

技術資料

Technical Data

炭化物制御による Alloy718 の被削性改善効果

古庄千紘^{*1}, 光齋悠矢^{*1}, 宇野孝一^{*2}

Machinability Improvement Effect of Alloy718 by Controlling the Amount of Carbides

Chihiro FURUSHO, Yuya KOSAI and Koichi UNO

Synopsis

Alloy718 has been applied in many applications such as aerospace, power generation plants, automobiles, and oil and gas. Most products of Alloy718 are finished by a machining process. Therefore, improvement of the machinability can contribute to the manufacturability. An important microstructural factor for the machinability is large carbides, which have high hardness. Two types of Alloy718 containing different amounts of carbon (Alloy A: 0.024C, Alloy B: 0.002C) were prepared and their machinability was evaluated. Machinability of Alloy718 depends on its carbon content, and the lower the carbon content, the better its machinability. As a result of SEM observation on electrolytic extraction, (Nb, Ti)C type carbides were observed only in Alloy A. Furthermore, the total amount of carbides and nitrides is larger in Alloy A. This result suggests (Nb, Ti)C type carbides accelerate abrasive wear of the cutting tool, so that spectacular improvement of machinability was shown in Alloy B at the machining temperature in which abrasive wear is dominant.

1. 緒 言

数ある Ni 基超合金の中でも代表的な鋼種の一つである Alloy718 は、その優れた高温機械的特性、耐食性から、航空宇宙、石油ガス、重電、自動車といった多岐にわたる産業界で使用されている。例えば、油田掘削における地中配管やその継ぎ手に使用される Alloy718 は、高温環境下での高い強度と腐食性ガスに対する耐食性の高さから使用されているが、その製品加工には外削加工、ドリル加工、内削加工などの切削工程が必須となる。その他 Alloy718 の用途としてガスタービンのローター材が挙げられるが、これも熱間加工によって成形した後、外削加工によって仕上げられる。以上のように、Alloy718 を使用した部材は、多くの場合切削加工を伴う製造プロセスで作られている。

ところが、Alloy718 は先述の通り、その高温機械的特性の高さから、一般的な鉄鋼材料などに比較すると著しく切削性に乏しいことが知られている。また、普通鋼に比べ高温機械的特性のみならず、熱伝導率も低く、切削時に工具先端に熱がこもりやすく容易に拡散摩擦を引き起こし、著しい摩擦の進行が認められる。そのため、Alloy718 の切削加工には頻繁に工具交換が必要になり工具費用が高額になるだけでなく、切削能率も上げられないためプロセス自体も長時間化するという難点があり、Alloy718 の切削性改善ニーズは従来から顕在化している。そこで、Alloy718 の切削性改善に関する報告例を挙げると、板倉ら¹⁾ および杉野ら²⁾ は、高圧クーラントを用いることで、切削温度が効率的に低下することから、切削能率の向上が可能であることを報告している。竹山ら³⁾ は Alloy718 被削材と切削工具材種との親

2018年11月2日 受付

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

* 2 大同特殊鋼(株)渋川工場 (Shibukawa Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

和性について報告しており、耐熱性と耐摩耗性に優れた CBN 工具が Alloy718 の切削に適していることを報告している。また Ezugwu ら⁴⁾は、Alloy718 の切削条件の最適化に関する報告をしており、切削条件と工具摩耗や切削抵抗といった切削性についてニューラル・ネットワーク解析することで、Alloy718 の最適切削条件を提案している。

これらの Alloy718 の切削性改善に関する報告はあくまで一例ではあるものの、加工プロセス側からの被削性改善検討事例が多くを占め、材料そのものの化学成分、組織調整からの切削性改善検討に関する報告事例は数少ない。Fig. 1⁵⁾に難削材の材料特性と切削加工時の問題点との相関を示すが、機械的特性や物性値の調整余地は小さく、顕著な切削性改善効果は期待しにくい。一方で、一般的に製造される Alloy718 には、原料由来の炭素が少なからず混入しており、アブレシブ粒子になりうる硬質炭化物を形成している。したがって、材料組織制御による被削性改善の一つに、炭化物制御によるアブレシブ摩耗の低減が期待できる。そこで、本研究では Alloy718 の炭素添加量減による切削性改善余地の見極めと、組織変化について調査したので結果を報告する。

