





Joining of AISI 1040 and AA6013 material pairs by mechanical locking method (MLM) using different connection angle

Serdar Mercan¹ , Hatice Varol Özkavak^{2*} 

¹Mechatronics Engineering Department, Faculty of Technology, Sivas Cumhuriyet University, 58140, Sivas, Turkey

²Machine and Metal Technology. Department, Isparta University of Applied Science, 32200, Isparta, Turkey

Highlights:

- Development of alternative methods for joining different materials
- Determination of mechanical properties and changes in micro structure after joining different materials
- Steel and aluminum combined successfully with mechanical locking method (MLM)

Keywords:

- Mechanical locking method
- AISI 1040
- AISI 6013
- Mechanical properties
- Metallurgical properties

Article Info:

Research Article
Received: 02.05.2021
Accepted: 02.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.931293

Correspondence:

Author: Hatice Varol Özkavak
e-mail:
haticevarol@isparta.edu.tr
phone: +90 0505 379 7785

Graphical/Tabular Abstract

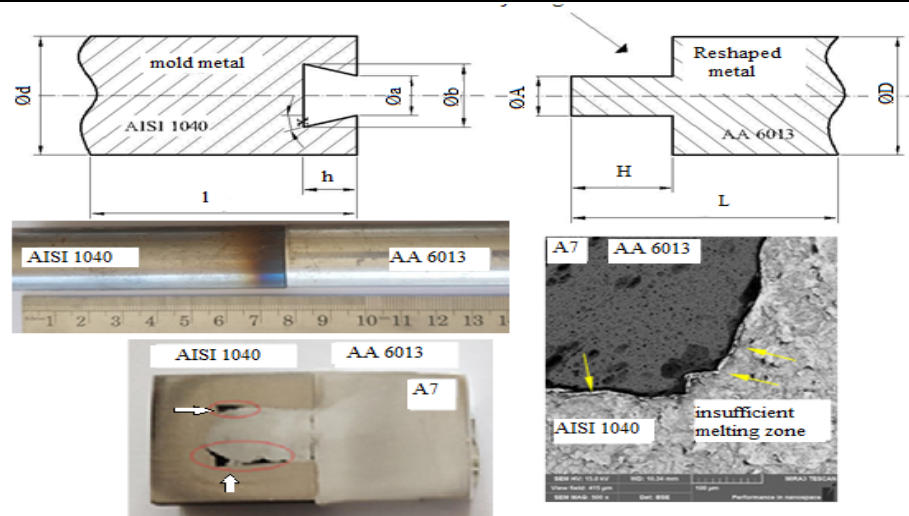


Figure A. Flowchart of the study

Purpose: The aim of the study is to investigate joining of different type of materials by using mechanical locking method (MLM).

Theory and Methods:

In this study, AISI 1040 steel and AA 6013 aluminum alloy are joined with mechanical locking method. The effect of the connection angle on the metallurgical and mechanical properties of the connection was investigated. Therefore 3 different connection angles were used. The microstructure analyzes of the joined samples were performed and their mechanical properties were examined.

Results:

It has been determined that AISI 1040 and AA 6013 material pairs can be joined by mechanical locking method. It has been found that micro crack and porosity decreases with increasing connection angle and more regular microstructure is obtained. It has been found that an inadequate joint angle causes a decrease in the joint strength and that the pieces can be stripped out of the channel before breaking, while the increased joint angle has been found to significantly increase the joint strength. It has been found that micro crack and porosity decreases with increasing connection angle and more regular microstructure is obtained.

Conclusion:

It has been determined that different material pairs are successfully joined by using mechanical locking method. It has been found that micro crack and porosity decreases with increasing connection angle and more regular microstructure is obtained.



AISI 1040 ve AA6013 malzeme çiftinin mekanik kilitleme yönteminde (MLM) farklı bağlantı açıları kullanılarak birleştirilmesi

Serdar Mercan¹ , Hatice Varol Özkavak^{2*}

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 58140 Sivas, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, TBMYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Farklı malzeme türlerinin birleştirilmesinde alternatif yeni ve çevreci bir yöntemin kullanılması
- Çelik ve alüminyumun mekanik kilitleme yöntemi (MLM) ile birleştirilmesi
- MLM tasarım parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 02.05.2021
Kabul: 02.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.931293

Anahtar Kelimeler:

Mekanik kilitleme yöntemi,
AISI 1040,
AA6013,
mekanik özellikler,
metalürjik özellikler

ÖZ

Farklı malzeme türlerinin birleştirilerek kullanılmasının zorunlu olduğu birçok endüstriyel uygulama bulunmaktadır. Ancak kaynak, döküm, yapıştırma gibi diğer birleştirme yöntemleri ile bu her zaman mümkün olmamakta ya da çeşitli problemler ortaya çıkarmaktadır. Bu problemlerin ortadan kaldırılması amacıyla klasik birleştirme yöntemlerine alternatif olarak yeni ve çevreci bir yöntem olan mekanik kilitleme yöntemi (MLM) kullanılmaktadır. MLM yöntemi özellikle farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde kullanılabilir. Bununla birlikte yüksek ısı girdisinin neden olduğu mikro yapı hatalarının azaltılması istenen durumlarda tercih edilebilir. Bu çalışmada; MLM için bağlantı kalitesini doğrudan etkileyen bağlantı açısının mikro yapı ve mekanik özelliklerle olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla; AISI 1040 çelik ve AA6013 alüminyum alaşımı MLM yöntemi ile farklı bağlantı açıları (7°, 10° ve 13°) kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi sonrasında mikro yapı incelemesi, mikro sertlik ölçümleri ile çekme testleri yapılarak bağlantı performansı belirlenmiştir. Çalışma sonunda 13° bağlantı açısı ile hazırlanan numunelerde 241,38 MPa değer ile en yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir. Bağlantı açısının daha düşük olduğu diğer numunelerde ise bağlantıyı gerçekleştiren flanş oluşumunun düzensiz dağılım gösterdiği, malzeme akışının yetersiz olduğu bunun sonucunda mekanik özelliklerin düştüğü tespit edilmiştir.

Joining of AISI 1040 and AA6013 material pairs by mechanical locking method (MLM) using different connection angle

H I G H L I G H T S

- Using an alternative new and environmentally friendly method in joining different types of materials
- Joining steel and aluminum with mechanical locking method (MLM)
- Determining the effect of MLM design parameters on microstructure and mechanical properties

Article Info

Research Article
Received: 02.05.2021
Accepted: 02.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.931293

Keywords:

Mechanical locking method,
AISI 1040,
AA6013,
mechanical properties,
metallurgical properties

ABSTRACT

There are many industrial applications where different types of materials must be combined and used. However, this is not always possible with welding, bonding and other disassembling methods or it contains various problems. In order to eliminate these problems, mechanical locking method (MLM), which is a new and environmentally friendly method, is used as an alternative to classical joining methods. MLM method can be used especially in joining material pairs with different chemical and physical properties. However, it can be preferred in situations where it is desired to reduce microstructure defects caused by high heat input. In this study; For MLM method, the effect of the connection angle, which can directly affect the joining quality, on the microstructure and mechanical properties was investigated. For this purpose, AISI 1040 steel and AA6013 aluminum alloy were joined at different connection angles (7°, 10° and 13°) using the MLM method. After the joining process, microstructure analysis, microhardness measurements and tensile tests were performed and the connection performance was determined. At the end of the study, the highest mechanical properties were obtained with a value of 241.38 MPa in the samples prepared with 13° connection angle. An other samples where the connection angle was lower, it was determined that the flange formation performing the connection showed an irregular distribution, the material flow was insufficient and the mechanical properties decreased as a result.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çelik, alüminyum, bakır ve pirinç metal esaslı malzemeler olup mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kendilerine has özelliklerinden dolayı çelikler ağır sanayi; bakır ve alüminyum elektrik elektronik, alüminyum ve çelik raylı sistemler, otomotiv ve havacılık gibi endüstrilerde geniş kullanım alanı bulmuştur [1]. Havacılık, otomotiv gibi sektörlerde dayanım ve hafiflik ön plana çıkarken; ağır sanayi sektöründe ise yüksek mukavemete sahip malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu ihtiyaçlar ve teknolojideki gelişim hızı dikkate alındığında kimyasal ve fiziksel farklılığı olan bu malzeme türlerinin üstün özelliklerinin bir arada birleştirilerek kullanılmasına yönelimi artırmıştır. Bu ihtiyaçların yanında farklı özellikteki parçaların birleştirilmesi sistem ağırlığını düşürme ve maliyet etkinliği gibi birçok avantajı da endüstriye sunmaktadır [2]. Farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerin uyumsuzlukları nedeni ile birleştirme işlemlerinin kaynak yöntemi gibi geleneksel yöntemlerle yapılması ise oldukça zor ve problemlidir [3, 4].

Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde alüminyum ve alaşımları iyi ısı transferi, yüksek dayanım, iyi şekillendirilebilme ve özellikle hafifliğinden dolayı havacılık, gemi, raylı sistemler ve otomotiv gibi birçok uygulamada kullanılan malzemeler olduğu bilinmektedir [5]. Ancak endüstriyel uygulamalarda düşük maliyet beklentisinin bir sonucu olarak çelik malzemeler daha sık tercih edilmektedir [6]. Alüminyumun çeliklerle birlikte kullanılması ise mukavemet, hafiflik ve düşük maliyet taleplerine çözüm oluşturmaktadır. Bu durum alüminyum ile çeliğin birleştirilmesini zorunlu kılmaktadır [7]. Diğer taraftan Fe/Al gibi farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip metal çiftlerinin çok yüksek ısı girdisinin meydana geldiği birçok kaynak yöntemi ile istenilen mekanik özelliklerde birleştirilemediği yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [8].

