CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.21, No.6(2022), pp.476~486 pISSN 1598-6462 / eISSN 2288-6524
[Research Paper] DOI: https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.6.476

알루미늄 6061 합금의 표면 나노 구조물 변화에 따른 방빙 특성 연구

김리안 · 정찬영†,††
동의대학교 금속소재공학과, 부산광역시 부산진구 엄광로 176
(2022년 10월 20일 접수, 2022년 11월 9일 수정, 2022년 11월 12일 채택)

Anti-Icing Characteristics of Aluminum 6061 Alloys According to Surface Nanostructure

Rian Kim and Chanyoung Jeong†,††
Department of Advanced Materials Engineering, Dong-eui University, Busan 47340, Korea
(Received October 20, 2022; Revised November 09, 2022; Accepted November 12, 2022)

Recently, aluminum 6061 instead of copper alloy is used for cooling heat exchangers used in the internal combustion of engines due to its economic feasibility, lightweight, and excellent thermal conductivity. In this study, aluminum 6061 alloy was anodized with oxalic acid, phosphoric acid, or chromic acid as an anodizing electrolyte at the same concentration of 0.3 M. After the third anodization, FDTS, a material with low surface energy, was coated to compare hydrophobic properties and anti-icing characteristics. Aluminum was converted into an anodization film after anodization on the surface, which was confirmed through Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). Pore distance, interpore distance, anodization film thickness, and solid fraction were measured with a Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM). For anti-icing, hydrophobic surfaces were anodized with oxalic acid, phosphoric acid, or chromic acid solution. The sample anodized in oxalic acid had the lowest solid fraction. It had the highest contact angle for water droplets and the lowest contact hysteresis angle. The anti-icing contact angle showed a tendency to decrease for specimens in all solutions.

Keywords: *Aluminum oxide nanostructure, Anodization, Hydrophilic, Hydrophobic, Anti-icing*

1. 서론

자동차, 선박, 기차, 항공기 등 엔진의 내연기관에 활용되고 있는 냉각용 열 교환 장치는 열전도율이 높은 구리합금을 사용하였으나, 최근에는 경제성, 경량화 및 우수한 열 전도성을 목적으로 Al 6000 계열 합금이 주로 활용되고 있다 [1-3]. 그러나 압력이 높은 공간에 위치한 냉각용 열 교환장치는 운전시 냉각수의 끓는 점이 높아지기 때문에 온도 차로 인한 냉각 효과가 극대화되어 결빙이 발생하며, 이는 엔진 손상, 엔진오일 등의 기능 저하를 초래한다 [4-7]. 결빙으로 인한 사고 방지의 구체적인 해결 방안이 없어 불필요한 에너지를 소모하고 있으며, 냉각용 열 교환 장치의 배치 공간 확보는 복잡한 설계와 경제적으로 큰 비용이 필요하다 [8]. 따라서 효율적이고 경제적인 제빙(De-Icing) 및 방빙(Anti-Icing) 기술이 요구되고 있어, 이를 구현하는 표면처리 공정의 개발 및 연구가 각광받고 있다.

고체 표면의 방빙 효과 구현에 필요한 인자는 젖음성 및 표면 형상 등이 존재한다. 낮은 젖음성을 위한 발수성 표면의 구현이 필수적이며, 발수성 표면은 연꽃잎, 소금쟁이의 다리 구조 등 자연에서 영감을 받아 개발되었다 [9-12]. 고체 표면 위 액적의 반경은 고체-액체 계면에서 흡수되는 정도에 따라 달라지며, 고체 표면 위 액적이 기체로 둘러싸여 고체, 액체, 기체가 교차하는 상의 경계에서 측정된 각을 접촉각이라 한다 [13,14]. 일반적으로 접촉각의 크기가 15° 이하인 표면을 초친수성 표면, 30° 이하인 표면을 친수성 표면이라 하며, 90° 이상인 표면을 발수성 표면, 150° 이상인 표면을 초발수성 표면이라 정의한다. 접촉각이 큰 발수성 표면은 고체 표면 위 액적이 유동적이기 때문에 표면에 물방울이

†Corresponding author: cjeong@deu.ac.kr
††These authors contributed equally to this work as the first author.
정찬영: 교수, 김리안: 학부 연구생

붙지 않는 특성을 가질 수 있다 [15-18].

방빙 특성을 구현하기 위한 표면 처리 방법 중 하나인 양극산화는 다른 방법에 비해 친환경적이고, 경제적인 장점이 있어 최근 각광받고 있는 방법이다. 또한 산성 전해질 내에서 두껍고 단단한 다공성 산화피막을 형성하여 내식성을 향상시킬 수 있다 [19-21]. 표면에 형성된 구조물로 인해 친수 특성이 구현되며, 표면에너지가 낮은 물질을 코팅하여 발수 특성을 부여할 수 있다. 양극산화의 매개변수인 전해질의 종류, 조성 및 농도, 인가전압 또는 전류밀도 등을 조절함에 따라 산화피막의 두께 및 기공의 크기를 조절할 수 있으며 [22-24], 전해액으로는 옥살산, 인산, 크롬산 등 다양한 전해질을 통해 산화피막을 형성시킬 수 있다. 인산과 크롬산은 폐수처리와 유해 물질 문제로 사용 빈도가 낮지만, 충분한 두께, 높은 내식성을 가지는 Anodization film을 얻을 수 있으며, 옥살산은 황산에 비해 공정 후의 경도, 내식성, 내마모성이 뛰어나 여러 특성을 요구하는 분야에 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다 [25-29].

본 연구에서는 알루미늄 6061의 양극산화 전해질의 종류별 알루미늄 표면 위 방빙 특성을 알아보기 위해 양극산화 전해질 종류를 옥살산, 인산, 크롬산으로 수행하였으며, 전해질별 산화피막의 성장 거동과 방빙 특성에 관하여 연구하였다. 양극산화 공정을 단계적으로 이행하여 1차 양극산화 후 산화피막을 제거하였으며, 2차 양극산화 후 표면 기공 확장을 위해 PW(Pore-Widening)와 3차 양극산화를 마지막으로 방빙 특성을 관찰하였다 [30].

