PVD コーティング被覆ダイによる 6063 アルミニウム
合金熱間押出のピックアップ欠陥の抑制船塚 達也^{1*}・高辻 則夫²
堂田 邦明³・渡辺 悠太郎⁴Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 70, No. 11 (2020), 510-516
© 2020 The Japan Institute of Light MetalsSuppression of pick-up defects in hot extrusion of
6063 aluminum alloy by using PVD coating dieTatsuya FUNAZUKA^{1*}, Norio TAKATSUJI²
Kuniaki DOHDA³ and Yutaro WATANABE⁴

6000 series aluminum alloys are used in a variety of fields including architectural products and automobiles. These products require complex cross-sectional shapes and high productivity. In the forming of products that meet these market requirements, surface defects such as pick-up and tearing occur. In the previous report, we focused on the mechanism of pick-up defects on the extrusion surface. The cause of the pick-up defects was the preferential adhesion of Mg and O to the die bearing surface. In this paper, a die coating is applied as a method to suppress the pick-up defects. AlCrN, TiAlN, Diamond-like carbon (DLC) were applied and compared to the Nitriding. The number of pick-up in the DLC increased as the stroke progressed, and surface layer delamination of DLC was observed after extrusion. Mg oxide wasn't observed in AlCrN and TiAlN on the bearing surface. And, surface delamination wasn't observed with these coatings. The coatings such as AlCrN and TiAlN to the die bearing surface were effective in suppressing pick-up defects.

(Received June 25, 2020 Accepted September 15, 2020)

Keywords: 6063 aluminum alloy; hot extrusion; pick-up; die coating

1. 緒 言

アルミサッシなどに広く使用されている 6063 アルミニウム合金押出製品の多くはポートホールダイを用いて押出した中空型材である。そして、その断面形状は、機能性の向上などを求め、ますます複雑さを増す一方で、表面品質の向上や低コストの要求も増してきている。しかし、複雑な断面形状や生産性を高めた押出条件での押出加工では、押出材表面上にピックアップと呼ばれる米粒状のむしれ欠陥が不規則に発生する。このピックアップ欠陥を抑制し、押出材の表面品質の低下を防ぐためには、押出速度の低速化が有効である。

著者らの前報¹⁾にて、Al-Mg-Si 系合金の熱間押出加工におけるピックアップ欠陥発生メカニズムの検討を行った。発生メカニズムとして、熱間押出が進むにつれて押出中のダイのベアリング面での摩擦およびピレット内部のせん断変形による加工発熱が発生する。Trindade ら²⁾の報告から 550°C の高温

化で工具鋼表面では Fe₂O₃ 層が形成される。ピレットである Al-Mg-Si 系合金では、Wefers ら³⁾および、加藤ら⁴⁾の報告から、300°C 以上の高温下でマグネシウム（以下、Mg）が最表面へ拡散される。ベアリング部で押出材表面の Mg とダイ表面の Fe₂O₃ との接触による酸化還元反応によって、ベアリング面に Mg 酸化物が付着する。Mg 酸化物によって押出材がむしられ、離脱することでピックアップ欠陥が発生することを明らかにした。その抑制方法として、ベアリング面の酸化の防止とベアリング面上でのダイと押出材の接触を防ぐ必要があることを報告した。ベアリング面におけるトライボ特性の向上がピックアップ欠陥の抑制に有効であると考えられる。

そこで、本報ではベアリング面の酸化の防止とトライボ特性の向上を目的として、ベアリング面上へのコーティング処理を検討する。著者らの解説記事^{5), 6)}に記述した通り、コーティング処理は冷間加工での適用がほとんどであり、熱間加工では板成形などの限られた塑性加工にのみ使用されてい

¹ 富山大学学術研究部工学系（〒930-8555 富山県富山市五福 3190） Academic Assembly Faculty of Engineering, University of Toyama (3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555)

² 富山大学学術研究部都市デザイン学系（富山市） Academic Assembly Faculty of Sustainable Design, University of Toyama (Toyama-shi, Toyama)

³ Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL, USA

⁴ YKK AP 株式会社（黒部市） YKK AP Co., Ltd. (Kurobe-shi, Toyama)

* 責任著者 E-mail: funazuka@eng.u-toyama.ac.jp

る。押出加工や鍛造加工といった高圧負荷かつ高表面積拡大を伴う加工の場合、加工時の摩擦係数の測定が困難であることから、それらをシミュレートした摩擦試験法はほとんど見られない。加えて、コーティング自体が高温かつ高負荷条件に耐えられず、その剥離寿命評価も難しい。加えて、深穴や狭窄部を有する複雑形状金型が対象となる場合には、イオンブレーティングやスパッタリングなどの物理的蒸着法（PVD法）では、製膜ができないため、適用は困難とされてきた。熱間押出加工におけるコーティング適用例については政ら⁷⁾は硬質被膜ダイスにおける表面性状に及ぼす影響およびコーティングの耐摩耗性、耐酸化性について報告している。しかし、実用に至るまでの知見が得られておらず、実操業で熱間塑性加工へダイコーティングを適用した事例は非常に少ない。特に、ピックアップ欠陥などの押出材表面に発生する表面欠陥などに着目した例はない。

ダイコーティング処理がピックアップ欠陥に及ぼす影響を調査するために、汎用の表面処理である窒化処理に加え、AlCrN, TiAlN, Diamond-like carbon (DLC) の3種類のPVDコーティングを適用した。AlCrNおよびTiAlNについて、Kalinら⁸⁾⁻¹⁰⁾の一連の研究やBirolら¹¹⁾による摩擦試験の報告より、熱間押出温度に近い500°C時の摩擦係数が小さいこと、また摺動後のダイに付着したアルミニウム合金の表面積が小さいことが報告されている。DLCでは、耐熱性には優れてはいないもののアルミニウム合金に対しての摩擦係数が非常に小さく、耐摩耗性に優れていることが報告されている^{12), 13)}。

本研究では押出荷重、ピックアップ欠陥数、ダイ表面元素分析などを行い、ダイ表面へのコーティング処理の適用によるピックアップ抑制効果を明らかにする。

2. 実験方法

Table 1に本実験での押出条件を示す。供試材料は、A6063合金を使用した。本実験で使用したA6063合金の組成を**Table 2**に示す。ビレット形状は旋削加工にて $\phi 42 \times 100$ mmとした。また、ビレット温度は540°Cとし、ラム速度は10 mm/sとした。押出比は28.9とし、ラムストロークは90 mm、潤滑条件は無潤滑とした。押出用工具はすべて熱間ダイス鋼（SKD61）を素材とした。熱間押出実験は**Fig. 1(a)**に示す横型油圧プレス押出機（最大プレス能力2000 kN）を用いた。

ダイ表面のコーティングがピックアップ欠陥に及ぼす影響

Table 1 Extrusion conditions.

Die material	SKD61
Billet material	A6063
Billet shape [mm]	$\phi 42.0 \times 100$
Extrusion temperature [°C]	540
Ram speed [mm/s]	10
Extrusion stroke [mm]	90
Extrusion Ratio [–]	28.9

Table 2 Chemical composition of A6063 alloy [mass%].

Alloy	Mg	Si	Fe	Al
A6063	0.48	0.49	0.15	Bal.

