



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelerde vakum sementasyon işleminin sinterlenebilirlik ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of vacuum cementation on sinterability and mechanical properties of Fe-based composite materials produced by powder metallurgy method

Yazar(lar) (Author(s)): Özer PAMUK¹, Ümit DEMİR², Sinan AKSÖZ³

ORCID ID¹: 0000-0001-6810-8526

ORCID ID²: 0000-0002-1385-9768

ORCID ID³: 0000-0003-4324-5043

To cite to this article: Pamuk Ö., Demir Ü. ve Aksöz S., “Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelerde vakum sementasyon işleminin sinterlenebilirlik ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 26(2): 641-651, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Pamuk Ö., Demir Ü. ve Aksöz S., “Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelerde vakum sementasyon işleminin sinterlenebilirlik ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 641-651, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.836940

Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Fe Esaslı Kompozit Malzemelerde Vakum Sementasyon İşleminin Sinterlenebilirlik ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

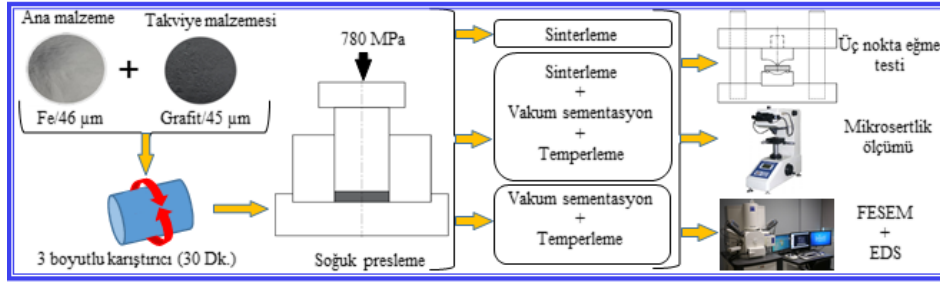
Investigation of the Effect of Vacuum Cementation on Sinterability and Mechanical Properties of Fe-Based Composite Materials Produced by Powder Metallurgy Method

Önemli notlar (Highlights)

- ❖ Vakum sementasyon ile sinterlenen parçaların mekanik özellikleri./ Mechanical properties of samples sintered by vacuum cementation.
- ❖ Geleneksel sinterleme ile vakum sementasyon sinterlemenin karşılaştırılması./ Comparison of conventional sintering and vacuum cementation sintering.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Fe esaslı kompozit malzemelerde vakum sementasyon işleminin sinterlenebilirlik ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. / The effect of vacuum cementation on sinterability and mechanical properties of Fe-based composite materials produced by powder metallurgy method was investigated.



Şekil. Deneysel çalışmaların şematik gösterimi / Figure. Schematic representation of experimental studies

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı, vakum sementasyon işlemi ile Fe esaslı kompozit malzemelerin yüzey sertleştirme ve sinterleme işlemlerinin gerçekleştirilmesidir./ The aim of this study is to perform surface hardening and sintering processes of Fe-based composite materials by vacuum cementation process.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Fe esaslı kompozit malzemeler soğuk presleme yöntemiyle üretilmiş ardından sadece sinterleme, sinterleme+vakum sementasyon+temperleme ve sadece vakum sementasyon+temperleme işlemlerine tabi tutulmuştur./ Fe-based composite materials were produced by cold pressing method and then subjected to only sintering, sintering+vacuum cementation+tempering and only vacuum cementation+tempering processes.

Özgünlük (Originality)

Yüzey sertleştirme işlemi uygulanacak Fe esaslı kompozit malzemelerin vakum sementasyon işlemi ile beraber sinterlenebilirliğidir./ Fe-based composite materials to be applied surface hardening can be sintered with vacuum cementation process.

Bulgular (Findings)

Vakum sementasyon işlemi ile toz taneleri arasında boyun oluşumunun meydana geldiği ve sinterleme işleminin gerçekleştiği görülmüştür./ It was observed that the sintering process took place by forming a neck between the powder grains with the vacuum cementation process.

Sonuç (Conclusion)

Vakum sementasyon işlemi uygulanan numuneler yüksek karbon difüzyon bölgesine ve yüksek yüzey sertlik değerlerine sahiptir./ Samples with vacuum cementation process have high carbon diffusion zone and high surface hardness values.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Fe Esaslı Kompozit Malzemelerde Vakum Sementasyon İşleminin Sinterlenebilirlik ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi /Research Article

Özer PAMUK^{1*}, Ümit DEMİR², Sinan AKSÖZ³

¹Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği, 64000, Uşak, Türkiye

²MEB, İncirli Şehit Hüdaî Arslan Meslek ve Teknik Anadolu Lisesi, Metal Teknolojileri Alanı, 06010, Ankara, Türkiye

³Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 20160, Denizli, Türkiye

(Geliş/Received : 07.12.2020 ; Kabul/Accepted : 07.12.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 31.12.2021)

ÖZ

Bu çalışmada; %100 Fe ve %0.2-0.4 grafit içeriğine sahip Fe esaslı kompozit malzemeler toz metalurjisi (T/M) yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen numuneler sadece sinterleme, sinterleme + vakum sementasyon + temperleme ve sadece vakum sementasyon + temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için üç nokta eğme testi ve mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapı ve üç nokta eğme testi kırık yüzey incelemeleri için Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ve Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (EDS) ile görüntü analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, sadece vakum sementasyon işlemi uygulanan numunelerde toz taneleri arasında boyun oluşumunun meydana geldiği ve sinterleme işleminin gerçekleştiği görülmüştür. Bu şekilde Fe esaslı kompozit malzemelerin vakum sementasyon yöntemi ile sertleştirilmesi ve sinterleme işlemleri bir arada yapılabilmektedir. Böylelikle T/M yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin kullanım alanlarının artırılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi, doğal kaynakların tüketiminin azaltılması ve ekosistemin korunmasına katkı sağlanabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Fe Esaslı kompozit malzeme, toz metalurjisi, vakum sementasyon, sinterlenebilirlik, mekanik özellikler.

Investigation of the Effect of Vacuum Cementation on Sinterability and Mechanical Properties of Fe-Based Composite Materials Produced by Powder Metallurgy Method

ABSTRACT

In this study; Fe-based composite materials with 100% Fe and 0.2-0.4% graphite content were produced by powder metallurgy (P/M) method. The samples produced were subjected to only sintering, sintering + vacuum cementation + tempering and only vacuum cementation + tempering processes. Three point bending test and microhardness measurements were performed to determine the mechanical properties of the samples. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) were used to examine the microstructure and three-point bending fracture surfaces of the samples. As a result of the examinations, it was observed that the neck formation between the powder grains and the sintering process occurred in the samples that were only subjected to vacuum cementation. In this way, the hardening and sintering processes of Fe-based composite materials by vacuum cementation method can be done together. Thus, it will be possible to increase the usage areas of composite materials produced by the P/M method, to reduce production costs, to reduce the consumption of natural resources and to protect the ecosystem.

Keywords: Fe Based composite material, powder metallurgy, vacuum cementation, sinterability, mechanical properties

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzeme, bir malzemedeki tek başına elde edilemeyen özelliklerin aynı ya da farklı gruptaki iki ya da daha fazla sayıda malzemenin makro seviyede bir

araya getirilerek tek bir malzemede toplanmasıyla elde edilmesine denir. Toz metalurjisi (T/M) ise kompozit malzeme üretim yöntemlerinden biridir. T/M işlemi ile parça üretimi genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar; metal tozlarının üretimi, tozların karıştırılması, kalıp içerisinde preslenmesi ve sinterleme işlemleridir [1]. Toz parçacıklarının arasındasıkı bağ

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : ozer.pamuk@usak.edu.tr

oluşturulması, preslenen toz metal ham parçaların ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılmasıyla yani sinterlenmesiyle sağlanmaktadır. Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayını ve küçük parçaların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Geleneksel sinterleme yöntemi ile fırınlarda gerçekleştirilen parçacıklar arası bağ oluşturmaya mukavemet kazandıran ısı işlemidir. Sinterlenmiş malzemeler tipik olarak sinterleme sonrasında yapıda kalan ve bu malzemelerin mekanik özelliklerini oldukça etkileyen gözeneklilik ile karakterize edilir. Gözenek miktarı ve malzeme yoğunluğu, sinterleme sıcaklığı ve süresi, alaşım ilaveleri ve başlangıçtaki tozların parçacık boyutu gibi çeşitli işlem değişkenleri tarafından kontrol edilir [2]. T/M farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarının önce preslenmesi ve daha sonra taneciklerin sinterleme yoluyla birleştirilerek sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülmesidir [3].

