ÖN ALAŞIM VE KARIŞIMLI ALUMIX 123 TOZU İLE ÜRETİLEN TM PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE SIKIŞTIRMA BASINCI VE SİNTER SICAKLIKLARININ ETKİSİ

Buse APAYDIN

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06560, Yenimahalle, Ankara

Email: buseapaydiiiin@gmail.com

ORCID: 0009-0006-9578-2202

Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06560, Yenimahalle, Ankara

Email: ozcatalbas@gazi.edu.tr

ORCID: 0000-0002-4256-8492

ÖZET

Toz metalurjisi (TM) ürünü sinter parçalar ve TM yöntemiyle üretilen metal matrisli kompozit (MMKp) malzemeler havacılık, savunma sanayii ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan mühendislik ürünleridir. Bu malzemelerin üretiminde özgül dayanımlarının yüksek olması sebebiyle Aluminyum alaşımı tozların da yaygın kullanımı mevcuttur. TM parçaların üretiminde genellikle ön alaşımlı Al esaslı tozlar tercih edilirken kısmen ön karışımlı tozlarında kullanımı mevcuttur. Çünkü, TM ile alüminyum alaşımlarının üretimi, elementel alüminyum tozu, alaşım katkı tozları ve yağlayıcı tozdan oluşan bir toz ön karışımıyla başlar. Zira, alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, bazı alaşım elementlerinin mikro veya makro ölçekte küçük ilaveleriyle geliştirilebilir. Ticari Alumix 123 tozunun üretimi ve piyasaya arz sürecinde Al esaslı AlSiMg içerikli ön alaşımlı metal tozları ile birlikte, %4,5Cu içeriği ile ön karışımlı toz olarak hazırlanır. Bu durum ise, gerek sinterleme veya gerekse sıcak presleme sürecinde Al%4,5Cu alaşımının homojen dağılımlı sağlanmasında problemler oluşturabilir. Bu çalışmada, Ticari Alumix 123 tozunun 300, 400 ve 500 MPa sıkıştırma basınçlarında soğuk preslenmesi sonrası 500, 570 ve 640 °C sıcaklıklarda bir saat süre ile sinterlenmesi ile üretilen TM parçaların mikroyapısı ve özellikle mekanik özellikleri incelenmiştir. Sinter sıcaklıklarının üretilen TM malzemelerin sertliklerine etkileri belirlenmiştir. ASTM B528-16(2020) standardına göre hazırlanan TM numunelere uygulanan testlerle çapraz kırılma dayanımları (ÇKD) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, artan sıkıştırma basıncı ve sinter sıcaklıkları ile birlikte üretilen TM malzemelerin ham ve sinter yoğunlukları artarken sertlikleri de artmaktadır. Bununla birlikte, yüksek sıkıştırma basınçlarında ve fakat düşük sinterleme sıcaklıklarındaki TM malzemelerin ÇKD değerleri önemli ölçüde düşmüştür. Ayrıca, 570 °C'de sinterlenen fakat 300 MPa ile 500 MPa'da preslenmiş malzemelerin ÇKD değerlerinde belirgin bir fark görülmemiştir. 640 °C'de sinterleme sürecinde oluşan sıvı faz sebebiyle TM malzemelerde fiziksel deformasyon meydana gelmiştir.

Anahtar kelimeler: Toz Metalurjisi, Alumix 123, Sinterleme sıcaklığı, Sertlik, Çapraz Kırılma Dayanımı

THE EFFECT OF COMPACTION PRESSURE AND SINTERING TEMPERATURES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF TM PARTS PRODUCED WITH PRE-ALLOYED AND MIXED ALUMIX 123 POWDER

