



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Sıcak Yırtılmanın Alüminyum Alaşımlarının Metal Kalitesine Etkisinin İncelenmesi ve Alaşımların Titreşim Karakteristiğinin Belirlenmesi

Engin TAN ^{a,*}, Derya DIŞPINAR ^b, Ali Tekin GÜNER ^c, Gökmen ATLIHAN ^d

^a Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE

^b Global R&D Non Ferrous Metal Treatment Center, Foseco, Enschede, NEDERLAND

^c Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE

^d Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: etan@pau.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1013025

ÖZ

Alüminyum alaşımlarının döküm yoluyla üretilmesindeki önemli kusurlardan birisi sıcak yırtılmadır. Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip 1050 ve 5083 döküm alaşımlarının sıcak yırtılmaları araştırılmış ve sıcak yırtılmaya neden olan tasarım parametreleri ile döküm koşulları belirlenmiştir. Ayrıca sıcak yırtılmanın metalografik ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Bununla birlikte, Vakum Altında Katılma Testi (VAKT) ile bifilm indeks ölçümleri gerçekleştirilerek sıcak yırtılmanın metal kalitesi üzerindeki etkileri, döküm alaşımlarının yapısındaki porozitelerin varlığına bağlı olarak incelenmiştir. Son olarak, döküm alaşımlarının doğal frekans analizleri ve titreşim testleri yapılmış, serbest titreşim ve burkulma karakteristikleri farklı sınır koşulları altında ayrı ayrı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak yırtılma, Alüminyum alaşımı, Bifilm, Metal kalitesi, Titreşim

Investigation of the Effect of Hot Tearing on the Metal Quality of Aluminum Alloys and Determination of the Vibration Characteristics of Alloys

ABSTRACT

One of the major defects in the production of aluminum alloys by casting is hot tearing. In this study, hot tearing of 1050 and 5083 casting alloys with different properties were investigated and the design parameters and casting conditions caused hot tearing were determined. In addition, the effects of hot tearing on metallographic and mechanical properties were also investigated. In addition, the effects of hot tear on metal quality were investigated depending on the presence of porosities in the structure of the casting alloys by performing bifilm index measurements with the RPT method. Finally, natural frequency analyzes and vibration tests of casting alloys were carried out, and free vibration and buckling characteristics were investigated separately under different boundary conditions.

Keywords: Hot tearing, Aluminum alloy, Bifilm, Metal quality, Vibration

I. GİRİŞ

Günümüzde alüminyum ve alaşımları; hafiflik ve yüksek şekillenme kabiliyeti özelliklerinden dolayı, otomotiv endüstrisi, havacılık ve uzay sanayi, çeşitli deniz yapıları, gıda ve mutfak endüstrisi gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının döküm yolu ile üretiminde çeşitli zorluklar ve hatalar ile karşılaşmaktadır. Döküm prosesinde, hammadde, ergitme parametreleri, kalıp malzemesi ve tasarımı ile farklı katılma koşullarına bağlı olarak yüzden fazla hatayla karşılaşıldığı bilinmektedir [1]. Bu hatalar, nihai ürünün mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Döküm yolu ile üretimde karşılaşılan hatalardan en önemli iki hata porozite ve sıcak yırtılmadır [2]. Sıcak yırtılma, katılma esnasında meydana gelmektedir ve “döküm alaşımının geometrisine bağlı olarak, dökümün kritik bölgelerinde (özellikle kesit farklılığı olan bölgelerde) en son kalan sıvının ayrışması” olarak tanımlanmaktadır [3, 4]. Farklı kalınlardaki kesitlerin soğuması esnasında, soğuma hızlarının farklılığından dolayı kritik kesitlerde görülen sıcak yırtılmalar döküm prosesinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisidir. Sıcak yırtılma hatasını karakterize eden bazı özellikler bulunmaktadır. Sıcak yırtılma, her alaşımda ve her zaman aynı koşullarda görülmeyip tamamen rastgele oluşmaktadır, dağınık, dallanmış çatlaklar halinde şekillenerek çatlak ilerlemesi genellikle tanelerarası (transgranular) gerçekleşmektedir, yüzey morfolojisi genel olarak dendritiktir ve hata yüzeyi yoğun oksit tabakaları içermektedir [5, 6]. Demir dışı metallerde sıcak yırtılmaya etki eden başlıca faktörler; alaşımın kompozisyonu, tane yapısı, boyutu ve morfolojisi, döküm ve kalıp sıcaklıklarıdır [3]. Sıcak yırtılma analizleri CRC (Constrained Rod Casting-Sınırlanmış Döküm Çubuk) kalıbı, T şekilli ve yük hücre modifiyeli T şekilli kalıp, backbone (omurga), ring mould (halka kalıp), WPI (Worcester Polytechnic Institute) kalıbı, cold finger (soğuk parmak) gibi çok farklı kalıp tasarımlarıyla test edilebilmektedir [7-14].

Alüminyum alaşımlarının kaliteli üretiminde en temel iki husus, içsel ve dışsal hatalar olarak adlandırılacak hataların ortadan kaldırılmasıdır. İçsel hatalar mikroyapıdan kaynaklanan *sıcak yırtılma*, tane boyutu, segregasyon ve benzeri hatalar iken, dışsal hatalar ise üretim sırasında potadan karışan inklüzyon veya hava ile reaksiyon sonucu yüzeyde oluşan oksitlerin ergiyiğe karışması olarak değerlendirilebilmektedir [15, 16]. Dışsal hatalardan en önemlileri bifilmelerdir. Çift film olarak da adlandırılan bu hatalar, alüminyum ve alaşımlarının dökümü esnasında, ergimiş metal ile havadaki rutubet arasındaki reaksiyon sonucu yüzeyde oluşan oksit filmlerinin, başta türbülans olmak üzere çeşitli sebeplerle parçalanıp katlanarak sıvı metal içerisine dağılması ve aralarına bir miktar da havanın difüze olmasıyla meydana gelirler [17-19]. Bifilmeler, porozite gibi hataların temelini oluştururlar ve mikroyapıda çatlak görevi görerek düşük mekanik özelliklere neden olurlar [20, 21]. Bifilm-porozite ilişkisini açıklayabilecek deneysel yöntem Vakum Altında Katılma Testi – VAKT (Yaygın literatür ifadesi: RPT – Reduced Pressure Test)’dir. 1950’li yıllardan bugüne kadar sıvı metal içerisindeki hidrojen içeriğini belirlemek üzere kullanılan [22] bu yöntem, ilk kez olarak Dışınar ve Campbell’in öncülüğünde [20, 21, 23] yapılan çalışmalarda bifilm içeriğini tespit etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmalarda VAKT’nin bifilm içeriğini tespit etmede başarılı bir şekilde kullanılabildiğini ispatlamışlardır. VAKT yönteminin temel prensibi; yaklaşık olarak 100 g ağırlığındaki sıvının vakum odası içindeki bir kalıba dökülerek, seçilmiş uygun vakum değeri altında katılmasıdır. Kaliteli alaşımlarda, katılma sonrası döküm parçası yüzeyindeki bifilm miktarı düşük iken, hatalı alaşımlarda yüksek miktarda bifilm görülmektedir ve bifilm miktarlarının ölçülmesiyle metal kalitesi belirlenebilmektedir [24, 25].

