HAプロセスを利用した高強度・高靱性金型の開発

五十川幸宏*1，吉田広明*1，井尻裕之*2

Complex Shaping Die with High Hardness and Toughness by using HA-Process

Sachihiro Isogawa, Hiroaki Yoshida and Hiroyuki Ijiri

Synopsis

The applicability of hobbing die made by ausforming process was tested using 0.4C-1Mn-3Cr-2Mo-1V hot work tool steel which had excellent thermal shock and fatigue resistance. Basic experiments on ausforming showed the increase in hardness and toughness of this steel, which was derived from the refinement of microstructure. The hot work steel die for bevel gear was hobbled in this ausforming process (HA-Process) and the longer tool life than conventional electric-discharge-machined die was achieved in

【 1 . 緒 言 】

大量に使用する金型の製造コストを抑える手段として、工具類（ペンチ、スパナなど）、コイン、ナイフなどを鍛造する金型がホビング¹⁾にて作られている。ホビングとは、Fig.1に示すように製品の形状を転写したマスターパンチを焼なましされた工具鋼に押しつけることにより金型を作る方法である。一本のマスターパンチ（焼入焼戻し処理実施）にて数十個以上の金型を精密に製造することが可能で、切削および放電加工に比べ安価にかつ短時間に金型が製造できるだけでなく、鍛造によるメタルフローの連続化などにより、金型寿命の向上も図ることができる。

金型の寿命を高める手段の一つとして最適な合金設計により高強度・高靱性の工具鋼の開発が精力的に進められている。しかし、熱間工具鋼を例にとると、冷間鍛造

- a: pressure plate b: Master punch(die-hob)
- c: centering guide d: retaining ring
- e: female mould

1997年3月12日受付

* 1 大同特殊鋼（株）技術開発研究所(Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)，* 2 大同特殊鋼（株）星崎工場(Hoshizaki Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

用鋼と比較して高温において軟化抵抗や耐ヒートチェック性などの熱特性に優れているが、その特性上比較的硬さの低い状態で使用しており、それによって、型摩耗と変形を受けやすくなる²⁾。

一方、材料の靱性を低下させることなく強度を著しく高めることができる加工熱処理方法の一つとしてオースフォーミングが知られている。Fig.2にオースフォーミングプロセスの概略を示す。材料をいったんオーステナ

Fig. 2. Schematic illustration of ausforming.

イト化させた後降温させ、Ms点以上A3点以下の準安定オーステナイト中で塑性加工を行い、その後焼入れる方法で、いわば焼入れ途中に塑性加工を行うプロセスである。オースフォーミングの高強度化のメカニズムは、次のように説明できる。すなわち、加工中に導入されたセル状転位が無拡散変態であるマルテンサイト変態時にすべり面に対して整合性のあるものだけが主に引き継がれ、また均一に分布する。この時V、Moなどの強力な炭化物生成元素が含まれているものは、加工時に微細な加工誘起炭化物が析出し、転位密度がより一層高まる。また加工硬化組織からのマルテンサイト変態により、マルテンサイトラスは細かく分断される。しかし、準安定オーステナイト中の塑性加工は、拡散変態であるフェライト変態、パーライト変態を促進し、焼入性を阻害するとともに、オースフォーミング時の変形抵抗は、C含有量と未固溶炭化物量によって支配されるために焼なまし材を使った温間鍛造プロセスよりも変形抵抗が増加する^{3)~6)}。オースフォーミングの工具鋼への適用に関しては、大森ら^{7),8)}により古くから研究がなされている。

そこで、本研究ではホビングとオースフォーミングを熱間工具鋼の中でも、高温において熱疲労特性に優れた工具鋼として知られている3Cr-2Mo-1V系熱間工具鋼（大同鋼種名DH71）に適用し、強度と靱性を兼ね備えた