ABSTRACT

Sintered parts produced by powder metallurgy (PM) and metal matrix composite (MMCp) materials produced by the PM method are widely used engineering products in the aerospace, defense, and automotive industries. Aluminum alloy powders are also widely used in the production of these materials due to their high specific strength. While prealloyed Al-based powders are generally preferred in the production of PM parts, premixed powders are also used to some extent. This is because the production of aluminum alloys using PM begins with a powder premix consisting of elemental aluminum powder, alloy additive powders, and lubricant powder. The mechanical properties of aluminum alloys can be improved with small additions of certain alloying elements at the micro or macro scale. During the production and marketing of commercial Alumix 123 powder, it is prepared as a premixed powder with a 4.5% Cu content, along with Al-based AlSiMg-containing prealloyed metal powders. This can create problems in ensuring a homogeneous distribution of the Al4.5% Cu alloy during both sintering and hot pressing. In this study, the microstructure and especially the mechanical properties of PM parts produced by cold pressing commercial Alumix 123 powder at compression pressures of 300, 400 and 500 MPa and then sintering at temperatures of 500, 570 and 640 °C for one hour were investigated. The effects of sinter temperatures on the hardness of the produced TM materials were determined. Transverse rupture strength (TRS) was determined by tests applied to PM samples prepared according to ASTM B528-16(2020). The results obtained showed that with increasing compression pressure and sinter temperatures, the green and sinter densities of the produced PM materials increased, while their hardness also increased. However, the TRS values of PM materials at high compression pressures but low sintering temperatures decreased significantly. In addition, no significant difference was observed in the TRS values of materials sintered at 570 °C but compressed at 300 MPa and 500 MPa. Physical deformation occurred in the PM materials due to the liquid phase formed during the sintering process at 640°C.

Keywords: Powder Metallurgy, Alumix 123, Sintering Temperature, Hardness, Transverse Rupture Strength

1.GİRİŞ

Alüminyum alaşımları günümüzde çelikten sonra en çok kullanılan metalik mühendislik malzemeleridir [1]. Düşük yoğunluk (2,7 gr/cm3), yüksek korozyon dayanımı, yüksek elektriksel iletkenlik ve diğer mühendislik malzemelerine göre yüksek spesfik dayanım gibi özellikleri sebebiyle alüminyum alaşımlarına ilgi yüksektir. Alüminyum alaşımlarının günümüzde daha çok ilgi görmesinin başka bir sebebi ise taşımacılık sektöründe yaşanan gelişmelerdir. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde daha hafif, dolayısıyla daha az yakıt tüketen ve çevreye daha az zarar veren araçlar üretimi konusunda çalışmalar artmıştır. Daha hafif araçlar üretmek için günümüzde tercih edilen malzemelerden biri de özgül dayanımı yüksek olan alüminyum alaşımlarıdır [2, 3]. Toz metalurjisi (TM), hassas ve karmaşık parçaların uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir şekilde seri üretimi için kullanılabilen çeşitli bir üretim tekniğidir. Döküm veya şekillendirme gibi geleneksel metal işleme yöntemleriyle büyük miktarlarda küçük ve karmaşık bileşen üretmek, genellikle pahalı ve israfa yol açan ikincil işleme operasyonları gerektirir. Bazı durumlarda, çok az veya hiç ikincil işleme operasyonu gerektirmeyen net veya net şekle yakın bileşenler üretmek için geleneksel metal işleme yöntemleri yerine TM kullanmak daha uygundur [4]. TM ile alüminyum alaşımlarının üretimi, ana matriste alüminyum tozu, alaşım katkı tozları ve yağlayıcı tozdan oluşan bir toz ön karışımıyla başlar [5]. Ön karışım, ham mukavemetli malzeme oluşturmak için tek eksenli kalıp sıkıştırmasına tabi tutulur ve ardından sinterlenir. Alumix 123 ticari alaşımdaki metal tozu, Al2014'e dayalı, alüminyum-bakır esaslı olan ilave olarak kısmen magnezyum-silisyum içeren alaşımdır [6]. Bu alaşım sistemi, ASTM Standardı B595'te belirtilen 'AC-2014' tanımıyla standartlaştırılmış olup, şu anda ticari olarak 'Alumix 123' ticari adı altında sunulmaktadır [7]. Fakat bu alaşım AlSiMg ön alaşımlı toza sonradan ilave edilen ve ağırlıkça %4,5 Cu içeren aynı zamanda ön karışımlı toz niteliğindedir. Bu durum ise uygun sintersıcaklığı, süresi veya sıkıştırma basıncı kullanılmadığı sürece önemli oranda Cu segregasyonlarına, homojen olmayan çökelti dağlımına ve dolayısıyal TM ürünün mekanik özelliklerinde önemli problemlere sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada, TM yöntemiyle Alumix 123 tozundan üretilen toz metal numunelerde uygulanan presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının malzemenin yoğunluk, mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelenmiştir.

