用しながら押出材を形成していく。

押出性の評価は表4に示す押出材の欠陥の中で、ピックアップ、ダイスマーク等の表面品質で行う場合が多く、また、押出しのしにくさに対しては、押出圧力（初圧）、速度の立上がり性、すなわち設定温度までの所要時間の長短で判断する。さらに、押出材の強度的特性まで、広い範囲で評価することもある。

4.1 押出用合金

押出製品に用いられるアルミニウム合金は、国内ではJIS規格によって、合金成分、成分範囲、機械的性質が規定されている。表5に標準的な押出形材、管および棒のアルミニウム合金種を示す。Al-Mg-Si系の6063、6061、6N01等は全押出製品の90%を占めており、耐食性、表面処理性、加工性など総合的な性能で他合金系よりも用途拡大が進んでいる。表6に各合金系の用途例と材料特性を示す。

4000系合金は、鍛造用合金として自動車部品への応用が、1000、3000、5000系合金の非熱処理合金系は熱交換装置および電子光学関連への用途が拡大している。管および棒の押出材は直接押出し、間接押出しで生産されており、引抜き、鍛造加工を経て多様な製品に使用されている。

合金種による押出性を評価すると、表7^{(10),(11)}に示すよ

*1 ディスカードは1本のビレットの押出後に残すビレットであり、押し残しと呼ぶ。

図12 押出工場の生産工程概略図

図13 押出工程、熱処理工程の熱履歴

図14 押出性に影響する因子

うに、数値的には、その合金の持つ変形抵抗値の大小で比較できる。各合金の温度に対する変形抵抗値の変化は異なるが、通常、選択される押出温度での相対的な比較として利用できる。Mg, Cu, Znを多く含有する合金は押出圧力の点から押出性が低いといえる。一方、押出変形抵抗の大きい合金は含有元素が多く、熔融温度（固相線温度）が低い傾向となり、押出中の変形による熱発生で局部熔融を生じやすい。このため、定性的には図15に示す押出限界線図での押出適正範囲が狭くなり、押出しにくいことになる。

表8には、代表的押出用合金の熔融温度範囲の目安を示している。数値、特に下限値（熔融開始温度）は合金の成分値はもちろん、ビレット内の成分元素の均一性にも依存するので、各合金で求める必要がある。たとえば、6063の固相線温度は595°C前後であり、三元共晶点は555°C付近にあるため、均質化処理が不十分の場合は、共晶成分の残留のため局部熔融によるティアリング（割れ）が発生しやすく、押出限界速度は低くなる。

4.2 押出用ビレット

押出用ビレットの生産は半連続鑄造法であるDC法（Direct Chill Process）によっている。鑄造技術は、技術的要求および新規用途、たとえば複写機関連材、高靱性材に要求される品質レベルへの対応を、溶湯処理法の導入、ホットトップ法の改良等で行っている。

押出工場からのビレット品質への要求は、

- ① 組成の狭い範囲での管理
- ② 不純物元素、介在物、ガス量等の低減
- ③ ビレット径、曲がりの狭い範囲での管理
- ④ ビレット外観、表面の清浄化、平滑さ
- ⑤ 均質化組織の改良
- ⑥ 鑄造組織の改良（逆偏析層の低減、セル組織の微細化、均一化）
- ⑦ 割れ防止

