



Değirmen Valslerinin Mikroyapısal Karakterizasyonu ve Mekanik Testleri

Mehmet Solmaz^{1*}, Hasan Kotan^{2*}, Sabriye Açıkgöz^{3*}, Mehmet Bağcı^{4*}

¹Yenar Döküm A.Ş., Orcid Id: 0000-0001-7837-3526, mehmet.solmaz70@gmail.com

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Orcid Id: 0000-0001-9441-5175, hkotanmbagci@erbakan.edu.tr

³Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Orcid Id: 0000-0002-2020-7565, sabriyeacikgoz@kmu.edu.tr

⁴Konya Teknik Üniversitesi, Orcid Id: 0000-0001-6934-8660, mbagci@ktun.edu.tr

* Sorumlu Yazar: mehmet.solmaz70@gmail.com; Tel.: +90 5547216098

(First received September 14, 2022 and in final form December 21, 2022)

2nd International Conference on Design, Research and Development
December 14 - 17, 2022

Reference: Solmaz, M., Kotan, H., Açıkgöz, S., Bağcı, M. Değirmen Valslerinin Mikroyapısal Karakterizasyonu ve Mekanik Testleri. Orclever Proceedings of Research and Development,1(1), 220-239.

Özet

Bu çalışma kapsamında taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) kullanılarak valslerin hem yüzeyleri hem de dış tabakadan iç tabakaya derinlemesine mikroyapısal karakterizasyonları gerçekleştirilmiş ve matris yapısı, karbür fazları ve grafit yapıları resmedilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanılarak mikroyapıda var olan karbür fazlarının çeşidi tespit edilmiştir. Uygun bölgelerden kesilen numuneler ile iç tabaka ve dış tabakanın yoğunlukları hesaplanmıştır. Mekanik testler kapsamında değirmen valsinin uygun bölgesinden tel erezyonla kesilerek hazırlanan numunelere sertlik testi, basma ve çekme testleri ile darbe testleri uygulanmıştır. Darbe testi sonucunda elde edilen kırılma yüzeyleri SEM ile analiz edilerek malzemenin kırılma karakteristikleri yorumlanmıştır. Son olarak gerek oda sıcaklığında gerekse yüksek sıcaklıkta (150 °C) aşınma testleri yapılarak vals yüzeyinin kullanım esnasında aşınmaya dayanımı farklı sıcaklıklar için tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Vals silindiri, sertlik, basma, çekme, darbe, OM, SEM, XRD.



Microstructural Characterization and Mechanical Tests of Mill Rolls

Abstract

In this study, using scanning electron microscope (SEM) and optical microscope (OM), microstructural characterizations of both the surfaces and deep microstructural characterization of the rolls were carried out from the outer layer to the inner layer and the matrix structure, carbide phases and graphite structures were depicted. The types of carbide phases present in the microstructure were determined using the X-ray diffraction (XRD) technique. The densities of the inner layer and the outer layer were calculated with the samples cut from the appropriate regions. Within the scope of mechanical tests, hardness test, compression and tensile tests and impact tests were applied to the samples prepared by cutting wire erosion from the appropriate area of the mill roll. The fracture surfaces obtained as a result of the impact test were analyzed by SEM and the fracture characteristics of the material were interpreted. Finally, wear tests were carried out at both room temperature and high temperature (150 °C), and the wear resistance of the roll surface during use was determined for different temperatures.

Keywords: Roller, hardness, compression, tensile, OM, SEM, XRD.

1. Giriş

Gıda değirmenlerinde kullanılan değirmen valsleri gıda ürünlerinin kırma ve öğütme işlemlerini gerçekleştirir ve gıda öğütücü sistemlerinin en önemli parçasıdır. Değirmen vals silindirlerinin bu öğütme işlemini homojen ve istenilen tane boyutunda yapabilmesi için belirli karakteristiklere ve özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Değirmen vals silindirlerinden istenilen bazı özellikler; yüksek yüzey aşınma dayanımı, yüzeyde homojen sertlik dağılımı, iç bölgeden yüzeye doğru düzgün sertlik artışı sayesinde darbe sönümlene yeteneği, radyal yüklere dayanım ve yüksek ısı iletimidir. Bu özellikleri yapısal olarak karşılayabilmesi için vals silindirlerinin üretimi çift kat savurma döküm yöntemiyle gerçekleştirilir. Savurma döküm yöntemi, metalik değirmen valslerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, düşük enerji tüketimi, daha az çevre kirliliği, basitlik ve yüksek verim gibi avantajlar sağlamaktadır. Vals değirmen topunun yapısını oluşturan bu çift katlı savurma döküm işleminde dış tabaka beyaz dökme demirden, iç tabaka ise gri dökme demirden oluşur. Dış katmanı oluşturan beyaz dökme demir yüzeyde aşınma dayanımını sağlarken iç katmanını oluşturan gri dökme demir yapı ise vals üzerine gelen radyal yüklere dayanım sağlamaktadır. Dış tabaka ile iç tabaka arasında oluşturulan geçiş tabakası ise sertliğin iç bölgeye gidildikçe

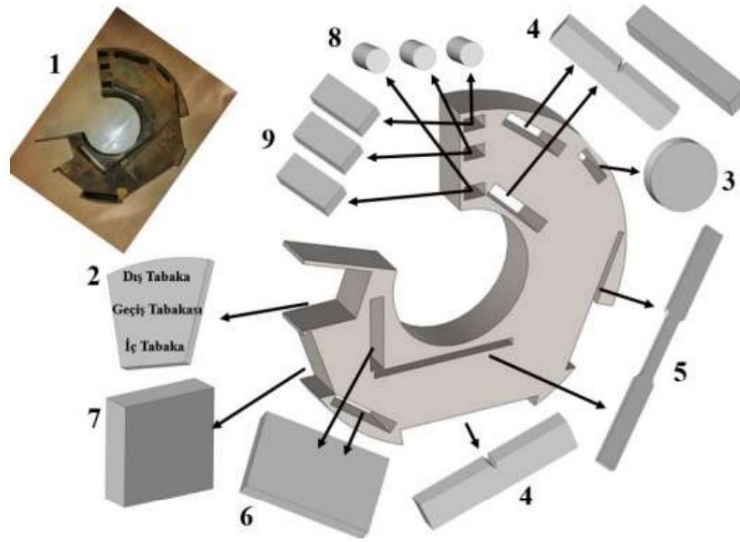


düzgün bir şekilde düşmesini sağlayarak dışarıdan gelen yükün ve mikro darbelerin sönümlenmesi sağlamaktadır.

Özellikle değirmen vals silindirlerinin en çok kullanıldığı endüstriyel bir tesis olan un fabrikaları, günün yirmi dört saati ve yılın neredeyse her günü kesintisiz olarak çalışmaktadırlar. Bu uzun ve sürekli çalışma şartlarında kırma ve öğütme valslerinin özellikleri ve bu özelliklerini kullanım şartlarında ve sürelerde muhafaza edebilmeleri çok önemlidir. Vals silindirinin aşınma dayanımı, öğütücü merdanelerin imalatında kullanılacak olan doğru malzemelerin seçiminde göz önünde bulundurulmuş en önemli parametredir. Merdanelerin aşınma dayanımı özelliklerinin oluşumunda ise sertlik, mikroyapı ve kimyasal kompozisyon önemli rol oynar. Bu nedenle, değirmen valslerinin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin bilinmesi ve kontrol edilmesi gerek üretim gerekse uygulama açısından son derece önemlidir. Bu çalışma kapsamında 250mm x 1000mm boyutlarındaki değirmen valslerinin mikroyapısal (Optik-Elektron mikroskobu ve X-ışını kırınımı analizleri) ve fiziksel (yoğunluk ölçümleri) karakterizasyonları ile mekanik testleri (sertlik, basma testi, çekme testi, aşınma testi, darbe testi) gerçekleştirilmiştir.