2. MALZEME VE METOT

2.1 Malzeme

Deneysel çalışmalarda Alumix 123 tozu kullanılmıştır**. Alumix 123**, atomizasyonla üretilmiş alüminyum esaslı metal tozları ile elektroliz yöntemiyle elde edilmiş elektrolitik bakır tozlarının belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulan bir toz metalurjisi alaşımıdır. İçeriğinde Al–Cu–Mg–Si elementleri bulunmaktadır. Kullanılan Alumix 123 tozunun kimyasal bileşimi Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. Alumix 123'ün kimyasal bileşimi

Element	Al	Cu	Mg	Si	Diğer
Ağırlıkça %	94.3	4.5	0.5	0.6	0.1

2.2. Deneysel Metot

Ham mukavemetli numuneler, ASTM B528-16(2020) standardında belirtilen boyutlarda ve hacimde şekillendirebilecek kalıp içerisine 7.8 gr Alumix 123 tozunun doldurularak

sıkıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Alüminyum tozlarının sertlikleri düşük olduğu için tek eksenli presleme ile kolaylıkla yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılabilmektedir [8]. Instron 8503 Tek Eksenli Hidrolik Pres vasıtasıyla soğuk presleme işlemi yapılmıştır. Malzemeler 3 farklı gruba ayrılıp sırasıyla 300MPa, 400MPa ve 500MPa basınç altında preslenmiştir. Farklı basınçlarda preslenmiş bu numunelerin basınç farkına göre oluşan ham yoğunluk boyutları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sıkıştırma basıncına göre değişen TM ham numune boyutları

Basınç(MPa)	300MPa	400MPa	500MPa
Yükseklik (mm)	7.80	7.75	7.60
Genişlik (mm)	12.88		
Boy (mm)	31.2		

Üç farklı basınç altında preslemenin sebebi presleme basıncının malzemede meydana getirdiği mekanik özellik farklarını gözlemlemektir. Presleme işlemi oda sıcaklığında gerçekleşmiştir. Sıkıştırma işleminde kullanılan kalıbı yağlamak için çinko stearat ve alkol karışımı kullanılmıştır. Presleme işlemi sonrası numunelerin ham yoğunluğu ölçülmüştür ve ardından sinterleme işlemine geçilmiştir.

Sinterleme işlemi, toz parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayan, böylece dayanımlarını artıran, yüzey alanlarını düşüren bir ısıl süreçtir [9]. Sinterleme işlemiyle malzemeye sertlik ve mukavemet kazandırılmış, toz partikülleri arasındaki difüzyonu artırarak mekanik özelliklerin gelişmesi sağlanmıştır. Üç farklı basınç altında preslenen numunelerin her biri sırasıyla 500°C, 570°C ve 640°C'de 10°C /dk ısıtma hızıyla, 60dk sinterlenmiş ardından fırın ortamında yavaş soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme işlemi Protherm marka sinter fırını yardımıyla yapılmıştır. Alüminyum tozları hangi yöntemle üretilirse üretilsin, açık atmosfer ortamında oksijene olan yüksek afinitesi sebebiyle hızla oksitlenen bir metaldir. Bu durum ise sinterlemeyi ve dolayısıyla TM malzemenin dayanımını olumsuz etkiler [10]. Sinterleme sırasında oksitlenmeyi ve korozyonu önlemek amacıyla numuneler alüminyum folyo ile kaplanmış, folyoların üzerine ise oksijen tutucu olarak titanyum parçacıkları yerleştirilmiş ve fırın ortamı argon gazı altında tutulmuştur.

