

알루미늄 용탕 탈가스 처리에 대한 이해 및 공정 최적화 방안

김민수^{1)*}

한국생산기술연구원 전북본부

1. 서 론

알루미늄 주조에 있어 용탕 탈가스 처리는 매우 중요한 공정이다. 알루미늄 용탕의 탈가스 처리가 제대로 수행되지 않은 경우 주물 내 기포 결함을 야기하게 되며, 특히 제품 두께가 얇거나 기밀성이 중요한 주물의 경우 이러한 기포 결함은 치명적이다. 이러한 관점에서 최근 주목받고 있는 대형 박육 알루미늄 차체 부품이나 내부 유로를 포함하고 있는 전기차 부품용 알루미늄 하우스 주조에 있어, 충분한 알루미늄 용탕 탈가스 조업이 필수적으로 요구되고 있다. 한편 대부분의 주조 현장에서는 그림 1 [1]과 같은 GBF (Gas Bubbling Filtration) 혹은 Rotary degassing 장비를 활용하여 알루미늄 용탕 탈가스 처리를 수행하고 있다. 레들 단위로 용탕이 이송 및 공급되는 주조 현장의 경우, 출탕된 용탕을 담은 레들 상부에 탈가스 유닛이 설치된 후 임펠러 회전과 불활성 가스 주입을 통해 탈가스 처리를 진행하게 되는데, 이때 탈가스 공정 효율이 낮아 탈가스 처리 시간이 길어지게 되면 용탕 열손실 증가에 따른 보온로 에너지 소모량 증가, 임펠러 등 탈가스 소모품의 수명 단축에 따른 잦은 유지보수 및 공정 비용 상승 등 여러 가지 문제점이 발생하게 된다. 본 고에서는 불활성 가스 주입을 통한 알루미늄 용탕 탈가스 처리의 메커니즘을 설명하고,

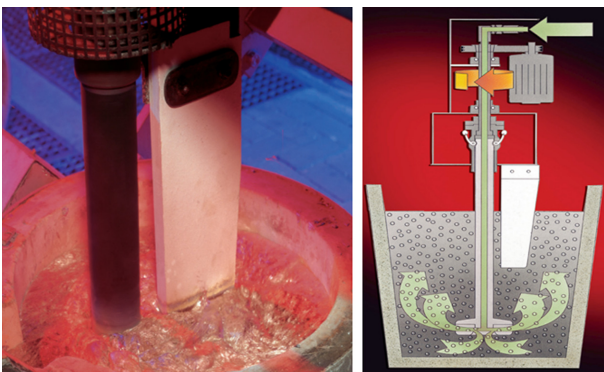


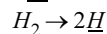
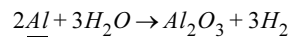
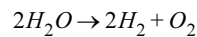
그림 1. GBF 방식의 알루미늄 용탕 탈가스 장비 [1].

이를 바탕으로 GBF 방식의 알루미늄 용탕 탈가스 공정 효율에 영향을 미치는 주요 인자, 그리고 GBF 방식의 탈가스 공정 최적화 방안에 대해 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 알루미늄 용탕 탈가스 처리 필요성 : 용탕 내 수소 함량 증가

일반적으로 탈가스 공정이라고 이야기하지만, 알루미늄 용탕으로 용해되는 가스성 원소는 수소가 유일 [2]한 것으로 알려져 있으므로, 엄밀히 이야기하면 알루미늄 용탕 탈가스 처리는 알루미늄 용탕으로 흡수 (absorption)된 수소 함량을 낮추기 위한 탈수소 공정이다. 알루미늄 용탕 내 수소 함량이 증가하는 현상은 아래 반응식과 같이 대기 중 수분의 분해 반응 혹은 수분과 알루미늄 용탕 간 반응을 통해 발생 [3]한다고 알려져 있다.



