UDC 669.14.018.258.8

新しい熱間ダイス鋼“MAX1”について

伊藤 一夫*, 磯部 晋**, 加藤 毅*

A new Hot-Work Die Steel “MAX1”

Kazuo Itô, Susumu Isobe and Tsuyoshi Katô

Synopsis

MAX 1 (0.3C, 4Cr, 0.6Mo, 1W, 0.4V, 2Co) is a new hot-work die steel alloy-designed to retain the least of undissolved carbides in quenched condition and to obtain secondary precipitations well enough.

This steel proves that it has excellent ductility together with high strength and that it satisfies various demands for heavy-duty hot-work dies as follows:

- easy austenitizing as conventional steels,
- negligible distortion induced by heat treatment,
- high fatigue-strength at elevated temperatures,
- skin-deep heat-checking cracks,
- good wear resistance,
- small corrosion loss in molten Al,
- adaptability to gas nitriding.

1. はじめに

熱間ダイスの使用条件は、設備の大型化および自動化が進むにつれてきびしくなっており、これらの要求に対処するため強靱なダイス鋼が数多く開発されてきた¹⁻³⁾。

これらの鋼は、一般に炭化物の析出硬化によって強度を上げており、炭化物形成元素の添加量が増加してきている。また、それにとまって焼入れ時に未固溶のまま残る炭化物量も増加してきている。

この未固溶炭化物は強化に寄与しないばかり

か、介在物と同様の切欠作用により鋼の靱性を損っている場合が多い。このような観点からマトリックス鋼として MAX 2 鋼が合金設計された。しかし、現用のダイス鋼より高い温度から焼入れているにもかかわらず、まだ未固溶炭化物の残留があった。

そこで MAX 2 における炭化物挙動の詳細な検討結果をもとに合金の再設計を行い、未固溶炭化物をさらに減少させた MAX 1 を開発した。この合金は高強度と高靱性を兼備した熱間ダイス鋼であることが確認されたので、以下にその諸特性を紹介する。

2. 供試材および実験方法

本実験では MAX 1 を他のダイス鋼と比較検討して、その特徴を明確にすることとした。Table 1 に供試材の化学成分を示す。比較材として用い

昭和51年11月19日 受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部中央研究所 渋川研究室

**日本原子力研究所 留学中

Table 1. Chemical compositions.

wt (%)

Specimen	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co	Remark
MAX1	0.33	0.29	0.29	3.92	0.59	0.91	0.41	2.02	mod. MAX2
MAX2	0.40	0.27	0.23	4.16	1.38	4.10	0.47	1.98	mod. H19
SKD61	0.38	0.89	0.40	4.96	1.23	—	0.93	—	JIS SKD61
SKD62	0.38	0.93	0.35	5.17	1.40	1.48	0.43	—	JIS SKD62

た MAX 2 は、MAX 1 の母体となった合金である。また現用の熱間ダイス鋼としては SKD 61 および SKD 62 をとり上げた。いずれの材料も不純物含有量は低い。

MAX 1 および MAX 2 は 2 ton アーク炉で溶製したものを直径 20 mm に鍛伸し、840℃の焼なましを施した。SKD 61 および SKD 62 は工場の製品から採取した棒材を直径 20 mm に再鍛し、860℃の焼なましを施して実験に供した。

試験片形状および測定方法は多岐にわたるので、実験結果をのべる際に随時説明する。

なお試験片の熱処理はすべて塩浴炉で行った。

3. 実験結果と考察

3.1 MAX 1 の熱処理

(1) 熱処理かたさ

MAX 1 の熱処理特性を主としてかたさの変化から検討した。

Fig. 1 に焼入れ温度と諸特性の関係を示す。図中(d)の焼入れままおよび(c)の焼もどし後のかたさの変化をみると、焼入れ温度の上昇とともに、いずれもかたさは増加しているが、1025℃付近で飽和値に達している。この温度は(e)の電子顕微鏡視野上で測定した未固溶炭化物量（定量法については⁴⁾参照）が最低値に近くなったところである。