2. 연구방법

본 연구에서는 알루미늄 6061 합금을 25 mm × 30 mm × 1 mm로 가공하여 사용하였으며 표면의 불순물을 제거하기 위해 상온에서 아세톤과 에탄올로 각각 15분씩 초음파 세척을 진행하였다. 1차 양극산화 처리 전 금속 표면에 존재하는 자연 산화막을 제거하기 위해, 에탄올(Ethanol, 95%)과 과염소산($HClO_4$, 70%)을 4:1의 부피 비율로 혼합한 상온의 용액에서 양극에는 알루미늄 시편, 음극으로는 백금을 사용하여 20 V 전압으로 1분간 전해연마를 실시하였다. 양극에는 전해연마를 행한 알루미늄 6061 시편, 음극에는 백금을 사용하여 전극 간 거리는 5 cm로 일정하게 유지 후 0.3 M의 농도로 제작된 옥살산(Oxalic acid), 인산(Phosphoric acid), 크롬산(Chromic acid)을 전해액으로 하여 0 ℃에서 40 V의 전압으로 6시간 동안 1차 양극산화를 실시하였다. 형성된 산화피막을 제거하기 위해 1.8 wt%의 크롬산과 6 wt%의 인산을 기반으로 한 혼합용액을 이용해 시편을 65 ℃에서 10시간 동안 침지 하였고, 1차 양극산화와 동일한 0 ℃ 전해액에서, 40 V의 전압을 통해 30분 동안 2차 양극산화를 진행하였다. 기공 확장을 위해 30 ℃의 0.1 M 인산에서 40분간 침지 하였으며 [31], 마지막으로 0 ℃의 전해액에서 80 V의 전압을 인가하여 30초 동안 3차 양극산화를 실시하였다. 이는 선행연구에 따라 확실한 구조물을 형성하여 초발수성 표면을 구현하기 위함이며, 양극산화 후 생성된 시편의 화학조성 및 성분을 확인하기 위해 에너지 분산 X선 분광법(EDS, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)을 사용하였고, 표면의 형상을 관찰하기 위해 시편을 1분 동안 백금 코팅 후, 전계 방출형 주사전자현미경(FE-SEM, Field Emission Scanning Electron Microscope)을 이용해 관찰하였다. 3차 양극산화 후 발수성 표면을 구현하기 위해 자가조립 단분자막(SAM, Self-Assembled Monolayer) 코팅 전, 플라즈마 장치를 이용하여 표면에 잔존하는 불순물 등을 제거하고, 시편을 10분간 150 ℃에서 건조 후 낮은 표면에너지를 가지는 FDTS(1H, 1H, 2H, 2H-Perfluorodecyltrichlorosilane) 용액으로 코팅하였다. 친수 및 발수 특성을 확인하기 위해 상온에서 3 μL의 증류수를 이용하여 접촉각 측정 장비로 5회씩 측정하였고, 방빙 특성을 확인하기 위해 -18 ℃의 환경에서 제빙한 시편의 접촉각 및 접촉이력각을 측정하였다.

3. 연구결과 및 고찰

본 연구는 양극산화 전해액 변화에 따라 구현되는 친수, 발수 및 방빙 특성을 관찰하였다. 양극산화 전해액

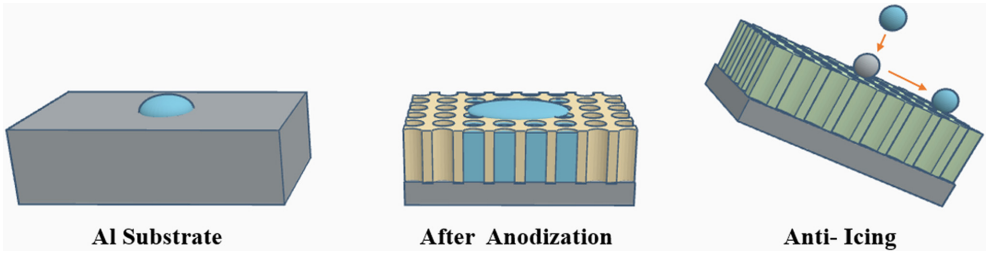


Fig. 1. Experimental method diagram

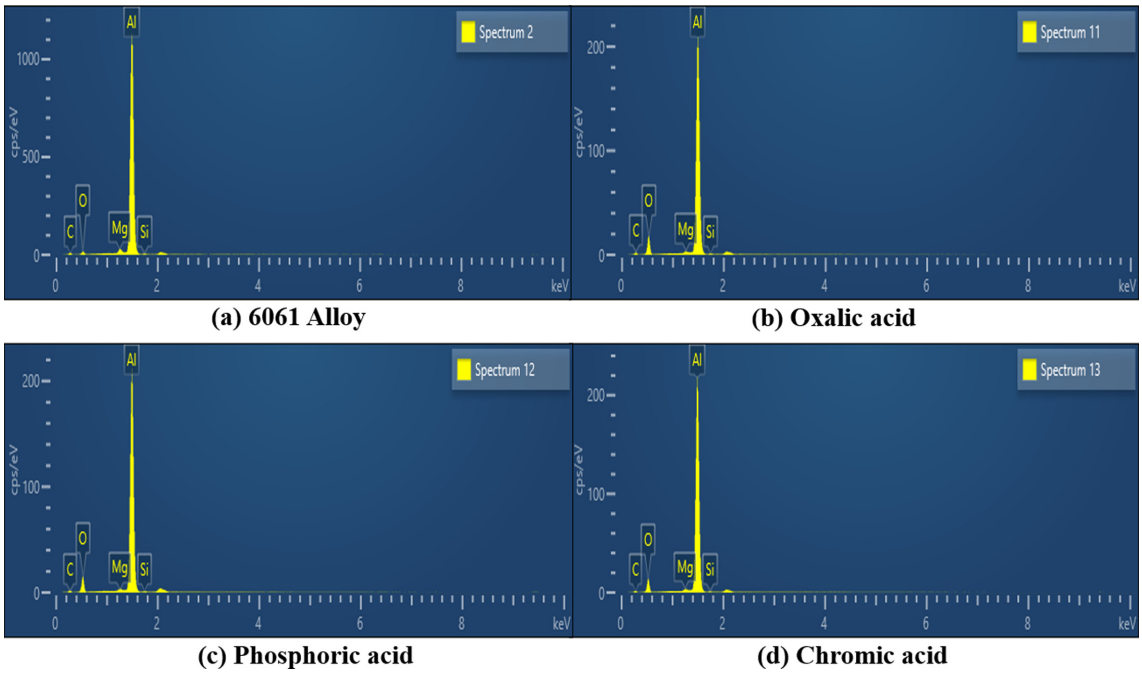


Fig. 2. EDS analysis before and after anodization of aluminum 6061 by different anodizing electrolytes

Table 1. Chemical compositions of Aluminum 6061 alloy before and after anodization

Sample	Elements (Atomic%)				
	Al K	O K	Mg K	Si K	C K
6061 Alloy	80.98	5.59	1.24	0.65	24.69
Oxalic acid	70.86	16.63	0.54	0.28	11.60
Phosphoric acid	75.35	12.81	0.56	0.84	10.44
Chromic acid	70.95	14.20	0.56	0.35	13.93

의 종류를 옥살산, 인산, 크롬산으로 수행하였으며, Fig. 1은 알루미늄에 양극산화를 수행하여 구현된 다공성 산화피막에 방빙 특성을 부여한 실험 모식도를 나타낸 그림이다.