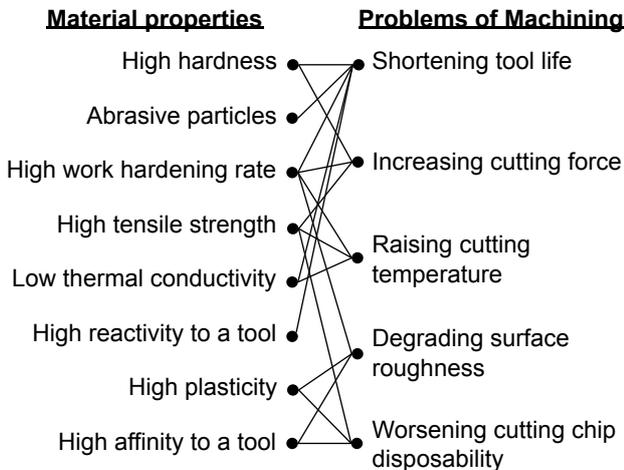


Fig. 1. Relationships among material properties and problems of machining process⁵⁾.

2. 実験方法

2. 1 供試材

Table 1 に本研究で用いた供試材の化学組成を示す。Alloy A の炭素添加量は一般的に流通している Alloy718 の炭素添加量に相当し、Alloy B の炭素添加量は極微量に抑えた。これらの合金を、VIF (Vacuum Induction Furnace) および VAR (Vacuum Arc Remelting) により溶製し 2.2 t のインゴットを得た。インゴットに対し均質化処理を施した後、熱間鍛造により直径 100 mm のバー材に成形し、次に示す固溶化熱処理、2 段時効熱処理を施した。固溶化熱処理は 975 °C にて 7.2 ks の処理をした後、直ちに水冷した。また時効処理は 720 °C にて 28.8 ks 保持した後に 620 °C まで炉冷し 620 °C で 28.8 ks 保持した後室温まで空冷した。なお、これらの熱処理は AMS 規格 5663N に準拠している。

得られた試料について、塩化第二銅コーリングに化学エッチングおよび 10 % 硝酸溶液による電解エッチングの 2 パターンのエッチング処理を施し、マイクロ組織観察を実施した。前者は析出物の観察、後者は結晶粒界の現出を目的に実施した。Fig. 2 に観察されたマイクロ組織写真を示す。Alloy A, B ともに整粒組織であり、その結晶粒度番号は #8-10 (ASTM E 112 準拠) である。また Alloy A には粒内に塊状の析出物が認められ、Alloy B には粒界近傍で板状もしくは針状の析出物が認められるが、いずれも δ 相と推定される。

Table 1. Chemical composition of samples in mass%.

Alloy	C	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	Fe
Alloy A	0.024	52.8	17.8	3.1	0.52	1.0	5.1	Bal.
Alloy B	0.002	53.3	17.7	3.1	0.55	1.0	5.1	Bal.

2. 2 試験方法

Alloy A, B それぞれについて、旋削試験による切削性評価を実施した。試験のイメージ図を Fig. 3 に、試験条件を Table 2 に示す。試験機は DMG 森精機(株)の 5 軸複合加工機 NT4200 を使用した。切削工具の詳細は

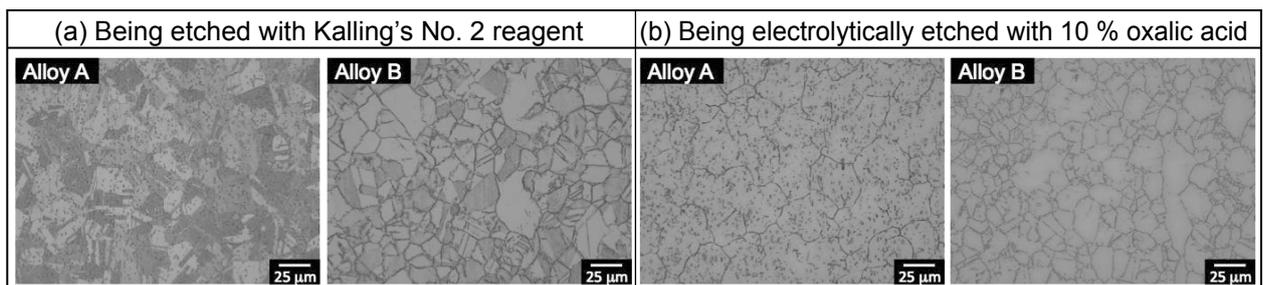


Fig. 2. Microstructure images of Alloy A and Alloy B after (a) being etched with Kalling's No. 2 reagent, and (b) being electrolytically etched with 10% oxalic acid.

