

Araştırma Makalesi

Otomotivde Kullanılan %25 Geri Dönüştürülmüş Al6016 Serisi Sacların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi

Cihan YAKUPOĞLU^{1,2,*} , Halil KIRDEMİR^{1,2} , Ömer ADANUR¹ , Faruk VAROL¹ 

Gönderim: 11.09.2024

Kabul: 23.12.2024

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, Türkiye; fvarol@subu.edu.tr, oadanur@subu.edu.tr

² Akpres Metal Yedek Parça Mak. San. ve Tic. A.Ş., Ar-Ge Bölümü, Sakarya, Türkiye; cihan.yakupoglu@akpres.com.tr, halil.kirdemir@akpres.com.tr

* Sorumlu yazar

Özet: Bu çalışmada, geri dönüştürülme oranı %25 olarak üretilen 2 mm kalınlığındaki Al6016 (AL6-HDI-TZ-U) serisi saclardan birleştirme numuneleri elde edilmiştir. Test numuneleri için özel fişür tasarlanarak üniversal kalıpcı freze tezgahına entegre edilmiştir ve birleştirmeler yapılmıştır. Birleştirici takım ucu geometrisi 10 derece konik, yüksekliği 2.9 mm, omuz çapı 15 mm olacak şekilde 2379 malzeme olarak seçilmiş ve yüzey sertliği 62-65 HRC'ye çıkartılmıştır. Kaynak bekleme süresi 4 sn olarak sabit tutulmuştur. Birleştirmeler 600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600 rpm olarak 6 farklı devirde sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılmıştır. Birleştirilen test numune bağlantılarının ısı girdileri hesaplanarak sertlik testi, çekme kesme testi ile makro ve mikroyapısal analizleri incelendi. 600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600 rpm hızlarda yapılan birleştirmeler başarılı oldu, tüm hızlarda SZ bölgesinde en ince tane yapısı, HAZ bölgesinde en kalın tane yapısı olduğu tespit edilmiştir. 600 rpm de en yüksek çekme kesme yükünü $R_m:109$ MPa olarak görüldü. En yüksek sertlik değerleri, 600 rpm'de BM, SZ, TMAZ ve HAZ için sırasıyla 108 ± 2 , 101 ± 3 , 95 ± 3 ve 87 ± 5 HV_{0.1} olarak tespit edildi. 600 ve 1200 rpm hızlardaki birleştirmelerde gevrek, diğer hızlarda sünek kırılma modu görülmüştür. Birleştirme bölgesi, dinamik olarak yeniden kristalleşen karıştırma bölgesi (SZ), termo-mekanik olarak etkilenen bölge (TMAZ), ısıdan etkilenen bölge (HAZ) ve ana metal (BM) olarak tanımlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Al6016; sürtünme karıştırma nokta kaynağı; geri dönüştürülmüş malzeme; C2379

Investigation of Weldability of 25% Recycled Al6016 Series Sheet Metal Materials Used in Automotive by Friction Stir Spot Welding

Abstract: In this study, joint samples were obtained from 2 mm thick Al6016 (AL6-HDI-TZ-U) series sheets produced with a recycling rate of 25%. A special

fixture was designed for the test samples and integrated into the universal mold milling machine and joints were made. The joint tool tip geometry was selected as 2379 material with a 10-degree conical, 2.9 mm height, and 15 mm shoulder diameter and the surface hardness was increased to 62-65 HRC. The welding waiting time was kept constant as 4 s. The joints were made by friction stir spot welding at 6 different speeds as 600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600 rpm. The heat inputs of the jointed test sample connections were calculated and hardness test, tensile shear test and macro and microstructural analyzes were examined. The joints made at speeds of 600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600 rpm were successful, the finest grain structure was found in the SZ region and the coarsest grain structure was found in the HAZ region at all speeds. The highest tensile shear load was observed as $R_m: 109 \text{ MPa}$ at 600 rpm. The highest hardness values were determined as 108 ± 2 , 101 ± 3 , 95 ± 3 and $87 \pm 5 \text{ HV}_{0,1}$ for BM, SZ, TMAZ and HAZ at 600 rpm, respectively. Brittle fracture mode was observed in joints at speeds of 600 and 1200 rpm, while ductile fracture mode was observed at other speeds. The joining zone was defined as the dynamically recrystallising stir zone (SZ), thermo-mechanically affected zone (TMAZ), heat-affected zone (HAZ) and base metal (BM).

Keywords: Al6016; friction stir spot welding; recycled material; C2379

1. Giriş

Sürtünme karıştırma kaynağı, alüminyum alaşımları, bakır alaşımları, titanyum alaşımları, paslanmaz çelik ve magnezyum alaşımları gibi çeşitli alaşımları birleştirme kabiliyetinden dolayı endüstride giderek artan bir katı hal birleştirme yöntemi olarak bilinmektedir [1]. Bu yöntemde, silindirik bir omuza sahip ve profilli bir pimle sonlanan dönen bir takım, alt tabaka plakasına sıkıştırılmış bir malzemeye daldırılır. Daha sonra takım, malzeme boyunca hareket ettirilir. Takım (omuz ve pim) ile malzeme arasındaki sürtünme ısı ile iş parçasını plastikleştirir. Dönen takım, karıştırılan bölgeyi oluşturmak için iş parçası boyunca çevrildikçe şiddetli plastik deformasyon ve plastikleştirilmiş metalin akışı meydana getirir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) ile birleştirilmiş malzemenin kesiti dört bölgeden oluşmaktadır; ana metal, ısıdan etkilenen bölge, termo-mekanik olarak etkilenen bölge ve karıştırılan bölgedir.

Demir dışı metaller, özellikle alüminyum ve alaşımları, hafifliği ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak tercih edilir. Yarı mamul ürünlerinin işlenmesi sırasında, talaş ve atık şeklinde büyük miktarda hurda oluştuğu bilinmektedir. Bu hurda genellikle eritme işlemine geri döndürülür ve burada bir miktar metal geri kazanılır ve tekrar üretim sürecinde kullanılır. Buna geleneksel geri dönüşüm süreci denir. Alüminyum hurdasının geleneksel geri dönüşümünde metal verim oranı çok düşüktür, sadece %55'tir [1]. Kullanım ömrü sonu hurdası ve üretim hurdası olmak üzere iki tür hurda vardır. Üretim hurdası düzenli olarak bulunur, cevherden daha saftır ve bu nedenle eritmeden ürünlerin doğrudan üretimi için uygun bir malzemedir. Bu yöntemi kullanarak alüminyum, bakır, magnezyum, çelikler ve metalik matrisli kompozitler dahil olmak üzere

malzemelerin yapısını değiştirme girişimlerinin faydalı olduğu bulunmuştur [2]. SKNK işlemi, mukavemet, süneklik, sertlik, yorulma ömrü, kırılma tokluğu ve korozyon direnci dahil olmak üzere malzeme mekanik özelliklerini iyileştirdiği bulunmuştur [3]. Karıştırılan bölgedeki metal özellikleri, tane arıtma, ikinci faz partiküllerinin homojenizasyonu, kusurların giderilmesi ve yüzey modifikasyonu yoluyla geliştirilmiştir [2-6]. Prosedürün gözenekliliği ve mikro ayrışmayı ortadan kaldırdığı gösterilmiştir [7]. Yoğunlaştırılmış karıştırma işlemi genellikle ikinci faz partiküllerini neredeyse normal boyuta ayırır ve bunları karıştırılan bölgede homojen bir şekilde dağıttığı bilinmektedir [5, 8]. Alüminyum alaşımlarında karıştırılmış bölgenin mikro yapısı üzerine yapılan çalışmalar, plastik deformasyon ve sürtünme ısınmasından kaynaklanan eř eksenli ve ince yeniden kristalleşmiş taneciklerden oluştuğunu göstermiştir. İşlenmiş 1050, 1100, 6061 ve 7050 alüminyum alaşımlarında geliştirilen tane boyutlarının 0.5 μm -10 μm arasında değiştiği bulunmuştur [9-11]. Boyut, soğutma sıcaklığı kontrolü yoluyla modifiye edilen ana metallere yaklaşık 10 kat ila 100 kat daha küçüktür. Malzemenin yapısının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi, daha ince eř eksenli taneler, daha ince ikinci faz parçacıkları, en aza indirilmiş kusurlar ve daha homojen bir yapı ile sonuçlanmıştır [9-11].

Takım ile ilgili sürtünme karıştırma kaynağı parametrelerinin farklı malzemeler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Parametreler: dönme hızı, bekleme süresi, dikey basınç, eğim açısı ve takımın geometrisidir [1, 7, 9, 12, 13]. Tane büyüklüğünün takım dönme hızındaki artışla doğru orantılı olduğu bulunmuştur [5, 11]. Hızdaki artış, artan sürtünme ısınması ve dolayısıyla sıcaklığı arttırmaktadır. Sonuç olarak, tane büyüme hızı arttırmıştır. Ek olarak, en yüksek sıcaklığın takım üzerindeki dikey basınçla önemli ölçüde arttığı bulunmuştur [13]. Bu yüzden; Isı üretimini teşvik eden işleme parametrelerinde bir artış ile tane büyümesi gözlenir.

