

SEN6 마그네슘합금의 미세조직과 인장 특성에 미치는 압출비와 압출 온도의 영향

김현지¹ · 이지윤² · 진상철³ · 박성혁^{4,*}

Effects of Extrusion Ratio and Extrusion Temperature on Microstructure and Tensile Properties of SEN6 Magnesium Alloy

H. J. Kim, J. Y. Lee, S. C. Jin, and S. H. Park

(Received May 9, 2024 / Revised May 21, 2024 / Accepted May 27, 2024)

Abstract

In this study, we investigated the effects of extrusion ratio and extrusion temperature on the microstructure and tensile properties of extruded Mg-6Al-0.3Mn-0.3Ca-0.2Y (SEN6) alloy. As the extrusion ratio and temperature increase, dynamic recrystallization during extrusion is promoted, leading to the formation of a fully recrystallized microstructure with increased grain size. Additionally, the increases in extrusion ratio and temperature lead to texture strengthening, exhibiting a higher maximum texture intensity. The extruded materials contain three types of secondary phases, i.e., Al_8Mn_4Y , Al_2Y , and Al_2Ca , with irregular or polygonal shapes. The quantity, size, distribution, and area fraction of the second-phase particles are nearly identical between the two materials. Despite its larger grain size, the tensile yield strength of the material extruded at 450 °C and an extrusion ratio of 25 (450-25) is higher than that of the material extruded at 325 °C and an extrusion ratio of 10 (325-10), which is mainly attributed to the stronger texture hardening effect of the former. The ultimate tensile strength is similar in the two materials, owing to the higher work hardening rate in the 325-10 extrudate. Despite differences in grain size and recrystallization fraction, numerous twins are formed throughout the specimen during tensile deformation in both materials; consequently, the two materials exhibit nearly the same tensile elongation.

Keywords : SEN6 alloy, Extrusion, Microstructure, Texture, Tensile properties

1. 서론

마그네슘은 지구에서 가장 풍부한 금속 원소 중 하나로서, 우수한 경량성, 비강도, 그리고 진동 감쇠능 등의 특성을 지녀 수송기기 분야에서 주목받고 있다[1-3]. 그러나 마그네슘 합금의 다른 경량 금속인 타이타늄과 알루미늄에 비해 낮은 부식 및 발화 저항성은 수송기기 부품으로의 폭넓은 적용에 있어

저해요소로 작용해 왔다. 최근 한국재료연구원에서 개발된 고내식 난연 SEN (Stainless, Environmentally friendly, Non-flammable) 합금은 상용 마그네슘 합금에 소량(<1wt%)의 Ca과 Y을 복합 첨가한 합금으로 우수한 내부식성과 내발화저항성을 비롯하여 높은 기계적 물성을 가진다[4, 5]. 마그네슘 합금은 주로 주조재로 수송기기 부품에 적용되어 왔으나, 최근에는 우수한 물성을 가진 가공재가 점차 널리 활용되고 있다[6, 7]. 특히, 압출은 다양한 형상을 가지는 가공재를 제조할 수 있는 효율적이고 경제적인 공정으로, 주조 결함을 제거하고 결정립 크기를 미세화하여 기계적 물성을 효과적으로 향상시킬 수 있다[8, 9]. 또한, 압출 공정 조건을 변화시켜 마그네슘

1. 경북대학교 금속재료공학과, 박사과정
2. 경북대학교 금속재료공학과, 석사과정
3. 경북대학교 금속재료공학과, 박사과정
4. 경북대학교 금속재료공학과, 교수

*Corresponding Author: Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, E-mail: sh.park@knu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-5710-7878