Kaynak yönteminde meydana gelen ısı, kaynak bölgesinde mikro yapının bozulması, mekanik özelliklerin düşmesi, sıcak çatlama hassasiyetinin oluşması, çarpılma, yanma ile kaynak metalinde sistemi etkileyecek derecede porozite meydana gelmesi gibi olumsuz sonuçları doğurmaktadır [9]. Bununla birlikte çelik ve alüminyum malzemeler arasındaki termal genleşme farklılıklarının yüksek olması kaynak sırasında kalıntı gerilmelere de neden olmaktadır [10]. Fe-Al faz diyagramı incelendiğinde ise ergime noktası düşük olan alüminyum ergimiş çelikle temas ettiğinde Al ve Fe katı çözeltileri ve demirce zengin Fe_3Al , $FeAl$ ile alüminyumca zengin $FeAl_2$, Fe_2Al_5 , Fe_2Al_3 , $FeAl_3$ intermetalik bileşikler meydana getirirler [11-13]. Bu bileşikler sert ve kırılğan yapıdadırlar [14, 15]. Bağlantı sırasında meydana gelen bu intermetalik bileşikler 10 μm kalınlıktan daha fazla olduğunda mekanik özellikleri önemli ölçüde düşmektedir. Bu intermetaliklerin kalınlıkları yüksek ısı girdisi meydana geldiğinde arttığı için düşük ısı girişinin kullanıldığı birleştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [16, 17].

Farklı kimyasal bileşime sahip metallerin birleştirilmesinde yüksek ısı girdisinin ve yukarıda bahsedilen istenmeyen durumlara çözüm olabilecek yeni ve çevreci bir imalat yöntemi olan mekanik kilitlenme yönteminin (MLM) ortaya çıkmasını sağlamıştır. Yapılan birleştirme işlemlerinde ergime meydana gelmediği için kaynak yöntemlerinde ergime ve katılma süreçlerinde meydana gelen sorunlar oluşmamakta ve farklı kimyasal bileşime sahip malzemeler rahatlıkla birleştirilebilmektedir. Bu yöntem uygulama prensibi olarak sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemlerine benzemekte olup plastik deformasyon mekanizmasını esas alarak çalışmaktadır. Bu nedenle literatür araştırmaları sürtünme kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağı ve plastik şekil değiştirme özelinde tamamlanmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde; Lee vd. [18] ostenitik çelik ile AA6056 alüminyum alaşımını sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmiş ve aralarında meydana gelen ara yüzey etkileşimini incelemiştir. Çalışmada birleştirme bölgesinde uzamış ve ultra ince tane yapıları ve intermetalik (Al_4Fe) tabakasını elde etmişlerdir. Uzamış tanelerin yüzey merkezli kübik yapıda ve ferrit fazında olduğunu belirlemişlerdir. Durmuş vd. [8] AA6061 alüminyum alaşımı ile galvanizli çeliği soğuk metal transfer kaynağı kullanarak birleşme bölgesindeki yapısal değişimlerini araştırmışlardır. Çelik ve Al birleştirme işlemlerinde fazla ısınmanın önlenerek daha başarılı olacağını tespit etmişlerdir. Kimapong ve Watanable [10] sürtünme karıştırma kaynağı kullanarak AA5083 alüminyum alaşımı ile SS400 çeliğini birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Mekanik özelliklerin bağlantı tasarımına (takım eğim açısı, pin çapı) bağlı olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Dong vd. [16] yaptıkları çalışmada 200SJ alüminyum alaşımını galvaniz çeliğe sürtünme kaynağı ile birleştirmişlerdir. Al/Çelik bağlantılarında, çekme gerilmeleri sonucunda kaynak dolgusu ile çelik arasındaki sınırda çatlak oluşumunu ve ilerlediğini belirlemişlerdir. Pourali vd [19] çalışmalarında AA1100 alüminyum alaşımı ile St37 çeliğini sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Farklı kaynak parametrelerinin etkisi ile demirce zengin 93 μm 'den daha büyük intermetalik bileşikler oluştuğunu tespit etmişlerdir. Optimum çekme gerilmesini yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızlarında elde etmişlerdir. Sierra vd. [20] AA6056-T6 ve AA6011-T4 alüminyum alaşımlarını düşük karbonlu çelik ile lazer kaynağı kullanarak birleştirmişler. Yazarlar çeliğin alüminyum üzerinde olduğu durumunda en iyi kaynak dikişinin elde edildiğini belirlemişler. Birleştirme esnasında 5-20 μm arasında Fe_2Al_5 , $FeAl_3$ fazları meydana geldiğini belirlemişlerdir. Ayrıca kaynak-çelik ara yüzeyinde çatlak oluşumunun sürekli görüldüğü sonucuna ulaşmışlardır. Chen ve Kovacevic [21] AA6061 alüminyum alaşımını AISI 1018 çeliğe ergitme ve katı hal kaynak yöntemi kullanarak birleştirmişlerdir. Birleştirme sonrasında kaynak dikiş bölgesinde Al_3Fe_4 , Al_3Fe_2 intermetalik bileşikler meydana geldiği; takımın kaynak sırasında aşındığı, aşınan takımın kaynak yapısının bozulmasına ve delik oluşumuna neden olarak kaynak bölgesinin yapının homojenliğini düşürdüğü ve takımın 917 rpm'de kırıldığı

gibi birçok olumsuz sonucu bildirmişler. Xu vd. yaptıkları çalışmada [22] sürtünme karıştırma kaynağı sırasında meydana gelen yeniden kristalleşme prosesini incelemişlerdir. Karıştırma işlemi boyunca yüksek sıcaklıklarda ana malzemede ilk büyük kristalleşme meydana geldiğini ve bu durumun statik iyileşme oluşturarak mikro yapıya önemli ölçüde etki ettiği sonucuna ulaşmışlardır. Esmaceli vd [23] çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AA150-pirinç malzemelerin mekanik ve metalurjik yapısını ele almışlardır. Çalışmalarında takım dönme hızı, kaynak hızı esas işlem parametreleri olarak belirlemişlerdir. Sonuçta maksimum çekme gerilmesi ana alüminyum malzemenin %80 değerine ulaşmıştır. Ayrıca yazarlar yüksek dönme hızı seçilmesi durumunda intermetalik tabaka kalınlığının artarak dayanımda düşüşün meydana geldiğini de belirlemişlerdir. Kar vd [24] sürtünme karıştırma kaynağı kullanarak Al ve Ti malzemelerini birleştirmişlerdir. Al/Ti ara yüzeylerinin intermetalik oluşum için potansiyel bölgeler olduğu belirlemişlerdir. Hem Ti hem de Al malzemede yeniden kristalleşme meydana geldiği; yeniden kristalleşmenin Al tarafında yüksek yığılma hatası enerjisi nedeniyle olduğu sonucuna varmışlardır. Zhao vd [25] yaptıkları çalışmada ultrasonik destekli sürtünme karıştırma kaynağında meydana gelen ısı oluşumu ve plastik deformasyonu incelemişlerdir. Ultrasonik destekli sürtünme karıştırma yönteminde termomekanik işlem uygulanmakta olup yöntem sonrasında ön ve arka tarafta oluşan yüksek akustik basınçlar o bölgedeki malzemenin plastik akışını iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır.

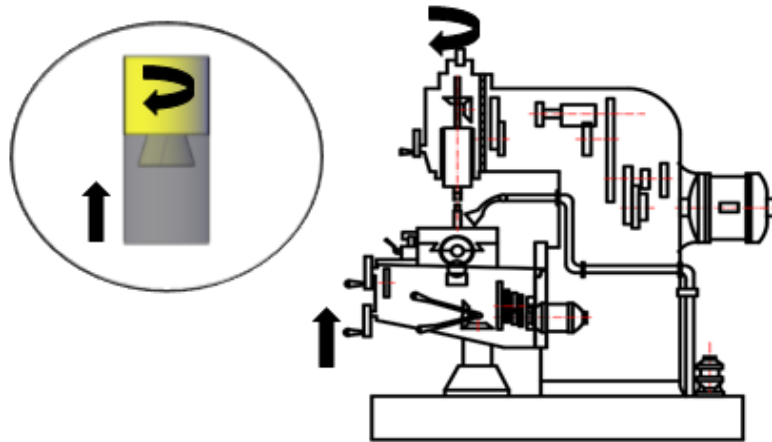
Literatür incelemeleri sonucunda; çelikler ve alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemlerinin bile yetersiz kaldığı görülmüştür. Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde oluşan intermetaliklerin ve ara yüzeyde meydana gelen çatlakların bağlantı özelliklerini olumsuz etkilediği görülmektedir. Literatürde doğru kaynak parametrelerinin seçimi ve birleştirilen numunelerin tasarımında ayrıca önemli olduğu belirtilmiştir. Yapılan bu incelemelerin ışığında bu çalışma kapsamında AISI 1040

çeliği ile AA6013 alüminyum alaşımı mekanik kilitleme yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirme yönteminde bağlantı tasarımında yer alan bağlantı açısının birleşme üzerindeki yapısal etkileri incelenmiştir. İncelemelerde mikro sertlik ölçümleri yapılmış, SEM görüntüleri ile mikro yapı analizleri tamamlanmıştır. Mekanik özellikler çekme deney testi ile belirlenmiştir. Çalışma sonunda AISI 1040 çeliği ile AA6013 alüminyum alaşımının MLM yöntemi ile birleştirme işleminin yapılabildiği ve bağlantı açısının birleştirilen parçaların mikro yapısında önemli yapısal değişikliklere neden olduğu ve buna bağlı mekanik özelliklerin önemli oranda değiştiği tespit edilmiştir.

