

技術資料


 Technical Data

SKD61 のヒートチェックにおよぼす延性と靱性の影響

河野正道*

Influence of Ductility and Toughness on Heat-Check of SKD61

Masamichi KAWANO

Synopsis

The influence of ductility, impact value and fracture toughness on thermal fatigue crack propagation of SKD61 which was treated to 45 HRC was investigated by heat shock test. These three properties are quite different between martensite and bainite. Other properties such as Young's modulus, coefficient of thermal expansion, thermal conductivity and high temperature strength are almost the same for different microstructures. No significant difference in crack propagation could be seen between martensite and bainite up to approximately 1.7 mm depth of crack in the heat shock test. Therefore, it could be concluded that shallow heat-check is not affected by ductility and toughness. Accordance with this result difference of crack growth rate between microstructures could not be seen in the small region of stress intensity factor range. Unlike gross cracking it could be assumed that heat-check is a crack propagation phenomenon under the condition of small stress intensity factor range.

1. 緒言

ダイカスト金型の表面は、溶湯の射出と離型剤の塗布によって加熱と冷却のサイクルに晒される。この結果、金型の表面には熱応力が作用し、ヒートチェックと呼ばれる熱疲労亀裂が発生する。鋳造品の表面品質を劣化させるだけでなく金型の大割れの原因ともなるヒートチェックを軽減することは、ダイカストの重要な課題である。

ヒートチェック軽減に有効な手段は、離型剤の種類や塗布方法の変更^{1)~4)}、ショットピーニング^{5), 6)}、金型材質の適正化、などである。金型材質としては、熱応力に影響するヤング率・熱膨張係数・熱伝導率⁷⁾、亀裂の発生や進展に影響する高温強度・延性・靱性、が挙げられる。一般的には、延性や靱性を高めればヒートチェックを軽減できると認識されている^{8)~11)}が、そうでない例も報告されている⁷⁾。

ヒートチェックにおよぼす延性や靱性の影響を議論する際は、それ以外の鋼材特性を共通にしておく必要がある。延性や靱性の調整を目的として鋼種や硬さを変えると¹²⁾、熱膨張係数・熱伝導率・高温強度も変わるため、ヒートチェックに延性や靱性が影響したかどうかの判断が難しい。また、金型には型締めによる機械応力も作用するため、熱応力のみによる疲労現象を評価することもダイカスト金型では難しい。

そこで本報では、延性や靱性が熱疲労亀裂におよぼす影響を正しく知るため、機械応力の関与を排し、延性と靱性の他の鋼材特性は同等の状態でのヒートチェック試験をおこなう。すなわち、熱応力だけで亀裂が進展してゆく挙動を、延性と靱性のみが異なる試験片間で比較する。外乱要因を排除したこのような条件下では、ヒートチェックに延性や靱性が影響するか否かを明確に判断できる。

2019年9月19日 受付

* 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

2. 実験方法

2. 1 供試材および調質

Table 1 に示す成分のSKD61を用いた。この素材を1030℃からの焼入れと585～610℃における複数回の焼戻しによって45.4±0.7HRCに調質した。焼入れ方案は、急冷と緩冷の2水準を設定した。マルテンサイト化させるための急冷方案では、6 bar に加圧した窒素ガスを炉内に強制対流させる。ベイナイト組織を得るための緩冷方案では、1030℃から600℃までを100℃/minで冷却後、600℃以下を0.5℃/minで緩速焼入れする。

上記の調質材から作製した試験片の組織をFig. 1に示す。焼入れ速度によって組織はマルテンサイトとベイナイトで顕著に異なるが、化学成分・焼入れ時のオーステナイト結晶粒径・調質硬さは同じである。

Table 1. Chemical composition (mass%).

