

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of the Effects of Cryogenic Process on Friction Stir Welding

Onur Özbek^a

Submitted: 16.09.2022 Revised: 11.10.2022 Accepted: 04.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705035

ABSTRACT

Keywords: Friction stir welding, Cryogenic treatment, Microhardness, Microstructure, Surface topography

^aDuzce University,
Gumusova Vocational School,
Department of Machine and Metal
Technologies 81850- Duzce, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8372-3487
email: onurozbek@duzce.edu.tr

7xxx series aluminum alloys, which have high mechanical properties after the elements in their content and applied aging, have low specific gravity and high specific strength. In addition, they have excellent corrosion resistance with applied heat treatments. For these reasons, they are frequently preferred in the automotive, aviation and space industries where energy consumption is very important. However, since these alloys with low melting points are very difficult to weld, friction stir welding offers an important alternative. However, the mechanical properties of the welded points also decrease slightly in friction stir welding compared to other methods. In order to solve the problem, in this study, the parts joined by friction stir welding were cryogenically treated at -180°C deep and shallow at -80°C . Cryogenic treatment performed after friction stir welding caused significant changes in the hardness and microstructure of the weld zone. The increase in hardness observed in the junction areas of the parts, especially after deep cryogenic processing, is very important.

Kriyojenik İşlemin Sürtünme Karıştırma Kaynağı Üzerine Etkilerinin Araştırılması

ÖZ

İçeriğindeki elementler ve uygulanan yaşlandırmalar sonrası yüksek mekanik özelliklere sahip 7xxx serisi alüminyum alaşımları, düşük özgül ağırlığa ve yüksek özgül mukavemete sahiptirler. Ayrıca uygulanan ısı işlemleri ile mükemmel korozyon dirençlerine sahiptirler. Bu sebeplerden ötürü enerji sarfiyatının çok önemli olduğu otomotiv, havacılık ve uzay sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedirler. Ancak erime noktası düşük olan bu alaşımların kaynaklanması oldukça güç olduğundan sürtünme karıştırma kaynağı önemli bir alternatif sunmaktadır. Fakat kaynaklanan noktalardaki mekanik özellikler sürtünme karıştırma kaynağında da diğer yöntemlere kıyasla az da olsa düşmektedir. Sorunun çözümü için bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalara -180°C 'de derin ve -80°C 'de sığ kriyojenik işlem uygulanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası gerçekleştirilen kriyojenik işlem kaynak bölgesi sertliği ve mikroyapısında önemli değişikliklere neden olmuştur. Özellikle derin kriyojenik işlem sonrası parçaların birleşme bölgelerinde gözlemlenen sertlik artışı oldukça önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, Kriyojenik işlem, Mikro sertlik, Mikroyapı, Yüzey topografyası

1. Giriş (Introduction)

7xxx serisi alüminyum alaşımları oldukça düşük yoğunluğa sahip olmalarına rağmen yüksek mukavemet gösterebilirler. Böylece otomotiv, uzay ve havacılık sanayisinde ürünün toplam ağırlığının düşürülmesi ile hem menzili arttırıp hem de tasarrufa önemli bir katkı sağlarlar. Ayrıca bu alaşımlar mükemmel korozyon direncine de sahiptirler. Ancak alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirilmesi alüminyumun ısı ve oksijene duyarlılığı nedeniyle oldukça güçtür. 20. yüzyılın sonunda alüminyum alaşımlarının kaynatılabilmesi için sürtünme karıştırma kaynağı tekniği geliştirilmiştir [1]. Sürtünme karıştırma kaynağı ile ısı nedeniyle oluşan bu sorunlara bir miktar çözüm bulunmuştur. Bu yöntemde erime sıcaklığının altında plastik deformasyon ile kaynak yapılır [2]. Böylece yüksek ısıya maruz kalmadığı için alüminyum alaşımı erimez ve faz değişimi sınırlı kalır. Ancak kaynak bölgesinin mukavemeti sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde de diğer yöntemlere nazaran düşük olsa da ısıdan etkilenerek düşmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağında ısı sebebiyle oluşan bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda kaynak bölgesinde oluşan sıcaklığı etkileyecek girdilere odaklanılmıştır. Bunlar sürtünme karıştırma kaynağı için kullanılan omuzun ve pimin tasarımı[3], devri [4], ilerlemesi [5], batma derinliği [6], malzemesi [7], kaplaması [8] gibi pek çok girdidir. Ayrıca kaynak esnasında oluşacak ısıyı düşürebilmek adına su altında [9] ya da kriyojenik soğutma altında [10] sürtünme karıştırma kaynak çalışmaları da yapılmıştır.

