Al ダイカスト金型に生じる残留応力 とヒートチェックの関係[†]

岩 永 省 吾* 榊 原 雄 二** 小 長 哲 郎*
中 村 元 志** 神 谷 孝 則***

Relationship between Heat Checking and Residual Stress in Aluminum Die Casting Dies

by

Shogo IWANAGA*, Yuji SAKAKIBARA**, Tetsuro KONAGA*,
Motoyuki NAKAMURA** and Takanori KAMIYA***

Heat Checking is a very important problem limiting the service life of aluminum die casting dies. In this paper, the relationship between the surface residual stress, which varies with die casting operation, and the initiation and propagation of heat checking is described.

Measurement of residual stress and observation of heat checking were carried out on a cover and an ejector production die made by SKD61 (AISI H13). The surface residual stress was measured by X-ray and the heat checking was observed in detail by SEM after every prescribed shots from the beginning to the end of the die service life. The mechanism of residual stress variation and the effects of the position and the cavity shape of dies on the residual stress variation and the initiation and propagation of heat checking were clarified.

The following conclusions were drawn from this investigation.

(1) The surface residual stress, which was compressive before die casting operation, changed immediately toward tensile side and saturated in the early stage of operation, say at only 50 shots. This fact is considered to result from the following process; the surface layer of dies is rapidly heated by molten aluminum. The thermal expansion due to this rapid heating is restrained by the substratum and thus the surface layer is subjected plastically to compressive strain. After cooling, the surface residual stress changes toward tensile side and saturates at some tensile value in the early stage of die casting operation.

(2) The value of saturated tensile residual stress depended on the position and the shape of die cavity. This experimental result is caused by the magnitude of thermal load and restraint.

(3) On the gate side of die cavity, in which the saturated tensile residual stress is large because of large thermal load, microcracks initiated in the saturated period. But on the position apart from the gate, in which the saturated tensile residual stress is small because of small thermal load, the residual stress did not decrease and microcracks did not initiate even at the end of die service life.

(4) In the later stage of crack propagation on the gate side of die cavity, heat checking was observed by the naked eye and the residual stress decreased to zero.

キー・ワード：ヒートチェック，Al ダイカスト，実用金型，残留応力

1 緒 言

Al ダイカスト金型のキャビティ面には，その使用に伴ってヒートチェックと呼ばれる網目状の細かいき裂が生じ，古くから問題になっている¹⁾。すなわち，金型にヒートチェックが発生すると，その模様が製品に転写され，外観，形状，寸法精度あるいは機能の面から不適格となったり，生産にあたっては，離型抵抗の

増大，金型保全工数・費用の増加あるいは安全性などの面からも不都合が生じる。特に，最近では，大型で複雑な形状の部品までダイカストで生産されるようになり，金型加工費が高価なこともあって，金型の長寿命化が重要な課題となっている²⁾。それにもかかわらず，ヒートチェックについては，今までに，十分な現象の解明や対策がなされているとはいいがたい。

[†] 原稿受理 昭和62年3月20日 Received Mar. 20, 1987

* 正 会 員 (株)豊田中央研究所 愛知県愛知郡長久手町, Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi

** (株)豊田中央研究所 愛知県愛知郡長久手町, Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi

*** アイシン精機(株) 刈谷市朝日町, Aisin Seiki Co., Ltd., Asahi-cho, Kariya

そこで、筆者らは、実際に使用されている Al ダイカスト金型において生じているヒートチェック現象を解明するために、その使用過程における表面の詳細な観察と表面残留応力の測定を行っている。そして、今までに、ヒートチェックの発生起点として、使用過程で生じたピットや波状模様、種々の加工傷、キャビティの形状に起因するひずみ集中部があること。表面き裂の数と長さは、き裂進展期間の前半に増加して、その後、飽和する傾向にあること。そして、表面の残留応力については、使用期間の非常に早い時期に大きな引張りに変化することなどがわかった³⁾。この報告以前においては、実際の Al ダイカスト金型や試験片について、その使用過程あるいは繰返し加熱、冷却過程で表面残留応力を測定した例も二、三みられるが⁴⁾⁵⁾、それらによれば、加熱冷却を十分繰返しした後においても残留応力は引張りに変化していないようである。また、最近になって、筆者らが先に報告したのと同様に、金型使用過程の極く初期に表面残留応力は引張りに変化すると⁶⁾の報告もなされている。しかし、これらの報告においては、ヒートチェックの発生および進展と残留応力変化との関係は明らかにされていないと言いがたい。

そこで、ここでは、実用金型のキャビティ面において、使用過程で変化する残留応力に注目して、この残留応力とヒートチェックの発生・進展との関係を、使用前から廃型になるまでの全期間にわたって明らかにした。また、金型キャビティ面の位置的あるいは形状的な違いが残留応力あるいはヒートチェックに及ぼす影響についても明らかにした。

2 実験方法

2.1 対象金型

対象とした金型は、型締力 4900 kN の鋳造機用の SKD61 製金型で、2 個取りで使用されているうちの 1 組の固定型と可動型である。これらの金型の使用条件を Table I に、金型の外観を Fig. 1 に示す。以後、固定型を金型 A、可動型を金型 B と略称する。これら

Table I. Operational conditions of die casting dies.

