

オーステンパ球状黒鉛鋳鉄の難削機構

山本 重男*・中島 宏興*²・宮地 博文*³

Mechanisms of Poor Machinability of Austempered Ductile Iron

Shigeo YAMAMOTO, Hirooki NAKAJIMA and Hirobumi MIYAJI

Synopsis : For the purpose of high strength austempered ductile iron (ADI) has the potential to reduce the size and weight of automotive parts, however poor machinability has made it difficult to achieve broad commercial application.

To clarify the mechanism of poor machinability of ADI, (i) the chips was analysed by X-ray diffraction, (ii) the cutting front was observed after instantaneously stopping using a quick stop device, (iii) for the turning tool wear was measured and (iv) sawability of material was compared using a saw test.

The results were as follows :

In the low cutting-speed range, it was found that strain induced transformation from retained austenite (γ_R) to martensite (α') occurred, and this corresponded to the poorest machinability in the saw test.

In the high cutting-speed range, $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ transformation was limited to the damaged layer, because the temperature of chips exceeded M_d point.

The tool wear during turning of ADI was generated closer to the cutting edge, as compared with turning of steels. Observation of chip forming state showed that this phenomenon resulted from the following two factors : a) the formation of saw-tooth like chips and the decrease of the tool-chip contact length due to the spheroidal graphite, and b) the increase of cutting force due to the high hardness of the bainitic phase and the damaged layer hardened by the $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ transformation.

Key words : cast iron ; machinability ; austempered ductile iron ; machining mechanism ; turning ; saw test.

1. 緒言

自動車部品および機械部品の軽量化・コンパクト化を目的として高強度球状黒鉛鋳鉄 (ADI) の研究が行われている^{1)~6)}。多くの研究の対象となっているADIの基質は上部ベイナイト組織であり、引張強さは約1000N/mm²で伸びは8~10%程度である³⁾。この状態では被削性は悪く実用化の用途を狭めている⁵⁾。

ADIの難削原因としては、主に、残留オーステナイトの切削部における加工誘起によるマルテンサイト変態³⁾⁵⁾⁷⁾⁸⁾あるいは基質の硬さ³⁾⁹⁾¹⁰⁾によることが報告されている。しかし、残留オーステナイト相の加工誘起変態は M_d 点以上では生じないと考えられ、切削部の発熱状態を考慮しなければならない。基質の硬さの影響にしてもベイナイト相の変形挙動および球状黒鉛粒の役割を中心に検討されるべきである。このような観点からADIの難削原因を検討した例は見当らない。

この報告では各切削速度において生成した切りくず中の残留オーステナイト量の測定、および、切削部におけるベイナイト相と球状黒鉛粒の変形状態の観察、これら2つの

結果と工具摩耗の関連について述べる。

2. 被削材および実験条件

2・1 被削材の組成およびマイクロ組織

被削材は精密工学会・切削加工専門委員会・ADIワーキンググループの共同実験試料を用いた。Table 1 に被削材の組

Table 1. Chemical composition of work materials (mass%).

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mg	Cu	Ni
3.6 ~3.8	2.6 ~2.8	0.15 ~0.25	<0.02	<0.03	<0.1	0.03 ~0.05	0.75 ~0.85	0.9 ~1.1

Table 2. Heat treatment conditions and hardness of work materials.

Work materials	Heat treatment	Hardness(HV30)
FCD700		270
FCD1000-1	Austempered (1175~1195K・7.2ks→650K・7.2ks)	334
FCD1000-2	Inoculation + Austempered (1175~1195K・7.2ks→650K・7.2ks)	337

Dimension of test pieces : $\phi_D 150 \times \phi_d 120 \times \ell 300$ (mm)

平成7年1月5日受付 平成7年4月24日受理 (Received on Jan. 5, 1995; Accepted on Apr. 24, 1995)

* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305)

* 2 法政大学 (Hosei University)

* 3 元金属材料技術研究所 (Formerly National Research Institute for Metals)