Alüminyum alaşımlarının kullanıldıkları sektörler ileri teknoloji gerektiren ve güvenlik faktörlerinin üst derecede önemli olduğu sektörlerdir. Bu nedenle bu sektörlerde kullanılan araçların ve ekipmanların güvenlik unsurlarının belirlenmesinde hatasız bir üretim ile birlikte, mukavemet ve rijitlik unsurları da oldukça önemlidir. Üretilen parçalarda bulunan sıcak yırtılma, porozite vb. döküm hataları, parçanın rijitliğinde azalmalara ve buna bağlı olarak doğal frekansta düşümlere neden olacaktır. Eğer bir parçanın doğal frekansı çalışma frekansı ile çakışırsa parçada rezonans meydana gelecektir ve büyük hasarlarla sonuçlanacaktır. Bu nedenlerle, düşük yoğunluk ve yüksek dayanıma ek olarak sağladığı darbe dayanımı, titreşim sönümleme veya ısı iletim yetenekleri gibi ilave gelişmiş özellikler ile işlevsel malzemelere yönelik çalışmalar artmaktadır [26-30].

Bu çalışmada, 1050 ve 5083 alaşımlarının döküm yolu ile üretiminde meydana gelen sıcak yırtılmalar CRC (Constrained Rod Casting-Sınırlandırılmış Döküm Çubuk) kalıp yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Sıcak yırtılma bölgelerinin metalografik karakterizasyonu SEM analizleri ile belirlenmiştir. Sıcak yırtılmanın mekanik özelliklere etkileri ise sertlik ölçümleri ve çekme testleri ile incelenmiştir. Sıcak yırtılma ile metal kalitesi arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere alaşımlara VAKT testleri uygulanmış ve bifilm indeks ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İlave olarak, üretilen döküm alaşımlarının titreşimleri doğal frekans analizleri ile deneysel olarak belirlenmiş ve farklı sınır şartlarında serbest titreşim ve burkulma karakteristikleri incelenmiştir.

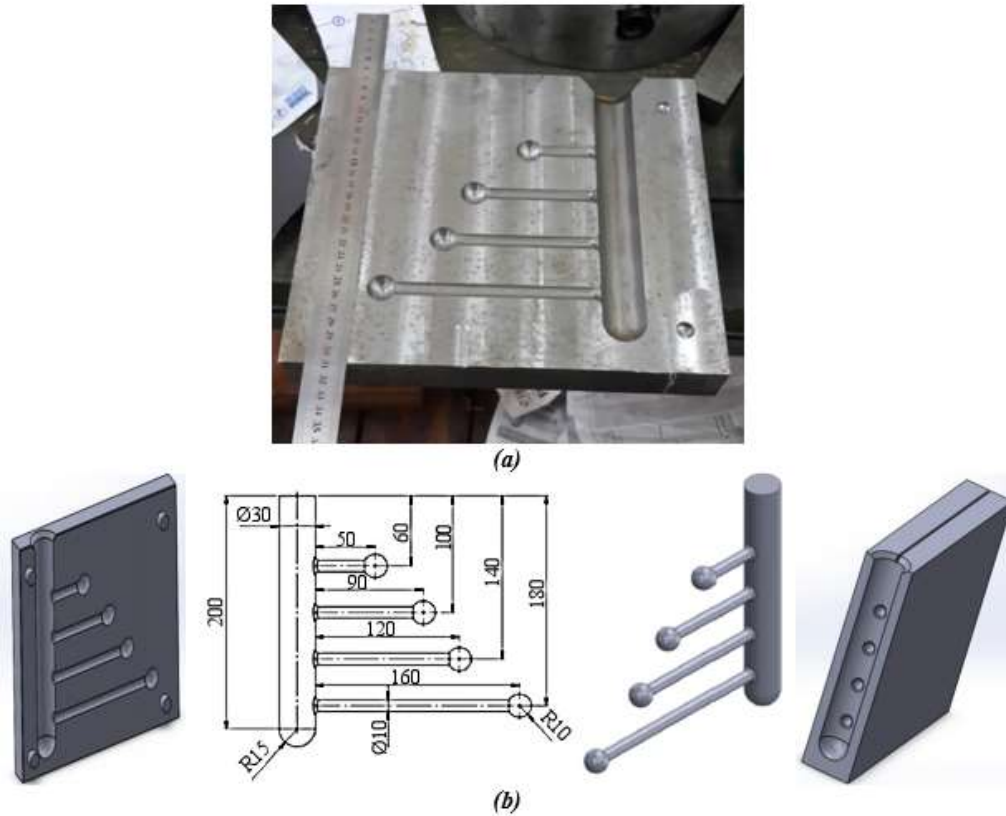
II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, 1050 ve 5083 alüminyum alaşımlarının sıcak yırtılma özellikleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri (%).

Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
1050	0,104	0,265	0,000	0,014	0,001	0,000	0,002	0,001	0,020	0,009	0,008	Kalan
5083	0,14	0,22	0,035	0,64	4,64	0,092	0,005	0,023	0,033	0,01	0,015	Kalan

Çalışmada alaşımların sıcak yırtılma karakteristikleri CRC (Constrained Rod Casting-Sınırlandırılmış Döküm Çubuk) kalıp yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Şekil 1’de alt ve üst derece olarak iki adet imalatı gerçekleştirilen sıcak yırtılma kalıbının fotoğrafları ve Solidworks programında oluşturulan katı modeli ile boyutları literatürde [14] yer alan kalıp tasarımlarına uygun olarak verilmiştir.



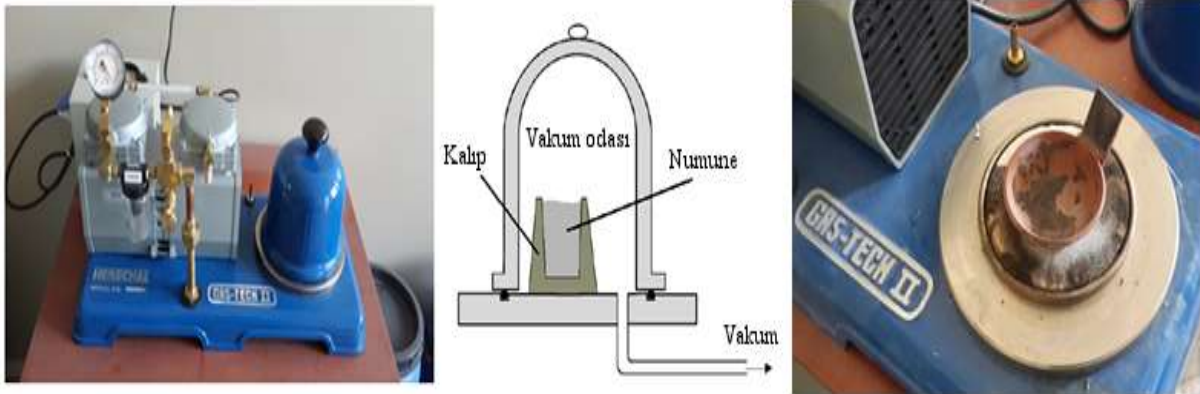
Şekil 1. Sıcak yırtılma kalıbı (a) İmal edilmiş (b) Katı modeli ve boyutları.

Ticari olarak temin edilen alaşımlar, 10 kg kapasiteli ergitme fırınında 730 °C sıcaklıkta ergitilmiştir. Ergitme fırınında sıvı hale getirilen malzeme, Şekil 1’de verilen kalıba dökülmeden önce, kokil kalıba ön ısıtma işlemi yapılmıştır. Bu ön ısıtma işlemi, viskozitesi yüksek olan alüminyum alaşımının, ince çubukları tam olarak doldurmadan katılaşmasını önlemek amacıyla uygulanmaktadır. Bununla birlikte, döküm parçanın katılaştıktan sonra kalıptan kolay ayrılması için kalıp boyası ve bor karbür (B₄C) sprey uygulanmıştır. Ön ısıtma işlemi sonrası döküm işlemi, Şekil 2’de gösterildiği gibi gravity olarak gerçekleştirilmiştir. Döküm sonrası parça, kalıp içinde soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 2. Sıcak yırılma kalıbına döküm işleminin gerçekleştirilmesi.

