

Yüksek Karbonlu Sinterlenmiş Çeliklerin Darbe Tokluklarına Küreselleştirme Isıl İşlemlerinin Etkisinin İncelenmesi

Onur ALTUNTAŞ¹ ve Ahmet GÜRAL*²

¹Gazi Üniversitesi Atatürk M.Y.O. Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ANKARA

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, ANKARA

(Geliş / Received : 20.09.2014 ; Kabul / Accepted : 11.11.2014)

ÖZ

Yüksek karbonlu toz metalurjisi çeliklere iki farklı yöntemle küreselleştirme ısıl işlemleri uygulanmıştır. Bu amaçla, NC100.24 saf demir tozlarına ağırlıkça % 0,9 doğal grafit ilave edilmiş ve ASTM E-23 standardına uygun ölçüde bir kalıpta oda sıcaklığında 5x10x55 mm³ boyutunda 700 MPa basınçta sıkıştırılmış ve daha sonra koruyucu gaz atmosferi altında 1180 °C'de sinterlenmişlerdir. İlk olarak, lamelli sementit fazlarının küreselleştirme işlemi sinterlenmiş parçalarda A_{c1} ötektoid sıcaklığının altında 705 °C'de 5 saat süreyle uygulanmıştır. İkinci küreselleştirme yönteminde ise sinterlenmiş numuneler öncelikle 850 °C'de 6 dk östenitlenmiş ardından mikroyapıda tamamen martenzitik yapı sağlamak amacıyla oda sıcaklığındaki su ortamında su verilmiştir. Martenzitik yapıya sahip numunelerde ince küresel sementit dağılımı sağlamak için, numuneler 505 °C ve 705 °C'de 5 saat sürede ayrı ayrı tavlansınmışlardır. Bu küreselleştirme işlemleri sonunda sertlik ve tokluk arasında doğrudan bir ilişki olmadığı, ancak tokluğun mikroyapıdaki sementit dağılımı ve morfolojisi ile daha ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Sertlik ve tokluk bakımından martenzitik yapıdan küreselleştirilen numunelerin özelliklerinin klasik küreselleştirme yöntemine göre daha üstün gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: Küreselleştirme ısıl işlemi, Toz metal çelik, Darbe özellikleri, Sementit

Examining Effect of Spheroidization Heat Treatments on Impact Toughness of High Carbon Sintered Steel

ABSTRACT

Spheroidization heat treatments by two different routes were performed on the high carbon powder metallurgy steels. For this purpose, 0.9 % in wt. natural graphite was admixed to NC100.24 pure iron powder and compacted in 5x10x55 mm³ size under 700 MPa pressure at room temperature in a die congruent with ASTM E-23 standard and then sintered at 1180 °C under protective gas atmosphere. Firstly, spheroidization proces of lamellae cementite phases was practiced at 705 °C for 5 hours below A_{c1} eutectoid temperature in the sintered parts. In the second spheroidization route, the sintered specimens were firstly austenitized at 850 °C for 6 min and then immediately quenched in water medium at room temperature to obtain fully martenzitic structure in the microstructure. Then, to produce fine spherical cementite dispersion in the specimens having martenzitic structure, the specimens were annealed at 505 °C and 705 °C temperatures for 5 hours separately. At the end of these spheroidization treatments, it was understood that there wasn't a direct relation between hardness and impact toughness; however, the toughness was more related to morphology and dispersion of cementite in the microstructure. In terms of hardness and impact toughness, properties of specimens spheroidized from martenzitic structure were higher in comparison to classical spheroidization route.

Keywords: Spheroidization heat treatment, Powder metal steel, Impact properties, Cementite

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toz metalurjisi ile üretilmiş gözenekli yapıdaki metal parçalara mekanik performansları artırmak için geleneksel ısıl işlemler uygulanabilir. Bu ısıl işlemlerin başında metallerin aşınma dayanımını da artırmak için yapılan su verme işlemi gelir [1,2]. Ancak bu işlemler çeliklerde önemli oranda sertlik kazandırırken, içerdikleri mevcut gözeneklerle beraber süneklikteki ciddi kayıptan dolayı gevrekliğe neden olmaktadır. Çeliklere uygulanan ısıl işlemlerden biri de işlenebilirlik, süneklik, darbe özelliklerinin gelişimine

önemli katlılar sağlayan küreselleştirme ısıl işlemidir.