Sürtünme karıştırma kaynaklı numunelerin normalde oda sıcaklığında yavaşça soğumasına izin verilir. Ultra ince tanelerin ısıya uzun süre maruz kalması, tane büyümesine yol açar. Bununla birlikte, bir soğutucunun uygulanması büyümei durdurduğu bulunmuştur [12-14].

İşlenmiş malzemenin bir bölümündeki Vickers mikro sertlik profilinin řu sırayla arttığı bulunmuştur: termo-mekanik olarak etkilenen bölge, karıştırılan bölge, ısıdan etkilenen bölge ve ana metal. Yazarlar, karıştırılan bölgenin yumuşmasının (ana metale kıyasla) sertleştirme fazı parçacıklarının parçalanması, ayrışması ve aşırı yaşlanmasından kaynaklandığını öne sürmüşlerdir [4, 14]. Termo-mekanik olarak etkilenen bölge ile ısıdan etkilenen bölge arasındaki geçişte minimum sertliğin meydana geldiği bulunmuştur [15]. Bu noktada, sıcaklık genellikle yüksek ve deformasyonun etkileri azalmıştır. Sonuç olarak, ısı malzemeyi büyük ölçüde yumuşatarak minimum sertliğe yol açmıştır. En düşük sertlik noktasının yüksek kalıntı gerilimi içerdıği ve çekme kırılması için bir bölge olduğu bulunmuştur [16-17].

De Caro, D. ve arkadaşları farklı hurda içeriğine sahip üretilen sac-alüminyum 6181 alaşımı analiz edilmiş ve birincil üretimden gelen bir 6181 alaşımı ile karşılaştırılmıştır. İkincil üretimlerden gelen alaşımların daha yüksek miktarda manganez, demir ve bakır içerdığini göstermiştir. Çekme özellikleri önemli ölçüde değişmediği, ancak muhtemelen artan Cu ve Mg içeriğiyle bağlantılı olarak mukavemette küçük bir artış gözlemlenmişlerdir. Bununla birlikte, süneklik önemli ölçüde değişmese de kırılma başlangıçlarında kapanımlar şeklinde kusurlar bulunabilirliği tespit etmişlerdir [18].

D.N. Wang'ombe ve arkadaşları; sürtünme karıştırma kaynağı sırasında ekstrüde geri dönüştürülmüş Al 6061 alaşımının dönme hızı ve ilerleme hızının mikro yapısı, çekme özellikleri ve Vickers

mikro sertliği üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili mevcut çalışmalar, esas olarak, alaşım içeriği geri dönüştürülmüş Al 6061'inkinden farklı olan birincil Al 6061'e odaklanmıştır. Alaşımın mikro yapısı, ana metal, ısıdan etkilenen bölge, termo-mekanik olarak etkilenen bölge ve karıştırma bölgesi olmak üzere dört bölgede idi. İşlenmemiş malzemenin ortalama tane boyutu 93 μm idi. Alaşımı 530 dev/dak ve 100 mm/dak'da birleştirildi, ana metalde, ısıdan etkilenen bölgede ve karıştırılan bölgede sırasıyla 93 μm , 183 μm ve 7 μm ortalama boyutta taneler ile sonuçlandı. Çekme hasarı, yüksek ısıya maruz kalan ısıdan etkilenen bölgede meydana geldi. Alaşım sertliği ısıdan etkilenen bölgede minimuma düştü, ardından termo-mekanik olarak etkilenen bölgede kısa bir artış oldu ve karıştırılan bölgede başka bir maksimuma ulaştı. İşlenmiş bölge sertliği takım hızıyla ters orantılı olduğu bilinmekteydi ve hızdaki artış, özellikleri bozan artan ısıyı artırdığı tespit edilmiştir [19].

Bu çalışmada, 2 mm kalınlığındaki %25 geri dönüştürülme oranına sahip AL6016 (AL6-HDI-TZ-U) alüminyum plakaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı birleştirme metoduyla omuz çapı 15 mm, 10 derece konik ve yüksekliği 2.9 mm uca sahip 2379 malzeme olarak seçilmiş ve yüzey sertliği 62-65 HRC'ye birleştirici takım ucu kullanılarak, 4 sn'ye kaynak bekleme süresin sabit tutularak 600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600 rpm olarak 6 farklı devirde kalıpcı freze tezgahında yapılan bindirme nokta birleştirilmelerindeki bağlantı bölgelerinin mekanik ve iç yapı özelliklerine etkileri amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Deneyleerde kullanılan malzemeler

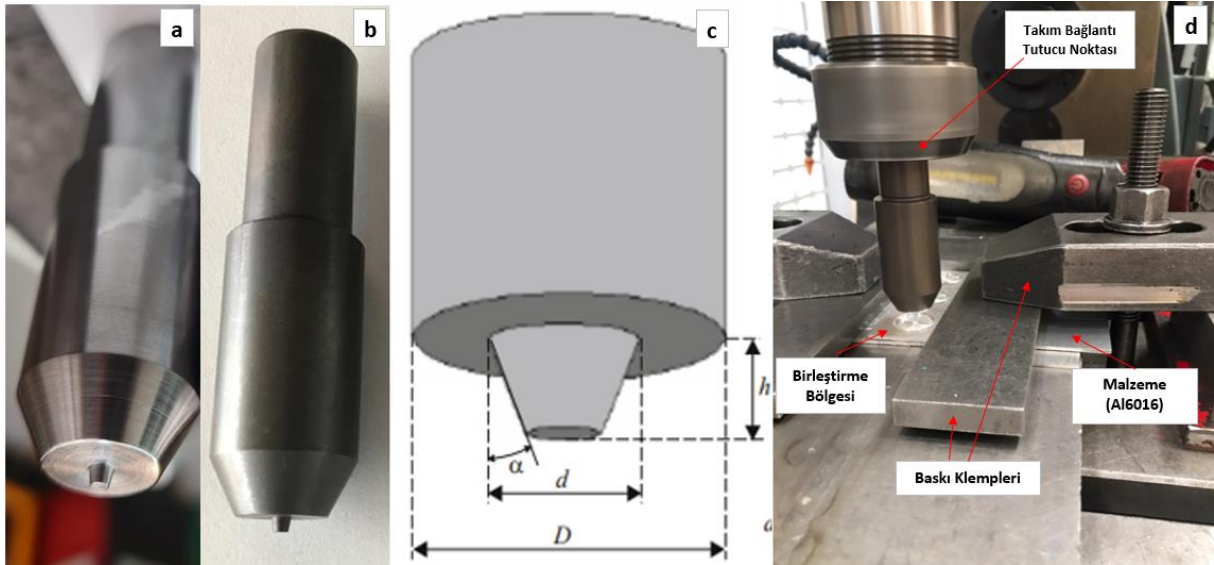
Birleştirmelerde test malzemesi ticari olarak kullanılan AL6016 alüminyum plakalardan seçilmiştir. Al 6016 (AL6-HDI-TZ-U) sac 2 mm kalınlığında 200 mm genişliğinde 600 mm uzunluğunda temin edilmiştir. Birleştirici takım ucu malzemesi olarak C2379 seçilmiştir ve yüzey sertliği ısı işlemi ile 62-65 HRC'ye çıkartılarak kullanılmıştır. Test numunelerin ve takım ucuna ait mekanik ve kimyasal değerler üretici firmanın kalite belgelerinden alınmıştır. Kimyasal bileşim oranları Tablo 1'de, mekanik özelliklerini ait bilgiler Tablo 2'de verilmiştir. Batıcı takım ucu geometrisi, tezgâh bağlantısı düzeneği Şekil 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Test numunesi ve takım ucu kimyasal bileşimi (%)

Tanım	Al	C	Si	Mn	Cr	Ti	Fe
AL6016	98	-	0.51	0.15	0.1	0.02	0.22
C2379	-	1.50	0.3	0.5	12	0.01	85

Tablo 2. Deneyleerinin ve takım ucu mekanik özellikleri

Tanım	(σ_{AK})	(σ_{max})	Uzama (%)	Sertlik (HV _{0,1})
AL6016	101 MPa	178 MPa	23	105
C2379	1150 MPa	1550 MPa	...	730

