

熱間工具鋼の高温強度に及ぼす合金元素の影響とダイカスト用鋼の開発

The effect of alloying elements on high-temperature strength and the development of hot work tool steel for die-casting die.

島村 祐太*1 館 幸生*2 中間 一夫*3

Yuta SHIMAMURA, Yukio TACHI, and Kazuo NAKAMA

Synopsis: Heat checking, caused by cyclic thermal load during the operation, is one of the common damages to die-casting dies. It is ideal for die steels to retain well-balanced high-temperature strength and toughness for good resistance to heat checking. In this report, the effect of carbide-forming elements on these properties was investigated by use of several 100kg VIM ingots of steels with varied Cr, Mo and V. As a result, in order to design the steel with good softening resistance, it is effective to increase the amount of M_2C carbide. On the other hand, toughness tends to decrease with increases of the total amounts of M_6C , M_2C and MC types of carbide. From these results, controlling the amounts of Mo and V is critical taking consideration of both high-temperature strength and toughness. In addition, it was found that the amount of M_2C carbides tends to increase with an increase of V content and with a decrease of Mo content. Based on the above knowledge, hot-work tool steel QDX-HARMOTEX is developed from the standpoint of controlling types and amounts of precipitated carbides by optimization of alloy design. With its excellent toughness and softening resistance, QDX-HARMOTEX demonstrates excellent heat checking resistance.

Key words: die-casting die ; hot work tool steel ; heat checking ; high-temperature strength ; toughness ; M_2C carbide,

1. 緒言

近年、自動車の燃費向上を目的とした車体軽量化を背景に、アルミ部品の高強度化及び薄肉化が進んでいる。そのため、これらの部品を製造するために使われるダイカスト金型への機械的負荷は増大している。さらに、自動車部品の生産性向上を背景に部品成形加工ピッチの短縮化が進んでいることから、金型への熱的負荷も増大している。これらのような過酷化する使用環境を背景として、金型には大割れやヒートチェックといった、寿命を低下させる問題が生じやすくなっており、長寿命化に向けて一層高性能な金型材料が求められている。

ヒートチェックは、意匠性が重視されるダイカスト金型に生じる主要損傷原因の一つである¹⁻²⁾。Fig.1に、ダイカスト金型のキャビティ面及びランナー部分に発生したヒートチェックを示す。これらの割れは、製品の寸法精度や肌性状などの品質に悪影響を及ぼし、金型交換の必要性が生じる。こうした場合、ダイカスト製品製造のトータルコス

ト増加を招くため、できる限りヒートチェックの発生を抑制することが望まれる。

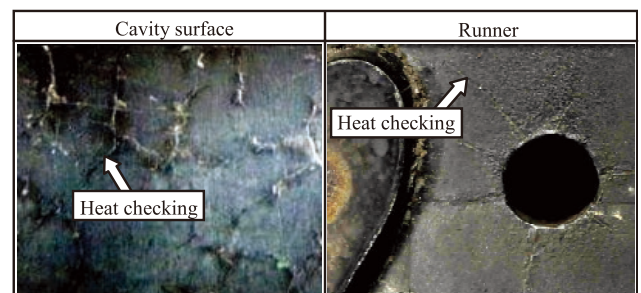


Fig.1 Examples of appearance of heat checking.

ヒートチェックとは、金型表面に亀甲状の割れが発生する現象であり、被加工材からの熱影響による金型表面の軟化に伴うき裂の発生と、大気との接触によるき裂内部の酸化と、加熱・冷却の熱サイクルの繰り返しに伴う局所的な膨張・収縮によってき裂が進展することが知られている³⁻⁴⁾。Fig.2に、ヒートチェックが生じた金型の断面ミクロ組織

*1 研究・開発センター 製鋼プロセスグループ (元 研究・開発センター 高合金鋼グループ)
*2 技術企画管理部 高合金鋼グループ
*3 研究・開発センター 高合金鋼グループ長 博士 (工学)