Arşimet Prensibi yöntemiyle Weightlab WSA-224T analitik terazi yardımıyla yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Arından presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direnç üzerindeki etkisini incelemek amacıyla INSTRON 3400 Serisi Üniversal Çekme Dayanım Test Cihazı yardımıyla numunelere Çapraz Kırılma Dayanım (ÇKD) testi yapılmıştır. Bu test ASTM B528-16 (2020) standardına göre yapılmıştır.

Bu işlem sonrasında malzemelerin mikroyapısı Nikon Eclipse E100 cihazı yardımıyla optik mikroskop altında incelenmiştir. Bu amaçla, alüminyum ve alaşımı malzemelerde tercih edilen Keller's Reaktfi dağlayıcı ile numuneler 15 saniye dağlanmıştır. Keller's Reaktifini elde etmek için 2,5 ml HNO_3 (nitrik asit) 1,5 ml HCl (hidroklorik asit), 1,0 ml HF (hidroflorik asit) ve 95 ml saf su kullanılmıştır.

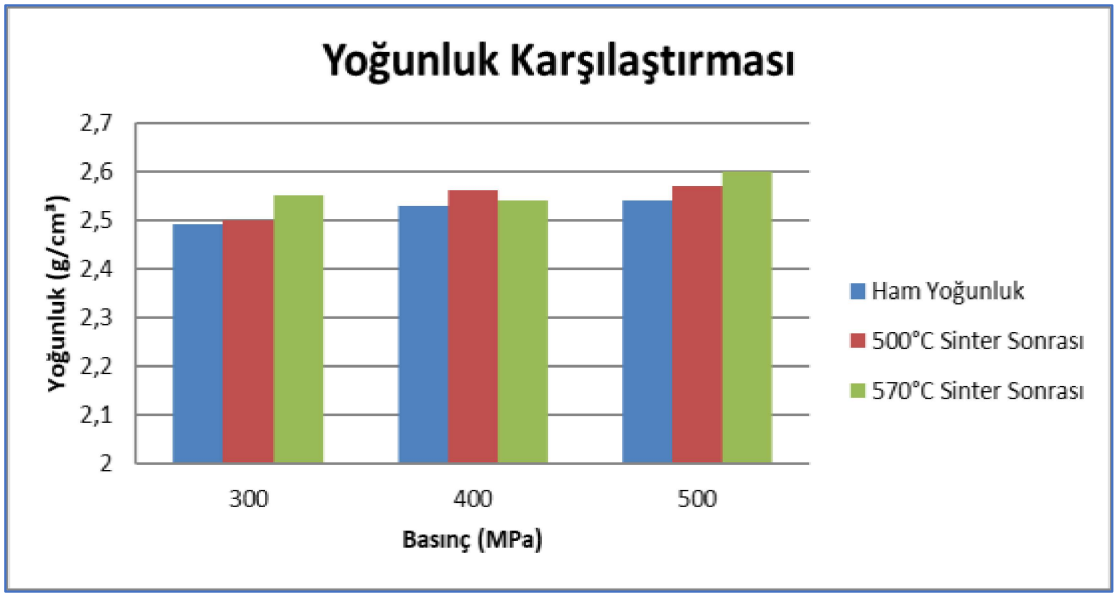
Ardından sinter sıcaklığının malzemenin sertliğine etkisini belirlemek için yalnızca 500 MPa basınç altında soğuk preslenen numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler sırasıyla 500°C, 570°C ve 640°C'de sinterlenmiş olan üç farklı numuneye Duravision 2000 Emco Test Sertlik Cihazı yardımıyla Brinell Sertlik testi uygulanmıştır. Her üç numune yüzeyinde 3 farklı bölgeden 31.25 kgf yük uygulanmıştır ve bu yük altında malzemelerin sertliği ölçülmüştür.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Sıkıştırma Basıncı ve Sinterleme Sıcaklığının Yoğunluğa Etkisi

Şekil 1'de görüldüğü üzere uygulanan presleme basıncının artmasıyla ham yoğunluğun ve sinterleme sonrası ölçülen yoğunluğun arttığı görülmektedir. Artan presleme basıncı ile toz taneleri arasındaki boşluklar kapanır, parçacıklar arası mekanik girişim artar. Buradan yola çıkarak presleme basıncının artmasının yoğunluğu da arttırdığını söylenebilir.