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	N
SKD61	0.37	0.92	0.45	5.20	1.20	0.83	0.009

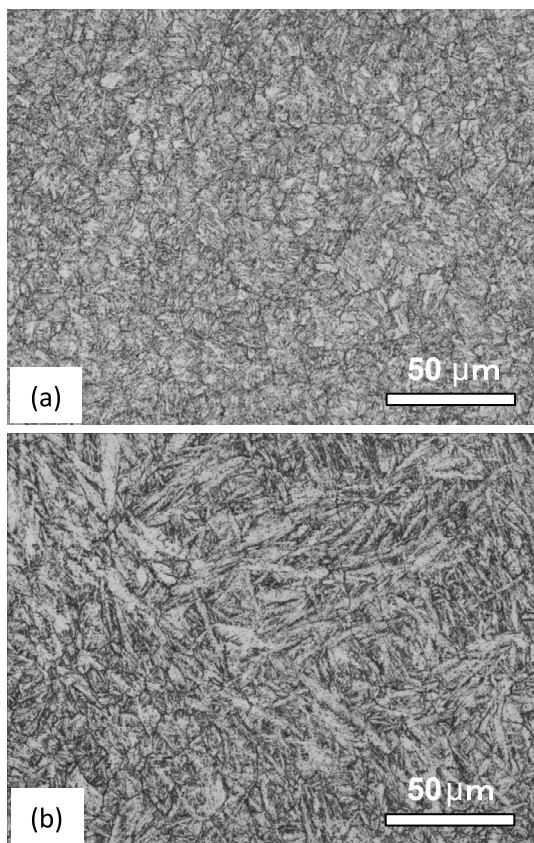


Fig. 1. Difference of microstructure by quenching method from 1030℃. (a) is martensite given by rapid cooling and (b) is bainite given by retarded cooling of 0.5℃/min in low temperature region.

2. 2 調査項目

熱応力に影響する因子として、ヤング率・熱膨張係数・熱伝導率を評価する。亀裂の発生や進展に関与する可能性がある要因として、高温強度・延性（絞り）・破壊靱性・衝撃値を調査する。また、亀裂が成長する様子を破壊力学的に比較するため、亀裂進展試験もおこなう。回転曲げ疲労強度と軟化抵抗も評価した。

耐ヒートチェック性は、加熱と冷却を繰り返す試験によって評価する。円柱状試験片の概形は直径72 mm 高さ50 mmである。片側の端面には先端Rが0.4 mmのVノッチを設けた。その面に対して、高周波による加熱と噴射水による冷却を30～3000サイクル付与し、ノッチ底に発生したヒートチェックの深さを評価する。1サイクルは17 secで、加熱温度はダイカスト金型を超えないよう580℃とした⁷⁾。3 secの水冷による最低到達温度は約60℃であり、復熱によって120～150℃となった時点で次のサイクルに移る。

また、熱疲労挙動の評価によく用いられる軸力型熱疲労試験もおこなう。平行部が直径10 mm長さ25 mmの棒状の試験片を150℃から20℃/secで580℃に加熱し、580℃での3 sec保持後に6℃/secで150℃に冷却する。この97 secの熱履歴を3000サイクル付与し、その間の荷重低下を評価する。結果を実際のヒートチェックと比較することによって、耐ヒートチェック性の評価方法としての軸力型熱疲労試験の妥当性を検証する。

3. 実験結果

3. 1 鋼材特性

熱応力に影響する因子として、ヤング率・熱膨張係数・熱伝導率をそれぞれFig. 2～Fig. 4に示す。これらの特性はマルテンサイトとベイナイトで同等である。また、ポアソン比も組織によらず0.29であった。

亀裂の発生や進展に関与する可能性がある要因とし

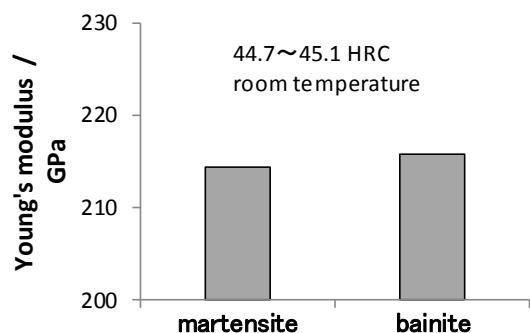


Fig. 2. Young's modulus.

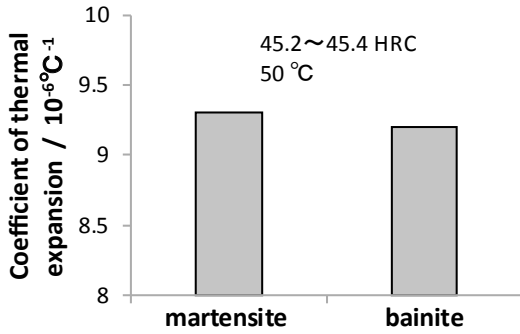


Fig. 3. Coefficient of thermal expansion.