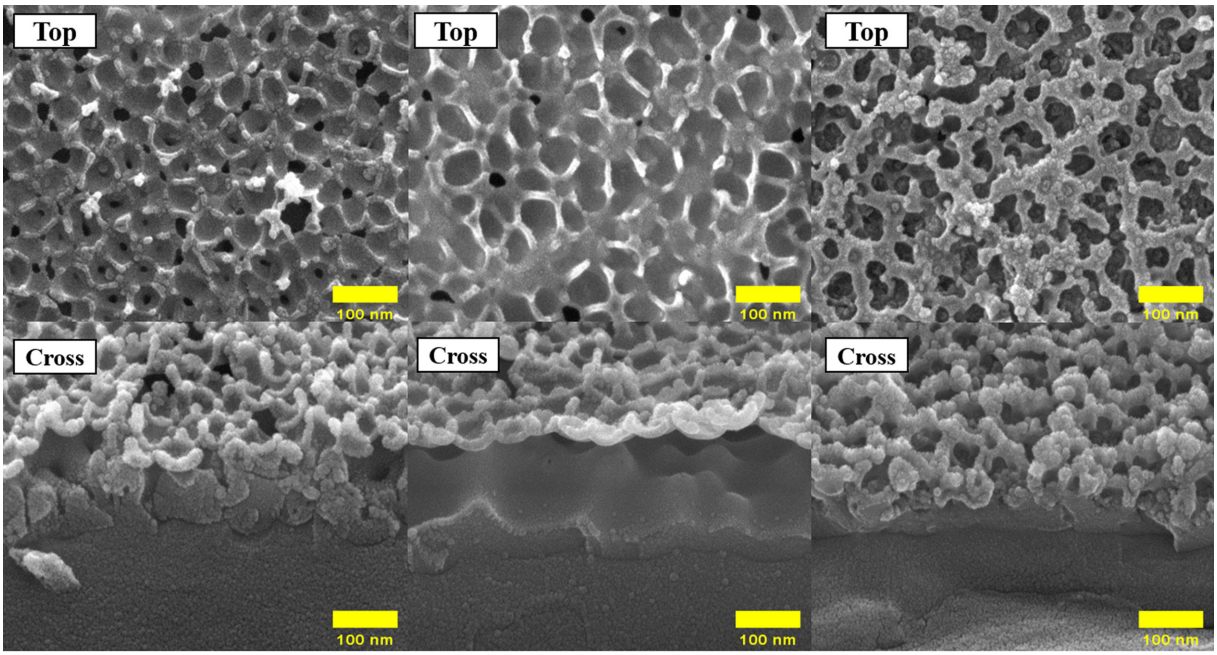
Fig. 2는 에너지 분산 X선 분광법을 이용해 알루미늄 6061의 양극산화 공정 전, 후 원소 함량 변화를 관찰한 것이다. 양극산화 후 산소와 알루미늄이 주성분으로 나타났고, 그 이외에 마그네슘, 실리콘, 탄소 등이 검출되었으며, 여기서 Mg와 Si는 알루미늄 6000계열에 첨가된 합금 원소이며, 탄소는 분석 시 사용한 카본 테이프의 영향으로 인해 나타난 것으로 사료된다. Table 1은 정량 분석한 것으로, 무처리 알루미늄 6061 시편에서 알루미늄 함량은 80.98%, 산소함량은 5.59%, 옥살산 전해액 시편의 알루미늄 함량은 70.86%, 산소함량은 16.63%, 인산 전해액 시편의 알루미늄 함량은 75.35%, 산소함량은 12.81%, 크롬산 전해액 시편의 알루미늄 함량은 70.95%, 산소함량은 14.20%로, 알루미늄 6061 합금의 양극산화 후 알루미늄 성분이 감소하고 산소 함량이 증가한 것으로 보아, 알루미늄 성분이 산화피막으로 변환되었음을 알 수 있다.

Fig. 3은 각각 옥살산 전해액 시편, 인산 전해액 시편, 크롬산 전해액 시편의 FE-SEM 이미지로, Top-Section 이미지에서 모두 기공이 관찰되는 것으로 보아 다공성 산화피막이 형성되었음을 알 수 있으며, Cross-Section 이미지로 각 전해액별 산화피막의 성장 차이를 알 수 있다.

Fig. 4와 Table 2는 FE-SEM 이미지를 통해 기공 직경(Pore-Distance, D_p), 기공 사이의 거리(Interpore-Distance, D_{int}), 산화막 두께(Thickness), 고체분율(Solid-Fraction)을 측정한 것이며, 고체분율은 알루미늄 표면 위에 형성된 고체-액체 비율 equation (1) 를 바탕으로 산출하였다.

$$f_{SL} = 1 - \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3}a^2} \quad (1)$$

equation (1)에서 f_{SL}은 고체분율, r는 기공의 반지름, a



(a) Oxalic acid (b) Phosphoric acid (c) Chromic acid

Fig. 3. FE-SEM of surface morphology and thickness of the aluminum oxide film prepared by different anodizing electrolytes