Bu çalışmada ise sürtünme karıştırma kaynağı esnasında oluşan ısının neden olduğu olumsuzluklar sürtünme karıştırma kaynağı sonrasında giderilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ısı işlem ya da talaşlı imalat gibi süreçlerden sonra malzemelerde meydana gelen hataları gidermek için kullanılan kriyojenik işlem kaynak sonrası numunelere uygulanmıştır. Kriyojenik işlem de sürtünme karıştırma kaynağı gibi yeni sayılabilecek bir araştırma konusudur. Ayrıca her iki yöntem de sürdürülebilir üretim sınıfına girmektedir. Kriyojenik işlem -50°C ve -100°C arasında sığ kriyojenik işlem (SCT), -125°C ve -196°C arasında derin kriyojenik işlem (DCT) olarak iki gruba ayrılmaktadır [11]. Kriyojenik işlemin talaşlı imalat kesici takımların sertliğini yükselttiği [12], homojen karbür dağılımı sağladığı [13][14], böylece de takımların daha az aşındığı [15], daha uzun takım ömrü sergiledikleri [16] rapor edilmiştir. Ayrıca malzemelere uygulanan kriyojenik işlemin de malzeme sertliğini bir miktar arttırdığı [17], kalıntı gerilme [18] ve kalıntı östenit fazlarını [19][20] tamamen ya da kısmen giderildiği bildirilmiştir. Alüminyum alaşımlarında da su verme işleminin neden olduğu kalıntı gerilmeleri giderebilmek için kriyojenik işleme başvuru çalışmaları literatürde mevcuttur [21]. Alüminyum alaşımına uygulanan farklı bekletme sürelerinde sığ kriyojenik işlemin ardından bazı bekletme sürelerinde yeni fazların oluştuğu rapor edilmiştir. Ancak süre uzadıkça bu fazların ortadan kalktığı bildirilmiştir. Bu fazlar ile birlikte numunenin sertleştiği, yine fazların ortadan kalktığı bekletme sürelerinde ise sertliğin düştüğü bildirilmiştir[22]. Ancak sürtünme karıştırma kaynağı sonrası kriyojenik işlem ile kaynağın mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar birkaç tane ile sınırlıdır [23][24].

Bu çalışmada farklı ilerleme hızlarının sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan yüzey topografyasına etkilerinin yanı sıra derin ve sığ kriyojenik işlemin kaynak sertliğine ve mikroyapısına etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmanın sürtünme karıştırma kaynağı sonrası sığ ve derin kriyojenik işlemin etkilerinin belirlenmesi açısından literatüre önemli bir katkı sunacağı düşünülmektedir. Çalışma sürtünme karıştırma kaynağı alanına yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot (Material And Method)

Deney malzemesi olarak kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilen 7050-T7451 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

Tablo 1. Al 7050-T7451 alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of Al 7050-T7451 alloy)

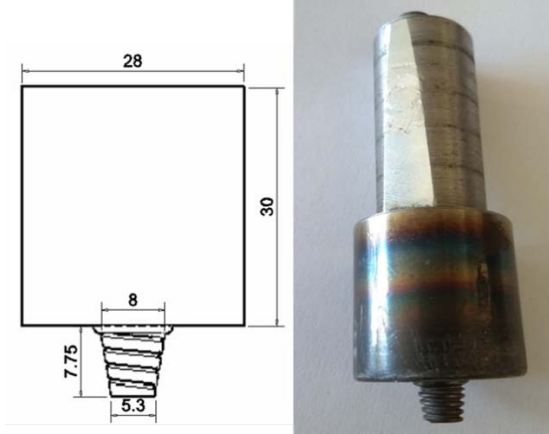
Element	Zn	Cu	Mg	Fe	Mn	Cr	Ti	Zr	Si
%	6.3	2.5	2.4	0.15	0.1	0.04	0.06	0.03	0.12

Numuneler 100x200x8 mm ölçülerine getirilmiş ve aln alına getirilerek Şekil 1’de görüldüğü gibi CNC dik işlem tezgahında tasarlanan bağlama kalıbı yardımı ile sürtünme karıştırma kaynağı yapılmıştır.