金型を塑性加工により製造するHAプロセス（Hobbing in Ausforming Process）を開発し、その基礎特性と実機に適用した結果を紹介する。

2. 加工性試験と機械的性質

2.1 供試材

供試材は3Cr-2Mo-1V系の熱間ダイス鋼で、その化学成分をTable 1に示す。本鋼は、熱間ダイス鋼の中で硬さ的には最大HRC53程度とやや低めであるが、軟化抵抗が最も高い鋼種の1つである。Ms点は310℃，Mf点はお

Table 1. Chemical composition of the test steel (mass %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
DH71	0.35	0.49	0.96	0.018	0.04	0.06	2.93	0.96

よそ100℃である。

試験片は直径26mmの素材を800℃×1hにて球状化焼なまし処理後、切削により仕上げた。その寸法は前方押し出し試験片の場合、直径を25mmとし長さを40mmとした。変形抵抗の測定には、日本塑性加工学会が推奨⁹⁾しているように高さを直径の1.5倍に選び15.0×22.5mmとした。素材の球状化焼なまし後の硬さはHV180~190であった。

2.2 実験方法

変形抵抗測定試験および前方押し出し試験はFig.3に示す加熱冷却条件に従った。一つはオースフォーミン

Fig. 3. Heat patterns for experiment.

グプロセスであり、もう一つは通常の温間加工である。加工温度はどちらも600℃を選定した。オースフォーミングプロセスの場合、試験片は1030℃のオーステナイト化温度に加熱保持された後、試験温度まで空冷され試験された。なお、試験直前の温度は放射温度計により管理した。有限要素法により計算した加工直前の中心と側面中央の温度差はわずかであり、およそ10℃であった。

変形抵抗の測定は、日本塑性加工学会推奨の同心円溝

付き圧板を用いた拘束圧縮試験⁹⁾により、試験温度に達した試験片に約70%まで加工を加えて行った。

前方押し試験片は黒鉛を塗布した後、高周波加熱により所定温度まで加熱された。押し金型の潤滑には黒鉛を噴霧して用いた。押し用金型のインサートは超硬で作られアプローチ角は120度とし減面率は30、45、60%と変化させて、絞り部の直径を20.9、18.5、15.8mmと変えることにより対応した。オースフォーミングにより押しされた試験片は、加工後直接ミスト冷却された。その後200～650 の温度範囲で1時間焼戻し処理を2回施した。そして、押しされた試験片から切り出された各種試験片（シャルピー衝撃試験片は幅10mm×高さ5mm×長さ55mm、深さ2mmで半径1mmのUノッチ。軟化抵抗測定試験片は直径10mmから16mmで長さ10mm。）を用いて、硬さ試験やシャルピー衝撃試験、そして焼戻し軟化抵抗の測定を行った。なお、比較用として通常の焼入れ（1030 にて30min加熱保持後油冷）- 焼戻し（200～650 にて1h保持後空冷を2回実施）を行った試験片も準備した。

2.3 実験結果

Fig.4に600 における変形抵抗を示す。オースフォー

Fig. 4. Stress-strain curve of test steel.

ミング時の変形抵抗は、通常の温間鍛造プロセスと比較して40%程高いものとなった。これは、一般に、オーステナイト時の変形抵抗は、未固溶析出物が多くない場合、炭素固溶量で決まり、オースフォーミングは炭素がすべて固溶した準安定オーステナイト状態での加工となるため、変形抵抗は上昇したものと考えられる。一方、通常の温間鍛造では、球状化焼なまし組織のような球状化炭化物と柔らかいフェライトの状態では加工されるため、変形抵抗は低くなる。ただし、圧延後の組織のようにマルテンサイトやベイナイトを多量に含むものを、通常の温

間鍛造した場合、変形抵抗は著しく上昇し、オースフォーミングよりも更に高くなる。

Fig.5に加工度を変化させてオースフォーミングを行ったものと通常の焼入れを施したものの焼戻し曲線を示

Fig. 5. Tempering curve of test steel.