Die material	SKD 61 (AISI H13)
Hardness	HRC 43~46
Surface roughness	Rz=1.0~1.5
Die casting machine	4900 kN
Die dimension	240×300×50 mm ³
Preheating of die	Preheating by steam
Cycle time	50 sec.
Al alloy	ADC 12
Temp. of molten alloy	640°C

Fig. 1. Schematic drawings of die casting dies and positions of measurement.

の金型のゲートに近い位置とゲートから離れた位置について、使用前から廃型となった 127 000 ショットまで、所定のショット数鋳造した後ごとに、表面の残留応力の測定と表面の詳細な観察とを実施した。測定対象位置は、Fig. 1 に示すように、金型 A の場合は両位置とも平坦部であり、金型 B の場合は両位置とも環状凸部の頂上部である。

2.2 測定観察方法

残留応力は、それぞれの測定位置で上下方向および水平方向について、CrK α 線を用いた X 線により Table II に示す条件で 4 点入射の $\sin^2\psi$ 法により測定した。また、表面の観察は、観察対象位置からそのつど採取した 1 段レプリカについて SEM を用いて実施した。

Table II. Conditions of X-ray stress measurement.

X-ray	CrK α
Voltage	30 kV
Current	10 mA
Filter	V foil
Irradiation area	2.5×6 mm ²
Divergent angle of Soller slits	0.69 deg.
Scanning speed of detector	2 deg./min.
Time constant	16 sec.

3 測定観察結果

3.1 金型 A (固定型) の場合

金型 A についてのショット数に伴う表面残留応力の

Fig. 2. Variation of residual stress with number of shots. (Die A. Flat surface.)

変化を Fig. 2 に示す. 金型使用前の表面残留応力はゲート側およびゲートから離れた位置の両方向とも機械加工により, $-500 \sim -700$ MPa 程度の圧縮となっていた.

しかし, 表面残留応力は金型の使用により引張側に変化し, 35ショットという非常に少ないショット数で,

すでに飽和している. その飽和値は上下, 水平方向ともほぼ同じ位の値である. つぎに, ゲート側とゲートから離れた側とを比べると, ゲート側の方が大きく, 両方向とも約 850 MPa であり, ゲートから離れた側では両方向とも約 350 MPa であった.

ゲート側においては, 両方向とも 21 000 ショット

Fig. 3. Variation of residual stress and crack propagation from the pits. (Die A. Flat surface.)

Fig. 4. Variation of residual stress and crack propagation from the indentation. (Die A. Flat surface.)

まで、ほぼこの飽残留応力値のままである。残留応力が飽和している期間の 2000 ショットの時点においては、Fig. 3 (a)および Fig. 4 (a)にその例を示すようにピットや圧痕などから、SEM でやっと観察できる程度の微視的なき裂が発生していた。これらの微視的なき裂はショット数が多くなるにつれて、Fig. 3 (b), (c) および Fig. 4 (b), (c)にその例を示すように、その数を増すとともに、進展あるいは結合し、42 000 ショットの時点では、Fig. 3 (d)および Fig. 4 (d)に示すように肉眼でも観察できるようになった。この時点では、ゲート側の両方向とも残留応力は減少しはじめており、その後、ショット数とともに、減少して零に近づく傾向にある。廃型となった 127 000 ショットの時点では、飽残留応力の半分以下の値しかもっていない。

一方、金型 A のゲートから離れた位置においては、その残留応力は、Fig. 2 に示すように 35 ショットから廃型になった 127 000 ショットまで、低い値のままであり、ゲート側とは異なった挙動を示している。そして、127 000 ショットの時点においてもヒートチェックは観察されなかった。

3・2 金型 B (可動型) の場合

金型 B についてのショット数に伴う表面残留応力の変化を Fig. 5 に示す。金型 B の場合も、使用前の残留応力はゲート側およびゲートから離れた位置において、両方向とも $-500 \sim -800$ MPa の圧縮であった。そして、わずか 17 ショット使用したあとの測定では引張側に変化し、すでに、飽和している。その値はゲート側

Fig. 5. Variation of residual stress with number of shots. (Die B. Circular convex part.)