Sıcak yırılma ile metal kalitesi arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere, VAKT testleri Şekil 3’te verilen VAKT test cihazında gerçekleştirilmiştir. Vakum basıncı olarak 0,9 bar sabit basınç seçilmiştir. Sıvı metal, belirlenen sabit vakum basıncı altında yine Şekil 3’te verilen kalıba dökülerek hazırlanmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra manuel kesme cihazı ile kesilerek kesit görüntüleri alınmıştır. Kesit görüntülerinden bifilm uzunlukları hesaplanarak, sonuçları karşılaştırmak üzere bifilm indeks ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3. VAKT test cihazı ve şematik gösterimi [19].

Alaşımın mekanik özelliklerini incelemek için sertlik ölçümleri ve çekme testleri uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri Matsuzawa DXT Rockwell sertlik ölçüm cihazında HRA skalası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numuneleri ASTM E8/E8M-09 standardına göre silindirik çekme numunesi olarak işlenmiştir ve çekme testleri 100 kN kapasiteli Hardway WDW100 serisi çift kolon çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Sıcak yırtılma bölgelerinin SEM analizleri, Jeol marka JSM 5600 model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, metal kalitesiyle titreşim karakteristikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere serbest titreşim testleri DEWE – 43 veri toplama sistemi ve MSI – BR – ACC ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında burkulma testleri, Instron marka universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Serbest titreşim testleri tutulu-serbest (C-F), burkulma testleri ise tutulu-tutulu (C-C) sınır şartları altında homojen Timoshenko kiriş teorisine göre [31-33] uygulanmıştır.

Titreşim ve burkulma testlerinde her alaşım için üçer numune hazırlanmıştır ve burkulma yükleri Eş. 1’de, serbest titreşim analizi sonucu temel frekans değerleri de Eş. 2’de verilen bağıntılarla boyutsuz değerlere dönüştürülmüştür.

$$\alpha = \frac{PL^2}{EI} \quad (1)$$

$$\bar{\omega} = \omega L^2 \sqrt{\left(\frac{\rho A}{EI}\right)} \quad (2)$$

Verilen bağıntılarda; P burkulma yükünü, E elastisite modülünü, L numune boyunu, I atalet momentini, ω dairesel temel frekans değerini, ρ yoğunluğu, A ise numune kesit alanını ifade etmektedir [31, 34].

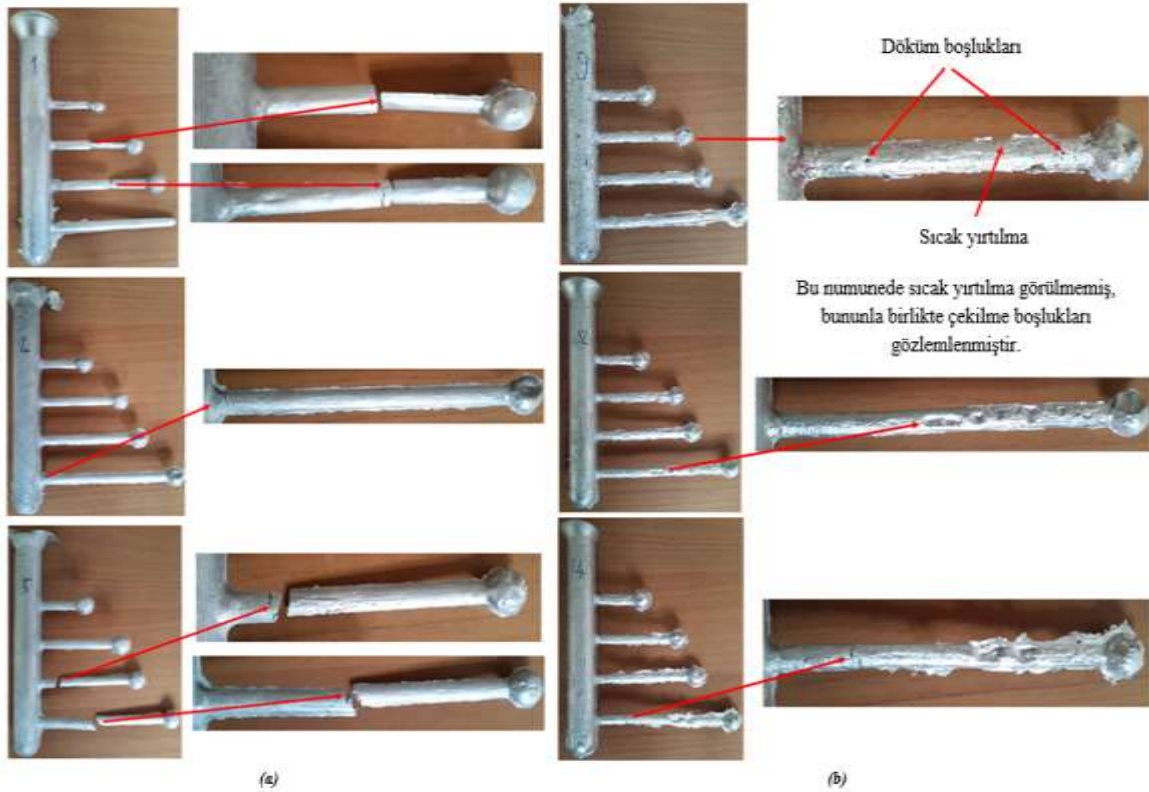
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 4’te 1050 ve 5083 alaşımından çubukların sıcak yırtılma bölgeleri gösterilmiştir. Verilen şekillerde görüldüğü üzere, her numunede çubukların farklı bölgelerinde ve farklı şiddetlerde yırtılma meydana gelmiştir. Nitekim dökümde karşılaşılan sıcak yırtılma hataları, literatürde “gelişigüzel, rastgele oluşan, her zaman aynı şartlarda oluşmayan” şeklinde tanımlanmaktadır [3]. Bununla birlikte tüm numunelerde döküm çubuklarının tam olarak dolmadığı ve yer yer döküm boşluklarının bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, 5083 alaşımının akıcılığının oldukça düşük olması ve bu nedenle kalıbı tam olarak doldurmadan katılaşması ile açıklanmaktadır. Ayrıca bu sonuç, literatürde de birçok döküm probleminin sorumlusu olarak kabul edilen bifilmelerin etkisi ile ilişkilendirilmektedir [5]. Genel olarak, dikey yolluğun kollarla bağlantı noktalarındaki büzülme oranlarının da sıcak yırtılmayı tetiklediği ve bu bölgelerde görülen sıcak noktaların, genellikle ötektik katılaşma sonucu bifilmelerin bu bölgelere itilmesi ve porozite oluşurmasıyla meydana geldiği değerlendirilmiştir.

