

Toz Metal 316L Paslanmaz Çeliğe Hidroksiapatit ve Al₂O₃ İlavesinin Sertlik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi

Mehmet Akif Erden¹  Abkar Ahmed Ali DHAIBAIN², Ahmet Serdar GÜLDİBİ³ 

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Müh. ABD, Karabük/Türkiye

²Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Biyomedikal Müh. ABD, Karabük/Türkiye

³Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. ABD, Karabük/Türkiye

Başvuru: 21/06/2022 **Kabul:** 01/08/2022 **Çevrimiçi Basım:** 18/12/2022

Öz

Toz metalürjisi (TM) seri üretim ile ekonomik ve üretim sırasında kayıpsız veya maksimum yaklaşık %3 atık malzeme üretiminin yansira ikincil bir işlem gerektirmemesi gibi özelliklere sahip olan müstakil üretim yöntemidir. Bu üstün özellikler sayesinde gün geçtikçe tercih edilebilirliği artmakta ve diğer bilinen geleneksel yöntemlere de alternatif olmaktadır. TM yöntemi ile üretilen parçalar, diğer yöntemlere kıyasla son şekle yakın pürüzsüz, temiz bir yüzeye sahiptir ve çoğunlukla ikincil bir uygulamaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Paslanmaz çelikler ise oldukça iyi mekanik özellikleri, yüksek ve düşük sıcaklıklarda mekanik özelliklerini muhafaza edebilmesinin yansira aşınma ve korozyon direncinin oldukça iyi olması nedeniyle biyomedikal endüstrisi gibi birçok sektörde sıklıkla tercih edilen malzeme grubu olarak bilinmektedirler. Bu çalışmada toz metalürjisi teknolojisi aracılığıyla 316L paslanmaz çelik matrisi içerisine belirlenen miktarlarda (yüzde ağırlık olarak 0,5) Hidroksiapatit (HA) ve Al₂O₃ elementi tozları tekli veya ikili olarak ilave edilmiş ve istenilen bileşim toz karışım olarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan tozlar Ø32 mm çapında silindirik kalıpta 700 MPa sıkıştırma basıncı altında tek yönlü olarak soğuk preslenmiş ve blok haline getirilmiştir. Presleme işlemi sonrası ham mukavemete sahip numuneler atmosfer kontrollü tüp fırında argon atmosferi ortamında 1200°C de iki saat boyunca sinterlenmiştir. Ayrıca üretilen numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri optik mikroskop ve sertlik testleri ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, 316L paslanmaz çeliğe ağırlık olarak %0,5 Al₂O₃ ilave edilen kompozisyona sahip paslanmaz çelik numunelerin en yüksek sertliğe sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca 316L paslanmaz çeliğe % 0,5 Al₂O₃, % 0,5HA ve % 0,5 (Al₂O₃ +HA) ilavesiyle Al₂O₃ ve HA içermeyen 316L numuneye göre sertlik dayanımının daha üstün olmalarına rağmen % 0,5 (Al₂O₃ +HA) ilavesiyle sertlik dayanımlarında düşüş gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: “Toz metalürjisi, 316L alaşımı, Al₂O₃/HA, mikroyapı, sertlik”

*Sorumlu Yazar: Mehmet Akif ERDEN
makiferden@karabuk.edu.tr



Bu makaleden alıntı yapmak için: M. A. Erden ve ark., Toz Metal 316L Paslanmaz Çeliğe Hidroksiapatit ve Al₂O₃ İlavesinin Sertlik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi, Çelik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 3(2), 23-32.

The Effect of Additional Hydroxyapatite and Al₂O₃ on Hardness and Microstructural Properties of Powder Metal 316L Stainless Steel

Abstract

Powder Metallurgy is a novel production method suitable for mass production and has no or max. %3 waste during production as well as nor requiring secondary process. The parts produced by the TM method have a smooth, clean surface that is close to the final shape compared to other methods. Stainless steels are famous with their superior mechanical specifications as well as wear and corrosion resistance which make them preferable for most industries one of them are biomedical. In this study, HA and Al₂O₃ powders were added individually or in pairs in determined amounts (0.5 percent by weight) into the 316L stainless steel matrix, and the desired composition was produced by powder metallurgy method. The powders used in the study were cold pressed unidirectionally under 700 MPa compression pressure in a Ø32 mm diameter cylindrical mold and formed into blocks. After pressing, the samples were sintered in an atmosphere-controlled tube furnace at 1200°C for two hours in an argon atmosphere. In addition, the microstructure and mechanical properties of the produced samples were analyzed by optical microscope and hardness tests. The results showed that stainless steel samples with a composition of 0.5% by weight of Al₂O₃ added to 316L stainless steel had the highest hardness strength. In addition, although the hardness strength of 316L stainless steel with the addition of 0.5% Al₂O₃, 0.5%HA and 0.5% (Al₂O₃+HA) is superior to the 316L sample without Al₂O₃ and HA, the hardness strengths with the addition of 0.5% (Al₂O₃ +HDA) are higher. decrease was observed.