成, Table 2 に熱処理条件, 硬さを示した。FCD700試料の基質はフェライト・パーライト組織で引張強さ700N/mm²程度で, 従来の高強度球状黒鉛鑄鉄に相当することから比較材として用いた。FCD1000-1試料およびFCD1000-2試料はオーステンパ処理によって基質を上部ベイナイト組織としたもので, 後者は残留オーステナイト粒および球状黒鉛粒の微細化を目的として接種を行っている。引張強さは共に1000N/mm², 伸びは8~10%程度である¹¹⁾。

被削材の球状黒鉛粒径の測定はマイクロ組織写真に一定間隔で直線を引き, 直線に接触した黒鉛粒について行った。球状黒鉛および残留オーステナイト相の面積率(%)は光学顕微鏡を用いた点算法によって求めた。この際の残留オーステナイト相はナイタルで腐食されない基質部分とし, 400倍の倍率で測定した。

2.2 切削試験条件

切削試験は切削形態が連続の場合と不連続の場合, すなわち旋削および鋸刃切削について行った。基本的に双方の切りくず生成機構は大差ないが, 切削形態, 切削条件が異なることで切削部の発熱状態が大きく異なる。ADIの施削による工具摩耗試験ではセラミック工具が適していることが報告されている⁹⁾¹⁰⁾。実験に先立ってサイアロンおよびSiC ウィスカーとAl₂O₃の複合(SiC/Al₂O₃)工具を用いてADI試料の切削を行い, 工具摩耗の点で優れている後者を用いた。この工具にはセラミック工具の脆性を考慮して切刃部にランド部(幅:0.1mm)が設けてある。切削抵抗の測定にもSiC/Al₂O₃工具を用いた。一方, 急停止装置¹²⁾を用いた切削部の採取には, ランド部が無く構成刃先の生成状態の観察に適した超硬工具(K10)を用いた。これら旋削の際の試験には切削油剤を用いていない。

旋削試験に用いた工具形状は前および横すくい角-6°, 前および横逃げ角6°, 前切刃角45°, 横切刃角15°, 先端半径0.8mmである。工具摩耗試験, 切削抵抗および切りくず温度の測定はDc:1.5mm, f:0.2mm/revで行った。この際の切りくず温度は炭素鋼の焼戻し温度と酸化色の対比表¹³⁾を参照して求めた。この前提としてはADI試料には酸化皮膜の生成に大きな影響をおよぼす合金元素量が少ないこと, および, 切削中の切りくずは工具送り台に堆積した状態で一定時間保持されていることから, 定性的な切りくず温度を示すと考えた。急停止装置を用いた切削部の採取はDc:1.5mm, f:0.2mm/revで行った。しかし, 中速切削域においては急停止装置の剛性上ビビリが生じるためf:0.1mm/revで行った。

鋸刃切削試験では著者らが開発した迅速被削性試験装置¹⁴⁾を用いた。この装置の特徴は切削速度および鋸刃に加わる荷重を適宜設定できる点である。鋸刃は手動弓鋸用のもので材質はSKH51である。切削条件については通常の鋸刃切削の際の切削速度を基準とし, 0.33m/sとした。鋸刃に加わる荷重は予備実験によって200Nを選定した。そして, 被

削材の形状は幅25mm, 厚さ10mmに一定とした。

2.3 切りくずのX線回折

ADIの難削原因の一つとされている残留オーステナイト(γ_R)の切削中の挙動を調べるため, 切削抵抗を測定中に各切削速度で得られた切りくずについてX線回折を行った。切りくずは軽く押しつぶして針状に細分化し, 化学研磨によって酸化皮膜を除去後, 回折用ホルダーにハンドプレスした。切りくずは鋸歯状切りくずのため, ハンドプレスで軽く押すことで1~2mmの長さに容易に分断され, $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ 変態が生ずるほどの応力には達していないと思われた。X線回折はCrおよびCoターゲットを用い, 走査速度は0.145rad/ksで行った。 γ_R 量は $\gamma(111)$ と $\alpha(110)$ のピークの積分強度比から求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 被削材のマイクロ組織

