

MAGNEZYUM DİBORÜR TELLERİN MİKRO YAPISI VE GERİLME ANALİZİ

Abdullah DÖNMEZ^{1*}, Şenol ATAÖĞLU²

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul, TÜRKİYE

Özet: Bu çalışmada, ısıtım işlem prosesinin süperiletken Magnezyum Diborür tellerin mikro yapısına ve oluşan gerilme dağılımlarına etkisi incelenmektedir. Sürekli Tüp Biçimlendirme ve Doldurma (CTFF) prosesi ile farklı çaplarda üretilen süperiletken Bakır/Magnezyum Diborür tellerin mikro yapısı Taramalı Elektrom Mikroskopu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) kullanılarak karakterize edilmektedir ve gerilme dağılımı hesapları analitik olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, Bakır/Magnezyum Diborür tellerin ara bölgesinde gerilme değerlerinin maksimum değerde olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Eksenel simetri, magnezyum diborür, artık gerilme, süperiletken tel.*

MICROSTRUCTURE AND STRESS ANALYSIS OF THE MAGNESIUM DIBORIDE WIRES

Abstract: In this study, the effect of the annealing process on the microstructure and the stress distribution of the Magnesium Diboride wires were investigated. The presented microstructure properties of the Copper/Magnesium Diboride wires are characterized for the various diameters fabricated by the Continuous Tube Forming and Filling (CTFF) by using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Electron Dispersive Spectroscopy (EDS) and the stress distribution is calculated analytically. In this study, it is observed that values of stress components are maximum at the interface region of Copper/Magnesium Diboride wires.

Anahtar Kelimeler: *Axial symmetric, magnesium diboride, residual stress, superconducting wire.*

1. GİRİŞ

Magnezyum Diborür telleri, transformatör, jeneratör, solenoid, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve yarış pisti bobinleri gibi uzun ömürlü uygulamalar için birçok gruptan tüp içinde toz prosesi ile üretilmiştir [1-5]. 2003 yılından bu yana Magnezyum Diborür bobinlerini geliştirmek için pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir [6]. Bobin uygulamaları için Wind and React (W&R) ve React and Wind (R&W) olmak üzere iki teknik kullanılmıştır. Ağırlığın önem kazandığı durumlarda küçük yarıçaplı Magnezyum Diborür bobinlerin üretiminde özellikle W&R tekniği kullanılmıştır.

Magnezyum Diborür'ün fiziksel ve mekanik özelliklerini konu alan birçok çalışma mevcut olmasına karşın [7], pek azı artık gerilmelerle ilgilidir. Artık gerilmeler termal ve mekanik özelliklerin uyumsuzluğundan, metal kaplamanın ve izafi olarak Magnezyum Diborür süperiletken çekirdekten kaynaklanmaktadır. Magnezyum Diborür'ün deformasyonları ayrıca kaplama malzemelerine ve sıcaklığa da bağlıdır. Artık gerilmeler sayısal, analitik ve X-ışınları vb. birçok yöntem kullanılarak hesaplanabilir [8].

W&R Magnezyum Diborür bobinleri için CTFF Bakır/Magnezyum Diborür tellerin mikro yapısını ve artık gerilmelerini araştırmak bu çalışmanın esas amacını teşkil etmektedir. Artık gerilmeler, ısıl işlem sırasında biçimlenme sıcaklığından oda sıcaklığına soğutma işlemi sırasında artarak çatlak oluşumuna ve kırılmalara neden olabilmektedir. incelenen numunenin boyutları sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmektedir.

2. DENEY PROSEDÜRÜ

Tek filament Magnezyum Diborür telleri CTFF prosesi kullanılarak üretilmiştir. CTFF prosesi ile ilgili detaylı bilgiler kaynak [9]'de bulunmaktadır. Kullanılan Bakır/Magnezyum Diborür tellerin çapları 0.80 ve 1.25 mm'dir ve bu çalışmada I ve II olarak isimlendirilmektedirler. Numunelere %4 H₂-Ar gaz akışının altında optimum ısıl işlem profili ile sıcaklık uygulanmıştır. Numunelerin mikro yapısı ve yüzey analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elektron dağıtım spektroskopisi (EDS) kullanılarak tanımlanmıştır.