す。オースフォーミングにより硬さは大幅に上昇している。これは、オースフォーミングされたものを焼戻した場合、2次析出炭化物の析出開始温度は低温側に移り、また析出炭化物のサイズは加工度に比例して微細化され硬さは増加¹⁰⁾することに起因する。また、焼戻し過程で2次析出が始まる直前の硬さの落ち込みが不明瞭になる傾向がみられる。この理由として、オースフォームを行った時すでに二次硬化原因となる Mo_2C や V_4C_3 の析出が起こり、焼入れ状態ですでに二次硬化を起こしたと同じ効果^{4), 11)}が生じていると言われている。Fig.6にオースフォーミング（HA-process材）されたものと、通常の

Fig. 6. Optical microstructures of test steel.

焼入れおよび焼戻しされた材料（QT-process材）の光学顕微鏡組織を示す。焼戻し後では不明瞭だが、焼入れ後の組織の違いよりオースフォーミングされたものは、マルテンサイト組織そのものが微細化されていることが推定できる。Fig.7に走査電子顕微鏡（SEM）により組織を観察した結果を示す。オースフォーミング材のラスが

Fig. 7. Microstructures of test steel observed by SEM.

分断，微細化されていることが確認される。

Fig.8に硬さとシャルピー衝撃値の関係を示す。一般に，オースフォーミングの最大の特徴は，強度が増加するにも関わらず，靱性が維持あるいは向上することであ

Fig. 8. Charpy impact value of test steel.

る。今回得られた実験結果も同様な傾向を示し，しかも高硬度側での靱性については通常の焼入れ - 焼戻し材対比約2倍以上の値となった。Fig.9に通常の焼入れ - 焼戻し材（QT-process材），およびオースフォーミング後焼戻しされた材料（HA-process材；オースフォーミング後2回焼戻し処理実施）のシャルピー衝撃試験後の破断面のSEM写真を示す。いずれも延性破面（ディンプル）と脆性破面の混在する形態であるが，QT材に比較してHA材は硬さがHRCで約4ポイント高いにもかかわらず延性破面の割合は増加し，脆性破面の単位も減少している。

Fig. 9. Fracture surfaces of Charpy impact test.

Fig.10には，550℃において長時間保持した時の軟化抵抗を示す。オースフォーミングの特徴の1つとして，軟化抵抗の向上¹⁰⁾が報告されているが，本鋼においても同様の結果が得られている。このような軟化抵抗の向上

Fig. 10. Heat resistance of test steel.

は，単に加工硬化によって高強度化されたためではなく，2次析出した炭化物の微細化がオースフォーミングの基本的なメカニズムであるためと考えられる。

【 3 . HAプロセスの適用例 】

3 . 1 熱間鍛造用ベベルギヤ用ダイスへの適用

塑性加工により金型を製造するホビング法とオースフォーミングを組み合わせたHA - プロセスを，熱間鍛造用ベベルギヤ用ダイス（モジュール4.375，歯数10枚）に適用した。ホビング用ピレットには球状化焼鈍しされたDH71の円柱片を用いた。ピレットは酸化防止のため

にArガス雰囲気中で1030 にオーステナイト化加熱され、衝風冷却によって600 に降温された後、鍛造加工され、その後水噴霧により冷却された。焼戻しは、575 で1時間加熱保持後空冷の処理を2回行った。また、金型の表面処理として550 ×15hの条件で塩浴室化を行

Fig. 11. Surface appearance of bevel gear.