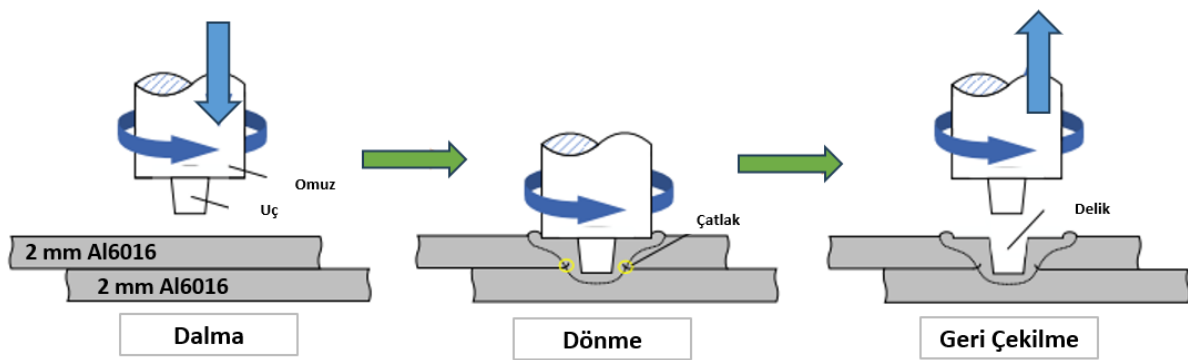


Şekil 1. SKNK takım ucu; a) Isıl işlem öncesi, b) Isıl işlem sonrası, c) Uç geometri ölçüleri, d) Freze bağlantısı

d: mm (batıcı uç çapı), h : mm (batıcı uç yüksekliği), a: derece (batıcı uç şekil açısı), D: mm (Batıcı ucun omuz çapı/sürtünen yüzey)

2.2. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı birleştirme yöntemi

SKNK süreci üç aşamaya ayrılır Şekil 2’de verildiği gibi, ilk aşamada, takım dönmeye ve plakalara doğru dalmaya başlar. İkinci aşamada, dönen alet en alt noktaya ulaşır ve bekleme süresini korur. Son aşamada, dönen takım geri çekilir ve ardından SKNK işlemi tamamlanır. SKK prosesinden farklı olarak, SKNK prosesindeki dönen takım eğim açısı veya enine hareket olmadığı bilinmektedir. Bu nedenle, SKNK prosesindeki sıcaklık dağılımı ve malzeme akış davranışı, SKK prosesindekilerden oldukça farklıdır ve ayrı olarak incelenmesi gerekir [20-21].



Şekil 2. SKNK birleştirme prensibi [21].

2.3. Uygulanan metod

Birleştirmeler, 2379 çeliği takım ucu ile %25 geri dönüştürülmüş 2 mm 6016 Al serisi saclarda bindirme pozisyonunda nokta sürtünme karıştırma yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Uygulamalar için freze tezgâhı sisteminde tam otomatik mod kullanılmıştır. Şekil 1(d)’de nokta birleştirme pozisyonuna uygun özel bir aparat yapılmış olup freze tezgahına bağlanmıştır. Farklı devir hızlarında (600, 1200,

1800, 2400, 3000, 3600 dev/dak) birleştirilmek üzere 2x200x600 mm alüminyum plakalar lazer kesim ile 2x100x30 mm ölçülerinde test numuneleri olacak şekilde hazırlanıp 30 mm'lik bir örtüşme ile bindirmeli bağlantı pozisyonunda uygulanmıştır. Dalma derinliği, dalma hızı ve eğim açısı punta kaynağı parametreleri sırasıyla 3 mm, 0.1 mm/s ve 0° 'de sabit tutulmuştur. Takım döndürülmesi ve aletin omzu malzemenin üst yüzeyine temas edene kadar 0,1 mm/s hızla iş parçasına yavaşça daldırılmıştır. Kullanılan alet, 15 mm omuz çapı, 3 mm pim çapı ve 2.9 mm pim uzunluğu boyutlarında çelikten (C2379) yapılmıştır. Takım, Şekil 1'de gösterildiği gibi düz bir omuza ve konik bir pime sahiptir. Takım geometrisi konik ve takım malzemesi 2379 olarak seçilmiştir [22-24].

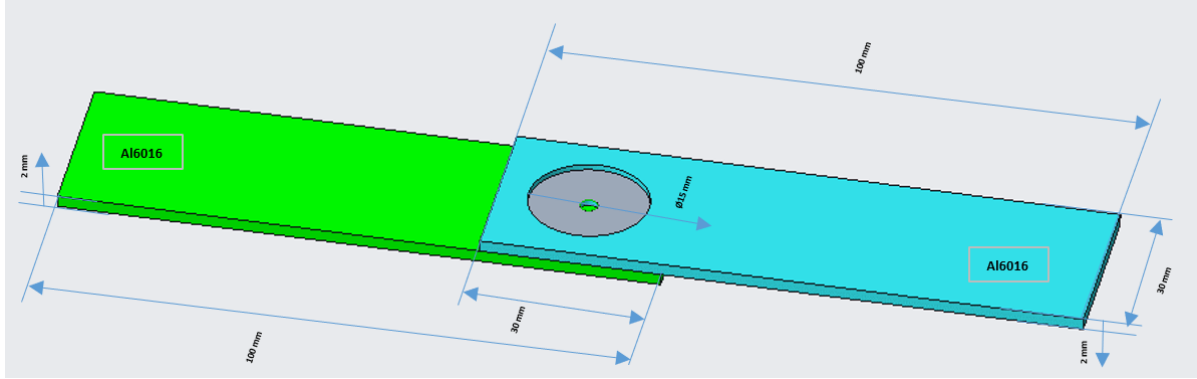
Birleştirme parametreleri olarak, takım devir hızı, batıcı ucun malzemesi, batıcı ucun geometrisi, batıcı uc çapı (d: mm), batıcı uc yüksekliği (h: mm), omuz çapı (D: mm), D/d, takım eğim açısı, kaynak süresi(sn) Tablo 3'te belirlenmiştir.

Tablo 3. *Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) parametreleri.*

Ana Metal	Kalınlık (mm)	Kaynak Süresi (sn)	Takım		Takım ucu Geometrisi	Takım Uc Çapı (d: mm)	Takım uç Yüksekliği (h: mm)	Takım		Takım D/d	Takım Açısı (°)	Birleştirme Pozisyonu
			Dönme Hızı (Rpm)	Takım Malzemesi				Omuz Çapı (D: mm)				
			600									
			1200									
AL 6016	2	4	1800	2379	Konik	3	2.9	15	5	90	Bindirme	
			2400									
			3000									
			3600									

Üretilen SKNK bağlantıları, makroyapı değerlendirmesi, mikroyapı incelemesi ve sertlik testi için kesitlere ayrılmıştır. Kesit numuneleri, 2400 kuma kadar SiC kağıtlarla zımparalanmıştır, daha sonra 0.04 µm'lik alümina ile parlatılmıştır. Parlatılmış numunelerin kimyasal aşındırılması için Keller ayracı (25 mL nitrik asit (HNO₃), 25 mL hidroklorik asit (HCl), 25 mL metanol (CH₃OH) ve bir damla hid-roflorik (HF) asit) kullanılmıştır. Birleştirme bölümleri aşındırmak için farklı konsantrasyonlarda birkaç Keller reaktifi kullanılmış olsa da AA6XXX Al-alaşım grubunun aşındırılmasının zorlukları nedeniyle, karıştırılmış bölgeyi (SZ) ve ana malzemeyi ayıran sınırların tanımlanması gerçekleştirilememiştir. Sertlik testi, punta kaynaklı bağlantıların enine kesitleri boyunca sertlik değerlerini elde etmek için yapılmıştır ve alt ve üst saclardan iki ayrı hat olarak sertlik değerleri tespit edilmiştir. Numunelerin mikro sertlik değerleri EN ISO 6507 standardına göre 100 gr yük altında piramit batıcı uca sahip cihaz olan Vickers yöntemiyle sıra sertlik değerleri alınmıştır. Her iki girinti arasındaki mesafe, kaynakların enine kesiti boyunca 1 mm olarak ayarlanmıştır. Çekme-kesme testi (yük taşıma kapasitesi), oda sıcaklığında ZwickRoell Z100 cihazında ISO 6892-1:2001 standardına göre yapılmıştır. SKNK bağlantıları, 0.1 mm/sn'lik sabit bir yükleme hızıyla test edilmiştir. Çekme kesme test numuneleri ASTM E

8M-04'e göre kesilmiş ve hazırlanmıştır. SKNK ile farklı takım dönme devri ile üretilen AL6016 eklemelinin çekme-kesme test numunesinin şematik çizimi Şekil 3'de gösterilmiştir. 2 mm kalınlığındaki 600, 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm'de üretilen SKNK'da çekme-kesme testinden sonra, kırık yüzeyler optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 3. SKNK çekme-kesme testi numune ölçüleri

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Isı girdileri ve Çekme deney sonuçları

SKNK sırasında üretilen ısı girdisi esas olarak takım omuz profiline, pim geometrisine, dönüş hızına, sürtünme katsayısına, aksenal aşağı doğru kuvvete ve bekleme süresine bağlı olduğu tespit edilmiştir [25-27]. SKNK sırasındaki termo-mekanik işlem, üretilen mekanik enerjiyi takım dönüşü yoluyla iş parçasındaki ısı girdisine dönüştürdüğü gözlemlenmiştir. SKNK prosesi (Q) için ısı girdisi Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanabilir [28-29].