2.1. Bakır/Magnezyum Diborür tellerin artık gerilme analizi

Bakır/Magnezyum Diborür numuneleri optimum ısıl işlemi olarak bulunan %4 H₂-Ar gaz akışı altında [10], 5.8 °C/dk. sıcaklık artışları ile 700 °C'de 30 dk. ısıl işleme tabi tutulmuştur. Oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda artık gerilmeler Bakır/Magnezyum Diborür tellerinde çatlak ve/veya kırılmalar meydana gelebilir. Bu çalışmada eksenel simetriye sahip Bakır/Magnezyum Diborür tellerde artık gerilmeler incelenmiştir. Oda sıcaklığındaki malzeme özellikleri ve incelenen numunenin boyutları sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Malzemelerin özellikleri

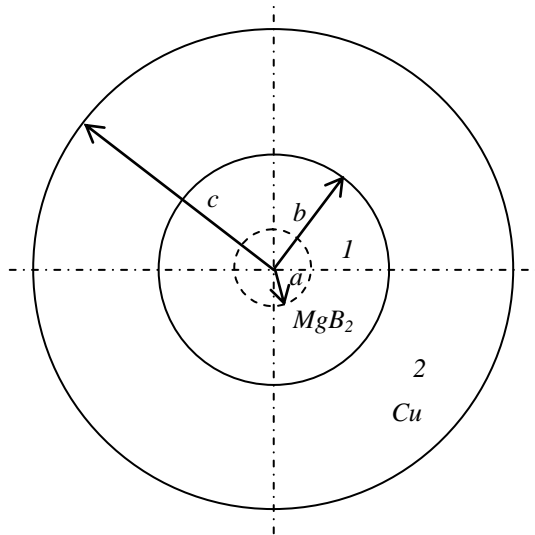
	No	E (GPa)	ν	α (10 ⁻⁶ /K)
Magnezyum Diborür	1	151	0.18	8.3
Cu	2	120	0.32	16.7

Burada, E elastisite modülü, ν Poisson oranı ve α ısıl genişleme katsayısıdır.

Tablo 2. Telin Boyutları (mm)

	I	II
b	240	368
c	400	625

Bakır/Magnezyum Diborür'den üretilen silindirik teldeki gerilme durumunun hesabı için Lamé çözümü kullanılabilir [11]. Yapının bölgelerini oluşturan malzemeler Şekil 1'de gösterildiği gibi işaretlenmektedir.



Şekil 1. Eksenel simetrik Bakır/Magnezyum Diborür telin şeması

Problemin ilgili çözümü yapının bölgeleri boyunca süreklilik koşulları kullanılarak elde edilmiştir. Merkezdeki bölgeler arası uzaklık birinci bölge için 1 ikinci bölge için 2 olarak işaretlenmiştir.

$$r=b \text{ de } u_1 = u_2 \quad (1)$$

Lamé'nin çözümüne göre yerdeğiştirme ifadesi:

$$u = \frac{1-2\nu}{E} \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} r + \frac{1+\nu}{E} \frac{r_i^2 r_o^2}{r} \frac{p_i - p_o}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2)$$

Burada r_i ve r_o silindirin iç ve dış yarıçaplarını, p_i ve p_o ise geometrik sınırlarda etkiyen üniform iç ve dış basıncı ifade etmektedirler.

(2) eşitliği yukarıda verilen koşullar altında tekrar yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{1-2\nu_1}{E_1} p_b b + b \alpha_1 \Delta T = \frac{1-2\nu_2}{E_2} p_b b + b \alpha_2 \Delta T \quad (3)$$

Burada α_i ($i=1,2$) malzemenin ısı genleşme katsayısını ve ΔT sıcaklık farkını ifade etmektedir. Yukarıdaki formülün düzlem gerilme durumunda geçerli olduğunu belirtmek gerekir. Bu bakımdan Poisson oranı, elastisite modülü ve termal genleşme katsayısını düzlem şekil değiştirme çözümü için formülde sırası ile $\nu/(1-\nu)$, $E/(1-\nu^2)$ ve $\alpha(1+\nu)$ ile değiştirilmelidir. Eşitlik (3)'ün çözümü soğuma işle mi sırasında oluşan ve p_b ile ifade edilen bölgedeki radyal gerilmeleri vermektedir. Gerilme bileşenleri, p_b 'nin artık biliniyor olması sebebiyle Lamé

gerilme ifadeleri kullanılarak ilgili çubuğun kısımlarında hesaplanabilir.