합금 압출재의 미세조직과 기계적 특성을 쉽게 제어할 수 있다. 그 중에서도 압출비(extrusion ratio)와 압출 온도(extrusion temperature)는 동적 재결정화, 결정립 크기, 집합조직 발달 등에 상당한 영향을 미친다[10, 11]. 일반적으로 높은 압출비와 압출 온도에서는 동적 재결정이 활발하게 일어나 균일한 미세조직을 얻을 수 있지만, 결정립 조대화가 발생한다[12, 13]. 반면, 낮은 압출비와 압출 온도에서는 동적 재결정이 활발하지 않으나 결정립 성장이 제한되어 미세한 결정립 크기를 얻을 수 있다[14, 15]. 지금까지 SEN 합금 압출재에 관한 미세조직 및 기계적 특성에 대한 연구들이 다수 보고되었지만, SEN 합금 압출재의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 압출 변수의 영향에 대한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 SEN6 (Mg-6Al-0.3Mn-0.3Ca-0.2Y) 합금 압출재의 압출비와 압출 온도에 따른 미세조직 및 인장 물성의 변화를 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Mg-6Al-0.3Mn-0.3Ca-0.2Y (SEN6, wt%) 합금을 사용하였다. 빌렛 제조를 위해 용탕을 720 °C에서 20분 동안 유지시킨 후 210 °C로 예열된 스틸 몰드에 부어 원통 형태로 제조하였다. 제조된 빌렛을 평형 상태에서의 용융 온도를 고려하여 440 °C에서 18 시간 동안 균질화 열처리 후 수냉 하였다. 압출을 수행하기 위해 균질화된 빌렛을 길이 120 mm, 직경 68 mm의 원기둥 모양으로 절삭 가공한 후, 300 ton 용량의 수평식 직접압출기를 사용하여 램 속도(ram speed) 1 mm/s로 압출 온도와 압출비를 달리하여 압출을 수행하였다. 325 °C의 압출 온도에서 10:1의 압출비로 제조된 압출재와 450 °C의 압출 온도에서 25:1의 압출비로 제조된 압출재를 각각 325-10과 450-25로 나타내었다.

미세조직을 관찰하기 위해 압출재의 압출방향(extrusion direction, ED)과 평행한 면을 120°로부터 240°까지 사포로 단계적으로 연마 후, OPS를 사용하여 최종 연마하였다. 연마된 시편은 아세트산 5 ml, 에틸알코올 50 ml, 증류수 5 ml, 피크릭 산 1.5 g 혼합용액을 사용하여 에칭 하였다. 미세조직 분석은 광학현미경(optical microscope, OM), 전계방사형 주사전자 현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM)을 사용하였으며, 집합조직 분석은 전자 후

방 산란 회절(electron backscattered diffraction, EBSD)을 사용하였다. 측정된 EBSD 데이터는 Oxford Instruments AztecCrystal 2.0을 사용하여 분석하였다. 압출재에 존재하는 이차상은 X선 회절분석(X-ray diffraction, XRD)을 통해 분석하였다. 압출재의 인장 시험편은 미국재료시험협회(American Society for Testing and Materials, ASTM) 규격을 따라, 길이 25 mm, 게이지 부(gauge section) 직경 6 mm를 가지는 봉상 시험편으로 제작하였다. 인장 시험은 만능시험기(Shimadzu AGS-100kNX)를 사용하여 상온에서 0.001 s⁻¹의 변형률 속도에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초기 압출재의 미세조직

Fig. 1는 325-10과 450-25 압출재의 OM 및 SEM 미세조직 사진을 보여준다. 325-10 압출재의 경우 일부 미재결정립(non-dynamically recrystallized grain, non-DRXed grain)이 존재하여 재결정 분율이 97.4%이다(Fig. 1(a)). 반면, 450-25 압출재는 압출 중 완전 재결정되어 등방성의 균일한 결정립으로 이루어진 미세조직을 형성한다(Fig. 1(b)). 압출 과정에서 재료에 적용되는 변형률은 압출비에 따라 결정된다[16]. 450-25 압출재의 변형률은 3.2로 변형률이 2.3인 325-10 압출재보다 높아, 재결정이 더 활발히 발생한다. 또한, 압출 온도가 증가하면 결정립계 이동도가 높아져 재결정 핵생성이 용이해진다[17, 18]. 따라서, 450-25 압출재는 완전 재결정된 조직을 가지게 된다. 한편, 두 압출재 모두에서 압출 방향을 따라 10 μm 이하 크기의 이차상이 관찰된다(Figs. 1(c)와 (d)). 형성된 이차상은 크기와 분포 면에서 뚜렷한 차이가 없으며, 면적 분율 측정 결과 각 1.5%와 1.4%로 거의 동일하다.