2. DeneySEL ve Test Çalışmaları

Bu çalışmada taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) kullanılarak valslerin hem yüzeyleri hem de dış tabakadan iç tabakaya derinlemesine mikroyapısal karakterizasyonları gerçekleştirilmiş ve matris yapısı, karbür fazları ve grafit yapıları resmedilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanılarak mikroyapıda var olan karbür fazlarının çeşidi tespit edilmiştir. Uygun bölgelerden kesilen numuneler ile iç tabaka ve dış tabakanın yoğunlukları hesaplanmıştır. Mekanik testler kapsamında değirmen valsinin uygun bölgesinden tel erezyonla kesilerek hazırlanan numunelere sertlik testi, basma ve çekme testleri ile darbe testleri uygulanmıştır. Darbe testi sonucunda elde edilen kırılma yüzeyleri SEM ile analiz edilerek malzemenin kırılma karakteristikleri yorumlanmıştır. Son olarak gerek oda sıcaklığında gerekse yüksek sıcaklıkta (150 °C) aşınma testleri yapılarak vals yüzeyinin kullanım esnasında aşınmaya dayanımı farklı sıcaklıklar için tespit edilmiştir. Aşağıdaki verilen Şekil 1’de değirmen vals merdanesinden kesilen parça ve bu parça üzerinden test ve karakterizasyon için tel erezyon ile alınan numuneler gösterilmiş ve numaralandırılmıştır.



Şekil 1. Değirmen vals merdanesinden kesilen parça ve bu parça üzerinden test ve karakterizasyon için telerezyon ile alınan numuneler gösterimi.

Şekil 1’de gösterilen numuneler tel erezyon ile kesilerek uygun metalografik numune hazırlama adımlarından geçirilmiş ve daha sonra Tablo 1’de verilen ilgili test ve karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır.

Tablo 1. Değirmen vals merdanesinden kesilen ve Şekil 1’de verilen numunelerin test ve karakterizasyon için kullanım amaçları

Numune 1	Vals topundan karakterizasyon ve test için kesilen ana numune
Numune 2	Derinlemesine (Dış tabaka-geçiş tabakası-iç tabaka) sertlik testi numunesi
	Derinlemesine (Dış tabaka-geçiş tabakası-iç tabaka) mikroskop (SEM ve OM) analiz numunesi
Numune 3	Yüzey X-ışını kırınımı analizi numunesi
	Yüzey sertlik numunesi
	Yüzey mikroskop (SEM ve OM) analiz numunesi
Numune 4	İç ve Dış tabaka için darbe testi numuneleri
Numune 5	İç ve Dış tabaka için çekme testi numuneleri
Numune 6	İç ve Dış tabakalar için yoğunluk hesabı numuneleri
Numune 7	Dış tabaka için aşınma numunesi
Numune 8	Dış tabaka, geçiş tabakası ve iç tabaka için basma testi numuneleri
Numune 9	Dış tabakan iç tabakaya kademeli olarak sertlik testi numuneleri



3. Bulgular ve Sonuçlar

3.1. Mikroyapısal Karakterizasyon

Değirmen vals malzemesinin Şekil 1’de gösterilen 2 ve 3 numaralı numuneleri metalografik olarak hazırlandı. Bu doğrultuda farklı boyutta zımpara kâğıdı kullanılarak numune yüzeyleri kademeli olarak zımparalandı ve parlatıldı. Daha sonra mikroskop incelemeleri öncesinde uygun kimyasal (nital) kullanılarak numune yüzeyleri dağlandı. Metalografik olarak hazırlanan numunelerin farklı büyütmelemlerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) incelemeleri ile mikroyapısal karakterizasyonu gerçekleştirildi. Ayrıca, X-ışını kırınımı (XRD) çalışmaları ile faz analizi yapılarak mikroyapıda var olan karbür fazlarının çeşidi de tespit edildi.

3.1.1. SEM ve OM Mikroyapı Görüntüleri

Metalografik olarak hazırlanan ve dağlanan numuneler önce OM ile mikroyapısal olarak incelendi. OM incelemelerinde 5x, 10x, 20x ve 50x büyütmelemler kullanıldı. Daha sonra, yüksek çözünürlüklü elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak 50x, 100x, 250x, 500x, 1000x ve 2000x büyütmelemlerde görüntüler alınarak malzeme mikroyapısı kapsamlı bir şekilde resmedilmiş oldu. Ayrıca, optik ve elektron mikroskobuyla gerçekleştirilen mikroyapısal karakterizasyon kapsamında hem valslerin yüzeyinden görüntü alındı (Şekil 1 – numune 3), hem de yüzeyden içeriye doğru derinlemesine görüntü alınarak (Şekil 1 – numune 2) dış tabaka-geçiş tabakası-iç tabaka detaylı olarak incelendi. Ayrıca, OM ve SEM ile elde edilen görüntüler ImageJ programı kullanılarak farklı büyütmelemler için analiz edildi ve mikroyapıdaki karbür faz oranı, matris faz oranı ve grafit faz oranı tespit edildi. Malzeme mikroyapısını temsil edecek şekilde seçilen uygun büyütmelemlerdeki mikroskop resimleri ve mikroyapıdaki faz oranlarının verildiği tablolar aşağıda görülmektedir.

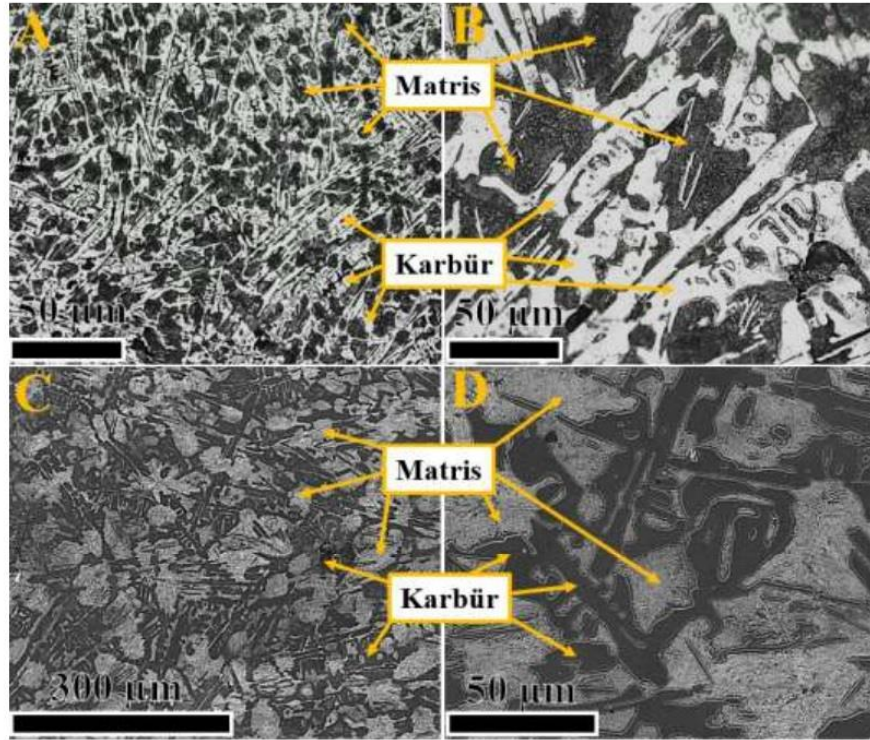
3.1.1.1. Vals Yüzeyinin Mikroyapısal Karakterizasyonu

Değirmen vals yüzeyinden (Şekil 1 – numune 3) yapılan mikroyapısal karakterizyon ile elde edilen OM ve SEM mikroskop görüntüleri Şekil 2’de, faz analiz sonuçları ise Tablo 2’de verilmektedir. Mikroskop resimlerinde yapılan incelemeler sonucunda mikroyapının perlitik matristen (ferrit + sementit) oluştuğu görülmektedir. Detaylı gerçekleştirilen mikroyapısal analizlerde mikroyapıda martenzit fazına rastlanmamıştır. Tablo 2’de verilen faz analizlerinde mikroyapının yaklaşık olarak %21 oranında karbür fazı (birincil ve ikincil karbürler) içerdiği tespit edilmiştir. SEM analizlerinde karbür faz

oranının fazla çıkmasının nedeni ise yüksek çözünürlükten dolayı perlit içi karbürlerin de tespit etmiş olmasıdır.