を示す。④の矢印で示した部分がヒートチェックであるが、金型は①内部の焼入焼戻層の硬さが50HRC程度であるのに対し、②表面部分は35~40HRCまで軟化しており、③酸化層も確認できる。以上より、ヒートチェックの発生を抑制するには、その発生機構が熱疲労現象に基づくものであることを考慮しつつ、き裂発生及びき裂伝播の抑制という観点から金型材料を検討する必要がある。金型材料特性としては、き裂の発生を抑制するための高温強度（軟化抵抗性）の向上や、き裂の進展を抑制する靱性の向上⁵⁾、熱疲労を軽減することを目的とした熱伝導率の向上⁶⁾などが効果的である。その中でも、高温強度と靱性は相反する特性であり、高温強度を高めるにはCやMo、Vなどを増量することが効果的であるが、これらの元素の増量は成分偏析の増加や炭化物の過剰形成を招き、靱性低下の原因となる。そこで、本報告では高温強度に着目し、熱間工具鋼の高温強度に及ぼす合金元素の影響について調査した結果を報告するとともに、その結果を踏まえて開発した新ダイカスト金型用鋼QDX-HARMOTEXの諸特性について報告する。

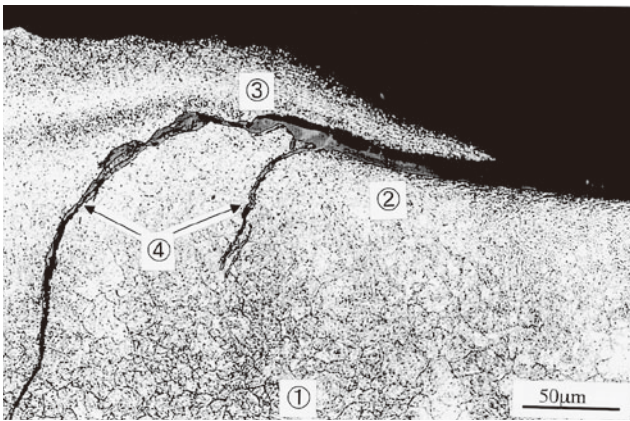


Fig.2 The cross-sectional microstructure of a damaged surface of die-casting die.

2. 実験方法

2.1 供試材の作製と化学成分

真空誘導溶解炉を用いて原料を誘導溶解し、100kg鋼塊を作製した。鋼塊を1230℃で35mm×70mmに鍛伸した後、870℃で2時間保持後徐冷し焼なまししたものを供試材とした。なお、鍛錬比は10.0である。Table 1に供試材の化学成分を示す。0.33C-0.12Si-0.60Mn-5.1Cr-2.0Mo-0.5V (mass%) をベースに、主にCr、Mo及びVの含有量を変化させた計6鋼種を製造した。炭化物形成元素であるこれらの元素添加量を調整することで、焼入焼戻後の安定炭化物の比率を変化させ、特に高温強度に及ぼす影響を明確にすることを成分設計の狙いとした。なお、D1~D5鋼は、北米ダイカスト協会 (NADCA) のGrade C鋼の成分範囲に該当する⁷⁾。表中には、参考までにJIS SKD61の化学成分も示した。

特性として、焼入焼戻硬さ、軟化抵抗性、シャルピー衝撃特性を調査した。焼入焼戻硬さは、供試材の中心部から15mmのブロック材を切り出し、1030℃で30分保持後空冷し、500~640℃で60分保持後空冷する処理を2回実施した後に、ロックウェル硬さを測定した。また、実際の金型の熱処理条件を模擬して、緩冷焼入焼戻硬さを調査した。半冷時間を30分として焼入後、580~595℃で5時間保持する処理を3回繰り返し、硬さを測定した。なお、本条件における焼入時の冷却速度は、300mm角のブロック材を油冷した場合の鋼材中心部冷却速度に相当する。

軟化抵抗性は、供試材の中心部から15mmのブロック材を切り出し、45HRCに調質したものを試験に供した。調質時の硬さを測定後、それらのブロック材を600℃に保持したカンタル炉に装入し、3~100時間加熱保持し、空冷後の硬さを測定し、軟化抵抗性の評価とした。

シャルピー衝撃試験片は、供試材の中心部圧延方向と垂直な面から60H×13W×13Lの荒供試材を割り出し、45HRCに調質した後、鍛伸方向と平行な面に2mm-Vノッチ加工ならびに仕上げ加工を行い、試験に供した。なお、試験温度は常温とした。