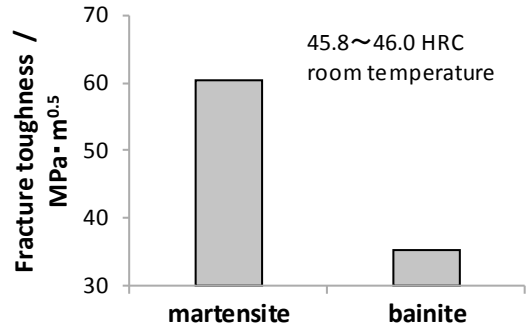


Fig. 7. Fracture toughness.

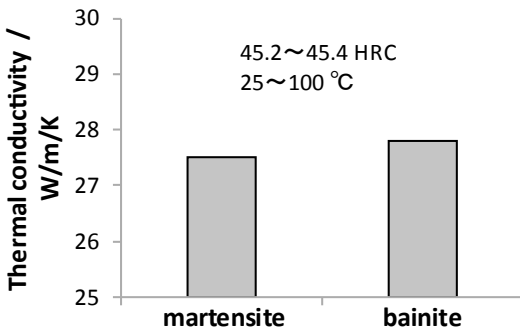


Fig. 4. Thermal conductivity.

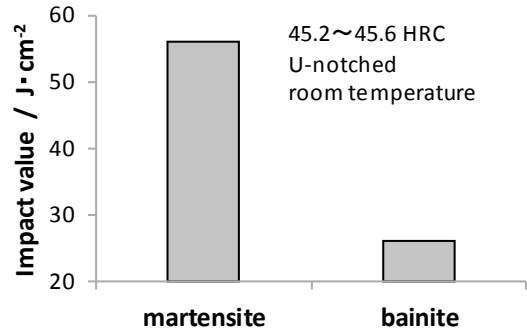


Fig. 8. Impact value.

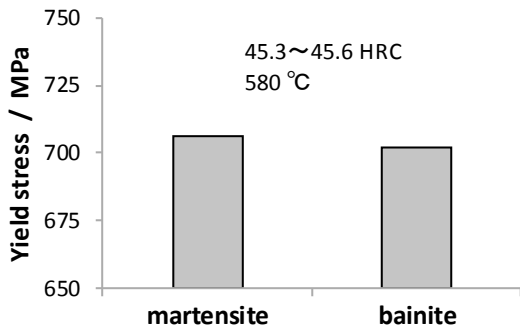


Fig. 5. High temperature strength.

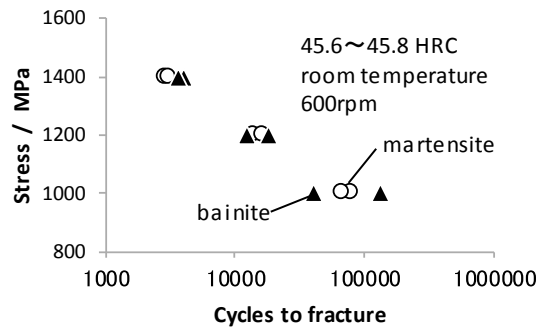


Fig. 9. Strength of rotating bending fatigue.

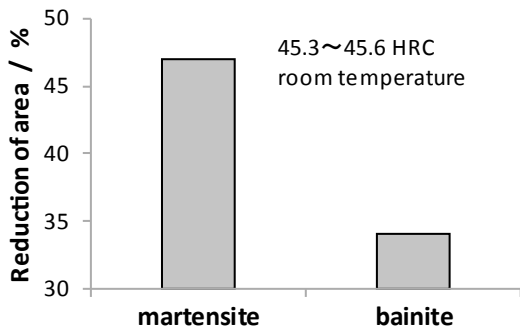


Fig. 6. Reduction of area as ductility.