Tablo 2. Vals yüzeyinden alınan numunenin (numune 3) dış tabakaya ait matris – karbür faz analizi

%	Optik Mikroskop Analizi			Elektron Mikroskobu Analizi		
	Büyütme	Karbür	Matris	Büyütme	Karbür	Matris
Yüzey	5x	18	82	100x	29	71
	10x	20	80	250x	36	64
	20x	22	78	500x	32	68
	50x	26	74	1000x	32	68
Ortalama	---	21	79	---	32	68

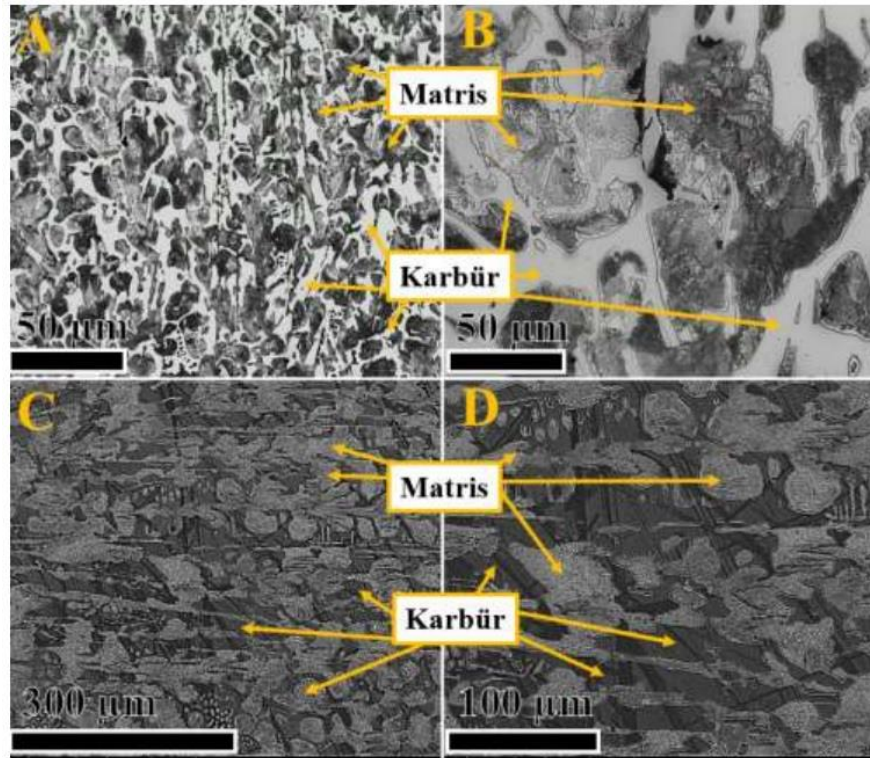


Şekil 2. Vals yüzeyinden alınan numunenin OM ve SEM görüntüleri. (A) – 10x büyütme, (B) – 250x büyütme, (C) – 50x büyütme, (D) – 1000x büyütme.

3.1.1.2. Vals Yüzeyinden Derinlemesine Mikroyapısal Karakterizasyon

Değirmen vals yüzeyinden derinlemesine (Şekil 1 – numune 2) yapılan mikroyapısal karakterizasyon ile dış tabakadan elde edilen OM ve SEM mikroskop görüntüleri Şekil 3’de, faz analiz sonuçları ise Tablo 3’de verilmektedir. Şekil 3’de verilen OM ve SEM

resimleri incelendiğinde mikroyapının perlitik matrsten (ferrit + sementit) oluştuğu görülmektedir. Detaylı gerçekleştirilen mikroyapısal analizlerde mikroyapıda martenzit fazına rastlanmamıştır. Tablo 3’de verilen faz analizlerinde mikroyapısının yaklaşık olarak %25 oranında karbür fazı (birincil ve ikincil karbürler) içerdiği tespit edilmiştir. SEM analizlerinde karbür faz oranının da yaklaşık olarak %28 olduğu görülmektedir. Şekil 2 ve Şekil 3’te verilen görüntüler değirmen valsinin dış tabakasına aittir. Bununla birlikte Şekil 2’de verilen görüntüler valsın yüzey bölgesinden dış, Şekil 3’de verilen görüntüler ise valsın dikey ekseninden derinlemesine olacak şekilde dış bölgesinden alınmıştır. Bu şekilde katılma yönüne hem dik hem de paralel olarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

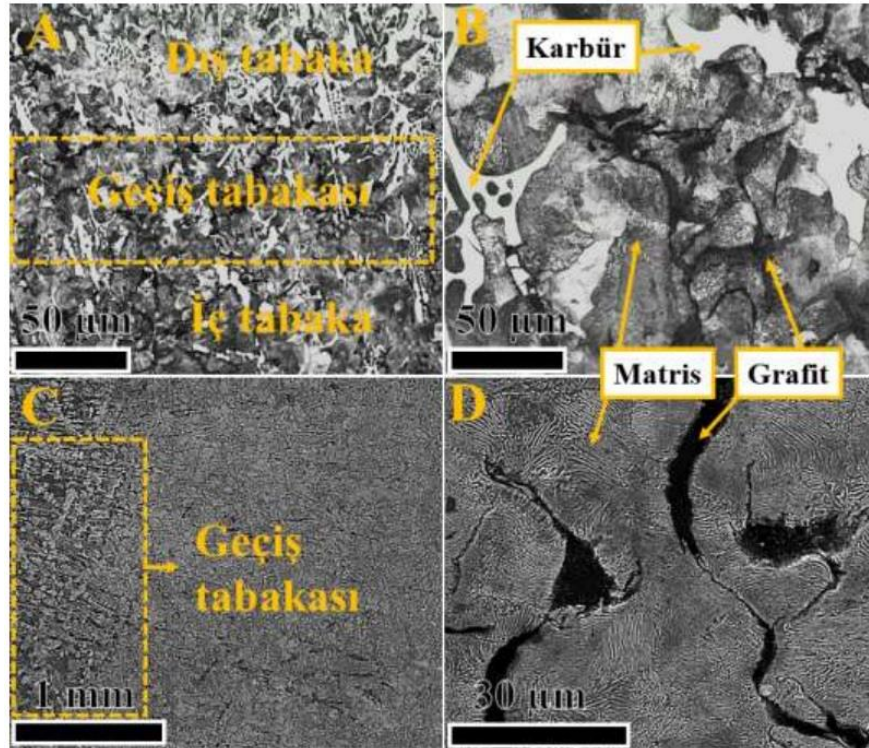


Şekil 3. Değirmen vals yüzeyinden derinlemesine yapılan mikroyapısal incelemede dış madene ait OM ve SEM görüntüleri. (A) – 10x büyütme, (B) – 50x büyütme, (C) – 250x büyütme, (D) – 500x büyütme.