った。Fig.11に完成したベベルギヤの外観を示す。

Fig. 12. Hardness distribution after tempering through HA

Fig.12にHA - プロセスによって製造された熱間鍛造用ベベルギヤダイスの硬さ分布を示す。歪みが十分に与えられる歯部は、HRC58を超える硬さが得られる。前述のようにHA - プロセスの場合、このように高硬度状態であっても靱性が十分に得られるため、ほぼ最高硬さが得られるような条件で使用できる。

3. 2 実機寿命試験評価

金型の寿命評価は、熱間横型多段成形機（ナショナル製3-4）を使いSCr420材を1200 に加熱し、生産速度100rpmの条件でデフ・ピンを鍛造することで評価した。

通常の焼入れ - 焼戻し処理によって製造された金型（HRC48-50）の寿命は10851ショットであるのに対し、HA - プロセスによって製造された金型は、17156ショットの寿命が得られた。寿命の主因は、どちらの金型も

Fig.13. Surface appearances of bevel gear after forging.

Fig. 14. Crack length distribution after forging.

Fig.13に示すようなヒートクラックである。Fig.14に鍛造後の両金型のヒートクラックの深さと、クラック発生数の分布を示す。通常の焼入れ - 焼戻し処理によって製造された金型は多くの大きなクラックが存在しており、ダメージの度合いが大きい。一方、HA - プロセスによって製造された金型はヒートクラックのサイズが小さ

Fig. 15. Hardness distribution of tooth after forging.

く、ダメージの度合いも小さい。Fig.15は、鍛造後の硬さ分布を歯の長さ方向の中央位置で歯先から歯元に向かって測定した結果である。表面層は窒化の影響をうけて高い硬さを保っているが、深くなるにつれて加工中の熱による焼戻しの影響をうけて硬さは大きく低下する。しかし、初期硬さの影響によりHA - プロセス材の方がQT - プロセス材に比して高い硬さを維持している。

このように、HA - プロセスによって製造された金型は、ほぼピーク硬さの状態で使用されているにも関わらず大きな割れは一切認められず、金型の高寿命化に対して非常に有効な手段であることが確認された。

4. 結 言

オースフォーミングとホッピングを組み合わせ高強度・高靱性の金型を塑性加工で製造するHA - プロセスを開発し、0.4C-1Mn-3Cr-2Mo-1V系熱間鍛造用材料（大同鋼種名DH71）に対して適用した。その結果、以下のことが明らかとなった。

（1）前方押出しによる基礎的な試験より、本鋼種にオースフォーミングを適用することにより靱性を約2倍に向上させるとともに、最大硬さが通常の焼入れ - 焼戻しで得られる硬さよりHRCで5ポイント高くなる事が分かった。

（2）強度と靱性が向上する理由として組織の微細化が考えられる。

（3）ホッピングとオースフォーミングを組み合わせることにより熱間鍛造用ベベルギヤ用金型を製作し、熱間横型高速多段成形機にて実機試験を行ったところ金型寿命は大幅に向上した。この理由として、オースフォーミングをホッピングに適用したHA - プロセスでは、靱性向上のため最高硬さ状態での使用が可能となり、耐摩耗、耐ヒートクラック性が向上したためと考えられる。

（文 献）

- 1) H. Hoischen: Ind. -Anz., 89(1967), 1255
- 2) E. Doege: 9. Umformtechnisches Kolloquium, (Hannover, 1978), 155
- 3) 田村今男: 鉄と鋼, 2(1966), 140
- 4) 佐藤昭治, 渡辺 敏: 法政大学工学部研究集報, 21(1985), 77
- 5) 牧 正志, 田村今男: 熱処理, 26(1986), 353
- 6) C. N. Elias: Material Science and Technology, 8(1992), 785
- 7) 大森宮次郎, 田中忠賢, 斉藤 勉, 田中大麗: 熱処理, 20(1992), 99
- 8) 大森宮次郎: 熱処理, 35(1995), 2579
- 9) 戸澤康壽: 塑性と加工, 30(1989), 1131
- 10) 田村今男: 鉄鋼材料強度学(1969), 195, [日刊工業新聞社]
- 11) 田村今男, 吉村, 茨木, 多賀谷: 日本金属学会誌, 23(1964), 433