2. DENEYSEL YÖNTEM VE MATERYAL (EXPERIMENTAL METHOD AND MATERIAL)

2.1. Mekanik Kilitleme Yöntemi (Mechanical locking method)

Çalışmada kullanılan MLM; malzemelerin plastik şekil değiştirme özelliği esas alınarak yapılan, sökülemeyen bir birleştirme yöntemidir. Birleştirilecek parçaların birbiri ile sürtünmesi sonucunda ara yüzeylerinde ortaya çıkan ısı etkisi ve uygulanan basınç ile malzemelerden birinin plastik şekil değiştirmesi sağlanır. Bu amaçla birleştirilecek parçalar işlem öncesinde, talaşlı imalat ve döküm yöntemleri gibi imalat yöntemleri ile hazırlanır. Parçalardan biri yeniden şekillendirilen parça (YŞP) diğeri kalıp parçası (KP) olarak adlandırılır. YŞP'nin plastik şekil değiştirme özelliğine sahip olması gerekir ve YŞP'nin kalıp parçasına göre ergime ısısının ve mekanik özelliklerinin daha düşük olması beklenir. KP içine ters konik kanal veya T kanal açılır. Hazırlanan sistemde YŞP'nin KP içinde, ara yüzeyde dönerek sürtünmesi ve aralarında aksel basınç meydana gelmesi sağlanır. Bu basınç ile yeniden şekillendirilen parçanın kalıp şeklini alması ile bağlantı gerçekleştirilir [26]. Birleştirme işlemi parçalar alın altına gelinceye kadar devam ettiği için yığılma basıncına ihtiyaç duyulmaz. Birleştirme işlemlerinde sürtünme kaynak makineleri veya freze tezgâhları kullanılabilir. Bağlantının yapılış şeklini gösteren şematik resim Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. MLM şematik resmi (Schematic picture of MLM) [27]

Kalıp parçasının döküm yöntemi ile hazırlanması durumunda atık talaş oluşmaz. Birleştirme işlemi sonunda sürtünme kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemlerinde ortaya çıkan talaş, bu yöntemde birleştirme işlemini gerçekleştirmek amacıyla kullanılır ve işlem sonrası ek bir işleme ihtiyaç duyulmaz. MLM'de birleştirme sonrasında parçada meydana gelen kesit birleştirme öncesinde hazırlanan kesitle aynı değildir ancak kütle ve kimyasal bileşim açısından herhangi bir değişiklik meydana gelmez.

2.2. İşlem Parametreleri (Process parameters)

MLM için seçilen tüm parametrelerin, parçanın mikro yapısında ve buna bağlı mekanik özelliklerde bozulmalara neden olmadan malzemenin plastik şekil değiştirmesini sağlayacak seviyede ve birbirleri ile uyumlu seçilmesi gerekmektedir. Önemli işlem parametreleri devir sayısı ve ilerleme (veya sürtünme basıncı) olup sürtünme süresi birleştirilen parça kesitlerine ve ilerleme miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu parametrelerin yanında kalıp parçasında yer alan kanal derinliği, kanal köşe radyüsü ile bağlantı açısının malzemelere göre doğru seçilerek bağlantı tasarımının doğru tamamlanması çok önemlidir.

Bağlantı bölgesinde sürtünme sonucunda elde edilen ısı, plastik deformasyona uğrayan malzeme miktarı, bağlantı bölgesinin mikro yapısı, bağlantıda meydana gelen hatalar ve bu hataların büyüklüklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle işlem parametreleri seçilirken oluşan bu ısının yeterince büyük seçilmesi gerekmekte olup bu durum devir sayısı ile doğrudan alakalı olduğu yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [28]. Bu nedenle devir sayısının plastik şekil değişimi için yeterli büyüklükte olması ancak numunelerin mikro yapısı üzerinde olumsuz etki oluşturmayacak seviyede belirlenmesi gerekmektedir.

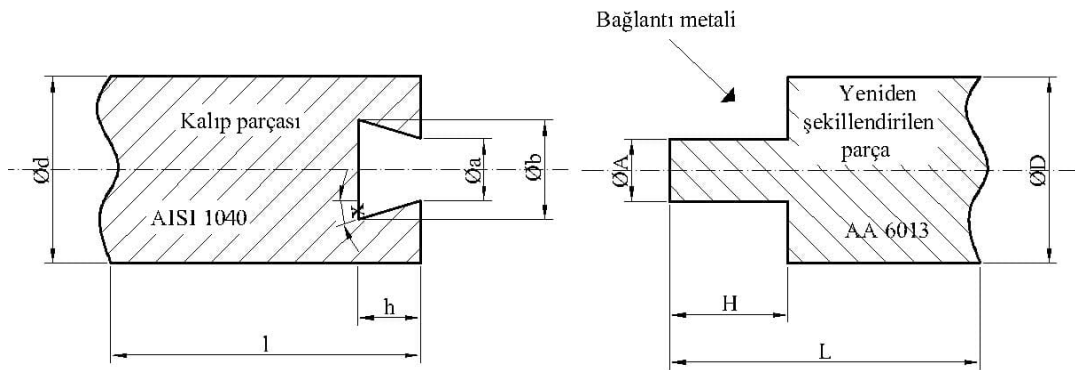
MLM işlem parametrelerinden olan ilerleme miktarı da uygun plastik deformasyon sıcaklığına sahip malzemenin yeterli akışımı sağlayacak büyüklükte olması gerekmektedir. Çünkü malzemeler üzerinde oluşan ısı, malzemelerin sürtünme bölgesinden flanş oluşturarak uzaklaşması sürecinde hızla azalır [29]. MLM işlemi ile bağlantı şartları

ile ilgili değerlendirmeler ve yapılan literatür çalışmaları işlem parametreleri belirlenmesinde göz önüne alınmış ve ön deneyler ile doğru parametre grubu belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışma kapsamında birleştirme işlemleri Taksan/FU315x1250 marka/model freze tezgâhında sabit devir sayısı (1120 rpm), sabit ilerleme (16 mm/min) miktarı kullanılarak tamamlanmıştır. Kalıp parçası olarak tasarlanan AISI 1040 çelik malzeme tezgâh mengenesine bağlanmış ve ilerleme hareketi tabla üzerinden sağlanmıştır. AA6013 alüminyum alaşım malzeme pens yardımı ile tezgâh döner başlığına bağlanmıştır. Her iki malzemenin merkezleme işlemleri tamamlanarak aralarında sürtünme sağlanmış ve istenilen yüzey sıcaklığını elde etmek amacıyla ilk temas anından itibaren 3 sec. sonra tablanın ilerleme hareketi başlatılmıştır.

2.3. Numune Tasarımı (Sample Design)

Çalışma kapsamında daha önce incelenmemiş olan; bağlantı açısının bağlantı metalurjik ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bağlantı açısı, MLM' de kalıp parçası üzerinde kanal üzerindeki koniklik açısıdır. Bu açığa bağlı olarak bağlantı metalinin özellikleri değişiklik göstermektedir. Bağlantı metali oluşabilecek muhtemel gerilmeleri taşıyan bölüm olması nedeni ile bağlantı kalitesini doğrudan etkileyebilecek niteliktedir. Dolayısı ile numune boyutlarının belirlenmesinde bağlantı için gerekli olan sürtünme hareketini ve plastik şekil değiştirmeyi sağlayacak ve istenilen mekanik özellikleri elde edebilecek şekilde bir tasarıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bağlantı açısında artan değerler, talaşlı imalat yöntemi kullanılarak kalıp parçasının imalatını zorlaştırmaktadır. Diğer taraftan azalan bağlantı açısı flanşların kalıp içinde akışını engelleyerek istenilen kalıp metalinin oluşumunu engellemektedir. Bu nedenle bağlantı açısına ait değerler yapılan ön deneyler ile belirlenmiştir. Ön deneyler sonucunda 13°'lik açının beklenen flanş hareketlerine izin verdiği aynı zamanda talaşlı imalat yöntemi ile kolay bir şekilde elde edilebileceği görülmüştür. Kalıp metalinin imalat sürecini kolaylaştırmak ve istenilen mekanik özelliklerin daha küçük bağlantı açıları ile elde edilip edilmeyeceğini görmek amacıyla diğer



Şekil 2. Numune şekli ve ölçülendirilmesi (Specimen shapes and measurement)

numunelerde bağlantı açısı daha küçük seçilmiştir. Numunelere ait fiziksel büyüklükler Şekil 2’de gösterilmiştir. Bağlantı açısına ait değerler ve numune boyutları ise Tablo 1’de verilmiştir.

2.4. Malzeme Özellikleri (Material properties)

Bu çalışmada ticari olarak temin edilen AISI 1040 çelik ile AA6013 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin standart kimyasal kompozisyonları Tablo 2’de, mekanik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

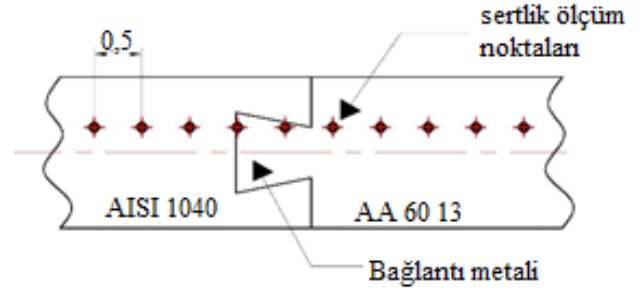
2.5. Mikro yapı incelemeleri (Microstructure examination)

Numunelerde meydana gelen yapısal değişiklikleri tespit etmek amacıyla SEM incelemeleri ve mikro sertlik ölçümleri tamamlanmıştır. Mikro yapı incelemeleri ve sertlik ölçümleri için deney numuneleri 150’den 2500 numaraya kadar su zımparasıyla daha sonra sırasıyla 3 µm ve 1 µm elmas pasta ile parlatılmıştır. Dağlama işlemlerinde; çelik tarafı %1 nitrik, alüminyum tarafı ise %2 hidroklorik asitte dağlanarak numuneler hazır hale getirilmiştir. Mikro yapı incelemelerinden sonra aynı numuneler sertlik ölçümü için kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri Şekil 3’te gösterilen doğrultuda, 10 N yük, 15 sec. bekleme süresi ve 0,5 mm aralıkla yapılmıştır.

