



NdFeB esaslı kalıcı manyetik alaşımların manyetik özelliklerine uygulanan ısıl işlemdaki sürenin etkisi

Muhammed Fatih Kılıçaslan^{1*}, Yasin Yılmaz² ve Bekir Akgül³

^{1*} Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Fundamental Sciences and Engineering, Sivas, Turkey, (ORCID: 0000-0001-8507-3900), fatihklicaslan@sivas.edu.tr

² Sivas University of Science and Technology, Faculty of Aeronautics and astronautics, Department of Aeronautical Engineering, Sivas, Turkey, (ORCID: 0000-0003-0690-8004), yyilmaz@sivas.edu.tr

³ Sivas University of Science and Technology, Faculty of Aeronautics and astronautics, Department of Aeronautical Engineering, Sivas, Turkey, (ORCID: 0000-0002-4744-9097), bekirakgul@sivas.edu.tr

(1st International Conference on Innovative Academic Studies ICIAS 2022, September 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1172051)

ATIF/REFERENCE: Kılıçaslan, M. F., Yılmaz, Y. & Akgul, B. (2022). NdFeB esaslı kalıcı manyetik alaşımların manyetik özelliklerine uygulanan ısıl işlemdaki sürenin etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (40), 138-142.

Öz

Mevcut çalışmamızda, hızlı katılaştırma yöntemlerinden biri olan, şerit şeklindeki amorf ve/veya yarı kristalin yapıdaki alaşımların üretilmesinde oldukça yaygın olan ergiyik eğirme (melt spinning) yöntemi kullanılarak, NdFeB esaslı kalıcı mıknatıs şerit alaşımları üretilmiştir. Her bir NdFeB alaışımının üretimi esnasında, ağırlıkça %15 oranında atık mıknatıs, alaşımların kompozisyona dahil edilmiştir. Üretilen kalıcı mıknatıs alaşımları, 710 °C lik ısıl işlem sıcaklığı ve 285 K/s lik çok yüksek ısıtma ve soğutma hızları kullanılmak üzere 5 ve 10 dakikalık sürelerde ısıl işleme tabi tutulmuştur. Aynı sıcaklıkta uygulanan ısıl işlem süresinin, şerit alaşımların manyetik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Artan ısıl işlem süresi ile manyetik koerzivite ve maksimum enerji ürünü özelliklerinin dikkate değer bir şekilde değişimiyle sonuçlanırken, doyum manyetizasyonu ve manyetik remanans gibi özelliklerde çok fazla bir değişim meydana gelmemiştir. Açıkça görüldüğü gibi, artan ısıl işlem süresi, manyetik koerzivitede 5030.5 Oe'den 2279.4 Oe'ye doğru sürekli bir düşüşe yol açmışken maksimum enerji ürününde önce 62.02 kJ/m³ ten 103.73 kJ/m³ e doğru çarpıcı bir şekilde artış, daha sonra ise 38.63 kJ/m³ e doğru çarpıcı bir azalma görülmüştür, bu da alaışımın kalıcı mıknatıslığındaki düşüşe işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: NdFeB, kalıcı mıknatıs, ergiyik eğirme, kalıcı mıknatıslık, ısıl işlem, süre.

Effect of heat treatment time on magnetic properties of NdFeB-based permanent magnetic alloys

Abstract

In our current study, NdFeB-based permanent magnet ribbon alloys were produced by using melt spinning method, which is one of the rapid solidification methods and very common in the production of ribbon-shaped, amorphous and/or semi-crystalline alloys. During the production of each NdFeB alloy, 15 wt.% of waste magnet was included in the composition of the alloys. The produced permanent magnet alloys were heat treated for 5 and 10 minutes by using a heat treatment temperature of 710 °C and very high heating and cooling rates of 285 K/s. The effect of the heat treatment time applied at the same temperature on the magnetic properties of the strip alloys was investigated. While the increase in heat treatment time resulted in a remarkable change in magnetic coercivity and maximum energy product properties, there was not much change in the properties such as saturation magnetization and magnetic remanance. As clearly seen, increasing heat treatment time resulted in a continuous decrease in magnetic coercivity from 5030.5 Oe to 2279.4 Oe, maximum energy product first showed a dramatic increase from 62.02 kJ/m³ to 103.73 kJ/m³, and then a dramatic decrease to 38.63 kJ/m³, indicating a decrease in the permanent magnetism of the alloy.