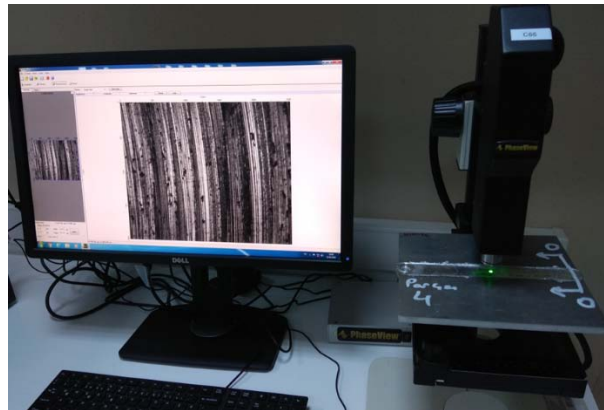
Şekil 1. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması (Friction stir welding application)

Sürtünme karıştırma kaynağı için omuz malzemesi olarak AISI 4140, pim malzemesi için ise daha mukavim olan Toolox 44 çeliği kullanılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi pim konik tornalanmıştır. Pim üzerine malzemenin doğru yöne taşınması için ters yönde diş açılmıştır. Pimin kaynağa başlayacağı noktaya öncesinde 8 mm çapında bir delik açılmıştır. Pim bu delik içerisinde 30 saniye boyunca ilerlemeksizin döndürülmüştür. Böylece pim ve omuzun kaynak malzemesine sürtmesi sonucu ortamda ısının oluşması sağlanmıştır. Kaynak esnasında pim saat yönünde döndürülerek ilerletilmiştir.



Şekil 2. Pim ile omuzun şekli ve ölçüleri (Shape and dimensions of the shoulder with the pin)

Bu çalışmada, takımın dönüşü için sabit devir (900 rpm) ve üç farklı ilerleme hızı kullanılmıştır (24, 28 ve 32 mm/dk). Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası her bir numunenin yüzey topografyası Şekil 3’de görülen Phase View marka profilometre ile ölçülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri Ra’nın yanı sıra Rz, Rv, Rp ve Rt değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3. Yüzey topografyası ölçümü (Surface topography measurement)

Ardından numuneler sıvı azota temas etmeden PLC kontrollü Şekil 4’de görülen özel olarak kriyojenik işlem için tasarlanmış olan tankta kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Malzemelerin aşırı hızlı sıcaklık değişimi nedeniyle çarpılmalarını önlemek amacı ile dakikada 3°C hızla kriyojenik sıcaklığa düşülmüştür. Bu işlem -80°C’de sıg kriyojenik işlem ve -180°C’de derin kriyojenik işlem olmak üzere iki etapta gerçekleştirilmiştir. Her iki bekletme sıcaklığında da numuneler 15’er saat tutulmuştur.



