

Santrifüj Döküm Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemelerde Üretim Parametrelerinin Malzemenin Sertliği Üzerine Etkisi

Semih AĞCA^{1*}, Neşet AKAR²

¹Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06020, Keçiören, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara

(Geliş/Received : 17.03.2016 ; Kabul/Accepted : 05.04.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, soğuma hızı (0,27 – 7,38 – 14,23 – 21,56 °C/s), kalıp dönme hızı (160 – 225 – 275 rpm) ve döküm atmosferi (açık atmosfer – vakum atmosferi) parametrelerinin santrifüj döküm yöntemiyle üretilen Al-Cu fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) sertliği üzerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel araştırmalar sonucunda, soğuma hızının artması ile sertlik değerinin arttığı ve diğer parametrelerin etkisinin soğuma hızına bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Yüksek (7,38 – 14,23 – 21,56 °C/s) soğuma hızlarında üretilen döküm parçalarının bütün bölgelerinde, kalıp dönme hızı arttıkça sertlik artmış ve açık atmosferde üretilen numunelerin sertliği vakum atmosferinde üretilenlerden daha yüksek çıkmıştır. Düşük (0,27 °C/s) soğuma hızında ise, kalıp dönme hızı arttıkça sertlik, numunenin dönme merkezine uzak bölgesinde artmış, orta bölgede değişmemiş ve dönme merkezine yakın bölgesinde de azalmıştır. Bununla birlikte, açık atmosferde üretilen numunelerin sertliği merkeze uzak bölgede vakum ortamında üretilenlerden daha düşük, orta bölgede aynı ve merkeze yakın bölgede de daha yüksektir. Bu sonuçlar santrifüj döküm yöntemiyle FDM üretiminde, üretim parametrelerinin birbirleri ve malzemenin sertliği üzerine etkisi olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: FDM, Santrifüj Döküm, Sertlik.

Effect of Fabrication Parameters on Hardness of Al-Cu Functionally Graded Materials Manufactured by Centrifugal Casting

ABSTRACT

In this study, the effect of cooling rate (0,27 – 7,38 – 14,23 – 21,56 °C/s), mold rotation speed (160 – 225 – 275 rpm), and casting atmosphere (air – vacuum) on hardness of Al-Cu functionally graded materials (FGMs) were investigated. According to the experimental results, it was found that the hardness value became higher with increasing cooling rate and efficiency of other parameters varied according to cooling rate. The hardness increased with increasing mold rotation speed and hardness values of specimens produced in air atmosphere are higher than that of manufactured in vacuum atmosphere for all parts of specimens produced in high (7,38 – 14,23 – 21,56 °C/s) cooling rates. On the other hand, the specimens produced in low cooling rate (0,27 °C/s) have varying hardness values depending on the location of the cast part. Hardness increased with increasing mold rotation speed in the far part of specimens to the rotation axis. It remained unchanged in middle section and decreased with increasing mold rotation speed in parts close to the rotation axis. Also, hardness values of specimens obtained in air atmosphere are lower in far part, same in middle and higher in rotation axis by comparison with the specimens obtained in vacuum atmosphere. Results showed that all parameters affected each other and the hardness in fabrication of FGMs by centrifugal casting.

Keywords: FGMs, Centrifugal Casting, Hardness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozisyon ve yapının derecelendirilmiş bir şekilde değiştiği ve bu değişimin malzemenin özelliklerini önemli derecede etkilediği malzemelere fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) denilmektedir [1]. Refrakter özellikte seramik malzeme ile metalik malzemenin bir arada kullanıldığı FDM en iyi bilinen örnekler

arasındadır. Bu malzemede seramik bileşenin ısı, aşınma ve korozyon direnci ile metalik malzemenin yüksek tokluk, dayanım ve işlenebilirlik özellikleri bir arada bulunmaktadır. FDM'nin derecelendirilmemiş kompozitlere göre en büyük üstünlüğü termal şoklara daha dayanıklı olmasıdır [2].

Yapı bakımından katmanlı ve sürekli derecelendirilmiş olarak iki kategoride incelenebilecek olan FDM'nin üretimi birçok yöntemle gerçekleştirilebilir. Termal püs-

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: aqcasemih@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 121-127

kürtme, toz metalürjisi, elektroforetik biriktirme, infiltrasyon ve santrifüj döküm bilinen üretim yöntemlerindedir [3]. Termal püskürtme ve toz metalürjisi gibi yöntemlerle katmanlı derecelendirilmiş yapı elde edilirken, santrifüj döküm yöntemi ve infiltrasyon gibi yöntemlerle de sürekli derecelendirme mümkün olmaktadır. Sürekli derecelendirilmiş yapılarda termal şoklara dayanım ve değişken mekanik yüklerle karşı direnç daha yüksek olmaktadır. Santrifüj döküm yönteminin diğer avantajları ise üretim kolaylığı ve düşük maliyettir.