Table 1 Chemical compositions of samples in mass%.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
D1	0.33	0.12	0.60	0.009	0.001	5.06	2.04	0.50
D2	0.33	0.12	0.56	0.009	0.001	5.01	2.53	0.50
D3	0.35	0.12	0.56	0.009	0.001	5.02	2.51	0.65
D4	0.38	0.13	0.56	0.010	0.001	4.75	2.06	0.65
D5	0.32	0.28	1.00	0.008	0.002	5.47	2.54	0.57
D6	0.34	0.38	0.42	0.016	0.001	5.42	1.50	0.51
NADCA Grade C specification	0.32 -0.40	0.10 -0.50	0.10 -1.2	0.020 max	0.003 max	4.70 -5.85	2.00 -3.30	0.40 -0.70
JIS SKD61	0.35 -0.42	0.80 -1.20	0.25 -0.50	0.030 max	0.020 max	4.80 -5.50	1.00 -1.50	0.80 -1.15

2.2 焼入焼戻後の炭化物種類と割合の予測

Table 2に、45HRCに調質する場合の焼戻温度における、析出炭化物種類及び割合の平衡計算結果を示す。計算には、統合型熱力学計算ソフトウェアであるThermo-Calc®を使用し、データベースはTCFe6を用いた。また、炭化物の割合は、各焼戻温度での平衡状態と、焼入状態である1030℃の安定炭化物の差から求めた。Fig.3に、焼入焼戻後の安定炭化物種類に及ぼすMo、V及びCr量の影響の模式図を示す。本研究の化学成分範囲では、M₂C炭化物の割合は、V量の増加ならびにMo量の低下に伴い増加する傾向にあった。また、Cr量の低下に伴い増加する傾向も認められた。一方で、M₆C炭化物は、Mo量の増加ならびにV量の低下に伴い増加する傾向にあった。さらに、M₂₃C₆炭化物は、V及びMoの低下に伴い増加する傾向にあった。こ

の結果から、本報告の試作鋼の成分範囲において、焼入焼戻後の安定炭化物種類及びその割合が大きく変化すると予測される。

Table 2 Calculated volume fraction of stable carbides in quenched and tempered condition.

Steel	Volume Fraction (vol. %)				
	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	M ₂ C	MC	Total
D1	5.55	0.29	0.19	0.19	6.22
D2	5.30	1.17	0.00	0.19	6.66
D3	5.01	0.71	0.54	0.10	6.36
D4	5.55	0.00	0.66	0.21	6.42
D5	5.07	1.29	0.00	0.10	6.46
D6	5.80	0.00	0.00	0.27	6.07

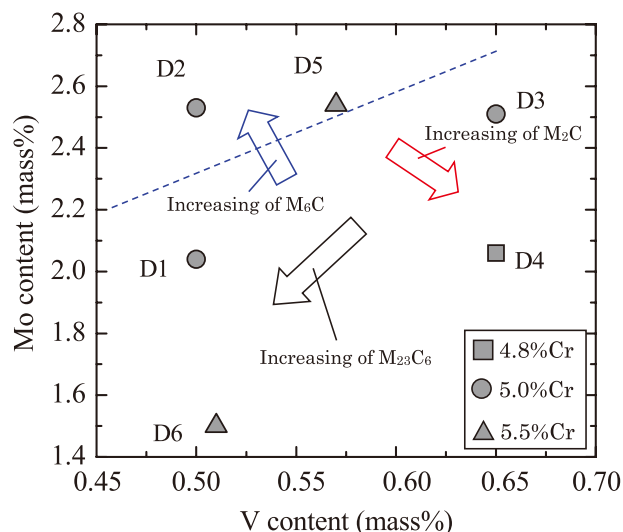


Fig.3 Schematic representation of the effect of Mo, V and Cr content on the type of precipitated carbides.

