



EŞ KANALLI AÇISAL PRESLEME (EKAP) UYGULANAN GEMİ İNŞA ÇELİĞİNİN İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Dursun Murat SEKBAN*

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği,
Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Eş Kanallı Açısal Presleme,
Gemi İnşaatı,
Düşük Karbonlu Çelik,
İçyapı,
Mekanik Özellik.*

Öz

Yüksek mukavemetli çeliklerin düşük kaynak edilebilirlik ve şekillendirilebilmeleri nedeniyle, gemilerde yüksek dayanım istenen kısımlarda düşük-orta mukavemetli çelikler kalınlıkları artırılarak kullanılmaktadır. Daha kalın sacların kullanılması beraberinde ağırlığın ve yakıt tüketiminin önemli ölçüde artmasını getirmektedir. Bu bağlamda düşük-orta mukavemetli gemi imalat çeliklerinin aşırı plastik deformasyon yöntemleri veya ısıl işlemler uygulanarak dayanımlarının geliştirilmesi oldukça önemlidir. Aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemleri ile malzemenin kimyasal bileşiminde herhangi bir değişiklik yapmadan tane boyutunu küçülterek malzemenin mukavemetini arttırmak son dönemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. APD yöntemleri arasında eş kanallı açısallı presleme (EKAP) yöntemi yüksek oranda tane inceltme ve mukavemet arttırma özelliği bakımından öne çıkmaktadır. Literatür incelendiğinde EKAP yönteminin herhangi bir gemi inşa çeliğine uygulamasının olmadığı açıkça görülmektedir. Bu yüzden yapılan çalışmada gemi inşaatından yoğun bir kullanıma sahip düşük-orta mukavemetli Grade A gemi inşa çeliğine 300 °C'de tek paso EKAP uygulanmış ve EKAP sonrası çelikteki içyapısal ve mekanik özelliklerinin değişimleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda EKAP sonrası ortalama tane boyutunun 25 µm seviyesinden 7 µm seviyesine indiği ve tane boyutunda meydana gelen bu azalmanın sonucu olarak sertlik ve mukavemet değerlerinin ana yapıya göre önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Öte yandan EKAP sonrası numunelere aşınma ve şekil verilebilirlik deneyleri de uygulanmış ve aşınma davranışının bir miktar iyileştiği şekil verilebilirliğin ise EKAP sonrası kötüleştiği belirlenmiştir.

INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSED (ECAPED) SHIP BUILDING STEEL

Keywords

*Equal Channel Angular,
Pressing,
Shipbuilding,
Low Carbon Steel,
Microstructure,
Mechanical Properties.*

Abstract

Low-medium strength steels are used by increasing their thickness in parts where high strength is required on ships due to the low weldability and formability of high-strength steels. The use of thicker plates brings about a significant increase in the ship's weight and their fuel consumption as expected. So, it is very important to improve the strength of low-medium strength shipbuilding steels by applying severe plastic deformation methods or heat treatments. Grain refinement via severe plastic deformation (SPD) seems to be an essential strengthening mechanism without changing the chemical composition of metallic materials. Among SPD methods, equal channel angular pressing (ECAP) is one of the most commonly used one due to its high grain refinement capacity. When the literature is examined, it is clearly seen that ECAP is not applied to any shipbuilding steel before. Therefore, in this study, one pass ECAP at 300 °C to low-medium strength shipbuilding steel (Grade A) which has intensively used in the shipbuilding industry and the changes in the microstructural and mechanical properties of steel after ECAP were investigated. After investigations, it was determined that the average grain size after

* İlgili yazar / Corresponding author: msekban@ktu.edu.tr, +90-462-377-8077

ECAP decreased from 25 μm (base material) to 7 μm and as a result of this, hardness and strength values increased significantly compared to the base material. On the other hand, wear and formability tests were applied after and before ECAP and it was determined that while a slight improvement was obtained in wear behavior, formability behavior deteriorated after ECAP.

Alıntı / Cite

Sekban, D.M., (2020). Eş Kanallı Açısal Presleme (EKAP) uygulanan Gemi İnşa Çeliğinin İyçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 240-251.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

D.M. Sekban, 0000-0002-7493-1081

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	27.05.2019
Revizyon Tarihi / Revision Date	17.08.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.10.2019
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2020

1. Giriş (Introduction)

Gemilerde ahşap, kompozit malzemeler ve alüminyum alaşımları kullanılsa da bu malzemelerle üretilen gemilerde özellikle dayanım anlamında yaşanan sıkıntılardan ötürü gemi inşaatında çelik malzemelerin kullanımı ön plana çıkmaktadır (Eyres, 2001). Çelikler ayrıca şekil verilebilirlik, kaynak edilebilirlik ve maliyetleri göz önüne alındığında da kullanılan diğer malzemelere büyük üstünlükler sağlamaktadır. Gemilerde kullanılan çelikler en genel anlamda düşük-orta mukavemetli çelikler ve yüksek mukavemetli çelikler olarak ikiye ayrılabilir. Düşük-orta mukavemetli gemi inşa çeliklerinde karbon oranı yaklaşık %0,2 seviyelerindedir. Bu tip çeliklerde dayanımı arttırması nedeniyle Mn ve Si elementleri de bulunmaktadır (Bhadeshia ve Honeycombe 2011; Klepaczko vd., 2009). Yüksek mukavemetli gemi inşa çelikleri ise düşük-orta mukavemetli gemi imalat çeliklerine göre daha yüksek oranda Mn ve Cu elementleri içerdiğinden; daha yüksek mukavemet, sertlik ve korozyon direnci gösterirler. Ayrıca bu tür çelikler düşük-orta mukavemetli gemi imalat çeliklerinde bulunmayan ve yapıya yüksek mukavemet, yüksek sertlik, iyi korozyon dayanımı veren ve tane irileşmesini engelleyici Nb, V, Ti ve N gibi elementleri de ihtiva ederler (Klepaczko vd., 2001). Yüksek mukavemetin istendiği gemi kısımlarında yüksek mukavemetli çelikler kullanılsa da bu tür çeliklerin kullanılmasını zayıf kaynak edilebilirlik ve düşük şekil verilebilirlik gibi kısıtlayan bazı faktörler vardır. Bu faktörler göz önüne alındığında gemilerde yüksek dayanımın istenildiği yerlerde genellikle daha kalın saclar kullanılarak yüksek mukavemet gereksinimi karşılanmaktadır. Yüksek mukavemet elde etmek adına daha kalın sacların kullanılması gemilerde ağırlığın dolayısıyla da yakıt tüketiminin önemli ölçüde artışına neden olmaktadır. Bu nedenle düşük-orta mukavemetli gemi imalat çeliklerinin uygulanacak çeşitli yöntemlerle mukavemetlerinin geliştirilmesi gemi imalat sektörüne önemli bir katkı olacaktır.