の水平方向が約 800 MPa、上下方向が約 500 MPa であった。また、ゲートから離れた位置の水平方向は約 400 MPa、上下方向では約 100 MPa であり、金型 A の場合と同様、両方向ともゲート側の方が大きな値に飽和していた。しかし、この金型の場合には二つの測定位置とも測定方向による違いがみられ、水平方向の方が上下方向より大きな値に飽和していた。

ゲート側においては、飽和期間の 5 100 ショットの時点で、Fig. 6 (a)にその例を示すように、加工傷や圧痕などから微視的なき裂が発生しているのが観察された。12 000 ショットになると水平方向の残留応力は減少しはじめ、21 000 ショットになると、上下方向の残留応力も減少しており、Fig. 6 (b), (c)に示すようにき裂はさらに進展している。そして、42 000 ショットでは、残留応力も、ほぼ、零になっており、Fig. 6 (d)に示すようにき裂の幅も非常に大きくなっている。

Fig. 6. Variation of residual stress and crack propagation from the machining scratches. (Die B. Circular convex part.)

一方、飽和した残留応力の値が小さいゲートから離れた位置においては、127 000 ショット使用して廃型となった後でも、残留応力は減少していないし、ヒートチェックもみられなかった。

4 残留応力変化とヒートチェックの関係

4.1 使用前の表面残留応力

つぎに、残留応力の変化とヒートチェックの関係について述べる。Fig. 7 は、ゲート側における使用に伴う残留応力の変化とヒートチェックの発生・進展状況を模式的に示した図である。使用の全期間を残留応力変化の観点から、使用前、引張りに変化する期間、飽和している期間および減少する期間の四つに分けることができる。

Fig. 7. Typical variation of residual stress on die casting dies.

まず、使用前の金型の表面残留応力は、金型製造工程における機械加工や油砥石による仕上げ加工により、Fig. 2 および Fig. 4 に示したように、 $-500 \sim -800$ MPa 程度の圧縮の値をもっていた。これは種々の加工により、最表面層に塑性流動が生じたためと考えられ、圧縮残留応力をもつ層の厚さは、せいぜい、 $10 \mu\text{m}$ 程度と非常に薄いことが知られている。

Fig. 2 および Fig. 5 に示したように、金型A、金型Bともにゲート側およびゲートから離れた位置とも、上下方向の方が水平方向よりも圧縮で大きな値をとっている。これらの部位においては、最終的なみぎき方向が、主として水平方向であることを考えると、みぎき方向と直角な方向の方が大きな圧縮の残留応力をもっていることがわかる。

4.2 使用に伴う表面残留応力の引張側への変化

金型Aの場合は35ショット、金型Bの場合は17ショットまでに、表面の残留応力は圧縮から引張りに変化したし、ほぼ、飽和値に達している。この残留応力の変化機構について考えてみる。

いま、金型の表面部分だけをとりだして、この部分の応力とひずみの関係を模式的に示すとFig. 8のようになる。高温のAl溶湯がキャピティ面に接触すると金型最表面は急激に加熱され膨張しようとするが、下

Fig. 8. Stress-strain curves at the surface of dies.

層部では、まだ温度が低いので最表面層の膨張を拘束することになる。このとき、最表面には圧縮ひずみが生じ、この値が大きいと最表面層は圧縮塑性変形することになる。その後、製品がとりだされて金型が冷却されると、金型の最表面層はすでに圧縮塑性変形により収縮しているため、今度は下層部から引張られることになり、引張りの残留応力が生じる。そして、金型が徐々に室温まで冷却されたあとでも、引張りの残留応力が測定されるようになる。また、このような加熱、冷却のサイクルが繰り返されると、材料の加工硬化やバウシinger効果などの複合効果が定常状態になり、残留応力も熱ひずみの大きさや材料の強度などに応じた値に飽和するものと考えられる。なお、残留応力が変化した直後あるいは飽和期間の初期には、SEMによる観察では、微視的なき裂も発生していなかった。

4.3 飽和残留応力の大きさと飽和期間

これらの飽和した引張残留応力は金型A、金型Bともゲート側における方がゲートから離れた位置におけるよりも大きな値をとっていた。これは、Al溶湯によって金型表面に与えられる熱負荷が大きいゲート側の方が、Fig. 8における温度差 ΔT が大きくなり、したがって、全ひずみ幅 $\Delta \epsilon_t$ も大きくなるため、大きな引張りの値に飽和したものと考えられる。

また、金型Bにおいては、ゲート側においても、ゲートから離れた位置においても、測定方向によって飽和残留応力の値が異なっている。すなわち、いずれの測定位置においても、水平方向の方が上下方向よりも大きな引張残留応力に飽和している。これは測定対象位置が環状凸部であり、両位置とも、水平方向が環状凸部の長軸方向、上下方向が短軸方向となっており、長軸方向の場合より短軸方向の場合の方が拘束がゆるやかなため、高温で生じる熱ひずみが小さく、そのため上下方向の方が飽和引張残留応力の値も小さくなったものと思われる。