これより高い温度から焼入れると(a)に示したように粒成長が著しくなり、同時に(b)の衝撃値も低下する。

以上の結果を総合すると、MAX 1 の最適焼入れ温度範囲は1000～1050℃である。SKD 61 および SKD 62 と同じ焼入れ温度で処理できることが判明した。

これに対して、比較材の MAX 2 について上のような検討を行った結果によれば、最適焼入れ温

度範囲は1100～1150℃の高温となる。

つぎに Fig. 2 で 3 鋼種の焼もどしかたさを比較した。MAX 1 の焼入れままおよび低温焼もどし後のかたさは他の 2 鋼種に比較して低くなっているが、600℃以上の焼もどしでは SKD 62 よりも高い値を示している。したがって熱間ダイスの使

Fig. 1. Effect of quenching temperatures on various properties of MAX 1 and MAX 2.

Fig. 2. Tempering curves for MAX 1, MAX 2 and SKD62.

用温度範囲では、十分な軟化抵抗性を持っていると考えられる。

(2) 熱処理にともなう組織変化

MAX 1 の開発に当っては、焼入れ時の未固溶炭化物を減少させることに重点をおいて合金設計を行っているので、以下に本合金中の炭化物の挙動について検討した。

まず、Photo. 1 に MAX 1 の光学顕微鏡組織を示す。焼なまし状態の炭化物は細かく、しかも均一に分布しており、これを焼入れると炭化物は完全に固溶したかにみえる。その後焼もどしを施せば、微細な炭化物が析出してくる。このように MAX 1 の光学顕微鏡組織は低合金構造用鋼のそ

Table 2. Carbides extracted from steels.

Specimen	Extracted residue (wt %)		Main carbide	
	(SA)	(H)	(SA)	(H)
MAX1	5.5	(1025°C) 1.2	$M_{23}C_6$	M_6C
MAX2	11.0	(1125°C) 5.0	M_6C	M_6C
SKD62	7.8	(1025°C) 3.5	M_6C $M_{23}C_6$	M_6C
SKD61	6.1	(1025°C) 2.6	M_4C_3 M_7C_3	M_4C_3

れに類似している。

しかし、先の焼入れの実験でふれたように電子顕微鏡観察によれば、未固溶炭化物が残っている。そこで、定電位電解法⁵⁾により炭化物を抽出して、その分析を行った。

Table 2 は焼なましおよび焼入れままの状態で鋼に含まれる炭化物の分析結果である。まず重量率をみると、MAX 1 は4鋼種の中で炭化物量をもっとも少なく、とくに焼入れのままの状態では1.2%の少量となる。

Photo. 2 は焼なまし状態の MAX 1 から抽出したもののX線回折図形である。この例に示したように、残渣には数種類の炭化物が混在している場合が多い。そこで、熱処理にともなう回折図形の変化を解析して、主体となっている炭化物を推定した。これを先の Table 2 に示す。

Photo. 1. Microstructures of MAX 1.

Photo. 2. An Xray diffraction pattern for extracted materials from MAX 1 annealed.

焼なまし状態の炭化物の種類をみると、Mo およびW含有量の多い MAX 2 および SKD 62 は M_6C が主体であり⁶⁾、V量の多い SKD 61 では M_4C_3 が多くなっている。これらの炭化物は固溶度が小さく、高温から焼入れても未固溶炭化物として残留しやすい⁷⁾。

これに対し、MAX 1 の焼もどし状態における炭化物は $M_{23}C_6$ が主体であり、この炭化物は低温の焼入れで完全に固溶する。

なお、4 鋼種とも 550℃ 以上に焼もどし温度を上げて行くと、炭化物の重量率が焼なまし状態の値に飽和することを認めている。すなわち、二次硬化により最高かたさに達する焼もどし温度で、析出炭化物の量は最大となり、これよりも高温では炭化物の凝集反応のみが生じていると推察される。したがって、焼なまし状態の炭化物量から焼入れままの状態における値を差引いたものが、二次硬化に寄与する析出炭化物の量と考えられる。このような考え方で Table 2 の重量率をみると、MAX 1 の析出炭化物量は SKD 61 よりも大きく、SKD 62 と同等になっている。一方、MAX 2 の析出炭化物量は 6 % にも達している。MAX 2 の焼もどし軟化抵抗性が大きいのは、このためであろう⁸⁾。