Küreselleştirme ısıl işlemi, çelikleri A_{c1} sıcaklık çizgisi civarında uzun süre tutuktan veya bu sıcaklığın hem altında ve hemen üstünde salımlı olarak tavladıktan sonra, yavaş soğutma ile karbürlerin küresel şekle dönüştürülmesi işlemidir. Tavlansınmış durumdaki ötektoid üstü çelikler mikroyapılarında sert ve gevrek sementit fazlarının genellikle kesintisiz bulunması nedeniyle işlenmeye elverişli değildir. Bu tür çeliklerin işlenmesini kolaylaştırmak ve sünekliğini artırmak amacıyla da küreselleştirme ısıl işlemi uygulanır [3]. Ayrıca bu ısıl işlem, farklı kimyasal bileşimlere sahip orta ve yüksek karbonlu pek çok çeliklerde farklı

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: onuraltuntas@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2015.18.23, 107-112

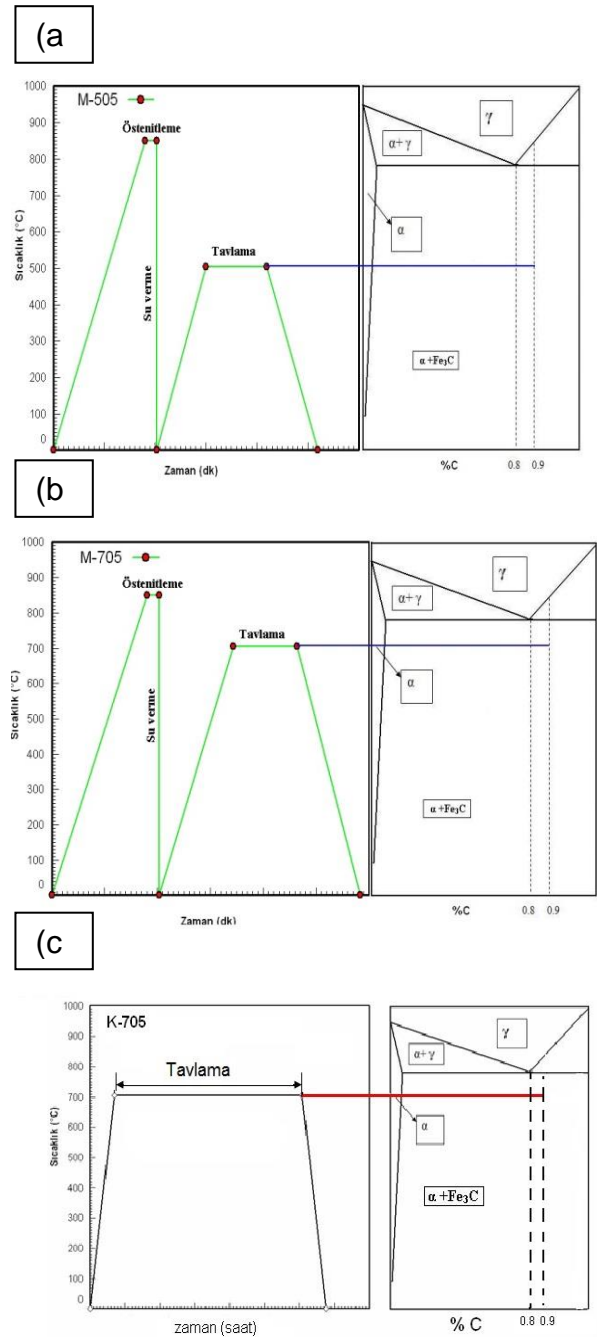
özellikler geliştirilmesinde de kullanılmıştır. Küreselleştirme işlemi uygulanmış Ç52100 (AISI52100, 100Cr6) rulman çeliklerinin işlenmesinde takım aşınması azaltılmış [4], Cr – V'lu, SAE1050 ve AISI W1 çeliklerinde darbe toklukları artırılmıştır [5-7].