$$Q = \frac{13}{12} \mu \frac{P}{K_A} \omega r t \quad (J)$$

(3.1)

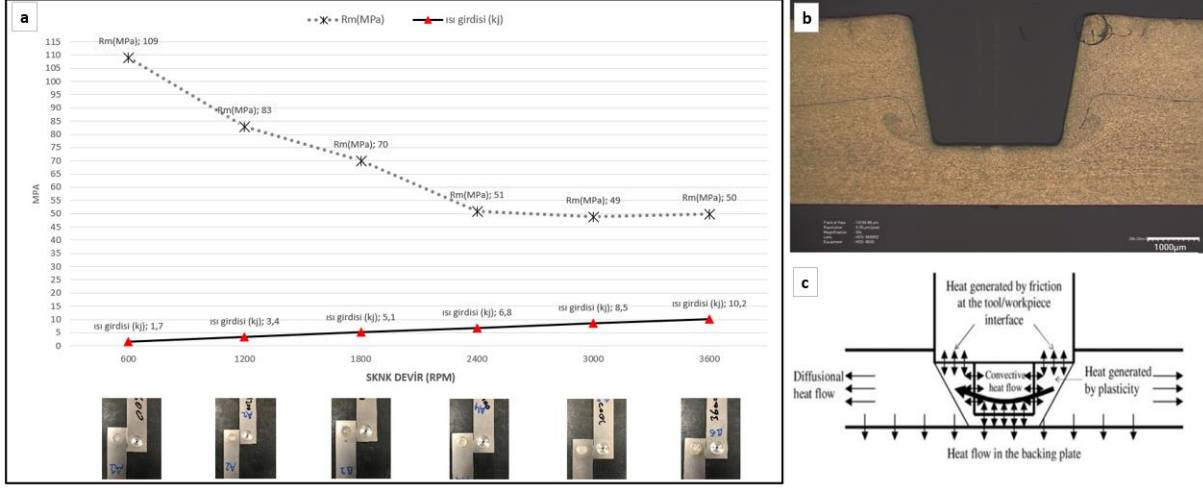
Burada P(N): aşağı doğru uygulanan kuvvet, K_A : omuz profilinin temas alanının takım kesit alanına oranı, ω (rad/s) $2\pi n$ 'ye eşittir n: kullanılan dönüş hızı, t (s): SKNK işlemi sırasında uygulanan bekleme süresi ve r (m): takım ucu yarıçapı. μ (takım ile alüminyum alaşımı arasındaki sürtünme katsayısı): 0.4'e eşittir [28].

$$K_A = \frac{\text{shoulder radius}^2 - \text{pin radius}^2}{\text{shoulder radius}^2} \cdot 0.9375 \quad (3.2)$$

Denklem (3.1) ve (3.2)'den, Al6016'nın farklı spot bindirme bağlantılarını üretmek için ısı girdisi, Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanabilir [28].

$$Q = 1.1859 \times 10^{(-3)} \times P \times n \times t, \quad (3.3)$$

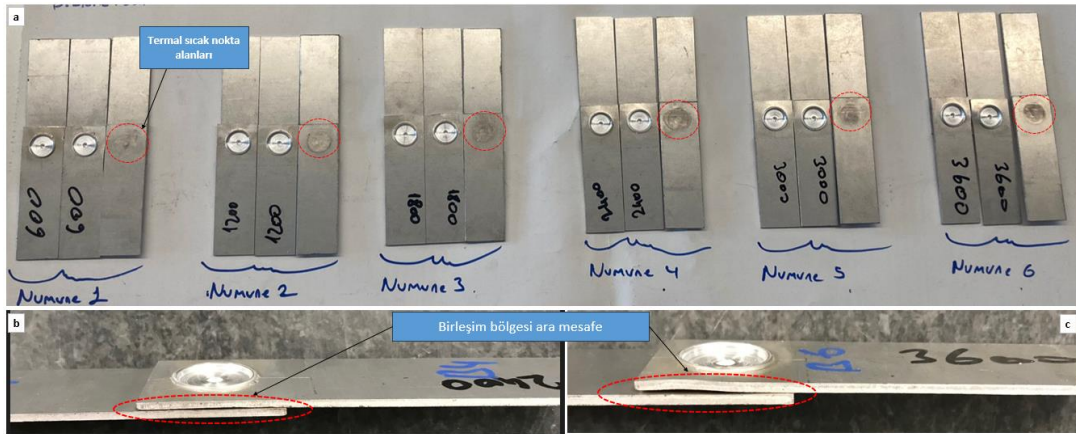
Şekil 4'te SKNK sırasında 600 ila 3600 rpm arasında uygulanan farklı dönme hızlarında üretilen ısı girdileri ve maksimum çekme-kesme kuvvetleri göstermektedir.



Şekil 4. SKNK a) ısı girdileri ve çekme mukavemet değerleri, b) ısı üretimi/transfer noktası ve c) ısı üretimi/transfer şeması

SKNK'nın çekme kesme performansının kaynak işlemi parametrelerinden önemli ölçüde etkilendiği bildirilmiştir [29-31]. 600, 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm dönüş hızlarında üretilen SKNK bindirmeli bağlantıların maksimum çekme kesme yükü Şekil 4'te gösterilmektedir. Burada, 4 sn bekleme süresinde 600 rpm dönüş hızının SKNK koşulunun, diğer punta kaynaklı bağlantıların yük taşıma kapasitesine kıyasla en yüksek çekme kesme yükünü (R_m :109 MPa) gösterdiği tespit edilmiştir. Çekme kesme testindeki taşıma kapasitesindeki bu artış, daha büyük bir tam bağlı kesit boyutuna bağlanabilir. Ek olarak, SZ'deki sertlik, diğer SKNK bağlantılarının 600 devirde ölçülen sertlikten daha fazla olduğu görülmüştür. Buna karşılık, Şekil 4(a)'da 600, 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm'de üretilen kaynaklı bindirme levhaları, çekme-kesme testi sırasında tamamen ayrıldığı görülmüştür. 2400, 3000 ve 3600 rpm gibi daha yüksek dönüş hızlarında birleştirilen punta kaynaklarının çekme kesme yüklerinin taşıma kapasitesi, maksimum çekme kesme yükünde bir azalma olduğunu göstermektedir. Çekme kesmesindeki bu düşüş, muhtemelen artan ısı girdisi ve omzun altındaki üst tabakanın daha düşük kalınlığı ile SZ'deki artan termal yumuşamadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Xie ve ark. [32] ve Ohashi ve ark. [33], SKNK bindirme eklemlerinin mekanik özelliklerinin esas olarak hem omzun altındaki üst tabaka hem de bağlı alan tarafından yönetildiği sonucuna varmıştır. Çökelti kabalaşması nedeniyle tane sınırları etrafındaki çökeltisiz bölgelerin SZ'nin mukavemetini azaltmış olabileceği de belirtilmiştir.

Takım dönüş hızıyla bindirme-kesme ayırma yükündeki değişim yalnızca sürtünme ısıyla değil, aynı zamanda bağlanmış bölgenin boyutunu ve kancalama özelliklerini de etkileyen malzeme akışıyla da ilgili olduğu bildirilmiştir.

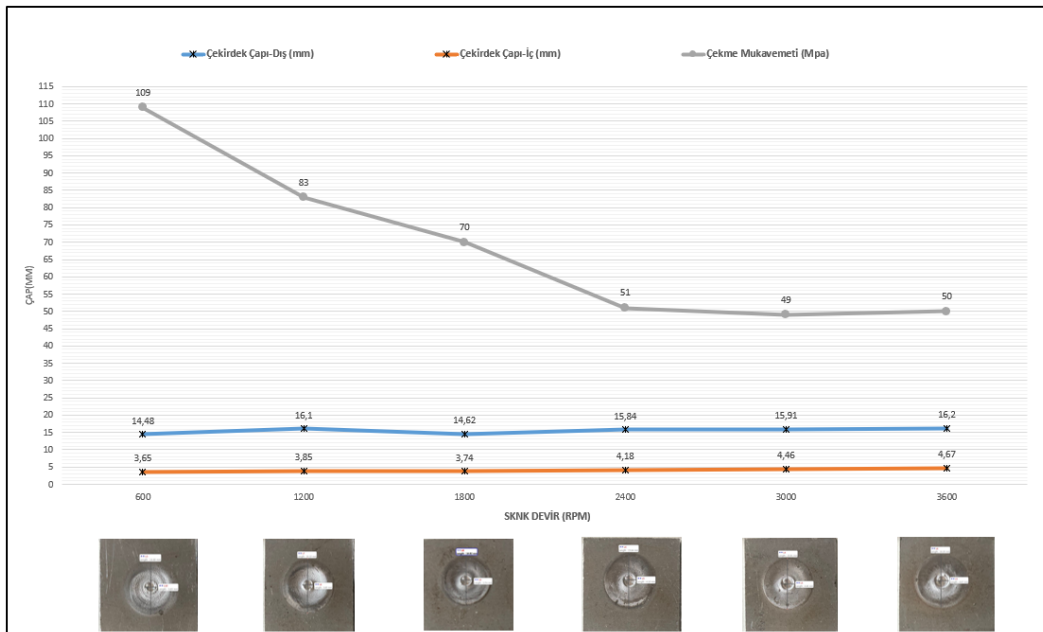


Şekil 5. SKNK a) termal sıcak nokta alanları, b-c) 2400 ve 3000 rpm birleştirmelerdeki örtüşen yüzey alanları

SKNK bağlantılarının alttan görünümü, termal sıcak nokta alanlarını (sürtünme karıştırma işleminden etkilenen alanlar) göstermektedir. Bu termal sıcak nokta alanları, Şekil 5(a)'da görülebileceği gibi, nokta bekleme süresi boyunca üretilen ısı girdisinin artması sonucu dönme hızının artmasıyla oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 5(b, c) ısı girdisi arttığında birleşim bölgesi ara mesafesinde deformasyonların olduğu gözlemlenmiştir. Buda birleşimin tutunma temas yüzeyini azalttığını ve kopma mukavemet değerinin düşük olmasını desteklemektedir.