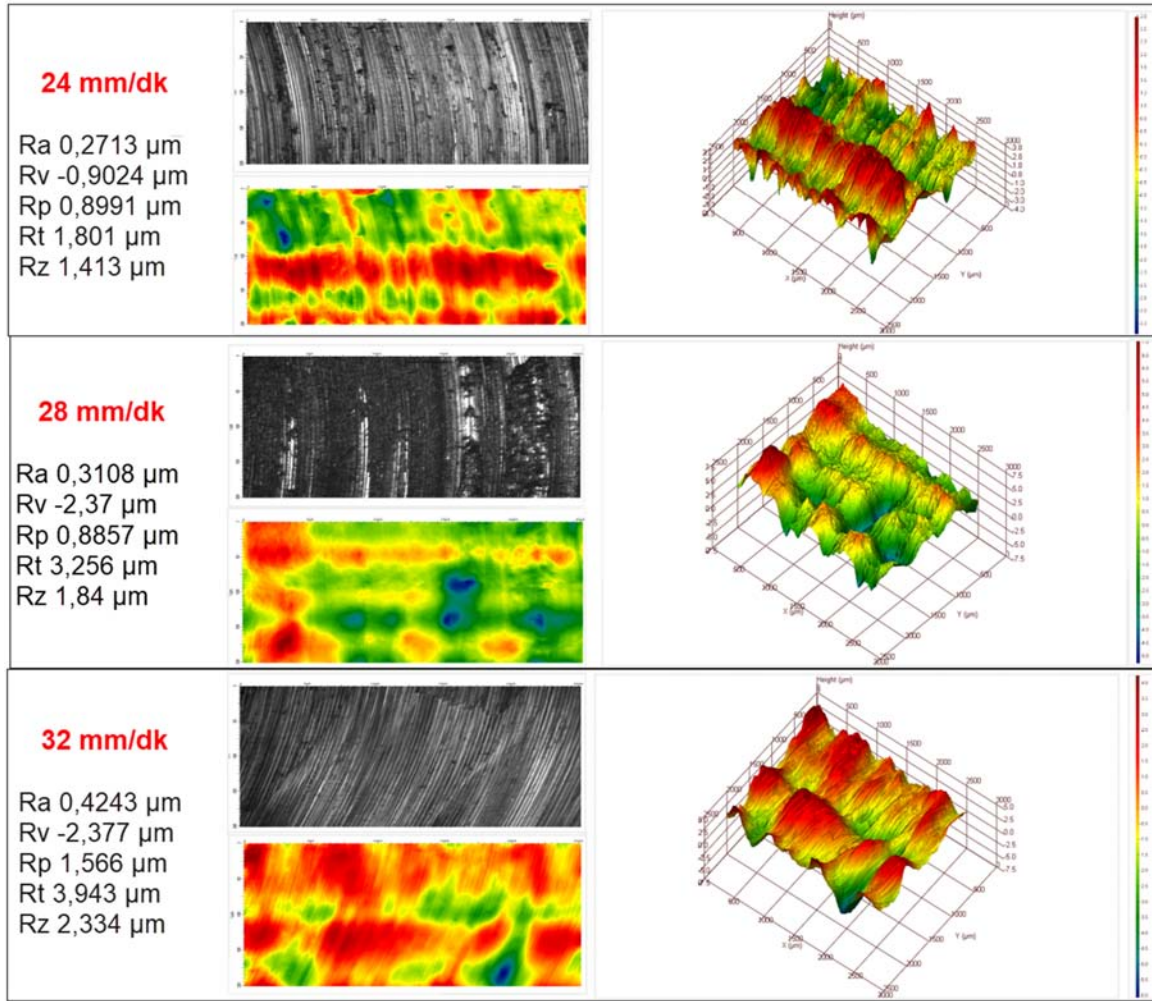
Şekil 4. PLC kontrollü kriyojenik tank (PLC controlled cryogenic tank)

Ardından numuneler yine dakikada 3°C hızla kriyojenik bekletme sıcaklığından oda sıcaklığına getirilmiştir. Kriyojenik işlemin etkisini görebilmek için mikroyapı görüntüleri alınmış ve sertlikleri ölçülmüştür. Mikroyapı için numuneler zımparalanmış ve 20 saniye süre ile Keller reaktifi ile (190 ml saf su, 5 ml HNO₃, 3 ml HCl, 2 ml HF) dağlanmıştır. Sertlik ölçme değerleri için 500 gram yük, 15 saniye süresince uygulanmıştır. Tüm numunelerin sertliği kaynak bölgesi merkez olmak üzere her iki yönde de 2’şer mm ara ile ölçülmüştür.

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Yüzey topografyası (Surface topography)