Başlangıç mikroyapısı birincil ferrit-perlit veya birincil sementit-perlit olan çeliklerde sementitlerin küreselleştirilmesi için oldukça uzun zaman almaktadır. Bununla beraber başlangıç mikroyapısı martenzitik olan çeliklerde ise aşırı temperleme sonunda sementit parçacıklarının genellikle küre biçiminde çökeldiği bilinir [8]. Karbon atomlarının aşırı doymuş hacim merkezli tetragonal kristal yapıya sahip kararsız martenzit, yüksek temperleme sıcaklıklarında sementit oluşumu için itici kuvvet olmaktadır. Yoğun dislokasyon içeren çita ve plaka sınırları arasında kalan arayüzey enerjisi ferritin tane büyümesi veya çökelen sementitin boyut ve morfolojisine katkı sağlamaktadır [9,10]. Ancak yapılan çalışmalar [11], küreselleştirme işlemi uygulanan çeliklerin mekanik özelliklerinin ısı işlem çevrimleri sonundaki mikroyapı dönüşüm kinetiklerinden etkilendiği gibi, özellikle çökelen sementitin bulunduğu konum ve biçiminden de etkilendiğini göstermiştir.

Bu çalışmada ise, yüksek karbon içeren toz metalürjisi çeliklere özellikle tokluk direncinin geliştirilebilmesi için farklı başlangıç mikroyapılarına göre küreselleştirme ısı işlemleri uygulanmış ve sementit fazlarının küreselleştirilebilme davranışlarına bağlı olarak sertlik-darbe tokluk özellikleri belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneysel çalışma için Höganäs AB firması tarafından üretilmiş NC 100.24 saf demir tozlarına ağırlıkça % 0.9 grafit ilave edilmiştir. Hazırlanan bu karışım tozları 700 MPa basınçta oda sıcaklığında tek eksenli presleme ile ASTM-E23 standardına göre 5x10x55 mm darbe test numunesi olacak şekilde şekillendirilmiş ve bu numuneler 1180 °C de Argon gaz atmosfer kontrollü fırında sinterlenmişlerdir. Sinterlenen numunelere *M-505*, *M-705* ve *K-705* olarak kodlanan üç farklı küreselleştirme ısı işlem çevrimleri uygulanmıştır. *M-505* olarak kodlanan numunelere öncelikle 850 °C de 6 dk östenitleme, ardından su verilerek martenzitik yapı oluşumu sağlanmış daha sonra 505 °C de izotermal tavlama yapılmıştır. *M-705* olarak kodlanan numunelere yine 850 °C de 6 dk östenitleme, ardından su verme işleminden sonra küreselleştirme işlemi 705 °C'de yapılmıştır. Son olarak klasik küreselleştirme işlemi olan ve *K-705* olarak kodlanan numuneye sinterleme işlemi sonrası doğrudan 705 °C'de izotermal küreselleştirme tavlama uygulanmıştır. Numunelerin tümünde küreselleştirme işlemleri için toplam 5 saat izotermal tavlama süresi uygulanmıştır.



Şekil 1. (a) M-505, (b) M-705, (c) K-705 numunelerinin ısı işlem grafikleri (Heat treatment graphics of (a) M-505, (b) M-705, (c) K-705 specimens)

Mikroyapıların açığa çıkarılması için klasik metalografi işlemleri uygulanmış, numuneler % 2'lik Nital solüsyonu ile dağlanmışlar ve elde edilen mikroyapı görüntülemesi JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir. Mikroyapıda çökelen karbürler ise Bruker Marka D8 Advanced özellikteki XRD cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Prob olarak Cuka, $\lambda=1.5406$ ve tarama hızı da 1°/dak.'dır.

Numunelerin Vickers sertlik ölçümleri Shimadzu Sertlik cihazında 2 kg yük kullanılarak, her bir numune için en az 5 farklı noktadan sertlik değeri alınarak ortalama HV2 değerleri tespit edilmiştir.

ASTM E-23 standardına göre hazırlanmış darbe numunelerinin testleri, Instron –Wolpert marka darbe cihazında standartlara uygun olarak çentik açılmadan gerçekleştirilmiştir. Darbe test numunelerini kırmak için 150 J kapasiteli çekiç kullanılmıştır. Tüm testler aynı şartlarda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Darbe tokluk deneyinde her bir ısıl işlem için en az 3 numune kullanılmıştır ve elde edilen verilerin ortalaması ile standart sapması hesaplanarak darbe tokluğu değerleri elde edilmiştir.