Toz metalurjisi (T/M), küçük ve karmaşık şekilli parçaların seri üretimine imkân tanınması, yüksek ölçü toleransları, düzgün yüzeylerin elde edilmesi, plastik deformasyon, talaşlı imalat ve döküm yöntemleri ile üretimi zor veya imkânsız olan parçaların üretimlerine olanak tanınması, üretimlerindeki düşük malzeme kayıpları, enerji giderleri ve üretim maliyetleri nedeniyle giderek daha çok tercih edilen bir yöntem haline gelmektedir. T/M yöntemi ile parça üretimi %60'lık bir oranla en çok otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [4]. Otomotiv sektöründe yüksek performans gerektiren dişliler, piston kolları, yataklar, supap yuvaları, emisyon algılayıcıları, katalitik konvertörler, darbe emicileri, bujiler, metal filtreler ile pek çok motor zamanlama parçaları bu yöntemle üretilmektedir [3,5-6]. Ayrıca T/M yöntemi ile parça üretimi havacılık başta olmak üzere inşaat, denizcilik, enerji sektörleri, spor malzemeleri ile köprülerden mobilyalara kadar değişik mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedirler [7].

Bir Fe-C alaşımı olan çelikler mühendislik malzemeleri içerisinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Son yıllarda Fe esaslı parçaların üretiminde konvansiyonel yöntemlere alternatif olarak toz metalurjisi yöntemi ile üretim büyük bir gelişim göstermiştir. Bu nedenle T/M yöntemiyle imal edilen Fe esaslı kompozitlerin kullanım alanı gün geçtikçe artmaktadır. T/M yöntemi ile malzeme üretiminde en çok kullanılan metal tozu %85 oranla Fe tozlarıdır [8]. Çeliklerin yüzey sertlikleri çelik türlerine bağlı olarak uygulanan çeşitli yüzey sertleştirme ısı işlemleri ile geliştirilebilmektedir. Gaz sementasyon yöntemi çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme yöntemlerinden biridir. Son dönemlerde çeliklerin sementasyon işlemlerinde 1050°C'ye kadar sementasyon işlem sıcaklıkları, oksijensiz sementasyon atmosferi, hızlı kinetik reaksiyonlar, homojen sementasyon derinliği, ürünlerde temiz yüzeylerin elde edilmesi, düşük distorsiyon oranları, yüksek mekanik ve aşınma özellikleri gibi avantajlarından dolayı vakum

sementasyon yönteminin kullanımı giderek artmaktadır [9].

TM yöntemi ile üretilen Fe esaslı parçalar çoğunlukla geleneksel sinterleme metodu kullanılarak üretilmektedir. Geleneksel sinterleme yönteminde fırınlar kullanılmaktadır. Bu fırınların sinterleme işleminin gerçekleştirilmesi için tamamen istenilen sıcaklıklara ısıtılması ve sinterleme sıcaklıklarında sabitlenmesi ciddi enerji sarfiyatı ve enerji maliyeti oluşturmaktadır. Toz metalurjisi parçalarının sinterlenmesi tozların ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılmasıyla gerçekleştirildiği için enerji maliyetleri Fe esaslı kompozit malzemelerin üretiminde daha da artmaktadır. T/M yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelere vakum sementasyon yöntemi ile yüzey sertleştirme ve sinterleme işlemlerini bir arada uygulayarak üretim maliyetlerini düşürerek kullanım alanları arttırılabilir.

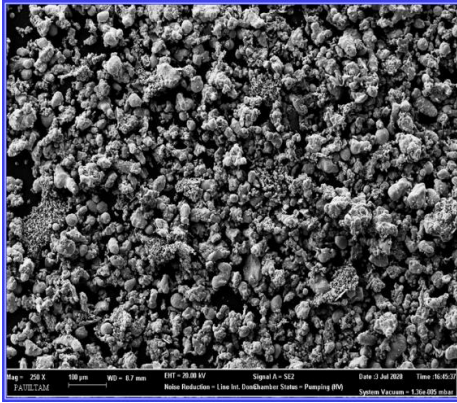
Vysotskii ve Lovshenko, karbürleme ve sinterleme işlemlerini bir arada uygulayarak toz alaşımlarından parça üretilebilirliğini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada toz metal parçaların üretiminde sinterleme ve karbürleme işlemlerinin bir arada uygulanabileceğini, yöntemin üretilen parçaların mekanik özelliklerine katkı sağladığını, bu şekilde üretilen toz ürünlerin kullanım alanlarının artmasına ve seri üretim yapan kuruluşlardaki karbürleme ile ilgili ekipmanlarında değişimi mümkün kılacağını belirtmişlerdir [10]. Ghermec vd. yapmış oldukları çalışmada, ekolojik çelikler elde etmek için farklı presleme basıncıyla üretilen Fe tozlarının karbürleme ve sinterleme işlemlerinin metan gazı ortamında aynı anda gerçekleştirilebilirliğini araştırmışlar. Presleme basıncı azaldıkça ve karbürleme süresi arttıkça karbon difüzyon mesafesi ile karbon konsantrasyonunun arttığını, aşınma ve korozyon özelliklerinin klasik çelikler ile benzer Fe-grafit karışımından oluşan sinterlenmiş çeliklerden daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır [11]. Ghermec vd. metan içeren bir atmosferde demir tozlarının karbonlama işleminin çevresel performansının iyileştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada Fe numunesinin metan ile karbonlanmasıyla sinterlenmiş çelikler elde etmek için uygulanan yenilikçi "çevre dostu" prosedürlerin geliştirilebileceğini ve elektrik tasarrufu, atık azalması, iyi bir maliyet etkinlik oranının sağlanabileceğini belirtmişlerdir [12].

Bu çalışmada, T/M yöntemiyle üretilen Fe esaslı kompozit malzemelere vakum sementasyon ısı işlemi uygulayarak yüzey sertleştirme ve sinterleme işlemlerinin tek bir proseste gerçekleştirilmesi ve bunun mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, bu özelliklerin geleneksel yöntemlerle sinterlenmiş akabinde de vakum sementasyon işlemi uygulanmış numunelerle karşılaştırılması hedeflenmiştir. Böylelikle, T/M yöntemiyle üretilen Fe esaslı kompozit malzemelerin sinterleme ve yüzey sertleştirme işlemlerini bir arada gerçekleştirilerek parçaların yüzey sertliği ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinin

yanında, T/M ile parça üretim aşamalarından olan sinterlemenin neden olduğu yüksek enerji kullanımından kaynaklanan enerji maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenmektedir. Bütün bunların sonucunda uzun vade de doğal kaynakların tüketiminin azaltılması ve ekosistemin korunmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada Molchem firması tarafından gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen ve ürün analiz raporlarında belirtildiği şekilde %99,9 saflık, 46µm parçacık boyutu ve 3,1 g/cm³ görünür yoğunluğa sahip demir tozları ile %99 saflık, 45µm parçacık boyutuna sahip grafit tozları kullanılmıştır. Fe tozlarına ait FESEM görüntüsü Şekil 1’de yer almakta olup, tozlar düzensiz ve küresel şekilli bir yapıya sahiptir.