알루미늄 용탕, 그리고 응고된 알루미늄 합금 내 수소가 얼마나 용해될 수 있는지를 확인해보기 위해 열역학 계산 소프트웨어인 FactSage[®]를 활용, 몇몇 알루미늄 주조합금의 수소 용해도를 계산하여 그림 2에 나타내었다. 각 합금의 용점 (수소 용해도가 급격히 하락하는 온도)을 기준으로, 3종의 알루미늄 합금 모두 액상의 수소 용해도와 고상의 수소 용해도 간 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 용탕이 장시간 대기과 반응하여 용탕 내 수소 함량이 높아진 상태에서 탈가스 처리 과정 없이 응고가 진행되게 되면, 고상 합금 내 존재할 수 있는 최대 수소 함량을 초과하는 수소 성분은 기체 형태로 주물 내 석출되어 기포 결함을 발생시킬 수 있음을 의미한다. 한편 Si 함량이 7wt% 수준으로 첨가된 A356 합금의 경우, 순수 알루미늄 대비 액상 상태의 수소 용해도가 낮아지는 것을 확인할

¹⁾E-mail: mskim85@kitech.re.kr

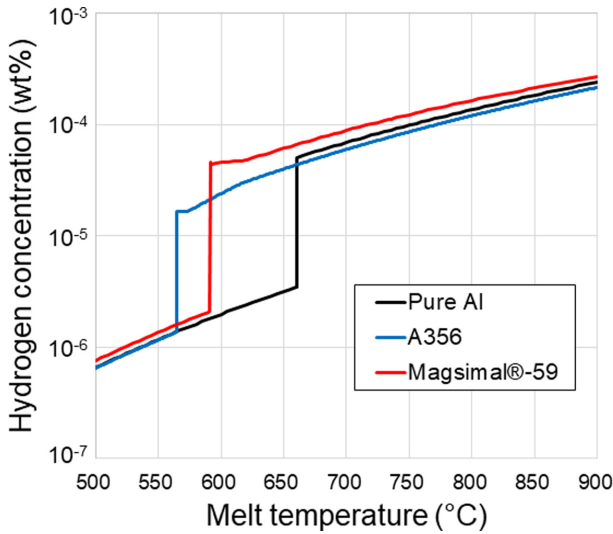


그림 2. 알루미늄 주조 합금의 수소 용해도.

수 있는데, 이는 액상 알루미늄 내에서 Si는 수소의 활동도 계수를 증가 [4] 시키기 때문이다. 한편 순 알루미늄 대비 Mg 함량이 5wt% 이상 함유된 Rheinfelden사의 Magsimal®-59 합금의 경우 오히려 액상 내 수소 용해도가 증가한 것을 확인할 수 있는데, Mg의 경우 액상 알루미늄 내에서 수소의 활동도계수를 감소 [4] 시키기 때문이다. 이러한 열역학적인 이유로 인해 3종의 알루미늄 합금 중 액상-고상 수소 용해도 차이가 가장 큰 합금 또한 Al-Mg계 합금인 Magsimal®-59 합금이 된다. 이렇게 알루미늄 합금 내 첨가원소의 종류 및 그 함량에 따라서 액상 및 고상 알루미늄 합금 내 수소 용해도가 변하게 되므로, 액상 내 수소 용해도가 상대적으로 높은 알루미늄 합금의 경우 그렇지 않은 합금 대비 용탕 내 수소 함량이 쉽게 증가할 수 있다는 점을 고려하여 더욱 세심한 탈가스 처리를 진행할 필요가 있다.

2.2. 불활성 가스 주입을 통한 알루미늄 용탕 탈가스 처리 메커니즘

가장 대중적인 알루미늄 용탕 탈가스 처리 기법은 알루미늄 용탕에 용해되지 않는 불활성 가스 (Ar 혹은 N₂)를 주입하여 가스 버블을 형성시킨 후, 용탕 내 수소 성분을 가스 버블 내로 흡수시켜 제거하는 것이다. 이러한 불활성 가스 주입을 통한 알루미늄 용탕 탈가스 반응은 그 단계별로 아래와 같이 정리 [5]할 수 있으며, 이를 그림으로 도식화하면 그림 3과 같다.

- ① 용탕 내 분포되어 있던 수소 성분이 가스 버블 근처로 이동
- ② 가스 버블 근처 용탕 내 수소 성분이 용탕-가스 계면으로 이동

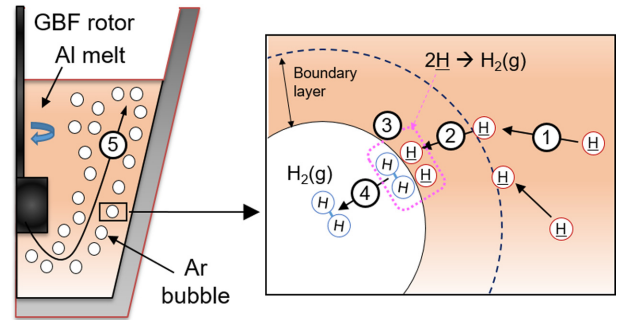


그림 3. 알루미늄 용탕 내 가스 버블에 의한 탈수소 반응 모식도.