Key Words: Powder Metallurgy, 316L alloy, Al₂O₃, hydroxyapatite, microstructure, hardness”

1. Giriş

Toz metalürjisi (TM) seri üretim ile ekonomik ve üretim sırasında kayıpsız veya maksimum yaklaşık %3 atık malzeme üretiminin yansira ikincil bir işlem gerektirmemesi gibi özelliklere sahip olan müstakil üretim yöntemidir. Bu üstün özellikler sayesinde gün geçtikçe tercih edilebilirliği artmakta ve diğer bilinen geleneksel yöntemlere de alternatif olmaktadır. TM yöntemi ile üretilen parçalar, diğer yöntemlere kıyasla son şekle yakın pürüzsüz, temiz bir yüzeye sahiptir ve çoğunlukla ikincil bir uygulamaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Paslanmaz çelikler ise oldukça iyi mekanik özellikleri, yüksek ve düşük sıcaklıklarda mekanik özelliklerini muhafaza edebilmesinin yansira aşınma ve korozyon direncinin oldukça iyi olması nedeniyle biyomedikal endüstrisi gibi birçok sektörde sıklıkla tercih edilen malzeme grubu olarak bilinmektedirler [1-5].

Östenitik paslanmaz çelikler birçok endüstri uygulamasında tercih edilen malzemelerdir. Östenitik paslanmaz çelikleri endüstri için çekici kılan özellikleri, yüksek korozyon direnci, yüksek tokluk, iyi kaynak edilebilirlik özellikleri olarak sıralanabilir [6–8]. Bu özellikleri nedeniyle östenitik paslanmaz çelikler petrokimya, implantlar, mutfak ekipmanları ve otomotiv gibi alanlarda tercih edilmektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerin mukavemetini, sertliğini ve tokluğunu arttırmak için yapılan birçok çalışma mevcuttur. Özellikle araştırmacılar bu malzemenin tokluğundan ödün vermeden mekanik özelliklerinde iyileştirme yapma gayreti içindedirler. Bu nedenle, sıralı/katmanlı plastik deformasyon (SPD) tekniklerinden eşit kanallı açılı presleme (ECAP), yüksek basınçlı burulma HPT ve mekanik öğütme (MM) gibi yöntemler kullanılmaktadır [4].

İmplantlar insanlık tarihinde uzun süredir kullanılan ve vücutta zarar görmüş herhangi bir kemik parçasına ikame malzeme olarak geliştirilmiş ürünlerdir. İmplantların vücutla tam uyum içerisinde olabilmesi için, implant malzemesi olarak kullanılan materyalin vücut kimyasına zarar vermeyecek alaşım elementlerinden

geliştirilmiş olması, ikame kemik yerine kullanılacağı durumlarda, Young modülünün kemiğe yakın olması, vücut ile kısa sürede imtizaç edebilmesi ve enfeksiyon oluşturmayacak özelliklerde olması gerekmektedir ki bu tarz malzemeler biyomalzeme olarak bilinmektedir. AISI 316 malzemesi de yüksek korozyon direnci, non-toksik özelliği, işlenebilirlik özellikleri gibi nedenlerle implant malzemesi olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar Young modülü kemiğe yakın olmasa da (~10-30 GPa), kemik implantı olarak birçok bölgede kullanılmaktadır [10-11].

Alümina olarak da isimlendirilen alüminyum oksit (Al_2O_3), teknik seramik olarak da bilinmektedir ve ileri düzey seramiklerin imalatında kullanılmaktadır. Alümina kullanım alanı olarak inşaat, yakıt pilleri, aşındırıcı veya kimyasal atıkları temizleyici, mikro elektronik vs. gibi alanlarda kullanılmaktadır. Alümina yüksek sertlik, elektrik direnci, korozyon direnci, yüksek refrakterlik gibi özelliklerinin yanı sıra günümüzde klinik alanda kullanılan en yüksek biyo uyuma sahip inert bir malzemedir [12,13]. Biyomalzeme olarak ise, ventilasyon tüpleri, sterilizasyon cihazları ve ilaç sevk sistemleri gibi yerlerde kullanılmaktadır. Tek kristalli alümina dental implant olarak kullanılmaktadır. Alüminanın 4 µm den daha küçük taneciklerden üretilmesi durumunda elastikiyet modülü 30 GPa değerlerine çıkmaktadır. Bu nedenle biyo malzeme olarak kullanımında başka rahatsızlıklara yol açmaktadır. Tanecik boyutunu büyütme suretiyle mekanik özelliklerinin düşürülmesi, protez olarak kullanımında önemli rol oynamaktadır [14].