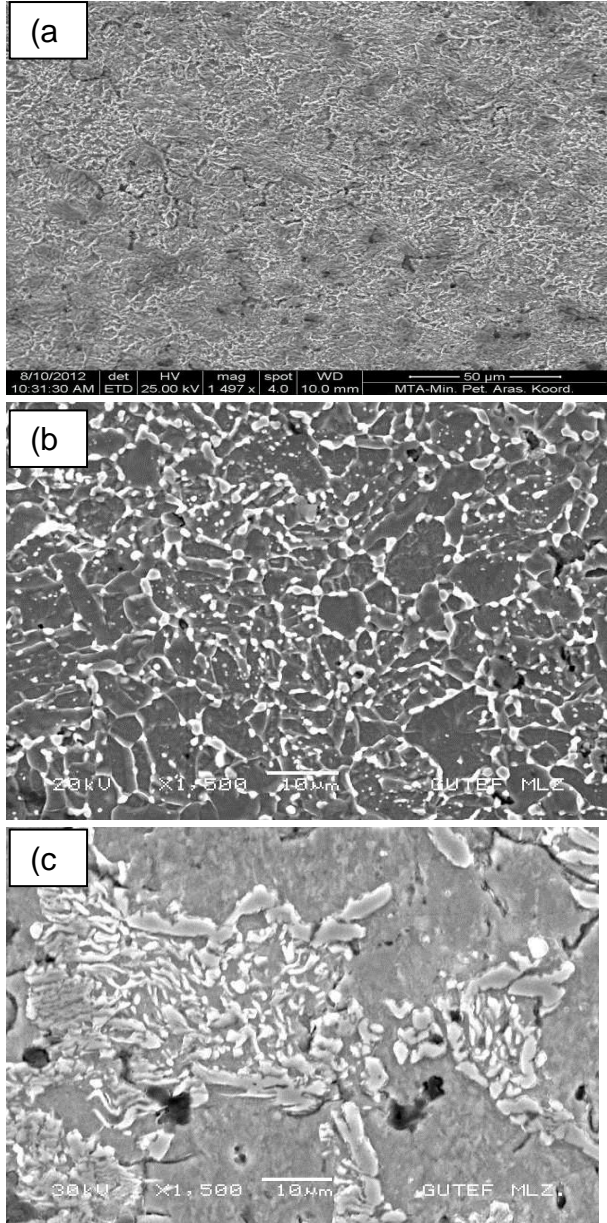
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mikroyapı (Microstructure)

Aynı şartlarda sinterlenmiş tüm numunelere, deneysel çalışmalar bölümünde açıklandığı gibi küreselleştirme işlemleri yapılmıştır. Farklı yöntemlerle uygulanan küreselleştirme ısıl işlemleri sonrası numunelerin mikroyapıları karşılaştırmalı olarak Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1a’da *M-505* numunesinin SEM mikroyapısı verilmiştir. Bu numuneye tamamen östenitleme işlemi sonrası su verilerek elde edilen martenzitik yapının ardından 505 °C’de 5 saat küreselleştirme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonunda *M-505* numunesinin mikroyapısında iğnemi martenzit plakaların bozulmaya başladığı anlaşılmaktadır. Ancak, martenzitik yapıdan dönüşmesi beklenen sementit fazlarının oluşumu ve küreselleşmesinin tam anlamıyla gerçekleşmediği görülmektedir. Şekil 1b’de ise östenitleme sıcaklığından su verme işlemi uygulandıktan sonra 705 °C’de 5 saat küreselleştirme uygulanmış *M-705* numunesinin mikroyapısı verilmiştir. Bu numunede su verme sonrası martenzit plakalarının tamamen kaybolduğu, yerine çok ince ve oldukça küre biçimli olduğu söylenebilen sementit parçacıklarının oluşumu görülmektedir. Bu kadar kısa sürede ince biçimde küreselleşme eğiliminde olmasının temel nedeni şu şekilde açıklanabilir. Küreselleştirme öncesi su verilen numunede tamamen martenzitik yapılar elde edildi. Özellikle bu denli yüksek C’lu çelikte oluşan martenzitik biçimi yoğun plakalar halindedir. Yüzey merkezli kübik östenitten tetragonal martenzite dönüşüm sırasında kristal kafes yapının çok hızlı çarpılmasından kaynaklanan plakalar arasında çok yoğun dislokasyon varlığı ve yoğun kristal düzensizliği söz konusudur [3]. Bu nedenle bu numuneler (*M-505*, *M-705*) de küreselleştirme sıcaklığında tavlandığında martenzit plakaları arasında sementitlerin çekirdeklenmesi için gereken potansiyel yer sayısının artması ve sementitin oluşum kinetiği ve büyümesinde oldukça etkili olmaktadır. Ancak *M-705* numunesi *M-505* numunesi ile karşılaştırıldığında 505 °C sıcaklıkta 5 saatlik sürenin yeterli olmadığı açıkça görülmektedir. Şekil 1c’deki *K-705* numunesi incelendiğinde, *M* serisi