Fig. 2는 325-10과 450-25 압출재의 XRD 결과를 보여준다. 압출 조건과 관계없이 두 압출재 모두에서 동일하게 α-Mg, Al₃Mn₄Y, Al₂Y, Al₂Ca상이 검출된다. Ca과 Y의 첨가로 인해 형성된 이러한 미고용 이차상들은 이전의 SEN 합금 연구들에서 보고된 이차상들과 동일하며, Al₂Ca상은 irregular-shape을, Al₃Mn₄Y, Al₂Y상은 polygonal-shape을 가진다고 알려져 있다[19, 20].

Fig. 3은 두 압출재의 역 극점도 지도(inverse pole figure map)와 함께 집합조직을 나타내는 (0001) 극점

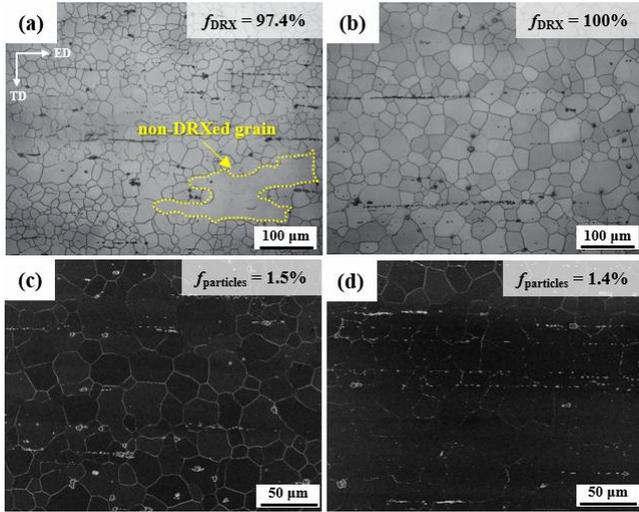


Fig. 1 (a), (b) Optical; (c), (d) SEM micrographs of (a) 325-10 and (b) 450-25 extrudates. f_{DRX} and $f_{particles}$ denote the area fractions of recrystallized grains and particles, respectively.

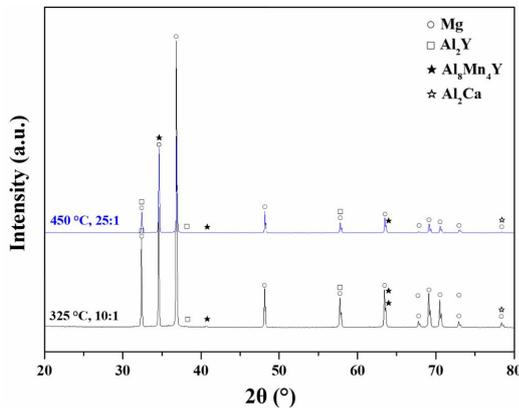


Fig. 2 X-ray diffraction patterns of 325-10 and 450-25 extrudates

도(pole figure)를 보여준다. 325-10과 450-25 압출재의 평균 재결정립의 크기는 각 $21.5 \mu\text{m}$, $35.7 \mu\text{m}$ 로 450-25 압출재의 결정립의 크기가 325-10 압출재에 비해 1.7배 크다. 소재가 압출 다이로 빠져나온 후 냉각되는 동안 결정립 성장이 발생하며, 압출 온도가 증가함에 따라 이러한 결정립 성장이 활발히 발생한다[21]. 또한, 압출비가 증가함에 따라 압출 중 받는 소성 변형과 변형 및 마찰로 인한 열이 증가하면서 열에너지가 높아진다. 이러한 열에너지 역시 결정립계 이동을 활발히 발생시켜 결과적으로 재결정립의 크기를 증가시킨다[22]. 한편, 두 압출재는 모두 기