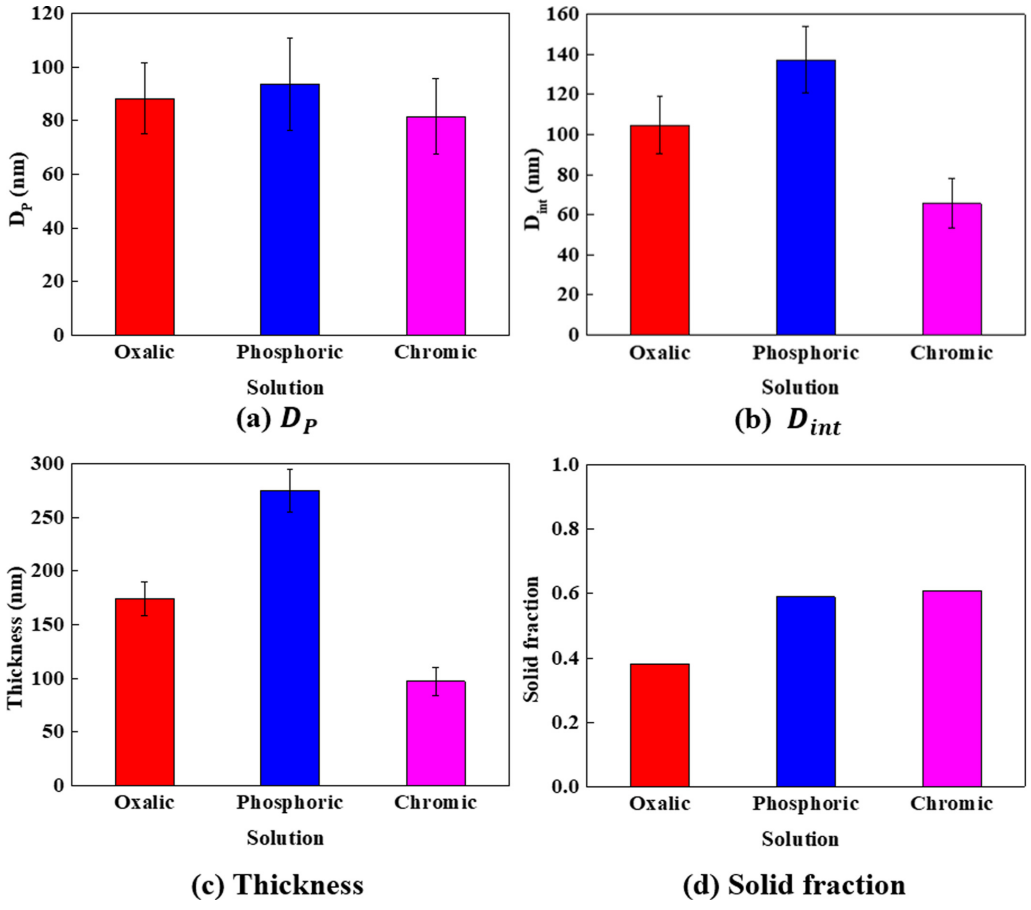


Fig. 4. Measurement graph of D_P, D_{int}, thickness, and solid fraction by different anodizing electrolytes

Table 2. The structural characteristics value of after the 3rd anodization nanostructures by different anodizing electrolytes

	Oxalic acid	Phosphoric acid	Chromic acid
D_p (nm)	88.23 ± 13.15	93.64 ± 17.17	81.62 ± 14.23
D_{int} (nm)	104.64 ± 14.18	137.23 ± 16.57	97.02 ± 13.36
Thickness (nm)	174.29 ± 15.73	275.00 ± 19.82	167.00 ± 16.41
Solid Fraction	0.38	0.59	0.61

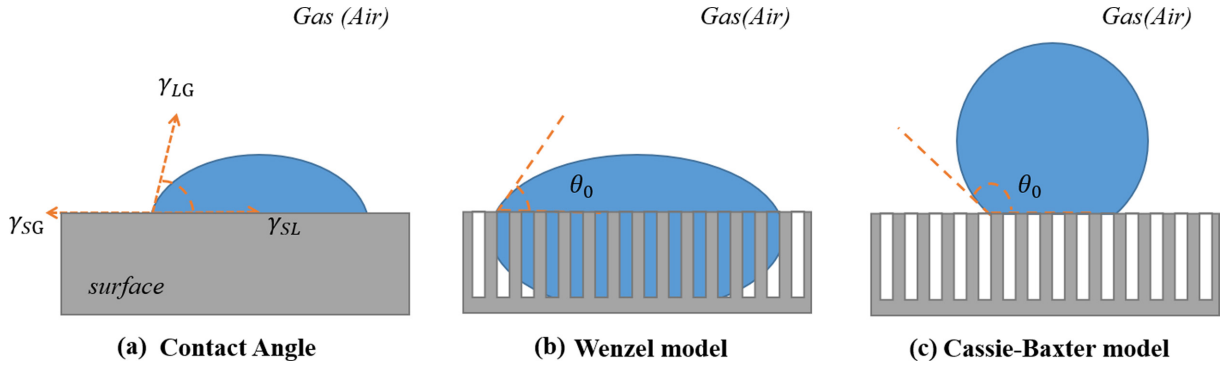


Fig. 5. Wenzel, Cassie-Baxter model explaining the hydrophilic and hydrophobic properties

는 기공간의 거리를 나타낸 것이다. 옥살산 전해액 시편의 기공 직경은 88.23 ± 13.15 nm, 기공 사이 거리는 104.64 ± 14.18 nm, 산화막 두께는 174.29 ± 15.73 nm, 고체분율은 0.38 이며, 인산 전해액 시편의 기공 직경은 93.64 ± 17.17 nm, 기공 사이 거리는 137.23 ± 16.57 nm, 산화막 두께는 275.00 ± 19.82 nm, 고체분율은 0.59 이고, 크롬산 전해액 시편의 기공 직경은 81.62 ± 14.23 nm, 기공 사이 거리는 97.02 ± 13.36 nm, 산화막 두께는 167.00 ± 16.41 nm, 고체분율은 0.61 이다. 이를 통해 기공직경, 기공사이거리, 산화막 두께는 인산, 옥살산, 크롬산 전해액 시편 순으로 크게 관찰되었으며 고체분율은 크롬산, 인산, 옥살산 전해액 시편 순으로 크게 나타남을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5a는 Contact Angle model로 Young's equation (2)로 설명할 수 있으며, 여기서 γ_{SG}는 고체-기체 간의 계면장력, γ_{SL}는 고체-액체 간의 계면장력, γ_{LG}는 액체-기체 간의 계면장력이다. 이는 계면에너지의 평형 관계를 설명하는 equation으로써, γ_{SG}, γ_{SL}, γ_{LG}의 계면이 열역학적으로 평형상태에 도달했을 때 성립한다 [32-34].

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos\theta_0 \quad (2)$$

Fig. 5b는 표면 젖음성을 설명할 수 있는 이론 중 하나인 Wenzel model로, 고체 표면에서 표면이 거칠어질수록 거칠기에 의해 생겨난 요철 사이에 액적의 흡수가 원활해져 친수성 표면의 특성을 가지며, equation (3)로 설명할 수 있다 [35,36]. 여기서 미세구조를 갖는 표면과 액체가 접촉하는 경우, Cosθ는 Cosθ_W로 변환되며 r는 거칠기 인자를 나타낸다. Fig. 5c는 Cassie-Baxter model로 고체 표면의 표면에너지가 낮아 표면 거칠기에 의해 형성된 요철 사이에 공기로 채워진 계면이 형성되어 액적을 떠받드는 형상을 가지는 발수성 특성을 가지며 equation (4)로 설명할 수 있다 [37-40]. 여기서 요철과 액적이 접촉하는 경우, Cosθ는 Cosθ_{CB}로 변환되며 f는 액적에 의해 젖은 표면의 면적이며, 접촉각 (Cosθ_{CB})이 $Cos^{-1}\{(f-1)/(r-f)\}$보다 크면 표면에 액적이 닿아도 젖지 않는 표면을 가질 수 있다. 이를 통해 Cassie-Baxter 상태의 액체가 Wenzel 상태의 액체보다 고체 표면 위에서 유동적임을 알 수 있다.