2.6. Mekanik Test (Mechanical test)

MLM ile birleştirilen parçaların birleşme bölgesinde dayanımının belirlenmesi amacıyla çekme deney numuneleri

TS EN ISO 6892-1/Mart 2011 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Çekme deney numunesi makro fotoğraflar Şekil 4’te gösterilmiştir. Çekme deneyleri Instron 5982 test cihazında $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerinme oranında ekstansometre kullanarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Mikro sertlik ölçüm noktaları (mm)
(Micro hardness measuring points (mm))

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Makro Yapı İncelemeleri (Macro structure examination)

Bu çalışmada farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip AISI 1040 çeliği ile AA6013 alüminyum alaşımı MLM kullanarak birleştirilmiştir. Birleştirilen numuneler üzerinde, bağlantı açısının bağlantı metalurjik ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Bu amaçla 3 farklı bağlantı açısı

Tablo 1. Mekanik kilitleme yönteminde kullanılan numune boyutları (mm)
(Specimen sizes used in mechanical locking method)

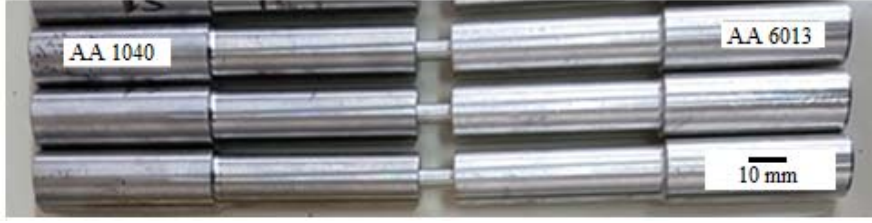
	A7	A10	A13
Kalıp Parçası [AISI 1040]			
Anma ölçüsü [Ød]	30		
Boyu [l]	150		
Kanal derinliği [h]	15		
Kanal ağzı [Øa]	10		
Bağlantı açısı [x]	7	10	13
Yeniden Şekillendirilen Parça [AA6013]			
Anma ölçüsü [ØD]	30		
Boyu [L]	150		
Bağlantı metalı çapı [ØA]	10		

Tablo 2. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları (%). (Chemical composition of materials (wt. %))

	C	Mn	Si	Mg	Cu	Cr	S	Zn	Ti	Al	Fe
AISI 1040	0,42	0,55	0,30	---	---	---	0,035	---	---	---	Bal.
AA6013	---	0,50	0,8	1	0,85	0,05	---	0,12	0,05	Bal.	0,25

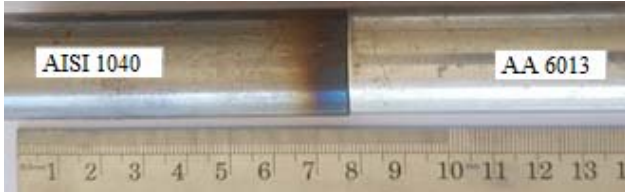
Tablo 3. AISI 1040 ve AA6013 malzemelerin fiziksel özellikleri [29] (Physical properties of AISI 1040 and AA6013 materials)

Fiziksel özellik	AISI 1040	AA6013
Yoğunluk [$\times 1000 \text{ kg/m}^3$]	7,845	2,73
Elastik Modül [MPa]	200×10^3	69×10^3
Çekme Dayanımı [MPa]	500-620	300-375
Poisson oranı	0,28	0,33
Akma Dayanımı [MPa]	415	330
Termal genişleme katsayısı [$\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$]	11,3	23,4



Şekil 4. Çekme deney numunesi makro fotoğrafları (Macro photos of tensile test specimen)

kullanarak birleştirilme işlemleri yapılmıştır. Birleştirme işleminin başarılı bir şekilde tamamlanması için numunelerin alın altına gelmesi ve kanal içinin sürtünme sonucu oluşan flanşların dışarı taşmaması sağlanmalıdır. Çalışmada birleştirilen numunelere ait makro yapı fotoğrafı Şekil 5'te verilmekte olup birleştirme işlemlerinin numuneler alın altına gelinceye kadar devam ettiği görülmektedir. Bağlantı metalinin her üç numunede AISI 1040 çelik malzeme tarafında ve kalıp boşluğu içinde kaldığı görülmüştür. Sürtünme sonucu oluşan ısıdan etkilenen bölge AISI 1040 tarafında oluşmuştur. AA6013 ısı iletim katsayısının çelikten 7 kat fazla olması ve bağlantı tasarımı bu durumun temel nedenini oluşturmaktadır. Bağlantı tasarımında; sürtünme ara yüzeyinin çelik malzeme tarafında kalıyor olması AA6013 tarafında ısıdan etkilenen bölgelerin makro fotoğraflarda görülmesini engellemektedir.

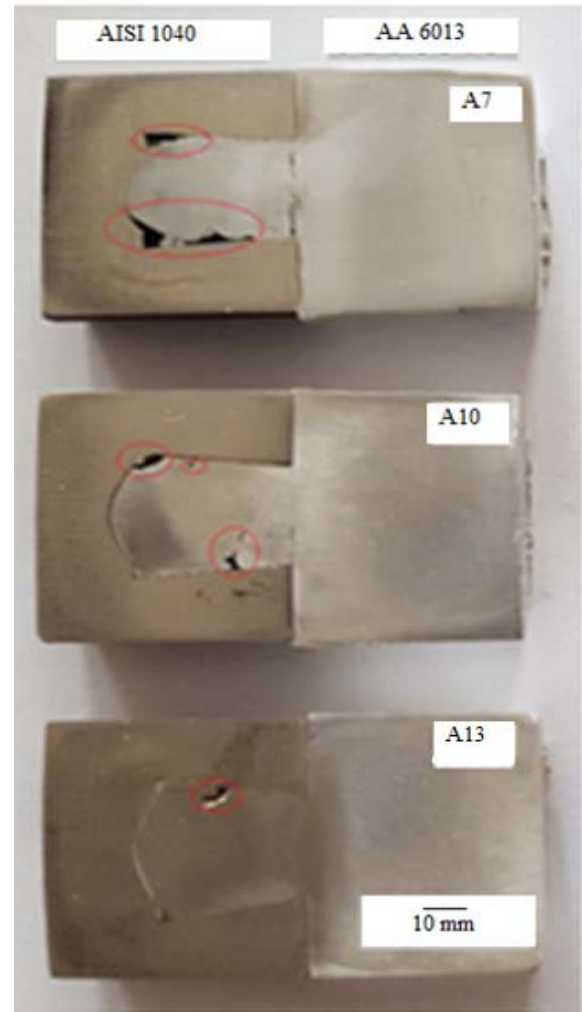


Şekil 5. Numune makro görüntüleri (Macro images of specimen)

Şekil 6' da MLM ile birleştirilen numunelere ait ara yüzey makro fotoğrafları verilmiştir. Çelik malzemenin ergime sıcaklığı alüminyum malzemeden yaklaşık 1000°C daha yüksektir. Bununla birlikte mekanik özelliklerin çelik malzeme tarafında %28 daha yüksek olması nedeniyle plastik şekil değişiminin tamamının alüminyum tarafında meydana gelmesi beklenen bir sonuç olmuştur [31]. Oluşan bu plastik deformasyon mekanik kilitlenme işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Ara yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde bağlantı metalini oluşturan kısımlarda poroziteler net bir şekilde görülmektedir. Poroziteler A7 ve A10 nolu numunelerde, bağlantı metali uç kısımlarında birbirine benzer bölgelerde meydana geldiği görülmüştür. A7 ve A10 nolu numunelerde sürtünme ile oluşan flanşların bu bölgeleri dolduramamış olması, bağlantı açısının flanşların serbest hareketini ve geriye doğru yığılmalarını engellemesinden kaynaklanmıştır. Bağlantı açısının yetersiz olması durumunda hızla soğuyan flanşın konik kanal içinde yeterli akışı sağlayamadığı görülmüştür.

A7 nolu numunede porozite miktarının çok yoğun olduğu görülürken, A10 nolu numunede artan bağlantı açısı ile birlikte porozitenin A7 nolu numuneye göre önemli oranda

azaldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle aynı devir sayısı ve aynı ilerleme değerlerinde birleştirilen numuneler arasında oluşan porozite büyüklükleri arasındaki fark bağlantı açısının, MLM'de bağlantı kalitesi doğrudan etkilediğini göstermiştir. Bağlantı açısının A13 nolu numunede artırılarak 13° olması, A7 ve A10 nolu numunelere göre porozitenin önemli oranda azalması bu sonucu net olarak doğrulamaktadır. Ancak A13 nolu numunede porozite oluşumu engellenememiştir. Bu nedenle bağlantı açısının daha yüksek değerlerde ve diğer parametrelerle birlikte incelenmesi gerektiği görülmüştür.



Şekil 6. Numune ara yüzey makro görüntüleri (Specimen interface macro images)

Şekil 6'da A7 ve A10 nolu numunelerde AA6013 malzeme tarafında kesitin en dar olduğu bölgede oluşan çatlaklar oklarla gösterilmiştir. Söz konusu çatlaklar yeniden şekillendirilen malzemenin akış süresince flanşların yüksek bir basınç oluşturması ve ısıl çevrimlerinde neden olduğu değişen basınç etkilerinin sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir. A10 nolu numunede flanş basıncının daha az olması çatlak miktarını azaltmıştır. A13 nolu numunede ise bağlantı açısına bağlı olarak diğer numunelere göre daha kolay akışı sağlanan flanşlar, malzeme üzerinde oluşabilecek düzensiz basıncın azalmasını sağlamış ve söz konusu bölgede çatlak oluşmamıştır.