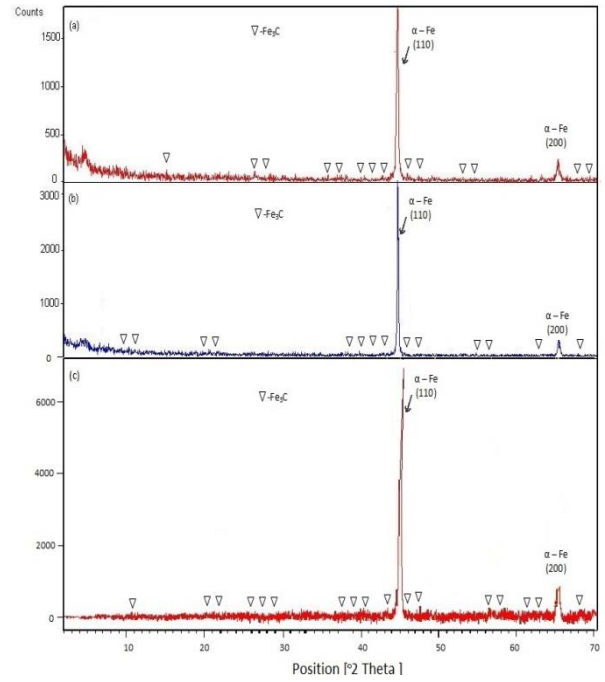
numunelere göre küreselleşme etkinliğinin daha az olduğu açıkça görülebilir. Bu numunede 5 saatlik küreselleştirme işleminde, sementit fazlarının çok az da olsa lamel yapısını yitirdiği söylenebilir. *K-705* numunesinde görülen sementitler tane sınırları üzerinde biçimlenmiştir ancak 5 saatlik ısıl işlem süresinin yeterli olmadığı söylenebilir.