Tablo 3. Vals yüzeyinden derinlemesine alınan numunenin (numune 2) dış tabakaya ait matris – karbür faz analizi

%	Optik Mikroskop Analizi			Elektron Mikroskobu Analizi		
	Büyütme	Karbür	Matris	Büyütme	Karbür	Matris
Dış Tabaka	5x	24	76	---	---	---
	10x	26	74	250x	29	71
	20x	29	71	500x	27	73
	50x	20	80	---	---	---
Ortalama	---	25	75	---	28	72

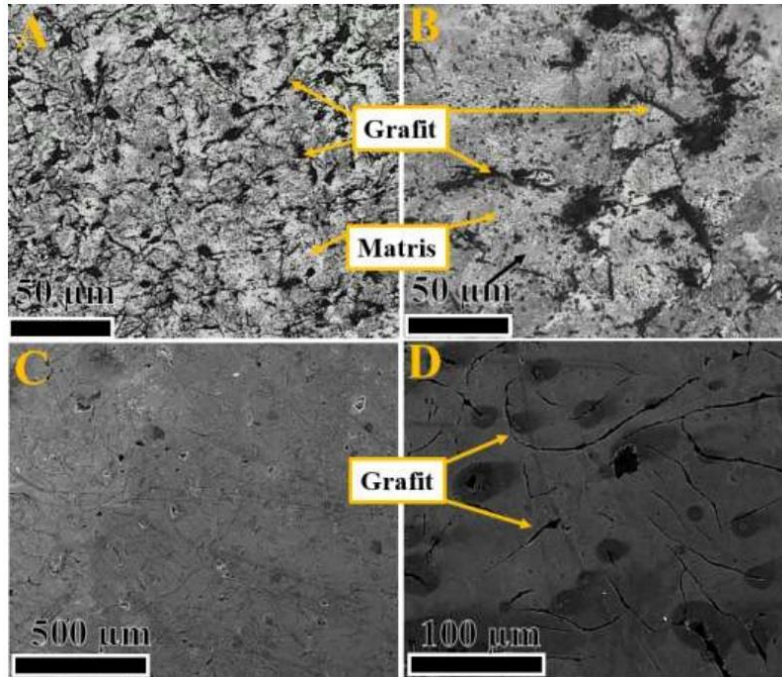
Vals yüzeyinden derinlemesine olarak alınan (Şekil 1 – numune 2) geçiş tabakasına ait mikroskop görüntüleri Şekil 4’te verilmektedir. Şekil 4 (A) ve (C) ile verilen görüntülerde dış maden – iç maden geçişi görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4 (B) ve (D) ile verilen görüntülerde ise matrisin perlitik yapıda olduğu ve mikroyapıda karbür fazlarıyla beraber iç kısma doğru gidildikçe grafit yapısının da oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4. Değirmen vals yüzeyinden derinlemesine yapılan mikroyapısal incelemede geçiş bölgesine ait OM ve SEM görüntüleri. (A) – 5x büyütme, (B) – 50x büyütme, (C) – 50x büyütme, (D) – 200x büyütme.

Şekil 5’te derinlemesine yapılan (Şekil 1 – numune 2) analizde iç tabakaya ait OM ve SEM görüntüleri verilmektedir. DIN EN ISO 945-1 standardına göre, lamel grafitli dökme demirlerde karşılaşılan grafit tipleri A, B, C, D ve E olmak üzere beş ana gruba ayrılmaktadır. Soğuma hızının çok yüksek olmadığı ve uygun şekilde aşlanmış dökme

demirlerde grafit yapısı A tipindedir. A tipi grafit yapısı yüksek mekanik özellikler sağlamaktadır ve bu nedenle valslerin üretiminden sonraki süreçte uygulanan kolların çakılması sürecinde kolların daha iyi kavranmasını sağlamaktadır. Döküm esnasında uygun olmayan aşılama ve hızlı soğuma sonucunda homojen olmayan B tipi grafit yapısı oluşmaktadır. Ötektik üstü kompozisyonların seçilmesi durumunda ise C tipi grafit yapısı oluşmaktadır. C tipi grafit yapısı yüksek grafit miktarına bağlı olarak iyi ısıl iletkenlik sağlasa da malzemenin gevrekliğini arttırarak dökme demirin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Lamel grafitli dökme demirlerin üretiminde hurdadan gelebilecek alüminyum ve titanyumun bulunmasıyla oluşan D ve E tipi lamel yapısı matris yapısını ferritik yapıya dönüştürerek iç tabakanın mekanik özelliklerini düşürmektedir. Şekil 5’de verilen ilgili görüntülerden mikroyapıda homojen olarak dağılmış ve rastgele yönelime sahip yapraklar şeklinde grafit yapısının oluştuğu görülmektedir. Dolayısıyla, iç tabaka mikroyapısı perlitik matristen ve A tipi grafit yapısından oluşmaktadır. Ayrıca, yapılan incelemelerde iç tabaka mikroyapısında yaklaşık olarak %9 oranında grafit olduğu görülmektedir.

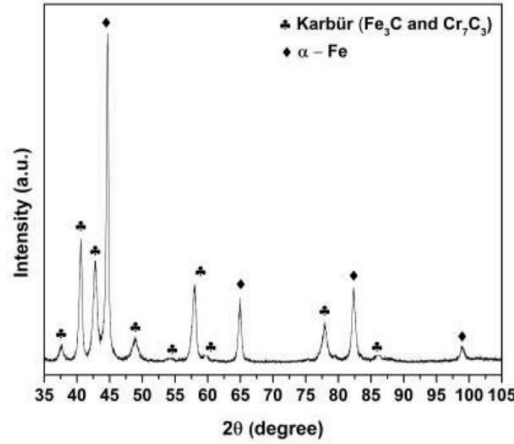


Şekil 5. Değirmen vals yüzeyinden derinlemesine yapılan mikroyapısal incelemede iç madene ait OM ve SEM görüntüleri. (A) – 10x büyütme, (B) – 50x büyütme, (C) – 100x büyütme, (D) – 500x büyütme.

3.1.2. XRD Analizleri

Değirmen valsı üzerinden tel erezyonla kesilen uygun numune (Şekil 1 – numune 3) kullanılarak yüzeyden (dış tabakadan) alınan XRD analiz sonuçları Şekil 6’da verilmektedir. XRD sonuçlarının analizi neticesinde dış tabakaya ait malzeme mikroyapısının α -Fe ve karbür fazlarından oluştuğu görülmektedir. Mikroyapıda tespit

edilen bu karbür fazları hem birincil hem de ikincil karbür fazlarını ihtiva etmektedir. XRD sonuçlarının detaylı analizi sonucunda karbür fazlarının ise Fe₃C ve Cr₇C₃ olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Değirmen vals yüzeyinden elde edilen XRD analizi. Temel Fe piklerinin yanına Fe₃C ve Cr₇C₃ karbür fazlarının da mikroyapıda olduğu görülmektedir.