3. 実験結果と考察

3.1 焼入焼戻硬さ

Fig.4に、焼入焼戻硬さを示す。焼戻しに伴う軟化抵抗性は、D4鋼が最も高く、続いてD3、D1、D2、D6、D5鋼の順であった。Table 2で示した炭化物の種類及び割合と比較すると、安定炭化物としてM₂C炭化物の割合が多いほど、焼戻軟化抵抗性が優れる傾向にあった。M₂C炭化物は、M₆CやM₂₃C₆などの炭化物に比べて高温加熱保持中に粗大化し難いことが知られている⁸⁾。また、炭化物自体の硬さは、M₂Cが1800~3000HVであるのに対し、M₆Cは1600~2300HV、M₂₃C₆は1000~1800HV程度であり、M₂C炭化物の硬さは比較的高い⁹⁾。炭化物による強化を考慮した場合、M₂C炭化物のこれらの挙動や特性は、高温加熱保持中の硬さ低下抑制に有利であることがわかる。

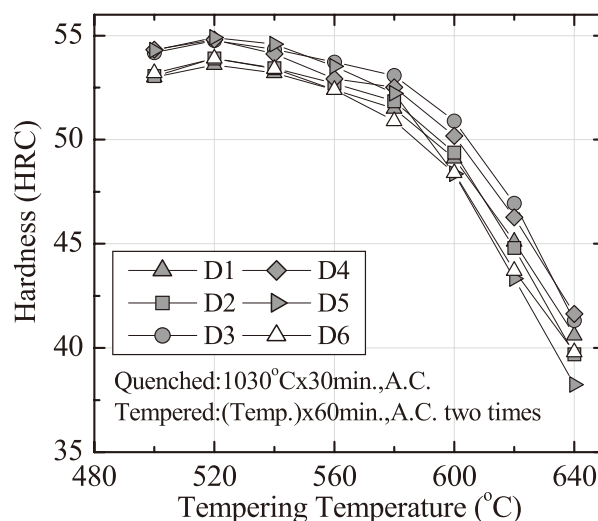


Fig.4 Effect of tempering temperature on hardness of steels D1 to D6.

3.2 軟化抵抗性

Fig.5に、軟化抵抗性試験の結果を示す。また、Table 3には、初期硬さである45HRCに調質する際に適用した焼戻温度と、初期硬さと100時間保持後の硬さの差（以下、軟化量）を示した。この差に着目すると、D3及びD4鋼は軟化量が少なく、続いてD2、D1、D5、D6の順であった。これは焼戻軟化抵抗性の傾向とはほぼ一致する結果であった。調質時の焼戻温度が比較的低いD5及びD6鋼は、特に軟化度合いが大きかったが、一方で、調質時の焼戻温度が比較的高いD3及びD4鋼は、軟化度合いが小さかった。これは、焼戻温度が高いほど炭化物の析出及び成長は進行しており、その後の600°C加熱保持において、軟化の要因である更なる炭化物の析出及び成長が進行し難くなったことが影響したと考えられる。即ち、軟化抵抗性を向上させるためには、狙いの硬さを得るための調質時の焼戻温度を高く設定できるほど有利であり、そのためには、焼入焼戻状態でM₂C炭化物が安定となる成分設計が効果的であると考えられる。

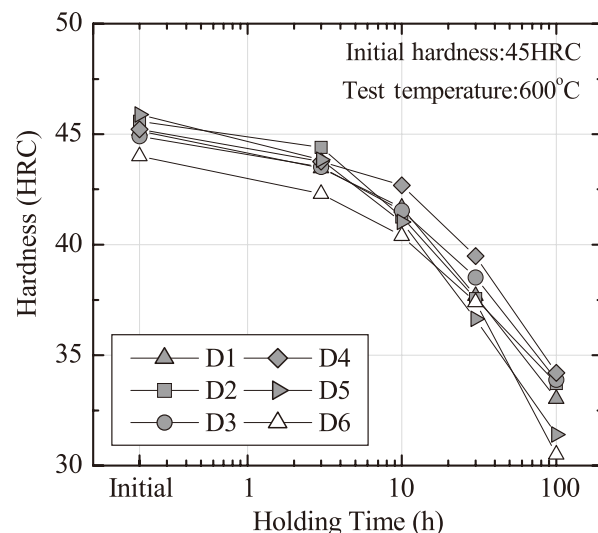


Fig.5 Effect of holding time on hardness of steels D1 to D6.

Table 3 Drop in hardness after keeping at 600°C for 100 hours.