Şekil 1. Demir tozu Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskopu (FESEM) görüntüsü (Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) image of iron powder)

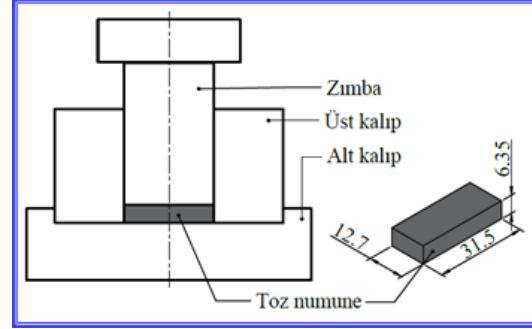
Toz karışım oranları, Çizelge 1’de verilen üç farklı seride, Presica marka XB 220A model 0,0001 gr. ölçüm hassasiyetine sahip hassas terazide ölçülerek hazırlanmıştır.

Çizelge 1. Kompozit üretiminde kullanılan tozların karışım oranları (Mixing ratios of powders used in composite production)

Seri	Numune no	Toz karışım oranları (% Ağırlık)		
		Çinko stearat	Grafit	Demir
Seri - 1	1-A	0,8	-	99,2
	1-B			
	1-C			
Seri - 2	2-A	0,8	0,2	99
	2-B			
	2-C			
Seri - 3	3-A	0,8	0,4	98,8
	3-B			
	3-C			

Hazırlanan bu toz karışımlarında homojen bir toz dağılım elde etmek için 3 boyutlu turbula karıştırıcıda (TURBULA T2F), 34 d/d hızda, 30 dakika süre ile karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan bu

karışımlar Şekil 2’de teknik çizimi verilen 1.2379 (AISI/SAE-D2) soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş kalıp içerisinde 780 MPa basınç altında soğuk presleme yöntemi ile preslenerek ASTM B528-16 standardına uygun 31,7x12,7x6,35 mm boyutlarında üç nokta eğme test numuneleri üretilmiştir. Numune sayıları her bir deney parametresi için 3 adet olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 2. Toz presleme kalıbı (Powder pressing mold)

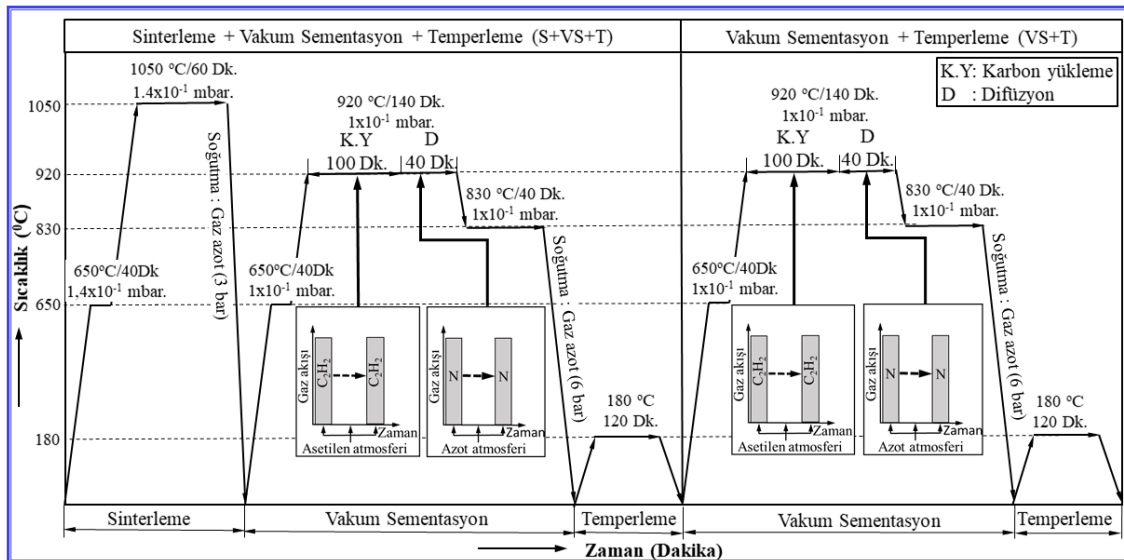
Üretilen her bir numunenin ham yoğunluğu tespit edilmiş ve akabinde Döksan Isıl İşlem A.Ş firmasında ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemler sırasında her seri için, sadece sinterleme, sinterleme + vakum Sementasyon + temperleme ve sadece vakum sementasyon + temperleme olmak üzere üç farklı ısıl işlem prosesi belirlenmiştir. Uygulanan ısıl işlemler, sadece sinterleme için (S), sinterleme + vakum Sementasyon + temperleme için (S+VS+T) ve sadece vakum sementasyon + temperleme için ise (VS+T) şeklinde kodlanmıştır. Bu kodlamalarda (S) harfi sinterleme işlemini, (VS) harfleri vakum sementasyon işlemini, (T) harfi ise temperleme işlemini temsil etmektedir. Numunelere uygulanan ısıl işlem bilgileri ve kodlama şekilleri Çizelge 2’de verilmektedir. Makalenin 3. ve 4. bölümlerinde numunelere uygulanan ısıl işlemlerden bahsedilirken yukarıda belirtilen kodlamalar kullanılacaktır. Sinterleme işlemi Schmetz marka IU72/1F2R model fırın içerisinde 1.4 10⁻¹ mbar basınç altında 1050°C’de 60 dakika tavlama sonrası 3 bar basınca sahip gaz azot ile soğutulmuş ve gerçekleştirilmiştir. Vakum sementasyon işlemi ise ALD marka VZKQ-PC model vakum sementasyon fırınında 20 lt./dk. gaz debisine sahip asetilen (C₂H₂) gazı atmosferinde 1x10⁻¹ mbar basınç altında 920°C sıcaklıkta 100 dakika karbon yükleme ve aynı sıcaklık ve basınç değerlerinde azot atmosferinde 40 dakika karbon difüzyonu, akabinde 1x10⁻¹ mbar basınç altında 830°C sıcaklıkta 40 dakika bekletme ve 6 bar basınca sahip gaz azot ile soğutma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Vakum sementasyon işlemi sırasında numuneler sementasyon sıcaklığına 10°C/dk. ısıtma hızında ısıtılarak çıkartılmıştır. Ayrıca ani sıcaklık değişimlerinin numunelerde oluşturabileceği gerilim yığılmalarını ortadan kaldırmak ve homojen bir ısı dağılımı elde etmek için numuneler 650°C sıcaklıkta 1x10⁻¹ mbar basınç altında 40 dakika süre ile bekletilmiştir. Vakum sementasyon işlemi tamamlanan numuneler 180°C sıcaklıkta 120 dak. temperleme işlemine tabi tutulmuştur.

Isıl işlemleri tamamlanan numunelerin yoğunlukları Presica marka XB 220A model yoğunluk ölçüm kitine sahip 220 gr. ölçme kapasiteli ve 0,0001 gr. hassasiyetli analitik yoğunluk ölçüm terazisi ile belirlenmiştir. Numunelere ait ısıl işlem öncesi ve sonrası yoğunlukları Çizelge 3’de verilmiştir. Şekil 3’de numunelere uygulanan ısıl işlem süreçlerine ait ısıl işlem özetleri yer almaktadır.

görüntülerini almak için yüzeyleri Quarum marka Q150R ES model kaplama cihazında %80Au-%20Pd olacak şekilde kaplanmıştır. Kaplama işlemi tamamlanan numunelerin mikro yapı ve yapıda yer alan element dağılım incelemeleri için, element dağılım spektrometresi (EDS) ile donatılmış ZEISS marka SUPRA 40VP model Alan Emisyon Taramalı Elektron mikroskobu (FESEM) kullanılmıştır. Mikro sertlik

Çizelge 2. Numunelere uygulanan ısıl işlemler (Heat treatments applied to samples)