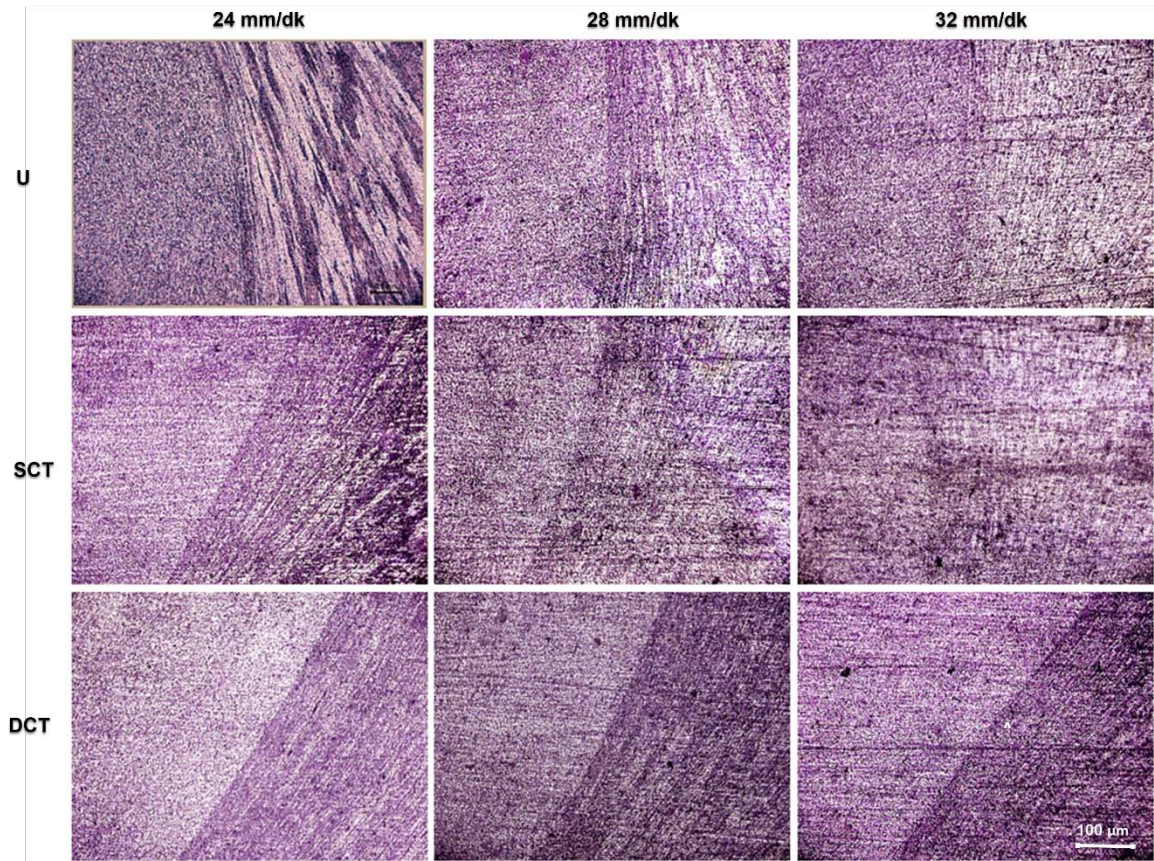
Kaynak kalitesini etkileyen önemli girdilerden olan pimin ilerleme hızının kaynak yüzeyinde oluşan yüzey kalitesini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu amaçla yüzey topoğrafyası ölçülmüş ve değerler Şekil 5’te verilmiştir. İlerleme hızının en düşük olduğu 24 mm/dk hızında Ra değeri 0,2713 µm ölçülürken 28mm/dk ilerleme hızında 0,3108 µm değerinde, en yüksek ilerleme hızında 32 mm/dk ise %56,4 oranında artarak 0,4243 µm olarak ölçülmüştür. En yüksek tepe değeri olan Rp en düşük ilerleme hızında 0,8991 µm iken, en yüksek ilerleme hızında %74,17 oranında artış göstermiş ve 1,566 µm değerine ulaşmıştır. Ölçülen yüzeydeki en derin vadinin derinliğini veren Rv değeri 24 mm/dk ilerleme hızında -0,9024 µm iken 32 mm/dk ilerleme hızında %163,41 oranında artış göstermiş ve -2,377 µm değerine ulaşmıştır. Rv ve Rp değerlerinin toplamı olan Rt değeri benzer oranlarda artış göstermiştir. En yüksek beş tepe ve vadi değerinin ortalaması olan Rz değeri ise, 24 mm/dk ilerleme hızında 1,413 µm en 32 mm/dk ilerleme hızında 2,334 µm olarak ölçülmüştür. Rz değerindeki artış oranı ise %65,18 olarak hesaplanmıştır. Yüzey topoğrafyasındaki tüm bu değerlerle bakıldığında artan ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ve topoğrafyası üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının mantığı sürtünme etkisi ile ortamda ısının artırılması ve malzemenin erime noktası altındaki sıcaklık değerinde bir noktadan diğer bir noktaya taşınmasıdır. Bu esnada ısıyı oluşturan takımın devri ve omuzun baskı kuvveti oldukça önemlidir. Ancak ısının dağılmasını sağlayan ve takımı bölgeden uzaklaştıran ilerleme hızıdır. Omuzun kaynak yüzeyinden dönerek ayrılırken alüminyumun yapışması ile girintili ve çıkıntılı yüzeyler oluşturması beklenmektedir. Bu ayrılmanın ısının etkisi ile daha kolay olduğu artan ilerleme hızı ile de görülmektedir.