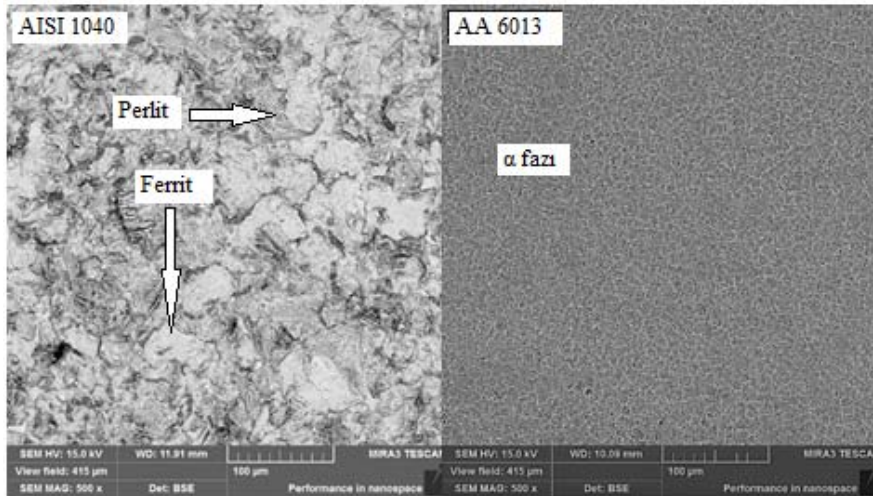
3.2. Mikro Yapı İncelemeleri (Micro structure examination)

Birleştirme işlemi sonrasında birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişiklikler SEM analizleri ile incelenmiştir. Yapılan incelemeler ile her iki malzemenin birleştirme öncesinde homojen yapıda olduğu görülmüştür (Şekil 7). Birleştirme öncesi malzemelerden biri olan çelik tarafında tipik ferrit ve perlit yapının varlığı belirlenirken sadece α fazında olan Al alaşımının eş eksenli tanelerden meydana geldiği tespit edilmiştir [32].

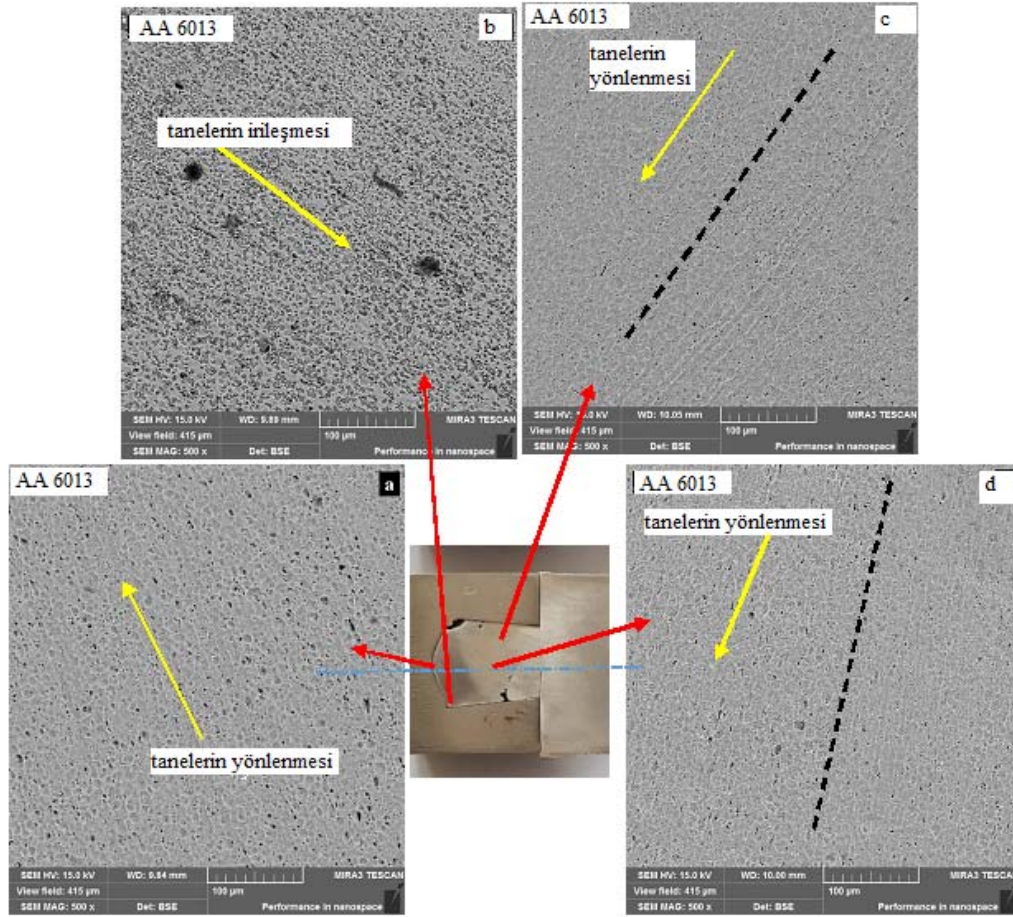
Mekanik kilitleme sonucunda plastik şekil değişiminin meydana geldiği ve bağlantı metalini oluşturan alüminyum malzeme üzerindeki yapısal değişikliklere ait SEM fotoğrafı Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8a'da AISI 1040 ile sürtünme ara yüzeyinde karşılaşılan AA6013 metali sürtünmeyle ortaya çıkan ısı ve eksenel basınç etkisiyle birlikte tanelerin yönlendiği görülmektedir. Yönlenme sürtünme kaynak yöntemindeki flanş oluşumuna benzer şekilde ilerleyerek Şekil 8b'de yön değiştirmiştir. Şekil 8b ile gösterilen bölgede taneler ilerlemiş ve hareket alanları daraldığı için basınç etkisi artmıştır. Bu nedenle bu bölgede tane boyutlarının küçüldüğü tespit edilmiştir. Ancak tane inceliği kısmi bir bölgede meydana gelmiştir. Hall-Petch eşitliği uyarınca tane inceliği sonucu oluşması beklenen mekanik özellik iyileşmesi bu açıdan sınırlı kalmıştır. Şekil 8c'de yapıda meydana gelen flanş tanelerinden serbest şekilde hareket

ederek ilerleyenler görülmektedir. Oluşan flanşlar arka taraftan akmaya devam eden malzeme tarafından mekanik kilitlemeyi oluşturacak biçimde AA6013 ana malzeme yönünde öteleme hareketi ile ilerlemeye devam etmiştir. Şekil 8c'de görülen bağlantı metalinin oluşan flanş ve arkadan gelen malzeme akışı ile ötelenen malzemeden meydana geldiği anlaşılmaktadır. Malzeme akışı devam ederken bağlantı metalini oluşturan bölgeden ana metale doğru ilerledikçe tane sınırlarına benzer bir yapı (kesik çizgi hattı boyunca) Şekil 8c'de meydana geldiği tespit edilmiştir. Belirtilen bu bölgede bir şerit (bant) boyunca ana metalden farklı bir yapının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Özellikle Alüminyum alaşımının ergime sıcaklığının birleştirilen diğer malzeme olan AISI 1040 malzemeye göre çok düşük olması alüminyum tarafında sürtünme esnasında ortaya çıkan ısı enerjisi ve basınca bağlı olarak ana malzemenin tane yapısından farklı bir yapının ortaya çıkması söz konusu olmuştur. Bu durumun düzensiz ısıl çevrim, kendi halinde akan ve daha sonra basınç etkisi ile sıkışan tanelerin bir araya gelmesi nedenleri ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Söz konusu durum ve bağlantı açısına bağlı olarak ortaya çıkan flanş ilerleme hızının bir etkisi sonucunda, soğuma hızındaki değişim nedeni ile A7 ve A10 nolu numunelerde sıcak yırtılmalara neden olmuştur. A13 nolu numunede ise artan bağlantı açısının bir sonucu diğer numunelerle söz konusu aynı bölgelerde yırtılmaların meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bu durum tanelerin, artan bağlantı açısına bağlı olarak daha kolay hareket etmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Şekil 8c ve 8d'de oluşan tane sınırına benzer yapının (kesik çizgi hattı boyunca) devamı görülmektedir. Şekil üzerinde kesik çizgilerle ayrılan bölgenin üst kısmında, ısının etkisi ile hamurumsu hale gelerek yeniden şekillendirilen ve aralarında soğuma farkları bulunan yapılar olduğu düşünülmektedir. Şekil 8c ve 8d ile gösterilen tanelerin tamamının flanş oluşumunda meydana gelen yönlenelemlere benzer yönlendirilme oluşturması bu sonucun temelini oluşturmaktadır. Sözü edilen bu bölgede homojen olmayan sıcaklık ve plastik deformasyon oranının varlığı tane



Şekil 7. Birleştirilen numunelere ait SEM görüntüleri (SEM images of the joining samples)



Şekil 8. A10 nolu numune bağlantı metali üzerinde meydana gelen yapısal değişiklikler
(Structural changes on A10 specimen connection metal)

yapısında yukarıda bahsedilen değişikliklere neden olduğu sonucuna varılmıştır. Birleştirme işlemi esnasında her iki malzemede sürtünmenin ve uygulanan basıncın etkisiyle bölgesel değişen sıcaklık gradyanına ve plastik deformasyona neden olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 7’de verilen görüntülerde AISI 1040 malzemede tane yapısında değişim ortaya çıkmadığı ana yapının perlit ve ferrit’ten oluştuğu, tanelerin eş eksenli olduğu dolayısıyla herhangi bir yönleneşme, tane boyutu değişimi, beklenmeyen oranda plastik deformasyon oluşmadığı gözlemlenmiştir. Birleşme esnasında meydana gelen ısının etkisiyle oluşan sıcaklık yükselmesi çelik malzemede tane irileşmesi veya aşırı plastik deformasyondan kaynaklanan tane incelmeleri ve heterojen plastik deforme olmuş bölgelerin ortaya çıkmasını engellediği sonucuna varılmıştır. Birleşme kısmında kısmi olarak ara yüzeye yakın bölgelerde tanelerde değişimler gözlemlenmiş olmasına rağmen ana yapıyı ve genel olarak birleşme bölgesini etkileyebilecek büyüklükte olmadığı açıkça görülmektedir.