Table 3 に示す. 工具には PVD コーティング超硬の菱形ネガティブインサートを使用した. クーラント液には 10 倍希釈のエマルジョンを使用し, クーラント圧 0.1 MPa にて試験した. 切削性の評価項目として, 工具のフランク摩耗, 切削抵抗, および熱電対法による切削温度を測定, 評価した^{6)~8)}.

アプレシブ粒子の同定および定量評価のため, Table 4 に示す電解抽出試験を実施した. 抽出率は, 電解抽出前後の試験片重量変化と抽出フィルターの重量変化から算出した. 抽出残渣の走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察ならびに X 線スペクトル解析 (EDX) を実施し, 抽出物の同定を図った.

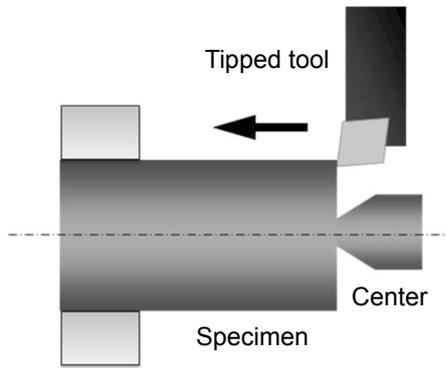


Fig. 3. Schematic image of machining test.

Table 2. Test conditions of the tool life test.

Machining Center	DMG MORI NT4200
Specimen size	φ92 mm x 300 mm
Cutting speed	30, 50 m/min
Feed rate	0.2 mm/rev
Depth of cut	0.5 mm
Coolant	Wet (emulsion lubricant)
Evaluation	Width of flank wear Appearance of tool tip Cutting Temperature

Table 3. Information of the cutting tool.

Manufacturer	Mitsubishi Materials Corp.
Tool shape	CNGG120408-FJ
Grades	VP15TF-Cemented carbide coated with (Al, Ti)N
Breaker	✓
Holder	PCLNR2525-43

Table 4. Condition of the electrolytic extraction test.

Sample size	10 mm cubic shape
Extracting solvent	10 % Acetylacetone 1% Tetramethylammonium-chloride Methylalcohol
Extracting time	4 hours
Current value	0.20 A
Pore size of filter	0.1 mm

3. 結果および考察

3. 1 切削性評価結果

Fig. 4 に切削速度 20, 30, 40, 50 m/min それぞれにおける切削初期の主分力を示す. エラーバーは試験中の抵抗値の最大値と最小値の数値から決定している. Alloy B の切削抵抗は, いずれの切削速度においても Alloy A 対比で低い値を示す. さらにエラーバーも Alloy B のほうが小さい傾向にあるが, 切削速度 50 m/min において, Alloy A, Alloy B ともに顕著なエラーバーの拡大傾向が認められる. これは, 拡散摩耗による急速な摩耗の進行が原因と推定される.

Fig. 5 に切削速度 30 m/min ならびに 50 m/min における工具摩耗曲線を, Fig. 6, Fig. 7 に摩耗測定時の工具の実体顕微鏡写真を示す. 切削速度 30 m/min における Alloy B のフランク摩耗の進行は Alloy A 対比で顕著に抑制されており, 特に摩耗量 200 μm を寿命判定距離とした場合, Alloy B の工具寿命は Alloy A 対比で 4 倍以上の向上が認められる. 一方で, 切削速度 50 m/min における摩耗の進行度合いは, Alloy A, B 間で明確な差異はなく, いずれの合金も極めて短時間で摩耗が進行している. このことから, 切削速度 30 m/min と 50 m/min との間では工具摩耗の支配因子が変化していることが示唆される.

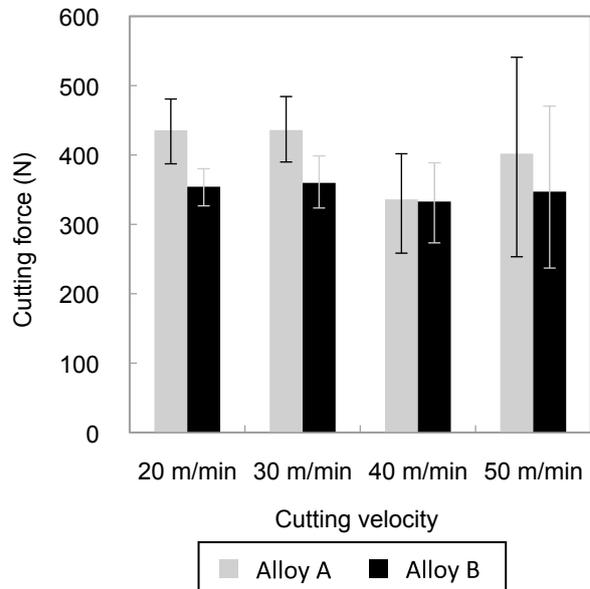


Fig. 4. Cutting forces of Alloy A and Alloy B at various cutting velocities.