Seri	Numune no	Uygulanan ısıl işlemler	Isıl işlem kodları
Seri - 1	1-A	Sinterleme	S
	1-B	Sinterleme + Vakum Sementasyon + Temperleme	S+VS+T
	1-C	Vakum Sementasyon + Temperleme	VS+T
Seri - 2	2-A	Sinterleme	S
	2-B	Sinterleme + Vakum Sementasyon + Temperleme	S+VS+T
	2-C	Vakum Sementasyon + Temperleme	VS+T
Seri - 3	3-A	Sinterleme	S
	3-B	Sinterleme + Vakum Sementasyon + Temperleme	S+VS+T
	3-C	Vakum Sementasyon + Temperleme	VS+T



Şekil 3. Isıl işlem özeti (Heat treatment summary)

Isıl işlemleri tamamlanan numuneler ASTM B528-16 standardına göre 100 kN kapasiteli Hardway marka WDW-100 model çekme/basma test cihazında üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Mikroyapı incelemeleri için deney numunelerinden enine kesitte 10 mm yükseklikte parçalar kesilerek çıkartılmıştır. Kesilen bu numuneler Metspre marka BC45 model bakalit cihazında bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler Metspre marka PCIH250 model zımparalama cihazında sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 numara SiC zımpara ile zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemi tamamlanan numuneler polisaj işlemi için Metspre marka MPD250 model polisaj cihazında sırasıyla 6µm ve 3µm polisaj keçesinde 6µm ve 3µm elmas süspansiyon kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işleminden sonra numuneler %94 saf su + %4 Nitrik asit konsantrasyonuna sahip dağlama solüsyonu içerisinde 8 sn. bekletilerek dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi tamamlanan numunelerin FESEM

ölçümleri MATSUZAWA marka MMT-X7B model Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı ile 50 g yük altında 10 sn. süre ile zımparalama + parlatma + dağlama işlemlerine tabi tutulmuş malzeme yüzeyine uygulanmıştır. Mikro sertlik ölçümleri malzeme kenar bölgesinden başlayarak merkeze doğru 30, 80, 150, 250, 500, 1000, 2000, 3000 µm mesafelerden ölçülerek gerçekleştirilmiştir. Sertlik sonuçları her mesafe için 10 farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

3.1. Mikroyapı sonuçları (microstructure results)

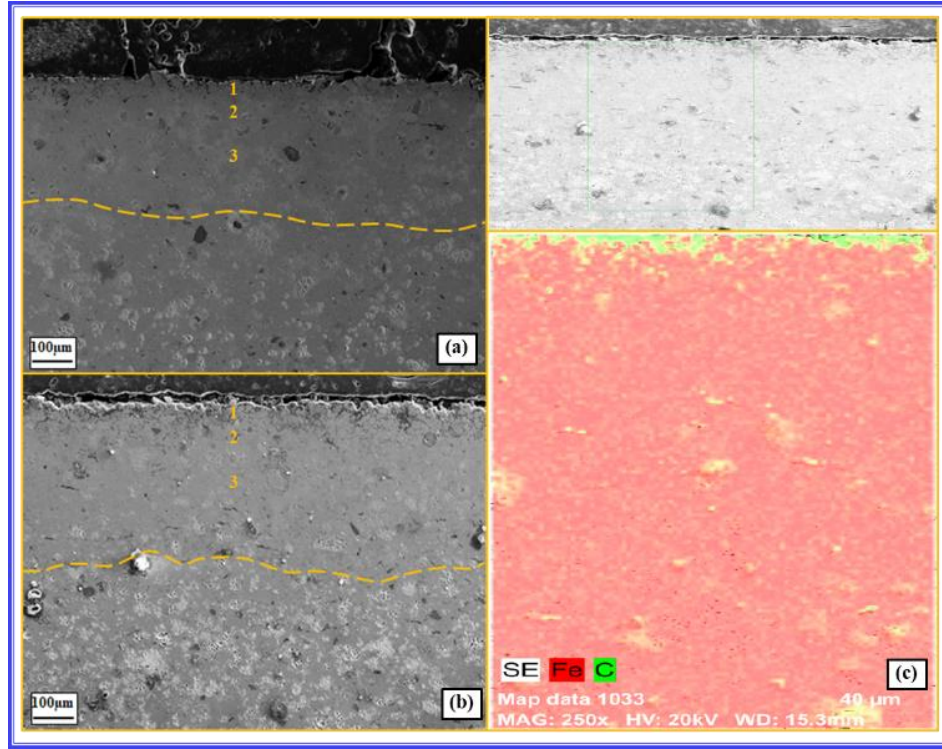
T/M yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelere ait ısıl işlem öncesi ve sonrası yoğunluk değerleri Çizelge 3’de verilmiştir. Ayrıca numunelere uygulan S+VS+T ve VS+T işlemleri sonrası elde edilen mikroyapı FESEM

görüntüleri ile VS+T işlemi görmüş numuneye ait element dağılım haritası Şekil 4'de, FESEM görüntülerinden elde edilen EDS analizleri ise Şekil 5'de verilmiştir. Çizelge 3'de verilen yoğunluk sonuçları incelendiğinde bütün ısıl işlem parametrelerinde numunelerin yoğunluklarında artış meydana geldiği görülmektedir. En yüksek yoğunluk artışının S+VS ısıl işlemi uygulanan numunelerde meydana geldiği, en düşük yoğunluk artışının ise sadece VS işlemi uygulanan numunelerde meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum S+VS ısıl işlemi uygulanan numunelerde sinterleme işleminin yapıldığı 1050°C sıcaklığının toz taneleri arasında daha iyi bağ oluşumu sağladığı, ayrıca bu numunelere sinterleme sonrası uygulanan vakum sementasyon işleminin ikinci bir sinterleme etkisi yaparak numunelerin yoğunluklarında artışa neden olduğu düşünülmektedir. Kompozit malzemeler içerisindeki grafit miktarının artışına bağlı olarak numunelerin yoğunluklarında azalma görülmektedir. Şekil 4'de verilen FESEM görüntüleri ve element dağılım haritası incelendiğinde karbon difüzyonunun en yüksek 1 numaralı bölgede gerçekleştiği, 2 numaralı bölgeye doğru difüzyon miktarının azaldığı ve 3 numaralı bölgede ise difüzyonun oldukça az miktarlarda gerçekleştiği görülmektedir. Bunun nedeni olarak en yüksek difüzyon hızının numunenin en dış bölgesinde olduğu merkeze doğru ilerledikçe difüzyon hızında azalmanın meydana geldiği bu nedenle de yüzeyden merkeze doğru karbon konsantrasyonunda azalma görüldüğü düşünülmektedir. Sementasyon ısıl işlemi sırasında östenit yapısı içerisinde çözünen karbon atomları yüzeyden içeriye doğru azalan oranlarda difüzyon mekanizması oluşmaktadır [13]. S+VS işlemi uygulanmış numunede yaklaşık 300 µm mesafesinde karbon difüzyonunun meydana geldiği, sadece VS işlemi uygulanmış numunede ise yaklaşık 450 µm mesafede karbon difüzyonunun meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 5'de verilen EDS analizleri incelendiğinde sadece VS uygulanan numunelerdeki karbon difüzyon bölgesinin S+VS işlemi görmüş numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Böylelikle T/M yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelerde presleme sonrası doğrudan VS işlemi uygulamanın S+VS işlemine göre daha yüksek karbon difüzyon bölgesi meydana getirdiği anlaşılmaktadır. Bu durum; presleme sonrası doğrudan VS işlemi uygulanan numunelerin sahip