Santrifüj döküm yöntemi ile partikül takviyeli FDM üretimi mümkün olmaktadır [4]. Literatürde partikül takviyeli FDM üretimi için katı partikül ve in-situ (dışarıdan ilave edilmeksizin yapı içerisinde kendiliğinden oluşan) partikül santrifüj olmak üzere iki farklı yöntem yer almaktadır [5-7]. Üretim sıcaklığı, temel alaşım elementinin likidüs sıcaklığından katı partikül santrifüj yönteminde daha düşük, in-situ partikül santrifüj yönteminde ise daha yüksektir [8]. Araştırmacılar, partikül-matris arayüzey uyumunun daha iyi olmasından dolayı, in-situ partikül santrifüj yöntemine daha çok ilgi göstermişlerdir [9].

Bu çalışmada, santrifüj döküm yöntemi ile Al-Cu ötektik alaşımından FDM üretimi gerçekleştirilmiş ve üretim parametrelerinin malzemenin sertliği üzerine etkileri araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Saf alüminyum (% 99,7) ve saf bakır (% 99,99) ağırlıkça % 67 ve % 33 oranlarında tartıldıktan sonra ergitilmiştir.

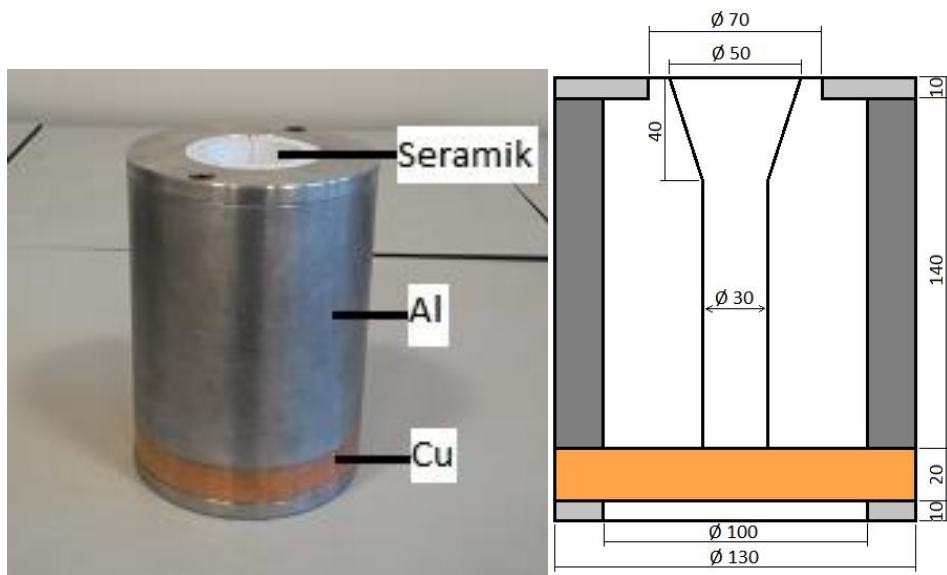
Alaşımın kimyasal kompozisyonunu kontrol etmek için potanın üst, orta ve alt kısımlarından alınan örnekler SPECTROMAXx marka optik emisyon spektrometresi ile incelenmiş ve tamamının ötektik kompozisyonda olduğu görülmüştür. Daha sonra, Al-Cu ötektik alaşımı kıl kalıplara dökülerek santrifüj döküm işlemi için ön-numuneler hazırlanmıştır. Ön-numune içerisinde bulunan elementlerin ağırlıkça oranları Çizelge 1'de gösterilmiştir. Santrifüj döküm yöntemi kapalı bir sistem olduğu ve malzeme ilavesi mümkün olmadığından ön-numune hacmi, kalıp boşluğu hacmi ile uygun olacak şekilde seçilmiştir.

Çeşitli soğuma hızları kalıp tasarımında yapılan değişiklikler ile elde edilmiştir. Santrifüj döküm yönteminde kullanılan, seramik ve metal parçalardan oluşan kalıp seti Şekil 1'de gösterilmiştir.

Kalıbın dış ölçüleri santrifüj döküm makinesinin kalıp tutucu bölmesine uygun olacak şekilde ayarlanmıştır. Santrifüj döküm sırasında oluşacak olan yüksek basınca kalıbın dayanabilmesi için dış katman Al-6061 alüminyum alaşımından üretilmiştir. İstenen soğuma hızlarını elde edebilmek için kalıp tabanına bakır soğutucu yerleştirilmiş ve sıvı metalin bakır soğutucuya temas ettiği alan değiştirilmiştir. Ayrıca ısı akışının daha çok bakır soğutucu yönünde olmasını sağlamak adına kalıbın iç katmanını izolasyon özelliği yüksek seramik malzemeden üretilmiştir. Dört farklı soğuma hızının elde edilmesi için kullanılan seramik iç katmanlar Şekil 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Ön-numunelerin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of pre-samples)

Element	Al	Cu	Si	Fe	Mn	P	Cr	Zn
Ağırlıkça %	66,9	32,87	0,033	0,15	0,0025	0,00185	0,0054	0,03



Şekil 1. Santrifüj döküm yönteminde kullanılan kalıp seti (Mold set used in centrifugal casting)