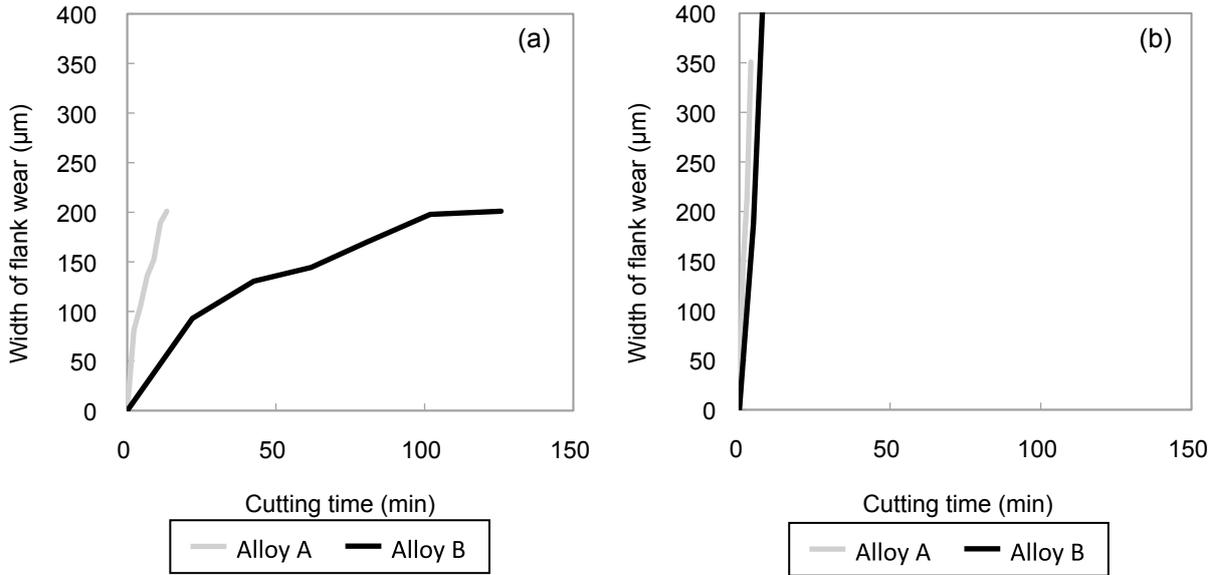


Fig. 5. Major flank wear curves of Alloy A and Alloy B at (a) 30 m/min and (b) 50 m/min in cutting velocity.