を明らかにするため実験では、**Fig. 1(b)**に示すような分割ダイを用いた。ダイ形状は**Fig. 1(b-1)**に示すようにベアリング長さ3.0 mmで、得られる板材の寸法は幅18.6 mm、厚さ1.5 mmとした。**Fig. 1(b-2)**に分割ダイの概略図を示す。幅18.6 mm、高さ1.5 mmの凹部が付いたダイをAとし、半円となっているダイをBとした。**Table 3**に供試のコーティングにおけるコーティング方法、膜厚、ビッカース硬さ、表面粗さを、**Fig. 2**に窒化処理と各種ダイコーティングの粗さ曲線を示す。各コーティングはベアリング面の表面粗さ Ra を0.1 μm 程度に整えた後にコーティング処理を施した。コーティング後の表面粗さは**Fig. 1(b-2)**のBを測定した。TiAlNおよびDLCで局部的に粗さの高い箇所はドロップレット除去時に発生した空孔を測定しているものと考えられる。ドロップレットはPVDコーティングの蒸着時にコーティング内部に金属粒子などが混入することで発生する。それを除去した際にコー

Fig. 1 Experimental apparatus.

Table 3 Properties of the coatings.

Surface condition	Thickness [μm]	Hardness [HV]	Surface roughness Ra [μm]
Nitriding ⁽¹⁾	150	1100	0.122
AlCrN ⁽²⁾	3.8	3100	0.035
TiAlN ⁽²⁾	5.0	2800	0.074
DLC ⁽³⁾	1.0	2900	0.082

(1) Gas Nitriding, (2) Cathodic Vacuum Arc,
(3) Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition

Fig. 2 Surface roughness curve in each surface condition.

ティング表面に微小な空孔ができるため面粗度の悪化につながる」とされている。

Fig. 3に熱間押し実験後の押出材の観察位置と押出材表面のピックアップ欠陥を示す。押出実験で得られる押出材の全長はおよそ2400 mmの内、押出材先端より800 mmごとに観察した。また、押出材の形状が幅18.6 mmであることから左右対称として、ピックアップ欠陥数観察位置は押出方向を縦として1.0 mm、板材の中心から端部までの幅9.3 mmとした。押出材表面のピックアップの観察には、低真空電子顕微鏡 (Miniscope; 株式会社日立ハイテク, TM3030) を用いた。押出材と押残材のミクロ組織観察は光学顕微鏡 (Optical microscope, OM; NIKON, H600L Microscope), 電子線マイクロアナライザ (Electron probe microanalysis, EPMA; JEOL, JXA-8230) および同装置の走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscopy, SEM) を用いた。押出材表面粗さの測定に表面粗さ測定器 (株式会社小坂研究所, SE-30D) を用いた。測定距離は9.3 mm, 押出方向と垂直方向に測定した。ベアリング部および押出材表面の元素分析にはEPMAの波長分散分光法 (Wavelength-dispersive spectroscopy, WDS) を用いた。ドロップレットによる空孔部の形状測定には非接触3次元形状測定器 (ZYGO Corporation, NewView 7300) を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ピックアップ欠陥および押出材表面に及ぼすダイコーティングの影響

図は省略するが、窒化処理, AlCrN, TiAlN および DLC の最大押出荷重はそれぞれ、窒化処理が527.8 kN, AlCrN が496.4 kN, TiAlN が495.4 kN, DLC が515.0 kNとなった。本実験では、ダイコーティングの適用は押出荷重に影響を及ぼさないことがわかった。

Fig. 4に各種ダイコーティングにおけるピックアップ欠陥数を示す。窒化処理では最も多く押出材表面にピックアップ欠陥が発生した。また、押出が進むにつれてピックアップ欠陥が増加することがわかった。DLCでは、窒化処理に比べて押出初期ではピックアップの発生が抑制されたが、押出の進行とともにピックアップ欠陥が増加した。これらに対して、AlCrN および TiAlN では、いずれの地点でも0から2個程度と窒化処理とDLCに比べてピックアップ欠陥数が少ないことがわかった。

Fig. 5(a)に各種ダイコーティングにおける押出材表面粗さを示す。いずれのコーティング処理でも押出材表面粗さ Ra は、0.080~0.125 μm 程度の非常に滑らかな表面状態であり、

Fig. 3 Surface observation position of extrusion.

Fig. 4 Number of pick-up in each die coating. (Extrusion temperature 540°C, Ram speed V 10 mm/s)

(a) Surface roughness of each length of extrusion from tip

(b) Surface roughness curve of extrusion (Extrusion length 2400mm)

Fig. 5 Surface roughness of extrusion in each die coating.