などがあげられる。これらの要求仕様を製造工程別に整理し、技術的対策とともにまとめて表9に示す。

ビレットに求められる品質は、外観状態、寸法・形状そして内部組織に関するものである。ビレット外観、特にビレット鑄肌の滑らかさは逆偏析層の厚さの均一性に

表4 押出材の欠陥とその主な対策⁹⁾

欠陥名称	欠陥の状態および定義	対 策
ピックアップ	押出方向に伸びた表面むしれ状欠陥	<ul style="list-style-type: none"> ベアリングコーティングの不安定 ベアリング逃げ面への酸化物付着 ⇒ベアリング形状の適正化酸化防止 ビレット内部組織の改善
ダイスマークおよび筋	押出方向に密に並んで発生する表面の筋状欠陥	<ul style="list-style-type: none"> ベアリングコーティングの不安定 ベアリング面状態の劣化 ⇒ベアリング面の均一な仕上げ
外傷		<ul style="list-style-type: none"> 設備によるもの 製品同士の共ずれ ⇒設備メンテナンス、改善 共ずれ発生防止の施策
巻込み (piping) (permeation)	ビレット表皮層、コンテナ内付着物、潤滑剤などが押出材内部表面部に現れたもの	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ディスクード量の増大 適度な潤滑の防止 コンテナとビレットの温度差を大きくとる
圧着不良	肉眼では見えない ホローダイスを用いたときにダイス内で押出方向に分流した金属流れの合流部が筋状、線状に現れたもの	<ul style="list-style-type: none"> ⇒マンドレル押出し化 ⇒押出温度と速度のバランス ダイス温度の低下防止 適度の潤滑防止 ⇒ビレット端部の清浄 押出残り材の除去
ブローホール	押出方向に線状に連なった気泡欠陥	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ビレット外表面の良好化 アップセットスピード 押出速度の適正化
グレーングロス	押出断面で粗大成長した結晶粒	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ビレットの組成変更 ⇒均質化処理条件の適正化 ⇒押出温度、押出速度の適正化
偏肉	断面肉厚の不均一	<ul style="list-style-type: none"> ⇒押出工具の適正化 ⇒押出機芯管理

表5 押出用アルミニウム合金の化学組成

合金名	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	その他不純物		Al
									各々	計	
EC ⁽²⁾	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.45
1060 ⁽¹⁰⁾	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03	—	0.05	0.03	0.03 ⁽⁴⁾	0.03	99.60
1150 ⁽¹⁰⁾	0.45 Si+Fe		0.20	—	—	—	—	—	0.05	—	99.50
1100	1.0 Si+Fe		0.20	0.05	—	—	0.10	—	0.05 ⁽⁴⁾	0.15	99.00
2011	0.40	0.7	5.0~6.0	—	—	—	0.30	—	0.05 ⁽³⁾	0.15	残
2014	0.50~1.2	1.0	3.9~5.0	0.40~1.2	0.20~0.8	0.10	0.25	0.15	0.05 ⁽⁴⁾	0.15	残
2024	0.50	0.50	3.8~4.9	0.30~0.9	1.2~1.8	0.10	0.25	—	0.05	0.15	残
3003	0.6	0.7	0.20	1.0~1.5	—	—	0.10	—	0.05 ⁽⁴⁾	0.15	残
4543	5.0~7.0	0.50	0.10	0.05	0.10~0.40	0.05	0.10	0.10	0.05	0.15	残