Biyoseramik malzemelerden olan kalsiyum fosfatlar da yüksek biyo uyumluluğa sahiptir ve bu malzemelerin yapısı kemik ve diş yapısına büyük benzerlik göstermektedir. Kalsiyum fosfatlardan hidroksiapatit kemik yapısına oldukça benzerdir bu nedenle kemik ile uyumu çok yüksektir [8]. HA'nın doku yenilenmesini destekleyici özelliği vardır. Bu nedenle nano boyutlarda formülize edilmiş HA ortopedik ve dental uygulamalarda araştırma konusu olmaktadır [16]. HA'nın tek başına kullanımı ise, düşük mekanik özellikleri nedeniyle pek mümkün değildir. Bu nedenle HA daha çok yüzey kaplama malzemesi [17] veya alaşım malzemesi olarak kullanılmaktadır [18]. Albayrak ve ekibi, HA'nın düşük mekanik özelliklerini iyileştirmek ve kemik iyileşmesini hızlandırıcı etkisi düşünülerek bor ilavesi yapılmıştır. Üretilen HA'larda bor ilavesinin mikro sertlik ve basma dayanımlarını artırdığı tespit edilmiştir [19]. AISI316L paslanmaz çeliği, biyomalzeme özellikli olması nedeniyle vücutta protez ve implant olarak kullanılmaktadır. 316L paslanmaz çeliğinin implant ve protez olarak tercih edilmesinin nedeni sahip olduğu korozyon direnci, anti bakteriyel aktivitesi ve biyouyumluluğudur [10]. Ancak 316L'nin içeriğinde bulunan nikel ve demir elementlerinin serbest kalması enfeksiyona ve implant yapılan bölgede ağrıya neden olabilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar 316L üzerine HA kaplaması yapmaktadır [11]. Kaplamasız şekilde kullanılan 316L malzemelerin nikel yayması nedeniyle vücutta alerjik reaksiyonlara neden olduğu da literatürde bildirilmiştir [12]. 316L malzemesinde görülen bu tarz negatif etkenlere rağmen en sık kullanılan implant malzemesidir. Bunun nedeni maliyet olarak en uygun malzemelerden olmasından kaynaklanmaktadır [19].

HA üzerine yapılan bir başka çalışmada ise, 316L paslanmaz çeliği HA-Mg ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi öncelikle yoğun bir HA kaplaması ardından en üst tabakada HA-Mg kaplaması şeklinde uygulanmıştır. Çift kaplamalı uygulanan bu yöntem ile toksik elementlerin yayılması önlenmiş ve ayrıca simüle edilmiş vücut sıvısı içerisinde yapılan korozyon testlerinde en üst tabakada HA-Mg olması sayesinde kemik dokusunun gelişimine katkı sağlayacak potansiyel gözenekler elde edilmiştir [20]. Genel olarak son çalışmalarda, HA'nın metal seramiklerle kompozit oluşturması üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. HA kemik ile uyumlu ve doku tamirinde kullanılan bir malzemedir. Ayrıca AL_2O_3 malzemesi ise vücut ile uyumlu bir seramiktir ve protez olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada biyomalzeme olarak kullanılan 316 L paslanmaz çeliğe HA ve AL_2O_3 ilavesi ile biyouyumluluğa katkısı olan takviye elementler kullanılarak mekanik özellikleri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AISI316L malzemeye % ağırlık olarak % 0,5 oranında Hidroksiapatit ve Alümina tekli ve ikili ilavesi yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir.

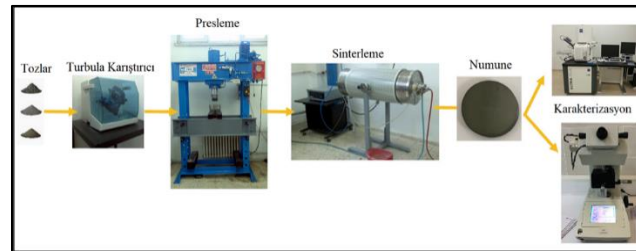
2. Deneysel Metot

Bu çalışmada toz metalürjisi tekniği kullanılarak Çizelge 1’de verilen kimyasal bileşimlerde çelik numune üretimi gerçekleştirilmiş ve Hidroksiapatit ve Alümina tekli ve ikili ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Numunelerin üretiminde kullanılan aşamalar Şekil 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Üretilen numunelerin kimyasal bileşimi