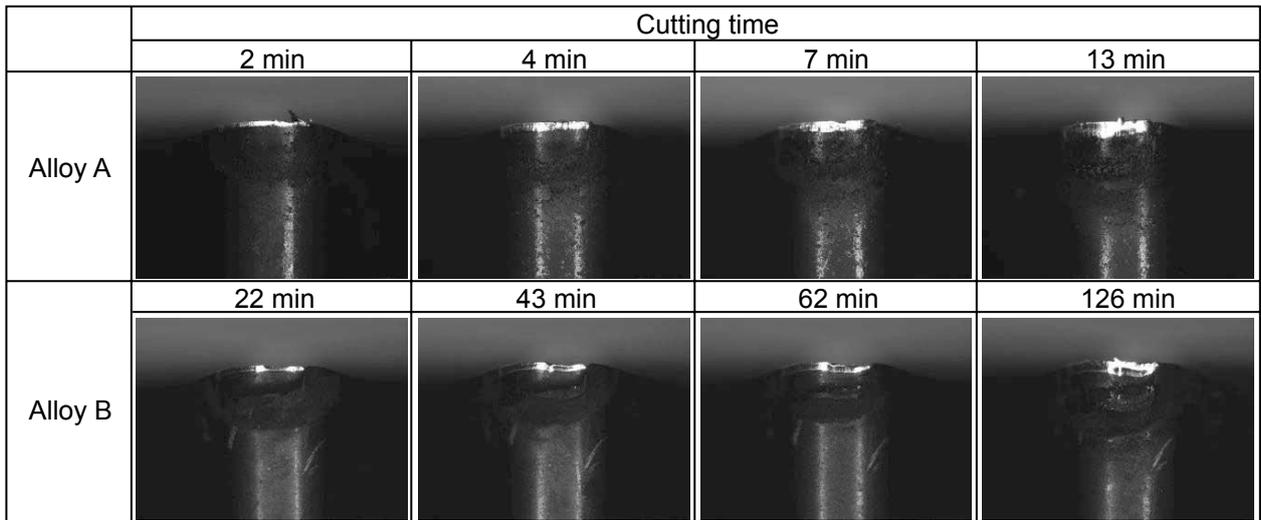


Fig. 6. Major flank wear progress at 30 m/min in cutting velocity.

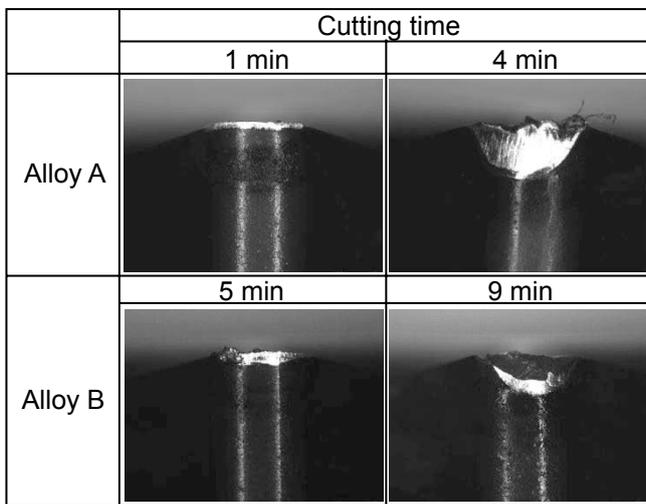


Fig. 7. Major flank wear progress at 50 m/min in cutting velocity.

3. 2 切削温度

Fig. 8⁹⁾ に示すように、工具摩耗の支配因子は切削温度に依存して変化する。低温域においては凝着摩耗が支配的であるが、温度の上昇に伴い酸化摩耗や拡散摩耗が支配的となり、ある温度を境に急速に摩耗が進行する。Ni 基超合金は炭素鋼に比較すると熱伝導率が著しく低いため、比較的遅い切削速度においても容易に切削温度が上昇し拡散摩耗を引き起こす傾向にある。そこで、Alloy A と Alloy B の工具寿命の差異に影響を与えた因子を考察するため、熱電対法を用いた切削温度の直接測定を実施した。Fig. 9 に切削速度 20 ~ 50 m/min における切削温度を示す。各切削速度において、Alloy A, Alloy B 間で切削温度に大きな差異はなく、切削速度の高速化に伴い、切削温度は上昇する。一般に

超硬工具を用いた旋削加工において、工具と被削材の切削温度が 800 °C 以上の領域になると工具摩耗形態は拡散摩耗が支配的になり、工具摩耗が急速に進行することが知られている^{10)~14)}。切削速度 20 m/min において、Alloy A, Alloy B ともに切削温度は 800 °C 未満である一方、切削速度 30 m/min 以上の速度では 800 °C を上回っていることから、切削速度 30 m/min 付近から拡散摩耗が現れ始め、切削速度の高速化に伴い、より顕著な拡散摩耗が認められることが予想される。これを踏まえ、Fig. 5(b)を参照すると、50 m/min の切削速度における急速な摩耗の進行は、切削温度の高温化による拡散摩耗の進行が要因であることが理解できる。一方で Fig. 5(a) に示す切削速度 30 m/min における摩耗進行の鋼種間差異は、いずれの鋼種も切削温度が約 800 °C 程度と拡散摩耗が顕在化するか否かの遷移温度域であることから、Fig. 8 で言うところの Suitable cutting temperature での切削加工に相当し、拡散摩耗以外の摩耗要因が工具摩耗量に影響することが予想される。したがって、切削速度 30 m/min においてアブレシブ摩耗の少ない Alloy B の工具摩耗が抑制されたと考えられる。