3.1.1. Çekirdek çap oluşumları

Şekil 6, SKNK sırasında 600 ila 3600 rpm arasında uygulanan farklı dönme hızlarında üretilen çekirdek çapları ve maksimum çekme-kesme mukavemetleri göstermektedir. Isı girdisinin artışı çekirdek çaplarının büyümesine neden olmuştur ve çekme mukavemetlerini düşürdüğü tespit edilmiştir. 600 rpm birleştirmede en düşük çekirdek iç çapı 3.05 mm iken en yüksek çekme mukavemeti yine 600 rpm'de 109 MPa olarak tespit edilmiştir.

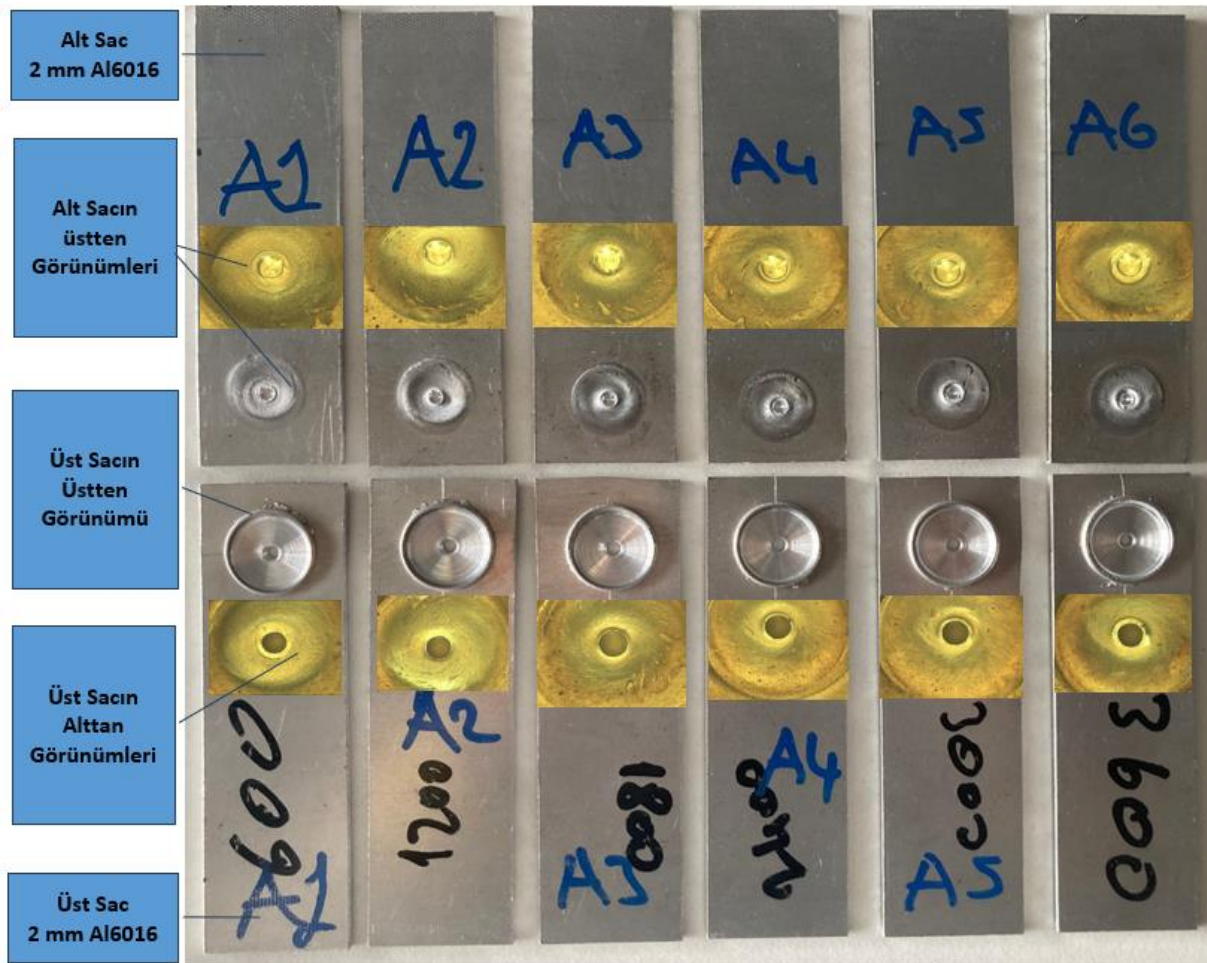


Şekil 6. SKNK İç ve dış çekirdek çapları ve çekme-kesme mukavemetleri

3.1.2. SKNK Birleşim ve Kırılma Yüzeylerinin Görünümü

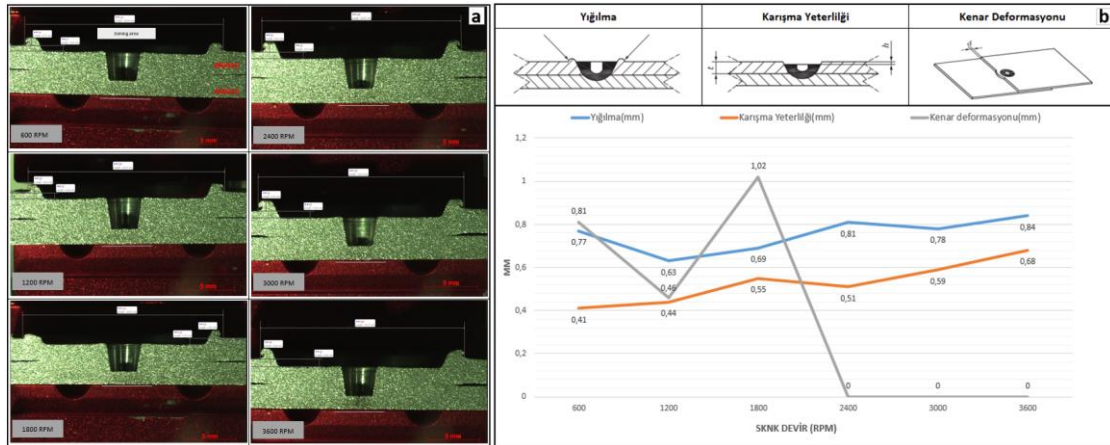
600 ila 3600 rpm arasında uygulanan farklı dönme hızlarında üretilen ve 4 sn bekleme süresinde işlenen SKNK bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeyi görünümünün fotoğrafları Şekil 7’de verilmiştir.

İki kırılma modunun (sünek ve kırılğan) tespit edildiği, alt sacın üst bölgesinde farklı çukur boyutları ve üst sacın alt kısmında sığ uzun çukurlar açısından alüminyum matrisin gösterdiği sünek kırılmanın görüldüğü, gevrek kırılma ise Mg_2Si ve $(Fe, Mn)_3SiAl_{12}$ çökeltilerinin varlığı bilinerek, çökeltilerin çekilmesinden kaynaklanan mikro boşluklar, iki tabakanın kırılma yüzeyinde de tespit edilmiştir.