5050 ⁽¹⁰⁾	0.40	0.7	0.20	0.10	1.0~1.8	0.10	0.25	—	0.05	0.15	残
5052	0.45 Si+Fe		0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	—	0.05 ⁽⁴⁾	0.15	残
5083	0.40	0.40	0.10	0.30~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	0.25	0.15	0.05	0.15	残
5086	0.40	0.50	0.10	0.20~0.7	3.5~4.5	0.05~0.25	0.25	0.15	0.05	0.15	残
5154	0.45 Si+Fe		0.10	0.10	3.1~3.9	0.15~0.35	0.20	0.20	0.05 ⁽⁴⁾	0.15	残
5357 ⁽¹⁰⁾	0.12	0.17	0.20	0.15~0.45	0.8~1.2	—	—	—	0.05	0.15	残
5454	0.40 Si+Fe		0.10	0.50~1.0	2.4~3.0	0.05~0.20	0.25	0.25	0.05	0.15	残
5456	0.40 Si+Fe		0.10	0.50~1.0	4.7~5.5	0.05~0.20	0.25	0.20	0.05	0.15	残
5652 ⁽¹⁰⁾	0.40 Si+Fe		0.04	0.01	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	—	0.05 ⁽⁴⁾	0.15	残
6061	0.40~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.15~0.35	0.25	0.15	0.10	0.15	残
6063	0.20~0.6	0.35	0.10	0.10	0.45~0.9	0.10	0.10	0.10	0.05	0.15	残
6066	0.9~1.8	0.50	0.7~1.2	0.6~1.1	0.8~1.4	0.40	0.25	0.20	0.05	0.15	残
6101 ⁽⁵⁾	0.30~0.7	0.50	0.10	0.03	0.35~0.8	0.03	0.10	—	0.03 ⁽⁶⁾	0.10	残
6151 ⁽¹⁰⁾	0.6~1.2	1.0	0.35	0.20	0.45~0.8	0.15~0.35	0.25	0.15	0.06	0.15	残
6201 ⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾	0.50~0.9	0.50	0.10	0.03	0.6~0.9	0.03	0.10	—	0.03 ⁽⁶⁾	0.10	残
6253 ⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾	⁽⁹⁾	0.50	0.10	—	1.0~1.5	0.15~0.35	1.6~2.4	—	0.05	0.15	残
6351 ⁽¹⁰⁾	0.7~1.3	0.50	0.10	0.40~0.8	0.40~0.8	—	—	0.20	0.05	0.15	残
6463	0.20~0.6	0.15	0.20	0.05	0.45~0.9	—	—	—	0.05	0.15	残
7001	0.35	0.40	1.6~2.6	0.20	2.6~3.4	0.18~0.40	6.8~8.0	0.20	0.05	0.15	残
7075	0.50	0.7	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.40	5.1~6.1	0.20	0.05	0.15	残
7079	0.30	0.40	0.40~0.8	0.10~0.30	2.9~3.7	0.10~0.25	3.8~4.8	0.10	0.05	0.15	残
7178	0.50	0.7	1.6~2.4	0.30	2.4~3.1	0.18~0.40	6.3~7.3	0.20	0.05	0.15	残