- ③ 용탕-가스 계면에서 용탕 내 수소 성분이 가스 버블 내 수소 가스로 변하는 화학 반응
- ④ 용탕-가스 계면에서 생성된 수소 가스가 가스 버블 내로 이동
- ⑤ 유동 및 부력에 의해 수소 가스를 포함한 가스 버블의 용탕-대기 계면 혹은 용탕-내화재 계면으로 이동 및 수소 가스 배출

여기서 ⑤번 단계는 용탕 내 수소 성분이 가스 버블로 이미 제거된 후, 수소 가스를 포함한 가스 버블이 용탕으로부터 빠져나가는 과정이기 때문에, 용탕 내 용해된 수소가 제거되는 탈가스 메커니즘을 고찰함에 있어 우선 배제하도록 하자. ①번, ②번 그리고 ④번 단계는 흔히 물질전달 (mass transfer)라고 부르는 단계인데, ①번과 ④번 단계는 용해된 수소 혹은 수소 가스가 자연 대류 혹은 인가된 유동에 의해서 농도 (정확히는 활동도)가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하는 단계이며, ②번 단계는 용탕 내 경계층 (Boundary layer)에 도달한 수소 성분이 오직 확산에 의해 용탕-가스 계면으로 이동하는 단계이다. 실제 탈가스 환경은 임펠러에 의한 용탕 교반과 주입된 불활성 가스에 의해 유동이 존재하는 상황이므로, ①번 및 ④번 단계보다 ②번 단계가 상대적으로 느리게 진행된다. 한편 ③번 단계는 순수한 수소 가스 생성 반응인데, 일반적으로 화학 반응은 반응물 (용탕 내 수소성분)의 활동도가 높고 생성물 (가스 버블 내 수소 가스)의 활동도가 낮으면 매우 빠른 반응속도를 가진다. 결론적으로 불활성 가스에 의한 알루미늄 용탕 내 탈가스 속도는 ②번 단계의 진행 속도에 의해 결정된다 [5].

위에서 설명한 탈가스 속도 관련하여 추가로 고려해야 할 점이 있는데, 그것은 상기 탈가스 단계는 가스 버블의 크기, 개수 및 분포는 고려하지 않았다는 점이다. 가스 버블의 크기가 작아질수록 가스 유량 대비 반응 면적이 넓어지고, 낮은 부력으로 인해 알루미늄 용탕 내 머무는 시간이 증가하므로 탈가스 반응을 더 빠르게 그리고 더 효율적으로 진행시킬 수 있다. 가스 버블의 개수는 탈가스 반응 면적과 연관 있으며, 가스 버블이 용탕 내 균일하게 분포할수록 용탕 내 극소량 포

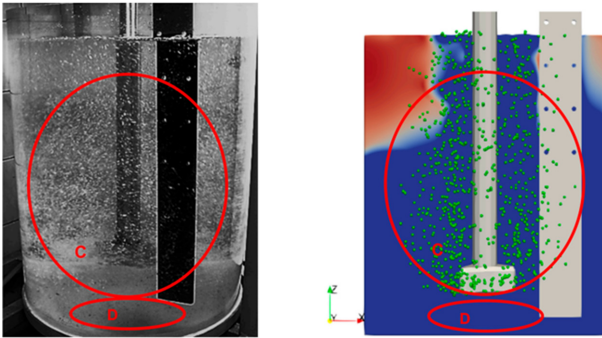


그림 4. 알루미늄 용탕 탈가스 거동에 대한 수모델 및 유동 해석 연구 예시 [6].

함된 수소 성분이 주변의 가스 버블로 더욱 빠르게 이동할 수 있으므로, 가스 버블의 개수 및 분포도 매우 중요한 인자가 된다. 실제로 그림 4 [6]와 같이, 수모델 실험과 유동 해석을 통해 탈가스 조건에 따른 용탕 내 유동 및 가스 분포 예측 연구 [6]가 지금도 활발히 수행되고 있다.