Steel	Tempering Temperature (°C)	Drop in hardness after keeping at 600 °C for 100h (HRC)
D1	620	12.1
D2	620	11.9
D3	627	11.0
D4	627	11.0
D5	615	14.5
D6	615	13.4

3.3 緩冷焼入焼戻硬さ

前述した試験は、小試験片による急冷（理想）状態での特性であるが、ダイカスト金型はそれより遥かに大きなサイズであることから、鋼材中心部の焼入時の冷却速度は小さくなり、焼戻保持時間は長時間となる。また、靱性重視のため、焼戻しの回数を3回とする場合も多い。そのため、実際のダイカスト金型の熱処理を適用した場合、焼入焼戻硬さの挙動が、Fig.4で示した結果と異なる恐れがある。そこで、金型のサイズを考慮した緩冷焼入焼戻硬さを測定し、その確認を行った。Fig.6に、D1、D4及びD6鋼の緩冷焼入焼戻硬さを示す。D4鋼やD1鋼は、D6鋼よりも硬さが高く維持されていた。焼入焼戻硬さは、実際の金型を想定した熱処理条件を適用しても、小試験片による急冷状態と同様の傾向が得られることを確認した。ここで、析出している炭化物に関して調査を行うため、緩冷焼入焼戻硬さを測定した試験片を用いて、抽出残渣法によって炭化物を抽出し、X線回折による解析を行った。なお、調査はD1及びD6鋼を対象とし、試験片は590°C焼戻材を使用した。Fig.7に、X線回折結果を示す。いずれの鋼種も、析出炭化物はMC、M₂C、M₂₃C₆及びM₃Cであった。それぞれM₂C炭化物ならびにM₂₃C₆及びMC炭化物を示すピーク(1)及び(2)を比較すると、D1鋼のピーク(1)は、ピーク(2)に比べて強度が高く、すなわちD1鋼はM₂C炭化物が比較的多く析出していることを確認した。

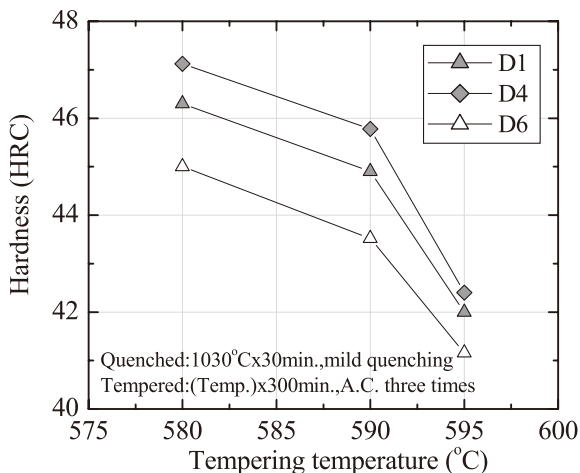


Fig.6 Effect of tempering temperature on hardness of steel D1, D4 and D6.

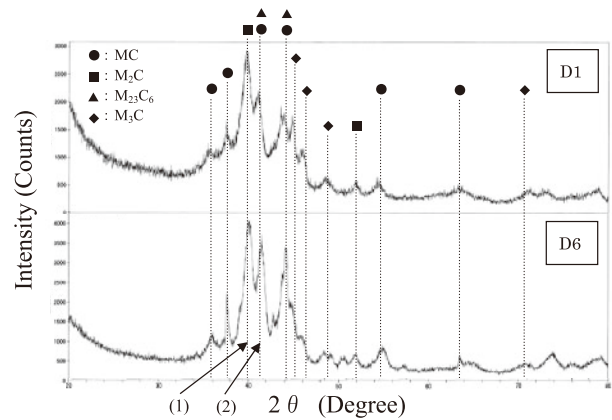


Fig.7 Results of X-ray diffraction of extracted carbides of steel D1 and D6.

3.4 靱性

Fig.8に、シャルピー衝撃試験の結果を示す。衝撃値は、D1及びD6が最も高く、続いてD2、D4、D3、D5鋼の順であった。本結果と、Table 2に示した安定炭化物の種類と割合と比較すると、M₆CやM₂C、MC炭化物が多いほど、衝撃値が低下する傾向にあった。これらの炭化物を構成する主要な元素はMoやVであり、これらの元素は、その他の元素と比較して鋼材中で成分のミクロ偏析や炭化物偏析を助長しやすい元素であることから、このことが衝撃値の低下に影響したと考えられる。