注 (1) 組成が範囲で示されていない場合は、最大値を示す (AA 規格より)

(2) Electrical conductor 電気伝導体

(3) Pb, Bi は各々 0.20~0.6%

(4) 溶接芯線, 電極線用には Be は 0.0008 以下とする

(5) ブスパー用合金

(6) B は 0.06% 以下とする

(7) 電気伝導体用合金

(8) アルクラッド 5056 の合せ板用合金

(9) Si は Mg の 45~65% 添加

(10) 特殊押出用アルミニウム合金

表 6 アルミニウム製品の材質別材料特性と主要用途

合金分類	代表合金	製品形状別分類			材 料 特 性	主 要 用 途
		棒・線	管	形		
1000系	1050	○	○		高純アルミニウム。電導性，熱伝導性，耐食性，光輝性などに優れる	導電材料，熱交換装置，化学工業装置配管，装飾材など
	1070	○	○			
	1100	○	○	○	一般用純アルミニウム。耐食性，加工性などに優れる	熱交換装置，化学工業装置，厨房器具，建材など
	1200	○	○	○		
2000系	2011	○			切削性に優れる。高強度だが耐食性に劣る	切削材：部品類，ねじ類など
	2014	○	○	○	ジュラルミンの総称で高強度合金。熱間加工性が良好なため鍛造用素材にも適する。耐食性は劣る	一般構造材，航空機材，鍛造用素材，自動車の油圧部品，オートバイや自転車の部品，スポーツ用品（2024）など
	2017	○	○	○		
	2117	○				
	2024	○	○	○		
3000系	3003	○	○	○	純アルミニウムに比し耐熱性が良好。強度もやや高く，かつ耐食性も良好	化学装置配管，熱交換装置，複写機用感光ドラム，建材用など
	3203		○	○		
4000系	(4032)	(○)			耐熱性，耐摩耗性が良好	鍛造用素材：VTR ヘッド，ピストン部材など
	(4043)			(○)	硫酸陽極酸化処理でグレイ色を呈する	建材用
5000系	5052	○	○	○	中強度合金。耐食性，溶接性良好	化学工業装置配管，機械部品，カメラ鏡筒，複写機ヒートロールなど
	5N52	○				
	5154		○		5052よりやや高い中強度合金。耐食性，溶接性，加工性が良好	5052と同様。ホイール（5454）など
	5454		○			
	5056	○	○		耐食性，切削性，表面処理性が良好。強度は5083に次ぐ	カメラ鏡筒，機械部品など
6000系	5083	○	○	○	非熱処理型の5000系合金では最高強度を持つ。耐食性，溶接性に良好。加工性は難	溶接構造材：化学工業装置，鉄道車両，船舶など
	6061	○	○	○	耐食性の優れた中強度構造用合金。溶接も可。6061は加工性も良好	陸運車両，船舶・海上輸送機材，道路用資材，建材，スポーツ用品など
	6N01	○		○		
	6063	○	○	○	耐食性，表面処理性が良好な上に，押出性が優れているため押出材の大半を占める	建材，建設材，装飾品材，家電製品材などその他一般汎用品
	6101	(○)	(○)		6063と同等の強度を持つ導電用材	導電用継手部材
7000系	(6262)	(○)	(○)		耐食性のある切削用材。表面処理性も良好	カメラ鏡筒，部品類など
	7003	○	○	○	中強度溶接構造用合金。特に溶接部は自然時効により母材程度に強度回復。7003は強度は7N01よりやや低い薄肉厚に適する	車両，自動車・オートバイ部品，その他陸上構造材など
	7N01	○	○	○		
	7075	○	○	○	超々ジュラルミンの名称で最高強度合金。耐食性，溶接性は劣る	高強度用材：航空機など，機械部品類，スポーツ用品など

注 (1) 4032および4043は，押出し関係JIS規格での規定はない（ただし，4032はJIS H 4140鍛造品に，4043はJIS Z 3232溶接棒および電極ワイヤに規定がある）

(2) 6101は，JIS H 4180板および管導体に規定がある

(3) 6262は，JIS での規定はない。AA（米国アルミニウム協会）規格に規定がある

表7 合金種による相対的押出性比較¹⁰⁾と変形抵抗値¹¹⁾

区分	合金名	押出性指数	変形抵抗値 (N/cm ²)
軟質	1050	150	2400 (at 400°C)
	1100	150	2400 (")
	3003	100	2842 (430)
	6063	100	2744 (")
中硬質	2011	30	3920 (420)
	5052	60	4410 (470)
	6061	70	3626 (510)
	7003	70	4116 (500)
	7N01	60	4312 (500)
硬質	2014	20	5684 (430)
	2024	15	7448 (430)
	5083	25	5488 (460)
	7075	10	8036 (400)

図15 押出限界線図モデル

影響することなどにより重要な品質項目となっており、ホットトップ鑄造方式が良好な鑄肌表面を得る鑄造法として普及している。電磁鑄造法も開発、実用化されているが、ビレットの多本数注ぎ鑄造には適さないとされている。

内部組織として、鑄塊組織の微細化（セルの微細化）、均一化および逆偏析層の厚さの減少が、鑄型の改良、鑄造法の開発等で可能となり、現在はホットトップ鑄造法の効果が認められている。

一方、鑄塊（ビレット）の均質化処理は、ビレット内の元素の偏析をなくすとともに、晶出物の微細化、析出物の分布状態を調整する重要な工程であり、最も盛んに研究がなされている。6063合金に関する均質化処理はほぼ確立され、540～590°Cで1～6 h保持し、200～500°C/hの冷却速度で200°C以下にすることが一般的な処理条件となっている。

図16に、デンドライトセルサイズと押出性との古典的

表8 代表的押出用合金の溶融温度範囲

合金	溶融温度範囲 (°C)
1050	650～660
3003	640～655
6063	600～650
2014	510～640
2024	500～640
5083	570～640
7075	475～640