Sinter işlemi sonrasında malzemelerin yoğunluklarının ham yoğunluklarından fazla olduğu görülmektedir. Her sıcaklıktaki sinterleme işlemi yoğunluk artışı sağlamıştır. Sinter sonrası en yoğun malzemenin 500MPa basınç altında preslenmiş ve 570°Cde sinterlenmiş malzeme olduğu görülmektedir. Sinter sıcaklığı arttığında malzeme yoğunluğu da buna bağlı olarak artar. Sinterleme sıcaklık yükseldikçe katı hal difüzyonu artar gözenekler küçülür ve taneler birbirine daha yoğun bağlanır. Presleme basıncın artması her zaman yoğunluğu artırmaz. Özellikle aşırı yüksek presleme basıncından sonra ham yoğunlukta düşme gözlemlenebilir. Buna geri yaylanma sebep olmaktadır [11].



Şekil 1. Sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklıklarının TM numune yoğunluklarına etkisi

3.2 Sıkıştırma Basıncı ve Sinterleme Sıcaklığının Mikroyapıya Etkisi

Şekil 2'de 500 MPa'da preslenen TM numunelerin üç farklı sıcaklıkta sinterlendikten sonraki mikroyapıları verilmiştir. Şekil 3a'daki en düşük sinterleme sıcaklığında halen iri Cu parçacıklarının varlığı görülmektedir. Bu sıcaklığın Cu↔Al yayınımı için yeter sıcaklık olmadığı görülmektedir. Ayrıca, bu malzemede tane sınırlarında sinterleme yetersizliği ve kısmi gözenekler mevcuttur (okla gösterildi). Cu'ca zengin parçacıklar ve bölgeler çember içinde gösterilmiştir. 570°C'de sinterlenmiş malzemede ise sinterleşmenin çok daha iyi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte halen Cu'ca zengin parçacıkların yoğunluğu dikkat çekicidir. Özellikle tane sınırlarını takip eden dağılımda açık renk tonlamadaki fazın sinter sırasında ötektik oranda Al-Cu alaşımı ile oluşan sıvı fazın (ötektik sıvı sıcaklığı 548 °C) olabileceği ihtimali de değerlendirilmelidir (Şekil 2b). Şekil 2c'de 640 °C'de sinterlenmiş malzemenin mikroyapısı görülmektedir. Burada oluşan 70-80 µm çapındaki gözeneğin sıvı faz nedenli olduğu gayet açıktır. Gözenek çevresinde oluşmuş Cu'ca zengin halkanın merkezine doğru ötektik Al-Cu alaşım oranın sıvı faza sebep olduğu söylenebilir.