Şekil 2. Farklı soğuma hızlarının elde edilmesi için kullanılan seramik iç katmanlar (Ceramic inner layers that used for obtaining different cooling rates)

Isı transfer katsayılarının işlem boyunca değişmediği ve ısı akışının sabit olduğu varsayımlarının yapıldığı, ayrıca taşınım ve ışınım ile ısı geçişinin ihmal edildiği hesaplamalara göre soğuma hızları 0,27 °C/s, 7,38 °C/s, 14,23 °C/s ve 21,56 °C/s olarak tespit edilmiştir. Kalıp tabanında sıvı alaşım ile bakır soğutucunun direkt temas ettiği kalıp tasarımlarında, tabandan gerçekleşen ısı transferi Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$Q = k_{Cu}A \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de gösterilen Q sistemden atılan ısı miktarı, k_{Cu} (401 W/m.K) bakır soğutucunun ısı iletim katsayısı, A ısı transferi yönüne dik yüzey alanı, ΔT döküm sıcaklığı ile deney ortamı sıcaklığı arasındaki farkı ve L bakır soğutucunun et kalınlığıdır. Kalıp tabanında sıvı alaşım ile bakır soğutucunun arasına izolasyon malzemesi yerleştirilen kalıp tasarımında, tabandan gerçekleşen ısı transferi Eşitlik 2'ye göre hesaplanmıştır.

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{L_1}{k_{S1}A} + \frac{L_2}{k_{Cu}A}} \quad (2)$$

Eşitlik 2'deki L_1 (15 mm) ve L_2 (20 mm) tabandaki seramik ve bakır soğutucunun et kalınlıkları, k_{S1} (0,13 W/m.K) ise seramik silindir parçanın ısı iletim katsayısıdır. Numunenin etrafını saran, seramik ve alüminyumdan oluşan silindirik yapıdan gerçekleşen ısı transferi Eşitlik 3'e göre hesaplanmıştır.

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_{S2}L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_{Al}L}} \quad (3)$$

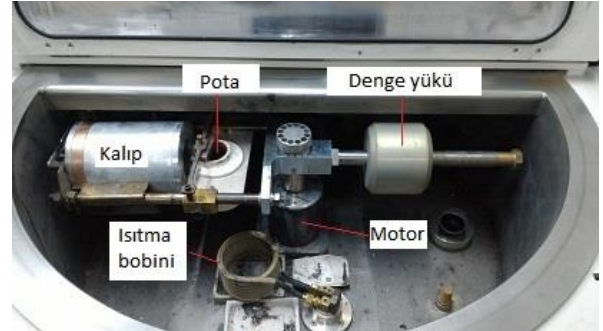
Eşitlik 3'te verilen r_1 kalıp boşluğunun, r_2 seramik kalıbın ve r_3 alüminyum dış gövdenin yarıçaplarıdır. k_{S2} (0,26 W/m.K) ve k_{Al} (167 W/m.K) seramik kalıp ve alüminyum gövdenin ısı iletim katsayılarıdır. Tabandan ve silindirik yüzeyden gerçekleşen toplam ısı transferi Eşitlik 4'te kullanılmış ve bu eşitlikten soğuma hızları tespit edilmiştir.

$$Q_T = mc\Delta T \quad (4)$$

Eşitlik 4'te verilen Q_T tabandan ve silindirik yüzeyden atılan toplam ısı miktarı, m (0,5124 kg) kalıba doldurulan Al-Cu ötektik sıvının ağırlığı, c (895 J/kg.K) Al-Cu

ötektikinin sıvı haldeki ısı kapasitesi ve ΔT soğuma hızı değerini veren, ötektik alaşımın sıcaklığının değişim miktarıdır. En düşük soğuma hızı, bakır soğutucu ile sıvı metalin temasının seramik izolasyon malzemesinden üretilmiş silindirik parçayla tamamen kesildiği tasarımda elde edilmiştir.

Santrifüj döküm işlemi Topcast TCE santrifüj döküm makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ve kalıp yerleşimi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği (Experimental set-up)

Her üretim için döküm sıcaklığı 700 °C, seramik parçaların ön ısıtma sıcaklığı 200 °C ve ergitme süresi 6 dakika olarak sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler Çizelge 2'de gösterilmiştir.

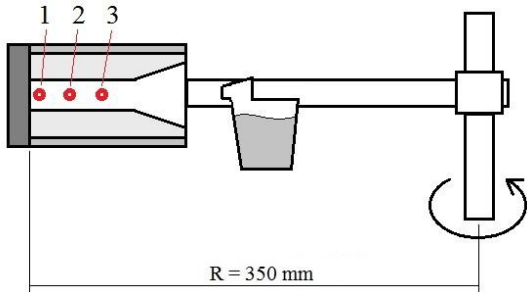
Çizelge 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler (Parameters used in experimental studies)

Parametre	Değer
Soğuma hızı (°C/s)	0,27 – 7,38 – 14,23 – 21,56
Kalıp dönme hızı (rpm)	160 – 225 – 275
Döküm atmosferi	Açık atmosfer – Vakum (200 mBar)