図16 デンドライトセルサイズと限界押出速度の関係¹²⁾ (570°Cで12 h、均質化処理したもの、限界速度はテリング発生速度) 図17 6063合金の均質化処理後の冷却速度と押出速度および時効処理 (160°C-16 h) 後の強度の関係¹³⁾

結果を示す¹²⁾。セルサイズを40 μm以下にすると著しく押出速度の増大が得られており、均質化処理効果が十分達成されたためと考えられる。

図17には、6063合金の均質化処理後の冷却速度と押出性との関係の一例を示す¹³⁾。この結果は、冷却速度が遅いほど、押出速度は増加できることを示すが、強度(T5)は炉内冷却では小さくなっている。

しかし、均質化温度からの冷却速度が20°C/hと遅い場合は、押出圧力（初圧）は低く、押出ししやすいが、

表9 ビレット製造工程と関連品質¹⁰⁾

	工 程	品質との関係因子	技 術 対 応
溶 解	成分配合 攪 拌 除 滓 酸化防止	成分濃度のばらつき 温度、成分の均一性 巻込み 巻込み	電磁攪拌方式
溶 湯 処 理	微 細 化 脱 ガ ス 鎮 静 ろ 過	フェザー組織、粗粒組織 気泡、色調 介在物、酸化物による色抜け	TiB ₂ の種類、量、形状 脱ガス法（炉内、インライン） フィルタリング方法 フィルタの種類 { ポーラスチューブフィルタ セラミックフォームフィルタ
鋳 造	Direct Chill 法 (DC 法) 方法 { フロート法 ホットトップ法 電磁鋳造法 条件 { 鋳造速度 鋳造温度 冷却 溶湯の流れ	ビレット表面の平滑性 シェルゾーンの厚さ 逆偏析層の厚さ 結晶粒の大きさ、均一性 セルサイズの大きさ、均一性 割れ 巻込み、酸化 ポロシティ	ショートモールド ホットトップモールド 気体加圧ホットトップ 潤滑方法 冷却技術 モールド材質 レベル鋳造 保持炉の方式
均 質 化 処 理	昇温速度 保持温度・時間 冷却速度	パーニング、遷移元素の存在状態 化合物、成分の均一化	昇温速度の規制 保持温度・時間と金属組織のコントロール 冷却条件と金属組織のコントロール

押出速度を速くする、たとえば、50～80 m/min にすると、形材表面に肌あれないしは微小クラックを生じるようになる。このため現在では、均質化温度から200～500°C/h 程度の速度で冷却し、6063ビレットの Mg₂Si の析出状態を制御し、押出性を向上させている。6063ビレットの押出性を評価する基準として、均質化処理による Al-Fe-Si 晶出物の形態変化も Mg₂Si 化合物の析出状態同様に考慮される。

Fe を不純物として含む6063は、鋳造時に板状でもろい β -Al・Fe・Si 化合物を晶出する。この化合物は押出時に形材表面に生じるピックアップと呼ばれる微小むしれの原因の一つと考えられている。均質化処理は β -Al・Fe・Si 晶出物を微細にし、球状の形態に変化させ、 α -Al・Fe・Si 化合物にする。6063では β が α 化合物に変化するほど、形材表面の欠陥が少なくなり、押出性が向上する¹⁴⁾。

また、均質化処理による $\beta \rightarrow \alpha$ 化を促進する方法とし

て Mn の微量 (0.03～0.1%) 添加の効果が報告されており、図18¹⁴⁾に、均質化処理温度の $\beta \rightarrow \alpha$ 化率への影響とともに、0.05%Mn 添加の $\beta \rightarrow \alpha$ 化率への影響も示す。Mn 無添加の場合、580°Cでの $\beta \rightarrow \alpha$ 化率は60～70%であり、0.05%Mn 添加は α 化率を85～95%と著しく促進している。