M-505 numunesinde sementitin çekirdeklenip küreselleşmesi için daha uzun zamana ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır. Hem *M-505* hem de *M-705* numunesinde sementitlerin çekirdeklenme mekanizmasının benzer olduğu düşünülebilir. Çünkü bu numunelerde sementitler, martenzit plakaları arasındaki yoğun dislokasyonlardan başlamaktadır. Oysaki *K-705* numunesinde başlangıç mikroyapısı martenzitik olmadığından, sementitin çekirdeklenmesi için dislokasyon yoğunluğu yüksek değildir. Bu numunenin başlangıç mikroyapısında hali hazırda lamelli yapıda sementit bulunmakta idi. Bunun için sementitin küreselleşmeden önce çekirdeklenmesi söz konusu değildir. Ancak *K-705* numunesinde sementitlerin küreselmeleri için uzun bir zamana ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu numunede çekirdeklenme olmaksızın sementitlerin küresellesinin uzun zaman almasının temel nedeni *M* serisi numunelerde martenzit serbest enerjisi (G^m) ile sementit serbest enerjisi (G^s) arasındaki farkın negatif olması, kararlı sementit oluşumu için itici güçtür ve reaksiyon hızını belirlemektedir. Aynı zamanda *M* serisi numunelerde sementitin oluşumunda aktivasyon enerjisinin oldukça düşük olmasıdır. Bu da martenzitik fazdan sementitin oluşumunu hızlandırmaktadır. Diğer taraftan reaksiyon hızını artıran bir neden de sıcaklıktır. Bu nedenle *M-705* numunesinde 5 saatlik tavlama sonunda sementit oluşumları görülmektedir. Bu esnada sementitin küreselliği tartışılmıdır. Sementitin küreselleşmesi için yüzey gerilim enerjisinin ana yapıya göre yüksek olması gerekliliğidir. *M-705* numunesinde sementitin oluşumu hızlı aynı zamanda sementit fazları daha küreseldir. Bunun muhtemel nedeni sementit fazı oluşurken daha az enerjiye ihtiyaç duymakta, kalan enerjinin de sementit fazlarının yüzey gerilim enerjisine harcadığı düşünülmekte ve ana yapıyı (ferritik matriksi) ıslatmamaktadır. Oysaki *K-705* numunesinde sinterleme sonrası diğer çeliklerde olduğu gibi denge fazlarında sementit fazları allotromorf biçimde çöker. Bunun en büyük nedeni sementitin ferritle arayüzey geriliminin azalmasıyla ıslatma açısı azalır ve daimi çöker. Daha sonra küreselleşmesi için uygulanan tavlama esnasında verilen ısı enerjisi muhtemelen arayüzey enerjisine harcadığından ıslatma açısını artırıp ana yapıda idiomorf olarak çökeltmektedir. Ancak bunun oluşumu için gerekli enerji ve zaman çok uzun olmaktadır. Bu nedenle *K* serisi numunede küreselleşme oldukça uzun zaman almıştır.



Şekil 2. (a) M-505, (b) M-705, (c) K-705 numunelerinin SEM mikroyapı görüntüleri (SEM microstructure images of (a) M-505, (b) M-705, (c) K-705 specimens)

5 saat küreselleştirme ısıl işleminin ardından numunelerde çökelen karbür türlerini belirlemek amacıyla XRD analizleri uygulanmış ve elde edilen XRD desenleri Şekil 2’de verilmiştir. Tüm numunelerde ortorombik kristal kafes yapısına sahip sementit (Fe_3C) fazı olduğu görülmüştür. Ancak uygulanan ısıl işlem formuna bağlı olarak pik şiddetleri farklılık göstermektedir. Ana pik şiddetinin en yüksek olduğu numune klasik yöntemle küreselleştirilmiş örnekte elde edilmiştir. Bu da klasik yöntemde hâlihazırda var olan sementit fazın termodinamik olarak en kararlı olduğunu göstermektedir. *M* serisi numunelerin kararsız bir faz olan martenzitin aşırı temperlenmesiyle küresel sementitin elde edilmesi gösterilebilir [12].



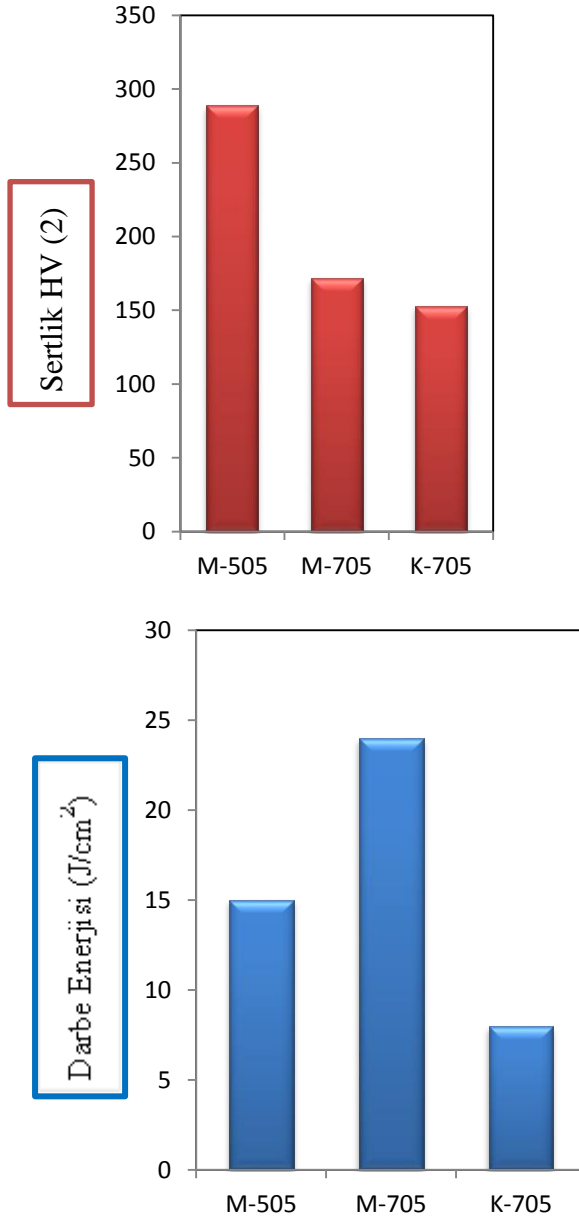
Şekil 3. (a) M-505, (b) M-705, (c) K-705 numunelerinin XRD analiz sonuçları (XRD analysis results of (a) M-505, (b) M-705, (c) K-705 specimens)