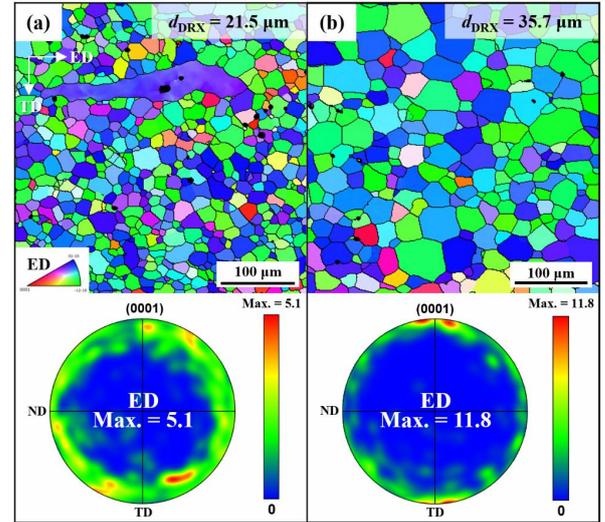


Fig. 3 Inverse pole figure maps and (0001) pole figures of (a) 325-10; (b) 450-25 extrudates. d_{DRX} denotes the average size of recrystallized grains

저극이 압출방향과 수직하게 배열된 집합조직을 가진다. 이는 압출 중 압출방향에 수직인 방향으로 압축응력을 받아 기저면 슬립이 활발하게 발생하였기 때문이다[23]. 그러나, 기저극의 분포 및 최대 집합조직 강도(maximum texture intensity)는 두 압출재가 차이를 보인다. 325-10 압출재는 450-25 압출재에 비해 더 넓은 기저극 분포를 보인다. 반면, 450-25 압출재는 기저극이 압출방향과 거의 90° 로 분포되어 있으며, 최대 집합조직 강도는 11.8로 5.1인 325-10 압출재에 비해 약 2배 높다.

3.2 압출재의 인장물성

Fig. 4는 325-10과 450-25 압출재의 상온 인장 물성 결과를 보여준다. 450-25 압출재의 항복 강도는 170.5 MPa 로, 325-10 압출재의 155.3 MPa 보다 10% 높다. 반면, 최대 인장 강도는 450-25 압출재가 275.4 MPa , 325-10 압출재가 273.9 MPa 로 거의 동일하며, 연신율도 약 20%로 거의 같다. 일반적으로 Hall-Petch 관계식에 따르면 결정립 크기가 작을수록 결정립계 강화 효과로 인해 강도가 높아진다[24]. 하지만 이번 연구에서는 일반적인 경향과 달리 결정립의 크기가 큰 450-25 압출재가 325-10 압출재보다 더 높은 항복 강도를 나타낸다. 따라서, 결정립계 강화 효과 외에 다른 강화 메커니즘이 작용했다는 것을 알 수 있다. 재료를 강화시키는 다른 요인으로

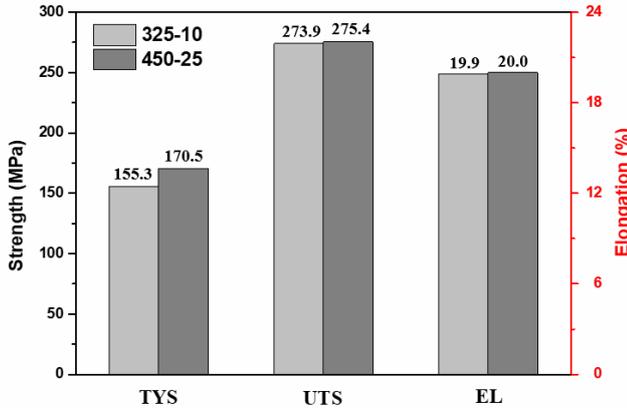


Fig. 4 Tensile properties of 325-10 and 450-25 extrudates. TYS, UTS, and EL denote the tensile yield strength, ultimate tensile strength, and elongation, respectively

는 고용 강화, 석출 강화, 변형 강화, 집합조직 강화 등이 있다[25-27]. 두 압출재는 동일한 합금 원소량이 첨가되고, 이차상의 분포 및 분율에서 차이가 없으므로 고용 및 석출 강화는 동일하다. 한편, 두 압출재의 변형 강화 효과를 알아보기 위해 Kernel Average Misorientation을 측정된 결과 325-10 압출재는 0.25로, 450-25 압출재의 0.2보다 높았다. 이는 325-10 압출재가 더 높은 변형 강화 효과를 가지는 것을 의미한다. 따라서, 450-25 압출재의 높은 강도는 325-10 압출재에 비해 높은 집합조직 강화 효과 때문으로 볼 수 있다. Fig. 3에서 450-25 압출재가 325-10 압출재에 비해 강한 기저면 집합조직을 가지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 압출 온도가 증가함에 따라 결정립 크기가 커지더라도, 그로 인한 집합조직 강화 효과가 더 크게 작용한다는 이전 연구 결과와도 일치한다[28, 29].