Açık atmosfer ve vakum ortamında yapılan ergitmelerin tamamında döküm alaşımı ergiyene kadar vakum uygulanmıştır. Açık atmosferde yapılan ergitmelerde, ergime sonrası sıvı metal 700 °C sıcaklığa ulaşınca

vakum durdurulmuş ve sistemin içine hava dolması sağlanmıştır. Vakum atmosferinde yapılan üretimlerde ise ilk uygulanan vakum döküm işlemi bitip katılaşma tamamlanmaya kadar sabit tutulmuştur. İstenilen döküm atmosferi ve döküm sıcaklığı elde edildikten sonra kalıp döndürme işlemi başlatılmış ve bu işlem katılaşma sonlanana kadar devam etmiştir.

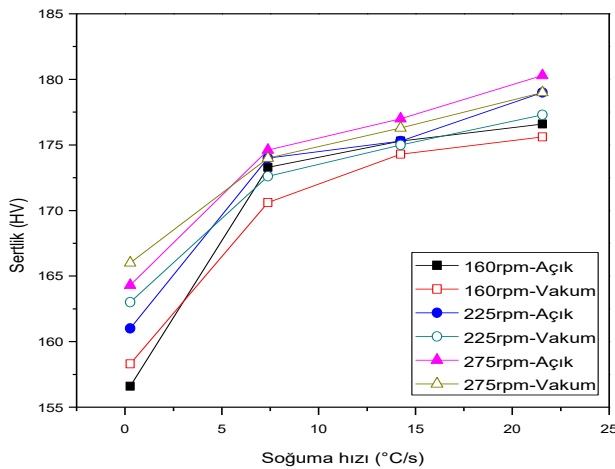
Üretilen numunelerin sertlik değerleri EMCOTEST DuraVision marka cihazla ölçülmüştür. Mikroyapıların görüntülenmesinde ise Leica DMI5000M marka mikroskop kullanılmıştır. Numunelerin kimyasal kompozisyonları SPECTROMAXx marka optik emisyon spektrometresi ile tayin edilmiştir. Ayrıca, numunelerin faz hacim oranları Leica Application Suite V 4.6 görüntü analiz programı aracılığıyla ölçülmüştür. Sertlik testi, spektrometre analizi, mikroyapı görüntüleme ve faz hacim oranı ölçümü her numunenin üç ayrı bölgesine en az üç tekrar ile uygulanmıştır. Bu bölgeler Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Test, analiz ve görüntüleme yapıldığı bölgeler (Parts of test, analysis and visualization)

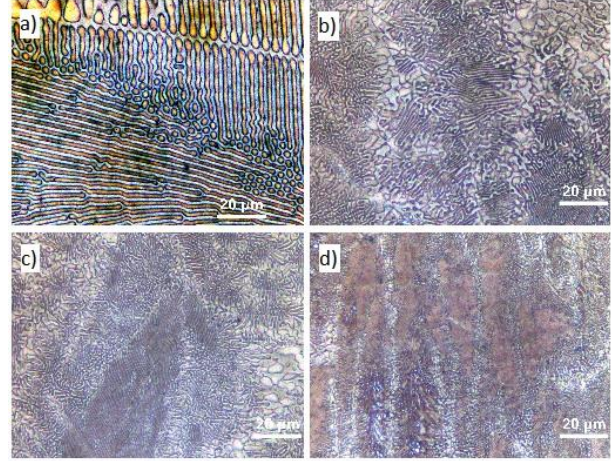
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Santrifüj döküm yöntemi ile üretilen numunelerin bakır soğutucuya en yakın bölümünden alınan sertlik değerlerinin soğuma hızına bağlı değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Numunelerin sertlik değerinin soğuma hızına bağlı değişimi (Effect of cooling rate on hardness of specimens)

Sertlik deneyi sonuçları, soğuma hızı arttıkça sertliğin arttığını göstermiştir. Soğuma hızı arttıkça ikincil dendrit kolları arası mesafe ve tane boyutunun küçülmüş olması sertliği artıran faktörlerdir [10-12]. Farklı soğuma hızlarında üretilmiş numunelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı soğuma hızlarında üretilmiş numunelere ait mikroyapı görüntüleri; a) 0,27 °C/s, b) 7,38 °C/s, c) 14,23 °C/s, d) 21,56 °C/s (Microstructures of specimens obtained in different cooling rates)

