

熱間金型用鋼（SKD61）の熱疲労特性に及ぼす 微粒子ピーニングの効果

材料技術部 構造材料チーム 高 木 眞 一
材料加工チーム 薩 田 寿 隆
構造材料チーム 佐 野 明 彦
熊 谷 正 夫

熱間金型用鋼（SKD61）の熱疲労き裂の発生と成長挙動に及ぼす微粒子ピーニング処理の影響を評価した。843K への加熱と 373K への冷却を 2000 サイクル繰り返す熱疲労試験を施した結果、微粒子ピーニング処理した試料の熱疲労き裂の発生頻度は未処理材と比較して明らかに減少していた。また、これと同様に微粒子ピーニング処理後にラジカル窒化処理を施した試料も優れた熱疲労特性を示した。微粒子ピーニング処理を施した試料を透過型電子顕微鏡を用いて観察した結果、表面近傍には結晶粒径が 100nm 未満のナノ結晶組織が生成しており、843K での焼鈍あるいはラジカル窒化処理後も結晶粒径が 100nm 前後の超微細粒組織を維持していた。このようなマイクロ組織の微細化が熱疲労き裂の発生と成長を抑制したと考えられる。

キーワード：ナノ結晶，ショットピーニング，ヒートチェック，ヒートクラック，ダイカスト

1 はじめに

微粒子ピーニング処理は、直径数十マイクロン程度の微粒子を 200m/sec 程度の高速で投射する一種のショットピーニング加工である。粒子径が小さいことに起因して、多段、多方向、非同期の大歪み加工が表面近傍に集中して起こるために、表面近傍にナノ結晶組織が生成することが報告されている¹⁾²⁾。このような強加工によって生成されるナノ結晶組織は約 873K まで粗大化することなく維持されるという特徴を示すことから¹⁾²⁾、温間域に曝される金型の寿命向上に有効であると予想される。そこで、本研究では、アルミダイカスト用金型に用いられる熱間金型用鋼（SKD61）の熱疲労特性に及ぼす微粒子ピーニング処理の効果について評価した結果を報告する。

2 実験方法

実験には焼入れ焼戻しにより HRC48 の硬さに調整した SKD61 鋼を用いた。これを図 1 に示すような円盤状試験片に加工した。微粒子ピーニング処理は円盤状試験片の盤面に対して吸引式のショットピーニング装置を用いて表 1 に示す条件で実施した。吸引式ショットピーニング装置とは、圧縮空気による吸引力により粒子タンク内の粒子を吸引して噴射する方式の装置である。ショットピーニングの強さを表すアークハイト³⁾は 0.14mmN であった。また、微粒子ピーニングに引き続き、ラジカル窒化処理を施した試料も準備した。ラジカル窒化とは、イオン密度の低い低エネルギープラズマを発生させ、活性な窒素（ラジカル種）により窒化する手法であり、従来のイオン窒化と比較

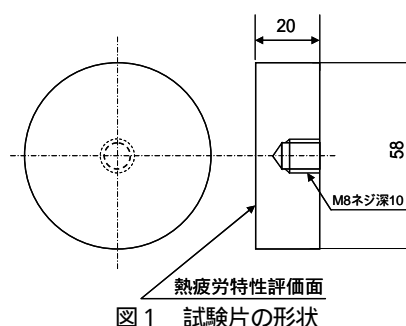


図 1 試験片の形状

表 1 微粒子ピーニング条件

粒子材質	硬さ HV	平均粒径 (μm)	噴射方式	圧縮空気圧 (MPa)	アークハイト (mmN)
炭素鋼	700	45	吸引式	0.4	0.14

してスパッタリングによる表面損傷や表面での化合物層の生成がないことを特徴とする。

熱疲労試験は、873K に加熱した鋼製ブロックを試験片の盤面全体に押しつけて表面を加熱した後、直ちに 373K の湯に漬けて冷却させる熱サイクルを試料に加えて実施した⁴⁾。これにより試験片表面は 160sec の間に 843K にまで加熱された後、15sec 間で 373K に冷却される。このサイクルを 2000 回繰り返した後、表面からのき裂の発生状況を評価した。すなわち、熱疲労特性試験を終了した試験片の中心から半径方向に沿って断面のマイクロ組織を観察し、き裂の数および各き裂の深さを計測した。

3 結果

図 2 に熱疲労試験後のき裂の分布状況を示す。横軸にはき裂の深さを、縦軸には試験片の半径方向に沿った単位長

さ当たりのき裂の数を示す。図のように未処理材と比較して、微粒子ピーニングを施した場合の方が、き裂の数、深さ共に減少している。この傾向はラジカル窒化処理した場合でも共通である。