Keywords: NdFeB, permanent magnet, melt spinning, permanent magnetism, heat treatment, time.

1. Giriş

NdFeB esaslı kalıcı mıknatıslar, sahip oldukları üstün manyetik özellikleri sayesinde oldukça dikkat çekmektedir. Söz konusu üstün manyetik özellikler; yüksek manyetik remanans (B_r), koerzivite (H_c) ve maksimum enerji ürünü ($(BH)_{max}$) ile kendini göstermektedir [1]. Bu tür kalıcı mıknatıslar, 1983 yılında keşfedilmiş olup, o zamandan beri başta elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar olmak üzere, endüstride artan enerji tasarruflu teknoloji talebine bağlı olarak hard-diskler, mobil telefonlar, otomotiv kontrol sistemleri, rüzgar türbinleri gibi pek çok alanda kendilerine kullanım yeri bulabilmesini, sahip oldukları üstün manyetik özelliklerine borçludur [2–4]. Kullanım alanlarının her geçen gün artışıyla birlikte NdFeB kalıcı mıknatıslarının manyetik özelliklerinin optimizasyonu da kaçınılmaz hale gelmektedir. Bilhassa, oldukça yüksek sıcaklıklarda kullanılacak olan NdFeB kalıcı mıknatısların oldukça yüksek bir manyetik koerzivite (H_c) ye sahip olması gerekmektedir. Bu bakımdan bu tür kalıcı mıknatısların koerzivitesini iyileştirmek, oldukça kritik bir önem taşımaktadır [5]. Bu durum dikkate alındığında, başta manyetik koerzivite olmak üzere kalıcı manyetik özellikleri iyileştiren çeşitli proseslerin kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır [6]. Uygun üretim yönteminin seçimi, ısıl işlem, tane sınırı difüzyonu prosesi (GBDP), alaşımlama bu prosesler arasında yer almaktadır [6–10]. Hızlı katılaştırma yöntemlerinden birisi olan ergiyik eğirme prosesi ile oldukça yüksek soğutma hızları kullanılarak amorf ve nispeten ince tane dağılımına sahip bir mikroyapı ve sonuç olarak, üstün manyetik özelliklere ulaşmak mümkündür [11–14]. NdFeB mıknatısların manyetik özelliklerinin, ısıl işlemle birlikte modifiye edildiği bilinmektedir [15]. NdFeB mıknatıslar, yaklaşık ağırlıkça %32-35 arasında Nd elementi ihtiva eder. Artan Nd içeriğine bağlı olarak, H_c ve $(BH)_{max}$ özelliklerinin modifiye edildiği de daha önce rapor edilmiştir [16]. Zira Nd elementi, $Nd_2Fe_{14}B$ sert manyetik fazının daha fazla oluşumunu teşvik eder [17]. Bu bakımdan çalışmamızın ana hedefini, 285 K/s lik çok yüksek ısıtma ve soğutma hızında ve 710 °C ta 5 ve 10 dakikalık süreler boyunca uygulanan flaş tavlama ısıl işleminin nispeten yüksek Nd içeriğine sahip (ağırlıkça %36 Nd), NdFeB esaslı kalıcı mıknatıs alaşımların manyetik özelliklerine etkisini incelemek oluşturmaktadır.