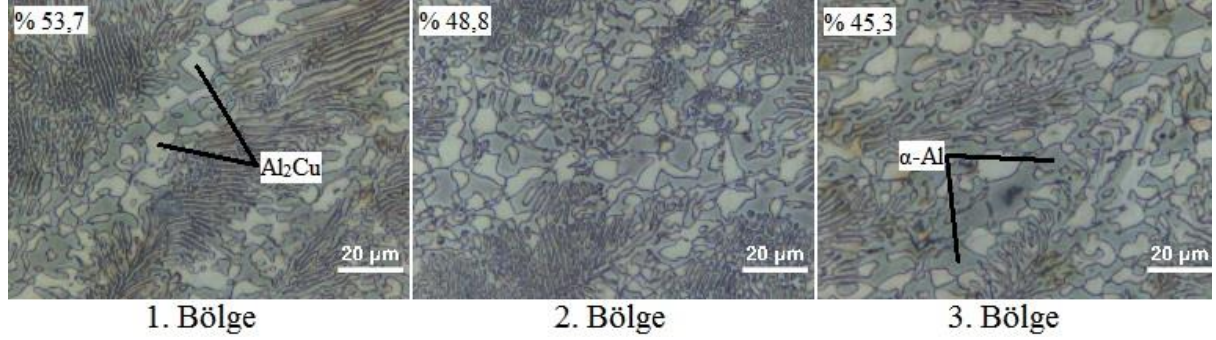
Optik emisyon spektrometre analizleri sonucunda, numunelerin farklı bölgeleri arasında bakır konsantrasyonu açısından % 1,4'e kadar fark olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin farklı bölgelerine ait bakır konsantrasyonları Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Numunelerin farklı bölgelerine ait bakır konsantrasyonları (Cu contents in different parts of specimens)

Üretim şartları	Ağırlıkça % bakır		
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge
0,27 °C/s – 160 rpm – Açık	33,2	33	32,9
0,27 °C/s – 160 rpm – Vakum	33,4		32,9
0,27 °C/s – 225 rpm – Açık	33,5		32,8
0,27 °C/s – 225 rpm – Vakum	33,6		32,7
0,27 °C/s – 275 rpm – Açık	33,8		32,6
0,27 °C/s – 275 rpm – Vakum	34		32,6
7,38 °C/s – 275 rpm – Açık	33,04		32,95
7,38 °C/s – 275 rpm – Vakum	33,05		32,95
21,56 °C/s – 160 rpm – Açık	33,01		32,98
21,56 °C/s – 160 rpm – Vakum	33,02		32,97

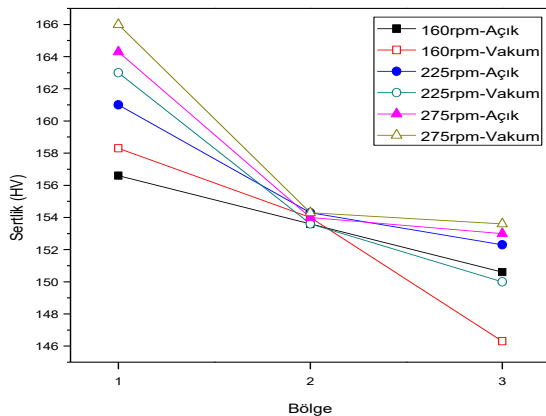
Çizelge 3'te, kimyasal kompozisyon açısından derecelendirmenin başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Dönme kuvveti etkisiyle numunenin dönme merkezine uzak bölgesinde bakır konsantrasyonundaki artış Al₂Cu

faz hacim oranını artırmıştır. Orta bölgede Al₂Cu faz hacim oranı değişmemiş ve numunenin dönme merkezine yakın bölgesinde Al₂Cu faz hacim oranı bakır konsantrasyonundaki azalışla birlikte azalmıştır. Bu durum literatürdeki diğer çalışmalarla uyumluluk göstermektedir [13,14]. Düşük soğuma hızında üretilen numunenin farklı bölgelerine ait mikroyapı görüntüleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. 0,27 °C/s soğuma hızında üretilen numunenin farklı bölgelerine ait mikroyapı görüntüleri (Microstructures of different parts of specimen obtained in 0,27 °C/s cooling rate)

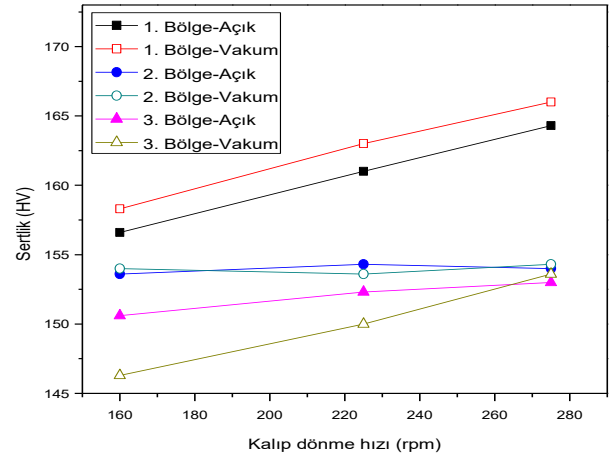
Şekil 7'de gösterilen faz tanımlamaları literatürdeki benzer çalışmalara göre yapılmıştır [13,14]. Al₂Cu faz hacim oranının farklı bölgelerde % 53,7 - % 48,8 - % 45,3 değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Kimyasal kompozisyon farkının çok küçük olması ve düzensiz katılma şartlarından dolayı birincil partikül oluşumu yerine dendrit kollarının kabalaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürde ayrılmış ötektik oluşumu ile açıklanmıştır [13]. Ötektik yapı içerisindeki Al₂Cu fazı sert ve α -Al fazı yumuşak olduğundan, bu fazların yoğunlukta olduğu bölgelerde sertliği önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Düşük soğuma hızlarında katılma daha geç tamamlanacağından dolayı kimyasal kompozisyon farkı daha yüksek olmaktadır. Şekil 8'de en düşük soğuma hızında (0,27 °C/s), kalıp dönme hızı ve döküm atmosferine bağlı olarak numunelerin farklı bölgelerindeki sertlik değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 8. 0,27 °C/s soğuma hızında kalıp dönme hızı ve döküm atmosferine bağlı olarak numunelerin farklı bölgelerindeki sertlik değerlerinin değişimi (Change of hardness values on different parts of specimens according to mold rotation speed and casting atmosphere in 0,27 °C/s cooling rate)