Numune	Bileşim	Al ₂ O ₃ (%ağırlık)	HDA (%ağırlık)	316L (%ağırlık)
A	316L	-	-	Geri kalan
B	316L +0.5HDA	-	0.5	Geri kalan
C	316L + 0.5 Al ₂ O ₃	0.5	-	Geri kalan
D	316L+ 0.5Al ₂ O ₃ + 0.5HDA	0.5	0.5	Geri kalan

Tozların tartımı Çizelge 1’de verilen miktar doğrultusunda 0,0001 hassasiyete sahip dijital hassas terzi kullanılarak yapılmıştır. Tartımı gerçekleştirilen toz karışımlar Turbula marka üç eksenli karıştırıcı aracılığıyla iki saat bilyeli olarak harmanlanmıştır. Karıştırılan tozlar, Ø32 mm çapına sahip silindir kalıpta 700 MPa presleme basıncında tek yönlü olarak preslenerek blok haline getirilmiştir.

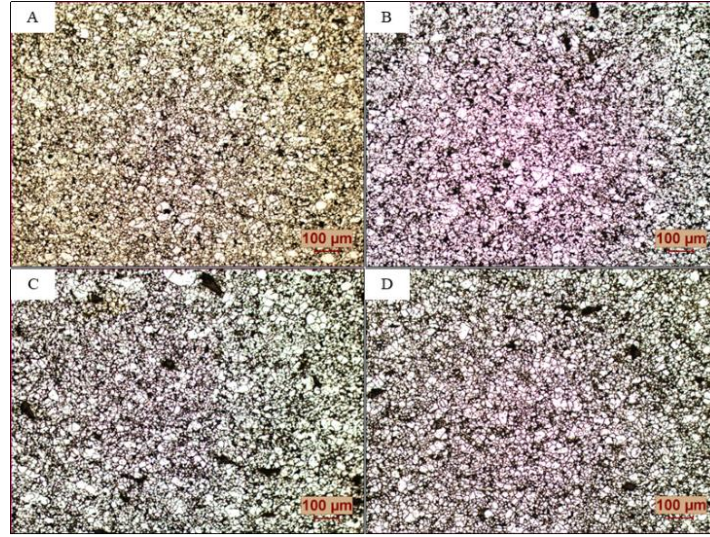


Şekil 1. Üretim aşamasının şematik tasviri

Sinterleme işlemi 1250 °C’de 2 saat argon atmosferinde uygulanmıştır. Sinterlenen numunelerin sertliklerini belirlemek amacıyla vickers mikrosertlik testi 0,5 kg yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ortalama tane boyutu doğrusal kesme yöntemi uygulanarak hesaplanmıştır. Mikroyapı incelemeleri X50-X1000 büyütme kapasiteli Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskop ve CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM marka SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bakalite alınan numuneler zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler, 10gr. Oksalik asit 90ml. Saf su çözeltisinde 2 amper akım şiddetinde 12 volt gerilim altında elektrolitik dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Metalografik numune hazırlama işlemi sonrası numunelerin farklı bölgelerinde görüntüler alınarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