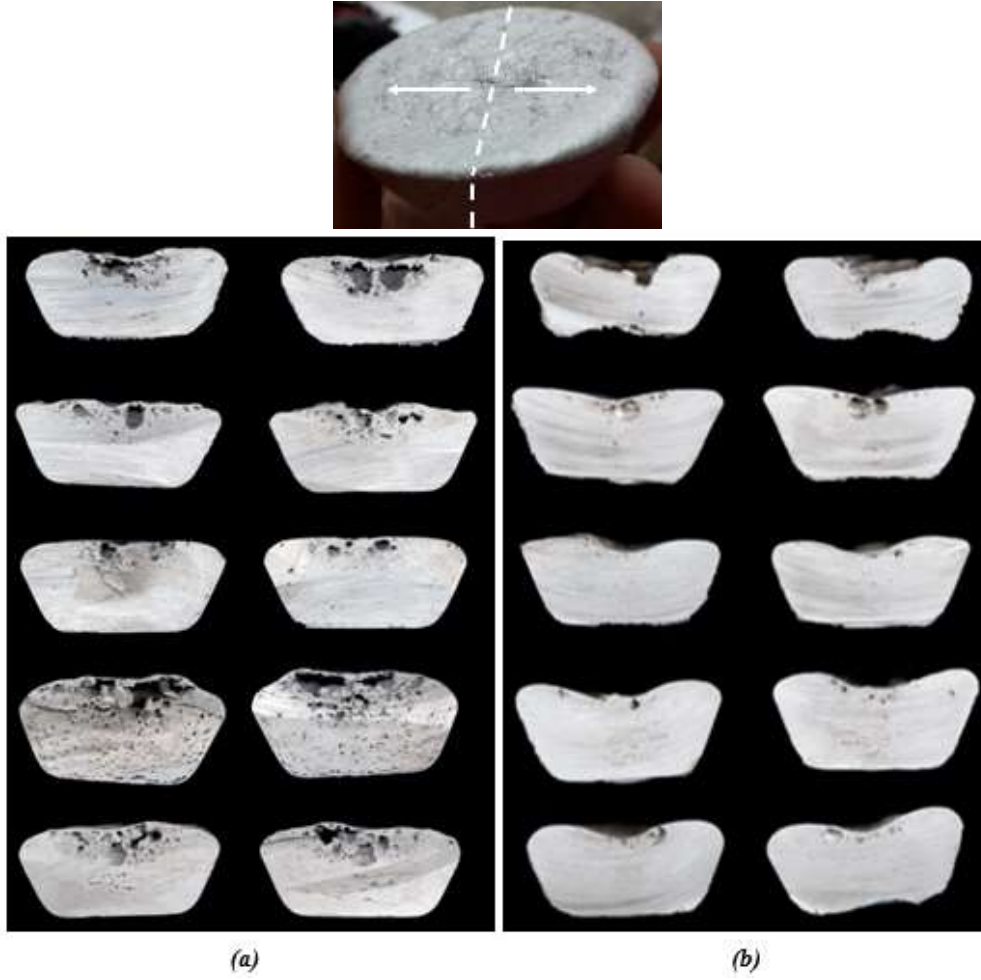
Katılaşma sonrası döküm parçalarda oluşan poroziteleri belirlemek ve bu poroziteleri sıcak yırtılma hasarları ile ilişkilendirmek üzere VAKT testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5’te 1050 ve 5083 alaşımlarına ait farklı dökümlerden elde edilen VAKT numunelerinin ve bu numunelerde oluşan porozitelerin görüntüleri verilmiştir. VAKT numuneleri Şekil 5’te gösterilen kesikli çizgiler boyunca düşey yönde kesildikten sonra, oklar yönünde porozite görüntüleri alınmıştır.

1050 alaşımında VAKT testi sonucunda oluşan porozitelerin miktarı oldukça fazladır. Bu durum 1050 alaşımından hazırlanan sıcak yırtılma çubuklarında oldukça yüksek miktarda sıcak yırtılmaların meydana gelmesi ve hatta birçoğunda kırılmalar şeklinde sonuçlanmıştır. Şekil 5’te karşılaştırmalı olarak verildiği üzere, 5083 alaşımında meydana gelen poroziteler, 1050 alaşımına göre oldukça düşük miktardadır. Porozitelerin miktarlarının sayısal karşılaştırması ise, Şekil 6’da verilen bifilm indeks değerleri ile yapılabilmektedir. Bifilm indeks değeri arttıkça porozite miktarı artmaktadır.

Sıcak yırtılmalarla bifilmelerin ilişkisini gösteren bir diğer gösterge, bifilmelerin yoğun olduğu bölgelerde bifilmelerin açılıp poroziteyi oluşturmalarıdır [35]. Şekil 6’da verilen iki alaşımın ortalama bifilm indeks değerlerine göre, 1050 alaşımının ortalama bifilm indeksi 88,5 mm iken, 5083 alaşımında bu değer 30,1 mm olarak belirlenmiştir. 1050 alaşımına göre bifilm indeksi yaklaşık % 66 oranında daha düşük olan 5083 alaşımında sıcak yırtılmaların oldukça az olması ve daha çok yüzey çöküntülerinin gözlenmesi (Şekil 4), bifilm indeksi çok daha yüksek olan 1050 alaşımında ise, yüzey çöküntülerinin görülmemiş sıcak yırtılmaların fazla olması bu sonucu desteklemektedir. Ayrıca Campbell da yaptığı çalışmada, bifilmelerin yokluğunda sıvı/katı büzülme gerilmelerinin yüksek olduğunu ve bunun yüzey çökmesine yol açabileceğini göstermiştir [36]. Benzer şekilde Uludağ vd. yaptıkları çalışmada, katılaşma morfolojisi ve katılaşma aralığı parametrelerine ve bifilm indeks yoğunluğuna göre farklı alüminyum alaşımlarında sıcak yırtılma ile yüzey çöküntüleri arasındaki ilişkiyi belirlemiştir [37].

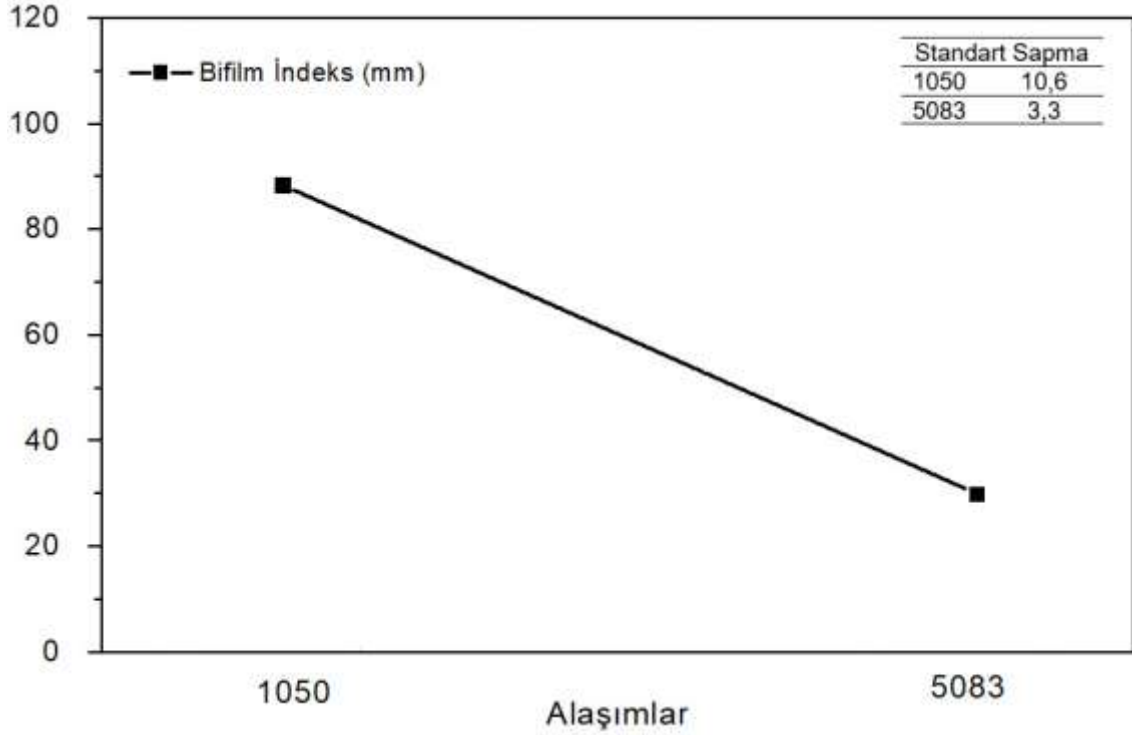


Şekil 4. (a) 1050 (b) 5083 alaşımında meydana gelen sıcak yırtılma bölgeleri.