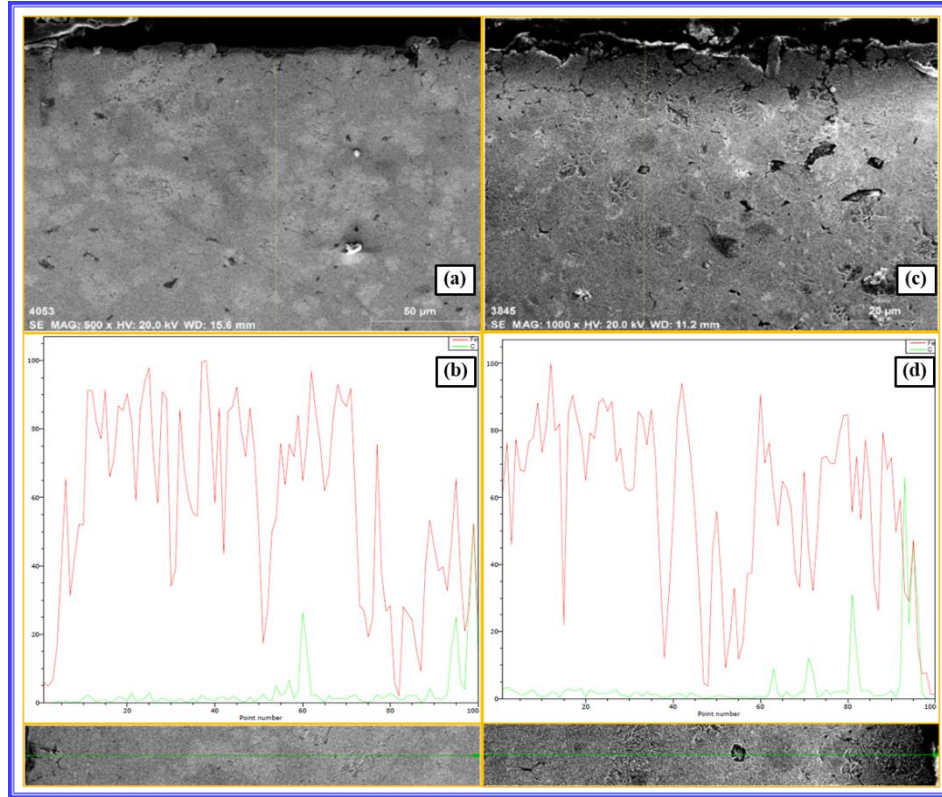
oldukları düşük ham yoğunlukları ve buna bağlı olarak toz taneleri arasındaki mesafenin daha fazla olması nedeniyle karbon atomlarının iç bölgelere daha kolay hareket ederek toz tanelerine difüzyonlarının gerçekleşmesi sayesinde daha yüksek karbon difüzyon mesafesinin oluştuğu düşünülmektedir. S+VS ısıl işlemi uygulanan numunelerde sinterleme işleminin toz taneleri arasında meydana getirdiği boyunlaşma ve buna bağlı olarak oluşan yoğunluk artışı nedeniyle karbon atomlarının iç bölgelere hareketinin zorlaştığı ve daha düşük bir karbon difüzyon mesafesinin meydana geldiği düşünülmektedir. Difüzyon işlemi sırasında yer değiştiren atomlar yeni yerlerine ulaşmak için çevre atomları sıkıştırarak geçmek için aktivasyon enerjisi olarak isimlendirilen bir enerji engelini aşmaları gerekmektedir. Atomlar zayıf paketlenme faktörüne sahip tane sınırlarına düşük aktivasyon enerjileri nedeniyle daha kolay difüze olmaktadır. Difüzyon mekanizmaları içerisinde yüzey difüzyonu en düşük aktivasyon enerjisine sahip olduğu için en yüksek difüzyon katsayısına sahiptir ve difüzyon hızı en yüksek olanıdır. Sonuç olarak atomların yeni yerlerine ulaşmak için aşmaları gereken enerji engeli olan ve aktivasyon enerjisi olarak isimlendirilen enerjinin tane sınır ve yüzey difüzyonlarında daha düşük olması nedeniyle difüzyon katsayısının daha yüksek olmasına ve difüzyon işleminin daha hızlı gerçekleşmesine neden olmaktadır [14]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, sinterleme işlemi ile T/M parçalarının yoğunluklarında artış meydana geldiği, toz taneleri arasındaki mesafelerde ve gözenek miktarında bir azalma meydana geldiği belirtilmiştir [15,16]. Demir kompaktlarının vakumlu sementasyon işleminde gözenek miktarının karbon difüzyon derinliği üzerindeki etkisi araştırılmış ve azalan makro gözenek hacmi ile beraber karbon difüzyon derinliğinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Daha yüksek karbon difüzyon derinliğine makro gözeneklerin etkin rol oynadığı belirtilmiştir [17]. T/M yöntemi ile üretilen Fe esaslı ham numunelere presleme sonrası uygulanan Borlama gibi ikincil işlemler sonrası nihai ürün eldesinde, tozların birleşmesi ve difüzyon sürecine sıcaklık ve sürenin doğrudan etkili olduğu bilinmekte olup [18], Şekil 4 ve Şekil 5'de yer alan numune görüntülerinde de durumun benzerliği anlaşılmaktadır.

Çizelge 3. Numunelerin ısıl işlem öncesi ve sonrası yoğunlukları (Density of samples before and after heat treatment)

Seri	Numune no	Uygulanan ısıl işlemler	Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Ham yoğunluk (g/cm ³)	Isıl işlem sonrası yoğunluk (g/cm ³)
Seri - 1	1-A	S	7,82	6,63	6,89
	1-B	S+ VS +T			6,98
	1-C	VS+T			6,73
Seri - 2	2-A	S	7,809	6,57	6,78
	2-B	S+VS+T			6,83
	2-C	VS+T			6,71
Seri - 3	3-A	S	7,797	6,52	6,76
	3-B	S+VS+T			6,79
	3-C	VS+T			6,71



Şekil 4. S+VS+T ve VS+T işlemleri uygulanmış numunelere ait FESEM görüntüleri (a: S+VS+T / b: VS+T) ile VS+T işlemleri uygulanmış numuneye ait elementel dağılım haritası (c: VS+T) (FESEM images of S+VS+T and VS+T treated samples (a: S+VS+T / b: VS+T) and elemental distribution map of the VS+T treated sample (c: VS+T))



Şekil 5. S+VS+T ile VS+T işlemleri uygulanan numunelerin FESEM görüntüleri ve EDS analizleri. a) S+VS+T numunesi FESEM görüntüsü, b) S+VS+T numunesi EDS analizi, c) VS+T numunesi FESEM görüntüsü, d) VS+T numunesi EDS analizi (FESEM images and EDS analysis of samples with VS+T treatment with S+VS+T. a) FESEM image of S+VS+T sample, b) EDS analysis of S+VS+T sample, c) FESEM image of VS+T sample, d) EDS analysis of

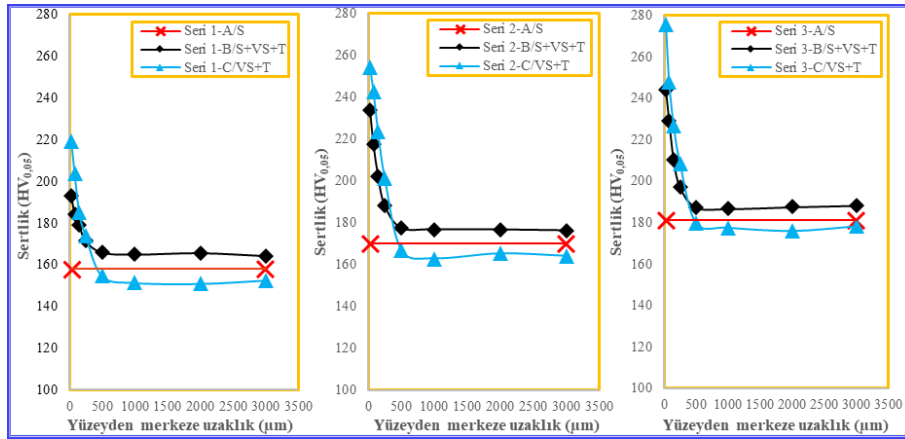
3.2. Mikrosertlik sonuçları (microhardness results)