a) 500 °C'de sinterlenmiş malzeme



b) 570 °C'de sinterlenmiş malzeme

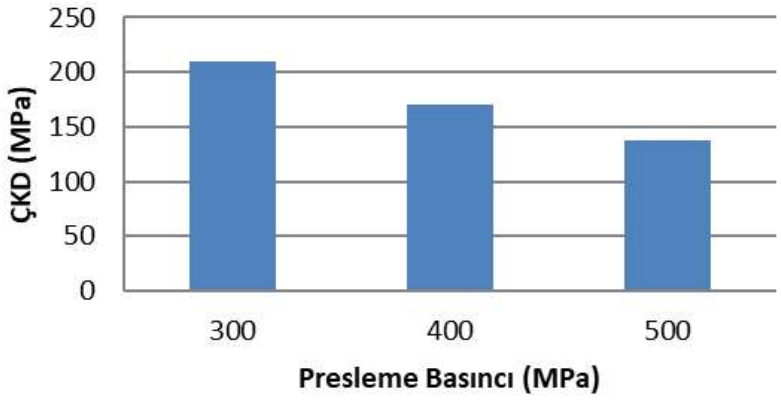


c) 640 °C'de sinterlenmiş malzemenin

Şekil 2. Sinterleme sıcaklığının mikroyapıya etkisi

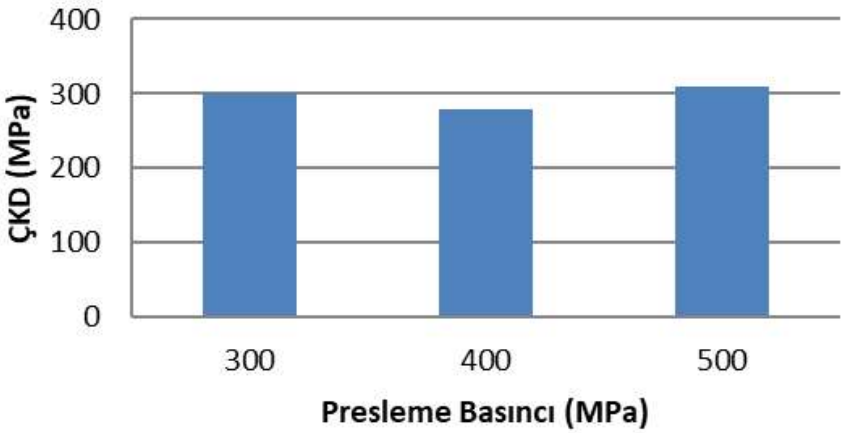
3.3 Sıkıştırma Basıncı ve Sinterleme Sıcaklığının ÇKD'ye Etkisi

Şekil 3'de 500 °C'de sinterlenmiş malzemelerin Çapraz Kırılma Dayanımı (ÇKD) görülmektedir. 300MPa basınç altında sinterlenmiş numunenin ÇKD'si 210MPa , 400'de 170MPa ve 500'de 137 MPa olduğu görülmektedir. Şekilde 300MPa basınçla preslenmiş malzemenin en yüksek dayanıma sahip olduğu görülüyor. Ancak 500 MPa basınçtaki ÇKD değeri çok daha düşüktür. Genel olarak basıncın artması ile birlikte kırılma dayanımının artması beklenirken burada düştüğü görülmektedir. Yüksek presleme basıncı parçacıklar arası boşlukları kapalı gözenekler haline getirebilir. Kapalı gözenekler de sinterleme sırasında gaz çıkışını engeller ve bunun sonucunda presleme doğrultusuna dik (radyal yönde) parallel çatlaklar meydana getirebilir. Bu durum özellikle düşük sinterleme sıcaklıklarındaki zayıf sinterleşme sebebiyle de dayanımı düşüren bir etken olabilir. Bunu yanında, yüksek sıkıştırma basıncı sonrası ve kalıptan çıkış sırasındaki geri yaylanmanın oluşturabileceği radial çatlakların düşük sinter sıcaklıklarında benzer etkileri göstermesi muhtemeldir. Bu alaşım için bu sinter süresi ve sıcaklığında uygun presleme basıncının 300 MPa olacağı söylenebilir.