Table 3. Contact angle value by different anodizing electrolytes

	Oxalic acid	Phosphoric acid	Chromic acid
Contact Angle (Hydrophilic)	4.29 ± 1.19	13.05 ± 3.68	27.55 ± 3.89
Contact Angle (Hydrophobic)	178.49 ± 0.91	131.46 ± 1.82	130.20 ± 3.60
Contact Angle Hysteresis	3.44 ± 1.65	19.53 ± 3.94	23.49 ± 12.48

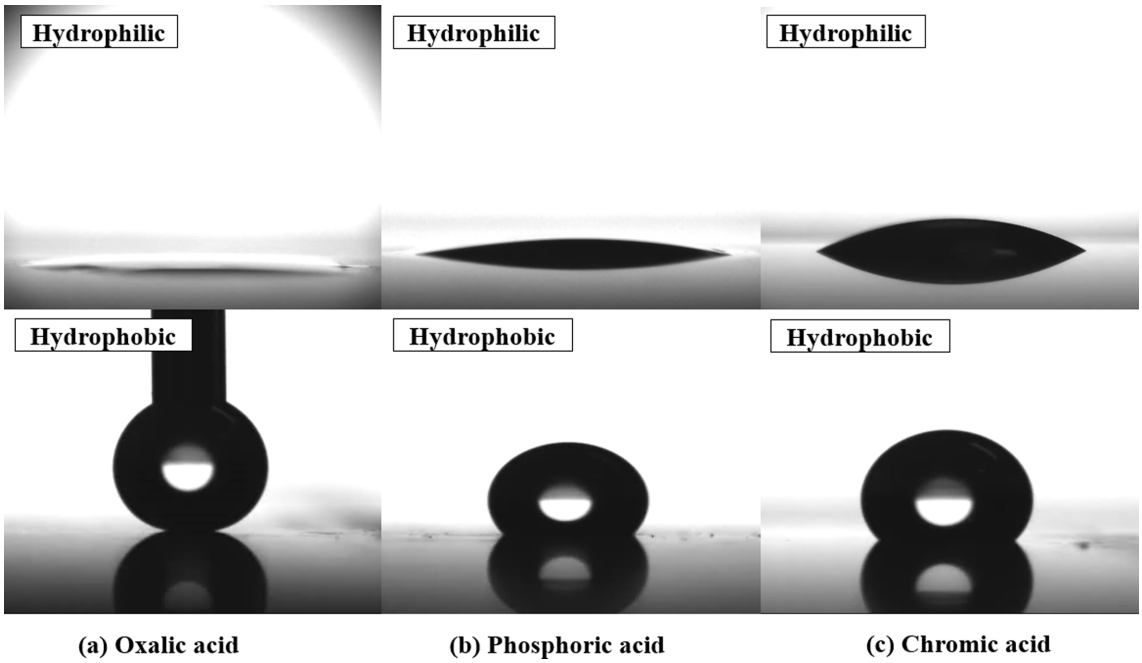


Fig. 6. Contact angle image by different anodizing electrolytes

$$Cos\theta_w = r\ cos_{\theta_0} \quad (3)$$

$$Cos_{\theta_{CB}} = f \cdot r \cdot Cos_{\theta_0} - 1 + f \quad (4)$$

Table 3은 양극산화 후 알루미늄 표면에 낮은 표면에너지를 가지는 FDTS를 이용하여 자기조립 단 분자막(Self-Assembled Monolayer, SAM) 코팅 수행 전, 후의 표면 젖음성을 접촉각(Contact Angle) 및 접촉이력각(Contact Hysteresis)으로 나타낸 것이다. 이를 통해 양극산화 전해액별 접촉각 및 접촉이력각을 확인할 수 있으며, 코팅 전 접촉각은 옥살산, 인산, 크롬산 전해액 시편 순으로 각각 4.29 ± 1.19°, 13.05 ± 3.68°, 27.55 ± 3.89°로 옥살산 전해액 시편과 인산 전해액 시편에서는 표면에 형성된 다공성 산화 피막의 영향으로 초친수 특성이 나타난 것으로 사료된다. 코팅 후 발수 접촉각에서 옥살산 전해액 시편은 178.49 ± 0.91°, 인산 전해액 시편은 131.46 ± 1.82°, 크롬산 전해액 시편은 130.20 ± 3.60°으로 옥살산, 인산, 크롬산 전해액 시편 순으로 높게 측정됨을 확인할 수 있으며, 특히 옥살산 전해액 시편에서는 초발수성 표면이 구현되었음을 알 수 있다. 초발수성 표면에서는 물방울과 고체 표면이 접촉하는 면적이 적기 때문에 기공이나 요철 사이에 갇힌 공기가 물방울을 떠받드는 형상을 띄며, Fig. 5c 모델과 같이 구현된다. 이는 Table 2의 고체분율과 같은 경향으로, 고체분율의 값이 작을수록 물방울이 고체 표면과 접촉하는 면적이 작아 높은 접촉각이 측정되는 것으로 볼 수 있다. Table 3은 접촉이력각을 나타낸 것으로, 옥살산 전해액 시편, 인산 전해액 시편, 크롬산 전해액 시편 순으로 각각 3.44 ± 1.65°, 19.53 ± 3.94°, 23.49 ± 12.48°인 것으로 보아 접촉이력각의 수치가 낮을수록 표면 위 물방울이 유동적임을 알 수 있다.

Fig. 6은 코팅 전후의 접촉각 사진으로, (a), (b), (c)는 각각 옥살산, 인산, 크롬산 전해액 시편이며, 초친수성 표면이 구현된 옥살산 전해액 시편에서 초발수성 표면이 구현됨을 관찰할 수 있다. 이는 인산, 크롬산 전해액 시편에 비해 옥살산 전해액 시편의 물방울이 고체 표면에 닿는 면적인 비표면적이 작아 초발수성 표면이 구현된 것으로 사료된다.

Fig. 7은 Table 3을 모식화 한 것으로, 옥살산 전해액 시편은 친수 접촉각 및 접촉이력각이 가장 낮고, 발수 접촉각이 가장 큰 것으로 나타났다. 이를 통해 고체분율이 낮은 초친수성 표면에서 초발수성 표면이 구현되며, 초발수성 표면에서는 접촉이력각이 낮아 액적이 유동적임을 알 수 있다.

Fig. 8은 시편을 각각 -18 °C의 환경에서 1시간, 12시간, 24시간 동안 제빙 후 측정한 접촉각 사진으로, 방빙 접촉각 역시 발수성 표면과 유사한 것으로 나타났다. Fig. 9와 Table 4는 젖음성을 접촉각으로 수치화한 것이며, 무처리 Al 6061 시편의 방빙 접촉각은 84.57 ± 7.96°, 83.06 ± 8.10°, 71.31 ± 4.05°, 옥살산 전해액 시편의 방빙

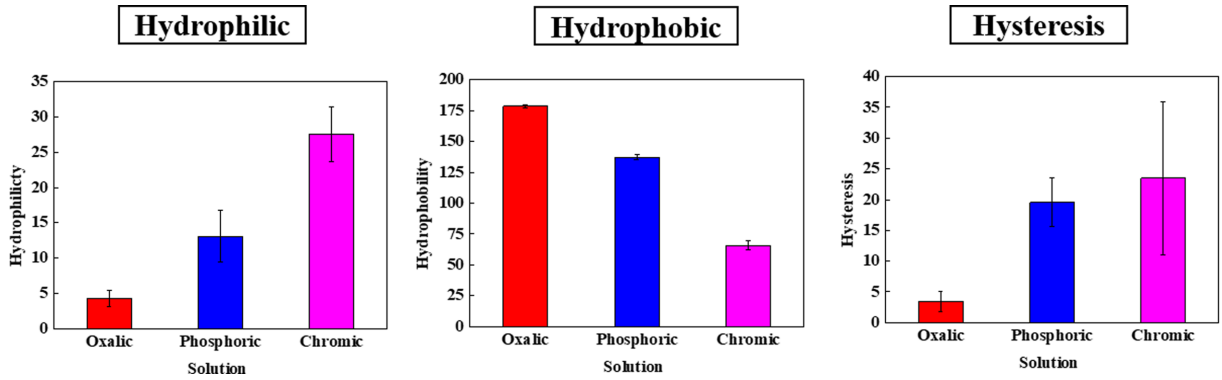


Fig. 7. Measurement of contact angle, contact angle hysteresis by different electrolytes