2. Materyal ve Metot

NdFeB esaslı şerit alaşımları üretmek için ilk olarak yaklaşık 10^{-4} mbar lık yüksek bir vakum ve 500 mbar lık bir kısmi basınca sahip argon atmosferi altında ingot şeklindeki alaşımlar, vakum indüksiyon ergitme (VIM) fırınında üretilmiştir. Alaşımların nominal kimyasal kompozisyonu ağırlıkça %36 Nd, %61 Fe ve %3 B olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca her bir ingot alaşımına ağırlıkça %15 oranında ve kimyasal kompozisyonu ağırlıkça %28 Nd, %64 Fe, %1 B, %3 Dy, %3.5 Co ve %0.5 Pr şeklinde olan atık mıknatıs dahil edilmiştir. Her bir ingot alaşımında, kimyasal homojenliğin yüksek seviyede sağlanabilmesi açısından ergitme işlemi 2 ila 3 defa tekrarlanmıştır. Her bir ingot alaşımı, yaklaşık 230 g'lık bir ağırlığa sahip olacak şekilde üretilmiştir. Her bir alaşım ingotundan yaklaşık 30 g'lık numuneler kesilerek, ergiyik eğirme işleminde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Ergiyik eğirme prosesi ile şerit şeklinde NdFeB alaşımlarını üretmek için, tekrardan vakum altında ergitme işlemine tabi tutulan ingot

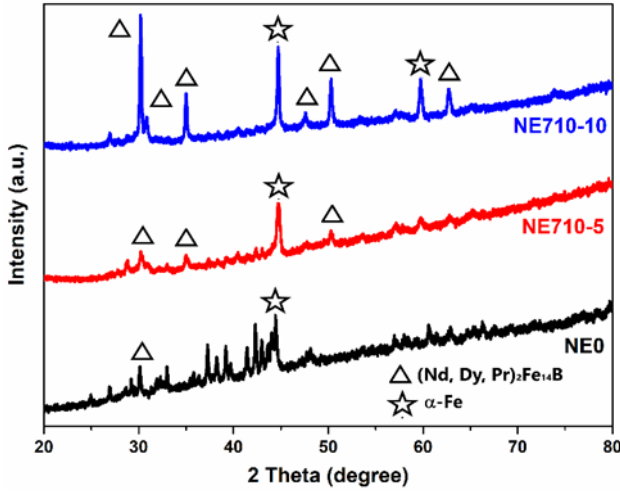
alaşım numuneleri, $1 \times 10 \text{ mm}^2$ lik bir kesit alanına sahip bir nozül vasıtasıyla ergiyik metal olarak yaklaşık 30 m/s hızla dönen bakır bir çark üzerine püskürtülmüştür. Bu arada, ergiyik metali bakır çarka püskürtmek için kullanılan argon basıncı 260 mbar iken, bakır çark ile nozül arasındaki mesafe 0.6 mm olarak ayarlanmıştır. Sonuç olarak, yaklaşık 35 μm lik homojen bir kalınlık ve yaklaşık 10 mm genişliğe sahip NdFeB esaslı şerit alaşımları üretilmiştir. Üretilen alaşımlardaki kristalin ve amorf bölgeleri ortaya çıkarmak amacıyla X-ışın difraksiyon (XRD) analizi, (Cu-K α radyasyonu kullanılarak) 2°/dakika tarama hızında yapılmıştır. Her bir şerit alaşımının manyetik özelliklerinin belirlenmesinde, titreşimli numune manyetometri (VSM) analizi yapılmıştır. 285 K/s lik çok yüksek ısıtma ve soğutma hızının kullanıldığı, 710 °C sıcaklıkta ve sırasıyla 5 ve 10 dakikalık iki farklı sürede, flaş tavlama ısıl işlemi, şerit alaşımların kristalizasyon ve manyetik özelliklere etkisini incelemek için gerçekleştirilmiştir. NdFeB esaslı alaşımların kristalizasyon sıcaklıklarının belirlenmesi amacıyla, her bir alaşıma diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmamız kapsamında üretilen her bir alaşımla ilgili tanımlama Tablo 1 de özetlenmiştir.