Şekil 3. 500 °C'de sinterlenmiş malzemelerin presleme basıncına göre ÇKD değerleri

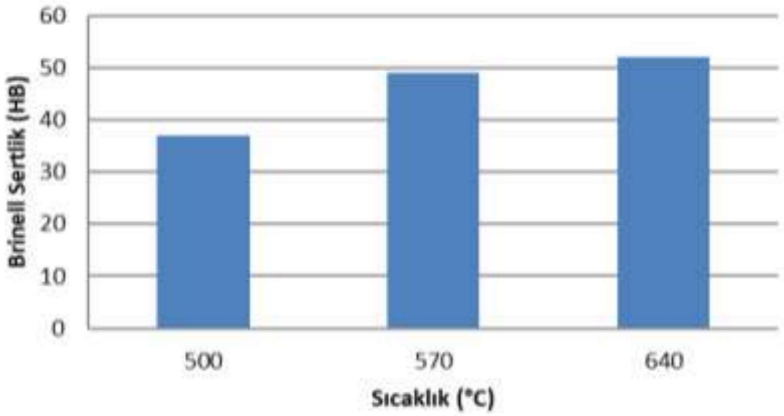
Şekil 4 incelendiğinde ise sinter sıcaklığının artmasıyla beraber her sıkıştırma basıncı için kırılma dayanımının önemli miktarda arttığı görülmüştür. 300MPa basınçla sinterlenen numunenin ÇKD değeri 300 MPa , 400'de 280 MPa ve 500'de ise 310 MPa olmuştur. Bu sonuçlar, artan sinterleme sıcaklığı ile birlikte önemli miktarda sinterleşmenin gerçekleştiğini ve TM malzemelerin dayanımlarının da arttığını göstermektedir. Bununla birlikte 300 ve 500 MPa'da preslenen numunelerin ÇKD değerlerinin çok yakın olması da dikkat çekicidir.



Şekil 4. 570 °C'de sinterlenmiş malzemelerin presleme basıncına göre ÇKD değerleri

3.4 Sinterleme Sıcaklığının TM Malzeme Sertliğine Etkisi

Şekil 5 incelendiğinde 500MPa basınçta preslenmiş malzemelerin artan sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak sertliklerinde de artış gözlenmiştir. 500°C'de sinterlenen malzemenin ortalama sertliği 38 HB_W ölçülürken 570°C'de 49HB_W ve 640°C'de 52HB_W ölçülmüştür. Bu durum, TM numunelerin artan sinter sıcaklığı ile birlikte sinterleşme oranının ve yoğunluğun artmasının yanında, Al matriste Cu difüzyonunun artması ile alaşımla oranının artmasına bağlanabilir. Ancak 640 °C'de oluşan sıvı faz sebebiyle, TM numune dışında katılaşan Cu'ca zengin ötektik karışım genel olarak malzeme hacminde Cu kaybına ve gözenekliliğe sebep olmuştur. Bu durum, belirtilen sıcaklıkta yeterli sertlik artışının görülmemesine neden olabilir.



Şekil 5. Sinterleme Sıcaklığının TM Malzeme Sertliğine Etkisi

4. SONUÇ

Bu çalışmanın amacı kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir;

500MPa basınç altında preslenen malzemelerin mikroyapısı incelendiğinde 500 °C'de sinterlenen malzemenin mikroyapısında yeter yayınım sıcaklığı olmamasından dolayı iri Cu parçacıklarının varlığı gözlemlenmiştir.Aynı zamanda kısmi gözenekler de mevcuttur. 570 °C'de sinterlenen malzemede ise sinterleşmenin çok iyi olduğu ama hala Cu'ca zengin parçacıkların da olduğu gözlemlenmiştir. 640 °C'de ise ötektik Al-Cu alaşım oranının sıvı faza sebep olduğu söylenebilir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, presleme basıncı arttıkça numunelerin sinter öncesi yoğunluklarının (ham yoğunluk) arttığı, sinter işlemi sonrasında ise malzemenin yoğunluklarının ham yoğunluklarından fazla olduğu gözlemlenmiştir. Her sıcaklıktaki sinterleme işlemi sonrasında yoğunluğun arttığı gözlemlenmiştir. Sinter sonrası en yoğun malzeme 500MPa basınç altında sıkıştırılmış 570 °C'de sinterlenmiş malzemedir. Sinter sıcaklığı artışıyla doğru orantılı olarak yoğunluk da artar.