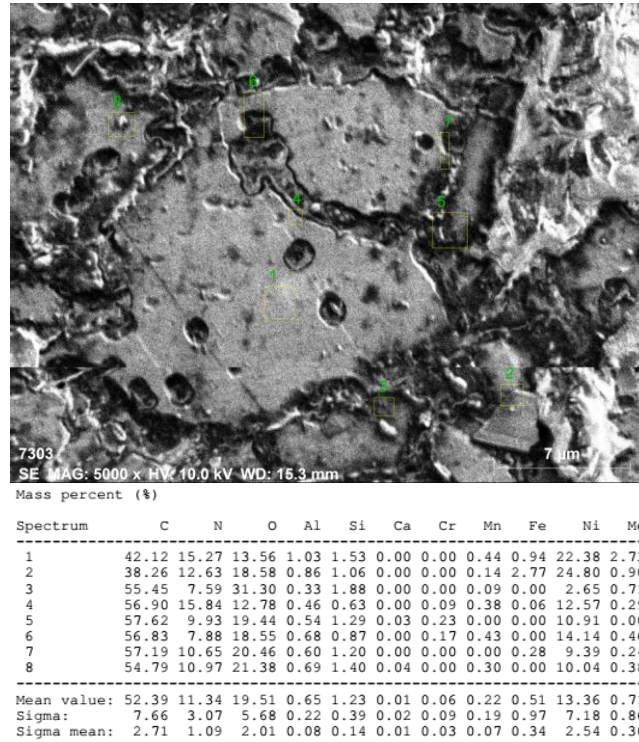
3. Sonuçlar ve Tartışma

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çelik malzemeler mikroyapı, sertlik testlerine tabi tutulmuştur. Şekil 2’deki mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, farklı alümina ve HA ilave edilen 316L malzemelerin tek yönlü soğuk presleme yapılarak toz metalürjisi ile üretilmiş olması nedeniyle boşluklar görülebilmektedir. Bunun nedeni toz metalürjisi ile yapılan üretimde meydana gelen ufak boşluklardan kaynaklanmaktadır [21]. Nitekim bu boşluklar şekil 2’de verilen mikroyapı görüntülerinden de anlaşılmaktadır. Dispersiyon ve çökelti sertleşmesi birbirine benzer proseslerdir. Her ikisinde de amaç dislokasyonların hareketini engellemek suretiyle dayanım artışı sağlamaktır [22].



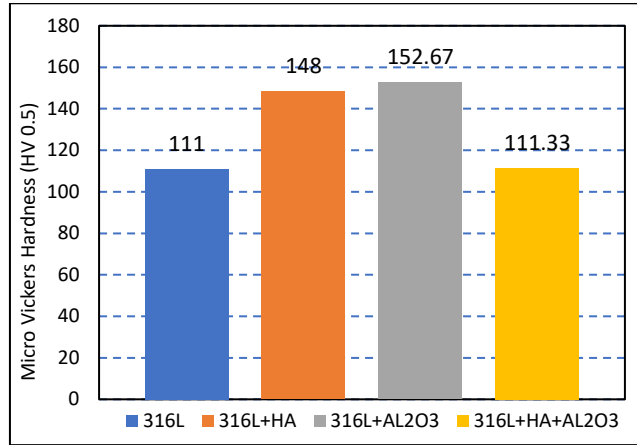
Şekil 1. Numunelerin optik mikroskop görüntüleri

Ayrıca mikroyapı resimlerine bakıldığında Al_2O_3 ve HA ilavesi ile tane boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, malzeme içerisinde oluşan Al_2O_3 , MoC(N), CrC(N), MoCrC(N), CrMnMoC(N) ve CaO gibi tekli, iki ve çoklu partiküllerin matris içerisinde bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde SEM, XRD ve TEM gibi analizleri ile tekli, ikili ve çoklu çökeltilerin oluştuğunu ifade eden çalışmalar mevcuttur (Şekil 3) [22-54].



Şekil 3. SEM ve EDS analiz sonuçları.

Oluşan bu partiküller, tane boyutu küçültme, çökelti sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve kümeleşme sertleşmesi gibi dayanım artırıcı mekanizmalarla malzemenin dayanımını arttırmaktadır. Nitekim şekil 3'te bu durum açıkça görülmektedir. Sertlik artışı oluşan bu partiküller sonucu gerçekleştiği literatürde de belirtilmiştir [21–25]. Sertlik değerleri incelendiğinde, AISI 316L malzemesine HA veya Al_2O_3 ilavesi ile sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. En yüksek sertlik değeri Al_2O_3 ilavesinde elde edilmiştir. HA ve Al_2O_3 katkılarının beraber ilave edilmesi yaklaşık olarak sertlik değerini eski seviyesine düşürmüştür. 316L malzemesinde görülen bu artış tane boyutu küçültme, çökelti sertleşmesi ve dispersiyon sertleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde Özdemirler vd. ağırlık olarak %55 grafik içeren demir matrisli kompozitlere farklı oranlarda Nb ilavesi sonrası çekme ve sertlik değerlerinde artış sağlamışlardır [26]. Nb ilavesi ile sağlanan bu dayanım artışı, matris ve tane sınırlarında NbC, NbN ve NbCN gibi çökeltilerin oluşması ve bu çökeltilerin çökelti sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve tane boyutu küçültme gibi mukavemet artırıcı mekanizmaları ile sağlandığı belirtilmiştir [27]. Yapılan başka bir çalışma da Gündüz vd. toz metalürjisi ile üretilen mikro alaşım çeliklerine Nb ve Al ilavesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmış, Nb ve Al ilavesi ile mekanik özelliklerinin arttığını gözlemiştir. SEM, EDS ve XRD analizlerinin uygulandığı çalışmada NbC, AlN çökeltileri görülmüş ve mekanik özelliklerde sağlanan iyileşmenin oluşan bu çökeltiler ile sağlanan çökelti sertleşmesine ve tane boyutu küçülmesi ile sağlanan mukavemet artışıyla ilişkilendirmişlerdir [28].



Şekil 3. Mikro sertlik değerleri.