0,27 °C/s soğuma hızında üretilen numunelerin tamamında birinci bölgenin en sert ve üçüncü bölgenin de en yumuşak bölge olduğu görülmektedir. Kalıp dönme hızının sertlik üzerindeki etkisi Şekil 9'da gösterilmiştir.

Birinci bölgede kalıp dönme hızı arttıkça sertlik artmıştır. Bunun sebebi, artan hızla beraber uç bölgede bakır konsantrasyonunun daha yüksek olması sonucu yüksek



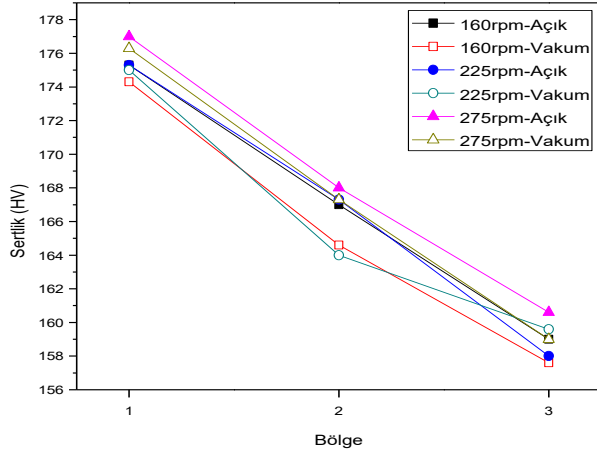
Şekil 9. 0,27 °C/s soğuma hızında kalıp dönme hızının sertlik üzerine etkisi (Effect of mold rotation speed on hardness of specimens in 0,27 °C/s cooling rate)

sertlikteki Al₂Cu faz hacim oranının artışıdır. Vakum, ortamdaki hava molekülleri sayısını azaltıp taşınım ile ısı transferini önemli derecede engellediğinden alaşımın daha uzun süre sıvı kalmasını sağlayarak kimyasal kompozisyon farkının daha yüksek olmasına sebep olmuştur. Bunun sonucunda vakum ortamında üretilen numunelerin sertlik değerleri açık atmosferde üretilenlerden daha yüksek olmuştur. İkinci bölgede Al₂Cu faz hacim oranı değişmediğinden kalıp dönme hızı ve döküm atmosferi değişikliğinin sertlik üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır [15,16].

Üçüncü bölgede ise kalıp dönme hızı arttıkça sertlik artarak ikinci bölgedeki sertlik değerine kadar yükselmiştir. α -Al fazı, yüksek dönme hızlarında besleyici bölgesinde birikmesi sonucu üçüncü bölgedeki Al₂Cu faz hacim oranı ikinci bölge ile yakın değerlerde olmuştur. Bundan dolayı, yüksek dönme hızlarındaki

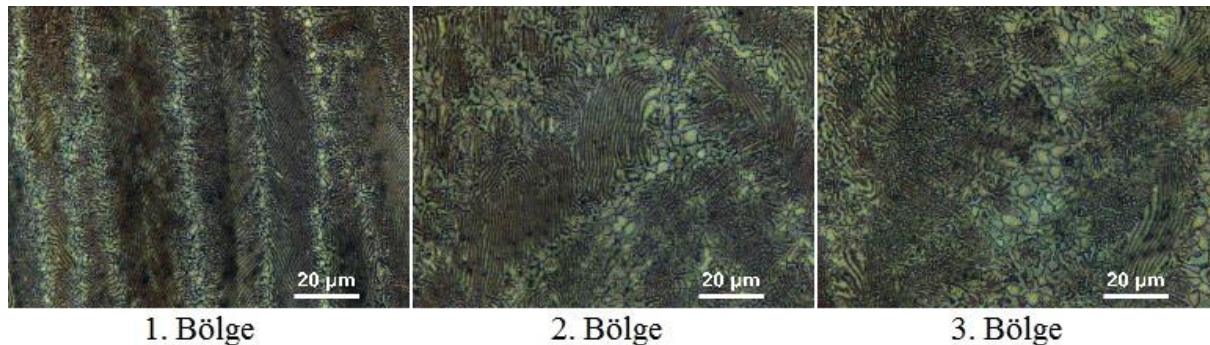
sertlik sonuçları ikinci bölgenin sertlik sonuçlarına çok yakın bulunmuştur.