Şekil 5. İlerleme hızına bağlı yüzey topografyasının değişimi (Change of surface topography depending on feed rate)

3.2. Mikroyapı (Microstructure)

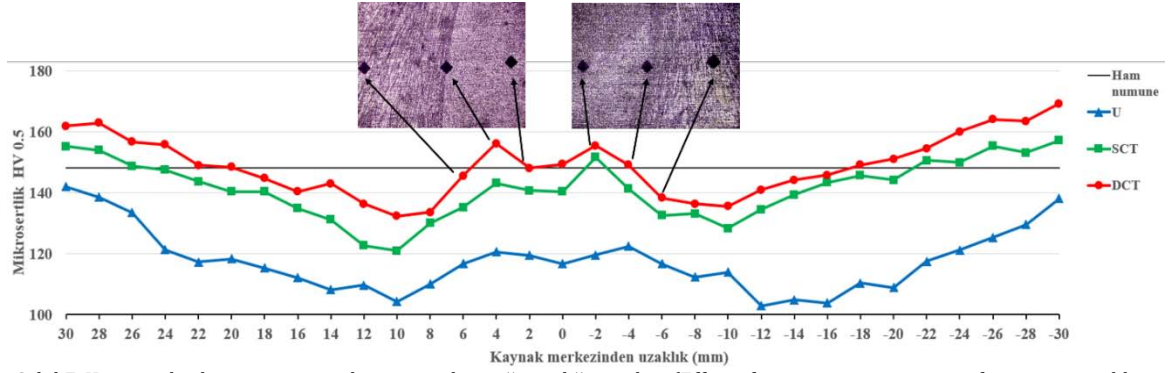
Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası pimin geçtiği dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) başta olmak üzere termomekanik olarak etkilenen bölgede (TEB) ısı etki ile yeniden kristalleşmenin görüldüğü bilinmektedir. Yeniden kristalleşen bu bölgelerde de tane yapılarının daha küçük olduğu, dislokasyonların daha az olduğu pek çok çalışmada rapor edilmiştir [8][25]. Sürtünme karıştırma kaynağında ısı etkisiyle gerçekleşen bu olaylar Şekil 6'da ilerlemenin artması ve kriyojenik işlem sonrası da gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlemin tane yapısını küçültmesinin yanında homojen tane dağılımı, dislokasyonları ortadan kaldırma ve artık gerilmeleri düşürdüğü bilinmektedir [21]. Mikroskop ile elde edilen makro görüntülerde DKB-TEB geçişinde özellikle TEB bölgesinde tane yapıları fark edilir şekilde küçülmüştür. Tane yapılarındaki bu küçülme ilerleme hızının artması ile görülmektedir. İlerleme hızının artması pimin geçtiği bölgelerde ısının artmasına neden olmaktadır. Artan bu ısı etkisi ile tane yapıları küçülmektedir. Aynı zamanda küçülen bu taneler de kaynağın mukavemetini ve sertliğini arttırmaktadırlar[26][27].



Şekil 6. İlerleme hızı ve kriyojenik işlemin mikroyapıya etkisi (Feed rate and effect of cryogenic treatment on microstructure)

3.3. Sertlik değerlerinin deneysel sonuçları (Experimental results of hardness values)

Kriyojenik işlemin sürtünme karıştırma kaynağında sertlik üzerine etkisinin araştırılması için 900 devirde 24 mm/dk ilerleme hızında kaynaklanan numuneler kullanılmıştır. Şekil 7. incelendiğinde 148,19 Hv olan ham numune sertliğinin tüm numunelerde düştüğü görülmektedir. Özellikle kriyojenik işlem uygulanmamış işlemsiz numunede (U) sürtünme karıştırma kaynağı sonrası önemli ölçüde sertlik düşüşü gözlemlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası alüminyumun sertliğinin, mekanik ve termal faktörlerden olumsuz etkilenmesi beklenen bir durumdur. DKB baz alındığında en yüksek sertlik değerinin derin kriyojenik işlem ile sağlandığı görülmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası artan sıcaklık etkisi ile yeniden kristallen bu bölgede tane yapısının küçülmesi ile sertliğin arttığı bilinmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının sergilediği bu özellik kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde de görülmektedir. Kriyojenik işlem sonucu malzemede yeniden kristallenme gerçekleştiği ve tane yapısının küçüldüğünü bildiren pek çok çalışma mevcuttur. Yani sürtünme karıştırma kaynağı sonrası uygulanan kriyojenik işlem ile ikinci kez ısı etkisi ile tane yapısı küçülmüştür. Kriyojenik işlemin tane yapısını küçültmesinin yanında homojen tane dağılımı, dislokasyonları ortadan kaldırma ve artık gerilmeleri düşürdüğü bilinmektedir. Böylece DKB'de sertliğin kriyojenik işlem ile arttığı düşünülmektedir. Derin kriyojenik işlemin de sığ kriyojenik işleme göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Sığ kriyojenik işlem uygulanmış numune sertliği, DKB'de işlemsiz numuneye göre artmıştır. Ancak ham numune sertliğine ulaşamamıştır. DKB'de ve tüm bölgelerde en yüksek sertlik değerlerine sahip olan numune derin kriyojenik işlem uygulanan numune olmuştur. Derin kriyojenik işlem uygulanan numune DKB'de ham numune sertlik değeri üzerine de çıkmıştır.