Çapraz Kırma Dayanım testinde 500 °C'de sinterlenmiş malzemelerde 300MPa basınçla preslenmiş malzemenin en yüksek dayanıma sahip olduğu görülüyor (210MPa). Bu alaşım için bu sinter süresi ve sıcaklığında uygun presleme basıncının 300 MPa olacağı söylenebilir.

570 °C'de sinterlenmiş malzemelere bakıldığında ise sinter sıcaklığının artmasıyla beraber her sıkıştırma basıncı için kırılma dayanımının önemli miktarda arttığı görülmüştür. En yüksek dayanım 500 Mpa basınç altında preslenip 570 °C'de sinterlenmiş malzemede gözlemlenmiştir (310MPa).

Brinell sertlik testinde 500 MPa'da preslenen TM numunelerin sertliği, sinterleme sıcaklığının 500°C'den 640°C'ye artmasıyla 38 HBW'den 52 HBW'ye yükselmiştir. Sertlik artışı, sinterleşme ve yoğunluğun gelişmesinin yanı sıra Al matristeki Cu difüzyonunun artmasına bağlanmıştır. Ancak 640°C'de oluşan sıvı faz nedeniyle Cu kaybı ve gözeneklilik meydana geldiğinden, bu sıcaklıkta sertlik artışı sınırlı kalmıştır. Sertliği en yüksek malzemenin 570MPa basınçta preslenip 640°C'de sinterlenen malzeme olduğu görülmüştür (52 HBW).

KAYNAKÇA

[1] Altenpohl, D. G. 1980. Present Structure and Future Trends in Key Materials Industries. Materials in World Perspective: Assessment of Resources, Technologies and Trends for Key Materials Industries, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Heidelberg p. 21–126.

[2] Ghassemieh, E. 2011. "Materials in Automotive Application , State of the Art and Prospects,"New Trends and Developments in Automotive Industry, p. 365–94.

[3] Hirsch, J. 2011. "Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design," Materials Transactions, vol. 52, no. 5, p. 815–823.

[4] Judge, WD, Bishop, DP ve Kipouros, GJ Endüstriyel Sinterleme Tepkisi ve Alüminyum Toz Metalurjisi Alaşımı Alumix 123'ün Mikroyapısal Karakterizasyonu. Metalografi. Mikroyapı. Analiz. 6 , 375–382 (2017). https://doi.org/10.1007/s13632-017-0379-0.

[5] EM Daver, WJ Ullrich, KB Patel, Alüminyum P/M parçaları - malzemeler, üretim ve özellikler. Anahtar Mühendislik Mater. 29–31 , 401–428 (1989).

[6] JE Foss, D. DeFranco, Northstar Kam Rulman Kapakları: Alüminyum P/M için Yeni Bir Uygulama, Otomotiv Mühendisleri Derneği, Warrendale, 1994, Rapor No. 940429

[7] Judge, WD, Bishop, DP ve Kipouros, GJ Endüstriyel Sinterleme Tepkisi ve Alüminyum Toz Metalurjisi Alaşımı Alumix 123'ün Mikroyapısal Karakterizasyonu. Metalografi. Mikroyapı. Analiz. 6 , 375–382 (2017). https://doi.org/10.1007/s13632-017-0379-0

[8] Boland, C. D., Hexemer, R. L., Donaldson, I. W., Bishop, D. P. 2013. "Industrial Pro-cessing of a Novel Al-Cu-Mg Powder Metallurgy Alloy," Materials Science and Engine-ering A, vol. 559, p. 902–8.

[9] German, R. M. 2005. A - Z of Powder Metallurgy, Elsevier, Michigan.

[10] Nylund, A., Olefjord, I. 1993. "Surface-Analysis of Air Exposed Rapidly Solidi□ed Alu-minum Powder," Powder Metallurgy, vol. 36, no. 3, p. 193–7.

[11] Gökçe, A., Findik, F., Kurt, A. O. 2013. "Effects of Mg Content on Aging Behavior of Al4CuXMg PM Alloy," Materials and Design, vol. 46, p. 524–31.