て、高温強度・延性（絞り）・破壊靱性・衝撃値をそれぞれ Fig. 5 ~ Fig. 8 に示す。耐力はマルテンサイトとベイナイトで同等である。引張強さも、組織によらず 860 ~ 876 MPa であった。一方、延性（絞り）・破壊靱性・衝撃値は組織によって大きく異なり、ベイナイトの方が

大幅に低い。破壊靱性の $35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ は、ダイカスト金型としての使用を推奨しにくい低さである。逆に、マルテンサイトの特性は理想的な高さである。以上より、今回の比較実験では、延性と靱性が狙い通りに作り分けられていることを確認した。

回転曲げ疲労試験の結果を Fig. 9 に示す。時間強度におよぼす組織の影響はほとんど認められない。900 MPa では、マルテンサイトもベイナイトも 10^7 サイクルで破断しなかった。硬さが同じであれば、両振りの荷重制御における機械疲労強度は組織によらず同等である。

また、580 °Cでの軟化抵抗にも組織の影響はほとんど認められなかった。45.5 HRC (452 HV 相当) のマルテンサイトとベイナイトは、3 H 保持後が 44.9 ~ 45.1 HRC (445 ~ 447 HV 相当) に、24 H 保持後は 41.2 ~ 41.3 HRC (404 ~ 405 HV 相当) に軟化したが、組織に

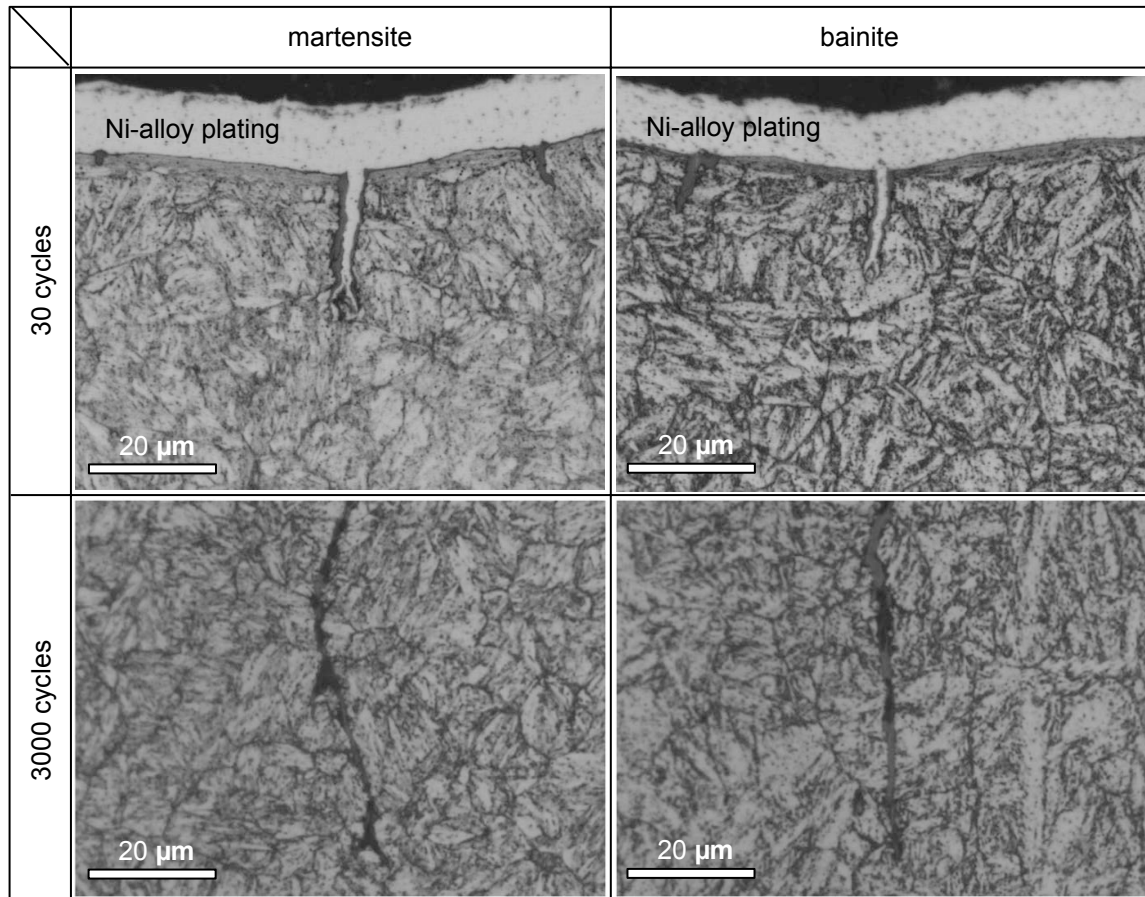


Fig.10. Crack tip at bottom of notch of specimens in heat shock test.Specimens were heated to 580 °C then forced water shower cooled. Next heat cycle starts at approximately 150 °C. Ni-alloy plating was treated after test.