Fig. 5는 325-10과 450-25 압출재를 압출방향으로 인장 시 기저 슬립에 대한 Schmid factor (SF) 지도를 보여준다. 450-25 압출재의 평균 SF 값은 0.15로, 0.22의 325-10 압출재에 비해 낮다. 인장 시 기저 슬립에 대한 평균 SF 값이 낮다는 것은 인장 변형 중에 기저 슬립을 활성화시키기 위해 더 높은 응력이 필요하다는 것을 의미하므로, 평균 SF 값이 낮은 재료는 SF 값이 높은 재료에 비해 더 강한 집합조직 강화 효과가 나타난다[30]. 따라서, 인장 시 집합조직 강화 효과가 450-25 압출재가 325-10 압출재보다 크기 때문에, 450-25 압출재에서 더 높은 항복 강도가

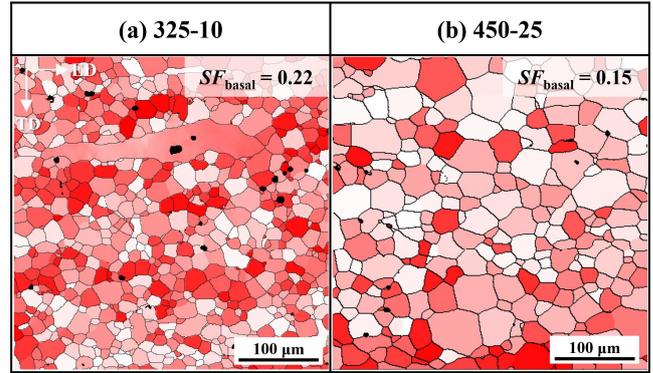


Fig. 5 Schmid factor maps for basal slip of (a) 325-10; (b) 450-25 extrudates. SF_{basal} denotes the average SF value

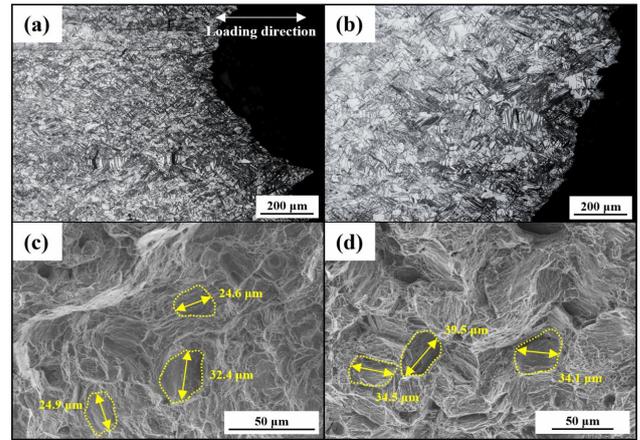


Fig. 6 (a), (b) Optical micrographs; (c), (d) SEM fractographs of tensile-fractured specimens of (a), (c) 325-10 and (b), (d) 450-25 extrudates

나타난다. 한편, 두 압출재의 거의 동일한 인장강도도 SF를 통해 설명될 수 있다. 325-10 압출재는 450-25 압출재에 비해 기저 슬립에 대한 SF 값이 높아 인장 시 슬립이 활발하게 발생한다. 이로 인해 항복점 이후 더 많은 전위의 생성 및 축적이 일어나 가공 경화율이 높아진다[31]. 또한, 결정립 크기가 더 미세해 전위의 움직임이 제한되므로 450-25 압출재보다 더 높은 가공 경화율을 보인다[32].