3. 3 アブレシブ粒子について

Fig. 8 に示すとおりアブレシブ摩耗は広い温度範囲で工具摩耗に影響をおよぼすことから、アブレシブ粒子の低減により幅広い切削条件下において工具寿命を改善させることが期待される。ここで、Eiselstein ら¹⁵⁾ の提唱する Alloy718 の TTP (Time-Temperature-Precipitation) 線図を参照すると、炭素を含有する Alloy718 には MC 系の炭化物を含有することが示唆され、おもに NbC, TiC, (Mo, V, Ta) C などが確認されている。Fig. 10¹⁶⁾ を参照すると MC 系炭化物の硬さは他の金属原子と炭素原子の構成比を取る炭化物と比較すると最も硬く、アブレシブ粒子として工具摩耗を助長することが予想される。

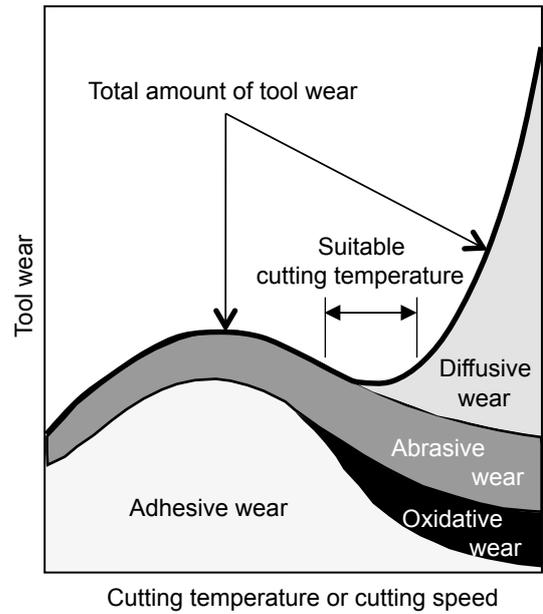


Fig. 8. Image of tool wear pattern transition as cutting temperature changes⁹⁾.

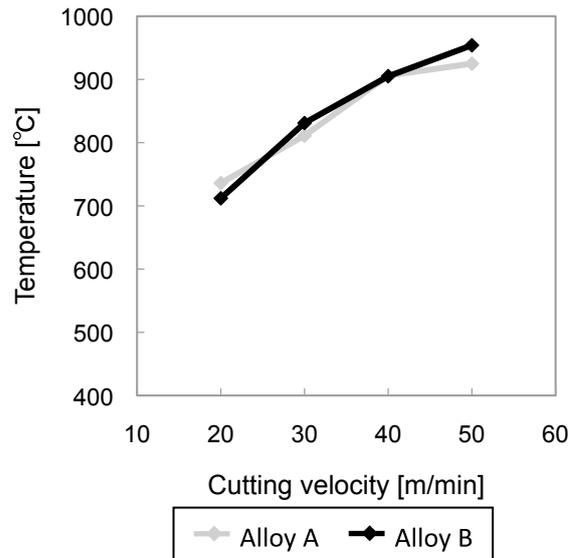


Fig. 9. Average cutting temperature of Alloy A and Alloy B at various cutting velocities.

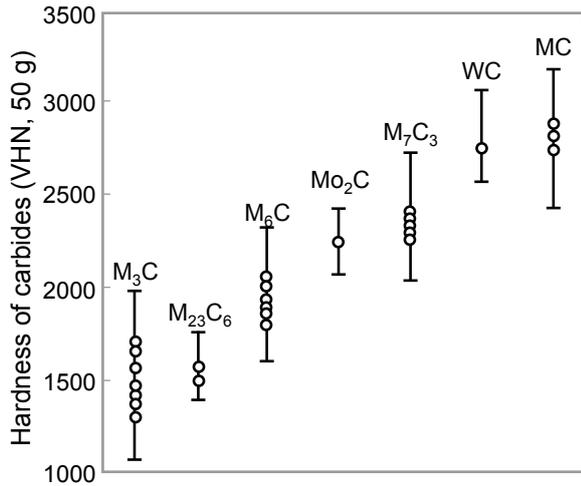


Fig. 10. Hardness of various carbides.