Çeşitli aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemleri ile malzemenin kimyasal bileşiminde herhangi bir değişiklik yapmadan tane boyutunu küçülterek malzemenin mukavemetini arttırmak son dönemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu APD yöntemleri arasında eş kanallı açısal presleme (EKAP) yöntemi yüksek oranda tane inceltme ve mukavemet arttırma özelliği açısından diğer yöntemler arasında ön plana çıkmaktadır. EKAP yöntemi eş kesit alanına sahip iki kanaldan düşey kanala yerleştirilen numunenin hidrolik bir pres yardımıyla itilerek yatay kanaldan çıkarılması prensibine dayanmaktadır (Demirtaş, 2017). Bu işlem sırasında numunede yatay kanaldan düşey kanala geçiş sırasında kayma düzleminde gerçekleşen basit kayma ile yoğun bir plastik deformasyon gerçekleşmektedir. EKAP yöntemi ile ilgili daha detaylı bilgiye literatürdeki çalışmalardan ulaşılabilmektedir (Valiev vd., 2000; Furukawa vd., 2001; Valiev ve Langdon 2006; Langdon, 2007). EKAP yöntemi kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların yoğunlukla çinko, alüminyum ve bakır gibi hafif alaşımlar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Demirtaş ve arkadaşları yaptıkları farklı çalışmalarda değişen oranlardaki Zn-Al alaşımlarına EKAP uygulamış ve EKAP sonrasında tane boyutunun oldukça incelendiğini ve malzemenin süperplastik özellik göstermeye başladığını belirlemişlerdir (Demirtaş vd., 2015; Demirtaş vd., 2018). Ebrahimi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Cu-Sn alaşımının EKAP sonrasında tane boyutunun mikron altı seviyelere düştüğünü, bununla birlikte korozyon dayanımının da arttığını belirlemişlerdir (Ebrahimi vd., 2019). Smirnov ve Konstantinov saf bakıra EKAP uygulamış ve EKAP sonrasında malzemenin ultra ince taneli bir içyapı sergilediğini, mukavemet ve darbe dayanımı değerlerinin de yükseldiğini rapor etmişlerdir (Smirnov ve Konstantinov 2018). Horikiri ve arkadaşları yaptığı çalışmada ise AA7075 alaşımına değişen paso sayılarında EKAP uygulamış ve artan paso sayısı ile çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin arttığını belirlemişlerdir (Horikiri vd., 2017). Suresh ve arkadaşları Al-Cu-Li alaşımı olan AA2195'e 4 paso EKAP uygulanması sonrasında malzemenin tane boyutunun oldukça incelendiğini, sertlik ve mukavemet değerlerinin önemli oranda artarken uzama değerlerinde ufak bir azalma olduğunu raporlamışlardır (Suresh vd., 2019). Shaeri ve arkadaşları ise AA7075 alaşımında EKAP'ın yaşlanma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmış ve ana yapının 60 μm olan ortalama tane boyutunun 200–350nm seviyelerine kadar indiğini, öte yandan tüm yaşlandırma koşullarında ana yapıya göre daha yüksek dayanım değerleri elde edildiğini belirlemişlerdir (Shaeri vd., 2015). Bu tür hafif alaşımların dışında çelik ve titanyum gibi daha mukavim

malzemelerin de EKAP yöntemiyle başarıyla proses edilebildiği de literatürde görülmektedir. Maier ve arkadaşları yaptıkları çalışmada % 0.09 C içeren düşük karbonlu bir çeliğe EKAP uygulamış ve EKAP sonrasında farklı sıcaklıklardaki ısıl işlemin içyapı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda EKAP sonrası tane boyutunun önemli oranda azaldığı, 500 °C'nin altındaki ısıl işlemlerde içyapı önemli oranda etkilenmezken, bu sıcaklığın üstüne çıkıldıkça tane irileşmesinin artarak meydana geldiği belirlenmiştir (Maier vd., 2013). Dobatkin ve arkadaşları östenitik paslanmaz çeliğe oda sıcaklığı ve 400 °C'de EKAP işlemi uygulamışlar ve her iki sıcaklıkta da mikron altı seviyelerde ortalama tane boyutları elde ettiklerini ve mukavemet değerlerinin önemli oranda arttığını belirtmişlerdir (Dobatkin vd., 2018). Islamgaliev ve arkadaşları yüksek kromlu ferritik martenzitik çeliğine (12Cr-2W-2Ni-0.5Mo) EKAP uygulamışlar ve işlem sonrasında tane inceliği elde ettiklerini ve mekanik özelliklerin geliştiğini belirtmişlerdir (Islamgaliev vd., 2019). Yanxia ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada ise saf titanyum alaşımına EKAP işlemi uygulamışlar ve EKAP sonrasında tane boyutundaki incelenin mekanik özellikler üzerinde geliştirici etkisini ortaya koymuşlardır. Öte yandan bu çalışmada EKAP sonrasında ultra ince taneli hale dönüşen saf titanyumun korozyon dayanımı konusunda ana duruma göre karışık sonuçlar elde edildiği ve bu konu üzerinde farklı çalışmalarında ortaya konması gerektiği bildirilmiştir (Yanxia vd., 2017). Li ve arkadaşları Grade 4 titanyum alaşımına 300 °C'de 8 paso EKAP işlemi uygulamış ve işlem sonrasında 200 nm seviyelerinde tanelerden oluşan bir içyapı ve ana yapıya göre oldukça yüksek mukavemet değerleri elde ettiklerini rapor etmişlerdir (Li vd., 2014).

Yapılan bilimsel ve teknolojik incelemeler gemi imalatında kullanılan çeliklerin özellikle kimyasal yapısını etkilemeden mekanik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların oldukça kısıtlı olduğunu göstermektedir. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde ise çalışmaların daha çok malzemelerin ısıl işlem sonrası mekanik özelliklerinin değişimine ya da sürtünme karıştırma işlemi (SKİ) sonrası malzemelerdeki mekanik özelliklerin değişimi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Hayat ve Uzun yaptıkları çalışmada düşük karbonlu gemi inşaatı çeliğini farklı sıcaklıklarda tavlarken su vermişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda tavlama sıcaklığı arttıkça su verme işlemi sonrasında oluşan martenzit oranının arttığı, dayanım değerlerinin yükseldiği, darbe dayanımı değerlerinin ise azaldığını belirlemişlerdir (Hayat ve Uzun 2011). Sekban ve arkadaşları yaptıkları farklı çalışmalarda ise yine düşük karbonlu gemi inşa çeliğine sürtünme karıştırma işlemi (SKİ) uygulamışlar ve işlem sonrasında çeliğin ortalama tane boyutunun önemli oranda azaldığını, dayanım, sertlik, darbe dayanımı ve şekil verilebilirlik özelliklerinin de iyileştiğini bildirmişlerdir (Sekban vd., 2016; Sekban vd., 2018). EKAP yönteminin gemi inşaatı özelinde kullanımını incelendiğinde ise literatürde henüz bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu bağlamda bu çalışma da farklı çelik türlerine başarıyla uygulanan EKAP yöntemi gemi inşaatında yoğun bir kullanım alanına sahip düşük-orta mukavemetli (ASTM 131A) gemi inşa çeliğine EKAP yöntemi uygulanmış ve EKAP sonrası çeliğin içyapısal ve sertlik, mukavemet, aşınma ve şekil verilebilirlik gibi gemiler için önem teşkil eden mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

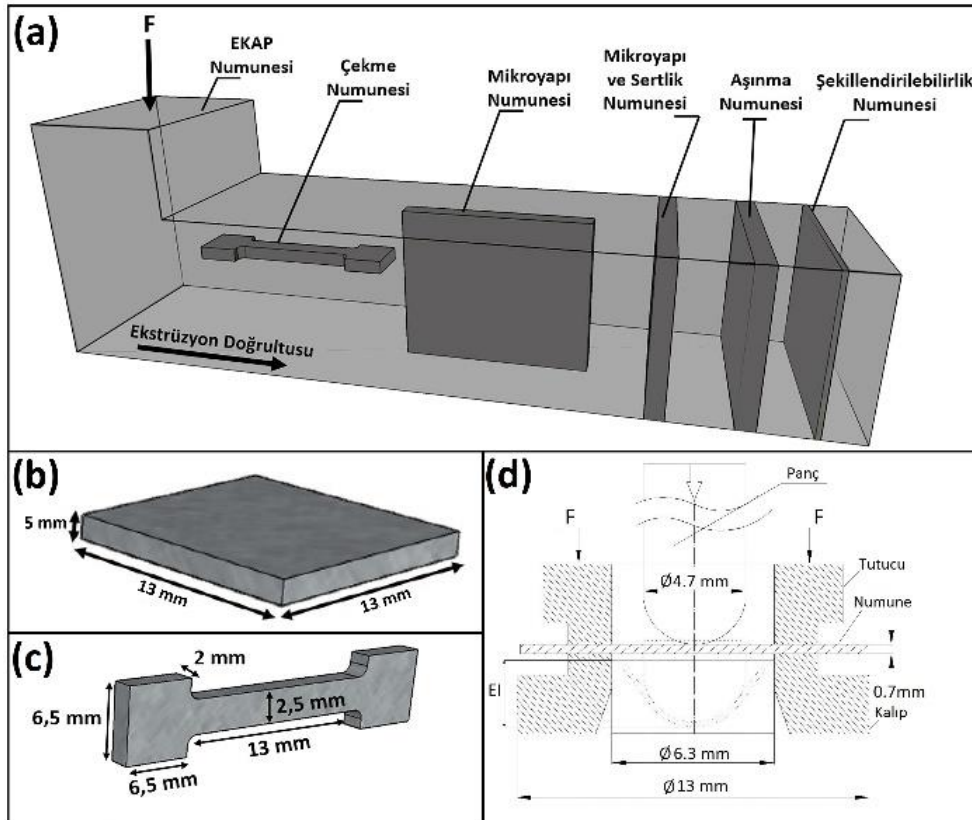
2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışmada gemi inşaatından yoğun bir kullanıma sahip, sıcak hadde ürünü düşük-orta mukavemetli ASTM 131A (0.16 ağırlık % C, 0.18 ağırlık % Si, 0.7 ağırlık % Mn, 0.011 ağırlık % S, 0.018 ağırlık % P, 0.09 ağırlık % Cr, 0.14 ağırlık % Mo, 0.04 ağırlık % Cu, 0.04 ağırlık % V ve kalan Fe) çeliği kullanılmıştır. EKAP işlemleri 13 X 13 mm² kesit alanı ve 130 mm uzunluğa sahip numunelere 300 °C'de 90° iç açığa (Φ) ve 0° dış yay açısına (Ψ) sahip kalıpta 1 mm/s basma hızında tek paso olarak gerçekleştirilmiştir. EKAP sırasında numunenin yüzeyi, kalıp ile arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla molibden sülfat katı yağlayıcı ile yağlanmıştır.