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 r_o^2 (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} + \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{r_i^2 r_o^2 (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \frac{1}{r^2} + \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (5)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - \alpha E \Delta T \quad (6)$$

Burada σ_z uzunluk boyunca oluşan gerilme bileşenidir. I ve II için elde edilen veriler aşağıda gösterilmektedir.

I

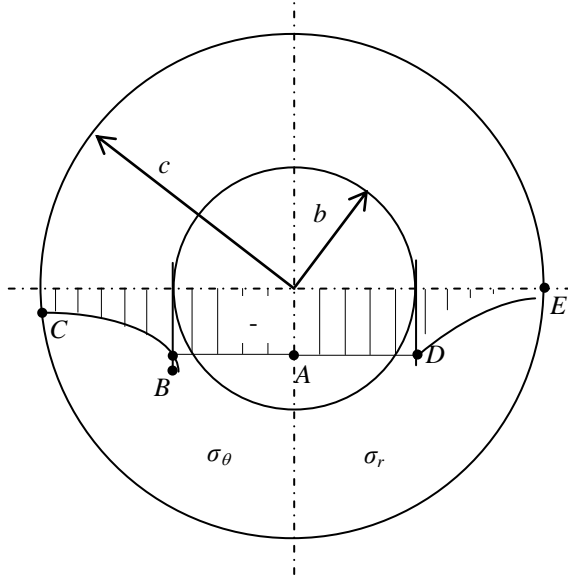
Elde edilen p_b -246.04 MPa'dır. Yerdeğiştirmeler $r = 240 \mu\text{m}$ ve $r = 400 \mu\text{m}$ olduğu durumda sırası ile -1.59 μm ve -1.59 μm olarak elde edilmiştir. Şekil 2'de gösterilen gerilme bileşenlerinin değerleri farklı noktalar için Tablo 3'de verilmektedir.

II

Elde edilen p_b değeri -250.8 MPa'dır. Yerdeğiştirmeler, $r = 368 \mu\text{m}$ ve $r = 625 \mu\text{m}$ olduğu durumda sırası ile -2.46 μm ve -2.46 μm olarak elde edilmiştir. Şekil 2'de gösterilen gerilme bileşenlerinin değerleri farklı noktalar için Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Teğetsel gerilme (σ_θ) değerleri (MPa)

	σ_θ		
	A	B	C
I	-246.04	-522.8	-276.79
II	-250.8	-517.13	-266.25



Şekil 2. Gerilme bileşenlerinin değişimi

Burada σ_r radyal gerilme bileşenidir.

3. DEĞERLENDİRME

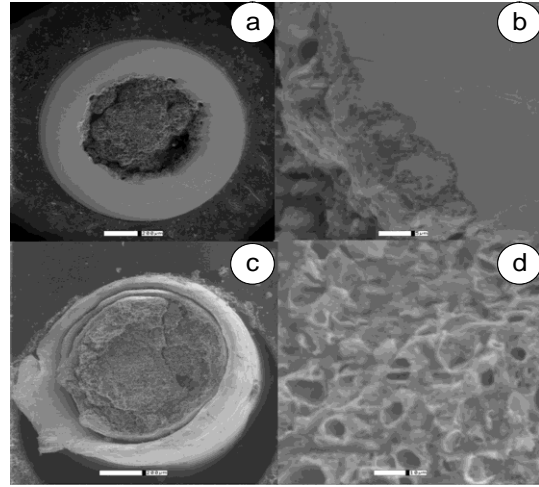
Bakır/Magnezyum Diborür numuneleri optimum ısı işlemi olarak bulunan %4 H₂-Ar gaz akışı altında 5.8 °C/dk sıcaklık artışları ile 700 °C'de 30 dk ısı işlemi tabi tutulmuştur. Bakır/Magnezyum Diborür tellerin çapları yaklaşık 0.80 ve 1.25 mm ve süperiletken çekirdeklerin kesit alanları SEM görüntüleme ile sırası ile 1.8x10⁻³ ve 4.2 x10⁻³ cm² olarak bulunmuş olup Şekil 3'te verilmektedir.