Fig. 6은 325-10과 450-25 압출재 인장 시험편의 파단 후 미세조직과 파면을 각각 OM과 SEM으로 관찰한 결과를 보여준다. 두 압출재 모두에서 쌍정 이 시편 전반에 형성되어 있다(Figs. 6(a)와 (b)). 이는 {10-11} 압축 쌍정과 {10-11}-{10-12} 이중 쌍정으로,

마그네슘 합금 압출재가 압출 방향으로 인장 응력을 받았을 때 전형적으로 형성되는 쌍정이다[33]. 또한, 두 압출재에서 쌍정으로 인한 벽개 파괴 양상이 관찰된다(Figs. 6(c)와 (d)). 쌍정에서 발생한 국부적인 변형 집중으로 균열이 형성되며 이로 인해 파단이 일어난다. 또한, 각 압출재의 벽개면의 폭은 해당 압출재의 재결정립의 크기와 유사하다. 일반적으로 미세결정립에서 쌍정이 우선적으로 형성되어 연신율을 저하시키는 것으로 알려져 있지만[34], 미세결정립이 325-10 압출재에서 2.6%로 소량 존재하기 때문에 인장 시험 중에는 450-25 압출재와 유사한 쌍정형성 거동을 보여 연신율이 거의 동일하게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 SEN6 합금을 압출비와 압출 온도를 다르게 하여 압출한 후, 미세조직과 기계적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 325-10 압출재는 일부 조대한 미세결정립이 존재하는 반면, 450-25 압출재는 압출 중 완전 재결정되어 등방성의 균일한 미세조직을 가진다.

(2) 두 압출재 모두에서 10 μm 이하 크기의 $\text{Al}_8\text{Mn}_4\text{Y}$, Al_2Y , Al_2Ca 이차상이 압출 방향을 따라 분포하며, 이차상의 크기, 분포, 면적 비율은 두 압출재에서 거의 동일하다.

(3) 325-10 압출재의 평균 결정립 크기는 21.5 μm , 450-25 압출재의 35.7 μm 에 비해 미세하다. 두 압출재는 압출 방향에 수직으로 배열된 기저극을 가진 집합조직을 보이며, 최대 집합조직 강도는 450-25 압출재가 11.8로 5.1인 325-10 압출재에 비해 약 2배 높다.

(4) 항복강도는 450-25 압출재가 170.5 MPa로, 325-10 압출재의 155.3 MPa에 비해 높으며 이는 집합조직 강화 효과로 인한 것으로 판단된다. 두 압출재 모두 인장 변형 시 쌍정 형성과 이로 인한 파단 양상을 보이며 유사한 연신율을 가진다.

후 기

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20024843)

REFERENCES

- [1] E. Maleki, F. Shahri, M. Emamy, 2021, Microstructure and Tensile Properties of Mg-5Zn Alloy Containing Ca, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 1565-1577. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00530-w>
- [2] S.M. Banijamali, Y. Palizdar, S. Najafi, A. Sheikhani, M. Soltan Ali Nezhad, P. Valizadeh Moghaddam, H. Torkamani, 2021, Effect of Mn Modification on Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy with Low Gd Content, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 1483-1492. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00588-6>
- [3] J. Song, J. Chen, X. Xiong, X. Peng, D. Chen, F. Pan, 2022, Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021, *J. Magenes. Alloys*, Vol. 10, pp. 863-898. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.04.001>
- [4] S.K. Woo, C. Blawert, K.A. Yasakau, S. Yi, N. Scharnagl, B.C. Suh, Y.M. Kim, B.S. You, C.D. Yim, 2020, Effects of combined addition of Ca and Y on the corrosion behaviours of die-cast AZ91D magnesium alloy, *Corros. Sci.*, Vol. 166, pp. 108451. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00764-z>
- [5] B.S. You, Y.M. Kim, C.D. Yim, H.S. Kim, 2014, Oxidation and corrosion behavior of non-flammable magnesium alloys containing Ca and Y, *Magnesium Technology 2014*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 325-329. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48231-6_62
- [6] S.H. You, Y.D. Huang, K.U. Kainer, N. Hort, 2017, Recent research and developments on wrought magnesium alloys, *J. Magnes. Alloys*, Vol. 5, pp. 239-253. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.09.001>
- [7] H. Liu, H. Huang, C. Wang, J. Sun, J. Bai, F. Xue, A. Ma, X.-B. Chen, 2019, Recent Advances in LPSO-Containing Wrought Magnesium Alloys: Relationships Between Processing, Microstructure, and Mechanical Properties, *JOM*, Vol. 71, pp. 3314-3327. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03610-9>
- [8] S.H. Park, S.H. Kim, H.S. Kim, J. Yoon, B.S. You, 2016, High-speed indirect extrusion of Mg-Sn-Al-Zn alloy and its influence on microstructure and