Tablo 1. Isıl işlem uygulanmamış ve 710 °C sıcaklıkta ve 5 ve 10 dakikalık sürelerde flaş tavlama ısıl işlemine tabi tutulmuş ergiyik eğirme yöntemiyle NdFeB esaslı alaşımların tanımlanması.

| Ergiyik Eğirme Yöntemi ile Üretilen Alaşımların Kodu | Tanımlama |
|--|--|
| NE0 | Ergiyik eğirme yöntemi ile üretilmiş, ısıl işlem uygulanmamış |
| NE710-5 | Ergiyik eğirme yöntemi ile üretilmiş, 710 °C ta 5 dk flaş tavlannmış |
| NE710-10 | Ergiyik eğirme yöntemi ile üretilmiş, 710 °C ta 5 dk flaş tavlannmış |

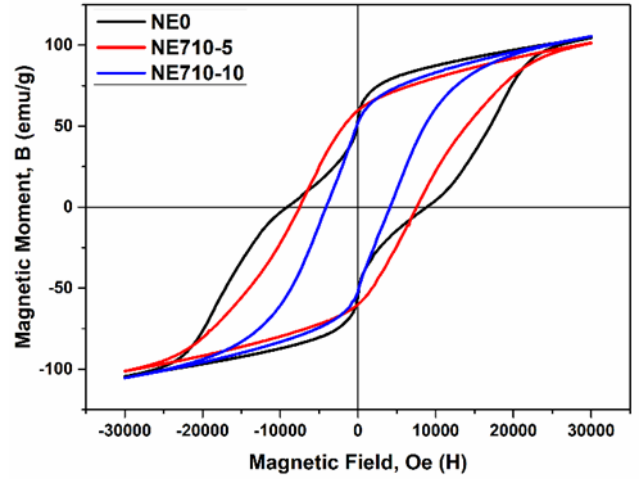
3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Şekil 1 de, ergiyik eğirme yöntemiyle üretilen, ısıl işlem uygulanmamış ve 710 °C ta 5 ve 10 dakika ısıl işlem uygulanmış NdFeB esaslı alaşımların XRD paternleri gösterilmiştir. Buna göre, her bir alaşımın XRD paternleri incelendiğinde eser miktarda kristalin yapının yanı sıra, büyük ölçüde amorf bir yapı oluşumu görülmektedir. Amorf yapının oluşumu, ergiyik eğirme yönteminde kullanılan hızlı soğutmaya atfedilebilir [18]. Isıl işlem uygulanmamış alaşımın XRD paterninde, NdFeB alaşımına dahil edilen atık mıknatıs içerisindeki Dy ve Pr ağır nadir toprak elementleri (HREE) nin etkisiyle, $2\theta=30^\circ$ civarında kristalin sert (Nd, Dy, Pr) $_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ manyetik fazın ve $2\theta=45^\circ$ civarında kristalin yumuşak α -Fe manyetik fazının pikleri görülmektedir. 710 °C ta, 5 ve 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısıl işlemiyle birlikte, amorf yapıda daha fazla kristalizasyon meydana gelmiştir [18]. Ayrıca, artan ısıl işlem süresiyle birlikte sert ve yumuşak, kristalin manyetik fazlara ait piklerin daha fazla ortaya çıktığı gözlenmiştir. Zira, atomların amorf bir yapıdan kristalin bir yapıya dönüşümü için belirli bir sıcaklık ve/veya zaman gereklidir [19]. Yüksek ısıl işlem sıcaklıkları ve sürelerinde, atomların hareketliliği (mobilitesi) daha fazla olup daha fazla kristalizasyon meydana gelir [20].