Fig.1は被削材のマイクロ組織である。FCD1000-1試料とFCD1000-2試料はマイクロ組織が類似しているため, 前者では走査型電顕写真を, 後者では光学顕微鏡写真を示した。

Fig. 2 に被削材の球状黒鉛の粒径分布比率を示した。黒鉛粒径の平均値はFCD1000-1試料で40 μ m, FCD1000-2試料で

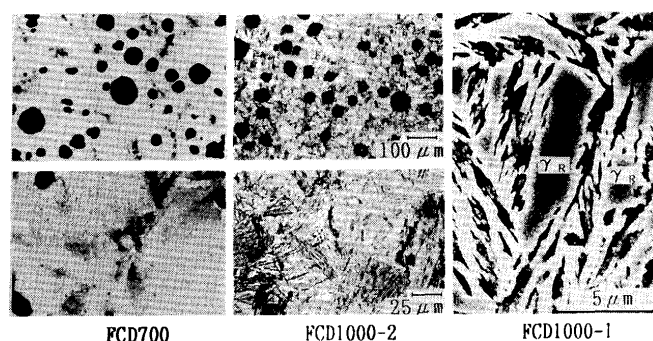


Fig. 1. Microstructures of work materials.

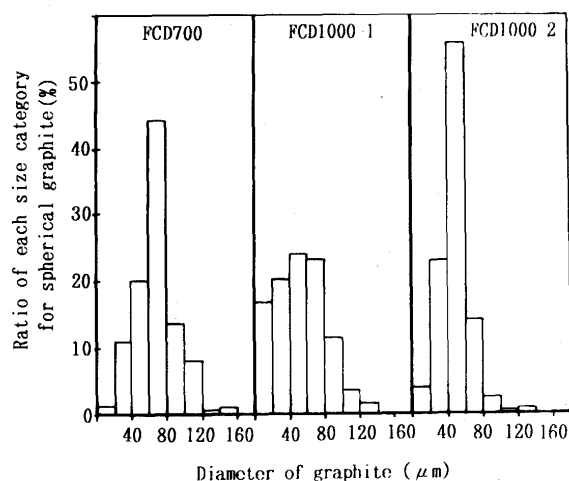


Fig. 2. Each size distribution of spheroidal graphite.

35 μ mであり、60 μ m以上の黒鉛粒径について個数比率を見ると前者は39%、後者は18%であり、FCD1000-2試料で黒鉛粒径が減少し、接種の効果が現れている。比較材であるFCD700試料の球状黒鉛粒径の平均値は43 μ mで、60 μ m以上の黒鉛粒径の個数比率は68%と3試料中では最も黒鉛粒径が大きい。球状黒鉛の面積率は3試料とも15~16%、 γ_R の面積率はFCD1000-1および2試料で20~23%の範囲であった。

3.2 切りくずのX線回折

Fig. 3にX線回折により測定した各切削速度域の切りくず中の γ_R 量を示した。ADI試料の被削材の γ_R 量は約20%程度であるが、切削速度0.08~0.17m/sにおいては γ_R は認められなく、切りくずが生成する際の激しい変形により、マルテンサイト(α')へ加工誘起変態したことを示している¹⁵⁾。切削速度0.3m~0.6m/sでは基質の γ_R 量に近い値となっており、切りくず温度が M_d 点以上に達して α' への変態が行われなかったためと思われる。ADIの M_d 点については組成は若干異なるが、550K近傍と推定される¹¹⁾⁶⁾¹⁷⁾。切削速度が0.7m/s以上では γ_R 量が切削前より増加しており、このことより切りくずせん断領域の終了域側の温度は A_s 変態点以上となり、新たに生成したオーステナイトの一部が冷却の過程で γ_R として残留したことが推定された。さらに γ_R 量は切削速度の増加と共に増しており切りくず温度の上昇によって、 γ_R 量も増加したものであろう。そして、切削速度1.3m/s以上では γ_R 量はほぼ一定値となることから切りくず温度は A_f 点を越えていると考えられる。