Şekil 7. Kriyojenik işlemin sürtünme karıştırma kaynağı sertliğine etkisi (Effect of cryogenic treatment on friction stir welding hardness)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada Al 7050-T7451 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında üç farklı ilerleme hızı kullanılmış ve ilerleme hızının yüzey topografyasına etkileri araştırılmıştır. Ayrıca farklı sıcaklıklarda uygulanan kriyojenik işlemin kaynak bölgelerinde neden olduğu mikroyapı ve sertlik değişimleri incelenmiştir. Deneyler sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ilerleme hızının 24 mm/dk hızından 32 mm/dk hızına artırılması ile yüzey pürüzlülük değerleri Ra %56,4, Rz %65,18, Rp %74,17 ve Rv %163,41 oranında artmıştır.
- İlerleme hızının artması ile hem DKB hem de TEB'de tane yapısının küçüldüğü gözlemlenmiştir.
- Kriyojenik işlem uygulanmış kaynaklarda DKB ve TEB'de tane yapısı küçülmüştür.
- Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde sertliğin işlemsiz numunelere göre artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- Derin kriyojenik işlemin sığ kriyojenik işleme göre kaynak bölgesi sertliğini daha fazla etkilediği gözlemlenmiştir.
- Derin kriyojenik işlem uygulanan numunede sertlik değerinin DKB'de ham numuneye göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Z. Y. Ma, A. H. Feng, D. L. Chen, and J. Shen, 'Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: microstructural evolution and mechanical properties', *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, no. 4, pp. 269-333, 2018. doi:10.1080/10408436.2017.1358145
- [2] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, 'Friction stir welding and processing', *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005. doi:10.1016/j.mser.2005.07.001
- [3] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, and P. Wanjara, 'Review of tools for friction stir welding and processing', *Can. J. Metall. Mater. Sci.*, vol. 51, no. 3, pp. 250-261, Jul. 2013. doi:10.1179/1879139512Y.0000000015
- [4] B. Çevik, B. Özçatalbaş, Y. Gülenç, 'Skk ile birleştirilen 7075-T651 Al alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine devir sayısının etkisi', in *3rd International Conference on Welding Technologies and Exhibition, 21-23 May 2014, Manisa Türkiye*, pp. 658-668.
- [5] A. Kurt, M. Boz, and M. Özdemir, 'Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi', *Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt*, vol. 19, no. 2, pp. 191-197, 2004.
- [6] G. İpekoğlu, Ö. Akçam, and G. Çam, 'Farklı Kalınlıktaki AA6061-T6 Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı için Uygun Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi', *AKU J. Sci. Eng.*, vol. 18, pp. 324-335, 2018. doi:10.5578/fmbd.66765
- [7] V. P. Singh, S. K. Patel, A. Ranjan, and B. Kuriachen, 'Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: A critical review', *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 6217-6256, 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.01.008
- [8] Ç. Bekir, 'Sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin kalıntı gerilmelere ve birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisi',

Ph.D. dissertation, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.

[9] M. A. Wahid, Z. A. Khan, and A. N. Siddiquee, 'Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties', *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 28, no. 2, pp. 193–219, Feb. 2018. doi:10.1016/S1003-6326(18)64653-9

[10] C. Sharma, D. K. Dwivedi, and P. Kumar, 'Influence of in-process cooling on tensile behaviour of friction stir welded joints of AA7039', *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 556, pp. 479–487, Oct. 2012. doi:10.1016/J.MSEA.2012.07.016

[11] N. Altan Özbek, 'The investigation of the effects of cryogenic treatment applied to cutting tools on tool life in machining AISI 316 austenitic stainless steel', Ph.D. dissertation, Gazi University, Ankara, Türkiye, 2013.