Şekil 9’da bağlantı metali üzerinde meydana gelmiş olan sıcak yırtılma ve malzeme akış doğrultularına ait SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler Çelik/Al ara yüzeyi köşe noktalarına yakın bölgelerden alınmış görüntülerdir.

Yeniden şekillendirilen Al malzemenin üst kısımları termal genişleme ve soğuma ile oluşan ısıl çevrim devam ederken alt taraf akmaya devam etmiştir. Akış devam ederken çelik yüzeyine doğru soğuma ve çekme nedeni ile çatlaklar meydana gelmiştir (A7 nolu numune). Birleştirme bölgesinde iki farklı metalin bir arada yer alması her iki malzemenin ısı iletim katsayılarının ve özgül ısınma ısısı değerlerinin oldukça farklı olması sıcak yırtılmaların ana nedeni olarak düşünülmüştür. Sıcaklık homojen olmadığı gibi soğuma ve ısı akışı yönleneşmesi de homojen değildir. Oluşan bu karmaşık, düzensiz ve karakteristik olmayan mekanizmanın bu tür sıcak yırtılma ve çatlakların oluşumunu teşvik ettiği düşünülmüştür. Akışın artan bağlantı açısı ile rahat bir şekilde ilerlemesi ile çatlak meydana gelmediği görülmektedir (A10 ve A13 nolu numuneler). Bağlantı açısı ve dolayısıyla birleştirme geometrisindeki değişiklikler sürtünmeyi ısı oluşumunu ve sıcaklık yükselmesini belirleyici etkiye neden olmaktadır. İşlem parametresi olarak en etkin parametrelerden birisinin bağlantı geometrisi olduğu sonucuna varılmıştır.

A13 nolu numunede ara yüzey iç kısımdaki köşe noktalarına akışın daha hızlı ve kolay gerçekleştiği ve tane boyutlarının A7 ve A10 nolu numunelere göre daha büyük olduğu

görülmektedir. Bağlantı açısı azaldıkça tanelerin hareketi dar bir alanda gerçekleşmek zorunda kalmıştır. Bu nedenle açıda azalma akışın olduğu bölgelerde malzeme dönüşlerini zorlaştırmıştır. Bu durumla birlikte yapı içinde soğuma farklılıklarının oluşması mikro çatlak oluşumuna neden olmuştur.

Birleştirme ara yüzelerine ait SEM görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. A7 nolu numunede birleşme ara yüzeyi ve konik kısımlarda tam birleşme sağlanmadığı açıkça görülmektedir. A10 ve A13 nolu numunede birleşme ara yüzeyinde çatlak oluşmadığı ve konik yüzey boyunca meydana gelen boşlukların A7 nolu numuneye göre nispeten azaldığı belirlenmiştir. Al ve çelik arasındaki ısıl genleşme farkı nedeni ile genişleyen ve büzülen Al malzeme büzülme sürecinde AISI 1040 çelik yüzeyi ile olan bağlantısını neredeyse tüm ara yüzey boyunca kaybetmiştir.

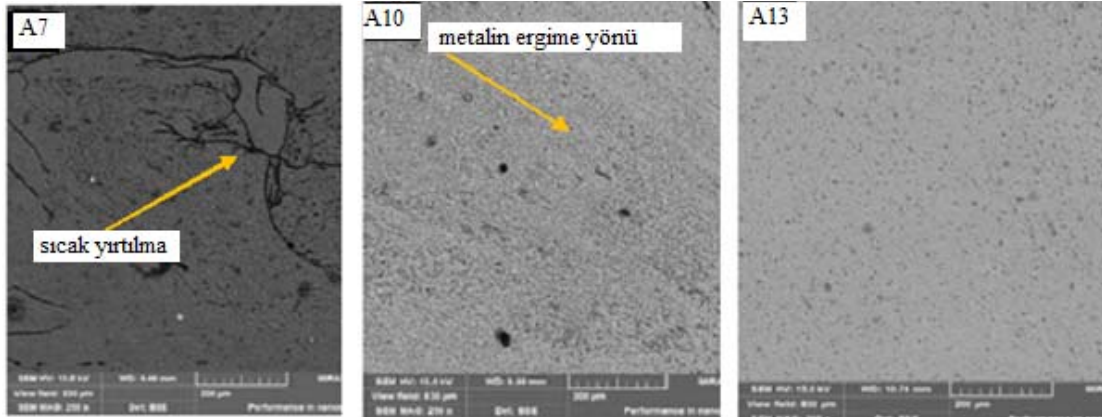
A7 nolu numune de AISI 1040 çelik ve AA6013 alüminyum malzeme arasında difüzyonun gerçekleşmediği görülmektedir. Ancak artan bağlantı açısının olduğu diğer numunelerde bağlantı ara yüzeyi boyunca yapılan detaylı incelemelerde ara yüzeyde kısmi de olsa ara yüzey difüzyonu olduğu tespit edilmiştir. Oluşan difüzyonların neredeyse her iki numunede yer yer ve benzer miktarlarda

meydana gelmesi nedeni ile bağlantı açısının oluşan difüzyon miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

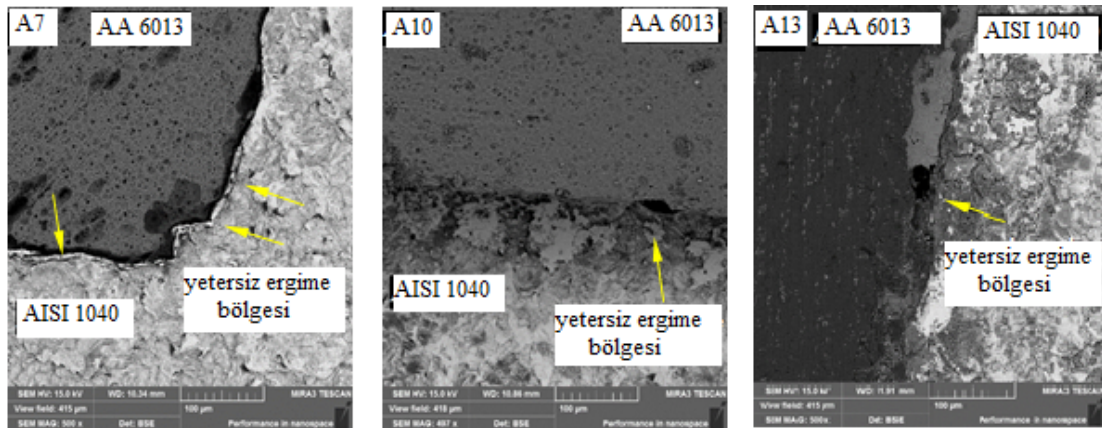
Şekil 10 incelendiğinde AA6013 malzeme tarafında plastik deformasyon açıkça gözlemlenirken AISI 1040 çelik malzeme tarafında tipik ferrit yapı korunmuş herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Al tarafında oluşan ara tabaka çeliğe göre daha fark edilebilir şekilde görülmektedir. Bağlantı ara yüzeyinde bazı bölgelerde Al ve Fe'in varlığı aynı anda bulunmakta olup bu durum bağlantı esnasında intermetalik bileşik (IMC) oluşumunun meydana geldiğinin göstergesidir. Meydana gelen intermetalik bileşiklerin Al_2Fe , $Al_{12}Fe_4$, Al_5Fe_2 ve $FeAl$ şeklinde olduğu literatürde bildirilmiştir [33].

3.3. Mikro Sertlik Ölçümleri (Micro Hardness Measurement)

Birleştirme sonrasında elde edilen sertlik değerleri Şekil 11'de verilmiştir. Ana malzeme sertlik değerleri ise AISI 1040 çelik malzemede 220 HV, AA6013 malzemede 72 HV olarak ölçülmüştür. Sürtünme ara yüzeyine yakın bölgede AISI 1040 çelik malzemede ısıdan etkilenmiş bölgede sertlik değerlerinin bir miktar azaldığı görülmüştür [34]. A7 ve A10 nolu numunelerde bu değer 137 HV iken A13 nolu



Şekil 9. Bağlantı metali üzerinde meydana gelen sıcak yırtılmalar ve malzeme akışı (Hot tears on the connection metal and material flow)



Şekil 10. Birleştirme bölgesi SEM görüntüleri (SEM images of the joint region)

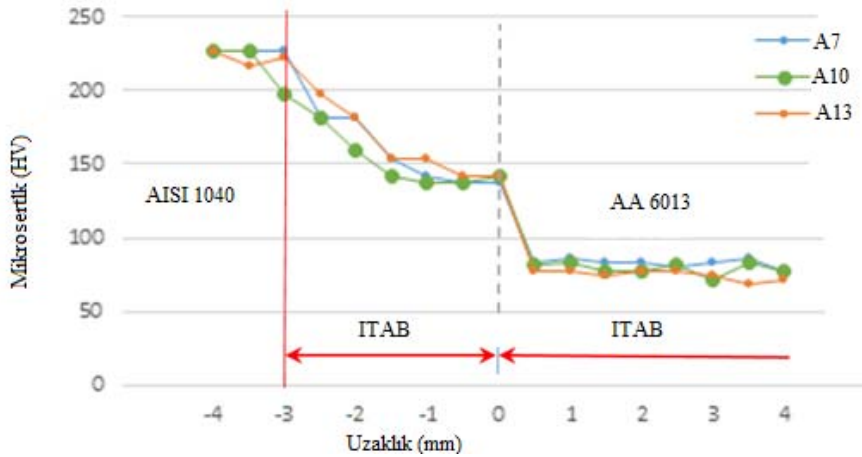
numunede 142 HV olarak ölçülmüştür. A13 nolu numunede; bağlantı metalinin bağlantı açısına bağlı olarak daha hızlı oluşması ve ısıyı tüm temas noktalarından iletmesinden, sertlikteki düşüş bir miktar daha az olmuştur. Çelik levhanın ısı tesiri altındaki bölgede, birleştirilen çelik malzemede soğuma hızından dolayı martenzit yapı oluşmuş ve yine işlem esnasında temperleme etkisi ile martenzit yapının sertliğinde düşüş ortaya çıkmıştır. Bunun martenzit adalarının temperlenmesine bağlı olduğu literatürde de bahsedilmektedir [35]. Azalan bu sertlik profilinin sınırı aynı zamanda ısıdan etkilenen bölgenin de sınırını oluşturmaktadır. Yaklaşık 3 mm'lik ısıdan etkilenen bölgeden sonra sertlik değerlerinin normal değerlerine ulaştığı görülmektedir.