切りくずの酸化色から推測した切りくず温度をTable 3に示した。切りくず温度はFCD1000-1と2試料では大差なく、切削速度0.67m/s域を極大とし、それ以上の速度では切りくずの冷却効果が増すため、見かけ上は減少している。一方、ADI (HV350~360)を切削中の切削温度(工具-被削材熱電対法による)は応本の報告⁹⁾によると、切削速度1.0m/sで1010K、1.67m/sで1100K (Dc:1.0mm, f:0.2mm/rev, 工具:K10)が示され、高速切削側では切りくず温度もかな

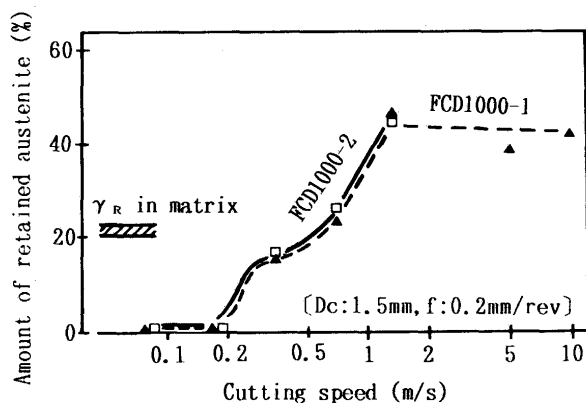


Fig. 3. Amount of retained austenite in chips at various cutting speed, measured by X-ray diffraction analysis.

Table 3. Temperature of chips of ADI by temper color.

Cutting speed (m/s)	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5
Temperature (K)	480	510	550	580	590	580	560

り上昇することが予想される。

Fig. 3およびTable 3の結果からみると切りくず温度が M_d 点以上に上昇している切削速度域においては、 $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ 誘起変態による難削原因は軽減されるように見える。しかし、加工変質層内の温度勾配は大きく、その表層域は M_d 点に達しても内部(被削材)側では M_d 点に達しない領域が予想される。この領域は $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ 誘起変態により工具寿命の低下と結びつくことが考えられる。例えば、田中ら⁸⁾は切削速度1~2 m/sにおいてADI試料を切削し、試料中の不安定オーステナイト量の減少に伴って工具寿命時間が増大することを報告している。その理由として不安定オーステナイト量が増加することによって顕著となる加工変質層のマルテンサイト化を考えている。しかし、切削速度から考えて工具寿命の低下と結びついているのは加工変質層全体ではなく内部の硬化した部分と考えられる。

3.3 切削部におけるベイナイト相および球状黒鉛の変形挙動

Fig. 4は切削速度0.33m/sにおいて急停止装置を用いて採取した切削部の状態である。観察部分は切込み深さ(Dc)の中央部である。Fig. 4 (a)はFCD700試料の場合であり構成刃先が認められる。Fig. 4 (b)はFCD1000-2試料であり、切刃近傍のすくい面では黒鉛の変形状態から構成刃先が形成されつつあることが分る。しかし、黒鉛粒をつなぐようにしてせん断が生じたため、構成刃先の生成はその段階で停止している。(a) (b)は共に切りくず表面側の凹凸の激しい鋸歯状の切りくずであるが、(a)の方が凹凸のピッチが狭

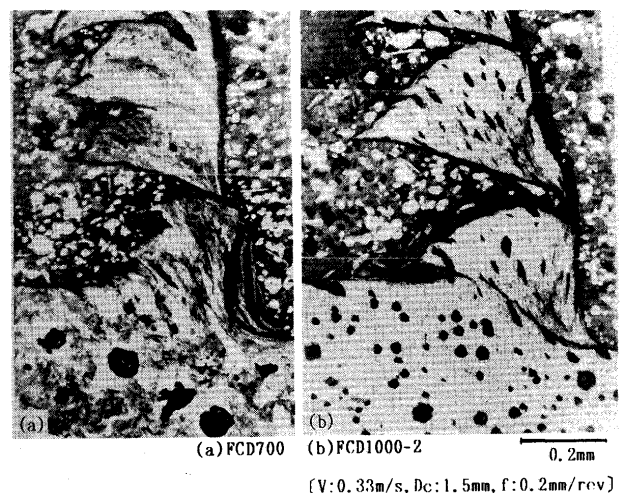


Fig. 4. Chip forming state in machining of FCD700 and FCD1000-2, Sample was extracted by quick stop device.