押出の進行とともに表面状態が悪化することもなかった。Table 1 に示すダイ表面粗さも $0.035 \sim 0.125 \mu\text{m}$ 程度と非常に滑らかな表面となっており、押出材も同程度の表面粗さとなった。Fig. 5(b) に押出材先端から 2400 mm での押出材の表面粗さ曲線を示す。窒化処理と AlCrN では表面粗さ曲線に大きなピークは見られなかった。一方で TiAlN と DLC では表面粗さ曲線にいくつか粗さの値が高い個所が見られた。Fig. 5(b) の特に粗さの値が高い個所ではダイラインが見られた。

以上の結果から、ベアリング面に AlCrN および TiAlN を処理すると押出材表面のピックアップ欠陥を抑制し、AlCrN では良好な押出材表面を得ることが出来た。

3.2 ベアリング面観察および元素分析

Fig. 6 に各種ダイコーティングにおけるベアリング面外観のモノクロ図を示す。押出後のベアリング面外観モノクロ図の黒い部分がダイ表面、白い部分がアルミニウム合金である。Fig. 6 から、窒化処理 > TiAlN > DLC > AlCrN の順でベアリング面上のアルミニウム合金の付着範囲が広いことが見てわかる。次に押出後のダイ表面の状態を観察するために、アルミニウム（以下、Al）を溶解（20%NaOH 水溶液、30 分間）した。それぞれの条件のベアリング面観察と EPMA によるカラーマップ分析を行い、コーティングの状態および付着物の元素を観察した。

Fig. 7 に Al 溶解後の各種ダイコーティングのベアリング面観察結果を示す。観察位置はベアリング中央の出口部（図内 C）、ベアリング端の出口部（図内 E）の 2ヶ所とし、観察範囲は 1 mm 四方とした。それぞれの観察位置で、窒化処理と AlCrN の表面ではダイ表面に損傷などは観察されなかった。TiAlN と DLC の表面ではドロップレット除去時に出来た空孔が多数見られる。また Fig. 6 の TiAlN と DLC の押出後のベアリング面外観でも点状に堆積したアルミニウム合金が無数に見られ、この空孔に押出中のアルミニウム合金が堆積することでベアリング面へのアルミニウム合金の凝着面積が広く

なったと考えられる。一方で、Fig. 4 から TiAlN での押出材表面にピックアップ欠陥は確認されていない。TiAlN 表面にあるドロップレットはダイ表面へのアルミニウム合金付着量の増加につながるが、ピックアップ欠陥に影響を及ぼさないと考えられる。AlCrN では、Table 3 からコーティングの算術平均粗さ R_a が特に低いこと、Fig. 6 から点状のアルミニウム合金の堆積が少ないことから、TiAlN や DLC ほど粗さの増加が見られなかったと考えられる。

Fig. 8 に各種ダイコーティングにおけるベアリング面元素分析結果を示す。Fig. 8(a) より、窒化処理の分析結果から、前報同様に、Mg の反応が強く、ビレット内の Mg が熱間のダイ表面で形成される Fe_2O_3 と優先的にベアリング面に付着したと考えられる¹⁾。また、Mg と同じ範囲で酸素（以下、O）の反応も強いいため、堆積物は MgO と考えられる。Fig. 8(b) より、AlCrN の分析結果から Mg のベアリング面への付着は確認されなかった。ピックアップ欠陥発生原因であるベアリング面への Mg 酸化物の付着を防止したことで、ピックアップ欠陥を抑制することができたと考えられる。また、AlCrN に含有している Al、クロム（以下、Cr）、窒素（以下、N）の反応が高いこと、またダイの主成分である鉄（以下、Fe）の反応がないことからコーティングの剥離は観察されなかった。局所的な付着についてはドロップレットに Al が堆積したものと考えられる。Fig. 8(c) より、TiAlN の分析結果から AlCrN と同様に、Mg のベアリング面への付着は確認されず、コーティングの剥離についても観察されなかった。Fig. 8(d) より、ピックアップ欠陥が発生した DLC でも Mg のベアリング面への付着は確認できなかった。また、ダイの主成分である Fe の反応が強いことから熱間押出中にコーティングは損傷および劣化したと考えられる。一方で、DLC の下地処理として使用される SiC によるケイ素（以下、Si）の反応が高いことから、Mg とダイ表面の Fe は直接的に接触していないため、Mg のベアリング面への付着は確認できなかったと考えられる。また、DLC は本実験の押出温度のような高温条件で摩擦係数が増大し、被加工材の凝着量の増加および、コーティン