そこで、実際に Alloy718 の組織中に存在する析出物量と析出物種の調査のため、10% アセチルアセトン溶液を用いた電解抽出試験を実施した。Alloy A の抽出率は 0.250% である一方、切削性に優れる Alloy B の抽出率は 0.056% であり、Alloy B の析出物量は Alloy A 対比少ないことが明らかになった。また、Fig. 11 に抽出残渣の SEM 観察結果、並びに EDX による定性分析結果を示す。Alloy A、Alloy B いずれの鋼種においても、Nb、Mo、Cr を主体とするサブミクロン～数 μm オーダーの炭化物と、Ti、Nb を主体とする数 μm ～十数 μm 程度の窒化物が認められた。しかし、Nb、Ti を主体とする数 μm ～十 μm 程度の炭化物は Alloy A のみに認められた。以上から、切削速度 30 m/min における Alloy B の工具寿命が優れる要因は、アプレシブ粒子となる炭化物、窒化物の量が低減されたこと、および粗大な Nb、Ti 系の炭化物の析出量が抑制されたことによるものと示唆される。

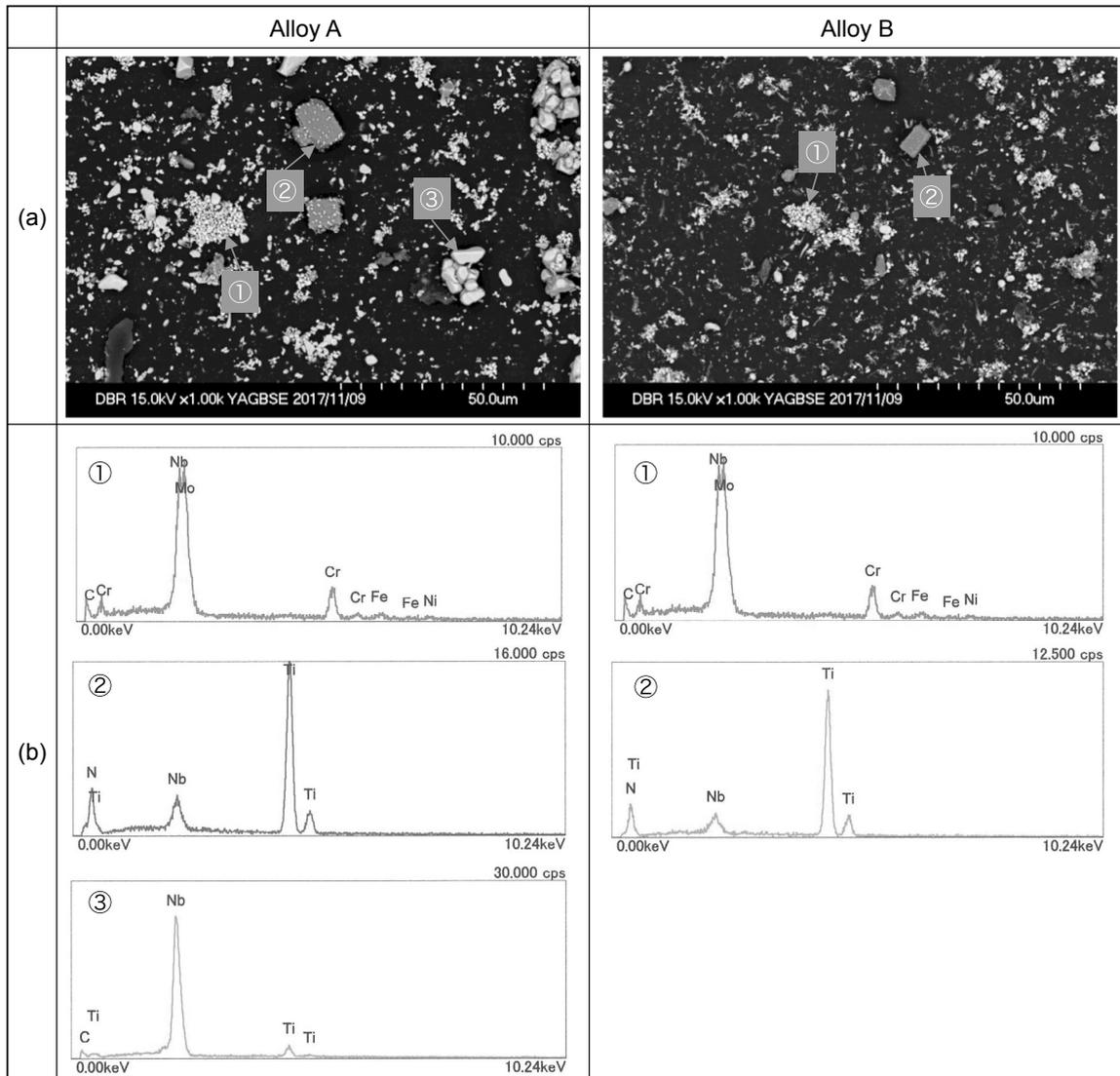


Fig. 11. SEM and EDX analysis results of electrolytic extractions, (a) backscattered electron image of extraction filters and (b) qualitative analysis results by using EDX.