3.1.3. Kimyasal Kompozisyon Analizleri

YENAR bünyesinde valslerin kimyasal kompozisyon analizleri yapılmıştır. İç ve dış tabakadan (numune 2) gerçekleştirilen kimyasal analiz sonuçları Tablo 4 ile verilmektedir. Alınan sonuçlarda %1'e yakın değerlerde Cu tespit edilmiştir. Özellikle dış maden de çıkan Cu miktarının tel erezyonla kesmeden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Kompozisyonda Cu bulunmaması gerektiğinden yapılan test tekrarlanmıştır. Ayrıca Si miktarının da dökümde yapılan analizden düşük çıktı görülmektedir. Daha sonra kesici taşla dış tabakadan numune kesilmiş ve kimyasal analiz gerçekleştirilmiştir. Tablo 5'te verilen bu değerlerin gerçek değerlere daha yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte spektrometrelerde tespit edilen karbon miktarı da gerçek değerlerinden sapma göstermektedir. Kimyasal analizde gerçek değerlere daha yakın olacak şekilde analiz yapabilmek için döküm esnasında dış ve iç madene ait sıvı metalden quick cup yöntemi kullanılarak örnek alınmış ve bu şekilde gerçekleştirilen spektral analiz değerleri (gerçek değerler) Tablo 6'de verilmiştir. Bu ölçümlerde dış ve iç madene ait karbon oranlarının yaklaşık olarak 3.44 seviyelerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Döküm esnasında dış ve iç madene ait sıvı metalden quick cup yöntemi kullanılarak alınan örneklere ait kimyasal analiz sonuçları

	Fe	C	Si	Cu	P	Mn	Ni	Cr	Mo
Dış	Bal.	3.44	0.76	0.09	0.16	0.62	0.43	1.04	0.13
İç	Bal.	3.4	2.21	0.01	0.05	0.6	0.02	0.06	0.01

3.2. Mekanik Testler

3.2.1. Sertlik Testleri

Değirmen vals malzemesinin dış tabaka, geçiş tabakası ve tabakanın sertlik değerleri Şekil 1’de gösterilen numune 2 kullanılarak yüzeyden içeri doğru derinlemesine olarak tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 7’de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 1’de gösterilen numune 9 kullanılarak da katılma yönüne paralel olacak şekilde yüzeyden içeriye doğru kademeli olarak sertlik değerleri ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 8’de verilmiştir. Sertlik testleri yapılmadan önce uygun numuneler zımparalanmış ve parlatılarak düz bir yüzey elde edilmiş ve her bölge için en az ortalama 3-5 değer alınarak sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri Brinell skalasında (2,5 mm çaplı metal bilye ve 187,5 kgf yük) elde edilmiştir. Elde edilen sertlik değerlerindeki vals yüzeyinden içeriye doğru olan değişim ise şekil 7’de gösterilmektedir.

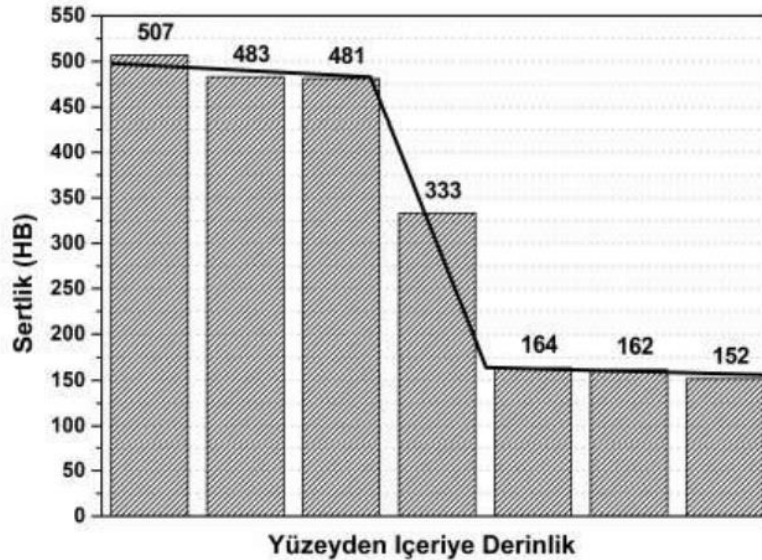
Tablo 5. Yüzeyden içeri doğru derinlemesine alınan sertlik değerleri

Sertlik (HB)	Derinlemesine Sertlik Ölçümü						Ortalama
Dış Tabaka	503	476	476	487	462	486	481
Geçiş Tabakası	330	330	361	309	-	-	333
İç Tabaka	160	158	167	164	161	-	162

Tablo 6. Katılma yönüne paralel ve içeriye doğru kademeli olarak alınan sertlik değerleri

Sertlik (HB)	Kademeli Olarak Derinlemesine Sertlik Ölçümü					Ortalama
Yüzey	507	506	508	-	-	507
V V V V V V	494	480	471	486	483	483
	486	481	484	488	474	483
	169	160	159	170	164	164
	147	155	152	153	153	152
	134	133	137	133	130	133
İç Tabaka	108	116	121	123	110	116

Şekil 7'den de görüleceği üzere vals yüzeyinin sertliği yaklaşık olarak 507 HB mertebesinde. Tespit edilen bu sertlik değeri katlaşmanın ilk başladığı bölgeden olduğundan dolayı içeri doğru gittikçe dış tabakada sertlikte bir miktar düşme yaşanmış ve dış tabakanın ortalama sertliği yaklaşık olarak 482 HB olarak tespit edilmiştir. Dış tabakadan içeriye doğru gittikçe sertlik kademeli olarak azalmış ve iç tabakanın sertliği ortalama olarak 160 HB civarına düşmüştür. Tablo 8'de sonuçları verilen kademeli olarak yüzeyden içeriye doğru alınan sertlik değerleri iç tabakanın merkeze yakın bölgelerinde sertliğin 116 HB seviyelerine kadar düştüğünü göstermektedir. Bu sertlik ölçümleri Şekil 1'de 9 numara ile verilen üç numunenin en alt bölgesinden, yani iç tabakanın merkeze en yakın bölgesinden alınmıştır. İç tabakada merkeze yakın bölgede tespit edilen bu düşük sertlik değerinin, daha sonraki süreçte çakılacak kollar dikkate alındığında uygulama açısından avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

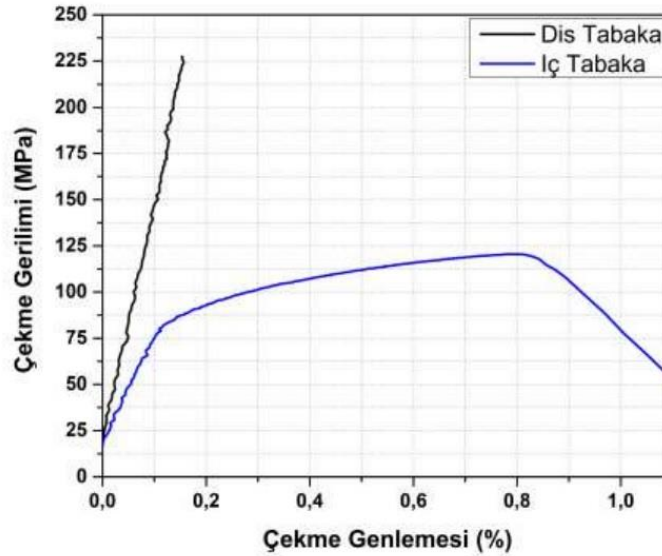


Şekil 7. Değirmen valsinin yüzeyden (dış tabaka) içeriye doğru (iç tabakaya) sertlik değerlerinin gösterimi.

Sonuç olarak, birincil ve ikincil karbür fazları barındıran ve beyaz dökme demirden oluşan dış tabakanın yüksek sertliği aşınma dayanımı sağlarken daha yumuşak olan iç tabaka ise vals üzerine gelen radyal yüklere dayanım sağlamaktadır. Ayrıca, Şekil 7'den de görüleceği üzere dış tabaka – geçiş tabakası - iç tabaka arasında oluşturulmuş ve sertliğin iç bölgeye gidildikçe düzgün bir şekilde düşmesini sağlayacak şekilde oluşturulmuş bu katmanlı yapı dışarıdan gelen yükün ve mikro darbelerin sönümlenmesi sağlayacaktır.

