UDC 669. 14. 018. 44: 621. 73. 01

論 説

21—4N 鋼 の 鍛 造 性

藤 田 護*

Forgeability of 21—4N Steel

Mamoru Fujita

Synopsis

Concerning manufacturing of exhaust valve for automobile by hot extrude forging method using hot rolled bar of 21—4N steel, the influence of the inclusions on the forgeability have been studied in this report.

The results are as follows:

1. Whether the forgeability is good or bad can be evaluated enough by forging quality rating (F.Q.R.) obtained by an hot upsetting test which has pretty good correlation with the defect rate so the defect rate of actually forged valves is unnecessary to be investigated.

2. After checking the relationship between the F.Q.R. used for evaluation of forgeability and non-metallic inclusions, it was recognized that there were no individual correlation among sulphide and oxides (alumina, silicate etc.), but there was pretty good correlation between the said F.Q.R. and multiple large and longer inclusions (stringer type inclusion or elongated clusters of inclusion) combined with these inclusions. If these should be existed just under sub surface in stringer state, the forgeability will extremely become worse.

3. Through analyzing the structure of multiple large and longer inclusions by E. P. M. A., it were confirmed that the main components were oxides of Mn, Al and Si and the existence of Cr oxides and the distribution S and Ti were also found.

4. In order to grasp the quality of non-metallic inclusions the combination of the measurement of clearness by ASTM-A method and machined hairline test are recommendable.

1. 結 言

21—4N鋼⁽¹⁾はCr—Mn—Ni—N 含有のオーステナイト系耐熱鋼で高温強度および酸化鉛耐食性が優れ、他のオーステナイト系耐熱鋼 (Silchrome 10, 21—

12N, SUH31)に比べコストが安く、熱間加工性が良好なこともあって近年内燃機関のエンジン用排気弁、特に自動車用排気弁（以下単にバルブという）として急速に需要が増大してきた。

21—4N鋼の代表的な化学成分を Table 1 に示す

Table 1. Typical chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.475~0.575	0.25max.	8.00~10.00	0.030max.	0.04~0.09	3.25~4.50	20.00~22.00	0.38~0.50

昭和46年3月10日受付

*大同製鋼(株)星崎工場

エンジン用吸・排気バルブは鑄造によってもつくられる場合もあるが、現在ではまだ例が少なく、殆んど熱間鍛造によってつくられている。

熱間鍛造による製造法として(1)みがき鋼材(研削または切削)を使用し通電加熱方式によりアブセット後、傘部の型打鍛造を行ないバルブを成形加工するアブセット鍛造法と²⁾、(2)わが国ではバルブメーカーのF社が採用し実用化している方法で、熱間圧延鋼材を使用し熱間押出鍛造によりバルブを成形加工する押出鍛造法²⁾、³⁾がある。

製造性の難易度からいうと押出鍛造法がむづかしい、すなわちアブセット鍛造法は通電加熱しながらアブセットを行ない、予備成形し、十分高温になった状態で型打鍛造するので、表面品質の良好なみがき鋼材を使用すれば鋼の熱間加工性はさほど問題とならない。しかし押出鍛造法は軸部を押出後、傘部を型打して成形するため相当の温度降下があり、鍛造割れが発生し易く、材料面および鍛造加工面の両方に問題が生じてくる。

本報告は21-4N鋼の熱間圧延鋼材を用いて押出鍛造法により自動車エンジン用バルブの製造に関して実際に製造したバルブで得られたデータを整理し、それに統計的な処理と若干の検討を加えてまとめたものである。

以下バルブの鍛造性の評価および鍛造性に及ぼす各種要因の影響について述べる。

2. 熱間押出鍛造によるバルブの製造法と問題点

2.1 製造法

鋼材から熱間切断した1個取りのスラグ(Slug)を高周波加熱し、押出ダイスに入れて軸部を押出(Extruding)する。次に押出のまま金型に移して傘部の型打(Coining)を行ないバルブの成形加工を完了する。

Fig. 1 は押出鍛造法の概略製造工程図を示す。

2.2 バルブ鍛造性に影響を及ぼす各種要因

(1) バルブ鍛造性²⁾、⁴⁾とは所定の形状の鍛造品(バルブ)が割れそのほかの使用上有害な欠陥がなく、かつ容易に得られるか否かということである。材料に関しての要因は鋼の塑性変形能(変形抵抗、変形能:加工割れに基づく変形限度を左右するところの材料の展

Fig. 1. Manufacturing process diagrams of hot extrude forging of 21-4N steel exhaust valve.