図3は、微粒子ピーニングによって熱疲労き裂が減少する理由を考察するために、透過型電子顕微鏡（TEM）により表面近傍のミクロ組織を観察した結果である。図3(a)の明視野像に示すように表面近傍には微粒子ピーニングによって塑性流動した様子が観察される。この領域の電子線回折図形（図3(b)）がbcc構造を反映したリング状の形状を示すことからこの領域がランダムな結晶方位分布を持つ多数の結晶粒で構成されていることが判明した。さらに、暗視野像（図3(c)）より表面近傍に結晶粒径が100nm未満のナノ結晶組織が形成されていることがわかる。微粒子ピーニングに引き続いて熱疲労試験と同様の843Kでの焼鈍処理を施した場合、あるいはラジカル窒化処理を施した場合の暗視野像を図4(a)および図4(b)に各々示す。いずれの試料も焼鈍あるいは窒化処理時の加熱により、結晶粒径が若干粗大化しているものの結晶粒径が100nm前後の超微細粒組織を維持している。これらのことから、微粒子ピーニングにより表面近傍の結晶粒径が微細化したために熱疲労き裂の発生と成長が抑制され優れた熱疲労特性を示したものと推測される。

図5に微粒子ピーニング処理を施した試料の熱疲労試験後の断面を走査型電子顕微鏡で観察した結果を示す。2000回の熱サイクルを経た後にもかかわらず、表面近傍には微粒子ピーニングによって形成されたと思われる塑性流動が観察される。このことも熱疲労試験中も微粒子ピーニングによる微細組織が粗大化することなく維持されたために、熱疲労き裂の生成が抑制されたことを示唆している。なお、熱疲労試験により表面に酸化皮膜（ Fe_3O_4 ）が生成することが判明しているが、この酸化皮膜はFe原子の外方拡散によって外側に成長する酸化膜であり、微粒子ピーニングによる微細組織が酸化皮膜の生成により消失することなく維持されたものと推測している。

4 まとめ

アルミダイカスト用金型に用いられる熱間金型用鋼（SKD61）の熱疲労特性に及ぼす微粒子ピーニング処理の効果について評価したところ、微粒子ピーニング処理によって熱疲労き裂の発生と成長が大幅に抑制されることが判明した。これは微粒子ピーニングによって表面近傍にナノ結晶組織が形成され、2000サイクルの熱疲労試験中も結晶粒径が顕著に粗大化することなく維持されるためにき裂の発生と成長が抑制されたと考えられる。

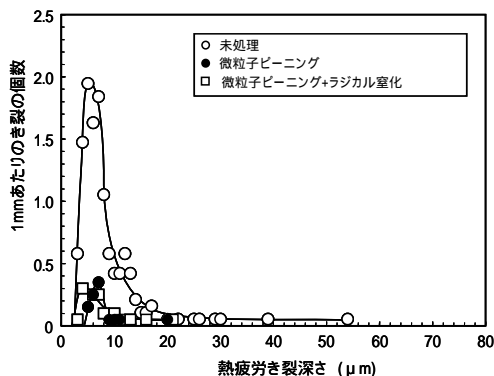


図2 熱疲労試験後のき裂分布

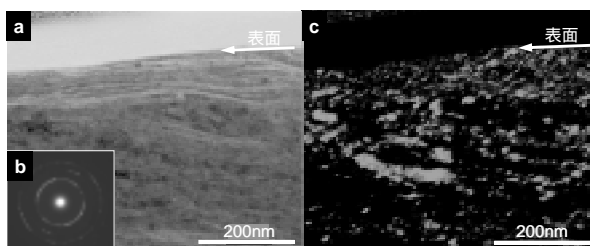


図3 微粒子ピーニング処理した試料の表面近傍のミクロ組織
a)明視野像・b)制限視野回折図形・c)暗視野像

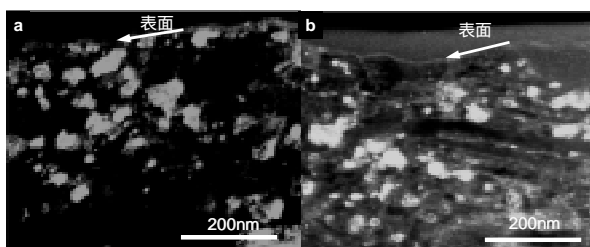


図4 微粒子ピーニング処理後焼鈍あるいはラジカル窒化処理を施した場合の結晶粒径の変化（暗視野像）
a)843K 焼鈍材・b)ラジカル窒化処理材

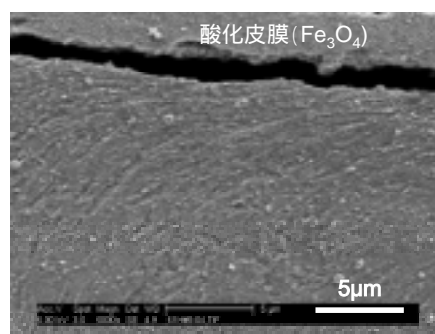


図5 熱疲労試験後のミクロ組織（微粒子ピーニング処理材）

文献

- 1) 高木眞一，熊谷正夫，小沼誠司，伊藤裕子，下平英二；鉄と鋼，**92**，318(2006)。
- 2) 戸高義一，梅本 実；日本金属学会誌，**67**，690(2003)。
- 3) ショットピーニング技術協会；“金属疲労とショットピーニング”，現代工学社，p.114(2005)。
- 4) 日原政彦；“ダイカスト用金型の寿命対策”，日刊工業新聞社，p.19(2003)。