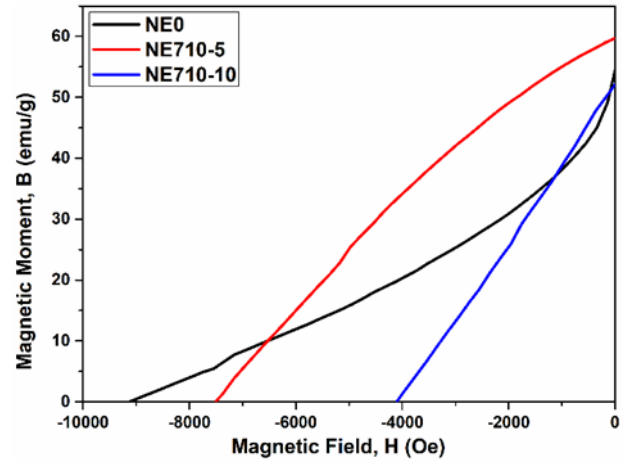


Şekil 1. Ergiyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların ısı işlem uygulanmamış ve 710 °C sıcaklıkta 5 ve 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısı işlemi sonrasındaki XRD paternleri.

Şekil 2 ve 3'te sırasıyla, ergiyik eğirme yöntemiyle üretilen, ısı işlem uygulanmamış ve 710 °C ta 5 ve 10 dakika boyunca flaş tavlama ısı işlemi uygulanmış NdFeB esaslı alaşımların titreşimli numune manyetometri (VSM) analizi sonucunda elde edilen demanyetizasyon eğrileri ve demanyetizasyon eğrilerinin ikinci çeyrek (second quadrant) kısımları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, ısı işlem uygulanmamış alaşımda, sırasıyla manyetik koerzivite (H_c) 5030.5 Oe, maksimum enerji ürünü ($(BH)_{max}$) 62.02 kJ/m³, manyetik remenans (B_r) 55.76 emu/g ve doyum manyetizasyonu (B_s) 104.65 emu/g dir. 710 °C ta 5 dakika boyunca flaş tavlama ısı işlemi uygulandığında, sırasıyla manyetik koerzivite (H_c) 4130.7 Oe, maksimum enerji ürünü ($(BH)_{max}$) 103.73 kJ/m³, manyetik remenans (B_r) 59.81 emu/g ve doyum manyetizasyonu (B_s) 101.44 emu/g dir. Aynı sıcaklıkta 10 dakika boyunca ısı işlem uygulandığında ise sırasıyla manyetik koerzivite (H_c) 2279.2 Oe, maksimum enerji ürünü ($(BH)_{max}$) 38.63 kJ/m³, manyetik remenans (B_r) 52.51 emu/g ve doyum manyetizasyonu (B_s) 105.46 emu/g dir. Burada, uygulanan flaş tavlama ısı işleminin etkisiyle yumuşak α -Fe fazı ile sert (Nd, Dy, Pr)₂Fe₁₄B manyetik fazlarının daha fazla ortaya çıkması ile kalıcı manyetik özellikleri belirleyen H_c ve $(BH)_{max}$ 'ın artması beklenir [21]. Diğer yandan, sert ve yumuşak manyetik fazlarda meydana gelen tane kabalaşması ve dolayısıyla bu manyetik fazlar arasındaki optimum değişim eşleşmesi (exchange coupling) mekanizmasını istenen seviyede sağlamadığı için H_c ve $(BH)_{max}$ 'de azalma meydana gelmiş olabilir [22]. Zira, kalıcı manyetik davranışı belirleyen manyetik özellik olan H_c , sert ve yumuşak manyetik fazlar arasındaki değişim eşleşmesi (exchange coupling) mekanizmasına bağlıdır [23]. Ayrıca, NdFeB alaşımına dahil edilen atık miktardan kaynaklanan Dy ve Pr ağır nadir toprak elementleri (HREE)'nin, oluşturdukları (Nd, Dy, Pr)₂Fe₁₄B sert manyetik fazı içerisinde, α -Fe fazı ile antiferromanyetik değişim eşleşmesi (exchange coupling) mekanizmasının da H_c ve $(BH)_{max}$ 'ı artırması beklenir [5]. Ancak burada, böyle bir durum söz konusu olmamıştır. 710 °C sıcaklıkta 5 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısı işleminde azalan H_c 'ye rağmen B_r 'de meydana gelen artış, $(BH)_{max}$ 'da belirgin bir artışa yol açmıştır. 710 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısı işlemi ile birlikte, B_s 'de meydana gelen artış, XRD paterninde de görüldüğü gibi, α -Fe yumuşak manyetik fazın miktarında meydana gelen artış ile açıklanabilir [24].