T/M yöntemi ile üretilen ve presleme işlemi sonrasında S, S+VS+T ve VS+T işlemine tabi tutulan Fe esaslı kompozit malzemelere ait mikrosertlik sonuçları Çizelge 4'te, mikrosertlik grafikleri ise Şekil 6'da verilmiştir. Çizelge 4 ve Şekil 6 incelendiğinde her üç seride de sadece S işlemi uygulanmış numunelerin ortalama sertlik değerleri sırasıyla 158HV_{0.05}, 170HV_{0.05} ve 181HV_{0.05} olarak belirlenmiştir. En yüksek sertlik değeri ise sadece VS+T işlemi uygulanmış ağ. %0,4 Grafit içeriğine sahip 3-C numaralı numunenin dış yüzeyine en yakın bölge olan 30 µm mesafede 275,6HV_{0.05} olarak ölçülmüştür. Aynı ölçüm mesafesinde benzer ısı işlem parametresinin uygulandığı (VS+T) ağ. % 0,2 Grafit içeriğine sahip 2-C ve ağ. % 100 Fe içeriğine sahip 1-C numaralı numunelerin ortalama sertlik değerleri ise sırası ile 254HV_{0.05}, 219HV_{0.05} olarak belirlenmiştir. En düşük sertlik değeri ise sadece VS+T işlemi uygulanmış ve ağ. % 100 Fe içeriğine sahip 1-C numaralı numunenin merkeze yakın bölgesinde 151HV_{0.05} olarak ölçülmüştür. Kompozit malzemeler içerisinde grafit miktarının artışına bağlı olarak sertlik değerlerinde de bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bütün seriler içerisinde S+VS+T ve VS+T işlemi görmüş numuneler birbirleri ile kıyaslandığında sertlik dağılımlarının yüzey bölgeleri ile merkez bölgeleri arasında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Yüzeye en yakın bölge olan 30µm mesafeden yaklaşık 250µm mesafeye kadar VS+T işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerlerinin S+VS+T işlemi uygulanan numunelerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak presleme sonrası doğrudan VS işlemi uygulanan numunelerde yoğunluklarının düşük olması, toz taneleri arası mesafenin fazla olması ve gözenek yapısının daha fazla olması sayesinde karbon atomlarının difüzyonunu kolaylaştırıcı bir etken olarak karbon konsantrasyonunun artması ve buna bağlı olarak mikroyapıda bulunan sementit miktarındaki artış ile birlikte oluştuğu düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda, T/M yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelerde grafit miktarının sertliğe olan etkisi araştırılmış ve grafit miktarındaki artışa bağlı olarak kompozit malzemelerin sertliklerinde de bir artış meydana geldiği görülmüştür. Oluşan bu sertlik artışının ise karbonun demire difüzyonu ile birlikte mikroyapıda oluşan sementit artışından

kaynaklandığı belirtilmiştir [19]. VS+T ve S+VS+T işlemi görmüş numunelerin sertlik dağılımları yüzeyden merkeze doğru azalma eğilimi gösterirken, sertlik değerleri arasındaki fark da azalmaktadır. Merkeze doğru ilerledikçe difüzyon hızındaki düşüşe bağlı olarak yeterli karbon konsantrasyonunun gerçekleşmemesi bu sonuçların ortaya çıkmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Aynı seriler içerisinde numunelerin merkez bölgelerinde S+VS+T işlemi görmüş numunenin sertliğinin VS+T işlemi gören numuneden daha yüksek olduğu ve sertlik dağılımının bu bölgelerde homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Sementasyon işlemi sırasında karbon difüzyonunun bu bölgelerde etkili olmaması nedeni ile sementasyon işlemine bağlı sertlik artışlarının bu bölgede etkin olmadığı düşünülmektedir. S+VS+T işlemi uygulanan numunelerde vakum sementasyon işlemi öncesi uygulanan sinterleme işleminin sertlik artışına katkı sağladığı ve sadece VS işlemi görmüş numunelere göre merkez bölgelerinde daha yüksek sertlik değerlerinin meydana geldiği düşünülmektedir. Sadece S işlemi uygulanmış numunelerde ise sertlik değerleri numunenin bütün kesiti boyunca homojen bir dağılım göstermektedir. Sadece S işlemi görmüş numuneler ile VS+T işlemi görmüş numunelerin merkez bölgelerindeki sertlik değerleri mukayese edildiğinde sadece S işlemi uygulanan numunelerin sertlik değerlerinin VS+T işlemi uygulanan numunelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak vakum sementasyon işleminin yapıldığı 920°C sıcaklığın sinterleme işleminin yapıldığı 1050°C sıcaklığa göre yetersiz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda; Toz metal dişlilerin aşınma davranışı üzerine farklı ısı işlem proseslerinin etkisi incelenmiş ve karbürizasyon işleminin Fe esaslı kompozit malzemelerin yüzey sertliklerinde artışa neden olduğunu belirtilmiştir [20]. T/M yöntemi ile üretilen Fe esaslı malzemelerde sinterleme sıcaklığının etkileri üzerine yapılan çalışmalarda sinterleme sıcaklığının artması ile beraber sertlik değerlerinde de artış meydana geldiği bilinmektedir [16, 21]

Çizelge 4. Mikrosertlik sonuçları (Microhardness results)

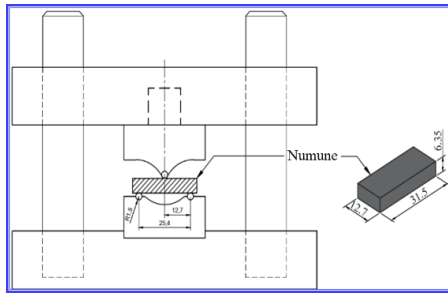
Seri	Numune no	Uygulanan ısı işlemler	Sertlik sonuçları (HV _{0.05})								
			Yüzeyden merkeze uzaklık (µm)								
			30	80	150	250	500	1000	2000	3000	
Seri-1	1-A	S	158,0								
	1-B	S+VS+T	193,1	184,4	179,0	171,4	166,0	165,0	165,7	164,3	
	1-C	VS+T	219,0	204,0	184,9	173,8	154,6	151,4	151,0	152,6	
Seri-2	2-A	S	170,0								
	2-B	S+VS+T	233,7	217,5	202,3	188,0	177,3	176,7	176,6	176,2	
	2-C	VS+T	254,0	242,5	223,3	201,4	167,0	162,8	165,2	164,0	
Seri-3	3-A	S	181,0								
	3-B	S+VS+T	244,0	229,0	210,2	197,0	187,3	186,6	187,5	188,2	
	3-C	VS+T	275,6	248,0	226,8	208,4	178,4	177,4	175,8	178,1	



Şekil 6. Numunelere ait mikrosertlik grafikleri (Microhardness graphics of samples)

3.3. Üç Nokta Eğme Test Sonuçları (Three-Point Bending Test Results)

T/M yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelerin ısıtılma sonrası uygulanan üç nokta eğme testleri deney düzeneği şematik görünümü Şekil 7’de verilmiştir. Tüm deneyler ASTM B528-16 standardına göre 100kN kapasiteni çekme/basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneyi sonrasında elde edilen test verileri Çizelge 5’de, grafikleri ise Şekil 8’de yer almaktadır.