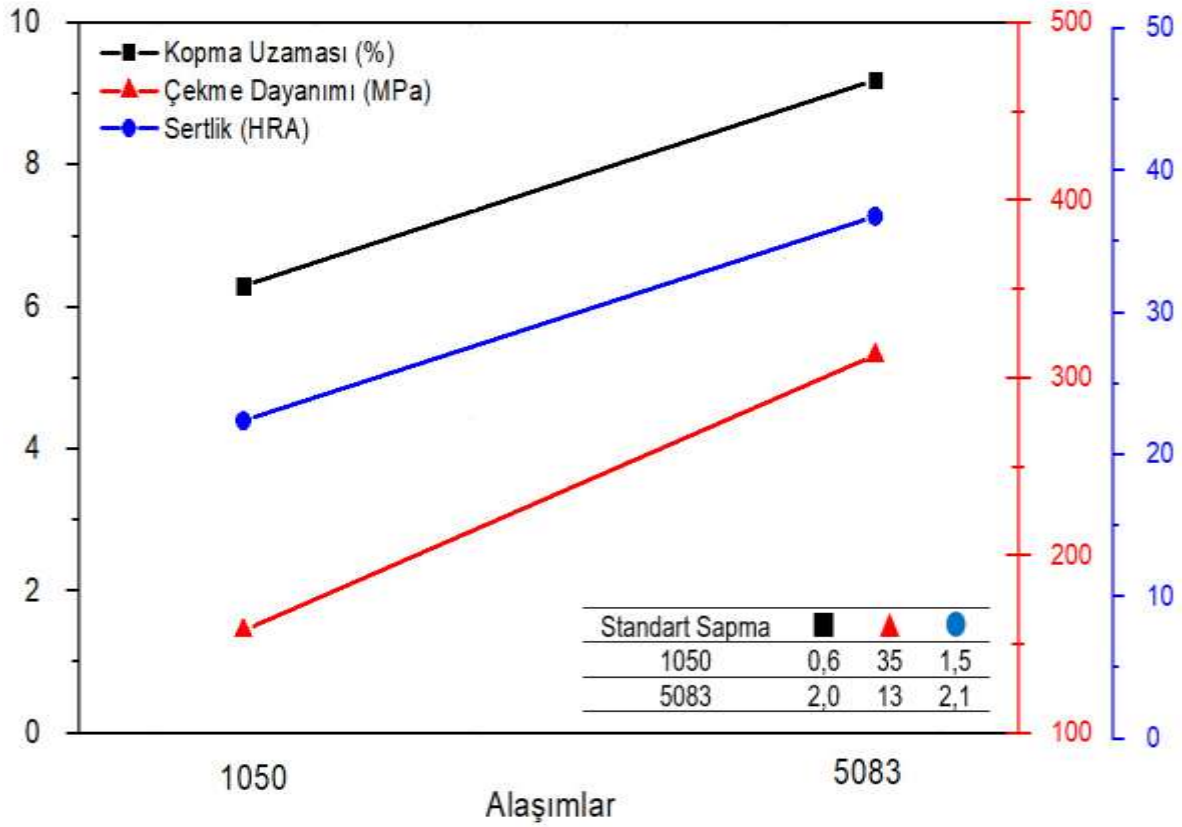
Şekil 5. (a) 1050 alaşımına, (b) 5083 alaşımına ait VAKT numuneleri ve oluşan poroziteler.

Alaşım elementi oranı 1050 alaşımına göre daha yüksek olan 5083 alaşımında likidus (sıvılaşma) ve solidus (katılaşma) sıcaklıkları arası bölgenin geniş olması (GKAS – Geniş Katılaşma Aralığına Sahip alaşımlar), yarı katı bölgede (mushy zone) katılaşma morfolojisinin değişmesine ve döküm parçada pürüzlü yüzeyler oluşmasına neden olmaktadır. Saf metaller ise DKAS (Dar Katılaşma Aralığına Sahip) alaşımlar olduğundan, bu çalışmada 1050 alaşımından döküm çubuklarının yüzeyi çok daha parlak ve pürüzsüz olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, bifilm indeksi ve buna bağlı olarak porozite miktarı 5083 alaşımına göre daha fazla olan 1050 alaşımında daha fazla sıcak yırtılma hasarları meydana gelmiştir. Bununla birlikte, 5083 alaşımının akıcılığının düşük olması ve kalıpta erken katılaşmadan dolayı çubuklar üzerinde döküm boşlukları gözlemlenmiştir. Bu nedenle, 5083 alaşımının yüzey kalitesinin 1050 alaşımından daha kötü olduğu görülmüştür.



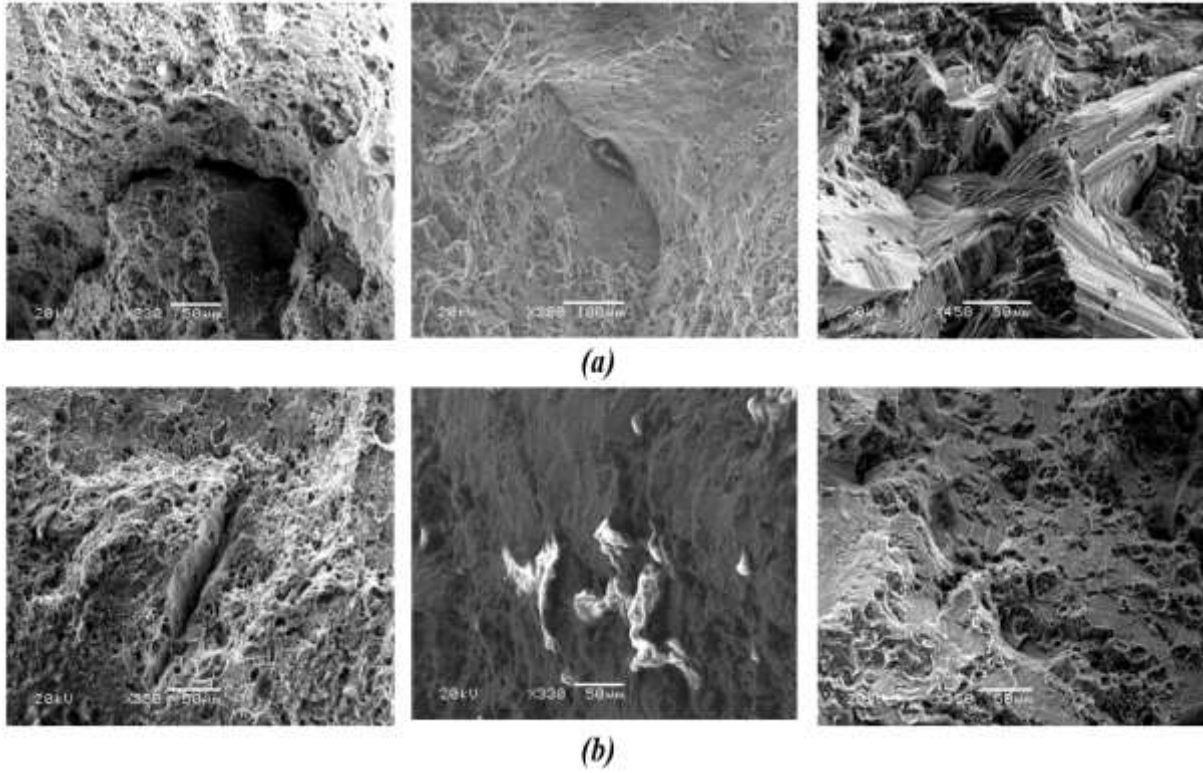
Şekil 6. İki alaşımın ortalama bifilm indeks değerlerinin karşılaştırması.