EKAP öncesi ve sonrası numunelerin içyapısal değişimlerini incelemek adına içyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. EKAP sonrası numuneler elektro-erozyon yöntemi kullanılarak olası yönlendirmeleri gözleyebilmek adına Şekil 1'de gösterildiği gibi ekstrüzyon doğrultusunda ve ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak 2 farklı yönde çıkarılmıştır. EKAP öncesi ve sonrası içyapı incelemeleri için optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskop (SEM) kullanılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri için numuneler farklı numaralarda zımparalarla zımparalandıktan sonra 1 µm boyutunda Al₂O₃ kullanılarak parlatılmış ve ardından %3 Nital çözeltilisinde (%3 HNO₃ + %97 C₂H₆O) 15 s bekletilerek dağlanmış. SEM incelemeleri için numuneler OM inceleme numuneleriyle benzer şekilde hazırlanarak JEOL 6400 marka SEM görüntüleme cihazında, 15 keV ve ikincil görüntüleme modu (SE) kullanılarak incelenmiştir.

EKAP öncesi ve sonrası numunelerdeki mekanik özellik değişimlerini belirlemek amacıyla sertlik, çekme, aşınma ve şekil verilebilirlik (Erichsen) deneyleri uygulanmıştır. Deneyler için numuneler, EKAP sonrası iş parçasından Şekil 1'de gösterilen konumlarda ve boyutlarda elektro-erozyon yöntemi kullanılarak çıkarılmıştır. Sertlik deneyleri Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak Struers marka (Duramin 3) mikro-sertlik deney cihazında batıcı ucun basma yükü 300 g ve yük altında bekleme süresi 10 s seçilerek gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi numuneleri standart çekme numunesi boyutlarının EKAP sonrası elde edilen parçaya göre büyük gelmesinden ötürü standart dışı olarak köpek kemiği şeklinde (dog-bone shaped) ve 2 mm x 3 mm x 26 mm boyutlarında

çıkarılmıştır. Deneyler Instron 3382 model bir üniversal çekme-basma deney cihazı kullanılarak oda sıcaklığında $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ lik deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 13 mm x 13 mm x 5 mm boyutlarında kesilen numuneler ile UTS Tribometer T30M-HT model aşınma test cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde resprokeyting (iler-geri) hareketli aşınma deney tipi ve 6 mm çapında Al_2O_3 aşındırıcı bilyeler kullanılmıştır. Ayrıca deneyler 0.1 m/s kayma hızında, 10 N yüklemeye değerinde ve 200 m kayma mesafesi seçilerek gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrası aşınma izlerinin 3 boyutlu tarama grafikleri Nanofocus µscan marka optik profilometre ile çıkarılmıştır. EKAP sonrası numunelerin şekil verilebilirlik davranışındaki değişimleri belirlemek için ana malzeme ve EKAP sonrası numunelere Erichsen şekil verilebilirlik deneyleri uygulanmıştır. Numuneler 13 mm'lik kare formda ve 0.7 mm kalınlığında kesilerek Instron 3382 model çekme-basma deney cihazına bağlanan minyatürize kalıp kullanılarak teste tabi tutulmuşlardır. Numunelerin yüzeyleri testler öncesinde zımparalanıp parlatılarak çizikler gibi çatlak başlangıcı oluşturabilecek yüzey kusurları giderilmiş ve 0,045 mm/s zımba ilerleme hızında yağlayıcı kullanılmadan Erichsen testleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası numunelerin yüzeyler SEM kullanılarak incelenmiş ve optik profilometre ile 3 boyutlu tarama görüntüleri çıkarılmıştır. Yapılan tüm mekanik testlerde en az 3'er numune kullanılmış ve saçılım değerleri sonuçlar tablosuna yansıtılmıştır.

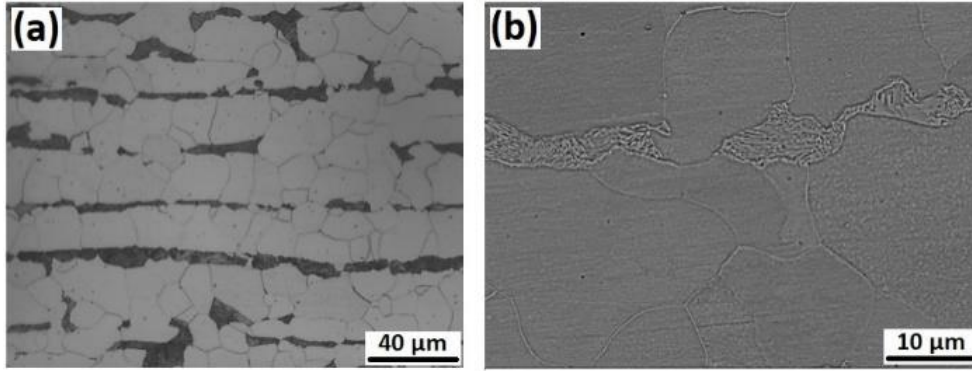


Şekil 1. (a) EKAP sonrası çıkarılan inceleme numunelerinin şematik gösterimi. Çıkarılan numunelerin boyutları: (b) içyapı, sertlik ve aşınma numunesi, (c) çekme numunesi ve (d) Erichsen kalıbı ve numunesi. ((a) Schematic illustration of the examination samples taken after EKAP. Dimensions of the extracted samples: (b) microstructure, hardness and wear sample, (c) tensile sample, and (d) Erichsen mold and sample.)

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

3.1. İçyapısal Değişimler ve Malzemeye Uygulanan Deformasyon Miktarı (Microstructural Changes and Amount of Deformation Applied to the Material)

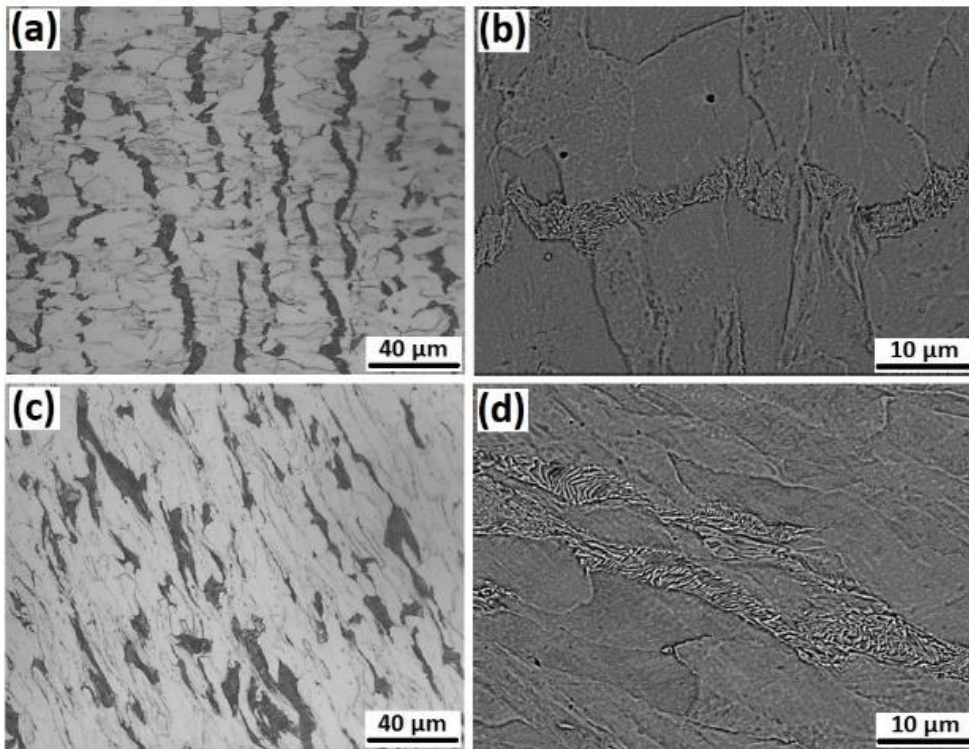
Şekil 2' de çalışmada kullanılan düşük-orta mukavemetli gemi inşa çeliğinin içyapı görüntüleri verilmiştir. Görüleceği üzere EKAP öncesi malzeme içyapısı tipik bir düşük karbonlu alaşımsız çeliğin içyapısını sergilemekte ve açık renkli ferrit ve koyu renkli ince sementit lamelleri içeren perlit fazından meydana gelmektedir. Sıcak hadde ürünü olan malzemede beklenildiği üzere perlit fazı tane sınırları boyunca hadde doğrultusunda yönlendirilmiştir. Başlangıç yapısında içyapının ortalama ferrit tane boyutunun 25 µm olduğu saptanmıştır.