以上の結果を総合すると、MAX 1 の化学組成では比較的固溶度の大きな炭化物が形成され、低

温の焼入れで未固溶炭化物を極めて少なくすることができたものと結論づけられよう。

また固溶させた炭化物は焼もどしの際に再析出し、十分な二次硬化を示すということになる。

3. 2 MAX 1 の諸特性

(1) 強度と靱性

未固溶炭化物の減少をねらった目的は、高強度に加えて高靱性を具備した鋼を開発することにあった。そこで、まず MAX 1 の強度と靱性を調査した。

Fig. 3 は引張試験の結果である。600℃ における引張強さは 100kg/mm²、耐力は 75kg/mm² を示し、熱間ダイス鋼に要求される強度を満足している。

つぎに Fig. 4 で 3 鋼種の衝撃試験結果を比較した。いずれの温度においても、MAX 1 の衝撃値は他の 2 鋼種より大きく、高靱性を有していることが確認された。

つぎに強度と靱性の組合わせについて評価した。Fig. 5 は平滑および切欠引張強さの関係を示したものである。MAX 1 の大きな特徴は平滑引張強さを大きくしても、切欠引張強さが減少しないということである⁹⁾。これは二次硬化で最高かたさが得られる状態に焼もどして使用しても、靱性の問題がないということであり、注目すべき特質である。また Fig. 6 はかたさと破壊靱性の関係

Fig. 3. Tensile properties of MAX 1.

Fig. 4. U-notch charpy impact values of MAX 1, MAX 2 and SKD61.

Fig. 5. Relationship between tensile strength and notched tensile strength of MAX 1 and SKD61.

Fig. 6. Fracture toughness of MAX 1 and SKD61.

Fig. 7. Dimensional change during heat treatment.

を示したものである。かたさが大きなところでも、MAX 1 の K_{IC} はSKD 61 の約1.5倍という高い値を示している。

以上の結果から MAX 1 は高強度および高靱性を兼備した熱間ダイス鋼であるといえよう。

(2) 熱処理変寸率

ダイスの寸法精度の点から、熱処理にともなう鋼材の寸法変化は重要な特性となる。ここでは小型試片を用いたが、測定値は実体にも十分適用できるといわれている¹⁰⁾。Fig. 7 に3鋼種の寸法変化を示す。実用の焼もどし温度は550~600℃と考えられるが、この温度範囲における変寸率は極めて小さい。

(3) 高温疲労強さ

ダイスは高温におけるくり返した応力を受けるので、熱間ダイス鋼には高温疲労強さが要求される。Fig. 8 に小野式回転曲げ試験機によって測定したS-N曲線を示す。MAX 1 の調質かたさはSKD 62 より低いにもかかわらず、高応力側の破断寿命は MAX 1 の方が極めて大きくなっている。これは MAX 1 の焼もどし抵抗性が高いということだけの効果によるものとは考えられない。むしろ未固溶炭化物の含有量が少なく、靱性が高いためであろう¹¹⁾。

(4) 耐ヒート・チェック性

実際に使用される条件では、ダイスが急激な温度変化を受け、ヒート・チェック¹²⁾による割れを生ずるために廃却される場合が多いので、MAX 1 の耐ヒート・チェック性を調査した。Fig. 9 にその試験結果を示す。試験方法は傘型の試片にガス・バーナー加熱—水冷の熱サイクルを付与し、く

Fig. 8. Rotating bending fatigue lives of MAX 1 and SKD62 at 550°C.