3.2. Makro Sertlik ve Darbe Test Sonuçları (Macro Hardness and Impact Test Results)

Şekil 3’de numunelerin makro sertlik ve darbe toklukları grafik olarak verilmiştir. Malzemelerin makro sertlik değerleri gibi pek çok özellikleri mikroyapısal özelliklerine doğrudan bağlıdır. Bu çalışmada numunelerin genel sertlik değerlerinin düşük olduğu söylenebilir. Ancak özellikle toz metal malzemelerinde olduğu gibi, sahip oldukları gözeneklilik bu değerlerin gerçek değerden daha düşük çıkmasına neden olmaktadır. *M-505*, *M-705* ve *K-705* numunelerinin sertlikleri sırasıyla 289, 172 ve 153 HV2 olarak belirlenmiştir. Bu her üç numunede sertlik bakımından *M-505* numunesinin diğerlerine göre belirgin üstünlüğü görülmektedir. Ancak bu numunede başlangıç yapısı su verme işleminin sonucu elde edilen martenzit olması bu numunede bu tavlama sıcaklığı ve sürede sementitin küreselleştirilmesi henüz tam olarak gerçekleşmemiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3b’de darbe tokluk grafiği verilen numunelerin makrosertlik değerleri ile doğrudan ilişkili olmadığı *K-705* numunesinden anlaşılmaktadır. Genellikle malzemelerin darbe toklukları sahip oldukları sertlikleri azalırken artış beklenir. Ancak darbe tokluğunun malzemenin mikroyapısına bağlı olduğu bilinen bir gerçektir. *K-705* numunesinin sertliği en az olmasına rağmen darbe tokluk değeri de en az seviyede gerçekleşmiştir. Bunun en temel nedeni mikroyapısında küreselleşmemiş özellikle sürekli çökelmiş sementitlerin varlığı gösterilebilir. Çünkü bu fazlar malzemenin sünekliklerini önemli ölçüde kısıtladığından uygulanan gerinim esnasında kolaylıkla kırılabilir. Bu çalışmada olduğu gibi

malzemede kırılmalıkları (gevreklikleri) azaltmak için mikroyapıda sementit gibi sert olan ikinci fazların süreksizliğini kazandırmaktır. Sementit fazının aralarında bağlantı olmaksızın mümkün olduğunca küresel dönüşürülmesiyle malzemenin sertliğinden ciddi taviz vermeksizin tokluğu geliştirilmektedir. Bu çalışmada *M-505*, *M-705* ve *K-705* numunelerinde darbe toklukları sırasıyla 15, 24 ve 6 J.cm⁻² olarak belirlenmiştir. Bu numunelerde en ideal küreselleşmenin sağlandığı *M-705* numunesinin darbe direnci daha yüksek bulunmuştur. Diğer taraftan yüksek sertlik/tokluk oranı istenirse *M-505* numunesinin üstün olduğu görülmektedir. Sonuç olarak küreselleştirme yönteminde başlangıç yapısı martenzit olan *M* serisi numunelerin üstünlüğü dikkat çekmektedir.