よる顕著な差はなかった。

ヒートチェックの発生と進展の駆動力となる熱応力 σ は、式 (1) および式 (2) で表現される。

$$\sigma = E \alpha \Delta T \tag{1}$$

$$\Delta T \propto \lambda \tag{2}$$

ここで、 E はヤング率、 α は熱膨張係数、 ΔT は温度差、 λ は熱伝導率である。Fig. 2 ~ Fig. 4 に示した通り、 $E \cdot \alpha \cdot \lambda$ は組織によらず同等である。すなわち、熱疲労試験の条件が共通であれば、温度推移や熱応力はマルテンサイトとベイナイトでほぼ同じになる。組織による高温強度の差もほとんど認められない (Fig. 5)。

以上より、マルテンサイトとベイナイトを比較する後述のヒートチェック試験においては、熱応力と高温強度が同等の条件下での亀裂進展を評価できる。しかも、ポアソン比・回転曲げ疲労強度・軟化抵抗も組織によらずほぼ同じであった。組織によって大きく異なる特性は延性と靱性だけである。したがって、延性や靱性がヒートチェックに関与したかどうかを直接的に判断できる。

3. 2 ヒートチェック

30 サイクル後と 3000 サイクル後の熱疲労亀裂を Fig. 10 に示す。30 サイクルの時点で、浸透探傷では検出できない 0.02 mm 程度の浅い亀裂が既に発生していた。いずれのサイクル数においても、亀裂の経路は旧オーステナイト結晶粒界でない割合が高く、ヒートチェックが粒界破壊とは必ずしも言えないことが分かる。

熱サイクル数に対する亀裂の深さを Fig. 11 に示す。亀裂が成長してゆく様子は、マルテンサイトとベイナイトでほとんど変わらない。3000 サイクルでは 1.6 ~ 1.9 mm の深さまで亀裂が進展した。この様子を Fig. 12 に示す。マクロ的には、亀裂の経路はほぼ垂直である。

3000 サイクル後の硬さは、ノッチ底付近の表面下 0.04 mm 位置が 438 ~ 446 HV (44.3 ~ 45.0 HRC 相当)、深さ 2 ~ 5 mm の領域は 445 ~ 452 HV (44.9 ~ 45.5 HRC 相当) であった。最表層の硬度低下は僅少である。マルテンサイトとベイナイトで軟化量に明確な差異は認められず、軟化抵抗が組織によらず同等であったことに対応した。ヒートチェックの発生と進展において、表層の顕

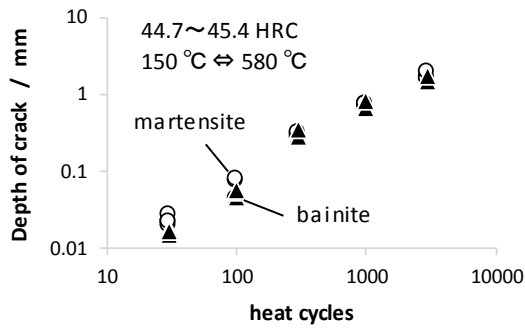


Fig. 11. Crack propagation from bottom of notch.

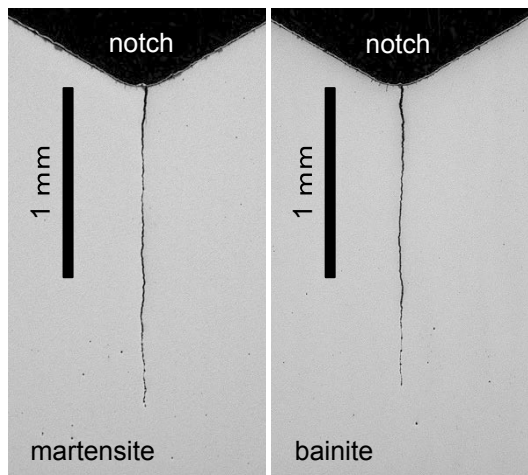


Fig. 12. Crack after 3000 cycles of heat shock test.