Şekil 2. Düşük-orta mukavemetli gemi inşaatı çeliğinin EKAP öncesi içyapı görüntüleri: (a) Optik mikroskop görüntüsü ve (b) SEM görüntüsü. (Microstructure of low-medium strength shipbuilding steel before ECAP: (a) Optical micrograph and (b) SEM micrograph.)

Tek paso EKAP sonrası ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan numuneden oluşan içyapıya ait optik ve SEM resimleri Şekil 3 (a-b)'de verilmiştir. Görüleceği üzere EKAP sonrası düşük-orta mukavemetli gemi inşa çeliğinin içyapısı işlem sırasında meydana gelen yoğun plastik deformasyondan önemli ölçüde etkilenerek ana malzemeye göre oldukça incelmış tanelerden oluşmaktadır. İşlem öncesi 25 µm seviyelerinde ölçülen ortalama ferrit tane boyutunun EKAP sonrasında 7 µm seviyesine indiği belirlenmiştir. Öte yandan ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan numunelerin büyük oranda eş eksenli tanelerden oluştuğu da içyapı görüntülerinde açıkça görülmektedir.

EKAP sonrası ekstrüzyon doğrultusuna paralel yönde çıkarılan numunelerde oluşan içyapının optik ve SEM görüntüleri Şekil 3 (c-d)'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi ekstrüzyon doğrultusunda numune oldukça yüksek en boy oranına sahip ve yönlenmiş ferrit ve perlit tanelerinden oluşmaktadır. Literatür incelendiğinde de tek paso EKAP sonrası ekstrüzyon doğrultusunda iç yapının benzer şekilde yönlenmiş tanelerden oluştuğu görülebilmektedir (Iwahashi vd., 1998; Segal, 1999; Gholinia vd., 2000). Oluşan bu yönlenmiş içyapıya tek paso EKAP sırasında numunenin deformasyon düzleminden geçtiği esnada basit kayma ile deformasyona uğraması neden olmaktadır. ECAP kalıbı akış düzlemi üzerinde ekstrüzyon yönü ile $\sim 45^\circ$ lik bir açığa sahiptir ve bu yüzden taneler kalıbın dikey ve yatay kanallarının kesişimlerindeki teorik kesme düzlemi boyunca uzamaktadırlar.

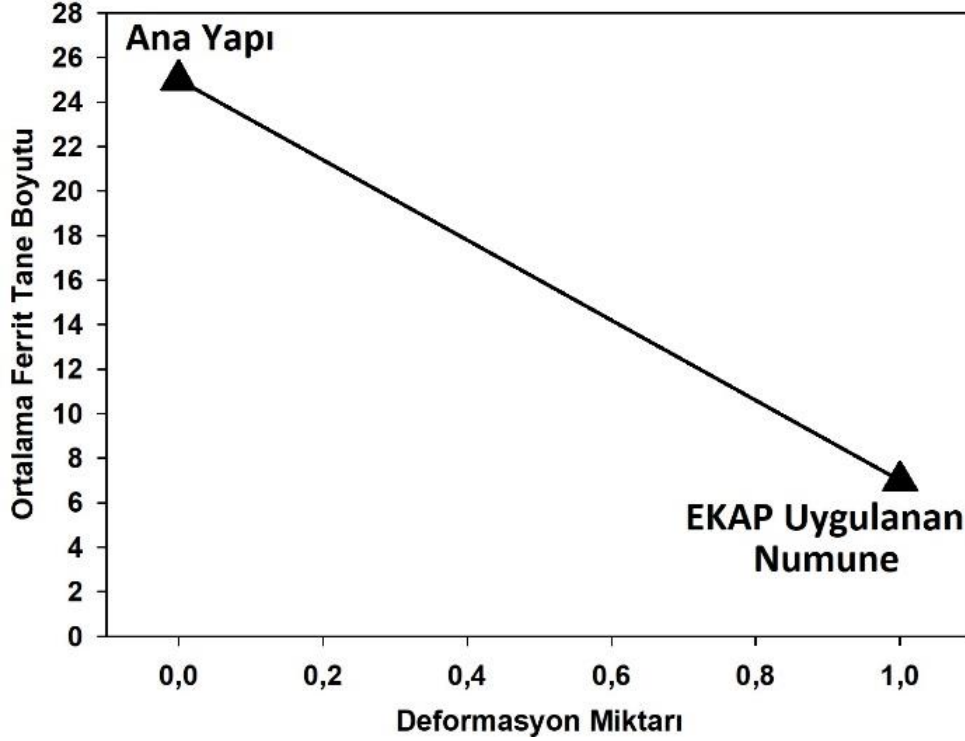


Şekil 3. EKAP sonrası düşük-orta mukavemetli gemi inşaatı çeliğinin içyapı görüntüleri: (a-b) Ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan optik mikroskop ve SEM görüntüsü ve (c-d) Ekstrüzyon doğrultusunda çıkarılan optik mikroskop ve SEM görüntüsü. (Microstructures of low-medium strength shipbuilding steel after ECAP: (a-b) Optical microscope and SEM micrographs taken perpendicular to the extrusion direction and (c-d) Optical microscope and SEM micrographs taken from extrusion direction.)

Tek paso EKAP sonrası malzemeye uygulanan deformasyon miktarı aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir. Formüldeki (Φ) iç açısına 0° değerini, (ψ) dış yay açısı değerini ise 90° değerini girdiğimizde EKAP uyguladığımız kalıp için tek paso sonrasında malzemeye uygulanan deformasyon miktarı yaklaşık 1 olarak elde edilmektedir.

$$\varepsilon = 1/\sqrt{3} [2\cot(\psi/2 + \Phi/2) + \psi \operatorname{cosec}(\psi/2 + \Phi/2)] \quad (1)$$

Değişen deformasyon miktarı ile malzeme tane boyutunda meydana gelen değişim grafiği Şekil 4'de görülmektedir. Görüleceği üzere deformasyon öncesi (0 deformasyon miktarında) $25 \mu\text{m}$ seviyelerinde ölçülen ortalama ferrit tane boyutu tek paso EKAP sonrasında (yaklaşık 1 olarak ölçülen deformasyon miktarı) $7 \mu\text{m}$ seviyelerine kadar inmiştir.



Şekil 4. Değişen deformasyon miktarı ile ortalama ferrit tane boyutundaki değişim grafiği. (Graph of change in average ferrite grain size with varying deformation amount.)

3.2. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

3.2.1. Sertlik ve Mukavemet (Hardness and Strength)

Ana yapı ve EKAP sonrası ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan numuneler ile yapılan sertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir. Ana yapıya ait $130 \text{ Hv}0.5$ sertlik değeri görüleceği üzere EKAP sırasında oluşan yoğun plastik deformasyonun sonucu olarak incelenen tane boyutu ve artan dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak $285 \text{ Hv}0.5$ seviyelerine çıkmıştır (İslamgaliev vd., 2019; Levin vd., 2019). Öte yandan EKAP sonrası çıkarılan numunenin tamamında homojen dağılımlı bir içyapı olduğundan numunenin ölçüm yapılan farklı tüm bölgelerinde sertlik değerlerinin $285 \text{ Hv}0.5$ seviyelerine çıktığı da belirlenmiştir.