い。

鋸歯状切りくずの生成機構について、中山¹⁸⁾は切りくずせん断領域の切りくず表面側からのクラックの発生および進行を挙げている。この点、切りくず表面側に位置した黒鉛粒はクラックの発生源として十分な大きさと脆弱さを持つものであろう。Fig. 2 に示した球状黒鉛粒径の分布からしてFCD700試料では比較的大きな球状黒鉛粒が切りくずせん断領域の表面およびその近傍に位置する機会が多く、鋸歯状切りくずの凹凸ピッチを狭めている原因と考えられる。

鋸歯状切りくずの生成サイクルにおいては、Fig. 4 (b)の状態の次の切削過程として、切削工具の前方に切りくずせん断領域の残存部分で、勾配をもつ形で残された領域を切削することになる。切削が進むに従って工具—切りくず接触長さ(L)は増大するが、その過程でせん断が生じ、新たに凹凸の激しい切りくずが生成する。従って、Lは切刃に近い部分に限られ、この部分に激しい変形・発熱が集中して工具摩耗の進行を促進することが予想される。すなわち、球状黒鉛粒の存在は鋸歯状切りくずの生成と結びつくことでLの増大を抑制し、工具摩耗の進行を促進していると考えられる。

Fig. 5 はFig. 4 (b)に示した切りくずせん断域におけるベイナイト相の変形状況を拡大して示したものである。ベイナイト相は黒鉛をつなぐ形で形成されたせん断領域に沿うように変形によって再配列されている。この部分より被削材側ではベイナイト相が強制的に湾曲させられている。このようなベイナイト相の激しい変形状態から推察して、工具すくい面には大きな応力が加わっていることが分る。

Fig. 6 として各切削速度域における切削抵抗合力を示した。切削速度 1 m/s域まではFCD700試料に比較して、FCD1000-1と2試料の切削抵抗合力は15~20%増大している。そして、それ以上の切削速度域では大差ない。しかし、後述する工具—切りくず接触長さはADI試料で約35%減少し

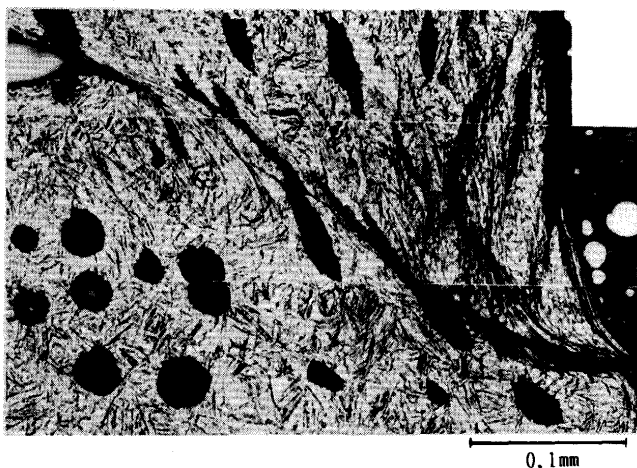


Fig. 5. Appearance of chip shear region deformed in machining of FCD1000-2 (magnified photograph of Fig. 4(b)).

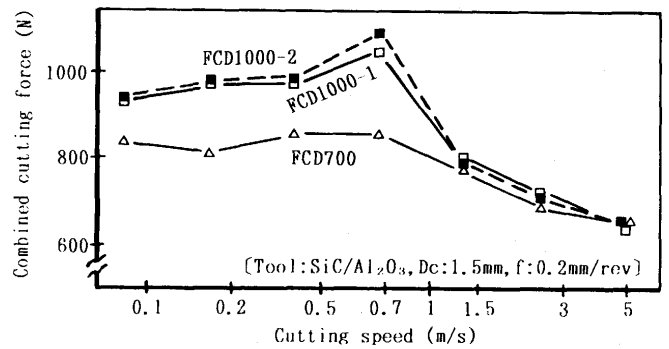


Fig. 6. Combined cutting force for work materials by lath turning.