延性もしくは靱性)および外観品質、内部品質(以下それぞれ外質、内質という)の良否によって鍛造性の評価がきまるものと考ええる。

(2) 以上が材料面での要因であるが実際のバルブ鍛造性を評価するには鍛造加工面の要因も考えなければならぬ。

Fig. 2 はバルブ鍛造性に影響を及ぼす要因を列挙し特性要因図で示したものである。

Fig. 2. Characteristics variable diagrams of affect on the forgeability of 21-4N steel exhaust valve.

2. 3 押出鍛造による鍛造割れ欠陥

2. 3. 1 製造法と鍛造割れ欠陥

(1) 切 断 熱間切断でスラグ (Slug) にするのであるが、切断工程では加熱温度、パイプ形状、クリアランスを適当に選定しないとスラグの端面割れ、バリ、half moon が発生し、押出および型打鍛造工程での欠陥の原因となる。

(2) 押 出 押出時²⁾にスラグ (Slug) 内部の fiber flow の流動が激しいため潤滑剤、押出速度、加熱温度等の加工面に十分留意しないと、すべり剪断による軸のちぎれ、押出熱による軸中心部の溶解、その他の欠陥が発生しやすい。したがって押出工程では材料面より加工面での注意が必要である。

(3) 型打鍛造 前述したように押出鍛造法はアプセット鍛造法のように十分温度が上昇した状態で型打するのとは異なり、型打鍛造時には相当の温度降下があり、低温 (1000~1050°C 推定) で加工するため潤滑方法、加熱温度、鍛造形状、金型形状等の加工面および熱間加工性、外質、内質等の材料面の品質に関して十

Photo. 1. View of forging crack.

Fig. 3. Relation between torsion number and heating temperature.

分配慮しないと、鍛造割れ (バルブの傘外周割れ、傘表割れ) が発生しやすい。Photo. 1 は鍛造割れ (傘外周割れ) の一例である。

2. 3. 2 鋼材の品質評価

(1) 熱間加工性

熱間加工性の評価としてここでは、低温 (1000~1050°C) で塑性変形しやすいこと、すなわち変形能が大きく加工温度範囲の広いものを熱間加工性がよいという。熱間加工性の良否の具体的な評価方法として各種あるが、なかでも熱間振り試験は定量的に把握でき、精度がよいので今日多方面で行なわれている。そこで熱間加工性の評価は熱間振り試験で行なうことにした。

Fig. 3 は熱間振り試験の捻回値と温度の関係を示したものである。捻回値は温度に依存し、温度の上昇とともに増大し、最高値に達して粒界の溶解等によりぜい性が現われて低下する。熱間加工性のよいものは図中の曲線 A のように低温で捻回値が高く、最高値附近でも変化が少なく、広い温度範囲にわたって同程度の値を示す。これに反して曲線 B は最高値においては曲線 A と大差ないが低温で捻回値が低く、温度による変化が大きい。この曲線 B のような材料を熱間加工性が悪いと評価する。すなわち押出鍛造でバルブを作ると曲線 B のようなものは鍛造割れが多発するが曲線 A のものは鍛造割れはほとんど発生しない。

(2) 外質、内質

熱間加工性のほかに鋼材そのものの外質と内質があり、これも重要な品質である。外質 (表面キズ、形状等) については手直しが可能なのでここでは取りあげないことにする。内質には非金属介在物、顕微鏡組織等がある。そのなかでも手直しができる品質とできない品質があり、顕微鏡組織は前者になり、非金属介在物は後者に当る。そこで鋼材の品質としては非金属介在物に十分留意することが必要である。非金属介在物の評価法および鍛造性との関係については 5 項で述べることにする。

3. バルブ鍛造性の評価

鍛造性の良否の評価は実体のバルブに鍛造 (以下鍛造バルブという) して、その不良発生率で行なうのが最もよい方法である。しかしすべて鍛造 (以下不良率という) 性のよいものであればよいが、悪いものを使用した場合、バルブの不良が多発し、大きな損失となる。また前述した熱間振り試験による捻回値で求める方法もあるが、塑性変形の形態が異なるので微妙な差