Sonuç olarak, Al_2O_3 ve HA ilavesi ile ortalama tane boyutunun daha da küçüldüğü görülmüştür ve HA ilavesi ile malzeme sertlik ve dayanım değerlerinde ciddi artışlar görülmüştür. Ayrıca özellikle HA ilavesi ile 316L malzemeden üretilen protez ve implantın vücuda daha hızlı uyum sağlayacağı düşünülmektedir [18,29–41].

4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, TM yöntemi ile 316L paslanmaz çeliğine Al_2O_3 ve Hidroksiapatit elementlerinin tekli ve çoklu ilavesinin mikroyapı ve sertlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 316L ve üç farklı Al_2O_3 ve HA hacim oranına sahip (%0,5 Al_2O_3 - %0,5HA - %0,5 HA+%0,5 Al_2O_3), olan 316L TM çelikleri soğuk presleme ve ardından 1250°C'de argon atmosferinde sinterleme işlemi uygulanarak üretilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Al_2O_3 ve HA ilave edilen 316L çelikleri toz metalürjisi yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Al_2O_3 ve HA elementinin ikili ilavesi ile ortalama tane boyutunun daha da küçüldüğü görülmüştür.

Bu durum sinterleme esnasında ve sonrasında tane sınırlarında ve tane içinde oluşan Al_2O_3 , CaO , $MnCN$, CrC , CrN , $CrCN$ ve $CrMoC$, $CrMoCN$ ve $CrMoMnCN(N)$ gibi tekli, ikili ve üçlü çökeltilerin tane büyümesini engellemesi sonucunda olduğu düşünülmektedir. Ayrıca oluşan bu partiküllerin çökelti sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve tane boyutu küçültme gibi mukavemet artırıcı mekanizmalar ile Al_2O_3 ve HA ilave edilmiş 316L numunelerin Al_2O_3 ve HA içermeyen 316L numuneye göre sertlik dayanımının daha üstün olduğu gözlemlenmiştir.

- En yüksek sertlik değeri %0,5 Al_2O_3 ilaveli numunede 152,67 HV ölçülmüştür. Al_2O_3 içermeyen 316L numuneye göre sertlik dayanımında yaklaşık %37 artış belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri KBÜBAP-22-DS-061, KBÜBAP-22-DS-062, KBÜBAP-22-YL-074, KBÜBAP-21-YL-118, KBÜBAP-21-YL-085 ve FYL-2020-2397 numaraları altında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu çalışmayı destekleyen Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Koordinatörlüğü teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

1. Türkmen M., Erden M. A., Karabulut H., Gündüz S. (2019). The Effects of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Nb V Microalloyed Powder Metallurgy Steels”, *Acta Physica Polonica A*, 135(4), 834–36.
2. Erden MA, & Ayvaci B (2019) The effect on mechanical properties of pressing technique in PM steels. *Acta Phys Pol A* 135:1078–1080. doi.org/10.12693/APhysPolA.135.1078
3. Simsir H., Akgul Y., & Erden M.A. (2020). Hydrothermal carbon effect on iron matrix composites produced by powder metallurgy. *Mater Chem Phys* 242:122557. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122557>
4. Erden M. A., Gündüz S., Karabulut H., & Türkmen, M. (2017). Wear behaviour of sintered steels obtained using powder metallurgy method. *Mechanics*, vol. 23(4), 574-580.
5. Erden M. A., Erer A. M., Odabaşı Ç., & Gündüz S. (2022). The Investigation Of The Effect Of Cu Addition On The Nb-V Microalloyed Steel Produced By Powder Metallurgy. *Science of Sintering*, 54(2), 153-167.
6. Lo K. H., Shek C. H. & Lai J. K. L. (2009) Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 65(4-6), 39–104.
7. Podder A. Saha & Bhanja A. (2013). Applications of Stainless Steel in Automobile Industry. *Advanced Materials Research*, 794,731–740.
8. Kurgan N., Sun Y., Cicek B., & Ahlatci H. (2012). Production of 316L stainless steel implant materials by powder metallurgy and investigation of their wear properties. *Chinese Science Bulletin*, 57(15),1873–1878.
9. Esmaeilzadeh R., Salimi M., Zamani C., Hadian A. M., & Hadian A. (2018). Effects of milling time and temperature on phase evolution of AISI 316 stainless steel powder and subsequent sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 766, 341–348.
10. Zhou J., Sun Y., Huang S., Sheng J., Li J. & Agyenim-Boateng E. (2019). Effect of laser peening on friction and wear behavior of medical Ti6Al4V alloy. *Optics & Laser Technology*, 109, 263–269.
11. Ahmadi R. & Izanloo S. (2022). Development of HAp/GO/Ag coating on 316 LVM implant for medical applications,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 126, 105075.