ており、工具すくい面の単位面積あたりに加わる切削力は大幅に増大している。一方、切削速度0.8m/s以下では先端半径の小さい構成刃先が生成することが予想される¹⁹⁾。従って、ADIの切削では低速から高速切削域において、工具すくい面に加わる単位面積当たりの切削力が増大していると思われる。なお、この際の切りくずせん断域のせん断歪みを鋸歯状切りくずの平均厚さから算出すると0.1, 0.5, 2.0, 10.0m/sの各切削速度において、3.1, 2.6, 2.4, 2.3をそれぞれ示した。

Fig. 7 はFCD1000-2試料を切削速度0.67m/sで切削した場合の切りくず生成状態である。構成刃先が生成している。切りくずせん断領域において、切りくず厚さの中央部に位置した黒鉛粒は紡錘状に変形されているが構成刃先の先端では紐状にまで延伸され、その中間域では紡錘状と紐状の中間の形状に変形している。このことから、構成刃先先端部側では切りくずの流出速度が著しく増している様子が分る。そして、構成刃先先端における紐状に延伸された黒鉛は潤滑効果をもつと考えられた。

黒鉛粒の潤滑効果についてはその摩擦係数の測定²⁰⁾および



Fig. 7. Chip forming state in machining of FCD1000-2.

被削性におよぼす黒鉛粒径の影響として報告されている²¹⁾。藤田ら²²⁾はADIのドリル切削加工において黒鉛の潤滑剤としての役割を考えている。このような黒鉛粒の潤滑効果は次のような理由で工具一切りくず接触長さ(L)を減少させる方向に作用するものであろう。1) 切りくずカール機構として考えられている切りくずせん断領域で生ずる速度差²³⁾を拡大する。2) 工具一切りくず接触域において鉛快削鋼中の鉛粒子に認められるような潤滑効果で、工具すくい面の摩擦応力分布を変え²⁰⁾切りくずカール半径を縮小する。

3・4 旋削の際の工具摩耗状態

Fig. 8にFCD700およびFCD1000-2試料を各切削速度で一定距離切削後の、工具一切りくず接触長さ(L)および工具逃面の摩耗幅(V_B)を示した。切削速度の増大に伴ってLは減少し、V_Bは増大している。Lの減少度合いはFCD1000-2試料の高速切削側において工具送り量(f)と同等かそれを下回っており、すくい面のクレータ摩耗の急激な進行を引き起こすことが予想された。なお、FCD1000-1試料の切削においても、FCD1000-2試料と同様な工具摩耗の傾向が認められ、切削速度5m/sにおいてはLが0.1mmと減少していた。鋼の切削においては工具送り量を下回るLは考え難く²⁴⁾、ADIを切削中の工具摩耗機構はLとの関連を重要視しなければならない。

ADIを高速側で切削中の工具摩耗機構は次の2点に集約される。1) 工具一切りくず接触長さ(L)の減少。2) 切削部における変形抵抗の増大。

1) は i) 切りくずせん断領域の表面側に位置した比較的大型の黒鉛粒を起点とする、クラックの発生・伝播による断続的な切削状態、および ii) 黒鉛粒の潤滑効果による、切りくずせん断領域と工具一切りくず接触面領域における切りくずカール機構の促進によってなされている。2) は切りくずせん断領域におけるベイナイト相および $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ 加工誘起変態した高硬度部分の変形抵抗の増大によってなされている。