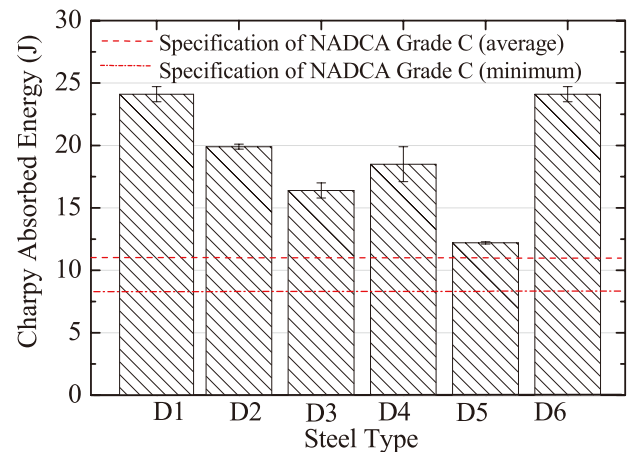


Fig.8 Results of Charpy absorbed energy test (R.T., 2mm-Vnotch).

4. QDX-HARMOTEXの開発

4.1 QDX-HARMOTEXの開発コンセプト

前章までの結果を整理すると、高温強度（軟化抵抗性）の向上には、高温焼戻時に粗大化し難く、かつ比較的硬度の高いM₂C炭化物を多く析出させることが有効であり、そのためにはV添加量を増加させ、Mo及びCr添加量を低下させる必要がある一方で、MoやVの過剰な添加は靱性を低

下させる傾向にあることがわかった。すなわち、高温強度と靱性を両立させるためには、これらの元素の添加量のバランスを十分に考慮して成分設計を行う必要があると考えられる。当社では、これらの知見を基に検討を行い、JIS SKD61に対して軟化抵抗性と靱性が優れたダイカスト用鋼としてQDX-HARMOTEXを開発した。なお、本鋼種は2次溶解を採用することで、製造プロセスの観点からも最適化を図った鋼種である。本章では、軟化抵抗性及び靱性の向上による耐ヒートチェック性向上効果を確認することを目的として、QDX-HARMOTEXの焼入焼戻硬さ、軟化抵抗性、靱性、耐ヒートチェック性について報告する。

4.2 実験方法

供試材は、当社の60t電気炉を用いて溶解し、LF、RH脱ガス、鑄造後、2次溶解（ESR）、ソーキング、鍛造の工程を経て製造した。比較材はSKD61 ESRとした。供試材のサイズは、QDX-HARMOTEXが180H×610W、SKD61 ESRが140H×270Wである。基本的に、焼入焼戻硬さ、軟化抵抗性、靱性の調査は、2.1章で述べた実験方法と同様である。今回、耐ヒートチェック性の調査には、実際のダイカスト金型の使用環境を模擬した試験機を用いた。装置の概略図をFig.9に示す。中央の試験片を、加熱用のコイルならびに冷却穴が取り囲んでおり、試験片に対して高周波電流による急速加熱と冷却水噴霧による急速冷却を繰り返し与えることが可能な試験機となっている。本実験では、試験片の硬さは45HRCとし、600℃まで加熱し、5秒保持後、水冷するサイクルを1000サイクル繰り返した。その後、試験片表面に生じたヒートチェックの平均深さと最大深さを画像解析によって算出した。

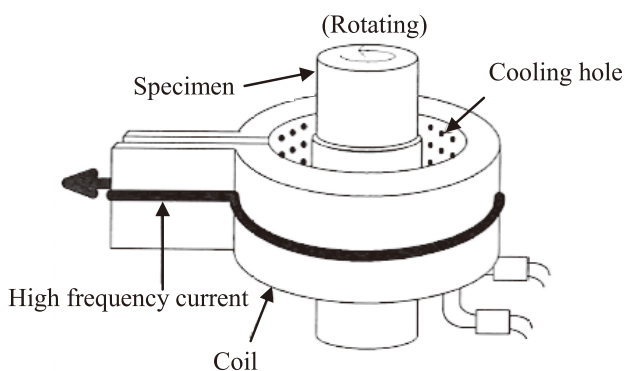


Fig.9 Schematic illustration of heat check equipment.

