技術資料

Technical Paper

大型品対応新熱間ダイス鋼 DH31-SS1 の開発

河野正道^{*1}, 井上幸一郎^{*2}A New Hot Working Die Steel with Improved Hardenability
“DH31-SS1”

Masamichi Kawano and Koichiro Inoue

Synopsis

The strongly commercial interests have been focused on hot working die steels with improved hardenability to attain higher impact value and ensure adequate dies life even in the larger mass blocks. Hardenability, avoiding pearlite transformation and attain a finer bainitic microstructure, is quite important on quenching of large die blocks. In addition strength of die is essential to improve sensitivity for ware at elevated temperature.

In this paper, several properties such as hardenability, impact value, fracture toughness and high temperature strength of newly developed hot working die steel ‘DH31-SS1’ will be represented. The given results by comparing with conventional hot working die steel DHA1-ES (corresponding to AISI H13) are as follows.

- (1) Retarded quenched material has finer bainitic microstructure and superior impact value of 30 J/cm².*
- (2) Stress of resistance to deform at 973 K after short time holding is higher from 100 MPa upto 150 MPa.*
- (3) Fracture toughness on high hardness is same but on low hardness, inferior.*

1. はじめに

熱間鍛造やダイカストに用いられる JIS SKD61（以下、SKD61 と記す）の金型には、寿命延長を目的とした高衝撃値化が求められる。衝撃値の向上には、介在物量の軽減¹⁾と急速焼入れが有効である。既に大同グループでは、SKD61 の晶出 VC 低減（DHA1-ES¹⁾）と高靱化焼入れ（e-HIT 法）を実現し、衝撃値の高い金型を供給している。しかし、このような対策によっても、大断面金型の高衝撃値化は容易でない。大単重材は急冷が困難であるうえ、焼入れ速度の小さい場合には、SKD61 の金属組織が高温で変態した粗大なベイナイトになるためである。

さらに、仕上げ加工の工数削減を目的とした低歪み化の要求も、金型の高衝撃値化を阻害する要因となっている。歪みの軽減には、焼入れ時の高温状態にある金型を緩冷する方案が有効である。しかし、このような工程を SKD61 の大断面金型に適用した場合、焼入れ速度が非常

に小さくなり、パーライトの析出によって衝撃値が低下する危険性を増す。

パーライトの混入や粗大なベイナイトの生成といった焼入れ性の不足によって、SKD61 では衝撃値を確保できないケースが今後はさらに増えると予想される。さらに、コスト低減を目的としたサイクルタイム短縮やニアネットシェイプ化が加速する傾向にあり、このような方案は金型への熱と圧力の負荷を増す。したがって、SKD61 では耐摩耗性や耐ヒートチェック性が不十分となる場合も考えられる。

以上より、焼入れ性と高温強度において SKD61 を凌ぐ鋼が不可欠と判断した。そこで、緩速焼入れにおいてもパーライトを析出せず、かつ低温での変態によって微細なベイナイトとなり、高温強度にも優れた「新しい熱間ダイス鋼 DH31-SS1」を開発した。以下では、開発鋼の諸特性を、高信頼性鋼 DHA1-ES¹⁾と比較して紹介する。

2007 年 8 月 13 日受付

*1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Reserch & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

*2 大同特殊鋼(株)研究開発本部, 工博 (Dr., Eng., Daido Corporate Reserch & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

2. 金型ユーザーの要求

特にダイカストにおいては、金型の「高衝撃値化」と「低歪み化」に対する要求が厳格化している。衝撃値に関しては、協会の定める値を満たさない金型は排除される動きが加速している。代表例は、NADCA（北米ダイカスト協会）、CNOMO（フランス自動車工業会）、VDG（ドイツダイカスト協会）の規格である。また、独自規定を設けるメーカーの出現など、規格化に追従の傾向が顕在化している。衝撃値（JIS 3号）が20 J/cm²未満の型は早期破壊しやすい¹⁾、という工業的な経験則から、国内の金型ユーザーが要求する衝撃値は20 J/cm²以上であることが多い。

一方、歪みについては、仕上げ加工の工数削減を目的とし、焼戻し後における金型の反りを0.1%以下にしたいとのニーズが強い。ダイカストは寸法精度の良さを特徴とし、長さ100 mmに対しての許容誤差は±0.22%程度である。したがって、調質による型の変形が0.2%を超えると、仕上げ加工代が小さい場合には铸造品の精度を保証できなくなり、型の再作製が必要となる。低歪み化は、ダイカスト型の短納期化と低廉化における重要な課題である。