- mechanical properties, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 667, pp. 170-177.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.163>
- [9] H.J. Kim, S.H. Kim, S.W. Lee, B.G. Moon, Y.M. Kim, J.H. Lee, J. Yoon, H. Yu, S.H. Park, 2021, Significant Improvement in Extrudability of Mg-9Al-0.8Zn-0.9Ca-0.6Y Alloy Through Mischmetal Addition, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 514-521.
<https://doi.org/10.1007/s12540-020-00822-6>
- [10] M. Shahzad, L. Wagner, 2009, Influence of extrusion parameters on microstructure and texture developments, and their effects on mechanical properties of the magnesium alloy AZ80, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 506, pp. 141-147.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.038>
- [11] Y. Uematsu, K. Tokaji, M. Kamakura, K. Uchida, H. Shibata, N. Bekku, 2006, Effect of extrusion conditions on grain refinement and fatigue behaviour in magnesium alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 434, pp. 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.117>
- [12] T. Zhao, Y. Hu, C. Zhang, B. He, T. Zheng, A. Tang, F. Pan, 2022, Influence of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of Mg-2Gd-0.3Zr magnesium alloy, *J. Magnes. Alloys*, Vol. 10, pp. 387-399.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.06.019>
- [13] S.S. Park, B.S. You, D.J. Yoon, 2009, Effect of the extrusion conditions on the texture and mechanical properties of indirect-extruded Mg-3Al-1Zn alloy, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, pp. 5940-5943.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.07.012>
- [14] Y.J. Chen, Q.D. Wang, J.G. Peng, C.Q. Zhai, W.J. Ding, 2007, Effects of extrusion ratio on the microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 182, pp. 281-285.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.012>
- [15] Ö. Ayer, 2020, Effect of die parameters on the grain size, mechanical properties and fracture mechanism of extruded AZ31 magnesium alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 793, pp. 139887.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139887>
- [16] K. Guan, R. Ma, J. Zhang, R. Wu, Q. Yang, J. Meng, 2021, Modifying microstructures and tensile properties of Mg-Sm based alloy via extrusion ratio, *J. Magnes. Alloys*, Vol. 9, pp. 1098-1109.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.12.004>
- [17] Y.Z. Du, X.G. Qiao, M.Y. Zheng, K. Wu, S.W. Xu, 2015, The microstructure, texture and mechanical properties of extruded Mg-5.3Zn-0.2Ca-0.5Ce (wt%) alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 620, pp. 164-171.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.028>
- [18] M.G. Jiang, C. Xu, H. Yan, S.H. Lu, T. Nakata, C.S. Lao, R.S. Chen, S. Kamado, E.H. Han, 2018, Correlation between dynamic recrystallization and formation of rare earth texture in a Mg-Zn-Gd magnesium alloy during extrusion, *Sci. Rep.*, Vol. 8, pp. 16800.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.038>
- [19] J.E. Kim, Y.J. Kim, J.H. Bae, B.S. You, S.H. Park, 2023, Tensile and High-Cycle Fatigue Properties of Die-Cast SEN6 Magnesium Alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 29, pp. 3511-3520.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-35170-4>
- [20] Y.J. Kim, Y.M. Kim, S.G. Hong, D.W. Kim, C.S. Lee, S.H. Park, 2021, Comparative study of tensile and high-cycle fatigue properties of extruded AZ91 and AZ91-0.3Ca-0.2Y alloys, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 93, pp. 41-52.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.039>
- [21] B.P. Zhang, L. Geng, L.J. Huang, X.X. Zhang, C.C. Dong, 2010, Enhanced mechanical properties in fine-grained Mg-1.0Zn-0.5Ca alloys prepared by extrusion at different temperatures, *Scr. Mater.*, Vol. 63, pp. 1024-1027.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.07.038>
- [22] X. Zhao, S.C. Li, Y.S. Zheng, Z.R. Liu, K. Chen, J.M. Yu, Z.M. Zhang, S.Q. Zheng, 2021, The microstructure evolution, texture weakening mechanism and mechanical properties of AZ80 Mg alloy processed by repetitive upsetting-extrusion with reduced deformation temperature, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 883, pp. 160871.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160871>
- [23] M.G. Jiang, C. Xu, H. Yan, G.H. Fan, T. Nakata, C.S. Lao, R.S. Chen, S. Kamado, E.H. Han, B.H. Lu, 2018,