Şekil 7. Üç nokta eğme deney düzeneği (Three-point bending test mechanism)

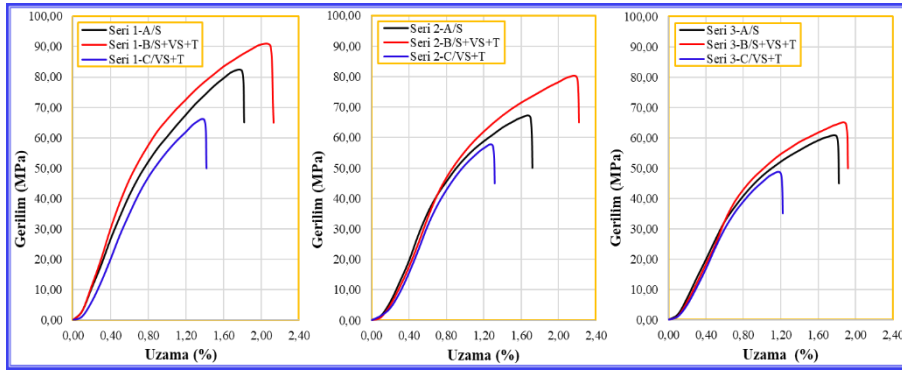
geldiğini göstermektedir. Bu durum, yapıda bulunan grafitin bir bölümünün sinterleme ısıl işlemi sırasında demir ile oluşturduğu reaksiyon neticesinde mikroyapıdaki sementit oluşumu ve böylece sertlik artışının sağlandığı, ancak demir atomları ile reaksiyona girmeyen ve yapıda serbest kalan grafitin mikroyapıda boşluk gibi davranması ile çatlak başlangıcı için uygun zemin hazırlayarak mekanik özelliklerde düşüş meydana getirdiği düşünülmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde Fe esaslı kompozit malzemelerde grafit miktarının üç nokta eğme deneylerindeki mekanik özelliklere etkisi incelenmiş olup artan grafit oranına bağlı olarak mekanik özelliklerde azalma meydana geldiği belirlenmiştir [19]. En yüksek dayanımın ağ. %100 Fe içeriğine sahip S+VS+T işlemi uygulanmış 1-B numaralı numunede 90,15MPa olarak tespit edilmiştir. Her üç seride de S+VS+T işlemi görmüş numunelerin dayanımlarının sadece S işlemi görmüş numunelere göre artış gösterdiği belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak S+VS+T işlemi uygulanan numunelerin VS işlemi sırasında ikinci bir sinterleme işlemine maruz kalarak yapıda bulunan grafitin Fe atomları ile reaksiyonu

Çizelge 5. Üç nokta eğme test sonuçları (Three-point bending test results)

Seri	Numune no	Uygulanan ısıl işlemler	Üç nokta eğme test sonuçları			
			Akma Dayanımı (MPa)	Üç nokta Eğme Dayanımı (MPa)	Üniform Uzama (%)	Toplam Uzama (%)
Seri -1	1-A	S	62,75	81,60	0,75	1,77
	1-B	S+VS+T	62,00	90,15	1,18	2,17
	1-C	VS+T	55,50	65,65	0,71	1,42
Seri -2	2-A	S	54,15	66,30	0,71	1,69
	2-B	S+VS+T	57,35	79,70	1,02	1,99
	2-C	VS+T	50,80	57,25	0,58	1,29
Seri -3	3-A	S	48,15	60,20	0,69	1,67
	3-B	S+VS+T	48,30	64,50	0,95	1,86
	3-C	VS+T	47,15	49,70	0,42	1,18

Çizelge 5 ve Şekil 8 incelendiğinde, her üç seride sadece S işlemine tabii tutulmuş numunelerin üç nokta eğme dayanım değerleri sırasıyla (Seri 1, Seri 2 ve Seri 3) 81,6MPa, 66,3MPa ve 60,20MPa olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlardan grafit miktarının artmasına bağlı olarak mekanik özelliklerde bir azalma meydana

sonucu mikroyapıdaki sementit teşekkülünün artması ve vakum sementasyon işlemi sırasında ortamda bulunan karbonun numune yüzeyinden merkeze doğru difüzyonu sonucu numunelerin yüzey bölgelerindeki karbon konsantrasyonunun artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük dayanımın ise ağ. %0,4 grafit

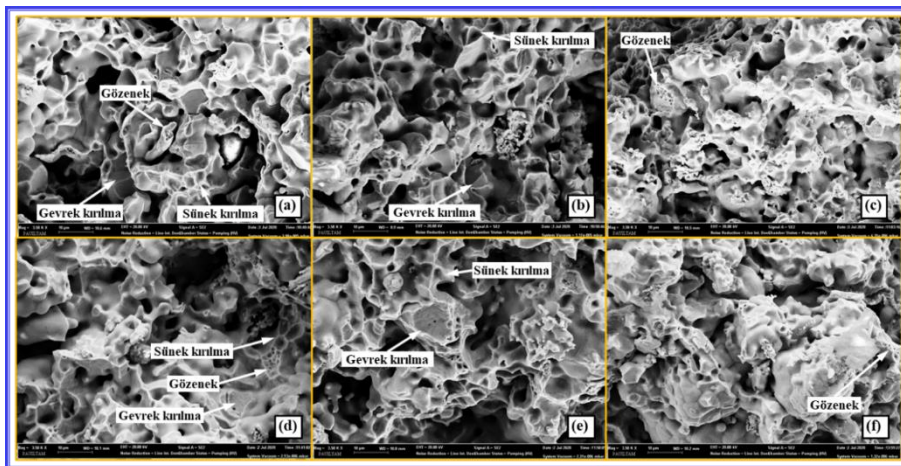


Şekil 8. Üç nokta eğme testi grafikleri (Three point bend test graphics)

içeriğine sahip VS+T işlemi uygulanmış 3-C numaralı numunede 49,70MPa olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Yine bütün seriler içerisinde en düşük dayanım değerine sadece VS+T işlemi görmüş numunelerin sergilediği görülmektedir. Bunun nedeni olarak sementasyon işleminin yapıldığı 920°C sıcaklığın yeterli sinterleme sağlamak için düşük kalmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Numunelerin % uzama değerleri incelendiğinde bütün serilerde S+VS+T işlemi görmüş numunelerin % uzama değerlerinin en yüksek, sadece VS+T işlemi görmüş numunelerde ise en düşük olduğu ve yapıdaki grafit miktarı artmasıyla % uzama değerlerinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum, sinterleme işlemine ilave yapılan vakum sementasyon işleminin ikinci bir sinterleme sağlayarak demir tozları arasındaki difüzyon bağının daha da güçlenmesine neden olduğu ancak doğrudan vakum sementasyon işleminde ise yeterli bağ gelişiminin sağlanmadığı, numunelerde fazla miktarda bulunan ve demire difüzyonu gerçekleşmeyen grafitin ise boşluk gibi davranarak çatlak başlangıcı için uygun zemin hazırladığı düşünülmektedir.

3.4. Kırık yüzey FESEM incelemeleri (Fractured surface FESEM investigations)

%100 Fe ve ağırlık %0.2-0.4 grafit içeriğine sahip S, S+VS+T ve VS+T ısıl işlemleri uygulanmış numunelerin üç nokta eğme testi sonrası kırık yüzey FESEM görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde bütün numunelerde tozların temas noktalarında toz taneleri arasında boyun oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir. Sinterleme, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbiri ile bağlanmasını sağlar. Mikroyapı ölçeğinde bağlanma temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir [3]. S ve S+VS+T işlemi görmüş numunelere ait toz tane sınırlarındaki gözenek miktarının çok az olduğu ancak VS+T işlemi görmüş numunelerin ise bu gözenek miktarının daha fazla olduğu görülmüştür. Numunelere ait kırılma yüzeyleri incelendiğinde S ve S+VS+T işlemi görmüş numunelerde genellikle sünek kırılma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum sinterleme işleminin yapıldığı 1050°C sıcaklığın sinterleme için yeterli olduğu ve toz taneleri arasındaki sinterleme neticesinde boyun oluşumu ile birleşme meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 9. % 100 Fe ve % 0,4 grafit içeriğine sahip numunelere ait kırık yüzey FESEM görüntüleri (a: %100Fe/S, b: %100Fe/S+VS+T, c: %100Fe/VS+T, d: %0.4 Grafit/S, e: %0.4 Grafit/S+VS+T, f: %0.4 Grafit/VS+T) (FESEM images of fractured surface of samples with 100% Fe and 0.4% graphite content (a: 100%Fe/S, b: 100%Fe/S+VS+T, c: 100%Fe/VS+T, d: 0.4% graphite/S, e: 0.4% Graphite/S+VS+T, f: 0.4% Graphite/VS+T))