2.3. 알루미늄 용탕 탈가스 공정 효율 향상에 대한 제언

알루미늄 용탕 탈가스를 수행하는 현장에서 실질적으로 필요한 부분은 현 탈가스 조업 대비 탈가스 효율을 높일 수 있는 구체적인 방안일 것이다. 그리고 이러한 탈가스 공정 최적화의 바람직한 목표는 기존 공정 대비 동일하거나 혹은 단축된 시간 동안 탈가스 처리를 수행하여도 더 낮은 용탕 내 수소 함

량 (혹은 DI 값)을 달성하는 것이다. 당장은 주물 내 기포성 결함 억제를 위해서 탈가스 처리를 더 오래하는 가장 간단한 해결책을 고려해 볼 수 있겠으나, 자칫하면 뚜렷한 효과를 보지 못한 채 용탕 온도 손실이 늘어나거나 소모품 교체 주기만 단축시키는 부작용을 초래할 수 있다.

앞서 설명한 탈가스 메커니즘을 다시 한번 생각해보자, 단위 반응의 관점에서는 용탕 경계면에서 용탕-가스 계면으로 수소 성분이 이동하는 속도가 전체 탈가스 반응 속도를 지배한다. 이때, 경계면의 두께는 용탕 내 유속에 의해 결정 [7]되므로, 용탕 내 유속이 빠르면 위 물질 전달 속도도 빨라질 수 있다. 결국 단위 반응의 관점에서는 용탕 내 유동이 중요한 변수가 되며, 용탕 유동을 발생시키는 임펠러 형상, 임펠러 회전속도, 가스 유량이 가장 쉽게 접근할 수 있는 공정 변수가 된다. 그리고 이러한 변수들은 가스 버블의 크기, 개수 및 분포에도 영향을 미치므로 결국 위 3가지 변수가 알루미늄 용탕 탈가스 공정 최적화를 위한 핵심 변수라고 할 수 있다.

위 3가지 변수 중 현장에서 바로 테스트하기 쉬운 변수는 임펠러 회전속도와 가스 유량이다. 위 2개 변수를 달리한 조건에서 탈가스 처리를 진행하면서 탈가스 시간에 따른 수소 함량 혹은 밀도 (감압 시편 밀도로부터 용탕내 수소 가스 농도를 계산할 수 있다 [8]) 변화를 측정할 수 있다면 조건 별 탈가스 속도를 비교 분석할 수 있게 되므로, 현 탈가스 설비 조건에 맞는 최적 탈가스 조건을 도출해볼 수 있다. 알루미늄 용탕 탈가스 연구를 수행한 문헌 [9]으로부터 반응 속도론에 기반한 탈가스 속도 분석 기법 (탈가스 공정 모델링)을 참고

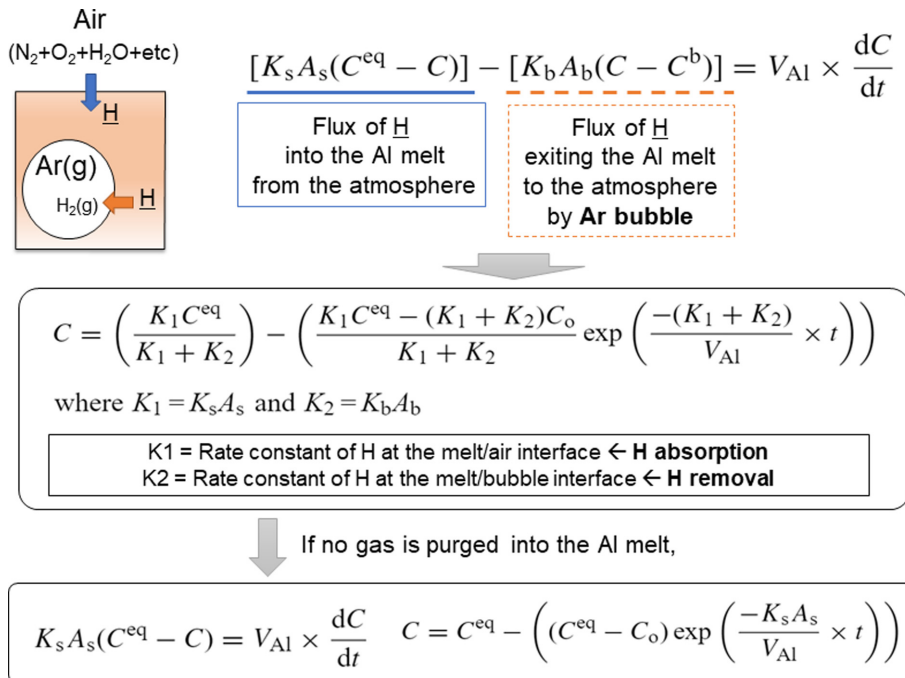


그림 5. 알루미늄 용탕 탈가스 공정 모델 식.