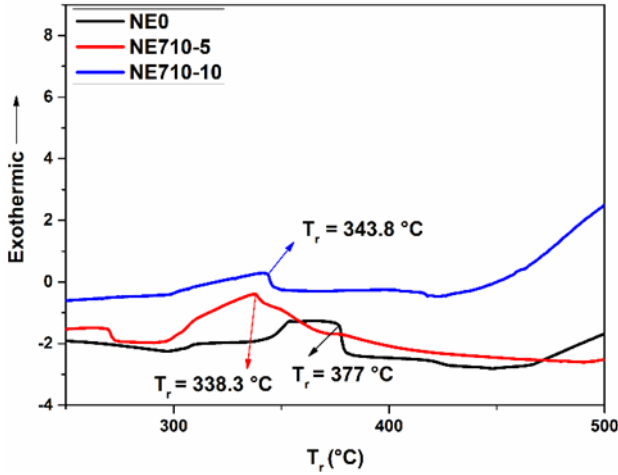


Şekil 2. Ergiyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların ısı işlem uygulanmamış ve 710 °C sıcaklıkta 5 ve 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısı işlemi sonrasındaki VSM eğrileri.



Şekil 3. Ergiyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların ısı işlem uygulanmamış ve 710 °C sıcaklıkta 5 ve 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısı işlemi sonrasındaki VSM eğrilerinin ikinci çeyrek (second quadrant) kısımları.

Şekil 4'te, ergiyik eğirme yöntemiyle üretilen, ısı işlem uygulanmamış ve 680 ve 710 °C ta 10 dakika boyunca ısı işlem uygulanmış NdFeB esaslı alaşımların diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi sonucunda elde edilen eğrileri gösterilmektedir. Buradan her bir alaşıma ait kristalizasyon sıcaklıkları değerleri sırasıyla 377, 338.3 ve 343.8 °C olarak ölçülmüştür. Uygulanan ısı işlemle birlikte kristalizasyon sıcaklığı önce bariz bir düşüş göstermekle birlikte artan ısı işlem süresiyle birlikte tekrar çok az bir miktar artma eğilimi göstermiştir.



Şekil 4. Ergiyik eğirme yöntemiyle üretilen NdFeB esaslı şerit alaşımların ısı işlem uygulanmamış ve 710 °C sıcaklıkta 5 ve 10 dakika boyunca uygulanan flaş tavlama ısı işlemi sonrasındaki DSC eğrileri.