Bakır/Magnezyum Diborür tellerin SEM ve EDS'leri Şekil 3 ve 4'te gösterilmektedir. Magnezyum Diborür (Çekirdek) ve Bakır kaplama arasında fark edilir bir reaksiyon oluştuğu Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 4'te (13) ile işaretlenen yerde sadece Cu, (14,15 ve 16) ile işaretlenen yerler (Cu ve Mg) ve 17, 18, 19 ve 20 ile işaretlenen yerlerin ise magnezyum (Mg) olduğu görülmüştür. Bakır/Magnezyum Diborür tellerin mikro yapısal analizleri detaylı olarak farklı kaynaklarda bulunmaktadır [12].

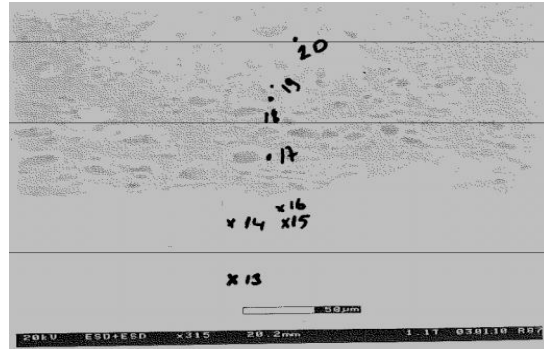
Farklı çaplardaki Bakır/Magnezyum Diborür tellerin ısı gerilme analizleri belli sıcaklık aralıklarında analitik olarak incelenmiştir. Bu konuda yapılan birçok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır [12]. Fakat YBCO kaplı iletken için çok katmanlı altlıklarda Ni altlık katmanının artık gerilme analizi ile ilgili quasi-statik

çözüm Arda ve arkadaşlarının önceki çalışmalarında bulunmaktadır [13].

Bu çalışmada aksel simetrik Bakır/Magnezyum Diborür telleri kullanılarak gerilme bileşenleri analitik olarak hesaplanmıştır. Çözümde kullanılan formül Lamé'ye ait olup bu problemde p_a her durumda sıfıra eşittir. p_b ise her durumda basınç durumları da dahil olmak üzere yaklaşık olarak aynı değerdedir.



Şekil 3. Bakır/Magnezyum Diborür telin en kesitinin tipik SEM fotoğrafları a) ve b) parlattılmış, c) ve d) sıvı Nitrojen içinde kırılmış.



Şekil 4. Bakır/Magnezyum Diborür telin en kesiti için SEM fotoğrafı ve EDS analizi.

Teğetsel gerilme bileşenleri her durumda basınç gerilmelerini ifade etmektedir. Maximum teğetsel gerilme bileşeni Şekil 2'de gösterildiği gibi bakır bölgesindeki B noktasında oluşmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada gerilme hesaplamaları %4 H₂-Ar gaz akışı 5.8 °C/dk sıcaklık artışları ile 700 °C'de 30 dk boyunca ısıtılma tabii tutulan farklı çaplardaki (0.8 ve 1.25 mm) Magnezyum Diborür teller için analitik olarak yapılmıştır. SEM mikrograf sonuçları Magnezyum Diborür kısmın süngerimsi yapıda olduğunu göstermektedir. Bakır/Magnezyum Diborür tellerin artık gerilme analizi farklı çaplar için farklı sıcaklıklarda aksel simetrik yapılarıdaki Lamé formülü kullanılarak yapılmıştır. Maximum teğetsel gerilme bileşeni olan -523 MP_a, bakır bölgesindeki B noktasında oluşmaktadır. Her durumda Bakır ve Magnezyum Diborür katmanları arasındaki teğetsel gerilme bileşenleri oranı,

$$\left| \frac{\sigma_{\theta}(Cu)}{\sigma_{\theta}(MgB_2)} \right|, \text{yaklaşık olarak } 2'ye \text{ eşittir.}$$

EDS ve SEM mikrograf sonuçları Magnezyum Diborür ile Bakır malzemeleri arasında fark edilir bir reaksiyon olduğunu göstermektedir. Buna karşılık gerilme analizi sonuçları, Bakır/Magnezyum Diborür tellerin süperiletken bobin uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar deneysel veriler için Dr. L. Arda'ya teşekkür etmektedirler.