4.3 実験結果

Fig.10に、QDX-HARMOTEX及びSKD61 ESRの焼入焼戻特性を示す。QDX-HARMOTEXは、本報告で得た知見に基づいて、M₂C炭化物が比較的多く析出する成分系となっており、SKD61 ESRと比較しても、565～570℃

以上の焼戻硬さが高い。すなわち、ダイカスト金型として実用的な硬さである40～50HRCを得るための焼戻し温度を比較的高温に設定することができ、これは金型使用時の軟化抑制にも効果があると考えられる。

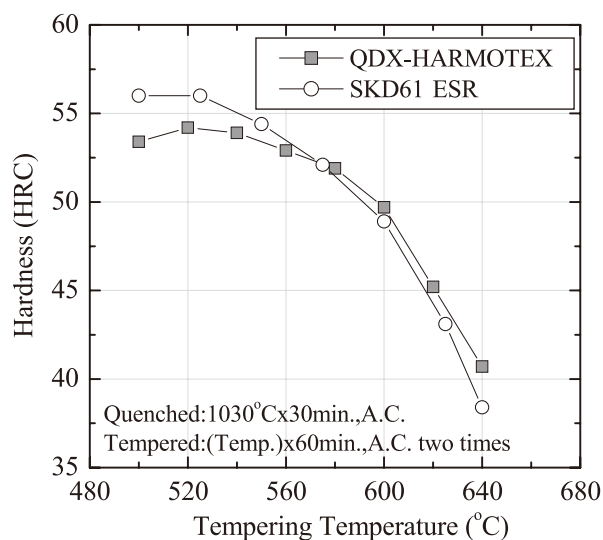


Fig.10 Effect of tempering temperature on hardness of QDX-HARMOTEX and SKD61 ESR.

Fig.11に、QDX-HARMOTEX及びSKD61 ESRの軟化抵抗性試験結果を示す。QDX-HARMOTEXは、SKD61 ESRと比較しても軟化の程度が少なく、非常に優れた高温軟化抵抗性を有していることを確認した。長時間使用しても金型の軟化が起こりにくいため、金型軟化による摩耗、ヘタリ及びヒートチェックの発生が抑制されることにより、金型の長寿命化が期待できる。

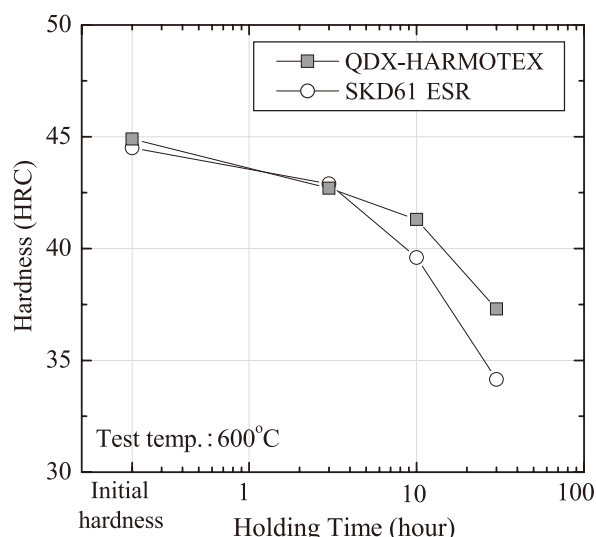


Fig.11 Effect of holding time on hardness of QDX-HARMOTEX and SKD61 ESR.

Fig.12に常温におけるシャルピー衝撃特性の例を示す。QDX-HARMOTEXは、合金成分及び製造プロセスの最適化により、成分偏析や炭化物偏析を軽減し、SKD61 ESR

よりも優れた靱性を有する。

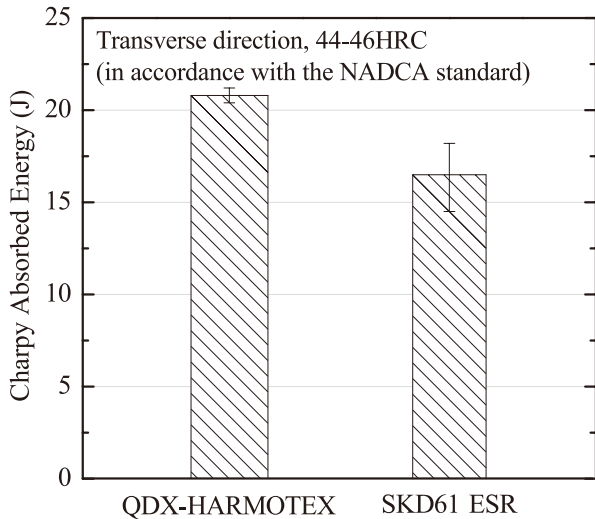


Fig.12 Results of Charpy impact test (R.T., 2mm-Vnotch).