4. 結 言

炭素含有量の異なる Alloy718 (Alloy A: 0.024C, Alloy B: 0.002C) の切削性と組織差異を調査した結果, 以下の知見を得た.

- (1) 炭素含有量の少ない Alloy Bの主分力は切削速度 20 ~ 50 m/minにおいて Alloy A対比低位だが, いずれの合金も切削速度 50 m/minにおける抵抗の振幅が増大する. これは, 拡散摩耗による急速な摩耗進行に起因すると思われる.
- (2) Alloy Bの切削速度 30 m/minにおける工具摩耗は, Alloy A対比抑制されており, フランク摩耗 200 μm を寿命判定としたとき, 工具寿命は 4倍以上向上する. 一方で切削速度 50 m/minにおいては, いずれの合金もごく短時間で摩耗が進行し, その挙動に明確な差異はない.
- (3) 切削速度 20~50 m/minにおける切削温度測定の結果, Alloy Aと Alloy Bで差異はなく, 切削速度の高速化に伴い切削温度は高温化する. 特に切削速度 50 m/minにおいて切削温度 900 $^{\circ}\text{C}$ を超えており, 拡散摩耗が容易に発生することが示唆される.
- (4) 電解抽出による炭化物, 窒化物の調査の結果, (Nb, Mo, Cr) 系炭化物, (Ti, Nb) 系窒化物, (Nb, Ti) 系炭化物が確認されたが, Alloy Aには全種, Alloy Bには(Nb, Mo, Cr) 系炭化物, (Ti, Nb) 系窒化物のみ認められ, 粗大な(Nb, Ti) 系炭化物は認められない. また Alloy Bの抽出率は Alloy A対比 1/5程度に抑制されており, Alloy718の低C化は炭化物の窒化物の析出量を低減し, かつ粗大な(Nb, Ti) 系炭化物が生成されないことによって工具のアブレイブ摩耗が抑制され, 工具寿命が改善することが示唆された.

(文 献)

- 1) 板倉勝利, 黒田基文, 土井義博, 塚本顕彦, 有浦泰常: 精密工学会誌, 66(2000), 10, 1611.
- 2) 杉野敦, 八田武士: 電気製鋼, 82(2011), 2, 165.
- 3) 竹山秀彦, 飯島昇: 精密工学会誌, 55(1989), 8, 1481.
- 4) E. O. Ezugwu, et al., "Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network", Int. J. Mach. Tool. Manu., 45(2005), 1375.
- 5) 鳴瀧則彦: 精密工学会誌, 58(1992), 12, 1949.
- 6) 前川克廣, 北川武揚, 白樫高洋, 白井英治: 精密工学会誌, 54(1988), 2, 346.
- 7) 白井英治, 白樫高洋, 北川武揚: 精密機械, 41(1975), 491, 1141.
- 8) 白樫高洋, 白井英治: 精密機械, 39(1973), 464, 966.
- 9) 竹山秀彦, 村田良司: 精密機械, 27(1961), 312, 33.
- 10) 北川武揚, 白樫高洋, 白井英治: 精密機械, 42(1976), 504, 1178.
- 11) 白井英治, 白樫高洋, 北川武揚: 精密機械, 43(1977), 514, 1211.
- 12) 白井英治, 北川武揚, 前川克廣, 帯川利之, 白樫高洋: 精密機械, 48(1982), 9, 1231.
- 13) 北川武揚, 前川克廣, 白樫高洋, 白井英治: 精密工学会誌, 53(1987), 9, 1414.
- 14) 前川克廣, 北川武揚, 白樫高洋, 白井英治: 精密工学会誌, 54(1988), 2, 346.
- 15) H. L. Eiselstein, "Advances in the Technology of Stainless Steels and Related Alloys", STP 369, ASTM, Philadelphia, PA, 1965, 62.
- 16) 佐藤知雄, 西沢泰二, 石原囊: 日本金属学会誌, 23(1959), 7, 403.



古庄千紘



光齋悠矢



宇野孝一