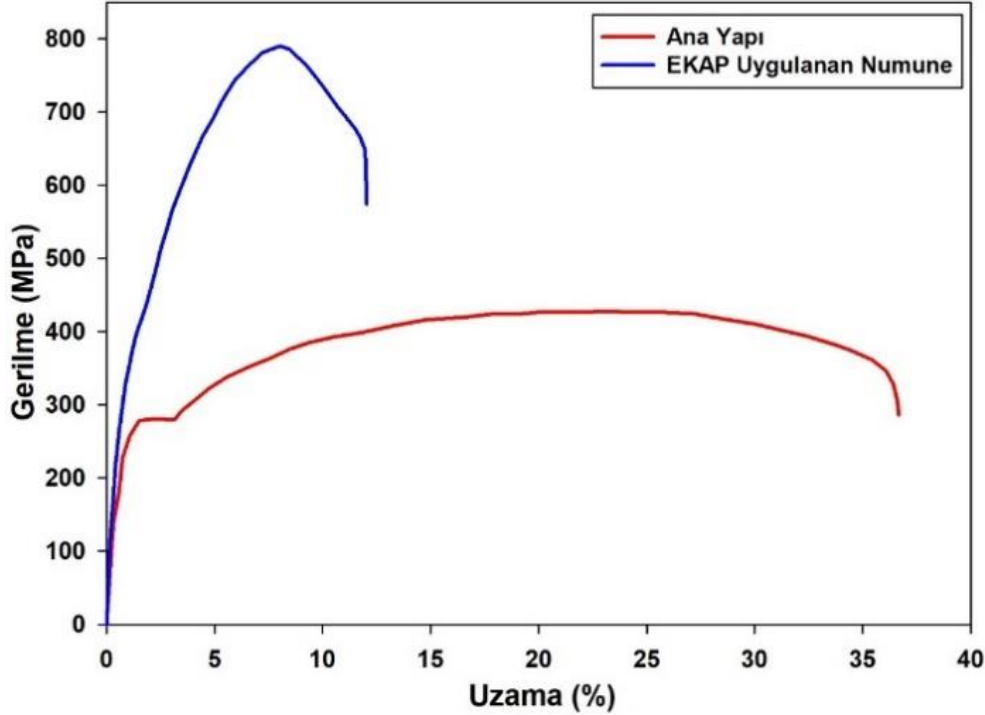
Tablo 1. Ana yapı ve EKAP sonrası numunelerin mikrosertlik değerleri. (Microhardness values of base and ECAPed samples.)

	Ana Yapı	EKAP Uygulanan Numune
Mikrosertlik ($\text{Hv}0.5$)	130 ± 5	285 ± 11

Ana yapı ve tek paso EKAP sonrası yapıya ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 5'de ve bu eğrilerden elde edilen temel mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Görüleceği üzere EKAP sonrası malzemenin mukavemet değerlerinde önemli oranda bir artış yaşanmıştır. Ana yapıda 284 MPa olan akma dayanımı EKAP sonrası 414 MPa seviyesine, 402 MPa olan çekme dayanımı ise 795 MPa seviyesine yükselmiştir. EKAP sonrası mukavemet değerlerinde elde edilen bu radikal artış temelde tane boyutunda meydana gelen incelmeden kaynaklanmaktadır (Kim vd., 2005; Niendorf vd., 2006; Saray vd., 2011). Öte yandan tane boyutunda meydana gelen radikal olmayan bu incelemeye karşın mukavemet değerlerinde yüksek oranda bir artış yaşandığı açıktır.

Bunun nedeninin ise yeniden kristalleşmenin gerçekleşmediği sıcaklık değerlerinde uygulanan EKAP sırasında malzemede meydana gelen yoğun deformasyonun sonucu oluşması beklenen dislokasyon yoğunluğu artışının olduğu düşünülmektedir.

EKAP sonrası çeliğin uzama değerlerinde ise önemli bir oranda azalmanın olduğu ve ana yapıdaki uniform uzama değerinin %21,1'den %8,7'ye ve kopma uzaması değerinin ise %36,4'den %12,7'ye düştüğü belirlenmiştir. EKAP sonrası uzama değerlerindeki bu düşüşe tane incelmeleri sonucu malzemede tane sınırı oranının artmasının neden olduğu düşünülmektedir (Saray vd., 2011). Öte yandan EKAP sonrası olduğu düşünülen dislokasyon yoğunluğundaki artışın da uzamadaki bu düşüşe etki eden bir diğer faktör olduğu düşünülmektedir.



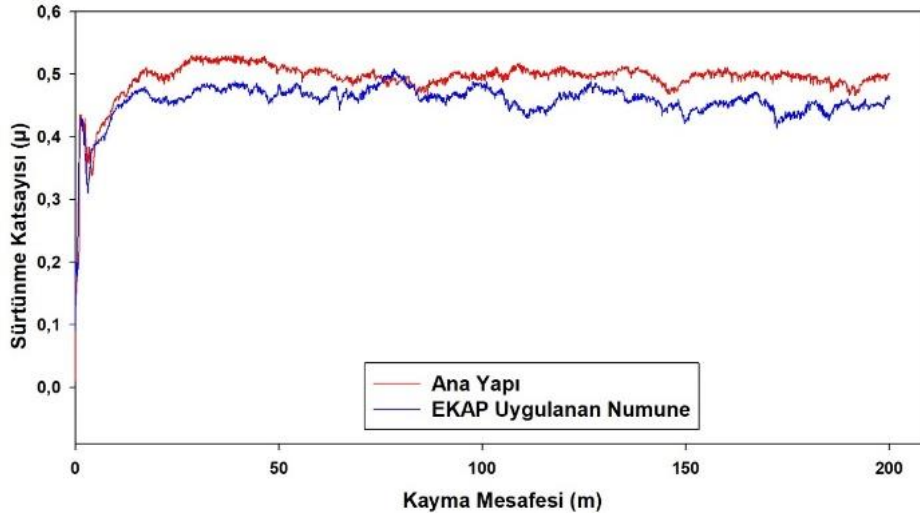
Şekil 5. Ana yapı ve EKAP sonrası numunelere ait mühendislik gerilme-uzama eğrileri. (Room temperature engineering stress-strain curves of base and ECAPed samples.)

Tablo 2. Ana yapı ve EKAP sonrası numunelere ait temel mukavemet ve uzama değerleri. (Main strength and elongation values of base and ECAPed samples.)

Durum	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Uniform Uzama (%)	Kopma Uzaması (%)
Ana Yapı	284 ± 08	402 ± 10	21,1 ± 0,9	36,4 ± 2
EKAP	414 ± 07	795 ± 12	8,7 ± 0,7	12,7 ± 1

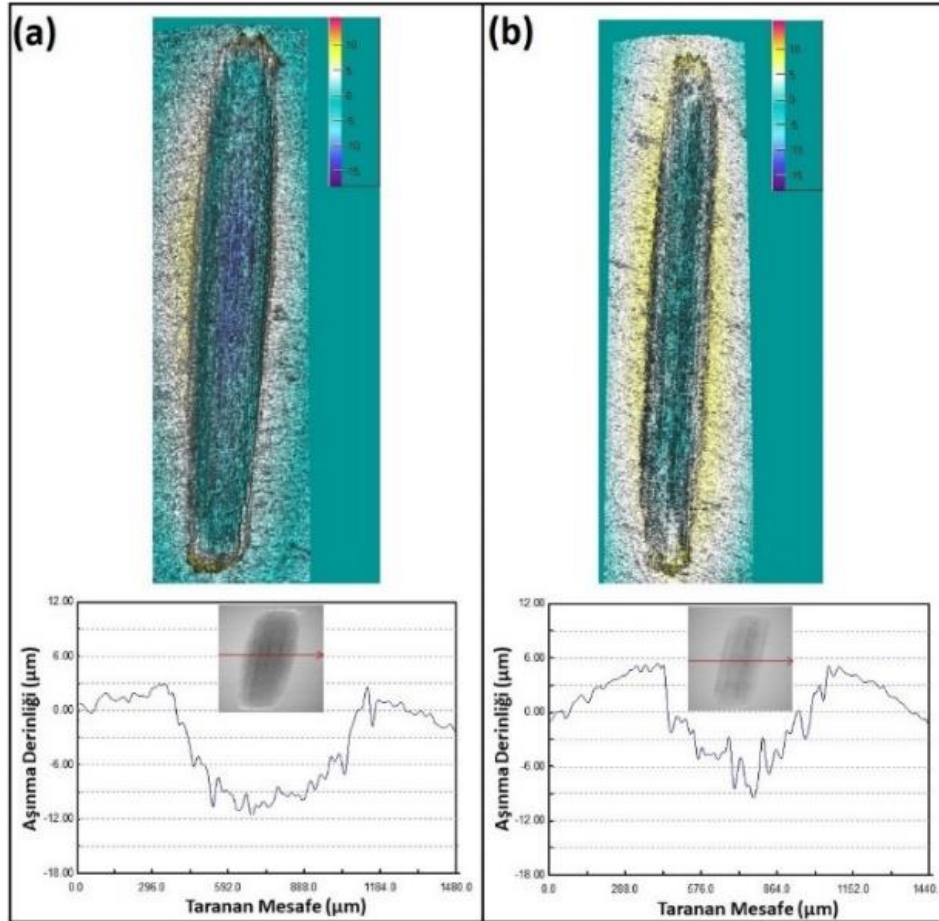
3.2.2. Aşınma (Wear)