할 수 있는데, 실제 활용해야 하는 주요 식들을 정리하면 그림 5와 같다. 용탕 내 초기 수소 농도 (C_0)는 측정할 수 있는 값이며, 용탕 내 평형 수소 농도 (C^e)는 열역학 계산 혹은 실험데이터 피팅을 통해 구할 수 있고, 가장 중요한 탈수소 반응속도 상수 (K_2)와 용탕의 수소 흡수 반응속도 상수 (K_1) 또한 데이터 피팅을 통해 도출할 수 있으므로 앞서 언급한 조건별 탈가스 실험데이터만 있다면, 그림 6 [9]과 같이 특정 탈가스 시간 (t)에서의 용탕 내 수소 농도 (C)를 높은 정확도로 예측할 수 있다. 여기서 탈수소 반응속도 상수 (K_2) 값이 클수록 탈가스 반응이 빠르게 일어난다는 의미이므로, K_2 값이 큰 조건이 탈가스 효율이 높은 조건이 된다. 예를 들어 가스 유량을 5, 10, 15 L/min으로 변화시키면서 측정된 실험데이터를 활용하여 K_2 값을 구해본 결과, 5 L/min 조건에서의 K_2 값, 10 L/min 조건에서의 K_2 값, 15 L/min 조건에서

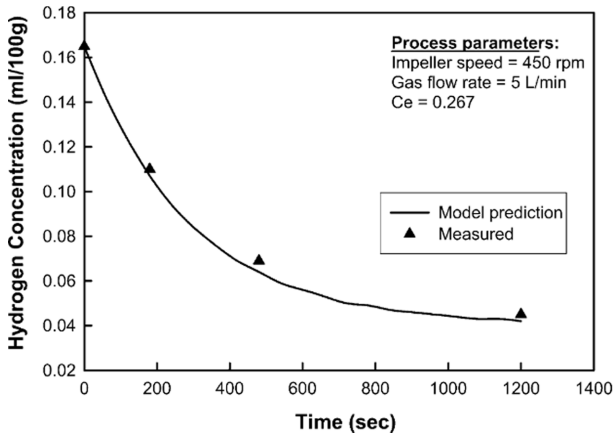


그림 6. 알루미늄 용탕 탈가스 공정 모델 적용 예시 [9].

의 K_2 값 순으로 탈수소 반응속도 상수가 유의미하게 증가한다면 가스 유량은 탈가스 시간을 단축시킬 수 있는 중요한 인자로 볼 수 있다. 반대로 가스 유량을 증가시켜도 K_2 값이 유의미하게 증가하지 않는다면, 현재 탈가스 조업 환경에서는 가스 유량이 탈가스 효율에 영향을 미치지 않는다는 의미이므로 단순히 가스 유량만 증가시켜서는 탈가스 효율 향상을 기대할 수 없다. 이러한 속도론적 분석 기법은 최소한의 현장 실험만으로도 최적의 공정 조건을 찾을 수 있다는 장점이 있으며, 특히 용탕 내 초기 수소 농도가 실험 조건 별로 달라 탈가스 속도를 단순 비교하기 어려운 경우 더욱 유용하다.

알루미늄 용탕 탈가스 중 유동 현상과 가스 버블 거동은 레들 내부 형상, 임펠러와 레들 크기 비율, 배플의 유무 등에 영향을 받으므로, 엄밀히 따지게 되면 탈가스 공정 변수는 상당히 많다. 그림 7 [10]과 같이, 부자재 관련 해외 선진사에서는 이러한 설비 변수를 포함한 다양한 공정 변수를 최대한 고려하여 탈가스 속도를 예측하고, 이를 기반으로 탈가스 공정을 제어하는 기술을 이미 상용화한 상태 [10]이다. 물론 이러한 탈가스 모델링 기반 공정 제어 기술은 모델링된 특정 시스템, 즉 선진사에서 제공하는 자사 제품 (레들, 임펠러 등)에 한해 그 성능이 보장되어 있다는 점을 감안해야 한다. 즉, 타사 탈가스 설비가 이미 구축된 현장에서 상기 기술을 도입하고자 하는 경우 기구축 설비 교체가 불가피한 상황이 발생할 수 있으므로, 전반적인 도입 비용 대비 효율성을 먼저 검토해 볼 필요가 있겠다.