今後、20 J/cm²以上の衝撃値を有し、歪みが0.1%以下である金型のニーズはさらに強まると考えられる。

3. DH31-SS1 の諸特性

Table 1 は、DHA1-ES¹⁾ と特性を比較した結果である。焼入れ性に優れた DH31-SS1 の最大の特徴は、緩速焼入れにおいて高い衝撃値を確保できることである。また、焼入れに際して DHA1-ES ほどの急冷を要しないため、金型の反りを小さくできる点もメリットとなる。

Table 1. Properties of newly developed steel DH31-SS1.

Properties	Results
Hardenability	○
Resistance to softening(long time exposure)	△
Strength at 973 K(short time holding)	○
Impact value(Retarded cooling)	○
Fracture toughness(Low hardness)	×
Mechanical fatigue property	△
Delayed fracture property	△
Resistance to cracking by thermal fatigue	○
Resistance to lose of weight in molten Al-alloy ADC12	△

○ : superior to DHA1-ES (AISI H13)

△ : same as DHA1-ES (AISI H13)

× : inferior to DHA1-ES (AISI H13)

3. 1 相変態挙動と緩速焼入れ材の組織

パーライト変態開始の臨界冷速は、DHA1-ES が約 7 K/min である。一方、DH31-SS1 は 1.6 K/min でもパーライトを析出しない。TTT 線図におけるパーライトノーズの時間は、DHA1-ES の約 52 min に対し、DH31-SS1 では 217 min 程度となっていた。

Fig.1 は、低温域の CCT 線図である。DH31-SS1 の変態点は DHA1-ES よりも約 50 K 低いため、Fig.2 に示すとおり、3 K/min の焼入れでも金属組織は微細となる。

Fig.1. Transformation temperature on continuous cooling processes.

Fig.2. As quenched microstructure of (a) DHA1-ES and (b) DH31-SS1 with cooling rate of 3 K/min.

3. 2 軟化抵抗と高温強度

Fig.3 に示すとおり、調質材を 873 K で保持した後の室温における硬さは、DH31-SS1 と DHA1-ES で同等になる。また、焼入れままの素材を 823 K ～ 973 K の範囲で 1 回焼戻した (≥ 60 min) 後の硬さにも、鋼種間の顕著な差異は認められなかった。以上より、DH31-SS1 と DHA1-ES の軟化抵抗は同等と判断できる。一方、Table 2 に示すとおり、均熱時間が 10 min と短い場合の 973 K における硬さは、DHA1-ES よりも DH31-SS1 の方が高い。

973 K での均熱時間と変形抵抗の関係を Fig.4 に示す。応力として、硬さと良い相関を有する 8 % 変形時²⁾の値に着目した。初期硬さが 52.1 HRC で共通であるにもかかわらず、均熱時間が 100 s 以下の条件における変形抵抗は、DHA1-ES よりも DH31-SS1 の方が 100 MPa ～ 150 MPa 高い。一方、均熱時間が 60 min の場合は変形抵抗が 500 MPa ～ 540 MPa となり、鋼種間に顕著な差異は認められなかった。これらの結果は、Table 2 に示した高温硬さの知見とも一致する。以上より、溶湯や被鍛材との接触によって急速加熱され、873 K ～ 973 K となった金型最表面の耐磨耗性や耐ヒートチェック性は、DHA1-ES よりも DH31-SS1 の方が高いと予想される。

Fig.3. Resistance to softening of specimens tempered to 48 HRC.

Fig.4. Influence of holding time on strength at 973 K.

3. 3 衝撃値の焼入れ速度依存性

Fig.5 に示すとおり、DH31-SS1 の衝撃値は焼入れ速度によらず高位安定である。金型のサイズが非常に大きい場合、低温域の焼入れ速度が 3 K/min 未満になることも珍しくない。このような条件においても、DHA1-ES の急冷材に匹敵する 30 J/cm² 以上の高い衝撃値を DH31-SS1 が確保できる理由は、緩速焼入れ時の変態点が DHA1-ES の Ms 点にほぼ等しく、金属組織が微細になるためと考えられる (Fig.1, Fig.2)。DH31-SS1 は、大断面金型用の「衝撃値保証鋼」として好適である。

Fig.5. Quenching rate dependance on impact value of materials tempered to 48 HRC.