著な軟化が必須の要件ではないことも分かる。

今回の検証では、マルテンサイトとベイナイトに組織を作り分けることで延性や靱性には大差を与えると同時に、その他の特性をほぼ同じにした。焼入れ時のオーステナイト結晶粒径も同等である。また、亀裂の発生と進展は熱応力のみ依存し、機械応力は作用していない。そういった条件下で、亀裂進展挙動には組織の影響がほとんど認められなかった。したがって、ヒートチェックには延性や靱性がほぼ関与しないと判断される。

4. 考 察

4. 1 亀裂進展

SKD61 の亀裂進展速度 da/dn と応力拡大係数範囲 ΔK の相関におよぼす組織の影響を Fig. 13 に示す。マルテンサイトとベイナイトでは延性や靱性に大差があった (Fig. 6 ~ Fig. 8) が、 ΔK と da/dn が直線関係になる Paris 則¹³⁾ は組織によらず同じである。同様の知見は SKD62 でも報告されている¹⁴⁾。以上より、Fig. 11 において亀裂深さに組織がほとんど影響しなかった理由は、ヒートチェックが Paris 則にしたがうため、と理解される。

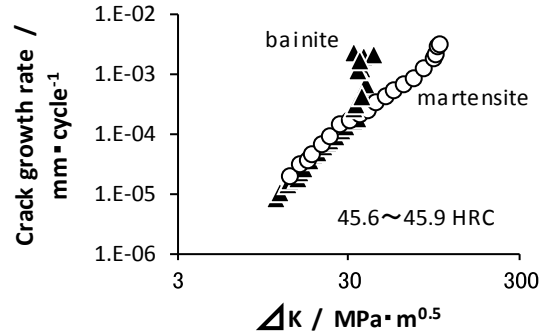


Fig. 13. Crack growth behavior at room temperature.

本報では、ノッチ底から試験片内部へと亀裂が進展してゆく様子を評価した。一方、ダイカストでは、意匠面におけるヒートチェックの分布状態や所定面積内の総長が問題になることも多い。このため、金型内部への亀裂進展に相当する本報の知見は、意匠面のヒートチェック分布には適用できないとの見方もできる。しかし、組織がマルテンサイトとベイナイトで異なるダイカスト金型においても、意匠面におけるヒートチェックの状態は同等であった⁷⁾。以上より、ヒートチェックには、延性や靱性がほとんど影響しないと結論付けて良いであろう。

一方で、ダイカスト金型の亀裂深さが延性や靱性に影響される可能性もある。この理由は、機械応力の関与である。型締めでは、金型は強制的に弾性変形させられる。こうして発生した機械応力が単独で、あるいは熱応力に加算されて ΔK が $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ を超えると (Fig. 13)、低靱性のベイナイトの方が亀裂は深くなる。熱応力による疲労がヒートチェックであるとの見地からは、この「機械応力が関与した亀裂」をヒートチェックとは扱えない。しかし、現実的には、意匠面からの亀裂を成因によらず「ヒートチェック」と呼ぶ。また、熱応力と機械応力の関与を分離評価することは難しい。こういった現状から、ダイカスト金型においては、見かけ上「延性や靱性がヒートチェックに影響する」こともあると考えられる。

4. 2 軸力型熱疲労試験

ヒートチェックは熱疲労であるため、軸力型熱疲労試験で鋼材の耐ヒートチェック性を評価できる、という意見は多い。その軸力型熱疲労試験の結果を Fig. 14 に示す。丸棒状の試験片を $580 \text{ }^\circ\text{C}$ に加熱して両端を拘束し、以降は $150 \text{ }^\circ\text{C}$ への緩冷と $580 \text{ }^\circ\text{C}$ への緩熱を繰り返した。

ベイナイトでは 300 サイクル以降の荷重低下が顕著であり、試験片の軸方向と直交する大きな亀裂を現認した 1966 サイクルで試験を打ち切った。マルテンサイトには、3000 サイクル後も目視で確認できる亀裂は発生

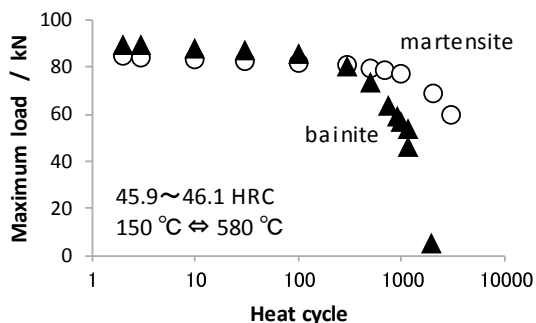


Fig.14. Thermal fatigue behavior in standard axial-force-type test of round bar.