異を求めるには最適とはいえない。そこで鍛造バルブをつくる前に鍛造性の良否を評価する方法として据込み鍛造による試験法を検討した。その試験法は鋼材から採取した試験片を鍛造バルブの製造に類似した条件（形状、温度、機械等）で据込み鍛造し、据込んだ部分（以下傘部という）の外周の割れ程度により鍛造品質指数（Forging Quality Rating：以下 F. Q. R という）を求めるもので、次にその試験方法⁵⁾について述べる。

3. 1 試験条件

試験片寸法：鋼材の直径(D)×長さ 57mm

試験数：32個/ロット（異なる鋼片より圧延した鋼材から採取）

機械：プレス

加熱温度：1050°C

据込み寸法：

3. 2 割れ程度の評価

据込み鍛造後黒皮状態で傘外周部の割れの有無および割れの深さにより5等級に分け、試験した32個を観察し、つぎのように表示する。Photo. 2 は割れ程度と等級の関係を示したものである。

等 級 割 れ 程 度

P (Perfect rating)：傘外周に割れなし

G (Good rating)：傘外周に小さい割れあり

F (Fair rating)：傘外周の割れ深さ 3.0mm 未満

Q (Questionable rating)：傘外周の割れ深さ 3.0 ~ 3.2mm

R (Reject rating)：傘外周の割れ深さ 3.2mmをこえるもの

3. 3 鍛造性の評価

割れ程度により評価した等級とそのものを鍛造バルブにした場合の不良率との関係から次式に示すように、等級に重みを加えて“鍛造品質指数 (F. Q. R)”として表示する。以下この F. Q. R でバルブ鍛造性の評価の可否を検討して行くことにする。

Photo. 2. Crack index.

$$F.Q.R(\%) = \frac{\left\{ R + \left(Q \times \frac{1}{10} \right) \right\}}{\text{試験数}} \times 100$$

4. F.Q.R とバルブ鍛造性（鍛造バルブ不良率）の関係

バルブ鍛造性は実体の鍛造バルブの不良率で評価するのが信頼性は高い。しかし前述した据込み鍛造試験で得られた F.Q.R で鍛造性の良否の推定ができないであろうかを検討した。Fig. 4 に F.Q.R と鍛造バルブの不良率の関係を示したが、F.Q.R と不良率とはよい相関性が認められる。すなわち F.Q.R と不良率は比例関係にあり、F.Q.R が 2% の場合、不良率は 1~2%、F.Q.R が 8% の場合、不良率は 6~10% にばらついている。

Fig. 4. Relation between F.Q.R and the rate of inferior quality on 21-4N steel forging valve.

F.Q.R から鍛造バルブの不良率がかなりよい精度で推定が可能なのでバルブ鍛造性の評価を鍛造バルブの不良率で行なうことにした場合、この不良率と相関関係にある F.Q.R で行なっても大きな差異は生じないものと考ええる。したがってバルブ鍛造性の評価は実体の鍛造バルブの不良率ではなく、代用特性として F.Q.R を用いることにした。この F.Q.R はかなり再現性がありバルブ鍛造性の目安をつけるには十分である。

5. バルブ鍛造性 (F.Q.R) と非金属介在物の関係

前述した F.Q.R を用いてバルブ鍛造性（実体の鍛造バルブの不良率）に及ぼす各種要因（熱間加工性、表面品質、非金属介在物 etc）について検討した。その結果、熱間加工性、表面品質、非金属介在物、顕微鏡組織等に有意差が認められた。つぎにその中でも一番大きく効いている非金属介在物についてバルブ鍛造性 (F.Q.R) との関係を述べる。

5.1 非金属介在物の検出法

非金属介在物の清浄度の測定は ASTM-A 法 (ASTM E45) を若干修正した方法（複合系介在物は形態により分類し C 系として測定）により試験を行ない最悪視野の平均値で表示した。このほかに長大非金属介在物の品質把握のため hairline 試験を併用した。この試験法は外表面直下のストリンガー状の長大介在物を検出するもので、径（直径）を 0.5mm、長さ 100mm に機械仕上し、JIS G0556 鋼の地キズの肉眼試験方法に準拠して行なった。品質の表示はストリンガー状のキズの総個数、総長さ、最大長さの組合せで 11 等級に分け、キズのないものを index=10、最悪のものを index=0 とし、試験した平均値を用いた。