Fig. 6 Die bearing surface after extrusion in each die coating. (Extrusion length 2400 mm)

Fig. 7 Die bearing surface after Al dissolution in each die coating. (Extrusion length 2400 mm)

Fig. 8 Die bearing surface color map analysis results in each die coating. (Extrusion length 2400 mm)

グの摩耗が激しくなることが報告されている^{12)~14)}。加えて、350~450°Cの温度範囲でコーティング自体が酸化し、劣化することが報告されている¹⁵⁾。Fig. 8(d)でもOの反応があり、ダイ表面のDLCが酸化したと考えられる。

Fig. 8(d)のDLCでは、酸化したDLC表面を確認できたが、Mgの付着は確認できなかった。Fig. 6およびFig. 7からDLC表面はドロップレットによる空孔部が無数に存在することがわかっており、押出後には空孔部に点状のアルミニウム合金の堆積が観察された。Fig. 9にAl溶解後のDLC表面におけるドロップレットによる空孔部のSEM像とその形状、Mg、O、Cの元素分析結果を示す。空孔部の形状は幅がそれぞれ30 μm 程度、深さ1.0 μm 程度であった。また、空孔部にMgとOの強い反応が観察された。DLCの主成分であるCも観察された。従って、押出中にドロップレットによる空孔部にMgを含んだアルミニウム合金が堆積したと考えられる。また、高温条件下でDLC自体が酸化することから、押出が進むにつれて、空孔部に堆積したアルミニウム合金のMgと酸化したDLC表面でMg酸化物を形成したと考えられる。

以上の結果から、ベアリング表面のMgを含む合金元素の付着がピックアップ欠陥発生の原因となると考えられる。Fig. 10にダイコーティングの有無での押出中のベアリング部

の模式図を示す。窒化処理の場合、熱間押出中にピレットとダイは直接接触する。著者らの過去の研究から、ピレットとダイ界面のせん断変形によって発生する加工発熱により、ベアリング部では最大100°C程度の温度上昇が発生することを報告している¹⁶⁾。Fig. 10(a-1)に示すように押出中の加工発熱によって、ダイ表面で局所的に Fe_2O_3 が形成される²⁾。押出材最表面に拡散されたMgとの接触による酸化還元反応によって、ベアリング面にMg酸化物が付着する^{3), 4)}。Fig. 10(a-2)に示すように加工発熱によって酸化還元反応が活発になり、ベアリング面に付着するMg酸化物が増加すると考えられる。熱間押出が進むにつれて、ベアリング面上に凝着したMg酸化物によって押出材がむしられ、離脱することでピックアップ欠陥が発生したと考えられる。一方で、ベアリング部にAlCrNまたはTiAlNを施すことで、Fig. 10(b-1)に示すようにピレットとダイ間にコーティング膜が存在する。これにより、ダイ表面と押出材最表面の直接的な接触が防がれると考えられる。同時に、大気中のOを起源とする Fe_2O_3 層の形成によるダイ表面の酸化を抑制したと考えられる。特に、AlCrNやTiAlNなどのPVDコーティングはKalinら^{8)~10)}、Birolら¹¹⁾による摩擦試験から、熱間押出温度に近い500°C時の摩擦係数が小さいこと、Alの凝着量が少ないことが報告さ