4.3 押出ダイス

押出ダイスは押出製品形状を決めるものであり、形材表面品質をも左右し、押出生産性、押出性にとって最も重要な生産工具である。

ダイスはその支持工具系にセットされ、押出中に最も過酷な状況下で形材を形成する。このため、ダイスのみに設計等の注意および研究がなされてきたが、昨今のよう大型形材押出しの需要拡大とともに寸法精度の要求が厳しくなり、ダイス構造のみでなく、その支持工具系の構造設計にも多くの改良が行われつつある。

14

図18 6063ビレットの均質化処理温度の β -Al・Fe・Si $\rightarrow$ α 化率への影響¹³⁾

1Mn: ビレット径155 mm, 0.05%Mn 添加
 3Mn: ビレット径317 mm, 0.05%Mn 添加
 2h, 8h: 各々均質化処理時間を示す

4.3.1 ダイスおよび工具系

図19¹⁵⁾に押出工具系の例を示す。ダイスの支持工具はバックカー、ボルスター、サブボルスター、ダイリングであり、これをダイホルダーでまとめている。図20にダイスの種類を示す¹⁵⁾。

ダイスはホロー（中空）とソリッド（中実）の二つに分類される。ホローダイスは中空材を押出しするためにビレットを分割して流入させ、マンドレル部で中空部を形成し、ダイス孔で溶着（固相接合）させるチャンバ（室）を有している。このため、ホローダイスは金属流入口とマンドレル、ブリッジで構成される母体（コア、オス部）とダイス部分（キャップ、メス部）の二つの分割した部分でできている。ポートホールダイスが最も汎用的であり、他のブリッジダイス、スパイダーダイスは製作上、押出作業上およびアルミ金属の取扱い上に難点があり、特殊な用途に用いられている。ベアリング部はアルミニウム押出材の形状を形成するために、コンテナ内で不均一に変形しているアルミニウムを均一にダイス孔から流出させることが必要であり、多くはベアリング長さで調整する。

この経過を模式的に図21に示す。図22にダイス各部の名称とともに、金属フローを調整するためにベアリング部の金属の入口と出口に角度をつけるチョークとリリーフダイスを示す。

図19 押出工具系（ポートホールダイス）の例¹⁵⁾

4.3.2 ダイス設計

ダイスのよさは、ダイス製作技術だけでなく、ダイス設計が押出しに適しているかに左右される。押出材の形状・寸法、表面品質は、押出機、押出条件等で変動するため、ダイス修正という経験作業が入る。このため、押出部門とダイス設計、修正との情報交換によるダイス性能の向上が必要とされる。しかし近年、ダイス設計をより系統的に整理し、ルール化を進め、CAD化（コンピュータ支援設計）とCAM化（コンピュータ支援製作）が実現している。

ダイス設計は、

- ① 押出材形状・寸法の安定化
- ② 押出材表面品質
- ③ 押出し金属フローのコントロール

の三つの基本的特性を満足するように次の項目を検討する。

- ① ダイス孔の数、配置、ダイスタイプ、寸法
- ② 形材寸法に対する収縮量の算出
- ③ 寸法許容量の決定（ダイスの全体的および部分的変形）
- ④ 金属フロー、表面品質を考えたベアリング長さの決定
- ⑤ ダイス支持工具の検討

さらにホローダイスの場合は、

- ⑥ ポート面積、形状、深さ、配置の設定
- ⑦ マンドレル部、ブリッジ部の形状・寸法の設定

などの設計工程を経ている。

図23にダイス設計の工程を整理して示す。各ステップで入力する情報によってダイス性能が左右されるため、CADの活用、特に情報管理システムが重要である。押出性に対する研究では、ベアリング形状と寸法の影響が報告されており、図24に、ベアリング長さの形材表面粗さへの影響を、図25にはベアリング角度（チョーク、リリーフ角度）の押出性への影響を示す¹⁶⁾。