残留応力が飽和している期間は、いずれの金型においてもゲート側の方が短く5 000～21 000 ショットまでである。そして、これらの位置においてはSEM観

察の結果, 2000~5000 ショットの時点で, 微視的なき裂が発生しているのが観察された。一方, 飽和引張残留応力の小さいゲートから離れた側においては, 両金型とも廃型となった 127 000 ショットの時点でも, 残留応力の減少はみられないし, き裂も発生していなかった。

4・4 引張残留応力の減少

金型Aのゲート側においては, 両方向とも, 21 000 ショットから残留応力が減少しはじめている。そして, 42 000 ショットの時点では肉眼でもヒートチェックが観察され, 127 000 ショット後には約 250 MPa まで減少していた。金型Bのゲート側においては, 水平方向が 5100 ショットから, 上下方向が 12 000 ショットから残留応力は減少しはじめている。そして, 21 000 ショットになると, 肉眼でもヒートチェックが観察されるようになり, 42 000 ショット以降は, 残留応力もほぼ零となっている。そこで, 長さ 0.2 mm 以上のき裂を対象としたき裂密度 $\rho_{0.2}$ と残留応力のショット数に対する変化を求め, その結果を Fig. 9 に示す。この図は, 金型Bのゲート側における 1000 ショット以降の上下方向のき裂密度と上下方向のき裂に関する水平方向の残留応力について示した。2000 ショットの時点で 0.2 mm 以上のき裂が現れ, ショット数とともにき裂密度は大きくなっていく。12 000 ショットでは, 残留応力も減少しており, 42 000 ショット以降になると残留応力もほぼ零になり, き裂密度もほぼ飽和している。

Fig. 9. Relation between crack density and residual stress for die B.

これらのことから, 飽和していた引張残留応力が減少する過程は, ヒートチェックが進展し, 金型表面が不連続となり引張残留応力をもてなくなったためと考

えられる。なお, 金型Aで, 飽和引張残留応力が零に減少しないのは, 溶損により金型の最表面が削り取られたためと考えられる。

5 結 言

実用金型のキャビティ面において, 使用前から廃型になるまでX線による残留応力測定と SEM による詳細な観察を繰り返し実施して, 残留応力の変化とき裂の発生・進展との関係について検討したところ, 次のことが明らかとなった。

(1) 金型キャビティ面の残留応力は, 使用前には, 機械加工などのため圧縮の値であるが, 使用のきわめて初期, 50 ショット程度までには引張りに変化して飽和する。これは, 金型最表面が Al 溶湯により急加熱され, その膨張が下層部により拘束されて圧縮塑性変形を生じるため, 冷却後は最表面の残留応力は引張りに変化し飽和するものと考えられる。

(2) この飽和引張残留応力の値は, キャビティ面の位置あるいはキャビティの形状に依存する。これは熱負荷あるいは拘束の大小によるものと思われる。

(3) 熱負荷が大きく, 飽和引張残留応力も大きいゲート側においては, この飽和期間中に, 熱ひずみの繰返しにより微視的なき裂が発生する。しかし, 熱負荷が小さく, したがって飽和引張残留応力も小さいゲートから離れた位置においては, 廃型になっても残留応力は減少せず, 微視的なき裂も発生していなかった。

(4) さらに, ショット数が多くなると, ゲート側においては, き裂が進展し, 肉眼でもヒートチェックが観察できるようになる。そして, 残留応力も減少して零に近づく。

(昭和61年12月10日 第24回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) H. H. Doehler, 祝田謙一, 小河原和夫訳, “ダイカスティング”, p. 263 (1963) 日刊工業新聞社。
- 2) A. M. Schindler, J. Czikel and E. Krainer, Transaction, 11th SDCE, Paper No. G-T81-091 (1981).
- 3) 岩永省吾, 榊原雄二, 小長哲郎, 中村元志, 神谷孝則, 材料, **36**, 604 (1987).
- 4) 鈴木宗男, 石原紋三郎, 宮路英敏, ダイカスト, No. 52, 21 (1973).
- 5) W. Ruhs, F. Rturm, E. Drössler and N. Spörk, Berg Hutennmann mnatsh, **129**, 147 (1984).
- 6) 浦部鉄平, 福島聖博, 坂本勝美, 日本ダイカスト会議論文集, JD86-10 (1986).
- 7) 岩永省吾, 並川宏彦, 青山咸恒, 材料, **21**, 1106(1972).