12. Al-Moameri H. H., Nahi Z. M., Rzajj D. R., & Sharify N. T. (2020). View Of A Review On The Biomedical Applications Of Alumina.” *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 24(05), 28-36.
13. Ruys A. J. (2021). Introduction to metal-reinforced ceramics. *Metal-Reinforced Ceramics*, 1–20. doi: 10.1016/B978-0-08-102869-8.00001-X.
14. Shanmugam K. & Sahadevan R. (2018). Bioceramics—An introductory overview. *Fundamental Biomaterials: Ceramics*, 1–46.
15. Evis Z. (2011). Çeşitli İyonlar Eklenmiş Nano- Mekanik ve Biyoyumluluk Özellikleri. *International Journal of Research and Development*, 3(1), 55-61.
16. James E. N., Hanna C., & Nair L. S. (2015). Nanobiomaterials for Tissue Engineering Applications,” *Stem Cell Biology and Tissue Engineering in Dental Sciences*, 221–234.
17. Çiftçi N. (2022). Sol-jel yöntemi ile 316 LSS ve Ti implant malzemelerin üzerine hidroxyapatite (HAP) kaplamaların üretilmesi ve korozyon davranışlarının elektrokimyasal yöntemle incelenmesi. Y.lisans tezi.
18. Kowalski K., Nowak M., Jakubowicz J., & Jurczyk M. (2016). The Effects of Hydroxyapatite Addition on the Properties of the Mechanically Alloyed and Sintered Mg-RE-Zr Alloy,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(10), 4469–4477.
19. Albayrak Ö., Uğurlu M., & Mersin T. (2016). Bor katkılı hidroksiapatit üretimi ve karakterizasyonu: Bor oranı ve sinterleme sıcaklığının yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 749-761.
20. Rezaei A., Golenji R. B., Alipour F., Hadavi M. M., & Mobasherpour I. (2020). Hydroxyapatite/hydroxyapatite-magnesium double-layer coatings as potential candidates for surface modification of 316 LVM stainless steel implants. *Ceramics International*, 46(16), 25374–25381.
21. Clyne T. W. (1996). *Metallic Composite Materials, Physical Metallurgy*, 2567–2625.
22. Erden M. A. (2017). The Effect of the Sintering Temperature and Addition of Niobium and Vanadium on the Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed PM Steels, *Metals*, 7(9), 329.
23. Elitaş M. (2021). Effects of welding parameters on tensile properties and fracture modes of resistance spot welded DP1200 steel. *Mater Test.*, 63, 124–130.
24. Erden M. A. & Akgün M. (2021). Effect of Mo addition on microstructure, mechanical and machinability properties of Cr-PM steels. *Metals*, 11(10), 5455-5467.
25. Guldibi A. S. & Demir H. (2020). Aging Effect on Microstructure and Machinability of Corrax Steel. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(1), 5168–5174.
26. Özdemirler D., Gündüz S., & Erden M. A. (2017). Influence of nbc addition on the sintering behaviour of medium carbon PM steels. *Metals (Basel)* 7:121. <https://doi.org/10.3390/met7040121>
27. Özdemirler D., Gündüz S., Erden M. A., Karabulut H. & Türkmen M. (2016). Microstructure and mechanical properties of Nb added PM steels sintered at defferent temperatures, AKU,” *J. Sci. Eng.*, 16 (1), 87-91.
28. Erden M. A., Gündüz S., Karabulut H. & Türkmen, M. (2017). Wear behaviour of sintered steels obtained using powder metallurgy method”. *Mechanics*, vol. 23(4), 574-580.
29. Guma A. M., Gündüz S., Erden M. A. & Taştumur D. (2017). Dynamic Strain Aging Behaviour in AISI 316L Austenitic Stainless Steel under As-Received and As-Welded Conditions. *Metals*, 7(9), 362.
30. Tanrıverdi A. N., Akgül Y. & Erden M. A. (2022). A novel approach on production of carbon steels using graphene via powder metallurgy. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 61(1), 85-93.
31. Erden M. A., Korkmaz M. E., Yaşar N., Ayvacı B., Sworna R. K. N. & Mia M. (2021). Investigation of Microstructure, Mechanical and Machinability Properties of Mo Added Steel Produced by Powder Metallurgy Method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 2811–2827.