5.2 F.Q.R に及ぼす非金属介在物の影響

塑性変形させた場合、鍛造割れに起因する非金属介在物として粘性変形しない B 系（アルミナ）、D 系（粒状酸化物）および複合系介在物を含む C 系が考えられる。これらの介在物と F.Q.R との関係を調べた。

その結果 B 系、D 系については顕著な相関は認められなかったが複合系介在物を含む C 系についてかなりよい相関性が認められた。Fig. 5 は F.Q.R と C 系介在物（含複合系長大介在物）との関係を示したもので若干のバラツキはあるが、介在物の等級が悪くなれば F.Q.R は高くなる傾向にある。C 系介在物のなかでも数種の介在物がコンパインドした複合系長大介在物（ストリンガー状または細長いクラスター状介在物）が悪影響を及ぼす。特にこれが外表面直下に存在する場合、型打鍛造時にこれを起点として割れ（傘外周割れ：Photo. 1 参照）を惹起するものと考えられる。この鍛造割れを起こすと考えられる複合系長大介在物の例を Photo. 3 に示す。

Fig. 5. Relation between F.Q.R and mean C type inclusion index.

清浄度の測定と併用して行なった hairline 試験結果と F.Q.R の関係について調べた。外表面直下に観

察されるストリンガー状のキズは Photo. 4 に示すように一般に地キズといわれているものである。

Photo. 3. Typical stringer type inclusion or elongated clusters of inclusion (x600).

Photo. 4. View of typical hairline stringers defect (x5).

Fig. 6. Relation between F.Q.R and mean hairline stringer index.

Fig. 6 からあきらかなように F.Q.R と地キズ等級との間にはかなりよい相関性が認められる。

以上述べたようにバルブ鍛造性を評価する代用特性の F.Q.R と非金属介在物との関係を調べた結果、鍛造性に影響を及ぼす介在物としては複合系長大介在物で、これが外表面直下に存在する場合その傾向は顕著である。複合系長大介在物は hairline 試験を行なうとストリンガー状のキズとなって現われるものである。

5. 3 複合系長大非金属介在物（ストリンガー状または細長いクラスター状の介在物）の組成

鍛造性に影響を及ぼす複合系長大介在物について E.P.M.A によりその組成を調査した。Photo. 5 は E.P.M.A による走査像を示したものである。介在物の組成は Mn, Al, Si の酸化物が主体で、そのほかに Cr 酸化物が Mn, Al, Si の酸化物とは異相になって存在している。同じような介在物について多数 E.P.M.A で分析したが、いずれも主成分は Mn, Al, Si の酸化物であった。

6. 結 言

21—4N 鋼の熱間圧延鋼材から熱間搾出鍛造法で自動車用エンジン排気バルブの製造に関し本報告では製造上の問題点、鍛造性の評価および鍛造性に及ぼす非金属介在物の影響について検討した。そのうち材料に関しての結果をまとめると次のように要約される。

1. 鍛造性の良否の評価は実体の鍛造バルブの不良率で行なわなくても、この不良率とかなりよい相関性がある据込み鍛造試験から得られる鍛造品質指数 (F.Q.R) で十分推定が可能である。

2. F.Q.R と非金属介在物の関係を調べると、硫化物系、アルミナ系けい酸塩系、酸化物系との間には単独に相関はないが、これらの介在物がコンパインドした複合系長大介在物（ストリンガー状または細長いクラスター状の介在物）とはかなりよい相関性が認められた。特にこれらが外表面直下にストリンガー状に存在する場合、その影響は顕著に現われ、著しく鍛造性を悪くする。

3. 複合系長大介在物の組成を E.P.M.A で分析した結果、介在物の主成分は Mn, Al, Si の酸化物でほかに Cr 酸化物, S, Ti の分布が認められた。

4. 非金属介在物の品質を把握するには ASTM—A 法による清浄度の測定と hairline 試験を併用して行なうとよい。

Photo. 5. Scanning image by E.P.M.A of typical stringer type inclusion or elongated clusters of inclusion (x600).

(文 献)

(1) 日本特許 277700 (特公昭 35—18552)	(3) AMS: Metals Handbook 1 (1961)627
D.L.Loveless: US Patent, 2,839,391(1958)	(4) 薄田, 作本, 佐納: 三菱重工技報 (1970)7
(2) 筒井: 金属材料 (1963) 10,85	(5) T.R.W Material specification VD-PS-2034