Sadece VS+T işlemi görmüş numunelere ait kırık yüzeyler incelendiğinde sünek kırılma eğiliminin daha düşük olduğu daha çok taneler arası kırılma şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum ise VS işleminin yapıldığı 920°C sıcaklığın sinterleme için yetersiz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda; Fe esaslı kompozit malzemelerde düşük sinterleme sıcaklıklarında sünek kırılma bölgelerine az rastlandığı, sinterleme sıcaklığının artması ile sünek kırılma oranında artış meydana geldiği belirtilmiştir [21]

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

T/M yöntemi ile üretilen ve ağ. %100Fe ve ağ. %0.2-0.4 grafit içeriğine sahip Fe esaslı kompozit numunelere uygulanan S, S+VS+T ve VS+T ısıtma işlemleri neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Sadece VS işlemi uygulanmış numuneler S+VS işlemi uygulanmış numunelere nazaran daha yüksek karbon difüzyon mesafesine sahiptir. S, S+VS ve VS işlemi görmüş numunelerin hepsinde toz tanelerinin birleşme noktalarında boyun oluşumu gerçekleşmiştir. S ve S+VS işlemi görmüş numunelerde toz tane sınırlarındaki gözenek miktarının çok az olduğu ancak VS işlemi görmüş numunelerin ise bu gözenek miktarının daha fazla olduğu görülmüştür.
2. Numunelere ait en yüksek sertlik değeri içerisinde ağ. %0.4 grafit içeren ve sadece VS+T işlemi uygulanmış numunenin yüzey bölgesinde 275,6HV_{0.05} değerinde ölçülmüştür. En düşük sertlik değeri ise %100Fe içeriğine sahip ve sadece VS+T işlemi uygulanmış numunenin merkez bölgesinde 151HV_{0.05} olarak ölçülmüştür. Grafit miktarındaki artışa bağlı olarak numunelerin sertlik değerlerinde de bir artış meydana gelmiştir. S ve S+VS+T işlemi görmüş numunelere ait yüzey bölgelerindeki sertlik değerleri sadece VS+T işlemi görmüş numunelerden daha düşük çıkarken merkez bölgelerinde tam tersi bir durum ortaya çıkmıştır.
3. Numunelere ait en yüksek üç nokta eğme dayanımları S+VS+T işlemi uygulanmış numunelerde (Seri 1, Seri 2 ve Seri 3) 90.15MPa, 79.70MPa ve 64.50MPa olarak görülmektedir. En düşük üç nokta eğme dayanımları ise sadece VS+T işlemi uygulanmış numunelerde (Seri 1, Seri 2 ve Seri 3) 65.65MPa, 57.25MPa ve 49.7MPa olarak görülmüştür. Numuneler içerisinde grafit miktarındaki artışa bağlı olarak üç nokta eğme dayanımlarında bir azalma meydana gelmiştir.
4. S ve S+VS+T ısıtma işlemi uygulanan numunelerin daha çok sünek kırılma eğilimi gösterdikleri, sadece VS+T ısıtma işlemi uygulanmış numunelerde ise sünek kırılma eğiliminin düşük olduğu daha çok taneler arası kırılma şeklinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada; T/M yöntemi ile üretilen Fe esaslı kompozit malzemelere soğuk preslenme işlemi sonrası uygulanan sinterleme, vakum sementasyon ve temperleme ısıtma işlemlerinin gerçekleştirilmesi sırasındaki vermiş oldukları katkılarından dolayı Döksen Isıl İşlem A. Ş. firmasına teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Özer PAMUK: Deneyle ilgili yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ümit DEMİR: Deneyle ilgili yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Sinan AKSÖZ: Deneyle ilgili yapılmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] ASM Handbook, Vol. 7, "Powder Metallurgy", *ASM International*, USA, (1998).
- [2] Chawla N., Deng X., "Microstructure and Mechanical Behavior of Porous Sintered Steels," *Materials Science and Engineering*, A 390: 98-112, (2005).
- [3] German M. Randal., Editörler: Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N., "Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri", *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara, (2007).
- [4] Özer E. Kübra., "Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen sade karbonlu Çeliklerin statik deformasyon yaşanması davranışlarının incelenmesi", *Yüksek Lisans*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2019).
- [5] Höganäs A. B., "Höganäs handbook for machining guidelines", 65-70, (1996).
- [6] Ünlü N., Çavuşoğlu L., "Toz Metalurjisinin Yaygın Kullanım Alanları", *Metal Dünyası Teknik Yazı*, İstanbul, 12-13, (1995).
- [7] Dere M. Ayşe., "Toz metalurjisi ile demir bazlı matrisli TiB₂ takviyeli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu", *Yüksek Lisans*, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2019).
- [8] Yavuz N., Güner R., "Demir esaslı toz metal parçaların elektrik direnç kaynağında optimum kaynak şartlarının belirlenmesi", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1):221-228, (2002).

- [9] Özdeşlik M., Sindel L., Keskin S., “Düşük basınç sementasyon ve yüksek basınç gaz ile sertleştirme”, *Türk Mühendis ve Mimarı Odaları Birliği Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası*, 180: 31-36, (2016).
- [10] Vysotskii V.T., Lovshenko F.G., “Feasibility of combining the sintering and carburizing processes for powder alloys”, *Metal Science and Heat Treatment*, 30(1): 62-66, (1988).
- [11] Ghermec O., Ghermec C., Popescu T., “A new technology to obtain ecological steels”, *Environmental Engineering and Management Journal*, 8(5): 1141-1144 (2009).
- [12] Ghermec O., Ghermec C., Dubovan S., Rusănescu C. O., “Improving the environmental performances of iron powders carburizing process in a methane-bearing atmosphere”, *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(10), 2019-2023, (2013)
- [13] Savaşkan T., “Malzeme bilgisi ve muayenesi”, Trabzon, (2009).
- [14] Askeland, D.R., Editör: Erdoğan, M., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, (1998).
- [15] Çelik E., Güven Gök M. ve Çelik Ö., “Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen elmaslı kesici takımlara sinterleme sıcaklığının etkisi”, *13th International Materials Symposium (IMSP'2010)*, 1527-1534, (2010).
- [16] Gao, F., Zong, X., Tian, L. ve Quan, S. “Microstructure and mechanical properties of low temperature carburizing layer on AISI 440C martensitic stainless steel”, *Materials Express*, 10(6): 841-847, (2020).
- [17] Widanka, K., “Effect of interconnected porosity on carbon diffusion depth in vacuum carburizing process of iron compacts”, *Powder Metallurgy*, 53:4, 318-322, (2010).
- [18] Aksöz, S., Kaplan, Y., & Tan, E., Boro-sinterleme işleminin ham T/M parçaların mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkilerinin incelenmesi. *Bor Dergisi*, 4(2), 77-84, (2019).
- [19] Uzun, H. Ve Kılıç, İ. “Demir esaslı T/M parçaların kırılma tokluğu, sertliği ve mikroyapısal karakterizasyonu”, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6:76-83, (2002).
- [20] Üllen, B. N., Ersoy, M., “toz metal dişlilerin aşınma davranışı üzerine farklı ısıl işlem proseslerinin etkisi”, *16th International Materials Symposium (IMSP'2016)*, 1696-1703,(2016).
- [21] Çivi, C. ve Atık E., “Bakır ve Grafit İçeren Demir Esaslı Malzemelerin İndüksiyon ile Sinterlenmesinde Sinterleme Sıcaklığının Malzeme Dayanımına Etkisi”, *CBÜ Fen Bil. Dergisi*, 13(2): 467-473, (2017)