7,38 °C/s, 14,23 °C/s ve 21,56 °C/s soğuma hızlarında parametrelerin sertliğe etkisi benzer olduğundan sadece 14,23 °C/s soğuma hızında üretilen numunelerin sertlik sonuçları değerlendirilecektir. Yüksek soğuma hızlarında üretilen numunelerin sertlik değerlerindeki değişim düşük soğuma hızında üretilen numunelerinkinden daha farklıdır. Şekil 10'da 14,23 °C/s soğuma hızında üretilen numunelerin sertlik değerlerinin kalıp dönme hızı ve döküm atmosferine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 10. 14,23 °C/s soğuma hızında kalıp dönme hızı ve döküm atmosferine bağlı olarak numunelerin farklı bölgelerindeki sertlik değerlerinin değişimi (Change of hardness values on different parts of specimens according to mold rotation speed and casting atmosphere in 14,23 °C/s cooling rate)

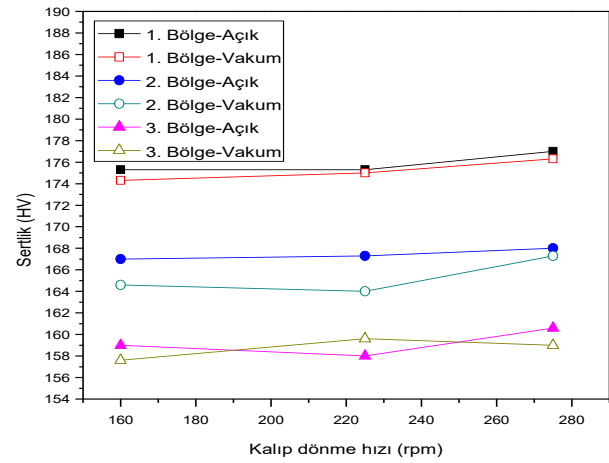
Yüksek soğuma hızlarında kalıp içerisine doldurulan sıvı metalin katılaşması için geçen süre çok kısa olduğundan, üretilen numunelerin farklı bölgeleri arasındaki bakır konsantrasyonu farkı % 0,1 seviyelerinde kalmıştır. Yüksek soğuma hızında üretilen numunenin farklı bölgelerine ait mikroyapı görüntüleri Şekil 11'de gösterilmiştir



Şekil 11. 21,56 °C/s soğuma hızında üretilen numunenin farklı bölgelerine ait mikroyapı görüntüleri (Microstructures of different parts of specimen obtained in 21,56 °C/s cooling rate)

Bölgeler arasındaki sertlik değeri, yavaş soğuma hızındaki Al₂Cu faz hacim oranı değişimi durumundan farklı olarak, bakır soğutucuya olan mesafeye göre değişmiştir. Bu durum, kalıp içerisinde bakır

soğutucudan besleyici bölgesine doğru azalan bir sıcaklık gradyanı oluşumu ile açıklanabilir. Şekil 12'de yüksek soğuma hızlarında kalıp dönme hızının sertlik üzerine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 12. 14,23 °C/s soğuma hızında kalıp dönme hızının sertlik üzerine etkisi (Effect of mold rotation speed on hardness of specimens in 14,23 °C/s cooling rate)

Yüksek soğuma hızlarında numunelerin sertlik açısından derecelendirilmesi temel olarak ikincil dendrit kolları arası mesafeye bağlı olduğundan, kalıp dönme hızı ve döküm atmosferinin etkileri ikincil dendrit kolları arası mesafeyi ne ölçüde değiştirebildikleriyle orantılıdır. Vakum atmosferinde üretilen numunelerde, katılaşmanın daha uzun sürede tamamlanmasından dolayı ikincil dendrit kolları arası mesafe daha büyük ve böylece sertlik daha düşük olmuştur. Kalıp dönme hızının etkisi ise katılaşma hızını değiştirmesi ile tanımlanabilir. Kalıp dönme hızı arttıkça sıvı metale uygulanan basınç artar. Sıvı metale uygulanan basıncın artması sıvı metal-kalıp arayüzünün daha iyi temas etmesini ve döküm-kalıp ara yüzeyinden ısının daha hızlı transfer olmasını sağlanmasından dolayı [17-19] katılaşma daha hızlı olmuş, dendrit kolları arası mesafe kısalmış ve bundan