Table 2. Influence of isothermal holding time on hardness at 973 K.

	Initial HV at room temp.	HV at 973 K after isothermal holding of	
		10 min (600 s)	60 min (1 H)
DH31-SS1	563($\approx$ 53.5 HRC)	284	206
DHA1-ES	565($\approx$ 53.5 HRC)	249	196

3. 4 破壊靱性値

Fig.6は破壊靱性値の硬度依存性を示す。全体的な傾向として、焼入れ速度が大きく硬さが低い水準ほど破壊靱性値は高い³⁾。DH31-SS1の特徴は、(1)焼入れ速度の影響を受けにくく、(2)急冷材は45 HRC以下の硬度域においてDHA1-ESの約2/3となる、ことである。亀裂が急速に進展して破壊に至る応力が低いため、DH31-SS1の金型は、微小亀裂の発生から大割れに至る期間も短いと考えられる。低硬度で使用されていたDHA1-ESを同硬度のDH31-SS1で代替する場合には、大割れに対する注意が必要となる。一方、48 HRC以上の高硬度域では、DH31-SS1の破壊靱性値はDHA1-ESと同等である。

Fig.6. Influence of hardness on fracture toughness.

3. 5 機械疲労強度

DH31-SS1の製造においては、DHA1-ES¹⁾と同様に、疲労破壊の起点となる介在物を低減する製造工程が適用されている。この結果、Fig.7に示すとおり、45 HRCに調質した素材の機械疲労強度は、DH31-SS1とDHA1-ESで同等となる。したがって、DHA1-ESからDH31-SS1への代替によって、金型の疲労破壊が顕著となる危険性は少ないと考えられる。

Fig.7. Mechanical fatigue strength.

3. 6 遅れ破壊強度

ダイカストにおいては、金型内部の水冷孔に発生したき裂が意匠面に貫通することがある。この現象は水冷孔割れと呼称され、型の計画的な補修が困難であることから、回避すべき重大な損傷の1つとされている。水冷孔の表面には、冷却水と常に接触する条件下で引張応力が作用していることから、このような環境におけるき裂の発生と進展を模擬できる遅れ破壊試験に着目し、水冷孔割れの危険度を簡易的に評価した。

Fig.8は、工業用水に対する遅れ破壊挙動を示す。静曲げ破断強度は、43.5 HRCのDHA1-ESが約3623 MPa、44.9 HRCのDH31-SS1は3852 MPa程度であった。負荷が静曲げ破断強度の80%では、およそ10 Hで破断に至る。負荷が60%～70%の条件においても、破断時間は20 H～60 H程度であり、鋼種間に顕著な差異は認められない。以上より、水冷孔割れの感受性は、DH31-SS1とDHA1-ESではほぼ同等と考えられる。

Fig.8. Delayed fracture strength.

3. 7 耐ヒートチェック性

熱間鍛造やダイカストの金型表面には、ヒートチェックやその連結による欠け落ちなど、き裂に関する不具合が発生しやすい。特にダイカストでは、金型寿命要因の大半を占めるヒートチェックの軽減が強く求められる。

ヒートチェックは、酸化雰囲気中で加熱と冷却のサイクルが繰り返し付与される条件において発生する。そこで、このような環境を模擬した試験によって、鋼材の耐ヒートチェック性を評価した。Fig.9は、973 Kへの急加熱と室温への急冷を繰り返した試験片表面のき裂深さを示す。DHA1-ES対比、DH31-SS1の亀裂深さは1/2～1/3であり、耐ヒートチェック性に優れていることが分かる。試験後の表面硬さはDH31-SS1の方が高く、この傾向はFig.4とも一致する。以上より、急速加熱時の973 Kにおける強度の差が、熱疲労特性に反映されたと考えられる。

Fig.9. Crack depth after 1000 cycle thermal fatigue.