3. 결 론

알루미늄 용탕 탈가스 공정은 용탕 내로 유입된 수소 성분을 제거하는 정련 공정이며, 이를 충분히 진행하지 않은 경우

SMARTT Scheme

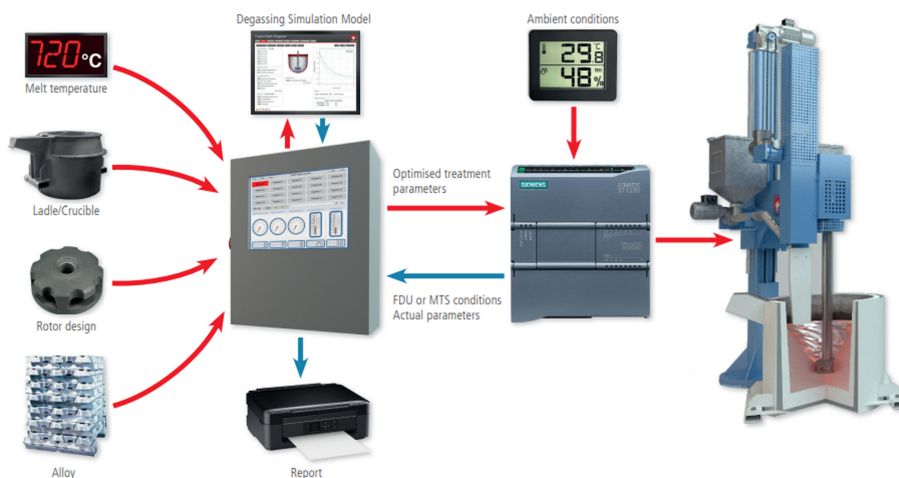


그림 7. 탈가스 거동 예측 기반의 공정 제어 시스템 구성도 [10].

주물 내 기포성 결함을 야기할 수 있으므로 박육 대형 부품 및 복잡 형상 주물 구조에 있어 매우 중요한 공정이다. 불활성 가스 주입을 통한 알루미늄 용탕 탈가스 메커니즘과 탈가스 공정 중 용탕 유동 및 가스 버블 거동을 고려해 보았을 때, 용탕 내 수소의 물질 전달을 촉진할 수 있는 용탕 교반과 충분한 가스 버블 개수, 그리고 용탕 내 고른 가스 버블 분포를 통해 탈가스 속도를 향상시킬 수 있다. 이러한 탈가스 공정 최적화를 위해서 가장 간단하게는 현장 실험데이터와 속도론에 기반한 탈가스 모델식을 활용하여 핵심 공정 변수를 직접 찾아서 최적화할 수 있다. 또한, 조업 상황에 따라 탈가스 효율을 예측하고 실시간으로 공정 제어를 수행하는 토탈 솔루션 개념의 탈가스 기술도 상용화되어 있으므로 투입 비용 대비 기대효과를 고려하여 다양한 방법으로 탈가스 공정 최적화를 시도해볼 수 있다.

참고문헌

- [1] Vesuvius (2019) FDU Foundry Degassing Unit [Brochure]. [https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/](https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment/brochures/FDU-e.pdf.downloadasset.pdf)
- [2] Davis, J. R., "ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys", ASM International, OH (1993) 148.
- [3] Tiryakioğlu, M., *Metals*, **10** (2020) 368.
- [4] Baukloh, W. and Oesterleu, F., *Z. Metallkunde*, **30** (1938) 386
- [5] Sigworth, G. K. and Engh, T. A., *Metall. Trans. B*, **13** (1982) 447.
- [6] Kuglin, K., Szucki, M., Pieprzyca, J., Genthe, S., Merder, T. and Kalisz, D., *materials* **15** (2022) 5273.
- [7] Munson, B. R., Young, D. F. and Okiishi, T. H. "Fundamentals of Fluid Mechanics 4th ed.", John Wiley & Sons, Inc., NY (2002) 551.
- [8] Shin, S. R., Lee, Z. H., Cho, G. S. and Lee, K. W., *J. Mater. Sci.*, **39** (2005) 1563.
- [9] Warke, V. S., Shankar, S. and Makhlof, M. M., *J. Mat. Proc. Technol.*, **168** (2005) 119.
- [10] Vesuvius (2019) SMARTT [Brochure]. https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment/SMARTT/SMARTT_brochure_en.pdf.downloadasset.pdf