Şekil 6'da ana yapı ve tek paso EKAP sonrası yapıya ait sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimini veren eğriler gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde eğrilerin ilk bölümünde sürtünme katsayısı değerlerinin keskin bir şekilde arttığı, daha sonra ise belli saçılımlarla kararlı bir duruma eriştiği görülmektedir. Sürtünme katsayısının kararlı kısma geçtiği bölüm karşılaştırıldığında EKAP sonrası yapının ana yapıya göre bir miktar daha düşük sürtünme katsayısı değerleri gösterdiği görülmektedir. Öyle ki kararlı kısımdaki ana yapıya ait sürtünme katsayısı değeri 0,51'den EKAP sonrası 0,44 değerlerine düşmüştür. EKAP sonrası çeliğin sürtünme katsayısında meydana gelen bu radikal olmayan azalmanın EKAP sonrası malzemenin sertlik ve mukavemet değerlerindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir (Aldajah vd., 2009; Yasavol ve Ramalho 2015). Bilindiği üzere sertlik artışı, aşınma esnasında birbiriyle sürtünen karşılıklı yüzeylerin birbirine nüfuzunu azaltmakta bu da plastik deformasyonun düşmesine neden olarak daha düşük sürtünme katsayılarının elde edilmesine neden olmaktadır (Aldajah vd., 2009; Yasavol ve Ramalho 2015).



Şekil 6. Ana yapı ve EKAP sonrası yapıya ait sürtünme katsayısının kayma mesafesi ile değişimini gösteren eğriler. (The coefficient of friction vs. sliding distance curves for the low carbon steel before and after ECAP.)

Şekil 7'de ana yapı ve EKAP sonrası yapıya ait üç boyutlu aşınma izi görüntüleri ve aşınma derinliği-taranan mesafe eğrileri verilmiştir. 3 boyutlu aşınma izleri ve aşınma derinliği eğrisinden görülebileceği üzere EKAP sonrası numunenin aşınma derinliği azalmıştır. Ayrıca numunelerde kütle kaybı değerleri de ölçülmüş ve bu bulguları destekler sonuçlara ulaşılmıştır. Öyle ki aşınma deneyleri sonrasında ana yapıda meydana gelen 0,8 mg'lık kütle kaybı EKAP sonrasında 0,4 mg değerine düşmüştür. EKAP sonrası çeliğin aşınma direncinin artması veya ağırlık kaybının azalması işlem sonrası elde edilen sertlik ve mukavemet artışından kaynaklanmaktadır. Malzemenin sertlik ve akma mukavemetinde meydana gelen artış, aşınma deneyi sırasında aşındırıcı bilye ile malzeme arasında meydana gelen plastik deformasyona karşı bir direnç oluşturarak malzemenin aşınma dayanımını arttırmaktadır (Huang vd., 2011).

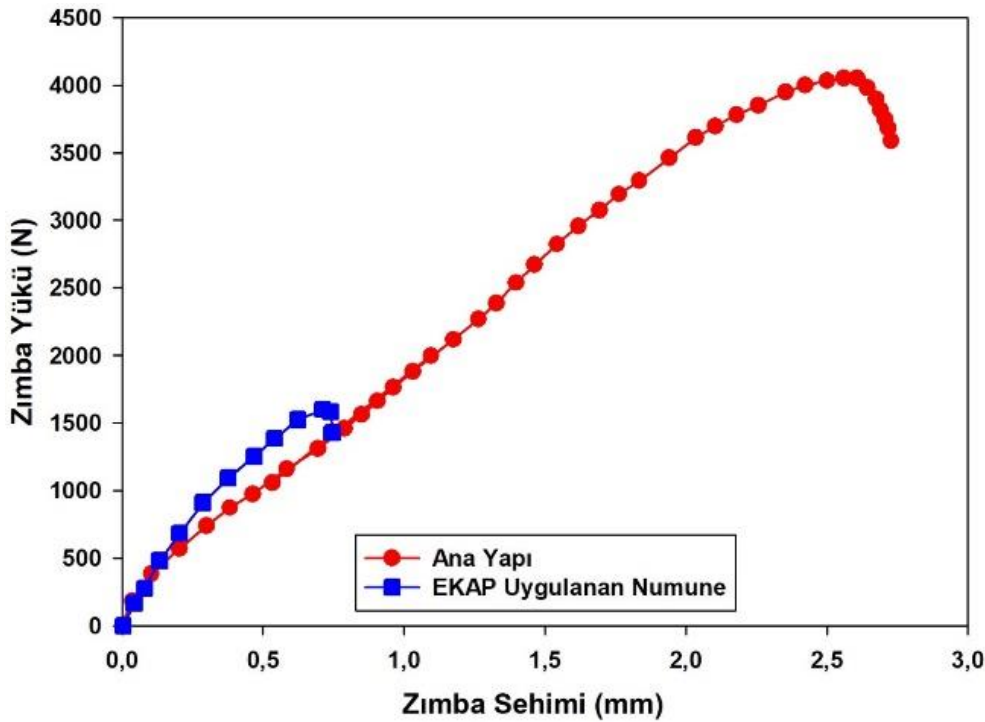


Şekil 7. Ana yapı ve EKAP sonrası yapıya ait üç boyutlu aşınma izi görüntüleri ve aşınma derinliği-taranan mesafe eğrileri: (a) Ana yapı ve (b) EKAP sonrası numune. (3D profilometric view of wear tracts and depth-scanned distance curves of the base and ECAPed structure: (a) Base and (b) ECAPed sample.)

3.2.3. Şekillendirilebilirlik (Formability)

Erichsen şekillendirilebilirlik deneylerinden elde edilen zımba yükü (N) ve zımba sehimi (mm) eğrileri Şekil 8'de gösterilmiştir. Ayrıca bu eğrilerden elde edilen ve numunede çatlakın başlamasına kadar oluşan sehim değerini gösteren Erichsen indeksi (EI) ve bu sehim anındaki zımba basma yükünü veren (F_{EI}) değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Şekil 8 ve Tablo 3'den EKAP sonrası yapının ana yapıya göre zımba sehimi ve zımba yükü değerlerinde önemli bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmektedir. Öyle ki ana yapıya ait 2,62 olan EI değeri tek paso EKAP sonrasında 0,68'e düşmüştür. Diğer taraftan EKAP sonrası yapıda EI değerindeki yüksek oranlı düşüşün bir neticesi olarak çatlakın başladığı andaki zımba yükü (F_{EI}) değeri de ana yapının kine oranla önemli oranda azalmıştır. Nitekim şekil verilebilirlik deneyi sırasında elde edilen gerekli F_{EI} değeri ana yapıda 3974 N iken EKAP sonrasında 1652 N'a düşmüştür.