Bağlantı metalinde sertlik değerlerinin, bağlantı ara yüzüne yakın noktalarında nispeten arttığı ve bağlantı metalini boyunca ana metal AA6013 sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik değerinin A7, A10 ve A13 nolu numunelerde sırasıyla 86,5; 81,63; 77,16 HV ye kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Isı ve eksenel basınç, bağlantı metalindeki sertlik artışının temel nedeni

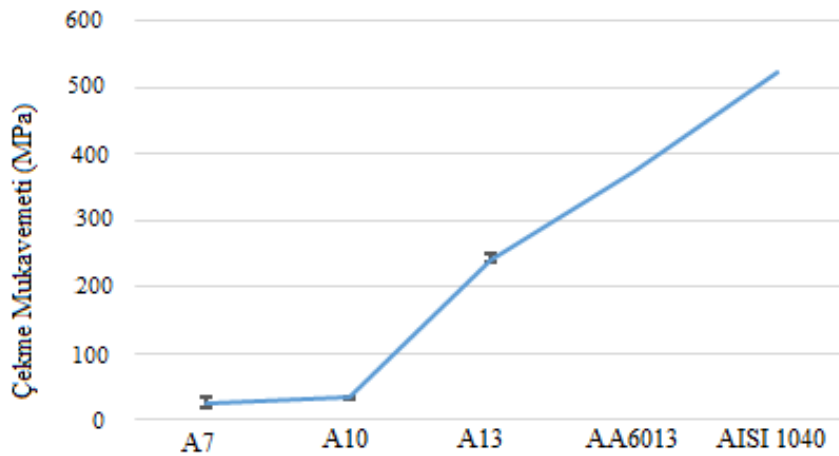
olmuştur [35]. AA 6013 tarafında ITAB bölgesinin tüm bağlantı metalini boyunca meydana geldiği (15 mm) ve bu bölgede plastik şekil değişiminin etkisi ile sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan bağlantı metalini, kalıp parçasında açılan konik boşluğu dolduracak şekilde tasarlanmış ve uygun ölçüde imal edilmiştir. Ancak kalıp içinde plastik şekil değişimine maruz kalan malzeme akışı uygun olmadığına bağlantı metalini belirli bölgelerde yığılacak ve sertliği artmasına neden olacaktır. Söz konusu durum nedeni ile sertlik değerleri tüm bağlantı metalini boyunca, bağlantı açısına bağlı olarak A7 nolu numunede en yüksek çıkarken A13 nolu numunede nispeten daha düşük çıkmıştır.

3.4. Çekme Test Sonuçları (Tensile Test Results)

Numunelere ait çekme deney sonuçları Şekil 12'de verilmiştir. Çalışmada her numune grubu için grafikte bağlantı mekanik özelliklerinin ana metal mekanik özelliklerinden az olduğu görülmektedir. Bu durumun ana sebebinin birleşme metalleri üzerinde meydana gelen poroziteden kaynaklandığı düşünülmektedir [23]. Ayrıca



Şekil 11. Birleştirilen bölgedeki mikro sertlik dağılımları (Micro hardness distribution in the joining area of the specimens)



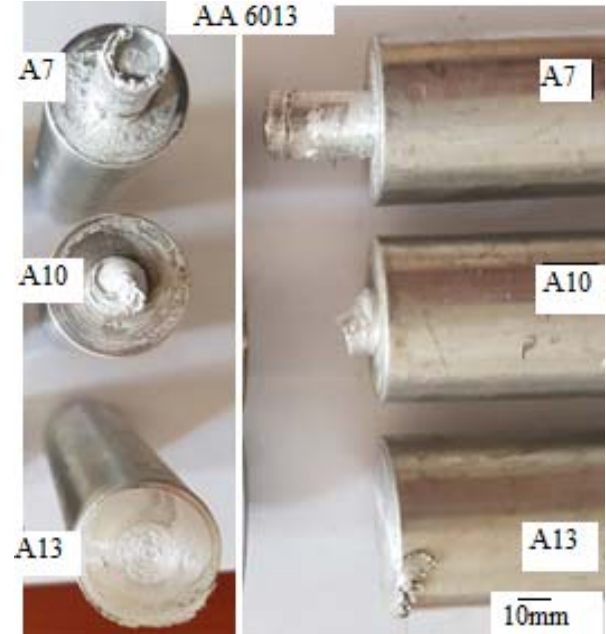
Şekil 12. MLM ile birleştirme işlemi sonrası çekme deneyi sonuçları (The results of tensile test of MLM connections)

birleşme işlemi sırasında meydana gelen ısı mekanik özelliklerde düşüşe neden olduğu ve ana metalden daha düşük dayanımların elde edildiği literatürde açık olarak belirtilmiştir [36]. Uygun ısı girdisinin sağlanarak mekanik özelliklerin artırılmasında; MLM yönteminde seçilen parametrelerin birbirleri ile uyumlarının artırılması ve birleştirilen malzemelere uygun parametre aralıklarının daha dar bir aralıkta belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan farklı malzeme türlerinin birleştirilmesinde meydana gelen plastik deformasyonun malzeme üzerinde kalıntı gerilme oluşturması mukavemetin azalmasında etkin bir rol oynamaktadır [37]. Söz konusu plastik deformasyonun gerçekleşmesinde malzemenin basınç altında sürekli döndürülmesi ve yarı katıdan katılaştıran alayışımın burkulma ile birlikte deformasyon miktarını artırması da bağlantı mukavemetini düşüren temel mekanizmalardan biri olmuştur.

Çekme deney sonuçları incelendiğinde A7 nolu numunenin çekme dayanımı 23,980 MPa, A10 nolu numunenin çekme dayanımı 34,717 MPa elde edilmiş olup bağlantı mukavemetinin önemli oranda düşük çıktığı görülmektedir. A7 ve A10 nolu numunelerde birleştirme işleminde seçilen bağlantı açısının yetersiz olması; yüksek porozite miktarına, plastik deformasyonun yetersizliğine ve akışın düzenli olarak sağlanamamasına bağlı olarak ortaya çıkan düzensiz soğuma bağlantı dayanımında düşüşe neden olmuştur. Buna karşın A13 nolu numunede bu değer 241,38 MPa'ya kadar yükselmiştir. Bağlantı açısının artması ile malzeme akışının düzenli hale geldiği ve porozitenin daha az miktarda olduğu SEM görüntülerinde görülmekte olup bu durum mekanik özelliklerdeki artışın nedenini gösterir niteliktedir. Sonuçlar incelendiğinde A13 nolu numunede bağlantı dayanımı ana malzeme AA6013 malzemenin %33 düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak her üç numune sonuçları incelendiğinde; farklı bağlantı açılarının kullanılması ve parametreler arasındaki uyumun artırılması ile mekanik özelliklerin daha da artırılabilirliği düşünülmektedir. Bunun yanında bağlantı metali akış hızının artırılması ve flanş oluşumunu zorlaştıracak kanal formundaki keskin köşelerin radyus olarak tasarlanması mekanik özellikleri artıracak etkiler arasındadır.

Çekme deneyi sonucunda kopan parçalar incelendiğinde kopmanın A7 ve A10 nolu numunelerde birleşme bölgesinde bağlantı metali üzerinde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 13). Bu numuneler önce kanal içinden sıyrılmış ve daha sonra kopmuştur. A7 nolu numunenin neredeyse tamamının sıyrılarak çıktığı görülmekte olup bu durum porozite oluşumunda belirtildiği gibi bağlantı açılarının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. A7 nolu numunede Şekil 6'da gösterilen AA6013 malzeme üzerinde daralan bölgede meydana gelen çatlaklara rağmen malzemenin sıyrılarak ayrılmış olması bağlantı açısının yetersiz seçilmesi ve birleşmenin tam olarak yapılamadığını göstermektedir [37]. Bağlantı açısındaki artışa bağlı olarak A10 nolu numunede kopma, kesitin daraldığı bölgeye yakın bir noktada meydana gelmiştir. Bağlantı açısının en büyük olduğu A13 nolu numunede ise kopma bağlantı metalinin

başlangıcını oluşturan, kesitin en küçük olduğu bölgede meydana gelmiştir.