1050 ve 5083 alaşımlarına ait sertlik ölçüm sonuçları, çekme testi sonucunda elde edilen çekme dayanımı kopma uzaması değerleri Şekil 7’de verilmiştir. Dayanım değerleri ile bifilm indeks arasındaki ilişki literatürde, bifilm indeks değerinin artmasıyla mekanik özelliklerde düşüş görülmeleri olarak verilmektedir [35, 38]. Nitekim Şekil 7’de verilen iki alaşıma ait ortalama çekme dayanımı değerlerinde 1050 alaşımında, deneysel veriler arasındaki sapmaların 5083 alaşımına göre yaklaşık 2,7 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Değerlerdeki bu sapmaların yapıdaki bifilmelerin empürite elementlerinin üzerinde çekirdekleşerek sünekliliği azaltması ve çentik etkisi yaparak çatlak başlangıcı görevi görmesiyle ilişkili olduğu önerilmektedir [39]. Şekil 7’de görüldüğü üzere, 5083 alaşımının kopma uzaması % 9,2 iken, 1050 alaşımının kopma uzaması % 6,3 olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre 5083 alaşımının süneklilik değerleri 1050 alaşımından yaklaşık % 46 daha yüksektir. Zhao ve diğ. [40], yaptıkları çalışmada, sıcak yırtılmanın meydana gelebilmesi için gerekli gerilme-deformasyon miktarını test etmişlerdir. Çalışmada, sünekliliğin düşük olduğu sıcaklık aralıklarında sıcak yırtılmanın arttığını gözlemlenmişler ve bu durumu katılaşma esnasında meydana gelen büzülme oranlarıyla ilişkilendirmişlerdir. Süneklilik değeri düşük olan 1050 alaşımında meydana gelen sıcak yırtılmaların, 5083 alaşımından daha fazla olması bu sonuçla uyum göstermiştir.



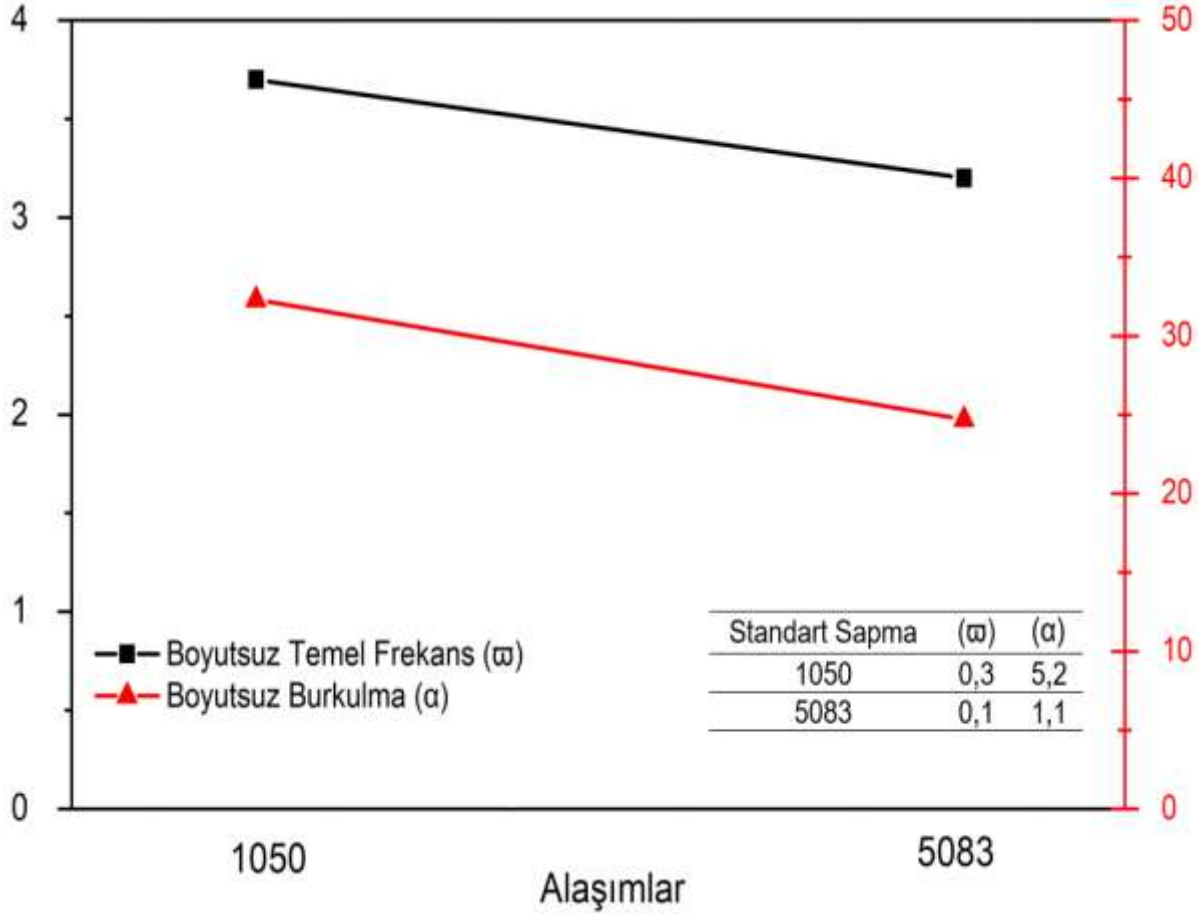
Şekil 7. İki alaşımların ortalama sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması (süneklik) değerlerinin karşılaştırması.

Şekil 8’de 1050 ve 5083 alaşımlarının sıcak yırtılma bölgelerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri bifilm indeks değerleri en yüksek olan döküm örneklerinden alınmıştır. SEM görüntülerinde yer alan farklı kontrasttaki (beyaz renkli) bölgeler ikincil fazların varlığını göstermektedir. Bununla birlikte, oksit film tabakasının (bifilm) tane yüzeylerini büzülmüş bir şekilde kapladığı görülmektedir. 5083 alaşımında görülen parlak bölgelerin, alaşımdaki yüksek magnezyum oranının etkisiyle oluşan ve literatürde “spinel oksit” adı verilen $MgO \cdot Al_2O_3$ oksit filmleri olduğu değerlendirilmiştir [19]. Yine Şekil 8’de verilen ve yırtılma bölgelerinde az miktarda büzülmüş (katlanmış) olarak görülen bifilm türbülans etkisiyle oluşan ve literatürde yeni bifilm (young bifilm) olarak adlandırılan oksitleri gösterirken, yüksek miktarda büzülmüş (katlanmış) olarak görülen ve sıvı metalin içerisinden gelen oksitleri tanımlayan bifilm literatürde eski bifilm (old bifilm) olarak adlandırılmaktadır [3, 19, 23]. SEM görüntülerinde yer alan bifilm türbülans etkisiyle gerekse sıvı metalin içerisinden gelerek porozitelere sebebiyet vermesi ve sıcak yırtılmaları oluşturması literatürle uyumlu bir şekilde gerçekleşmiştir [3, 20, 21].



Şekil 8. (a) 1050 alaşımlarının, (b) 5083 alaşımlarının sıcak yırtılma bölgelerinin SEM görüntüsü.