32. Karabulut H., Erden M.A. , Karacif K., & Gündüz S. (2022). Investigation of the effects of SiC reinforcement ratio in iron-based composite materials on corrosion properties. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 122(6), 317-322.
33. Erden M.A., & Aydın F. (2021). Wear and mechanical properties of carburized AISI 8620 steel produced by powder metallurgy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28 (3), 430-439.
34. Ahssi M.A.M., Erden M.A., Acarer M., & Çuğ H. (2020). The Effect of Nickel on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Properties of Niobium–Vanadium Microalloyed Powder Metallurgy Steels. *Materials*, 13, 4021. doi.org/10.3390/ma13184021
35. Erden MA (2017). Effect of pressing pressure on microstructure and mechanical properties of non-alloyed steels produced by powder metallurgy method. *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 6(1), 257-264.
36. Türkmen M., Karabulut H., Erden M.A., & Gündüz S. (2017). Effect of tin addition on the microstructure and mechanical properties of Pm steels. *e-Jour New World Sci Acad.*, 12, 178–184. doi.org/10.12739/nwsa.2017.12.4.2a0125
37. Gündüz S, Karabulut H, Erden MA, & Türkmen M (2013). Microstructural effects on fatigue behaviour of a forged medium carbon microalloyed steel. *Mater Test* 55:865–870.
38. Güney, B. (2021). Microstructure analysis of welding fume of low and medium carbon steels. *Rev. Metal.* 57(1), e187. doi.org/10.3989/revmetalm.187
39. Güney B., & Dilay Y. (2022). Determination of abrasion resistance of Fe28Cr5C1Mn coating applied to 30MnB5 boron alloy cultivator blades via electric arc spray. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(17), 9687-9699.
40. Kurt B., Özdoğan L., Güney B., Bölükbaşı Ö. S., & Günen A., (2020). Characterization and wear behavior of TiBC coatings formed by thermo-reactive diffusion technique on AISI D6 steel. *Surface and Coatings Technology*, 385:125332
41. Erden M. A., Taslıyan M.F., Akgul Y. (2021). Effect of TiC, TiN, and TiCN on Microstructural, Mechanical and Tribological Properties of PM Steels, *Science of Sintering*, 53(4), 497-508.
42. Erden MA, & Ayvaci B (2020) The effect on mechanical properties of pressing technique in PM steels. *Acta Phys Pol A* 135:1078–1080. doi.org/10.12693/APhysPolA.135.1078
43. Demir H, Gündüz S., & Erden MA (2018). Influence of the heat treatment on the microstructure and machinability of AISI H13 hot work tool steel. *Int J Adv Manuf Technol* ., 95, 2951–2958. doi.org/10.1007/s00170-017-1426-3
44. Demirtaş H., & Erden M.A. (2019). Cr ve Ni İlavesinin Sade Karbonlu Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1217-1223.
45. Erden M. A., Gündüz S., Türkmen M., & Karabulut H. (2014). Microstructural characterization and mechanical properties of microalloyed powder metallurgy steels. *Materials Science and Engineering A*, 616: 201-206.
46. Erden MA (2016). Investigation of the effect of nickel content on microstructure and mechanical properties of non alloyed steels produced by powder metallurgy. *GU J Sci PartC*, 4, 241–245.
47. Simsir H., Akgul Y., & Erden M.A. (2020). Hydrothermal carbon effect on iron matrix composites produced by powder metallurgy. *Mater Chem Phys* 242:122557. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122557
48. Erden M. A., Gündüz S., Türkmen M., & Karabulut H., (2016). The Effect of V Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Microalloyed Powder Metallurgy Steels. *Materials Testing*, 58(5), 433-437.
49. Erden MA (2017). The effect of the sintering temperature and addition of niobium and vanadium on the microstructure and mechanical properties of microalloyed PM steels. *Metals (Basel)*:7. doi.org/10.3390/met7090329
50. Erden MA, Gündüz S, Çalığılı U, & Boz M. (2018). Investigation of hardness and microstructure properties of non alloyed and hardox steel combined with submerged arc welding method. *J Fac Eng Archit Gazi Univ* 33:221–226. doi.org/10.17341/ gazimmfd.406794

51. Erden M. A., Barlak S., Adalı B., & Çelikkıran Ö. (2018). Toz Metalurjisi ile Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Vanadyum İlavesinin Mikroyapı Mekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(3),629-636.
52. Erden M. A., Erer A. M., Odabaşı Ç., & Gündüz S. (2022). The Investigation Of The Effect Of Cu Addition On The Nb-V Microalloyed Steel Produced By Powder Metallurgy. *Science of Sintering*, 54(2), 153-167.
53. Erden MA, & Taşçı MT (2016). The effect of Ni on the microstructure and mechanical properties of Nb-V microalloyed steels produced by powder metallurgy. *J Polytech*, 19, 611–616.
54. Gething, B. A., Heaney, D. F., Koss, D. A., & Mueller T. J., (2005). The Effect of Nickel on the Mechanical Behavior of Molybdenum P/M Steels. *Materials Science and Engineering A*, 390,19–26.