4. Sonuç

Çalışmamızın kapsamında 710 °C sıcaklık ve 5 ve 10 dakikalık süreler boyunca uygulanan çok hızlı ısıtma ve soğutma hızlarının kullanıldığı flaş tavlama ısı işleminin, ergiyik eğirme yöntemi ile üretilen NdFeB esaslı kalıcı mıknatıs alaşımlarının manyetik özelliklerine etkisi tartışılmıştır. Her bir alaşımın XRD paterni, yarı-kristalin bir yapının varlığını ortaya koymuş olup uygulanan flaş tavlama ısı işlemine bağlı olarak α -Fe yumuşak manyetik faz ve (Nd, Dy, Pr)₂Fe₁₄B sert manyetik fazları daha fazla ortaya çıkmıştır. Kalıcı mıknatıslık özelliğini belirleyen H_c ve (BH)_{max} gibi özelliklerde, uygulanan flaş tavlama ısı işlemiyle birlikte meydana gelen azalma, flaş tavlama ısı işlemindeki sıcaklık ve sürenin etkisiyle sert ve yumuşak manyetik fazlar olan α -Fe ve (Nd, Dy, Pr)₂Fe₁₄B'de meydana gelen tane kabalaşmasına ve sonuç olarak bu manyetik fazlar arasındaki değişim eşleşmesi (exchange coupling) mekanizmasının istenen performansta sergilemediği sonucuna varılmıştır. Flaş tavlama ısı işleminde artan süreye bağlı olarak B_s de meydana gelen artışın ise α -Fe yumuşak manyetik fazın miktarındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. Teşekkür

Bu çalışma, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörü tarafından finanse edilmiştir (Proje No: 2020-TDP-Mühe-0001).

Kaynakça

[1] Z. Cao, X. Ding, R. Bagheri, A. Ghafar, C. Xu, L. Yang, L. Song, Y. Wen, Z. Song, The deposition, microstructure and properties of Al protective coatings for NdFeB magnets by multi-arc ion plating, *Vacuum*. 142 (2017) 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.05.003>.

[2] X. Du, T.E. Graedel, Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets, *J. Ind. Ecol.* 15 (2011) 836–843. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00362.x>.

[3] D. Brown, B. Ma, Z. Chen, Developments in the processing and properties of NdFeB-type permanent magnets, *J. Magn. Mater.* 248 (2002) 432–440.

[4] C. Chen, Y.L. Huang, Y.F. Yao, X.K. Fu, W. Li, Y.H. Hou, Effects of thermal annealing on improved magnetic

properties and microstructure for SmFe 11 Ti alloy, *J. Magn. Mater.* 530 (2021) 9–13.

[5] M. Lv, T. Kong, W. Zhang, M. Zhu, H. Jin, W. Li, Progress on modification of microstructures and magnetic properties of Nd-Fe-B magnets by the grain boundary diffusion engineering, *J. Magn. Mater.* 517 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167278>.

[6] B.B. Straumal, A.R. Kilmametov, A.A. Mazilkin, S.G. Protasova, Amorphization of Nd-Fe-B alloy under the action of high-pressure torsion, *Mater. Lett.* 145 (2015) 63–66. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.041>.

[7] B.B. Straumal, A.A. Mazilkin, S.G. Protasova, D. V. Gunderov, G.A. López, Amorphization of crystalline phases in the Nd-Fe-B alloy driven by the high-pressure torsion, *Mater. Lett.* 161 (2015) 735–739. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.09.076>.

[8] Q. Zhou, W. Li, Y. Hong, L. Zhao, X. Zhong, H. Yu, Microstructure improvement related coercivity enhancement for sintered NdFeB magnets after optimized additional heat treatment *, *J. Rare Earths.* 36 (2018) 379–384. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2017.11.007>.

[9] Y.J. Wong, H.W. Chang, Y.I. Lee, W.C. Chang, C.H. Chiu, C.C. Mo, Coercivity enhancement of thicker sintered NdFeB magnets by grain boundary diffusion with low-melting Tb_{75-x}Ce_xCu₂₅ (x = 0–45) alloys, *J. Magn. Mater.* 515 (2020) 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167287>.

[10] H.W. Chang, Y.I. Lee, P.H. Liao, W.C. Chang, Scripta Materialia Significantly enhanced coercivity enhancement of hot deformed NdFeB magnets by doping Ce-containing (PrNdCe)₇₀Cu₃₀ alloys powders, *Scr. Mater.* 146 (2018) 222–225. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.11.052>.

[11] M.F. Kilicaslan, S.I. Elburni, B. Akgul, The effects of Nb addition on the microstructure and mechanical properties of melt spun Al-7075 alloy, *Adv. Mater. Sci.* 21 (2021) 17–19. <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0008>.