上記の1)は黒鉛粒に起因して、工具のクレータ摩耗が切削近傍から生ずる主因をなすと考えられる。この際、2)の変形抵抗の増大が切削部の温度上昇と結びついている。

3・5 鋸刃切削

Fig. 9に鋸刃切削の結果を示した。一定の断面(10mm厚さ、25mm幅)の被削材を一定の条件で切削した場合、切削始めから終わりまでのストローク数を切削回数とした。鋸刃の切れ味が劣化させる被削材ほど切削回数は増加する。FCD1000の2試料は水溶性の切削剤を使用した場合、使用しない時の2倍近い切削回数である。この原因は次のように考えられる。鋸刃切削では旋削と異なり、切削剤の冷却効果に加えて断続切削のため、切削速度が0.33m/sであるにもかかわらず、切削部の温度がM_d点以下に抑制されていると思われる。このためFig. 3の切削速度0.17m/sにみられるように $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ 加工誘起変態が生じ、加工変質層の表層部が硬さを増加させる。従って、鋸刃の逃面摩耗幅を増大させ、

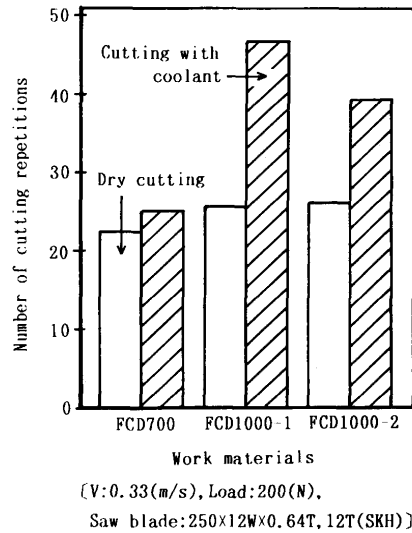


Fig. 9. Effect of coolant on the number of cutting repetitions in sawing of work materials.

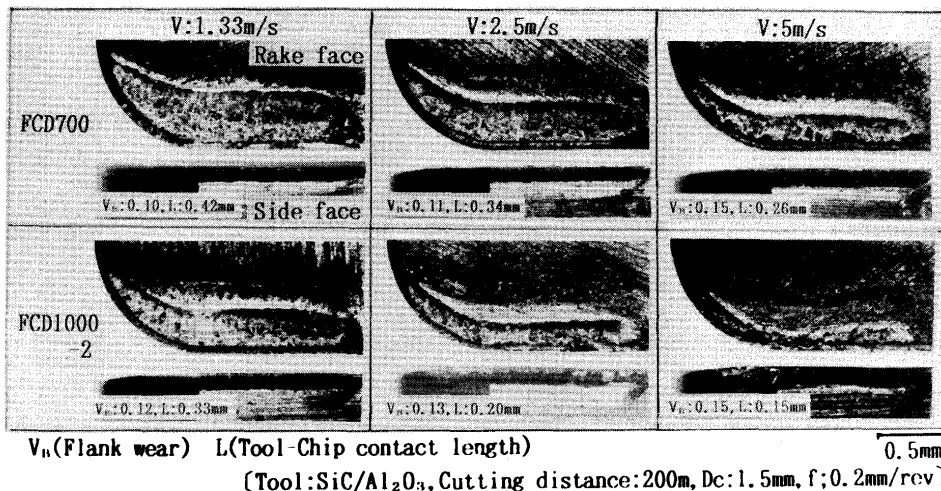


Fig. 8. Tool wear at various cutting speed in machining of FCD700 and FCD1000-2.

ストローク当たりの切込深さは切削剤を使用しない場合は0.39mmであるが、使用することでは0.23mmに減少した。一方、切削剤を使用しないときには切削部の温度上昇によって α' は加工変質層の内部に形成されることで鋸刃の摩耗量を減少させて、少ない切削回数で試料を切断したものであろう。

4. 結言

高強度球状黒鉛鋳鉄(ADI)の難削機構を明らかにするため、切りくずのX線回折、切りくず生成状態の観察、旋削工具摩耗試験、鋸刃切削試験を行い、以下の結果を得た。

(1) 旋削した切りくずのX線回折結果から、切削速度(V)が0.2m/s以下ではADI試料中の残留オーステナイト(γ_R)はマルテンサイト(α')に加工誘起変態している。V:0.3~0.6m/sでは切りくず温度が M_d 点以上に達し α' への変態は行われず、V:1.0m/sでは切りくず温度は A_s 点以上に達し、冷却過程で γ_R が生成したと考えられる。