Table 4. Contact angle value by different electrolytes by different frozen time

	1h	12h	24h
6061 Alloy	84.57 ± 7.96°	83.06 ± 8.10°	71.31 ± 4.05°
Oxalic acid	178.74 ± 0.33°	178.60 ± 0.58°	178.50 ± 0.75°
Phosphoric acid	136.70 ± 2.48°	131.18 ± 1.33°	129.28 ± 2.79°
Chromic acid	129.27 ± 4.96°	127.77 ± 3.04°	124.78 ± 3.12°

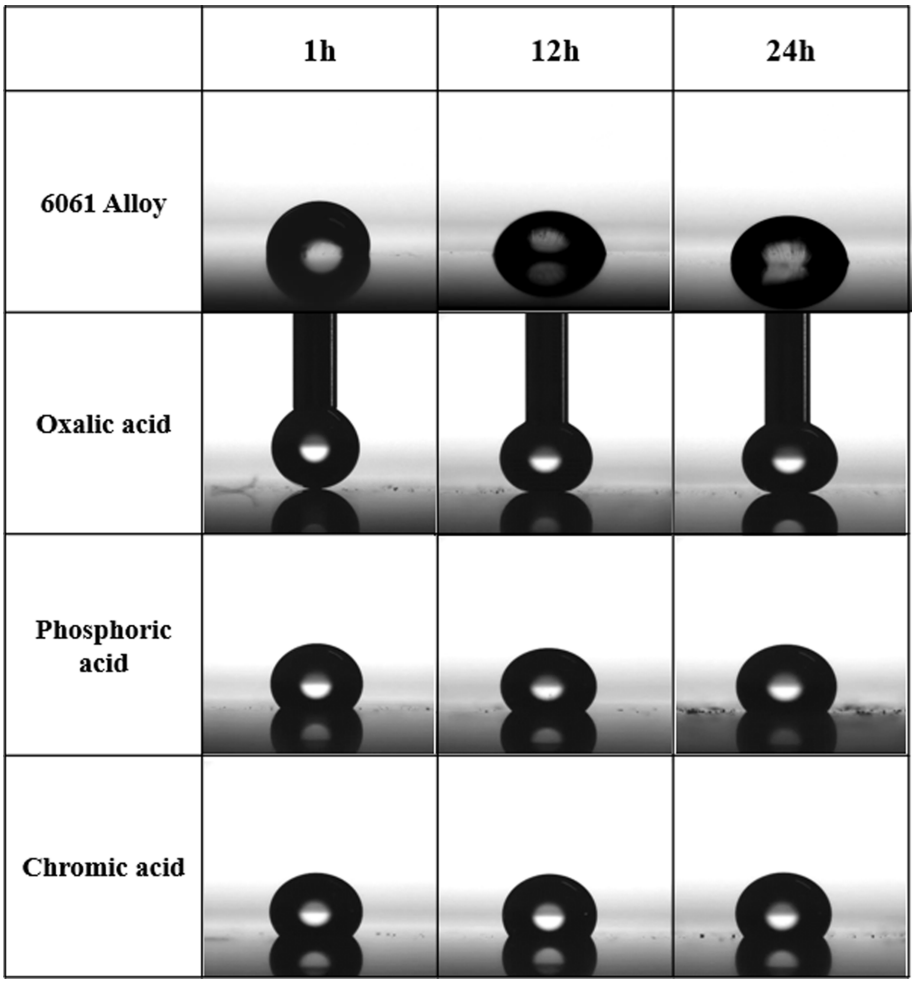


Fig. 8. Actual image after anti-icing by different frozen time

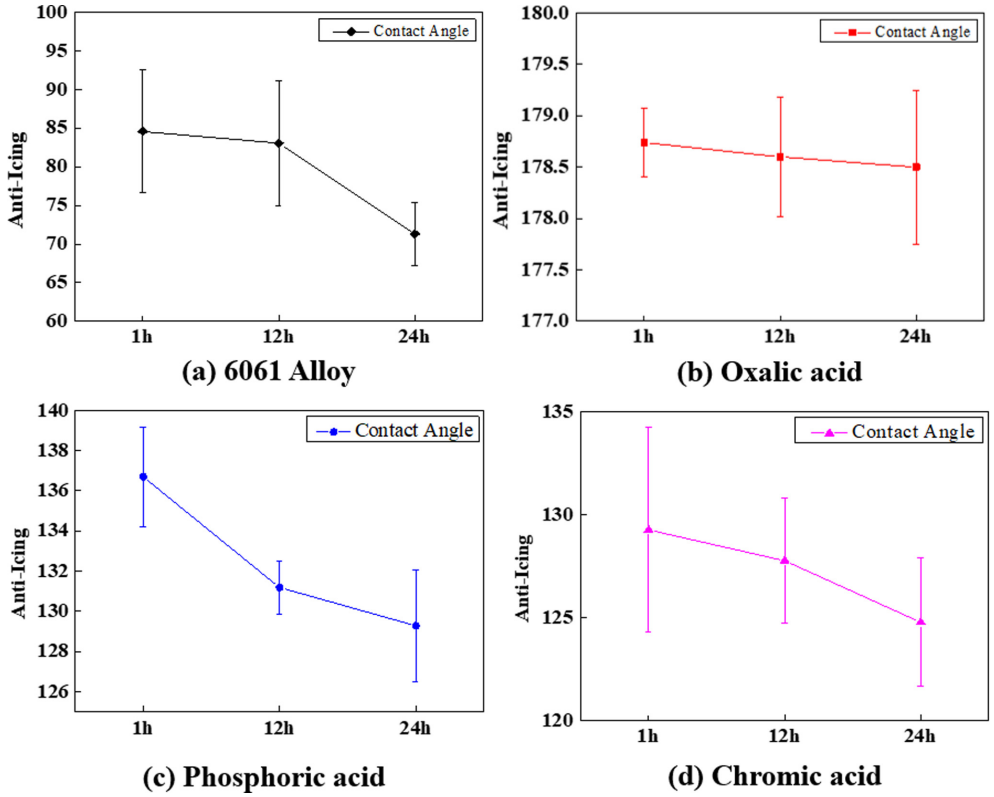


Fig. 9. Measurement of contact angle, contact angle hysteresis by different frozen time

접촉각은 178.74 ± 0.33°, 178.60 ± 0.58°, 178.50 ± 0.75°이며, 인산 전해액 시편의 방빙 접촉각은 136.70 ± 2.48°, 131.18 ± 1.33°, 129.28 ± 2.79°, 크롬산 전해액 시편의 방빙 접촉각은 129.27 ± 4.96°, 127.77 ± 3.04°, 124.78 ± 3.12°로 모든시편에서 제빙시간이 길어짐에 따라 접촉각은 점차적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 제빙으로 인한 표면의 응착 현상으로 인해 표면 마찰력이 증가하여 접촉각이 감소한 것으로 사료된다 [41-43].