Şekil 7. SKNK bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeyi görüntüleri

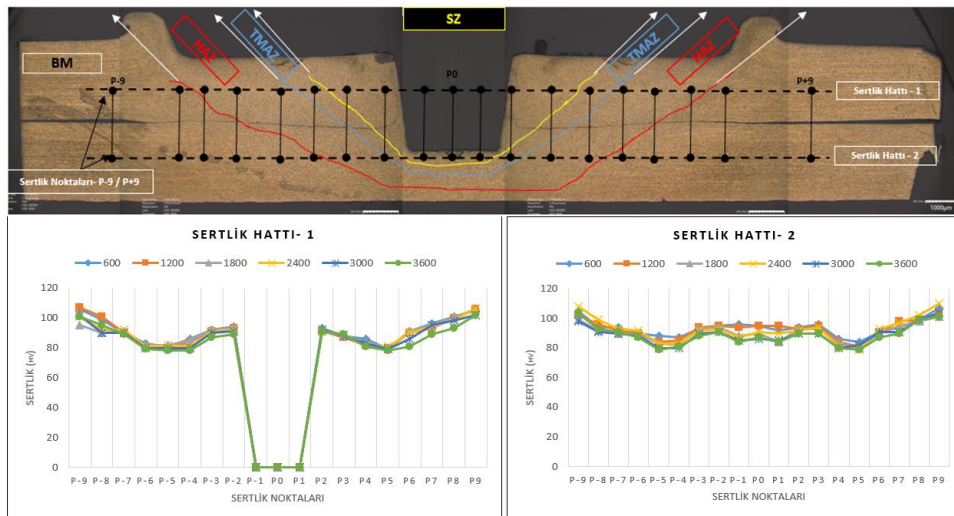
Görsel bir inceleme sonucunda, uygulanan farklı takım devir hızları ve diğer parametre değerleri AL6016 levhalar arasında SKNK bağlantılar üretmek için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8’de punta kaynaklı bağlantıların kesit görünümü için, uygulanan farklı parametrelerde omuz çıkıntısına bağlı dairesel girintilerin gözlemlendiği ve omuz çıkıntısının yanlarına parlayan ekstrüde malzemenin hemen hemen benzer olduğu gözlemlenmiştir. Karışma yeterliliğine bakıldığında üst plakada ısı arttıkça incelmelerin de arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 8. SKNK a) bağlantı bölgeleri, b) bağlantı bölgesi ölçüsel değişkenler

3.2. Sertlik test sonuçları

Birleştirilecek ana malzemenin durumu, SKNK'dan sonraki sertlik davranışını etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada, kaynak bölgesinin enine kesiti boyunca sertlik çizgisi üzerinden belirlenen noktalardan iki hat olarak izlenmiştir. Al6016 ana metaller, 2 mm sac kalınlığı için 107 ± 2 HV_{0,1} ortalama sertlik değerini göstermiştir. SKNK işlemleri sırasında üretilen sürtünme ısısının neden olduğu Al6016 ana metalin tavlanması nedeniyle SKNK bağlantılarının kaynak bölgesinin sertliği uygulanan tüm dönüş hızlarında önemli ölçüde azaldığı Şekil 8'de görülmektedir. Kaynak bölgesi arasındaki her bir punta kaynaklı bağlantı için, tane yapısı ve aşırı yaşlanma etkileri nedeniyle HAZ'da minimum sertlik değerleri gözlenmiştir. Buna karşılık, Ahmed ve ark. SZ'de daha yüksek sertlik, esas olarak dinamik yeniden kristalleştirilmiş ince taneli yapı ve soğutma çevrimi üzerinde gerçekleşebilecek yeniden çökteltme işlemi nedeniyle oluştuğunu bildirmiştir [24]. TMAZ'ın sertliği SZ'den daha düşük değerler ve HAZ'dan daha yüksek sertlik değerleri göstermektedir. TMAZ sertliğinin HAZ üzerindeki artışı, SKNK işlemi sırasında plastik deformasyon tarafından oluşan yüksek ısı yoğunluğuna bağlanabilir. En yüksek sertlik değerleri, 600 rpm'de kaynaklanmış punta bağlantısının BM, SZ, TMAZ ve HAZ için sırasıyla 108 ± 2 , 101 ± 3 , 95 ± 3 ve 87 ± 5 HV_{0,1} olarak Şekil 9'da gösterilmiştir.

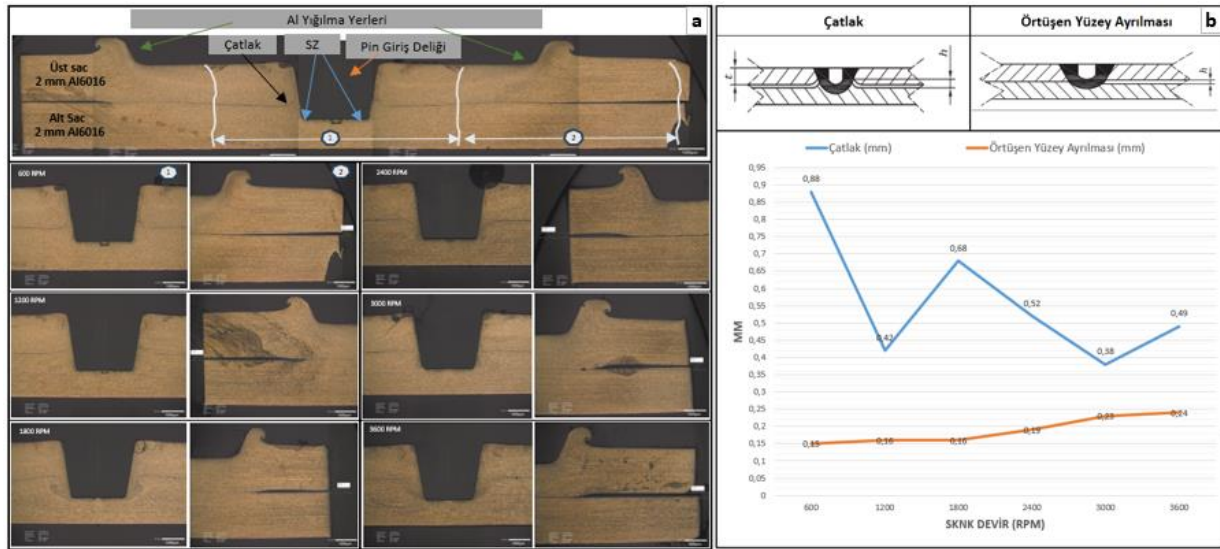


Şekil 9. SKNK birleştirme bölgesi sertlik değerleri

3.3. Makro yapıların incelenmesi

Şekil 9, SKNK AL6016 bağlantılarının enine kesit makrograflarını göstermektedir. Üst üste binen levhalar arasındaki arayüzün, takım piminin dönmesi ile oluşan plastik deformasyon ve malzeme akışı nedeniyle kaynaklandığı gözlemlenebilir. Daha önce yapılan çalışmalarda, punta kaynak bölgesinde üç farklı bölgenin kurulduğu bildirilmiştir. Bu bölgeler, dönen takım omzunun altındaki akış geçiş bölgesi, takım piminin etrafındaki SZ ve pimin altındaki burulma bölgesidir. Aslında, SKNK'nın bağlantı verimliliği, kaynak malzemesi, makine parametreleri (dönme hızı, bekleme süresi ve aşağı doğru kuvvet) takım malzemesi ve tasarımı dahil üzere çeşitli parametreler tarafından kontrol edildiği bilinmektedir [1,25,27].

SKNK birleştirmesi tamamlandığında takım çekildikten sonra nokta kaynaklı eklem merkezinde bir "anahtar deliği" oluşturduğu tespit edilmiştir. Anahtar deliğinin her iki tarafında iki simetrik kaynak bölgesi görülmüştür. Bir SKNK birleştirmesi, anahtar deliğinin çevresinden taban malzemesine doğru sırayla dört farklı mikro yapısal bölgeyi oluşturmuştur: sırasıyla dinamik olarak yeniden kristalleşmiş karıştırma bölgesi (SZ), termo-mekanik olarak etkilenen bölge (TMAZ), ısıdan etkilenen bölge (HAZ) ve taban metali (BM) Şekil 10'da gösterilmiştir. Aydın ve ark. BM mikro yapısı, haddeleme yönünün bir sonucu olarak iri ve uzun tanelerle karakterize edildiğini ve ince Mg_2Si ve iri $(Fe, Mn)_3SiAl_{12}$, $\alpha-Al$ matrisinde gözlenen birincil parçacıklar olduğunu bildirmişlerdi. Isıl çevrime tabi tutulmuş ancak deforme olmamış HAZ mikro yapısı, BM'ye göre nispeten daha iri taneli olduğunu tespit etmiştir.