(2) 旋削の急停止装置を用いて採取した切削部の観察では次のことが示された。a)切りくずせん断域の表面側に位置した球状黒鉛はクラックの発生源となることで鋸歯状切りくずを生成し、工具一切りくず接触長さを減少させる。b)切りくずせん断域および工具一切りくず接触域における球状黒鉛は潤滑効果により工具一切りくず接触長さを減少させる。c)切削部におけるベイナイト相および $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ 加工誘起変態による硬化部分は構成刃先および工具一切りくず接触域の単位面積当たりに加わる切削力を増加させる。

(3) 上記2)のa)~c)に原因して、旋削中には切刃近傍に変形と発熱が集中し、工具摩耗の進行を促進していると考えられる。

えられる。

(4) 鋸刃切削試験では水溶性の切削剤を用いた場合、ADI試料は乾切削に比較し約2倍の切削回数を要した。切削剤の冷却効果などにより切削部の温度は M_d 点以下となり、 $\gamma_R \rightarrow \alpha'$ 加工誘起変態が生じ、加工変質層の表層域が硬化したことに原因すると考えられる。

文 献

- 1) J.E.Bevan and W.G.Scholz: AFS Trans., **85** (1977), p.271
- 2) J.F.Janowak and R.B.Gundlach: AFS Trans., **91** (1983), p.377
- 3) 石原安典: 鋳物, **58** (1986), p.823
- 4) 塩川 忠: 鋳物, **60** (1988), p.179
- 5) 滝田光晴, 上田徹完, 白木久史, 成瀬賢次, 柏木陽一郎: 鋳物, **61** (1989), p.620
- 6) 吉田敏樹, 小松賢一, 岡田千里: 鋳物, **65** (1993), p.221
- 7) 木曾弘隆, 小山満晴, 田口富雄: 鋳物, **61** (1989), p.615
- 8) 田中雄一, 清水章裕, 横内弘宇: 鋳物, **65** (1993), p.93
- 9) 応本 正: 精密工学会切削加工専門委員会(通算75回), (1991年3月25日), 提出資料3-2
- 10) 新谷一博, 加藤秀治, 塩谷外司, 藤村善雄: 鋳物, **63** (1991), p.523
- 11) 横山哲男: 精密工学会切削加工専門委員会, ADI. WG資料(1993年3月24日)
- 12) 荒木 透, 山本重男, 内仲康夫: 鉄と鋼, **54** (1968), p.444
- 13) 金属熱処理技術便覧, 金属熱処理技術便覧編集委員会, (1979), p.21 [日刊工業新聞社]
- 14) 山本重男: 金属, **59** (1989), 12, p.54
- 15) 田村今男: 日本金属学会会報, **18** (1979), p.239
- 16) 上田慎也, 上田徹完, 生田浩之: 鋳物, **57** (1985), p.728
- 17) Continuous Cooling Transformation diagrams for Ductile Irons, Climax Molybdenum Company, II-73.
- 18) 中山一雄: 精密機械, **43** (1977), p.117
- 19) 山本重男, 中島宏典, 宮地博文: 鉄と鋼, **80** (1994), p.469
- 20) 白井英治: 切削・研削加工学(上), (1974), p.219 [共立出版]
- 21) 中村貞行, 羽生田智紀: 電気製鋼, **60** (1989), p. 265
- 22) 藤田武男, 関谷克彦, 北川亮三, 小池範法, 大城桂作: 1993年度精密工学会秋季大会講演論文集, (1993), p.365
- 23) 山本重男, 荒木 透, 金尾正雄: 鉄と鋼, **65** (1979), p.408
- 24) 中山一雄: 切削加工論, (1978), p.52 [コロナ社]