4. 결론

본 연구에서는 양극산화 전해액을 달리하여 알루미늄 6061 표면에 구현되는 친수, 발수 및 방빙 특성을 관찰하였다. 특히, 옥살산 전해액 시편에서는 초친수성 표면이 구현되며, 이는 양극산화 공정 후 생성된 다공성 산화피막으로 인해 나타나는 특징으로, 낮은 표면에너지를 가지는 FDTS를 이용하여 자가조립 단분자막 코팅을 하였을 때 초발수성 표면이 구현되는 사실을 확인하였다. 이는 고체분율이 낮은 옥살산 전해액 시편에서 물방울이 고체 표면과 닿는 면적이 작아 표면에 떠받드는 형상을 띄기 때문이며, 이로 인해 옥살산 전해액 시편에서 가장 유동적임을 알 수 있었다. 옥살산 전해액 시편과 인산 전해액 시편, 크롬산 전해액 시편 모두 제빙하였을 때 접촉각이 점진적으로 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 표면에 일어난 응착 현상으로 인해 마찰력이 오히려 커져 접촉각이 감소한 것으로 사료된다. 다시 말해 알루미늄 6061 시편을 0.3 M의 동일한 농도를 가지는 전해액 중 옥살산 전해액에서 양극산화 공정을 수행하였을 때 가장 낮은 친수 접촉각 및 접촉이력각을 가지며, 가장 높은 발수 접촉각을 가져 시편을 제빙한 경우, 인산 및 크롬산 전해액에 비해 물방울이 유동적인 표면을 가진다는 것을 확인하였다. 양극산화 공정은 다양한 특성을 가질 수 있는 표면이 구현되어 여러 산업 분야에 적용할 수 있는 공정으로, 특히, 내연기관이 사용되는 자동차, 선박, 항공기 등 방빙 특성이 요구되는 산업에서 취성파괴 등의 문제점이 야기될 수 있지만, 이는 후열처리와 같은 공정 등을 통해 방지할 수 있도록 해결책과 발전을 위해 지속적인 연구가 필요하다 [44].

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다(202202110001).

References

1. Y. Madhavi, N. Narasaiah, A. Jyothirmayi, Influence of surface-roughness on the corrosion-fatigue behavior of MAO coated 6061-T6 Al alloy assessed in NaCl medium, *Surface and Coatings Technology*, **14**, 127102 (2021). Doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127102
2. L. Telmenbayar, A.G. Ramu, D. Yang, M. Song, O. Erdenebat, D. Choi, Corrosion resistance of the anodization/glycidoxypropyltrimethoxysilane composite coating on 6061 aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology*, **403,** 126433 (2020). Doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126433
3. R. Krishna, Y. Madhavi, T. Sahithi, N. P. Wasekar, N. M. Chavan, D. S. Rao, Influence of prior shot peening variables on the fatigue life of micro arc oxidation coated 6061-T6 Al alloy, *International Journal of Fatigue*, **106**, 165-174 (2018). Doi: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.09.020
4. J. Zang, S. Yu, G. Zhu, X. Zhou, Fabrication of superhydrophobic surface on aluminum alloy 6061 by a facile and effective anodic oxidation method, *Surface and Coatings Technology*, **380**, 125078 (2019). Doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125078
5. S. Fu, R.P. Sahu, E. Diaz, J.R. Robles, C. Chen, X. Rui, R .F. Klie, A.L. Yarin, J.T. Abiade Dynamic study of liquid drop impact on supercooled cerium dioxide: anti-icing behavior, *Langmuir*, **32**, 6148 (2016). Doi: https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b00847
6. M. I. Bakshi, H. Khatoon, S. Ahmad, Hydrophobic, mechanically robust polysorbate-enveloped cerium oxide-dispersed oleo-polyetheramide nanocomposite coatings for anticorrosive and anti-icing applications, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **59**, 6617 (2020). Doi: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b06580
7. Y. Zhang, X. Yu, H. Wu, J. Wu, Facile fabrication of superhydrophobic nanostructures on aluminum foils with controlled-condensation and delayed-icing effects, *Applied Surface Science*, **258**, 8253 (2012). Doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.05.032
8. J. Dong, J. Chen, Z. Chen, Y. Zhou, Air-side thermal hydraulic performance of offset strip fin aluminum heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, **27**, 306 (2007). Doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.08.005
9. G. Y. Liu, Y. Yuan, R. J. Liao, H. Y. Xiang, L. Wang, Q. Yu, C. Zhang, Robust and self-healing superhydrophobic aluminum surface with excellent anti-icing performance, *Surfaces and Interfaces*, **28**, 101588 (2022). Doi: https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111430
10. J. Fahim, S. M. M. Hadavi, H. Ghayour, S. H. Tabrizi, Cavitation erosion behavior of super-hydrophobic coatings on Al5083 marine aluminum alloy, *Wear*, **424**, 122 (2019). Doi: https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.017
11. P. Atz-Dick, A. Konrath, Y. R. Melo, C. Radtke, L. F. Dick, Aluminum anodizing with simultaneous silanization for increased hydrophobicity and corrosion protection, *Applied Surface Science*, **593**, 153392 (2022). Doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153392
12. T. Darmanin, F. Guittard, Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature, *Materials today*, **18**, 273 (2015). Doi: https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.01.001
13. D. Y. Kwok, A. W. Neumann, Contact angle measurement and contact angle interpretation, *Advances in colloid and interface science*, **81**, 167 (1999). Doi: https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00087-6
14. J. F. Joanny, P. G. De Gennes, A model for contact angle hysteresis, *The journal of chemical physics*, **81**, 552 (1984). Doi: https://doi.org/10.1063/1.447337
15. D. Nakajima, T. Kikuchi, T. Yoshioka, H. Matsushima, M. Ueda, R. O. Suzuki, S. Natsui, A superhydrophilic aluminum surface with fast water evaporation based on anodic alumina bundle structures via anodizing in pyrophosphoric acid, *Materials*, **12**, 3497 (2019). Doi: https://doi.org/10.3390/ma12213497
16. E. Jenner, C. Barbier, B. D'Urso, Durability of hydrophobic coatings for superhydrophobic aluminum oxide, *Applied surface science*, **282**, 73 (2013). Doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.049
17. Y. Wang, W. wang, L. Zhong, J. Wang, Q. Jiang. X. Guo, Super-Hydrophobic Surface on Pure Magnesium Substrate by Wet Chemical Method, *Applied Surface Science*, **256**, 3837 (2010). Doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.037
18. A. Milionis, E. Loth, I. S. Bayer, Recent Advances in the Mechanical Durability of Superhydrophobic Materials, *Advances in colloid and interface science,* 229, 57 (2016). Doi: https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.007
19. C.J. Donahue, J.A. Exline, Anodizing and Coloring Aluminum Alloys, *Journal of Chemical Education*, **91**, 711 (2014). Doi: https://doi.org/10.1021/ed3005598
20. C. Jeong, A Study on Functional Hydrophobic Stainless Steel 316L Using Single-Step Anodization and a Self-Assembled Monolayer Coating to Improve Corrosion Resistance, *Coatings,* **12**, 395 (2022). Doi: https://doi.org/10.3390/coatings12030395