3. 8 耐 Al 溶損性

920 K ~ 990 K のアルミニウム合金溶湯を射出するダイカストにおいては、熔融金属に金型が侵食されることもある。意匠面の形状変化は製品の形状や離型性に悪影響を及ぼすため、溶損に対する抵抗の高さはダイカスト金型用鋼の重要な特性である。

Fig.10 は、973 K に保持した ADC12 の溶湯中で、鋼の試験片を 200 rpm で 30 min 公転させた後の溶損による重量減少を示す。試験前の重量は約 31 g であった。DHA1-ES と DH31-SS1 の重量減は共に 4 ~ 6 g の範囲であり、両鋼の耐溶損性に大差は無いと考えられる。

Fig.10. Weight loss in molten Al alloy ADC12.

4. 緩速焼入れ方案へ適用可能なサイズ

Fig.11 は、1303 K から 5 K/min で焼入れた DHA1-ES の金属組織を示す。粒界の 3 重点に散在するパーライトは、冷速が 7 K/min の条件においてもわずかながら確認された。パーライトの混入は衝撃値の低下を招く。

低歪み化に有効な、焼入れ時の高温状態にある金型を緩冷する方案においては、Fig.11 に例示した焼入れ不良

を回避しなければならない。すなわち、緩速焼入れ工程の対象となる金型がパーライト変態を回避できるサイズか否か、の事前予測が必須となる。そこで、単純な円盤状の素材を対象とし、FE 解析によって冷却速度に及ぼすサイズの影響を見積った。

Fig.12 は、焼入れ加熱温度である 1303 K から円盤素材を放冷した場合の、パーライト変態温度域 (1073 K ~ 873 K) の平均冷速を示す。パーライト析出の臨界冷速が 7 K/s 程度である DHA1-ES では、高温域に放冷を適用できる金型の最大厚さが約 150 mm と見積られた。

一方、1.6 K/min でもパーライトを析出しない DH31-SS1 については、厚さ 350 mm で直径が 900 mm の非常に大きなサイズ (約 1750 kg) にも、高温域の放冷を適用できると考えられる。さらに、Fig.5 を考慮すれば、このような大断面金型に対して 20 J/cm² 以上の衝撃値が規定された場合も、DH31-SS1 は規格を満足することが期待される。

Fig.11. Appearance of pearlite in DHA1-ES on retarded quenching process with cooling rate of 5 K/min.

Fig.12. Contour map of mean cooling rate of air-cooled materials.

5. まとめ

緩速焼入れにおいてもパーライトを析出せず、かつ低温での変態によって微細なベイナイト組織となり、高温強度にも優れた「熱間ダイス鋼 DH31-SS1」を開発した。開発鋼の諸特性、および好適な用途を以下に示す。

(1) パーライト変態開始の臨界冷速は、DHA1-ES が 7 K/min 程度であることに對し、1.6 K/min 未満と非常に小さい。また、ベイナイト変態点が DHA1-ES より 50 K 低いため、緩速焼入れにおいても微細な組織が得られる。

(2) 衝撃値が DHA1-ES より高い傾向は、焼入れ速度が小さいほど顕著となる。DH31-SS1 の最大の特徴は、緩速焼入れ時に高い衝撃値を確保できることであり、衝撃値保証鋼としての用途に向く。

(3) 保持時間が 1 H 以上の条件では、焼戻し硬さ、軟化抵抗、高温硬さ、における DHA1-ES との差異が非常に小さい。一方、急速加熱時の 973 K において、保持時間が 100 s 以下の場合には DHA1-ES よりも高強度である。

(4) 低硬度域における破壊靱性値は、DHA1-ES の約 2/3 である。したがって、微小なき裂から大割れを起こし易い点には注意を要する。一方、48 HRC 以上の硬度域においては、DHA1-ES と同等の破壊靱性値を有する。

(5) 熱疲労によるき裂発生への抵抗力は DHA1-ES より高く、耐ヒートチェック性に優れる。

(6) 諸特性から判断すれば、DH31-SS1 の最も好適な用途は「高硬度域 (48 HRC $\leq$) での衝撃値を規定された、寿命要因が摩耗の大断面金型」となる。また、小物への適用を想定した場合には、摩耗が顕著な部位に高硬度の入れ子として適用することが望ましい。

(文 献)

- 1) 井上幸一郎, 大藤孝, 市岡雄二, 荒木利彦: 電気製鋼, 76 (2005), 287.
- 2) 中村雅勇: 塑性と加工, 44 (2003), 674.
- 3) 奥野利夫: 鉄と鋼, 69 (1983), 655.