Fig. 9 SEM image, difference in height and color map analysis results of droplets in DLC. (Extrusion length 2400 mm)

れている。そのため、ベアリング面へのMg酸化物の付着も少なくなったと考えられる。一方で、DLCでは高温下での摩擦特性や耐摩耗が低いこと、DLC自体が酸化し、劣化を起こすことが報告されている^{12)–15)}。Fig. 10(b-2)に示すように熱間押出が進むにつれて、高温条件下で酸化したDLC表面のドロップレットによる空孔内部に、Mgを含んだアルミニウム合金が堆積することでMg酸化物が形成される。Mg酸化物が押出材表面をむしることでピックアップ欠陥が増加したと考えられる。

3.3 連続押出実験によるコーティングの性能評価

押出材先端からの長さ2.4 mまではAlCrNとTiAlNではピックアップ欠陥はほとんど発生しなかった。実操業では1回の押出でおよそ50 mの押出材に成形する。そこで本項ではAlCrNとTiAlNの有効性をさらに明らかにするために、押出材先端からの長さ50 mまでの熱間押出実験を行った。目標となる長さまでピレットを連続で継ぎ足し、押出を行った。押出材先端からの長さ50 mでのTiAlNとAlCrNのピックアップ欠陥数を測定したが、どちらもピックアップ欠陥は観察されなかった。また、押出材先端からの長さ10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m地点での押出材表面粗さを調査した結果、TiAlNではどの地点でも算術平均粗さで $0.10\ \mu\text{m}$ 程度となり、AlCrNではどの地点でも算術平均粗さで $0.06\ \mu\text{m}$ 程度となった。どちらのコーティングでもピックアップ欠陥は確認されず、押出材表面の粗さに大きな変化は観察されなかった。

Fig. 11(a)にAlCrN、Fig. 11(b)にTiAlNの押出材先端からの長さ2.4 mと50 mにおける押出後のベアリング部におけるEPMAによるカラーマップ元素分析を行った結果を示す。ベアリング表面のAlは20%NaOH水溶液に30分間漬けることで溶解させた。観察箇所はFig. 8と同じ箇所を分析した。分析元素はコーティングの成分であるAl, Cr, チタン（以下、Ti）およびピックアップ欠陥の発生に影響を与えるMgとO、鋼材の主元素であるFeを分析した結果を示す。分析結果の比較から、AlCrNとTiAlNのどちらのダイコーティングでも押出が進むにつれてMgの付着が確認できた。一方で、Oの付着は

Fig. 10 Schematic diagram of die bearing during hot extrusion.

確認できず、押出材先端からの長さ50 mまでの押出でMg酸化物は生成されなかった。Fig. 8にて示したように、ピレット側のMgとダイ側の Fe_2O_3 による酸化還元反応によってMgOが生成されることがピックアップ欠陥の発生につながるところ、ベアリング部にコーティングを施すことで、酸化還元反応を阻害し、MgOの生成を防いだことでピックアップ欠陥を抑制できたと考えられる。また、AlCrN、TiAlNのどちらにも含有しているAlの反応が低下した。AlCrNについてはCrの反応が強くなり、TiAlNはTiの反応も低下した。最表面のAlを含むコーティング層が摩耗したことがわかる。また、押出材先端からの長さ50 m地点の分析結果ではそれぞれのコーティングに含有している成分元素の欠落部分が見られないこと、また、どちらのコーティングでもダイの主成分であるFeの反応が見られなかったことからコーティングの剥離は見られなかった。

以上の結果から、TiAlNとAlCrNのいずれのダイコーティングも本実験条件下ではピックアップ欠陥発生低減に有用であると考えられ、押出材先端からの長さを50 mまで増加させてもコーティングの剥離は発生しなかった。

Fig. 11 Color map analysis of die surface after Al dissolution at extrusion length of 2.4 m and 50 m.