Bilindiği üzere tek paso EKAP işlemi sonrası yapı oldukça yönlendirilmiş tanelerden oluşmaktadır. Bu yapıdaki dislokasyonların da literatürden belli bir doğrultu üzerinde yığınlar halinde bulunduğu ve buna bağlı olarak sürekli alt tane sınırları oluşturduğu da bilinmektedir (Saray vd., 2013; Saray vd., 2014). Bu sınırlar da nispeten fazla gerilme yığılması bölgeleri oluşturarak çatlak başlangıcı ve ilerlemesine neden olmaktadır (Cheng vd., 2003; Zhao vd., 2011). Bu etki de özellikle iki eksenli gerilmenin uygulandığı deformasyon halinde daha da hissedilir hale gelmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında tek paso EKAP işlemi sonrasında yapıda meydana gelen zımba sehimi ve zımba yükü değerlerindeki düşüşlerin nedenini anlamak mümkün olmaktadır.



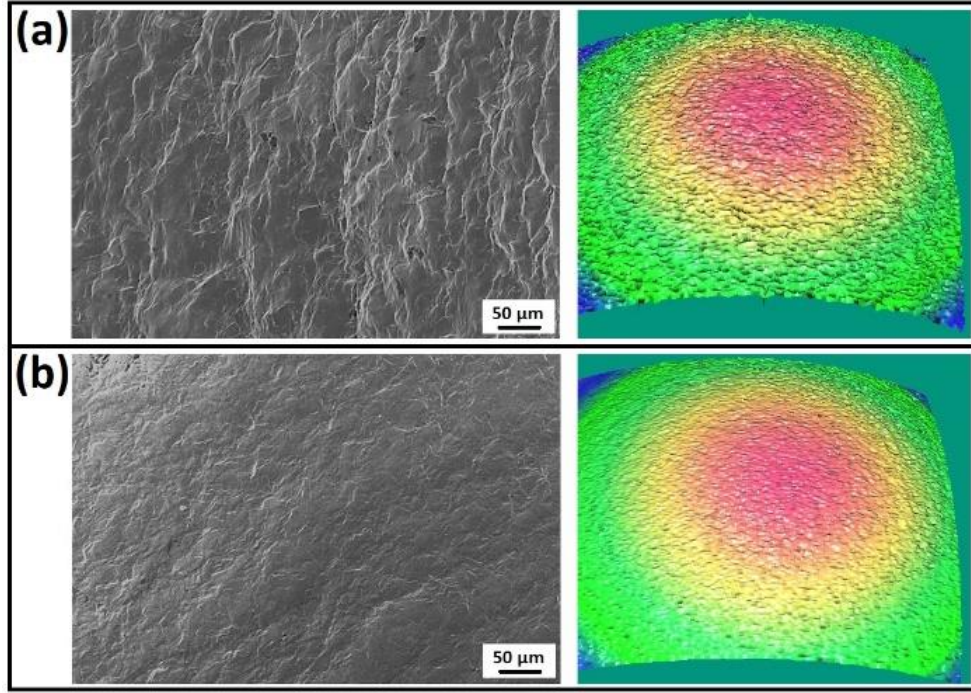
Şekil 8. Ana yapı ve EKAP sonrası yapıya ait zımba yükü – zımba sehimi eğrileri. (Punch load (F)-punch displacement (X) curves of base and ECAPed samples.)

Tablo 3. Erichsen deneyi sırasında ana yapı ve EKAP sonrası yapılardan elde edilen (EI) ve (F_{EI}) değerleri. (Erichsen Index (EI) and punch force (F_{EI}) of base and ECAPed samples.)

Durum	Erichsen İndeksi (EI) (mm)	Çatlak Başlangıcındaki Zımba Yükü (F_{EI}) (N)
Ana Yapı	2,62 ± 0.2	3974 ± 41
EKAP	0,68 ± 0.1	1652 ± 32

Erichsen deneyine tabi tutulmuş numunelerin yüzey SEM görüntüleri ve optik profilometre ile elde edilen üç boyutlu yüzey haritalandırması Şekil 9'da görülmektedir. Görüleceği üzere tek paso EKAP sonrasında Erichsen deneyine tabi tutulan numunelerin yüzey özelliklerinde ana yapıya kıyasla önemli değişimler ortaya çıkmıştır. Öyle ki ana yapıdaki portakal kabuğu etkisi EKAP sonrası numunelerde oldukça azalmıştır. Öte yandan ana yapıda 2,8 μ m seviyesinde ölçülen yüzey pürüzlüğü değeri de tek paso EKAP işlemi sonrasında 1,1 μ m seviyelerine inmiştir. Tek paso EKAP işlemi sonrasında numunelerin yüzey pürüzlüğündeki düşüşe işlem sonrasında meydana

gelen tane incelmesinin ve bu tane incelmesi sonrasında taneler arasındaki kristalografik yönelme farkının azalmasının neden olduğu düşünülmektedir (Becker, 1998). Bilindiği üzere yüzey pürüzlüğü yüzeydeki taneler arasındaki yönelme farkıyla orantılıdır (Becker, 1998; Wouters vd., 2005). Dolayısıyla tane incelmesinin sonucunda kesitteki tane boyutu birbirine yakın olan tane sayısı artarak taneler arası deformasyon uyumsuzluğu azalmakta ve böylelikle de yüzey pürüzlüğü azalmaktadır.



Şekil 9. Erichsen deneyine tabi tutulmuş numunelerin yüzey SEM görüntüleri ve optik profilometre ile elde edilen üç boyutlu yüzey haritalandırması: (a) Ana yapı ve (b) EKAP sonrası yapı. (SEM micrographs of free dome surfaces and 3D profilometric view of dome surfaces of: (a) base and (b) ECAPed samples.)

4. Genel Sonuçlar (General Results and Discussions)

Bu çalışma kapsamında gemi inşaatında kullanılan düşük-orta mukavemetli çeliğe eş kanallı açısız presleme (EKAP) yöntemi uygulanmış ve işlemin içyapı ve çeşitli mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1- Ana yapıda 25 µm seviyelerinde ölçülen ortalama ferrit tane boyutu tek paso EKAP işlemi sonrasında 7 µm seviyesine inmiştir. Öte yandan ekstrüzyon doğrultusuna dik olarak çıkarılan numunelerin büyük oranda eş eksenli tanelerden oluşurken, ekstrüzyon doğrultusunda çıkarılan numunelerin oldukça yüksek en boy oranına sahip ve yönelmiş ferrit ve perlit tanelerinden oluştuğu belirlenmiştir.

2- Ana yapıya ait 130 Hv0.5 sertlik değeri tek paso EKAP sonrasında işlem esnasında oluşan yoğun plastik deformasyonun sonucu olarak, incelen tane boyutu ve artan dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak 285 Hv0.5 seviyelerine çıkmıştır.

3- Tek paso EKAP öncesi ana yapıda 284 MPa olan akma dayanımı tek paso EKAP sonrası tane incelmesi ve muhtemelen dislokasyon yoğunluğu artışının bir sonucu olarak 414 MPa seviyesine, 402 MPa olan çekme dayanımı ise 795 MPa seviyesine yükselmiştir. Öte yandan EKAP sonrası çeliğin uzama değerlerinde ise önemli bir oranda azalmanın olduğu ve ana yapıdaki uniform uzama değerinin %21,1'den %8,7'ye ve kopma uzaması değerinin ise %36,4'den %12,7'ye düştüğü belirlenmiştir.

4- Tek paso EKAP sonrası yapının ana yapıya göre sürtünme katsayısı değerlerinin malzemede meydana gelen sertlik ve mukavemet artışının bir sonucu olarak bir miktar düştüğü ve 0,51 seviyesinden 0,44 seviyesine indiği belirlenmiştir. Ayrıca ana yapıda ölçülen 0,8 mg'lık kütle kaybının EKAP sonrasında 0,4 mg değerine düştüğü saptanmıştır.

5- Ana yapıya ait 2,62 olan EI değeri tek paso EKAP sonrasında oluşan yönelmiş tanelerin çift eksenli gerilme esnasında malzemenin şekil verilebilirlik performansındaki olumsuz etkisi nedeniyle 0,68'e düşmüştür. Diğer

tarafından EKAP sonrası yapıda EI değerindeki yüksek oranlı düşüşün bir neticesi olarak F_{EI} değeri de ana yapının kine oranla önemli oranda azalmıştır. Nitekim şekil verilebilirlik deneyi sırasında elde edilen gerekli F_{EI} değeri ana yapıda 3974 N iken EKAP sonrasında 1652 N'a düşmüştür. Öte yandan şekillendirilebilirlik deneyi sonrasında yüzey pürüzlüğü tek paso EKAP işlemiyle tane inceliğiyle önemli ölçüde azalmıştır.