1050 ve 5083 alaşımlarının serbest titreşim analizi ve burkulma testi sonuçları ise Şekil 9’da verilmiştir. 1050 alaşımlarının çekme dayanımı değerlerinin (Şekil 7) 5083 alaşımlarına göre daha yüksek oranda sapma gösterdiği görülmüştü. Bu durumla uyumlu olarak, serbest titreşim analizi sonucunda, 1050 alaşımlarının boyutsuz temel frekans değerlerinde 5083 alaşımlarına göre yaklaşık 3 kat fazla sapmalar görülmüştür. Bu sonuç, alaşımların bifilm varlığı ile açıklanabilmektedir. 1050 alaşımlarında bifilm indeks değerleri 5083 alaşımlarına göre yaklaşık % 294 daha yüksek çıkmıştır (Şekil 6) ve VAKT numunelerinde porozite miktarları da oldukça fazladır (Şekil 5). Buna bağlı olarak, sıcak yırtılma testlerinde de 1050 alaşımlarında daha fazla sıcak yırtılma bölgeleri görülmüştür.



Şekil 9. İki alaşımın boyutsuz temel frekans ve boyutsuz temel burkulma sonuçlarının karşılaştırması.

Serbest titreşim analizi sonuçlarının bir diğer yorumlaması, alaşımların rijitlik özellikleriyle ilişkilendirilmektedir [41]. Parça titreşimlerinin doğal frekansları serbest konumlarında rijitlik ile orantılıdır. Rijitlik ise hem parça geometrisine hem de alaşımın elastisite modülüne bağlıdır. 5083 alaşımının elastisite modülü yaklaşık 70,3 GPa iken, 1050 alaşımının elastisite modülü yaklaşık 69 GPa'dır [42]. Her ne kadar iki alaşımın elastisite modülü değerleri yakın olsa da, boyutsuz temel frekans değerlerine etkisi olmaktadır. 5083 alaşımı 1050 alaşımına göre daha rijittir ve buna bağlı olarak doğal titreşim frekansları da daha yüksektir.

Şekil 9'da verilen burkulma testi sonuçlarına göre, 5083 alaşımının çekme dayanımı özellikleriyle uyumlu olarak boyutsuz burkulma değerleri 1050 alaşımından % 31 oranında yüksek elde edilmiştir. 5083 alaşımının boyutsuz burkulma değeri 32,3 iken, 1050 alaşımında 24,7 olarak belirlenmiştir. Şekil 7'de verilen çekme dayanımı değerlerindeki sapmalara benzer olarak, burkulma testi sonuçlarında 1050 alaşımında 5083 alaşımına göre yaklaşık 4,6 kat daha fazla sapma belirlenmiştir ve boyutsuz burkulma değerlerinde de düzenli geçişler görülmemektedir [31, 32]. Tüm deney sonuçlarına göre, bifilmliğin varlığı (metal kalitesi) ile yoğunlukları ve yapıdaki dağılımları; sıcak yırtılma özellikleri ile birlikte, alaşımların çekme, burkulma ve titreşim özelliklerini de doğrudan etkilemiştir [3, 19, 31, 32].

IV. SONUC

Bu çalışmada, 1050 ve 5083 alüminyum alaşımlarının sıcak yırtılma özellikleri ve metal kalitesi arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmanın genel değerlendirmesi aşağıda sunulmuştur:

- Bifilmliğin varlığı, sıcak yırtılma hatalarını doğrudan etkilemektedir ve alaşımlarda bifilm yoğunluğu (indeksi) arttıkça sıcak yırtılma eğilimi artmaktadır. 1050 alaşımının ortalama bifilm

indeksi 88,5 mm iken, 5083 alaşımında bu değer 30,1 mm olarak belirlenmiştir. 1050 alaşımında bifilm indeks değerleri 5083 alaşımına göre % 294 daha yüksek elde edilmiştir. Bifilmelerin, porozitelerin büyüme kademesinde en önemli etken olduğu ve porozitelerin boyutu, dağılımı ve yöneliminin sıcak yırtılma özellikleri açısından temel parametreler olduğu sonucuna varılmıştır.

- 5083 alaşımının ortalama çekme dayanımı 313 MPa, kopma uzaması % 9,2 ve sertliği 36,8 HRA iken, 1050 alaşımında bu değerler sırasıyla 158 MPa, % 6,3 ve 22,4 HRA olarak belirlenmiştir. 5083 alaşımının boyutsuz temel frekansı 3,7 ve boyutsuz burkulması 32,3 iken, 1050 alaşımında bu değerler sırasıyla 3,2 ve 24,7 olarak belirlenmiştir. Bifilm indeksi % 294 daha yüksek olan 1050 alaşımında, 5083 alaşımına göre çekme dayanımı, boyutsuz temel frekans ve boyutsuz burkulma değerlerinde sırasıyla 2,7-3-4,6 kat daha fazla standart sapma görülmüştür. Alaşımaların çekme, burkulma ve titreşim karakteristiklerini belirlemede öncelikli olarak incelenmesi gereken parametrelerden birisi bifilmelerdir ve bifilmeler döküm alaşımalarının mekanik özelliklerindeki düşüşün temel sebebidir.
- Bifilm indeksi düşük olan malzemelerde, sıcak yırtılmadan ziyade yüzey çöküntüleri görülmüştür.
- CRC kalıbının en uç kısmındaki küresel noktalarda olduğu gibi, ince kesitli parçaların dökümünde metalostatik (metalin yoğunluğundan dolayı yerçekimi etkisi altında oluşan basınç; $P_{met} = \rho gh$) basınç etkisiyle dikey yolluktan uzak bölgelerde beslemenin zorlaşmasından dolayı sıcak noktalar meydana gelmektedir. Bu noktalarda bifilmelerin birikmesi ve katılma esnasında açılmalarıyla poroziteler görülebilmektedir. Bununla birlikte, bu çalışmada olduğu gibi, çekilme boşluklarından kaynaklı çöküntüler de meydana gelmektedir.
- Döküm alaşımalarında metal kalitesini belirleyen en önemli iki parametre, başlangıç malzemesinin (hammadenin) temizliği (empüritelerin ve gazların minimize edilmesi) ve türbülansın engellenmesidir. Bu nedenle, döküm proseslerinde döküm öncesi gaz giderme işlemlerinin bifilm ve dolayısıyla porozite oluşma ihtimalini azaltacağından, sıcak yırtılmaları önleyebileceği önerilmektedir.
- Farklı çalışmalarda, farklı alüminyum alaşımları ve sıcak yırtılma test yöntemleri ile katılma morfolojisi ve bifilmelerin sıcak yırtılmaya etkilerinin incelenmesinin literatüre katkı sağlayacağı önerilmektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2013BSP002).

V. KAYNAKLAR

- [1] G. A., Georgiou, “Non-destructive testing and evaluation of metals,” *Materials Science and Engineering*, vol. 3, pp. 76-102, 2009.
- [2] J. Campbell and R. A., Harding, “Solidification Defects in Castings,” *TALAT (Training in Aluminium Application Technologies)*, Lecture 3207, European Aluminium Association, Brussels, 1994.
- [3] M. Uludağ, “Al-Si Alaşımlarında Bifilmelerin Sıcak Yırtılmaya Etkisi,” *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2016.
- [4] N. Hatami, R. Babaei, M. Dadashzadeh and P. Davami, “Modeling of Hot Tearing Formation During Solidification,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 205, no. 1–3, pp. 506-513, 2008.
- [5] J. Campbell, “Casting,” *Butterworth Heinemann*, 2nd Edition., UK, 2003.