[12] M.F. Kilicaslan, S.I. Elburni, Y. Yilmaz, Effects of Nb addition on the microstructure and microhardness of melt-spun Al-7075 alloy, *Adv. Mater. Sci.* 22 (2022) 79–89. <https://doi.org/10.2478/adms-2022-0004>.

[13] M.F. Kılıçaslan, Y. Yılmaz, B. Akgül, H. Karataş, C.D. Vurdu, Effect of Fe-Ni Substitution in FeNiSiB Soft Magnetic Alloys Produced by Melt Spinning, *Adv. Mater. Sci.* 21 (2021) 79–89. <https://doi.org/10.2478/adms-2021-0026>.

[14] X.H. Li, Y. Guan, W. Li, J.W. Zhang, X.Y. Zhang, Study of the formation of crystal texture in α -Fe/Nd₂Fe₁₄B nanocomposite magnets prepared by controlled melt-spinning, *Mater. Lett.* 61 (2007) 2728–2730. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.02.095>.

[15] W.F. Li, T. Ohkubo, K. Hono, M. Sagawa, The origin of coercivity decrease in fine grained Nd-Fe-B sintered magnets, *J. Magn. Mater.* 321 (2009) 1100–1105. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.10.032>.

[16] K.B. Yang, A. Walton, R. Sheridan, K. Güth, R. Gauß, O. Gutfleisch, M. Buchert, B. Steenari, T. V. Gerven, P. T. Jones, REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review, *J. Sustain. Met.* (2017) 122–149. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>.

[17] J. Liu, H. Sepelri-Amin, T. Ohkubo, K. Hioki, A. Hattori, T. Schrefl, K. Hono, Effect of Nd content on the microstructure and coercivity of hot-deformed Nd-Fe-B permanent magnets, *Acta Mater.* 61 (2013) 5387–5399. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.05.027>.

[18] Z.Y. Zhang, L.Z. Zhao, X.C. Zhong, D.L. Jiao, Z.W. Liu,

- Phase precipitation behavior of melt-spun ternary Ce₂Fe₁₄B alloy during rapid quenching and heat treatment, *J. Magn. Mater.* 441 (2017) 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.028>.
- [19] Y. Lin, B. Wu, S. Li, S. Mao, X. Liu, Y. Zhang, L. Wang, The quantitative relationship between microstructure and mechanical property of a melt spun Al – Mg alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 621 (2015) 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.047>.
- [20] R.E. Simpson, P. Fons, A. V. Kolobov, T. Fukaya, M. Krbal, T. Yagi, J. Tominaga, Interfacial phase-change memory, *Nat. Nanotechnol.* 6 (2011) 501–505. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.96>.
- [21] S. Caglar, M.F. Kilicaslan, A. Atasoy, H. Tiryaki, M. Erkovan, S. jik Hong, Effect of heat treatment on magnetic properties of nanocomposite Nd-lean Nd₇Fe₇₃B₂₀ ribbons, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 32 (2021) 2338–2345. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04999-9>.
- [22] H. Zhao, H. Liu, J. Su, Influence of heat treatment on microstructures and properties of Nd₈Fe₇₈B₆Co₄ alloy, *J. Rare Earths* 24 (2006) 379–381. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(07\)60406-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(07)60406-2).
- [23] H.K. T. Schrefl, J. Fidler, Remanence and coercivity in isotropic nanocrystalline permanent magnets, *Phys. Rev. B* 49 (1994).
- [24] V. Swaminathan, P.K. Deheri, S.D. Bhame, R.V. Ramanujan, Novel microwave assisted chemical synthesis of Nd₂Fe₁₄B hard magnetic nanoparticles, *Nanoscale* 5 (2013) 2718–2725. <https://doi.org/10.1039/c3nr33296a>.