21. M. Saeeddikhani, M. Javidi, A. Yazdani, Anodizing of 2024-T3 aluminum alloy in sulfuric-boric-phosphoric acids and its corrosion behavior, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **23**, 2551 (2013). Doi: https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62767-3
22. L. Benea, N. Simionescu-Bogatu, R. Chiriac, Electrochemically Obtained Al_2O_3 Nanoporouslayers with Increased Anticorrosive Properties of Aluminum Alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, **17**, 2636 (2022). Doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.038
23. A. S. Darmawan, T. W. B. Riyadi, A. Hamid, B. W. Febriantoko, B. S. Putra, Corrosion Resistance Improvement of Aluminum under Anodizing Process, *AIP Conference Proceedings,* **1977**, 020006 (2018). Doi: https://doi.org/10.1063/1.5042862
24. C. Jeong, *Ph. D. Thesis*, p132, Stevens Institute of Technology, New Jersey (2013).
25. C. Blawert, W. Dietzel, E. Ghali, Anodizing Treatments for Magnesium Alloys and Their Effect on Corrosion Resistance in Various Environments, *Advanced Engineering Materials*, **8**, 511 (2006). Doi: https://doi.org/10.1002/adem.200500257
26. C. Jeong, J. Lee, K. Sheppard, and C.-H. Choi, Air-Impregnated Nanoporous Anodic Aluminum Oxide Layers for Enhancing Corrosion Resistance of Aluminum, *Langmuir*, **31**, 11040 (2015). Doi: https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b02392
27. Y. Alivov, M. Pandikunta, S. Nikishin, Z.Y. Fan, The anodization voltage influence on the properties of TiO_2 nanotubes grown by electrochemical oxidation, *Nanotechnology*, 20, 225602 (2009). Doi: https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/22/225602
28. M. Kim, E. Choi, J. So, J. S. Shin, C. W. Chung, S. J. Maeng, J. Y. Yun, Improvement of corrosion properties of plasma in an aluminum alloy 6061-T6 by phytic acid anodization temperature, *Journal of Materials Research and Technology*, **11**, 219 (2021). Doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.086
29. W. Lee, R. Ji, U. Gösele, K. Nielsch, Fast fabrication of long-range ordered porous alumina membranes by hard anodization, *Nature Materials*, **5**, 741 (2006) Doi: https://www.nature.com/articles/nmat1717
30. C. Jeong, C.Choi, Single-Step Direct Fabrication of Pillar-on-Pore Hybrid Nanostrutures in Anodizing Aluminum for Superior Superhydrophobic Efficiency, *Applied Materials & Interfaces,* **4**, 842 (2011). Doi: https://doi.org/10.1021/am201514n
31. C. Jeong, H. Ji, Systematic control of anodic aluminum oxide nanostructures for enhancing the superhydrophobicity of 5052 aluminum alloy, *Materials*, **12**, 3231 (2019). Doi: https://doi.org/10.3390/ma12193231
32. Y. Wu, C. Zhang, Analysis of anti-condensation mechanism on superhydrophobic anodic aluminum oxide surface, *Applied thermal engineering*, **58**, 664 (2013). Doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.048
33. T. Young, III. An essay on the cohesion of fluids, *Philosophical transactions of the royal society of London*, **95**, 65 (1805). Doi: https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005
34. J. Kijlstra, K. Reihs, A. Klamt, Roughness and topology of ultra-hydrophobic surfaces, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **206**, 521 (2002). Doi: https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00089-4
35. R. N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Industrial & Engineering Chemistry*, **28**, 988 (1936). Doi: https://doi.org/10.1021/ie50320a024
36. E. Puukilainen, T. Rasilainen, M. Suvanto, T. A. Pakkanen, Superhydrophobic Polyolefin Surfaces: Controlled Micro- and Nanostructures, *Langmuir,* **23***,* 7263 (2007). Doi: https://doi.org/10.1021/la063588h
37. A. B. D. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Transactions of the Faraday society*, **40**, 546 (1944). Doi: https://doi.org/10.1039/TF9444000546
38. E. Bormashenko, Why does the Cassie–Baxter equation apply?, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **324**, 47 (2008). Doi: https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.03.025
39. G. Whyman, E. Bormashenko, T. Stein, The rigorous derivation of Young, Cassie–Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon, *Chemical Physics Letters*, **450**, 355 (2008). Doi: https://doi.org/10.1016/j.cplett.2007.11.033
40. W. Choi, A. Tuteja, J. M. Mabry, R. E. Cohen, G. H. McKinley, A modified Cassie–Baxter relationship to explain contact angle hysteresis and anisotropy on non-wetting textured surfaces, *Journal of colloid and interface science*, **339**, 208 (2009). Doi: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.07.027
41. W. Gu, K. Song, Z. Cheng, Q. Wang, S. Wang, X. Wang, Y. Zhang, Water-Based Robust Transparent Superamphiphobic Coatings for Resistance to Condensation, Frosting, Icing, and Fouling, *Advanced Materials Interfaces*, **7**, 1902201 (2020). Doi: https://doi.org/10.1002/admi.201902201
42. H. Luo, S. Yin, S. Huang, F. Chen, Q. Tang, X. Li, Fab-

rication of slippery Zn surface with improved water-impellent, condensation and anti-icing properties, *Applied Surface Science*, **470**, 1139 (2019). Doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.174

43. S. Farhadi, M. Farzaneh, S. A. Kulinich, Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces, *Applied Surface Science*, **257**, 6264 (2011). Doi: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.02.057
44. I. V. Roslyakov, I. V. Kolesnik, E. E. Levin, N. S. Katorova, P. P. Pestrikov, T. Y. Kardash, K. S. Napolskii, Annealing induced structural and phase transitions in anodic aluminum oxide prepared in oxalic acid electrolyte, *Surface and Coatings Technology*, **381**, 125159 (2020). Doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125159