- [6] A.M. Nabawy, A.M. Samuel, F.H. Samuel and H.W. Doty, "Influence of Additions of Zr, Ti-B, Sr, and Si As Well As of Mold Temperature on the Hot-Tearing Susceptibility of an Experimental Al-2% Cu-1% Si Alloy," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 9, pp. 4146-4158, 2012.
- [7] A. R. E. Singer and P. H. Jennings, "Hot-Shortness of Some Aluminium-Iron-Silicon Alloys of High Purity," *Journal of the Institute of Metals*, vol. 73, pp. 273-284, 1947.
- [8] D. Warrington and D.G. McCartney, "Development of a New Hot-Cracking Test for Aluminium Alloys," *Cast Metals*, vol. 2, no. 3, pp. 134-143, 1989.
- [9] T. W. Clyne and G. J. Davies, "A Quantitative Solidification Test for Casting and an Evaluation of Cracking in Aluminium-Magnesium Alloys," *The British Foundrymen*, vol. 68, pp. 238-244, 1975.
- [10] G. Cao and S. Kou, "Hot Tearing of Ternary Mg-Al-Ca Alloy Castings," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 37, pp. 3647-3663, 2006.
- [11] M. Pokorny, C. Monroe, C. Beckermann, L. Bichler and C. Ravindran, "Prediction of Hot Tear Formation in a Magnesium Alloy Permanent Mold Casting," *International Journal of Metalcasting*, vol. 2, pp. 41-53, 2008.
- [12] S. Li, "Hot Tearing in Cast Aluminum Alloys: Measures and Effects of Process Variables," *Phd Thesis*, Worcester Polytechnic Institute, 2010.
- [13] M. Easton, H. Wang, J. Grandfield, C. Davidson, D. StJohn, L. Sweet and M. Couper, "Observation and Prediction of the Hot Tear Susceptibility of Ternary Al-Si-Mg alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43, no. 9, pp. 3227-3238, 2012.
- [14] D. G. Eskin, Suyitno Kool, W. H. and Katgerman, L., "Mechanical Properties in the Semi-Solid State and Hot Tearing of Aluminium Alloys," *Progress in Materials Science*, vol. 49, no. 5, pp. 629-711, 2004.
- [15] Ç. Yüksel, "Weibull Analysis of Fluidity and Hardness of Ultrasonically Degassed Secondary Al7Si0.3Mg Aluminum Alloy," *China Foundry*, vol. 16, pp. 352-357, 2019.
- [16] M.C. Flemings, "Solidification Processing," *Metall. Trans.*, vol.5, pp. 2121-2134, 1974.
- [17] W. Kurz and D.J. Fisher, "Fundamentals of Solidification," *Trans Tech Publications*, Switzerland, 1998.
- [18] E. Tan, "Alüminyum Alaşımlarında Blister Oluşumu," *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2011.
- [19] D. Dispınar, "Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys," *PhD Thesis*, The University of Birmingham, School of Metallurgy and Materials, England, 2005.
- [20] D. Dispınar and J. Campbell, "Critical Assessment of Reduced Pressure Test. Part 1: Porosity Phenomena," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 17, pp. 280-286, 2004.
- [21] D. Dispınar and J. Campbell, "Critical Assessment of Reduced Pressure Test. Part 2: Quantification," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 17, pp. 287-294, 2004.
- [22] H. Rosenthal and S. Lipson, "Measurement of Gas in Molten Aluminum," *AFS Transactions*, vol. 63, pp. 301-305, 1955.

- [23] D. Dışpınar and J. Campbell, "Use of Bifilm Index as an Assessment of Liquid Metal Quality," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 19, no. 1, pp. 5-17, 2006.
- [24] A. Yorulmaz, Ç. Yüksel, E. Erzi and D. Dışpınar, "Effects of Casting Conditions on End Product Defects in Direct Chill Casted Hot Rolling Ingots". In: Tiryakioğlu M., Jolly M., Byczynski G. (eds) *Shape Casting: 6th International Symposium*. Springer, Cham., pp. 185-193, 2016.
- [25] F. Tezer, Ö. Gürsoy, E. Erzi, M. Zorağa and D. Dışpınar, "Determination of Liquid Metal Quality with Deep Etching Method," *TMS 2019 Annual Meeting & Exhibition*, San Antonio, United States of America, pp.73-84, 2019.
- [26] Z. Yao, G.Y. Kim, L. A. Faidley, Q. Zou, D. Mei and Z. Chen, "Effects of Superimposed High-Frequency Vibration on Deformation of Aluminum in Micro/Meso-Scale Upsetting," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 640– 646, 2012.
- [27] S. Wu, L. Xie, J. Zhao and H. Nakae, , "Formation of Non-Dendritic Microstructure of Semi-Solid Aluminum Alloy Under Vibration," *Scripta Materialia*, vol. 58, pp. 556–559, 2008.
- [28] K. Marynowski, "Fractional Rheological Model of a Metal Alloy in the Study Vibrations of an Axially Moving Aluminum Beam in Thermal Environment," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 174, 105458, 2020.
- [29] J. Sakamoto and T. Shibutani, "Analysis of Fatigue Damage of Aluminium Alloy Under Multiaxial Random Vibration," *Procedia Structural Integrity*, vol. 13, pp. 529-534, 2018.
- [30] H. Hu, Y. Li, T. Suo, F. Zhao, Y. Miao, P. Xue and Q. Deng, "Fatigue Behavior of Aluminum Stiffened Plate Subjected to Random Vibration Loading," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, pp. 1331–1336, 2014.
- [31] S. Evran, "Eksenel Yönde Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kısa Kirişlerin Burkulma ve Serbest Titreşim Analizi," *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [32] G. Atlıhan, "Süreksizlik Bölgesine Sahip Tabakalı Kompozit Kirişlerin Titreşim Analizi," *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [33] S. R. Li and L. L. Fan, "Free Vibration of FGM Timoshenko Beams With Through-Width Delamination," *Science China-Physics Mechanics and Astronomy*, vol. 57, pp. 927-934, 2014.
- [34] A. J. M. Ferreira, "Matlab Codes for Finite Element Analysis: Solids and Structures (Solid Mechanics and Its Applications)," no.157, *Springer* 2nd Edition, 2020.
- [35] M. Çolak, E. Tan, R. Kayıkcı and D. Dışpınar, "Hot Tear-Melt Quality Relationship in 3xxx Aluminium Alloys," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 1, no. 2, pp. 56-62, 2013.
- [36] J. Campbell, "Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design," 2nd Edition, *Elsevier: Butterworth-Heinemann*, Amsterdam, 2015.
- [37] M. Uludağ, R. Çetin and D. Dışpınar, "Freezing Range, Melt Quality, and Hot Tearing in Al-Si Alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 49, pp. 1948–1961, 2018.
- [38] D. Dışpınar and J. Campbell, "Porosity, Hydrogen and Bifilm Content in Al Alloy Castings," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 10–11, pp. 3860-3865. 2011.
- [39] X. Cao and J. Campbell, "The Nucleation of Fe-Rich Phases on Oxide Films in Al-11.5Si-0.4-Mg Cast Alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 34A, pp. 1409-1420, 2003.

[40] L. Zhao, B. N. Wang, V. Sahajwalla and R. D. Pehlke, "The Rheological Properties and Hot Tearing Behaviour of an Al-Cu Alloy," *Journal International Journal of Cast Metals Research*, vol. 13. no. 3, pp. 167-174, 2000.

[41] F. Bedir, E. Durak ve K. Delikanlı, "Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Uygulanabilirliği ve Mekanik Özellikleri," *Mühendis ve Makina*, c. 47. s. 555, ss. 37-46, 2006.

[42] The Aluminum Association Data Sheet from Aluminum Standards and Data 2000 and/or International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys (Revised 2001).