図20 押出ダイスの種類¹⁵⁾

図21 不均一メタルフローのベアリングによる均一化の模式図

ベアリング長さが2 mm 程度で形材表面が最も平滑となり、1 mm 以下および4 mm 以上で表面は粗くなる。ベアリング面積の増大はアルミニウムとの摩擦を増大させ、1 mm 以下ではベアリング面へのメタル付着を不安定にし、表面を悪化させる。

また、ベアリング角度がチョークタイプ(プラス表示)

図22 ダイス各部の名称¹⁰⁾

左：メタルフローを遅くするチョークダイス
右：メタルフローを早くするリリースダイス

では、リリースタイプに比較して相対速度が0.4に、圧力は1.2、摩擦力は0から1.0となっている。したがっ

14

図23 ダイス設計工程

図24 押出材表面粗さに及ぼすベアリング長さの影響¹⁶⁾ 図25 押出速度, 圧力, 摩擦応力へのベアリング角度の影響¹⁶⁾

て, 平行ベアリング (直角ベアリング) を境に, 著しく摩擦応力が変化しており, ベアリング設計および加工精度の重要性を示している。

一方, ベアリング長さによるメタルフローの変動を少なくするため, ダイス面上にフローガイド (フィーダープレート) をセットし, その形状・寸法でコントロールする方法が採用されている。また, ダイス孔の周囲に段

フローガイド形状 (高さ: 8 mm)

図26 押出材の先端形状に及ぼすフローガイド形状の影響¹⁷⁾ (t : 材厚)

差をつける方法等もメタルフローの調整のために開発されている。

詳細な実験がフローガイドについて行われており, 図26にフローガイドの形状と押出結果を示す¹⁷⁾。フローガイドなし (BF₀) に比較して, BF₂ のガイドによって板材先端の凹凸はゼロとなり, メタルフローはフローガイドの形状設計によって均一化できることを示している。

ホローダイスの設計はソリッドダイスに比較して明らかに複雑であり, マンドレルの支持, ポート位置, 大きさ, 溶着部の構造等を, ダイスの強度, 押出圧力 (低面圧化), 溶着線を考慮して設計しなければならない。

さらに, ポートホールダイス等のホローダイスによる押出性 (押出速度) およびダイスの寿命をフラットダイス並にすることも重要課題となっている。この目標のためには, プリッジ部を小さく単純化する設計すなわちマンドレル支持を工夫することから始める必要が提案され

図27 センターホール・ダイ¹⁸⁾
(マンドレルにポートホールが作られている)

図28 サーキュラマンドレル・ダイ¹⁸⁾
(サーキュラ・リングは個々のマンドレルを支持している)

ている。代表的な例を図27および図28に示す¹⁸⁾。

センターホールダイスは金属の流れやすいピレット中央部をブリッジの下へ流込む設計であり、溶着性が良好である。

サーキュラマンドレルダイスは多孔押出用に開発されたもので、押出圧力の低下が得られる。

4.3.3 ダイス製作

ダイス材料としては、熱間工具鋼のSKD61 (5%Cr, 1.5%Mo, 1%V) が、高温強度、靱性等から主として用いられている。ソリッドダイスとホローダイスでは、後者のコア部(オス型)が圧倒的に加工工数がかかるが、機械加工技術の進歩、たとえばマシニングセンターの普及は、精度向上、短時間加工を可能とした。

図29 押出限界図 (7075合金)²¹⁾
直接、間接押出時の表面限界と再結晶粗大化限界および圧力線図

一般的に、近代化されたダイス製作工場では、次のようなステップでダイスを得ている。

- ① ユーザからの製品図入手
- ② 製品図からCADにてダイス設計図をかく
- ③ CADデータをCAMプログラムに変換する (NCデータとする)
- ④ ダイス材料の切断のための図面化
- ⑤ 旋盤
- ⑥ NC加工(数値制御加工) } マシニングセンター (穴あけ, 切断, 研削等)
- ⑦ 熱処理
- ⑧ ワイヤカット
- ⑨ 研磨
- ⑩ 表面処理
- ⑪ 検査