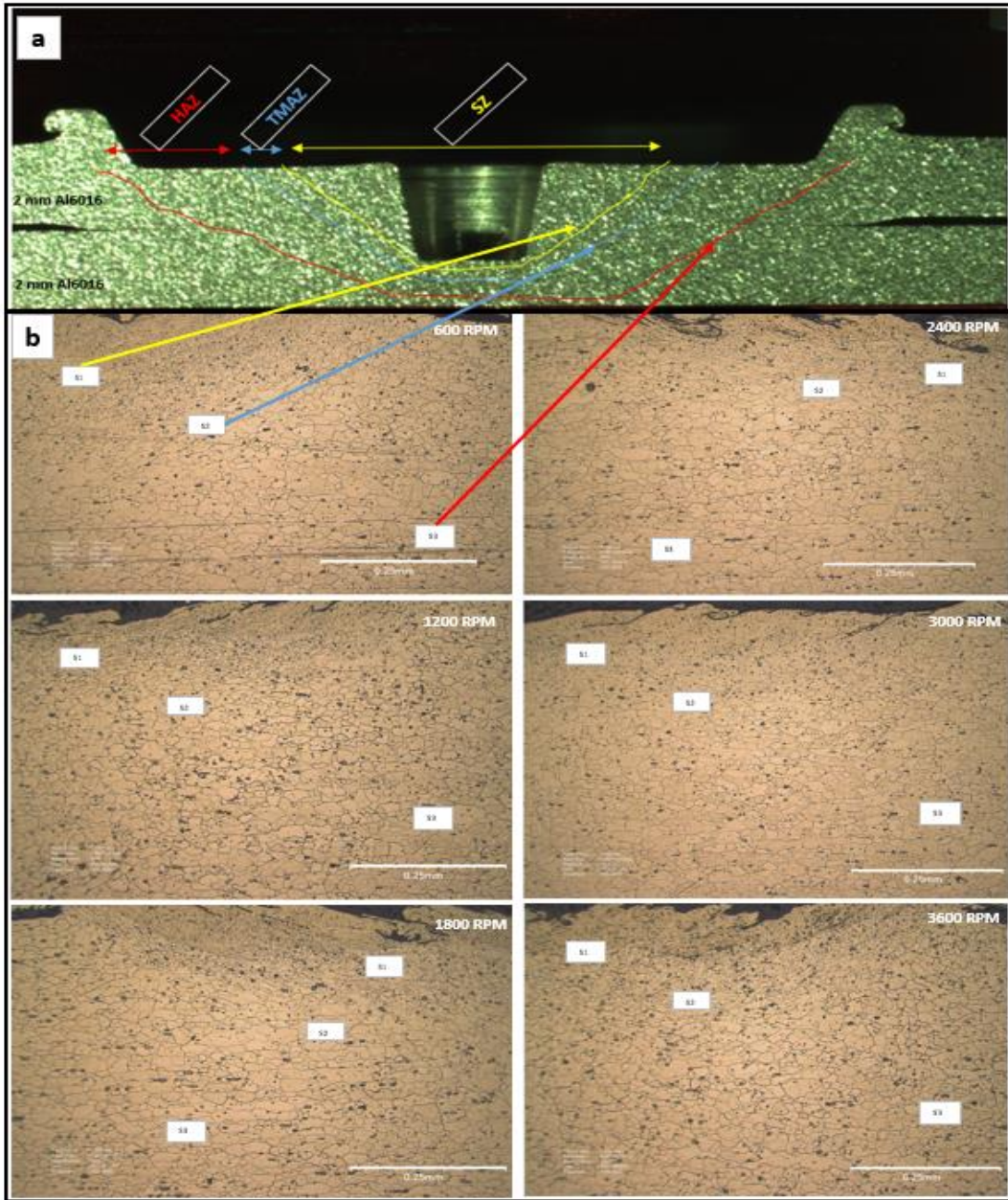
Şekil 10. SKNK a) kesit alanları, b) birleştirme iç bölge ölçüsel değişkenlikler

Yükleme koşullarında, mikro çatlaklar kancanın ucundaki kısmen bağlı bölgede başladığı ve nokta bağlantı arayüzünde yatay yönde yayıldığı aynı zamanda SZ'yi keserek arızaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Alt tabakalardaki iki eklem kırılma yüzeyi, ana metallere kıyasla çok küçük derin çukurlar açısından tipik olarak sünek özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Alt ve üst tabakanın arasındaki boşluk ısı girdisinin artmasıyla arttığı görülmüştür. En fazla açıklık 3600 rpm deki birleştirmelerde 0.24 mm olurken en düşük ara mesafe 600 rpm deki birleşmede 0.15 mm olarak görülmüştür.

600 ve 1200 rpm hızlarında çatlak yönü üst saca doğru ilerlerken diğer hızlarda alt saca doğru ilerlediği tespit edilmiştir. En uzun çatlak 600 rpm hızda, en kısa çatlak 3600 rpm hızda olduğu görülmüştür.

3.4. Mikro yapıların incelenmesi

Şekil 11(a), çeşitli parametrelerde SKNK işlemi ile elde edilen farklı bölgeleri açıklığa kavuşturmak için optik bir mikroskop kullanılarak incelenen konumları (S1-S3) göstermek için SKNK bağlantılarının enine kesiti için temsili bir çizim örneğidir. Şekil 11(b)'deki S1, S2, S3'teki optik mikrograflar, SKNK'dan sonra 600, 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm'lik farklı dönüş hızları kullanılarak 4 sn'lik sabit bir bekleme süresinde verilen çeşitli SKNK bölgelerini (SZ, TMAZ ve HAZ) göstermektedir.



Şekil 11. a) Enine kesit görseli, b) SKNK bölgesinin mikroyapı incelemesi için seçilen noktaların (S1-S3) konumları

Ana metal ve S.Z bölgelerinin mikroyapı analizi, tane morfolojileri ve boyutlarında belirgin değişiklikleri Şekil 11'de doğrulamaktadır. AL6016 ana metal levhalarının uzatılmış taneleri, uygulanan tüm parametrelerde dar bir aralık dağılımında eşit tanelere evrilmektedir. Tanelerin morfolojisindeki ve boyutundaki bu değişiklik, SZ yoluyla dinamik yeniden kristalleşme ile açıklanabilir [15,26,27,33]. Yaşanan yüksek sıcaklık ve bu yüksek sıcaklıktaki gerinim miktarı, dinamik yeniden kristalleşmenin gerçekleşmesine izin verdiği bulunmuştur. Alüminyumun SKNK'nın, dinamik yeniden kristalleşme yoluyla yeni ince tane yapısının oluşumuna neden olan yüksek bir sıcaklık ve yüksek gerinim oranı ile sonuçlandığı bildirilmiştir [30,33]. Alüminyumun SKNK sırasında, yukarıda belirtildiği gibi, sıcaklık deneyimi 210 ila 420 °C arasında değişir ve bu, yaşanan yüksek gerinim hızında dinamik yeniden kristalleşmeye izin verecek kadar yüksek olduğu tespit edilmiştir. Böylece, 2 mm AL6016 BM'nin tane boyutu, sırasıyla 600, 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm'de punta kaynaklı bağlantıların karıştırma bölgeleri için tane boyutunda küçülme olduğu görülmüştür. Şekil 11, Isı girdisindeki artışa bağlı olarak dönüş hızı 600'den 3600'e çıkarılarak SZ'nin ortalama tane boyutu arttırılmıştır. BM'lerdeki $(Fe, Mn)_3SiAl_{12}$ 'nin iri parçacıkları, SZ'deki karıştırma etkisi nedeniyle küçük parçacıklara ayrılmış ve alüminyum matris içinde yeniden dağıtılmıştır, oysa ince çökelti (Mg₂Si) SZ'de kabadır, bu da kaynağın termal döngüsü sırasında çözünme ve yeniden büyümeye, ardından hava soğutmasına açıklanabilir [27,34]. Ayrıca, Şekil 11(S2)'de TMAZ tanecikleri takım malzemesinin karıştırma hareketi sırasında malzeme akışı ile birlikte gözle görülür şekilde döndürülür ve deforme olduğu görülmüştür. Şekil 11(S3)'de HAZ'daki tane boyutu, plastik deformasyondan değil, sürtünme ısı oluşumundan etkilendiği tespit edilmiştir. Böylece, BM tane boyutuna kıyasla HAZ'da bir tane büyümesi gözleneceği düşünülmektedir. SKNK işlemi sırasında HAZ ve TMAZ'daki termal maruziyet, çökeltilerin kabalaşmasına neden olduğu ile açıklanabilir. Son olarak, farklı punta kaynak bölgelerinin (SZ, TMAZ, HAZ) tane boyutunun, diğer proses parametreleri sabit tutulduğunda dönüş hızı ile doğrudan ilişkili olduğu sonucuna varılabilir. Şekil 11'de verildiği gibi, tüm birleştirmelerin birleşim bölgelerinde SZ en ince tane yapısına HAZ en kalın tane yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Çalışmada, 2 mm'lik farklı AL6016 kalınlıktaki levhalar, 4 sn sabit bekleme süresinde ve 600, 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm'lik farklı dönüş hızlarında sürtünme karıştırma puntası kaynaklı hale getirildi. Punta kaynaklı bağlantılar, makro, mikroyapı, sertlik ve çekme kesme testi ve kırılma yüzeyi açısından karakterize edildi. Elde edilen sonuçlara dayanarak, aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir;

4 sn'lik sabit bekleme süresi ve 600, 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm'lik farklı dönüş hızlarında uygulanan SKNK parametreleri, konfigürasyonunda AL6016 malzemesinin birleştirmeleri başarılı olduğu görülmüştür.