3.2.2. Çekme Testi

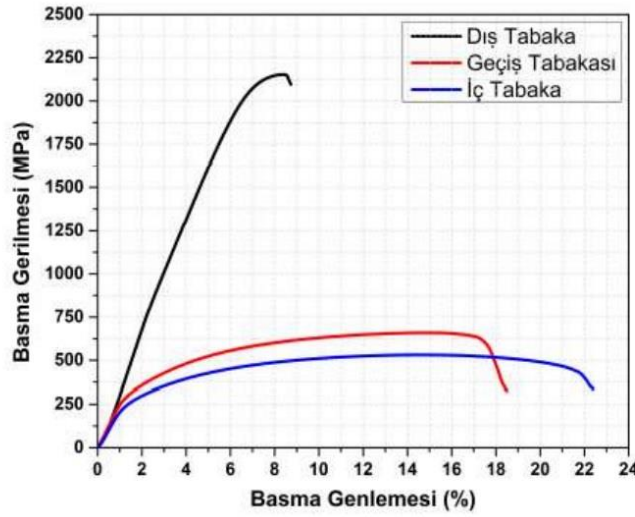
Çekme deneyi Şekil 1’de gösterilen bölgelerden TSE EN ISO 6892-1:2016 standartlarına göre alınan 5 numaralı numunelere uygulanmıştır. Deneyler 1 mm/dak çekme hızında ve oda sıcaklığında uygulanmıştır. Çekme deneylerine ait gerilme – genleme eğrileri Şekil 8’de verilmiştir. Grafik eğrilerinden de görüldüğü gibi özellikle dış tabakaya ait numune iç tabakayla kıyaslandığında daha yüksek çekme dayanımı (225 MPa) gösterse de belirgin bir akma meydana gelmemiştir. Beyaz dökme demir olan dış tabakaya ait numunenin akma göstermemesi beklenen bir sonuçtur. Diğer taraftan dış tabakayla kıyaslandığında perlitik matrise sahip olan lamel grafitli dökme demir yapısındaki iç maden de akma görülmektedir. Ayrıca, iç madenin çekme dayanımının da 120 MPa civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Dış ve iç tabakaya ait çekme testi sonucunda elde edilen gerilme – genleme grafikleri

3.2.3. Basma Testi

Basma testi, malzemelerin basma yükü altındaki davranışlarını belirlemek için kullanılan bir test yöntemidir. Uygulamada, basma kuvvetlerinin uygulandığı yerlerde kullanılan malzemeler genellikle gevrek malzemelerdir ve bu gruba giren dökme demirler de basma deneyi ile test edilirler. Çalışma kapsamında Şekil 1 – numune 8 ile gösterilen ve dış tabaka, geçiş tabakası ve iç tabakaya ait basma numuneleri te erezyon ile kesildikten sonra basma testi uygulanmıştır. Basma testi ASTM E9 standardına göre 3 mm çap ve 6 mm uzunluğundaki numunelere 1 mm / dakika hızlarda uygulanmıştır. Değirmen valsinin oluşturan farklı tabakalara ait basma testi sonuçları Şekil 9’da verilmiştir ve bu sonuçların birbirleri ile kıyaslanması çalışma kapsamında daha doğru bulunmuştur.

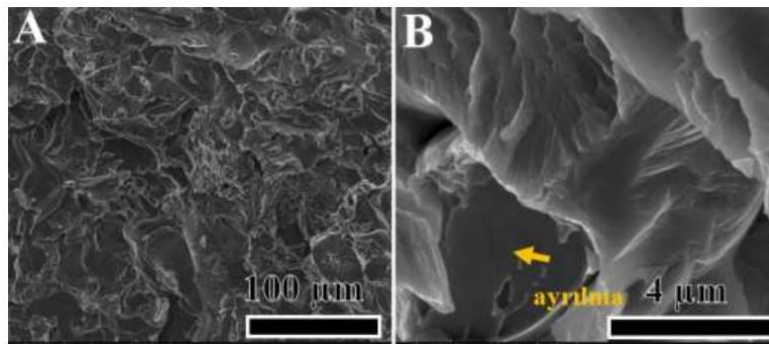


Şekil 9. Dış maden, geçiş bölgesi ve iç madene ait basma testi sonucunda elde edilen gerilme-genleme grafikleri. Şekil 9’da verilen gerilme – genleme eğrileri incelendiğinde beyaz dökme demir mikroyapısına sahip olan dış tabakanın yüksek dayanım sergilediği (yaklaşık olarak 2200 MPa) fakat bununla beraber mikroyapıda bulunan birincil ve ikincil karbür fazlarından dolayı şekil değiştirmesinin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, gri dökme demir mikroyapısına sahip iç tabakanın daha iyi şekil değiştirme yeteneğine sahip olduğu, bununla birlikte dayanımının yaklaşık olarak 500 MPa değerlerine düştüğü (dış tabakanın $\frac{1}{4}$ mertebelerine) görülmektedir. Son olarak geçiş tabakasına uygulanan basma testi sonuçları dış tabakayla iç tabaka arasında özellikler göstermekle birlikte beklendiği üzere iç tabakaya daha yakındır. Elde edilen bu katmanlı yapıdan dış katmanın yüksek dayanımda olması aşınma dayanımı sağlarken daha düşük dayanımlı fakat daha yüksek genleme değerine sahip iç tabakanın radyal yüklere dayanım sağlaması beklenmektedir. Dayanım ve şekil değiştirme değerleri dış tabaka ile iç tabaka arasında olan geçiş tabakası ise dışarıdan gelen yükün sönümlenmesini sağlamaktadır.

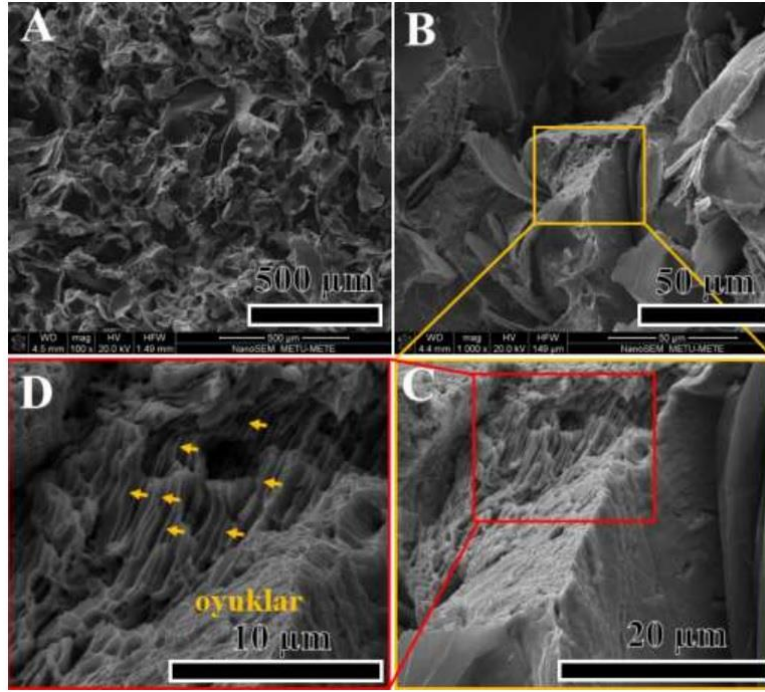
3.2.4. Darbe Deneyleri

Basma ve özellikle çekme testlerinde numunelerin süneklikleri oldukça düşük çıkmıştır ve dış tabakayı oluşturan beyaz dökme demir ve iç tabakayı oluşturan gri dökme demir düşünüldüğünde bu beklenen bir durumdur. Oldukça gevrek davranış gösteren dış tabaka ve iç tabakanın darbe dayanımlarının tespiti için oda sıcaklığında darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyinin yapılaş amacı, gevrek karaktere sahip olan dış tabaka ve iç tabakanın darbe dayanımlarının ölçülmesidir. Deney sonuçlarının yorumlanması ile dinamik yüklere karşı iç ve dış tabakaların kırılma enerji değerleri, kırılma davranışları ve sünek-gevrek karakterleri belirlenebilir. TS EN ISO 148-1 standardında belirtilen boyutlarda hazırlanan numuneler çentikli ve çentiksiz olarak test cihazı üzerindeki tablaya yerleştirilmiştir. Belli bir yükseklik ve açıyla malzemenin