[12] N. A. Özbek, 'Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel', *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 9442–9456, 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.03.038

[13] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O. Özbek, 'Application of deep cryogenic treatment to uncoated tungsten carbide inserts in the turning of AISI 304 stainless steel', *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 12, pp. 6270–6280, Dec. 2016. doi:10.1007/s11661-016-3767-1

[14] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O. Özbek, 'Effect of cutting conditions on wear performance of cryogenically treated tungsten carbide inserts in dry turning of stainless steel', *Tribol. Int.*, vol. 94, pp. 223–233, 2016, doi:10.1016/j.triboint.2015.08.024.

[15] E. Demir, 'Investigation of the effects of holding times at cryogenic temperatures on residual stress distribution of AISI D2 tool steel', M.Sc. dissertation, Yildirim Beyazit University, Ankara, Türkiye, 2014.

[16] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O. Özbek, 'Investigation of the effects of cryogenic treatment applied at different holding times to cemented carbide inserts on tool wear', *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 86, 2014. doi:10.1016/j.ijmactools.2014.06.007

[17] O. Özbek, 'Kriyojenik işlem sonrası temperleme sıcaklığı, bekletme süresi ve soğutma ortamının Al 7050-T7451 alaşımının sertliğine etkilerinin araştırılması', in *International Marmara Sciences Congress, 10-11 Dec 2021, Kocaeli Türkiye*, pp. 369–375, 2021, no. Dec, pp. 369–375.

[18] E. El, F. Kara, and O. Özbek, 'Researching the effect of shallow cryogenic treatment on the metallurgical features of sleipner cold work tool steel', *Gazi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 7, no. 2, pp. 111–120, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.02.04

[19] F. Kara, O. Özbek, N. Altan Özbek, and İ. Uygur, 'Investigation of the effect of deep cryogenic process on residual stress and residual austenite', *Gazi J. Eng. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 3–11, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.02.07

[20] F. Kara, 'AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması', Karabük Üniversitesi, Ph.D. dissertation, Karabük, Türkiye, 2014.

[21] M. Araghchi, H. Mansouri, R. Vafaei, and Y. Guo, 'A novel cryogenic treatment for reduction of residual stresses in 2024 aluminum alloy', *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 689, no. January, pp. 48–52, 2017. doi:10.1016/j.msea.2017.01.095

[22] M. K. Chaanthini, M. Govindaraju, and S. Arul, 'Effect of cryogenic treatment on mechanical properties of aluminium alloy AA2014', *J. Inst. Eng. Ser. D*, vol. 101, no. 2, pp. 265–270, 2020. doi:10.1007/s40033-020-00237-y

[23] V. Neelamegam, B. Govindasamy Bhavani, M. Muthukrishnan, and S. R. Tadvaka, 'Investigation on corrosion behavior of cryogenically treated friction stir welded aa5083', *Mechanika*, vol. 26, no. 5, pp. 442–449, 2020. doi:10.5755/j01.mech.26.5.23571

[24] A. Bansal *et al.*, 'Influence of cryogenic treatment on mechanical performance of friction stir Al-Zn-Cu alloy weldments', *J. Manuf. Process.*, vol. 56, no. March, pp. 43–53, 2020. doi:10.1016/j.jmapro.2020.04.067

[25] F. Sarsılmaz, 'Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması', Fırat Üniversitesi, Ph.D. dissertation, Elazığ, Türkiye, 2009.

[26] Y. Morisada, T. Imaizumi, and H. Fujii, 'Determination of strain rate in friction stir welding by three-dimensional visualization of material flow using X-ray radiography', *Scr. Mater.*, vol. 106, pp. 57–60, Sep. 2015. doi:10.1016/J.SCRIPAMAT.2015.05.006

[27] B. Çevik, B. Özçatalbaş, Y. Gülenç, 'Effect of welding speed on the mechanical properties and weld defects of 7075 Al alloy joined by FSW', *Kov. Mater.*, vol. 56, 2016. doi:10.4149/km_2016_3_241

This is an open access article under the CC-BY license