6- Gemi inşaatında malzemeler hem tek eksenli hem de çok eksenli gerilmelere maruz kalabilmektedir. Bu bağlamda hem tek eksenli gerilme durumunda (çekme eğrisinden) hem de çok eksenli gerilme durumunda (Erichsen şekillendirilebilirlik deneyinden) malzemenin deformasyon kabiliyetinin, meydana gelen pekleşme ile EKAP sonrasında önemli oranda azaldığı belirlenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Çalışma kapsamında laboratuvar imkânlarının kullanılması noktasındaki katkılarından ötürü Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Genççağ PÜRÇEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Aldajah, S.H., Ajayi, O.O., Fenske, G.R., David, S., 2009. Effect of friction stir processing on the tribological performance of high carbon steel. *Wear*, 267(1-4), 350-355.
- Becker, R., 1998. Effects of strain localization on surface roughening during sheet forming. *Acta Materialia*, 46(4), 1385-1401.
- Bhadeshia, H. ve Honeycombe, R., 2011. *Steels: Microstructure and Properties*, Elsevier Science,.
- Cheng, S., Spencer, J.A., Milligan, W.W., 2003. Strength and tension/compression asymmetry in nanostructured and ultrafine-grain metals. *Acta Materialia*, 51(15), 4505-4518.
- Demirtas, M., Kawasaki, M., Yanar, H., Purcek, G., 2018. High temperature superplasticity and deformation behavior of naturally aged Zn-Al alloys with different phase compositions. *Materials Science and Engineering: A*, 730, 73-83.
- Demirtas, M., Purcek, G., Yanar, H., Zhang, Z.J., Zhang, Z.F., 2015. Effect of equal-channel angular pressing on room temperature superplasticity of quasi-single phase Zn-0.3Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 644, 17-24.
- Demirtaş, M., 2017. Çinko-Esaslı Süperplastik Alaşımların Geliştirilmesi ve Yapısal, Mekanik ve Titreşim Sönümlenme Davranışlarının İncelenmesi. Trabzon, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Dobatkin, S.V., Skrotzki, W., Rybalchenko, O.V., Terent'ev, V.F., Belyakov, A.N., Prosvirnin, D.V., Raab, G.I., Zolotarev, E.V., 2018. Structural changes in metastable austenitic steel during equal channel angular pressing and subsequent cyclic deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 723, 141-147.
- Ebrahimi, M., Attarilar, S., Shaeri, M.H., Gode, C., Armoon, H., Djavanroodi, F., 2019. An investigation into the effect of alloying elements on corrosion behavior of severely deformed Cu-Sn alloys by equal channel angular pressing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(3), 842-850.
- Eyres, D.J., 2001. *Ship Construction*, Butterworth-Heinemann.
- Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G., 2001. Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, 36(12), 2835-2843.
- Gholinia, A., Prangnell, P.B., Markushev, M.V., 2000. The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAE. *Acta Materialia*, 48(5), 1115-1130.
- Hayat, F., Uzun, H., 2011. Effect of Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Ship and Dual Phase Steels. *Journal of Iron and Steel Research International*, 18(8), 65-72.
- Horikiri, G., Kitazumi, T., Natori, K., Tanaka, T., 2017. Improvement in mechanical properties of semi-solid AA7075 aluminum alloys by Equal-Channel Angular Pressing. *Procedia Engineering*, 207, 1451-1456.
- Huang, S.J., Semenov, V.I., Shuster, L.S., Lin, P.C., 2011. Tribological properties of the low-carbon steels with different microstructure processed by heat treatment and severe plastic deformation. *Wear*, 271(5), 705-711.
- Islamgaliev, R.K., Nikitina, M.A., Ganeev, A.V., Sitdikov, V.D., 2019. Strengthening mechanisms in ultrafine-grained ferritic/martensitic steel produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 744, 163-170.
- Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G., 1998. The process of grain refinement in equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, 46(9), 3317-3331.
- Kim, H.S., Ryu, W.S., Janeczek, M., Baik, S.C., Estrin, Y., 2005. Effect of Equal Channel Angular Pressing on Microstructure and Mechanical Properties of IF Steel. *Advanced Engineering Materials*, 7(1-2), 43-46.
- Klepaczko, J.R., Rusinek, A., Rodríguez-Martínez, J.A., Peçherski, R.B. ve Arias, A., 2009. Modelling of thermo-viscoplastic behaviour of DH-36 and Weldox 460-E structural steels at wide ranges of strain rates and temperatures, comparison of constitutive relations for impact problems. *Mechanics of Materials*, 41(5), 599-621.
- Langdon, T.G., 2007. The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 462(1), 3-11.
- Levin, Z.S., Brady, B.G., Foley, D.C., Hartwig, K.T., 2019. Recrystallization behavior of tungsten processed by equal channel angular extrusion at low homologues temperature: Microstructure, hardness, and texture. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, accepted manuscript.

- Li, Y., Pang, Ng. H., Jung, H.D., Kim, H.E., Estrin, Y., 2014. Enhancement of mechanical properties of grade 4 titanium by equal channel angular pressing with billet encapsulation. *Materials Letters*, 114, 144-147.
- Maier, G.G., Astafurova, E.G., Maier, H.J., Naydenkin, E.V., Raab, G.I., Odessky, P.D., Dobatkin, S.V., 2013. Annealing behavior of ultrafine grained structure in low-carbon steel produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 581, 104-107.
- Niendorf, T., Canadinc, D., Maier, H.J., Karaman, I., Sutter, S.G., 2006. On the fatigue behavior of ultrafine-grained interstitial-free steel. *International Journal of Materials Research*, 97(10), 1328-1336.
- Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Maier, H.J., 2013. Formability of Ultrafine-Grained Interstitial-Free Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(9), 4194-4206.
- Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Maier, H.J., 2014. Improvement of formability of ultrafine-grained materials by post-SPD annealing. *Materials Science and Engineering: A*, 619, 119-128.
- Saray, O., Purcek, G., Karaman, I., Niendorf, T., Maier, H.J., 2011. Equal-channel angular sheet extrusion of interstitial-free (IF) steel: Microstructural evolution and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 528(21), 6573-6583.
- Segal, V.M., 1999. Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation. *Materials Science and Engineering: A*, 271(1), 322-333.
- Sekban, D.M., Aktarer, S.M., Xue, P., Ma, Z.Y., Purcek, G., 2016. Impact toughness of friction stir processed low carbon steel used in shipbuilding. *Materials Science and Engineering: A*, 672, 40-48.
- Sekban, D.M., Akterer, S.M., Saray, O., Ma, Z.Y., Purcek, G., 2018. Formability of friction stir processed low carbon steels used in shipbuilding. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1), 237-244.
- Shaeri, M.H., Shaeri, M., Salehi, M.T., Seyyedain, S.H., Abutalebi, M.R., 2015. Effect of equal channel angular pressing on aging treatment of Al-7075 alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25(2), 159-168.
- Smirnov, I., Konstantinov, A., 2018. Influence of ultrafine-grained structure produced by equal-channel angular pressing on the dynamic response of pure copper. *Procedia Structural Integrity*, 13, 1336-1341.
- Suresh, M., Sharma, A., More, A.M., Kalsar, R., Bisht, A., Nayan, N., Suwas, S., 2019. Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on the evolution of texture, microstructure and mechanical properties in the Al-Cu-Li alloy AA2195. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, 972-983.
- Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V., 2000. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 45(2), 103-189.
- Valiev, R.Z., Langdon, T.G., 2006. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, 51(7), 881-981.
- Wouters, O., Vellinga, W.P., Tijum, R.V., de Hosson, J.T.M., 2005. On the evolution of surface roughness during deformation of polycrystalline aluminum alloys. *Acta Materialia*, 53(15), 4043-4050.
- Yanxia, G., Aibin, M., Jinghua, J., Dan, S., 2017. Research Progress of Ultrafine-Grained Pure Titanium Produced by Equal-Channel Angular Pressing. *Rare Metal Materials and Engineering*, 46(12), 3639-3644.
- Yasavol, N., Ramalho, A., 2015. Wear properties of friction stir processed AISI D2 tool steel. *Tribology International*, 91, 177-183.
- Zhao, Y., Topping, T., Li, Y., Lavernia, E.J., 2011. Strength and Ductility of Bi-Modal Cu. *Advanced Engineering Materials*, 13(9), 865-871.