以上の工程は①～⑧までCAD/CAMシステムにより、図面描画から製作まで、図面を見ることなくダイスを手でできる¹⁹⁾。

ダイスの表面処理として最も利用されているのは窒化処理であり、ガス窒化、塩浴窒化が一般的である。イオン窒化をはじめセラミックスを被覆する処理はまだ実用的段階ではない。ダイス寿命を考慮すると、ダイス鋼の改良、熱処理の管理、表面処理の改良等製作時に十分な注意が必要となる。

図31 押出機メインフレームの押出中の変形

プレスフレームの設計は、上記すべてを考慮してなされなければならない。図31のように、使用中プレスフレームは変形を繰り返している。これによる疲労を少なくし、剛性を高めるために、図32のように、前もってストレスを負荷することが行われている。

プレス周辺設備へのPLCの応用が進み、自動化ラインとなりつつあり、また、プラーの導入は歩留まり向上とともに、自動化にとって大きな技術的役割を果たしている。

6. おわりに

アルミニウム材料の用途拡大が進み、新しい特性、新しい加工法を必要とするアルミニウム合金系の開発や加工法の改良が行われてきた。

押出技術の分野では設備、工具設計・製作技術のコンピュータを利用したシステム化が進展しており、それに伴い各種の管理など工場内での生産合理化による小ロット対応が行われている。

成熟した押出加工にあって、ダイス設計、表面欠陥、ダイス表面処理、ビレット加熱、形状・寸法の変動など固有技術に関連した分野は未解決な問題も多く、昨今のシミュレーション技術の応用と押出技術の全般的な取り組みを深める必要があると思われる。

参考文献

- 1) C. L. E. Pearson and R. N. Parkins: "The Extrusion of Metals", Chapman & Hall, (1960).
- 2) G. Lang, A. F. Castle et al.: "Extrusion", Scientific and Technical Development, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, (1982).
- 3) 小林啓行: 第36回塑性加工連合講演会「アルミニウムの押出し技術」, (1985).
- 4) 木内 学: 押出加工, 日本塑性加工学会編, コロ

図32 押出機フレームのプレストレスの方法

- ナ社, (1992), p. 28.
- 5) E. Siebel: "The Extrusion of Metals", Chapman & Hall, (1960), p. 201.
- 6) K. Ashcroft and G. S. Lawson: J. Inst. Metals, 89 (1960-61), 369.
- 7) R. Akert: J. Inst. Met., 95 (1967), 204.
- 8) H. Stenger: "Extrusion", American Society for Metals, (1976).
- 9) 田中 浩: 非鉄金属の塑性加工, 日刊工業新聞社, (1970), p. 22.
- 10) KAISER ALUMINUM: Al Extrusion Process, (1965), 53.
- 11) 川島正平: 最近のアルミニウム押出し技術と生産管理, 軽金属学会, (1987).
- 12) G. Scharf, E. Lossack: Proceedings of International Al Extrusion Tech. Seminar, vol. 2, (1977), p. 311.
- 13) W. Gruhl and G. Scharf: Z. Metallkunde, 57 (1966), 597.
- 14) S. Zajac and B. Hutchinson: Material Science Technology, April (1994), vol. 10, 323.
- 15) Proceeding 3rd Int. Al Extrusion Tech. Seminar, vol. 2, (1984), 付録, p. 129.
- 16) T. Sheppard et al.: Proc. 4th Int. Al Extrusion Tech. Seminar, vol. 2, (1988), 329.
- 17) 高辻, 時沢ほか: 塑性と加工, 25 (1984), 1000.
- 18) P. T. F. Machado: Proc. 5th Int. Al Ext. Tech. Seminar, vol. 1, (1992), 385.
- 19) J. Harbison: Proc. 4th Int. Al Ext. Tech. Seminar, vol. 2 (1988), 61.
- 20) T. Sheppard: J. Inst. Met., 73 (1973), 101.
- 21) T. Sheppard: "Extrusion", Scientific and Technical Development, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, (1982), p. 41.