していなかった。この試験結果が耐ヒートチェック性に相当するとの認識に立てば、マルテンサイトはベイナイトより良好と判断される。一方、ヒートチェック試験では、組織によらず亀裂の深さが同等であった (Fig. 11)。

以上より、軸力型熱疲労試験は耐ヒートチェック性の評価には適さないとと言える。この試験では、熱応力は熱伝導率の影響をほとんど受けず、熱応力の源はヤング率と熱膨張係数である。今回の検証では、ヤング率と熱膨張係数は組織によらず同等なため (Fig. 2, Fig. 3)、熱応力にも組織による差は発生しない。高温強度もマルテンサイトとベイナイトでほぼ等しい (Fig. 5)。そういった条件において、Fig. 14 の荷重低下挙動は組織によって異なった。すなわち、軸力型熱疲労試験では延性や靱性の影響 (Fig. 6 ~ Fig. 8) が強く表れる。この点が、Paris 則にしたがうヒートチェックとの決定的な違いである。

5. 結 言

45 HRC に調質した SKD61 の耐ヒートチェック性におよぼす延性 (絞り) と破壊靱性と衝撃値の影響を調査した。延性と靱性は、焼入れ速度の制御で組織をマルテンサイトとベイナイトに作り分けることによって調整した。ヒートチェックの発生と進展は熱応力のみ依存し、機械応力は関与しない。得られた知見を以下に示す。

1. 焼入れ時のオーステナイト結晶粒径と、ヤング率・ポアソン比・熱膨張係数・熱伝導率・高温強度・軟化抵抗・回転曲げ疲労強度は、マルテンサイトとベイナイトで同等である。
2. ヒートチェック試験のノッチ底における亀裂進展の様子は、マルテンサイトとベイナイトでほとんど変わらない。したがって、延性と靱性はヒートチェックにはほぼ影響しないと結論付けられる。
3. 亀裂進展速度の Paris 則は、マルテンサイトとベイ

ナイトでほとんど変わらない。この結果は、ヒートチェック試験の亀裂深さに組織の影響が表れないことに対応する。すなわち、ヒートチェックの進展は Paris 則にしたがう、と理解される。

4. 軸力型熱疲労試験では、延性や靱性の高いマルテンサイトの方がベイナイトよりも亀裂の発生や進展が遅い。この結果は、ヒートチェックに組織の影響が表れない事実と反する。軸力型熱疲労試験は、耐ヒートチェック性の評価には適さないと考えられる。
5. ダイカストでは型締め機械応力が作用するため、熱応力のみ負荷よりも ΔK の大きくなる可能性がある。その場合は、見かけ上、ヒートチェックに延性や靱性が影響する結果になると考えられる。

(文 献)

- 1) 菅野友信, 植原寅蔵: ダイカスト技術入門, 日刊工業新聞社(1997), 123.
- 2) 井澤龍介: 型技術, 21(2006), 5, 43.
- 3) 古川雄一, 佐藤理通, 吉倉冬彦, 植林秀悟: 2004日本ダイカスト会議論文集(2004), 63.
- 4) 株式会社青木化学研究所, ダイカスト用離型剤・潤滑剤: <http://www.lubrolene.co.jp/industrials/release_agent_for_die_cast.html> 最終アクセス日 2019/9/19.
- 5) 小林祐次, 松井彰則: 2016日本ダイカスト会議論文集(2016), 23.
- 6) 小林祐次, 松井彰則: 2018日本ダイカスト会議論文集(2018), 23.
- 7) 河野正道: 素形材, 59(2018), 3, 10.
- 8) 田部博輔: 型技術, 18(2003), 12, 98.
- 9) 田部博輔: 型技術, 19(2004), 1, 100.
- 10) 吉田潤二, 今井克哉, 村田敬一, 山下広: 2004日本ダイカスト会議論文集(2004), 13.
- 11) 長澤政幸, 久保田邦親, 田村庸, 横尾英俊: CAMP-ISIJ, 12(1999), 1175.
- 12) 田村庸: CAMP-ISIJ, 7(1994), 1730.
- 13) 社団法人日本材料学会編: 材料強度学(1994), 124.
- 14) 山田春彦, 猿木勝司, 小川一義: 豊田中央研究所 R&Dレビュー, 27(1992), 4, 37.



河野正道