KAYNAKLAR

- [1] Sumption, M.D., Bhatia, M., Buta, F., Bohnenstiehl, S., Tomsic, M., Rindfleisch, M., Yue, J., Phillips, J., Kawabata, S., Collings, E.W., "Solenoidal coils made from monofilamentary and multifilamentary MgB₂ strands," Supercond. Sci. Technol. c.18, s. 961–965, 2005.
- [2] Sumption, M. D., Bhatia, M., Buta, F., Bohnenstiehl, S., Tomsic, M., Rindfleisch, M., Yue, J., Phillips, J., Kawabata, S. ve Collings, E. W. (2007). Multifilamentary MgB₂-based solenoidal and racetrack coils, Physica C, c. 458, s.12-20.
- [3] Sumption, M.D., Bohnenstiehl, S., Buta, F., Majoros, M., Kawabata, S., Tomsic, M., Rindfleisch, M., Phillips, J., Yue, J., Collings, E.W., "Wind and React and React and Wind MgB₂ Solenoid, Racetrack and Pancake Coils," IEEE Trans. Appl. Super. c. 17, s. 2286–2290, 2007.

[4] Sumption, M.D., Bhatia, M., Rindfleisch, M., Phillips, J., Tomsic, M., Collings, E.W., "MgB₂/Cu racetrack coil winding, insulating, and testing," IEEE Trans. Appl. Superconduct. c. 15, s. 1457–1460, 2005.

[5] Arda, L., Sacli, O.A., Tomsic, M., Dur, O., Hascicek, Y.S., "Field dependence of the critical current density of MgB₂/Cu wire for coil development," Supercond. Sci. Technol. c.20, s. 1054–1058, 2007.

[6] Kawagoe, A., Matsushima, K., Yoshidome, Y., Kawabata, S., Sumiyoshi, F., Yanagi, N., Mito, T., Kuichi, M., Otabe, E. S., Matsushita, T., Tanaka, K., ve Wakuda, T. (2011). Development of an MgB₂ Coil Wound With a Parallel Conductor Composed of Two Tapes With Insulation. IEEE Trans. on Appl. Super., c. 21, s.1612-1615.

[7] Kitaguchi, H., Kumakura, H. ve Togano, K. (2011). Strain effect in MgB₂/stainless steel superconducting tape. Physica C, c. 363, s. 198-201.

[8] Arda, L., Ataoglu, S., Sezer, S. ve Abdulaliyev, Z. (2007). Residual stress analysis of multi-layered buffer layers on Ni substrate for YBCO coated conductor. Surf. Coat. Tech., c. 202, s. 439–446.

[9] Sumption, M. D., Bhatia, M., Dou, S. X., Rindfleisch, M., Tomsic, M., Arda, L., Ozdemir, M., Hascicek, Y. S. ve Collings, E. W. (2004). Irreversibility field and flux pinning in MgB₂ with and without SiC additions, Supercond. Sci. Technol, c.17, s. 1180-1184.

[10] Aslanoglu, Z., Arda, L., Akin, Y., Hascicek, Y. S., Sumption, M. D. ve Tomsic, M. (2004). Characterization of MgB₂ conductors for coil development. Advances in Cryogenic Engineering Materials, c. 50 B, s. 533-540.

[11] Timoshenko S. P., Goodier, J. N. (1970). Theory of elasticity, McGraw-Hill, New York.

[12] Yu, Y. H., Lai, M. O., Lu, L. ve Yang, P. (2008). Measurement of residual stress of PZT thin film on Si(1 0 0) by synchrotron X-ray rocking curve technique, J. Alloy. Compound, c. 449, s. 556-59.

[13] Arda, L., Ataoglu, S., Abdulaliyev, Z. ve Sacli, O. A. (2009). Stress analysis of ceramic insulation coating on Cu/MgB₂ wires for W&R MgB₂ coils. J.Alloy Compound, c. 470, s. 404-407.

Geliş Tarihi: 16.12.2013

Kabul Tarihi: 14.07.2014