600 rpm dönüş hızının SKNK koşulunun, diğer punta kaynaklı bağlantıların yük taşıma kapasitesine kıyasla en yüksek çekme kesme yükünü (Rm:109 MPa) gösterdiği tespit edildi. Ayrıca 600 rpm birleştirmede en düşük çekirdek iç çapı 3.05 mm görülmüştür. Burada ısı artışı birleştirmenin mekanik özelliklerini azalttığını göstermektedir.

En yüksek sertlik değerleri, 600 rpm'de kaynaklanmış punta bağlantısının BM, SZ, TMAZ ve HAZ için sırasıyla 108 ± 2 , 101 ± 3 , 95 ± 3 ve 87 ± 5 HV_{0.1} olarak tespit edilmiştir. Ayrıca tüm birleş-

tirmelerde HAZ en düşük sertlik olan bölge olduğu görülmüştür. Isı artışının birleşim bölgesindeki sertliği olumsuz etkilediği görülmüştür.

600 ve 1200 rpm'lik en düşük dönüş hızında işlenen punta kaynaklı bağlantılarında gevrek, diğer hızlarda sünek kırılma modu görülmüştür.

Alt ve üst plakaların arasındaki boşluk ısı girdisinin artmasıyla arttığı görülmüştür. En fazla açıklık 3600 rpm deki birleştirmelerde 0.24 mm olurken en düşük ara mesafe 600 rpm deki birleşimde 0.15 mm olarak ölçülmüştür.

600, 1200, 1800, 2400, 3000 ve 3600 rpm'de punta kaynaklı bağlantıların SZ bölgesinde en ince tane yapısı, HAZ bölgesinde en kalın tane yapısı olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Desteklerinden dolayı Ak-Pres Otomotiv A.Ş. 'ye teşekkürler.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

Referanslar

- [1] Gronostajski, J., Marciniak, H., & Matuszak, A. (2000). New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling. *Journal of materials processing technology*, 106(1-3), 34-39.
- [2] Ceschini, L. O. R. E. L. L. A., Boromei, I. U. R. I., Minak, G. I. A. N. G. I. A. C. O. M. O., Morri, A. L. E. S. S. A. N. D. R. O., & Tarterini, F. A. B. R. I. Z. I. O. (2007). Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.% Al₂O₃p composite. *Composites science and technology*, 67(3-4), 605-615.
- [3] Charit, I., & Mishra, R. S. (2005). Low temperature superplasticity in a friction-stir-processed ultrafine grained Al-Zn-Mg-Sc alloy. *Acta Materialia*, 53(15), 4211-4223.
- [4] Commin, L., Dumont, M., Masse, J. E., & Barrallier, L. (2009). Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters. *Acta materialia*, 57(2), 326-334.
- [5] Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & design*, 29(2), 362-373.
- [6] El-Rayes, M. M., & El-Danaf, E. A. (2012). The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(5), 1157-1168.
- [7] Li, Y., Murr, L. E., & McClure, J. C. (1999). Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum. *Materials Science and Engineering: A*, 271(1-2), 213-223.
- [8] Liu, G., Murr, L. E., Niou, C. S., McClure, J. C., & Vega, F. R. (1997). Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum. *Scripta materialia*, 37(3), 355-361.
- [9] Chai, F., Zhang, D. T., & Li, Y. Y. (2014). Effect of rotation speeds on microstructures and tensile properties of submerged friction stir processed AZ31 magnesium alloy. *Materials Research Innovations*, 18(sup4), S4-152.

- [10] Kulekci, M. K., Esme, U., & Buldum, B. (2016). Critical analysis of friction stir-based manufacturing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1687-1712.
- [11] Kwon, Y. J., Saito, N., & Shigematsu, I. (2002). Friction stir process as a new manufacturing technique of ultrafine grained aluminum alloy. *Journal of materials science letters*, 21(19), 1473-1476.
- [12] Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M., & Withers, P. J. (2003). Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. *Acta materialia*, 51(16), 4791-4801.
- [13] Rhodes, C. G., Mahoney, M. W., Bingel, W. H., & Calabrese, M. (2003). Fine-grain evolution in friction-stir processed 7050 aluminum. *Scripta materialia*, 48(10), 1451-1455.
- [14] Santella, M. L., Engstrom, T., Storjohann, D., & Pan, T. (2005). Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloy A356. *SAE transactions*, 599-603.
- [15] Sen, U., & Sharma, K. (2016). Friction stir processing of aluminum alloys: A literature survey. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET)*, 2(2).
- [16] Su, J. Q., Nelson, T. W., Mishra, R., & Mahoney, M. J. A. M. (2003). Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium. *Acta materialia*, 51(3), 713-729.
- [17] Thomas, W. M., & Nicholas, E. D. (1997). Friction stir welding for the transportation industries. *Materials & design*, 18(4-6), 269-273.
- [18] De Caro, D., Tedesco, M. M., Pujante, J., Bongiovanni, A., Sbrega, G., Baricco, M., & Rizzi, P. (2023). Effect of Recycling on the Mechanical Properties of 6000 Series Aluminum-Alloy Sheet. *Materials*, 16(20), 6778.
- [19] Wang'ombe, D. N., Mose, B. R., Maranga, S. M., & Mbuya, T. O. (2021). Effects of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of extruded secondary aluminum 6061 alloy. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 52(3), 270-278.
- [20] Mubiayi, M. P., & Akinlabi, E. T. (2016). Evolving properties of friction stir spot welds between AA1060 and commercially pure copper C11000. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1852-1862.
- [21] Garg, A., & Bhattacharya, A. (2017). Strength and failure analysis of similar and dissimilar friction stir spot welds: Influence of different tools and pin geometries. *Materials & Design*, 127, 272-286.
- [22] Tunçel, O., Tutar, M., & Bayram, A. (2020). Effect of tool pin profile on the hook geometry and mechanical properties of a friction stir spot welded AA6082-T6 aluminum alloy. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 45(2), 233-248.
- [23] Shen, Z., Ding, Y., & Gerlich, A. P. (2020). Advances in friction stir spot welding. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(6), 457-534.
- [24] Ahmed, M. M. Z., Wynne, B. P., Rainforth, W. M., Addison, A., Martin, J. P., & Threadgill, P. L. (2019). Effect of tool geometry and heat input on the hardness, grain structure, and crystallographic texture of thick-section friction stir-welded aluminium. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50, 271-284.
- [25] Ahmed, M. M., Ataya, S., El-Sayed Seleman, M. M., Mahdy, A. M., Alsaleh, N. A., & Ahmed, E. (2020). Heat input and mechanical properties investigation of friction stir welded aa5083/aa5754 and aa5083/aa7020. *Metals*, 11(1), 68.
- [26] Atak, A., Sik, A., & Ozdemir, V. (2018). Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding and numerical solution with the finite element method. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), 257275.

- [27] Wiedenhof, A. G., Amorim, H. J. D., Rosendo, T. D. S., Tier, M. A. D., & Reguly, A. (2018). Effect of heat input on the mechanical behaviour of Al-Cu FSW lap joints. *Materials Research*, 21(4),.
- [28] Ahmed, M. M., IA Habba, M., Jouini, N., Alzahrani, B., Seleman, M. M. E. S., & El-Nikhaily, A. (2021). Bobbin tool friction stir welding of aluminum using different tool pin geometries: Mathematical models for the heat generation. *Metals*, 11(3), 438.
- [29] Ataya, S., Ahmed, M. M., El-Sayed Seleman, M. M., Hajlaoui, K., Latief, F. H., Soliman, A. M., ... & Habba, M. I. (2022). Effective range of FSSW parameters for high load-carrying capacity of dissimilar steel A283M-C/brass CuZn40 joints. *Materials*, 15(4), 1394.
- [30] Aydin, H., Tuncel, O., Umur, Y. E. L. İ. Z., Tutar, M. Ü. M. İ. N., & Bayram, A. (2017). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy AA6082-T6 friction stir spot welds.
- [31] Abdul-Maksoud, M., Ahmed, M. Z., Seleman, M. M. E. S., & Ammer, A. M. (2022). Effect of dwelling time and plunge depth on the joint properties of the dissimilar friction stir spot welded aluminum and steel. *Journal of Engineering Research*, 10(2B), 264-279.
- [32] Xie, G. M., Cui, H. B., Luo, Z. A., Yu, W., Ma, J., & Wang, G. D. (2016). Effect of rotation rate on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded DP780 steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 32(4), 326-332.
- [33] Ohashi, R., Fujimoto, M., Mironov, S., Sato, Y. S., & Kokawa, H. (2009). Effect of contamination on microstructure in friction stir spot welded DP590 steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(3), 221-227.
- [34] Zhu, R., Gong, W. B., & Cui, H. (2020). Temperature evolution, microstructure, and properties of friction stir welded ultra-thick 6082 aluminum alloy joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 331-343.