üzerine bırakılan çekicin başlangıçtaki yüksekliği ile numuneyi kırdıktan sonraki ulaştığı yükseklik arasındaki potansiyel enerji farkı malzemenin darbe dayanımını ortaya koymaktadır. Valslerin Şekil 1’de 4 numara ile gösterilen bölgelerinden alınan numunelere oda sıcaklığında uygulanan darbe deneyleri (Charpy Impact test) sonuçlarına göre dış tabakanın kırılma enerjisi yaklaşık olarak 1,035 Joule iken iç tabakanın kırılma enerjisi yaklaşık olarak 2 Joule olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerler özellikle metalik malzemeler için oldukça düşük olmakla birlikte dökme demirlerin gevrek olan karakterleri düşünüldüğünde kırılma enerjilerinin de düşük olması beklenmektedir. Ayrıca, darbe testleri sonucunda kırılma yüzeyleri SEM ile analiz edilmiştir. Dış tabakaya ait kırılma yüzeyini gösteren Şekil 10’dan da anlaşılacağı üzere dış tabakanın kırılması gevrek kırılmanın karakteristiği olan ayrılma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Dış tabakaya ait mikroyapıda gerek birincil gerekse ikincil karbür fazlarının oluştuğu Şekil 6’da verilmişti. Mikroyapıda var olan bu karbür fazlarının malzemeyi gevrekleştirdiği bilinmektedir. İç tabakaya uygulanan darbe deneyi sonucunda oluşan kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 11’de verilmektedir. Şekil 11 (A) düşük büyütmelerde kırılma yüzeyinin genel görüntüsünü vermekte iken Şekil 11 (B)’de işaretlenen kısım daha büyük büyütme ile Şekil 11 (C)’de, Şekil 11 (C)’deki işaretlenen bölge ise daha büyük büyütmede Şekil 11 (D)’de verilmiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde iç tabakaya ait numunenin de genel olarak gevrek karakter gösterdiği görülmektedir. İç tabakada (gri dökme demir) sivri, keskin köşeli ve birbirleri ile bağlantılı olan grafitler ayrıca çentik etkisi yaparak darbe dayanımını düşürdüğü düşünülmektedir. Bununla birlikte mikroyapıda gerçekleştirilen detaylı incelemelerde, kesme yönünde uzamaların – oyukların meydana geldiği ve bunun da dış tabakayla kıyaslandığında az da olsa sünek karaktere katkı sağladığı görülmektedir.



Şekil 10. Dış tabakaya ait farklı büyütmelerdeki kırılma yüzey görüntüleri

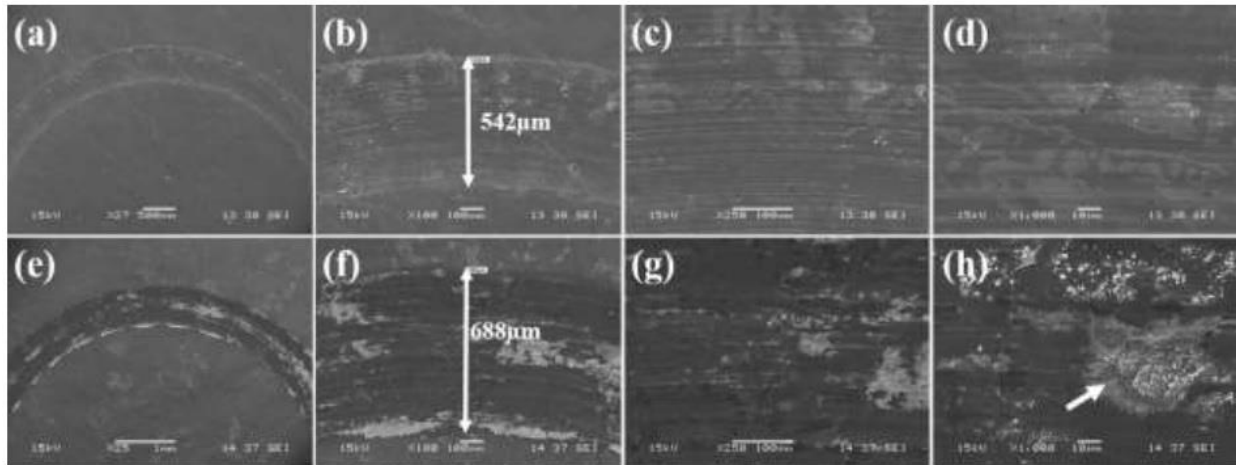


Şekil 11. İç tabakaya ait farklı büyütmelelerdeki kırılma yüzey görüntüleri

3.2.5. Aşınma Testleri

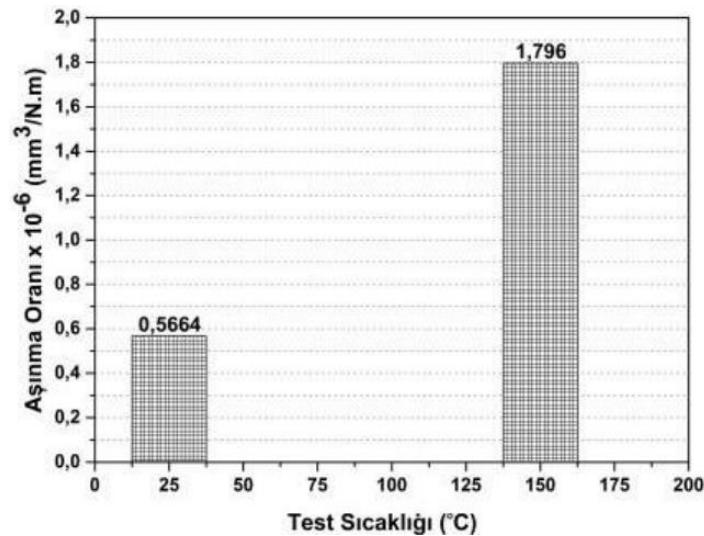
5 N yük ve 500 m mesafe için aşınma testi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, aynı şartlar kullanılarak aşınma testi yüksek sıcaklıkta (150 °C) da gerçekleştirilerek kullanım şartlarında vals üzerinde artan sıcaklığın aşınma dayanımına etkisi de araştırılmıştır.

Aşınma sonrası aşınma yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve görüntüler Şekil 12 'de verilmiştir. Şekil 12 (a-d) oda sıcaklığındaki aşınma yüzeylerini, Şekil 12 (e-h) ise 150 °C sıcaklıktaki aşınma yüzeylerini göstermektedir. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde özellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen aşınma sonrası yüzeyin bölgesel olarak yivli olduğu görülmektedir. Bununla birlikte oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma sonrası yüzey daha homojendir.