dolayı sertlik artmıştır. Ancak, kalıp dönme hızı ve döküm atmosferinin yüksek soğuma hızlarında üretilen numunelerin sertliği üzerindeki etkisi oldukça düşüktür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Santrifüj döküm yöntemi ile kimyasal kompozisyon, Al₂Cu faz hacim oranı ve sertlik açısından derecelendirilmiş FDM üretimi gerçekleştirilmiştir.
- Sertlik değişimindeki temel etkenin düşük soğuma hızında Al₂Cu faz hacim oranı, yüksek soğuma hızında ise kalıp içerisindeki sıcaklık dağılımı olduğu tespit edilmiştir.
- Soğuma hızının artması ile sertlik artmıştır, diğer parametrelerin etkisi soğuma hızına bağlı olarak farklılık göstermiştir.
- Al-Cu ötektik alaşımının fonksiyonel derecelenmesi; yüksek soğuma hızlarında ikincil dendrit kolları arası mesafenin değişimi, düşük soğuma hızında ise Al₂Cu faz hacim oranı değişimi ile elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Üretim aşamasındaki teknik desteği dolayısıyla Nev Vakumlu Hassas Döküm'e (Newincasting) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Shiota I. and Miyamoto Y., "Functionally graded materials 1996", *Elsevier Science B. V.*, Amsterdam, 1-14, (1997).
2. Miyamoto Y., Kaysser W. A., Rabin B. H., Kawasaki A. and Ford R. G., "Functionally graded materials design, processing and applications", *Springer Science+Business Media*, New York, 1-26, (1999).
3. Kieback B., Neubrand A. and Riedel H., "Processing techniques for functionally graded materials", *Materials Science and Engineering A*, 362: 81-105, (2003).
4. Zhai Y., Liu C., Wang K., Zou M. and Xie Y., "Characteristics of two Al based functionally gradient composites reinforced by primary Si particles and Si/in situ Mg₂Si particles in centrifugal casting", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20: 361-370, (2010).
5. Rajan T. P. D., Pillai R. M. and Pai B. C., "Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites", *Materials Characterization*, 61: 923-928, (2010).
6. Rahvard M. M., Tamizifar M., Boutorabi S. M. A. and Shiri S. G., "Characterization of the graded distribution of primary particles and wear behavior in the A390 alloy ring with various Mg contents fabricated by centrifugal casting", *Materials and Design*, 56: 105-114, (2014).
7. Chumanov I. V., Anikeev A. N. and Chumanov V. I., "Fabrication of functionally graded materials by introducing wolframium carbide dispersed particles during centrifugal casting and examination of FGM's structure", *Procedia Engineering*, 129: 816-820, (2015).
8. Watanabe Y., Kim I.S. and Fukui Y., "Microstructures of functionally graded materials fabricated by centrifugal solid-particle and in-situ methods", *Metals and Materials International*, 11: 391-399, (2005).
9. Arsha A. G., Jayakumar E., Rajan T. P. D., Antony V. and Pai B. C., "Design and fabrication of functionally graded in-situ aluminum composites for automotive pistons", *Materials and Design*, 88: 1201-1209, (2015).
10. Reis B. P., França R. P., Spim J. A., Garcia A., DaCosta E. M. and Santos C. A., "The effects of dendritic arm spacing (as-cast) and aging time (solution heat-treated) of Al-Cu alloy on hardness", *Journal of Alloys and Compounds*, 549: 324-335, (2013).
11. Houria M. I., Nadot Y., Fathallah R., Roy M. and Maijer D. M., "Influence of casting defect on SDAS on the multiaxial fatigue behaviour of A356-T6 alloy including mean stress effect", *International Journal of Fatigue*, 80: 90-102, (2015).
12. Ceschini L., Morri A., Toschi S., Johansson S. and Seifeddine S., "Microstructural and mechanical properties characterization of heat treated and overaged cast A354 alloy with various SDAS at room and elevated temperature", *Materials Science & Engineering A*, 648: 340-349, (2015).
13. Watanabe Y. and Oike S., "Formation mechanism of graded composition in Al-Al₂Cu functionally graded materials fabricated by a centrifugal in situ method", *Acta Materialia*, 53: 1631-1641, (2005).
14. Watanabe Y., Hattori Y. and Sato H., "Distribution of microstructure and cooling rate in Al-Al₂Cu functionally graded materials fabricated by a centrifugal method", *Journal of Materials Processing Technology*, 221: 197-204, (2015).
15. Lin X., Liu C. and Xiao H., "Fabrication of Al-Si-Mg functionally graded materials tube reinforced with in situ Si/Mg₂Si particles by centrifugal casting", *Composites: Part B*, 45: 8-21, (2013).
16. Huang X., Liu C., Lv X., Liu G. and Li F., "Aluminum alloy pistons reinforced with SiC fabricated by centrifugal casting", *Journal of Materials Processing Technology*, 211: 1540-1546, (2011).
17. Akar N., Şahin H. M., Yalçın N. and Kocatepe K., "Experimental study on the effect of liquid metal superheat and casting height on interfacial heat transfer coefficient", *Experimental Heat Transfer*, 21(1): 83-98, (2008).
18. Şahin H. M., Kocatepe K., Kayıkcı R. and Akar N., "Determination of Unidirectional Heat Transfer Coefficient during Unsteady-State Solidification at Metal Casting-Chill Interface", *Energy Conversion and Management*, 47(1): 19-34, (2006).
19. Akar N., Boran K. and Hoziklil B., "Effect of Mold Temperature on Heat Transfer Coefficient at Casting-Mold Interface", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 28(2): 275-282, (2013).