り返し数 (N) が規定値となったところで、円板外周のクラックを観察するというものである。4鋼種とも $N=500\sim1000$ でクラック発生頻度の最大値を示している。これはクラックの平均長さの変化にみられるように、それ以上の熱サイクルを受けると、多数の小さなクラックが少数の大きなクラックに統合されるためである。

$N=2000$ でクラック数が増え、最も小さいのは MAX 2 であるが、深さが大きくなっており、数および深さの両面から評価した場合は、MAX 1 の耐ヒート・チェック性が増えることもすぐれている。

なお、MAX 1 のクラック伝播に異方性が少ないこともその特質として上げられてよい。

(5) 耐摩耗性

くり返し応力およびヒート・チェックによるクラックの発生がなくとも、面の摩耗量が大きくなれば、ダイスは廃却されることになるので、つぎに MAX 1 の耐摩耗性を調査した。ただし、実際の使用条件を再現することは困難なので、通常の大越式摩耗試験機を用いた。相手材には軟質の

Fig. 9. Results of heat-checking test.

Fig. 10. Wear test results of MAX 1 and MAX 2.

SCM 21 を選定した。Fig. 10 はかたさと比摩耗量の関係である。小荷重の場合には焼もどし、かたさを高目にとれば耐摩耗性が向上するが、高荷重の場合にはかたさを上げて効果がない。同一かたさの MAX 2 は高荷重でも比摩耗量が少ないが、これは未固溶炭化物が耐摩耗性に寄与しているためであろう。

MAX 1 の耐摩耗性は MAX 2 より劣っているが、他の鋼種と比較すれば同等である。さらに大きな耐摩耗性が要求される場合には、窒化等の表面処理を適用すればよい。

(6) 耐Al溶損性

上でのべた機械的損耗のほかに、ダイキャストでは熔融金属による腐食が問題となるので、ここではMAX 1 のAl溶損を調査した。Fig. 11 に浸漬後の直径減少率を示した。MAX 1 は現用鋼と同等の耐食性を示しており、Al ダイキャスト型として使用可能と考えられる。

(7) 窒化性

ダイス鋼そのものの材質改善とは別に、ダイスの特性を向上させる有効な手段として表面処理が

Fig. 11. Erosion in molten aluminum alloy (ADC 1)

Fig. 12. Hardness distribution of MAX 1, MAX 2 and SKD61 nitrided at the indicated condition.

あり、適用の例も多いので、ここではガス窒化をとり上げて試験してみた。Fig. 12 は処理後の断面かたさ分布である。MAX 1 は熱間ダイスとして必要な深さまで容易に窒化され、窒化層も強固なものが得られるので、ガス窒化の適用による特性向上が期待できる。

4. ま と め

MAX 1 の特性として以下を確認した。

(1) 焼入れ時の未固溶炭化物量が極めて少な

く、しかも十分な二次硬化が得られる。

- (2) 現用鋼と同じ温度から焼入れることができる。
- (3) 熱処理変寸率が非常に小さい。
- (4) 高温疲労強さが大きい。
- (5) ヒート・チェックによる割れが浅い。
- (6) 耐摩耗性がよい。
- (7) Al溶損による減耗が少ない。
- (8) ガス窒化が適用できる。

(文 献)

- 1) Alan M. Bayer : Metal Progr., 97 (1970) 4, 86
- 2) 佐藤, 相沢 : プレス型材料と熱処理, (昭47), 3 日刊工業新聞社
- 3) 水野 : 特殊鋼, 20 (1971) 9, 34
- 4) 佐久間, 西沢 : 日本金属学会会報, 10 (1971) 5, 279
- 5) 増本 : 鉄と鋼, 55 (1969), 1347
- 6) H. J. Golceschmidt : JISI., 160 (1948), 345
- 7) 仁平 : 都立工業技術センター研究報告, (昭48) 3, 53
- 8) Mott, N. F. and Nabarro, F. R. N. : Rept. Conf. Strength of Solids, P.1. Physical Society, (1948)
- 9) 上原 : シンポジウム, “工具鋼に関する最近の進歩” (日本金属学会, 1974), 1
- 10) 伊藤, 磯部, 加藤 : 電気製鋼, 45 (1974), 13
- 11) 荒木 : 鉄鋼材料学, (昭45), 148 丸善
- 12) 藤原 : 大阪大学博士論文 (1962), 17