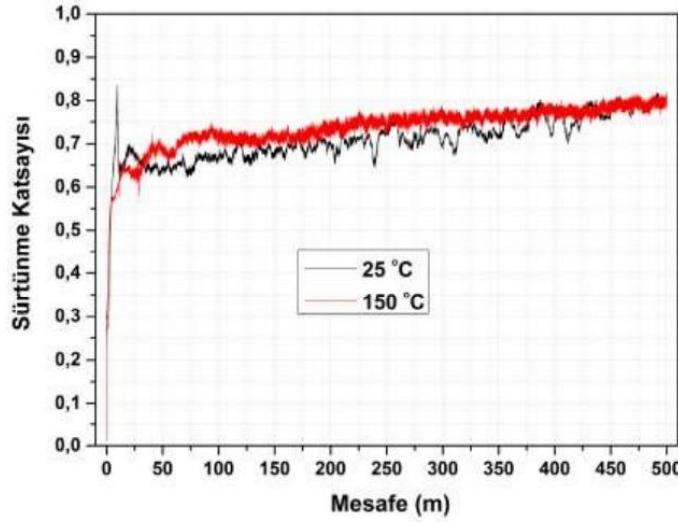


Şekil 12. Aşınma sonrası SEM ile görüntülenen aşınma yüzeyleri. (a-d) oda sıcaklığındaki aşınma yüzeylerini, (e-h) 50 °C sıcaklıktaki aşınma yüzeyleri.

Farklı sıcaklıklarda 500 m mesafe boyunca gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda hesaplanan aşınma oranları Şekil 13’de verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma testi sonucunda elde edilen aşınma oranı $0,5664 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / \text{N.m}$ iken aşınma test sıcaklığının 150 °C ye çıkmasıyla aşınma oranının da $1,796 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / \text{N.m}$ seviyelerine çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla aşınma test sıcaklığının valslerin aşınmasında etkili olduğu ve artan test sıcaklığı ile birlikte aşınma miktarının da arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 14’de iki farklı test sıcaklığı için aşınma mesafesine bağlı olarak değişen sürtünme katsayısı değerleri verilmektedir. Genel olarak farklı sıcaklıklarda yapılan aşınma testlerinde sürtünme katsayılarında önemli bir değişiklik görülmemektedir. Bununla birlikte aşınma mesafesi arttıkça her iki sıcaklık için de sürtünme katsayılarının arttığı fakat 500 m’lik aşınma testi boyunca sabit duruma ulaşmadıkları görülmektedir.



Şekil 13. Test sıcaklığına bağlı olarak elde edilen aşınma oranları



Şekil 14. Test sıcaklığına bağlı olarak elde edilen sürtünme katsayıları

3.3. Fiziksel Karakterizasyon

3.3.1. Yoğunluk Ölçümleri

Değirmen vals malzemesinin Şekil 1’de gösterilen 6 numara ile verilen dış tabaka ve iç tabakayı temsilen uygun ebatlarda numuneler kesilmiştir. Daha sonra bu numune yüzeyleri zımparalanmış ve parlatılarak düzgün yüzey elde edilmiştir. Numune boyutları kumpas ile hassas bir şekilde ölçüldüğünde dış tabakanın 5,5x3,265x1,008 cm ve iç tabakanın 5,494x3,246x0,995 cm ölçülerinde olduğu tespit edilmiştir. Numune ağırlıkları ise hassas terazi ile hassas bir şekilde tartılmış ve dış tabaka ağırlığı 138,959 g, iç tabaka ağırlığı ise 126,767 g olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar dış tabaka yoğunluğunun 7,6768 g/cm³ ve iç tabaka yoğunluğunun 7,144 g/cm³ olduğunu göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

YENAR Döküm firması özelinde endüstriyel uygulanabilirliğe yönelik katkının sorgulandığı deneysel çalışmaların bütününde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Vals silindirlerinin farklı bölgelerindeki etkinlik analizlerinin önemi ortaya konulmuş olup temel testlerin oluşturulabilmesine doğrudan katkı sağlanarak üretim detaylarından elde edilen farklılıklar irdelenmiştir.
- Vals yüzeyi perlitik matrsten oluşarak martenzit fazına rastlanmamış ve mikroyapı yaklaşık olarak %20-30 aralığında karbür fazı içermiştir.
- Mikroyapıda tespit edilen karbür fazları hem birincil hem de ikincil karbür fazlarını ihtiva etmiş olup XRD sonuçlarına göre karbür fazlarının Fe₃C ve Cr₇C₃ olduğu belirlenmiştir.



- Sertlik testlerinin belirlenmesinde Brinell skalası tercih edilerek (2,5 mm çaplı metal bilye ve 187,5 kgf yük) dış tabaka ile iç katman yönelimine ait sertlikteki değişim verileri elde edilmiştir.
- TSE EN ISO 6892-1:2016 standartları kapsamında çekme testleri önceliklendirilmiş olup deneyler 1 mm/dk çekme hızında ve oda sıcaklığında uygulanmıştır.
- Basma testi içeriği ise ASTM E9 standardına göre 3 mm çap ve 6 mm uzunluğundaki numunelere 1 mm/dk hız etkisinde sağlanmıştır.
- TS EN ISO 148-1 standardı yetkinliğinde çentikli ve çentiksiz Charpy Impact test sonuçlarına göre dış tabakanın kırılma enerjisi yaklaşık olarak 1,035 Joule iken iç tabakanın kırılma enerjisi yaklaşık olarak 2 Joule olarak tespit edilmiştir.
- Aşınma durumuna ait incelemelerde ise 5 N yük ve 500 m mesafeli oda sıcaklığı uygulamalarına ilave olarak (150 °C) değerlerinde de aşınma dayanımına etki irdelenmiştir.
- Vals silindirlerinin yapısının revizyonu amacıyla (Ti, Nb, V) etkilerindeki değişkenliklere ait yüzey aşınma dayanımı ve sertliği üzerine çalışmaların anlamlılığı üzerine odaklanılmıştır.

5. Teşekkür

Çalışma sürecinde büyük katkılarından ötürü değerli hocalarım Prof. Dr. Hasan Kotan, Doç. Dr. Sabriye Açıkgöz ve Doç. Dr. Mehmet Bağcı' ya ve YENAR Döküm A.Ş. ye şükranlarımı sunarım.

Referanslar

- [1] J.Halling. (1960). A Crossed-Cylinder Wear Machine and Its Use In The Study Of Severe Wear Of Brass on Mild Steel. *Wear*, 22-30.
- [2] Jiang, Jiaren, Stott, F.H. and Stack M.M., May 2004, "A Generic Model For Dry Sliding Wear Of Metals At Elevated Temperatures", *Wear*, Volume 256, Issues 9-10, Pages 973-985.
- [3] Koç R., Bilgisayar Kontrollü Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi (TİMAK-2010), 11-12 Kasım, Balıkesir, Türkiye, 2010
- [4] Miyajima, T., Iwai, Y., August-September 2003, "Effects Of Reinforcements On Sliding Wear Behavior Of Aluminum Matrix Composites", *Wear*, 255 (1-6), Pages 606-616.
- [5] PLINT Tribology Products from Phoenix Tribology Ltd. (2017, 07 15). Phoenix Tribology Ltd: <http://www.phoenixtribology.com/> adresinden alındı.



- [6] Prasad, B.K., July 2004, "Sliding Wear Behaviour Of Bronzes Under Varying Material Composition, Microstructure And Test Conditions", *Wear*, 257 (1-2), Pages 110-123.
- [7] Ramalho, A. (2006). A geometrical model to predict the wear. *Wear*, 775-780.
- [8] Scherge, M., Shakhvorostov, D., and Pöhlmann, K., August-September 2003, "Fundamental Wear Mechanism Of Metals", *Wear*, Volume 255, Issues 1-6, Pages 395-400.
- [9] Shorowordi, K.M., Haseeb, A.S.M.A. and Celis, J.P., June 2004, "Velocity Effects On The Wear, Friction And Tribochemistry Of Aluminum MMC Sliding Against Phenolic Brake Pad", *Wear*, Volume 256, Issues 11- 12, Pages 1176-1181.
- [10] Siniawski, M. T. (2006). A universal wear law for abrasion. *Wear*, 883-888.