Şekil 13. Çekme deneyi sonrası kırık yüzey makro görüntüleri (Macro images of fracture surface after tensile test)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında gemi, otomotiv ve raylı sistemler gibi birçok endüstride birleştirilerek kullanılması durumunda hafiflik, mekanik özelliklerde artış gibi önemli özelliklerin elde edilebileceği AISI 1040 ve AA6013 malzeme çifti mekanik kilitleme yöntemi ile birleştirilmiştir. Sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

- Farklı kimyasal ve fiziksel özellikteki AISI 1040 çeliği ve AA6013 alüminyum malzeme çiftinin MLM ile birleştirilebileceği tespit edilmiştir.
- Ana metalin mekanik özellikleri bağlantı sonrası elde edilen mekanik özelliklerden yüksektir. Bağlantı metali üzerinde meydana gelen poroziteler, yöntemin uygulanışına bağlı ortaya çıkan homojen olmayan yapı ve açığa çıkan ısının olumsuz etkisi mekanik özelliklerdeki düşüşün temel nedenlerini oluşturmaktadır.
- Bağlantı açısı ve dolayısıyla birleştirme geometrisindeki değişiklikler sürtünmeyi, ısı oluşumunu ve sıcaklık yükselmesini belirleyici etkiye neden olmaktadır. İşlem parametresi olarak en etkin parametrelerden birisinin bağlantı geometrisi olduğu sonucuna varılmıştır.
- Bağlantı mikro yapı ve mekanik özelliklerinin bağlantı açısına bağlı olarak önemli oranda değiştiği görülmüştür. A13 nolu numunede (Bağlantı açısı: 13°) 241,38 MPa olarak en yüksek dayanım değeri, A7 nolu numunede (Bağlantı açısı: 7°) 23,98 MPa ile en düşük dayanım değeri elde edilmiştir. Bağlantı açısındaki artış malzeme akışını düzenli hale getirmiş ve porozite oluşumunu azaltarak dayanım değerlerini artmıştır.

- Bağlantı metali üzerinde sertlik değerlerinin her üç numunede ana metale göre arttığı ve bu artışın bağlantı açısına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Bağlantı açısının azalması ile sertlik değerlerinin artarak A7 nolu numunede 86,5 HV, A13 nolu numunede 77,16 HV ye kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Sertlik değerleri ısı ve basınç altında birleştirilen her üç numunede artmıştır. Bağlantı açısının azalması malzeme akışını zorlaştırmış ve sertliğin artmasına neden olmuştur.
- Bağlantı açısının yetersiz olması bağlantı metalinin kalıp içindeki akışını engellemiş ve yeniden şekillendirilen metal üzerinde A7 ve A10 nolu numunelerde mikro çatlak ve porozite oluşumuna neden olmuştur. Bağlantı açısının artması sonucunda A13 nolu numunede eş eksenli ince taneli homojen bir mikro yapı ortaya çıkmıştır.
- A7 ve A10 nolu numunelerde bağlantı açısı yetersiz kalmış ve çekme testinde parçaların kopmadan önce kanal içinden sıyrıldığı görülmüştür. Bağlantı açısının en yüksek olduğu A13 nolu numunede sıyrılma olmadan kesitin daraldığı bölgeden kopmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Başar G., Mıstıkoğlu S., Determination of the optimum welding parameters for ultimate tensile strength and hardness in friction stir welding of Cu/Al plates using Taguchi method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1595-1608, 2019.
2. N. Kumar, W. Yuan, R.S. Mishra, Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials, Copyright Elsevier Inc. All rights reserved. No, 2015.
3. Aydın H., Tutar M., Davut K., Bayram A., Effect of welding current on microstructure and mechanical properties of 15% deformed TWIP steel joined with electrical resistance spot welding, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 803-81, 2020.
4. Mercan S., Özdemir N., AISI 2205 / AISI 1020 malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi, *NWSA-Technological Applied Sciences*, 8/2, 15-34, 2013.
5. Uzun H., Donne C.D., Argagnotto A., Ghidini T. and Gambaro C., Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 stainless steel, *Materials and Design*, 26, 41-46, 2005.
6. Piccini J. M., Svobodab H.G., Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-Steel joints, *Procedia Materials Science*, 9, 504 – 513, 2015.
7. Ünel E., Taban E., Properties and optimization of dissimilar aluminum steel CMT welds, *Welding in the world*, 61, 1-9, 2007.
8. Durmuş H., Çömez N., Yurddaşkal M., Soğuk metal transfer kaynağı ile birleştirilmiş AA6061-galvanizli çelik sacların karakterizasyonu, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 8, 835-844, 2017.
9. Rykała J., Pfeifer T., Robotised CMT welding of 6xxx series aluminium alloys, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 6, 5-11, 2013.
10. Kimapong K. and Watanabe T., Effect of Welding Process Parameters on Mechanical Property of FSW Lap Joint between Aluminum Alloy and Steel, *Materials Transactions*, 46 (10), 2211-2217, 2005.
11. Hussein S.A., Tahir A. S. M., Hadzley A.B., Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stir welding: A review, *Materials Today Communications*, 5, 32–49, 2015.
12. Shahverdi H.R., Ghomashchi M.R., Shabestari S., Hejazi J., Microstructural analysis of interfacial reaction between molten aluminium and solid iron, *Journal of Materials Processing Technology*, 124, 345-352, 2012.
13. Liu J., Jiang S., Shi Y., Kuang Y., Huang G., Zhang H., Laser fusion – brazing of aluminum alloy to galvanized steel with pure Al filler powder, *Opt Laser Technol*, 66, 1–8, 2015.
14. Kah P., Suoranta R., Martikainen J., Advanced gas metal arc welding processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67 (1-4), 655–674, 2012.
15. Furukawa K., New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets, *Welding International*, 20 (6), 440–445, 2006.
16. Dong H., Chen S., Song Y., Guo X., Zhang X., Sun Z., Refilled friction stir spotwelding of aluminum alloy to galvanized steel sheets, *Materials and Design*, 94, 457–466, 2016.
17. Coa R., Sun J., Chen J.H., Wang P.C., Weldability of CMT Joining of AA6061-T6 to Boron Steels with Various Coatings, *Welding Journal*, 93, 193-204, 2014.
18. Lee W.B., Schmucker M., Mercardo U.A., Biallas, G. and Jung, S.-B., Interfacial reaction in steel-aluminum joints made by friction stir welding, *Scripta Materialia*, 55, 355-358, 2006.
19. Pourali M., Abdollah-zadeh A., Saeid T. and Kargar, F., Influence of welding parameters on intermetallic compounds formation in dissimilar steel/aluminum friction stir welds, *Journal of Alloys and Compounds*, 715, 1-8, 2017.
20. Sierra G., Peyre P., Deschaux-Beaume F., Stuart D., Fras G., Steel to aluminium key-hole laser welding, *Materials Science and Engineering: A*, 447, (1-2), 197–208, 2007.
21. Chen C. M., Kovacevic R., Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1205–1214, 2004.
22. Xu N., Chen L., Feng R.N., Song Q.N., Bao Y.F., Recrystallization of Cu-30Zn brass during friction stir welding, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (3), 3746-3658, 2020.
23. Esmaeili A., Besharati Givi, M.K., Zareie Rajani H.R., A metallurgical and mechanical study on dissimilar Friction Stir welding of aluminum 1050 to brass (CuZn30), *Materials Science and Engineering: A*, 528 (22–23), 7093-7102, 2011.
24. Kar A., Yadav D., Suwasc S., Kailas S.V., Role of plastic deformation mechanisms during the

- microstructural evolution and intermetallics formation in dissimilar friction stir weld, *Materials Characterization*, 164, 110371, 2020.
25. Zhao W., Wu C., Su H., Numerical investigation of heat generation and plastic deformation in ultrasonic assisted friction stir welding, *Journal of Manufacturing Processes*, 56 (A), 967-980, 2020.
 26. Mercan S., Farklı Metal Çiftlerinin Mekanik Kilitlenme Yöntemi ile Birleştirilmesi, *GU J Sci, Part C*, 7(1) 25-36, 2019.
 27. Mercan, S., Joining Dissimilar Material Pairs by Mechanical Locking Method (MLM), *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 22, 1975–1987, 2021.
 28. Bozzi S., Helbert-Etter A.L., Baudin T., Criqui B. and Kerbiguet J.G., Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds, *Materials Science and Engineering A*, 527, 4505-4509, 2010.
 29. Ramachandran K.K., Murugan N., Kumar S.S., Influence of tool traverse speed on the characteristics of dissimilar friction stir welded aluminium alloy, AA5052 and HSLA steel joints, *Archives Civ. Mech. Eng.*, 15(4), 822-830, 2015.
 30. Azo Materials. Properties of materials. *Azo Materials*. (<https://www.azom.com>). Erişim Tarihi: 20.09.2019.
 31. Taban E., Gould J.E. and Lippold J.C., Alüminyum çelik farklı metal kaynaklı bağlantıların mikro yapısal karakterizasyonu, *Kaynak Teknolojisi VII. Ulusal Kongre ve Sergisi*, 97-102, 1994.
 32. Ersöz T., Investigation of The Hardness and Microstructural Properties of Equal Channel Angular Pressed 2024 Aluminium Alloy, After Aging, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2018.
 33. Lee C.-Y., Choi D.-H., Yeon Y.-M. and Jung S.B., Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and Al-Mg alloy by formation of IMCs, *Science and Technology of Welding and Joining*, 14, 216-220, 2013.
 34. Abdollah-Zadeh A. Saeid T., Sazgari B., Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminium/copper lap joints, *Journal of Alloys and compounds*, 460, 1-2, 535-538, 2008.
 35. Shen Z., Chen Y., Haghshenas M. and Gerlich A.P., Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds, *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 18, 270-277, 2015.
 36. Yasui T., Wu-Bian T., Hanai A., Mori T., Hirosawa K. and Fukumoto M., Friction stir girth welding between aluminum and steel rods, *Procedia Manufacturing*, 15, 1376-1381, 2018.
 37. Robinson J., S.I Redington W., The influence of alloy composition on residual stresses in heat treated aluminium alloys, *Materials Characterics*, 105, 47-55, 2015.