4. 結 言

本報ではA6063合金の熱間押出加工におけるピックアップ欠陥の抑制方法の検討としてベアリング部にダイコーティングを施した。ダイを分割することで、ベアリング部にPVDコーティングを製膜することが可能となった。以下に明らかとなった知見を示す。

(1) 押出材先端から2400 mmまでの実験では、800 mm, 1600 mm, 2400 mmのいずれの地点でもAlCrNおよびTiAlNのピックアップ欠陥数は、0から2個程度と窒化処理とDLCに比べて少なかった。

(2) 窒化処理のベアリング面ではMgとOの付着が確認された。一方で、AlCrNおよびTiAlNではMgとOの付着が見られなかった。DLCではMgの付着は確認されなかったが、Oが確認され、酸化によるコーティングの劣化およびFeとDLCの下地処理のSiの反応も確認されたため、コーティングの損傷が生じた。

(3) AlCrNおよびTiAlNでは、長さ2.4 mの押出では数個程度のピックアップ欠陥が観察されたものの、長さ50 mの連続押出実験ではピックアップ欠陥は観察されなかった。

謝 辞

本研究遂行に当たり、実験用のビレットを提供いただいたYKK AP株式会社に感謝申し上げます。また、コーティングについてご助言いただき、分割ダイへの被膜にご協力いただいたトーヨーエイトック株式会社の岡本圭司様に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 船塚達也, 高辻則夫, 土屋大樹, 小田省吾: 軽金属, **70** (2020), 415-421, doi.org/10.2464/jilm.70.415.
- 2) V. B. Trindade, R. Borin, B. Z. Hanjari, S. Yang, U. Krupp, H. J. Christ: Mat. Res., **8** (2005), 365-369, doi.org/10.1590/S1516-14392005000400002.
- 3) K. Wefers: Aluminium, **57** (1981), 722-726.
- 4) 加藤 豊, 塚本建次, 磯山永三, 内山利光, 成島勝也, 石丸肇: 軽金属, **35** (1985), 228-233, doi.org/10.2464/jilm.35.228.
- 5) 堂田邦明, N. Mahayotsanun: 塑性と加工, **54** (2013), 575-580, doi.org/10.9773/sosei.54.575.
- 6) K. Dohda, C. Boher, F. Rezai-Aria and N. Mahayotsanun: Friction, **3** (2015), 1-27, DOI 10.1007/s40544-015-0077-3.
- 7) 政 誠一, 松岡信一, 矢後俊郎: 軽金属, **54** (2004), 318-322, doi.org/10.2464/jilm.54.318.
- 8) J. Jerina and M. Kalin: Wear, **319** (2014), 234-244, doi.org/10.1016/j.wear.2014.07.021.
- 9) J. Jerina and M. Kalin: Wear, **340** (2015), 82-89, doi.org/10.1016/j.wear.2015.07.005.
- 10) M. Kalin and J. Jerina: Wear, **330** (2015), 371-379, doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.007.
- 11) Y. Birol: Tribol. Int., **57** (2013), 101-106, doi.org/10.1016/j.triboint.2012.07.023.
- 12) A. A. Gharam, M. J. Lukitsch, P. M. Balogh, N. Irish and A. T. Alpas: Surf. Coat. Technol., **206** (2011), 1905-1912, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.002.
- 13) A. Banerji, S. Bhowmick and A. T. Alpas: Surf. Coat. Technol., **241** (2014), 93-104, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.10.075.
- 14) S. Bhowmick, M. Lou, M. Z. U. Khan, A. Banerji and A. T. Alpas: Surf. Coat. Technol., **332** (2017), 399-407, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.093.
- 15) D. Y. Wang, C. L. Chang and W. Y. Ho: Surf. Coat. Technol., **120** (1999), 138-144, doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00350-3.
- 16) 谷村将吾, 竹下晴久, 鈴木智典, 福増秀彰, 高辻則夫, 沖田真吾: 軽金属学会第131回秋期大会講演概要, (2016), 91-92.