- Unveiling the formation of basal texture variations based on twinning and dynamic recrystallization in AZ31 magnesium alloy during extrusion, *Acta Mater.*, Vol. 157, pp. 53-71.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.014>
- [24] N. Hansen, 2004, Hall-Petch relation and boundary strengthening, *Scr. Mater.*, Vol. 51, pp. 801-806.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
- [25] L. Gao, R.S. Chen, E.H. Han, 2009, Effects of rare-earth elements Gd and Y on the solid solution strengthening of Mg alloys, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 481, pp. 379-384.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.02.131>
- [26] J.F. Nie, 2012, Precipitation and hardening in magnesium alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 43, pp. 3891-3939.
<https://doi.org/10.1007/s11661-012-1217-2>
- [27] M.M. Hoseini-Athar, R. Mahmudi, R. Prasath Babu, P. Hedström, 2020, Microstructure, texture, and strain-hardening behavior of extruded Mg-Gd-Zn alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 772, pp. 138833.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138833>
- [28] J.S. Suh, B.C. Suh, J.O. Choi, Y.M. Kim, B.S. You, 2021, Effect of extrusion temperature on mechanical properties of AZ91 alloy in terms of microstructure and texture development, *Met. Mater. Int.*, Vol. 27, pp. 2696-2705.
<https://doi.org/10.1007/s12540-020-00642-8>
- [29] D.H. Lee, G.M. Lee, S.H. Park, 2023, Difference in extrusion temperature dependences of microstructure and mechanical properties between extruded AZ61 and AZ91 alloys, *J. Magnes. Alloys*, Vol. 11, pp. 1683-1696. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.05.015>
- [30] J.Y. Shen, L.Y. Zhang, L.X. Hu, Y. Sun, F. Gao, W.C. Liu, H. Yu, 2021, Effect of subgrain and the associated DRX behaviour on the texture modification of Mg-6.63Zn-0.56Zr alloy during hot tensile deformation, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 823, pp. 141745. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141745>
- [31] R. Maaß, S.V. Petegem, D.C. Ma, J. Zimmermann, D. Grolimund, F. Roters, H.V. Swygenhoven, D. Raabe, 2009, Smaller is stronger: the effect of strain hardening, *Acta Mater.*, Vol. 57, pp. 5996-6005.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.08.024>
- [32] A. Malik, Y.W. Wang, F.S. Nazeer, M.A. Khan, M. Sajid, S. Jamal, W. Mingjun, 2021, Deformation behavior of Mg-Zn-Zr magnesium alloy on the basis of macro-texture and fine-grain size under tension and compression loading along various directions, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 858, pp. 157740.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157740>
- [33] H.J. Kim, S.C. Jin, J.G. Jung, S.H. Park, 2021, Influence of undissolved second-phase particles on dynamic recrystallization behavior of Mg-7Sn-1Al-1Zn alloy during low- and high-temperature extrusions, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 71, pp. 87-97.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.08.056>
- [34] S.H. Park, J.H. Bae, S.H. Kim, J. Yoon, B.S. You, 2015, Effect of Initial Grain Size on Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Mg-9Al-0.6Zn Alloy, *Metall. Mater. Trans. A* Vol. 46, pp. 5482-5488.
<https://doi.org/10.1007/s11661-015-3164-1>