Şekil 4. Numunelerin (a) makro-sertlik ve (b) darbe tokluk grafikleri (a) macro-hardness and (b) impact toughness graphs of the specimens)

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada yüksek karbonlu T/M çelikler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Farklı üç küreselleştirme ısıl işlem çevrimi uygulanmıştır. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. *M-505* numunesinin mikroyapısında iğnemsiz martenzit plakaların bozulmaya başlamış, ancak sementit fazlarının küreselleşmesi tam anlamıyla gerçekleşmediği anlaşılmıştır. 705 °C'de 5 saat küreselleştirme uygulanmış *M-705* numunesinin mikroyapısında martenzit plakalarının tamamen kaybolduğu, yerine çok ince ve oldukça küre biçimli olduğu söylenebilen sementit parçacıklarının oluşumu sağlanmıştır.
2. *K-705* numunesinde, *M* serisi numunelere göre küreselleşme etkinliğinin daha az olduğu, sementit fazlarının çok az da olsa lamel yapısını kaybettiği söylenebilir.
3. XRD analiz sonucuna göre tüm numunelerde ortorombik kristal kafes yapısına sahip sementit (Fe₃C) fazı olduğu görülmüştür. Ancak uygulanan ısıl işlem formuna bağlı olarak pik şiddetleri farklılık göstermektedir. Ana pik şiddetinin en yüksek olduğu numune klasik yöntemle küreselleştirilmiş *K-705* numunesinde elde edilmiştir.
4. *M-505*, *M-705* ve *K-705* numunelerinin sertlikleri sırasıyla 289, 172 ve 153 HV₂ olarak, darbe toklukları ise sırasıyla 15, 24 ve 6 J.cm⁻² olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre darbe toklukları ile sertlikleri arasında doğrudan bir ilişki olmadığı anlaşılmıştır.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. German, R. M., "Toz Metalürjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri", Çeviri. Ed: Sarıtaş S., Türker M., Durlu N., *Türk Toz Metalürjisi Derneği Yayınları*, Ankara, (2007)
2. Weissbach, W. "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", Çeviri: Anık, E. S., Vural, M., *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 133-117, 200-201, (1993)
3. Smith, W.F. "Structure and Properties of Engineering Alloys", Çeviri: Dr. Mehmet Erdoğan, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, (2000)
4. Motorcu, A.R., "Isıl İşlemsiz ve Küreselleştirilmiş Ç52100 Rulman Çeliğinin Farklı Takımlarla İşlenmesinde Takım Ömrü ve Aşınmasının İncelenmesi", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol: 25, No 1, 65-75, (2010)
5. Aydın, R., "Fracture Behaviour of A Low Alloy Cr-V Steel", *Thesis of Sc.* İstanbul Technical University, İnstitute of Science and Technology, (1992)
6. Ulu, S., Aytakin, H., Said, G., "4 Farklı Çeliğin Bazı Mekanik Özelliklerine Fe-Fe₃C Faz Diyagramında A1-A3 Arasında Yapılan Isıl İşlemlerin Etkisi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 1-9, (2006)
7. Onur, C. ve İnem, B., "AISI W1 ve L2 Soğuk İş Takım Çeliklerinin Düşük Sıcaklıklarda (120 °C) Menevişlenmesi ile Optimum Tokluğun Geliştirilmesi", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol: 18, No 1, 109-124, (2003)

8. A.T.W. Barrow, P.E.J. Rivera-Díaz-del-Castillo, “Nanoprecipitation in Bearing Steels”, *Acta Materialia* **59**, 7155–7167, (2011)
9. Sauvage, N. Guelton, D. Blavette, “Microstructure Evolutions During Drawing of a Pearlitic Steel Containing 0.7 at.% Copper ” *Scripta Materialia*, **46**, 459–464, (2002)
10. Sauvage, W. Lefebvre, C. Genevois, S. Ohsaki, K. Hono, “Complementary use of transmission electron microscopy and atom probe tomography for the investigation of steels nanostructured by severe plastic deformation”, *Scripta Materialia*, **60**,1056–1061, (2009)
11. J.-H. Kang 1, P.E.J. Rivera-Díaz-del-Castillo, “Carbide dissolution in bearing steels”, *Computational Materials Science* **67**, 364–372, (2013)
12. Altuntaş, O., “Yüksek Karbonlu Toz Metal Çeliklerin Mikroyapı ve Darbe Tokluğu Özelliklerine Küreselleştirme Isıl İşlemleri Etkilerinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2013)