Fig.13に、耐ヒートチェック試験の結果を示す。QDX-HARMOTEXは、SKD61 ESRと比較して、表面に生じたヒートチェックの平均深さ及び最大深さがともに抑制されており、優れた耐ヒートチェック性を有することがわかった。本結果から、高温強度と靱性の向上によって、耐ヒートチェック性が向上することを確認した。

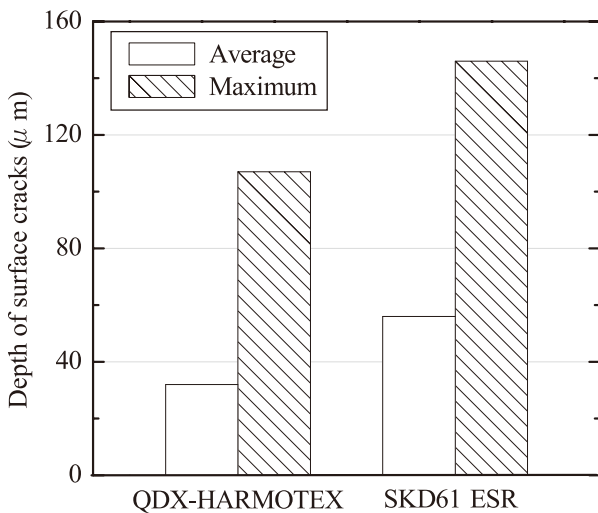


Fig.13 Results of Heat-check resistance test.

5. 結言

熱間工具鋼の高温強度（軟化抵抗性）や靱性に及ぼす合金元素の影響を調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 軟化抵抗性は、狙いの硬さを得るための調質時の焼戻温度を高く設定できるほど優れる傾向にあり、焼入焼

戻状態で M_2C 炭化物が安定となる成分設計が効果的であることがわかった。

- (2) 焼入焼戻状態で M_2C 炭化物を多く析出させるには、 $0.33C-0.12Si-0.60Mn-5.1Cr-2.0Mo-0.5V$ (mass%) をベースにすると、Cr及びMo量を低下させ、V量を増加させると効果的であることが分かった。
- (3) MoやVの過剰な添加は靱性を低下させる傾向にあることがわかった。
- (4) 本研究の結果を元に開発したQDX-HARMOTEXは、SKD61 ESRに対して優れた高温強度及び靱性を有し、その結果、優れた耐ヒートチェック性を有することを確認した。

QDX-HARMOTEXは、近年の金型使用環境の過酷化に対応するべく、ダイカスト金型に要求される諸特性を高いレベルで実現した鋼種であり、北米ダイカスト協会のGrade C鋼としても認定され、高い評価を得ている。QDX-HARMOTEXは、ヒートチェックの発生を抑制し、ダイカスト金型の寿命の更なる安定化及び向上に期待できる。

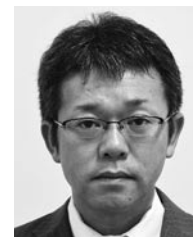
参考文献

- 1) 日本金型工業会:「ダイカスト金型寿命調査報告書」(1980)
- 2) (社)日本熱処理技術協会:「熱間工具鋼材料の表面層の改善研究部会共同研究成果発表会講演集」(1998)
- 3) 日原政彦:素形材, 49(2008)2, 18-24
- 4) 辻井信博:山陽特殊製鋼技報, 2(1995)1, 35-40
- 5) 辻井信博:山陽特殊製鋼技報, 7,(2000)1, 65-71
- 6) 河野正道:型技術, 28(2013)11, 28-31
- 7) NADCA DIE MATERIALS COMMITTEE: *Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptable Criteria for Die Casting Dies*, NADCA #207-2011A
- 8) 神谷久夫, 上原紀興:電気製鋼, 50(1979)3, 173-180
- 9) 佐藤忠雄:日特技報, 6(1970)1, 30-37

■ 著者



島村 祐太



館 幸生



中間 一夫