



## Farklı Dielektrik Ortamlarda Elektriksel Kıvılcımla İşlenmiş DIN 1.4442 Çift Fazlı Çeliğin Mikroyapı ve Mikrosertlik Değişimleri

*Microstructure and Micro Hardness Variations of Electrical Discharge Machined DIN 1.4442 Dual Phase Steel using Various Dielectric Media*

Nihal Ekmekci

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

### Öz

Elektriksel Kıvılcımla İşleme (EKİ) elektrik yüklü elektrotlar arasında oluşturulan kontrollü ardışık kıvılcımların termal etkilerini kullanan bir malzeme şekillendirme yöntemidir. Bu çalışmada DIN 1.4442 çift fazlı çeliğin EKİ yöntemiyle işlenmesinde kesit mikro yapısı ve sertliğindeki değişimler konu edilmiştir. Farklı dielektrik sıvı, toz katkısı ve takım elektrot malzemeleri denenerek numuneler yüksek darbe enerjisi ile işlenmiş ve derinliğe bağlı mikro sertlik değişimleri ölçülmüştür. Bulgular yeniden katılacak katman kesit mikro yapıları ile birlikte değerlendirilmiştir. Kullanılan takım elektrot malzemesi ya da toz katkılarının bağlı olmaksızın suda işlenen numunelerin yeniden katılacak katman sertliğinin değişmediği görülmüştür. Ancak hidrokarbon temelli dielektrik sıvıda (EKİ yağı) işleme yapıldığında sertlik hızla artmakta ve 850 HV değerine ulaşmaktadır. Takım elektrot malzemesi, dielektrik sıvı ve toz katkıları ise derinliğe bağlı sertlik değişimlerini etkilemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çift fazlı çelik, Elektriksel kıvılcım ile işleme, Mikrosertlik, Mikroyapı

### Abstract

Electrical Discharge Machining (EDM) is a material removal method that uses the thermal effects of successively controlled sparks created between electrically charged electrodes. In the study, the section microstructure and microhardness of EDM'ed DIN 1.4442 dual phase steel were investigated. Different dielectric liquids, powder additives, and electrode tool materials were examined using high pulse energy, and the microhardness depth profiles were measured. The findings are evaluated based on the resolidified layer microstructures. It was observed that the hardness of the resolidified layer has remained unchanged regardless of the used tool electrode materials or the powder additives if machining was conducted in water dielectric liquid. However, when the hydrocarbon-based dielectric fluid was used during machining the microhardness rapidly increases and reaches up to 850 HV. The tool electrode material, the dielectric liquid, and the powder additives affected the depth hardness profile.

**Keywords:** Dual phase steel, Electrical discharge machining, Microhardness, Microstructure

### 1. Giriş

Kıvılcım, elektrik yüklü elektrotlar arasında yer alan yalıtkan ortamın, üzerindeki elektriksel alanı taşıyamadığı anda oluşan düşük dirençli iyonik bir kanal içinden akan ani elektrik boşalımıdır. Doğada sıklıkla görülen yıldırımlar elektriksel kıvılcımlar için bir örnek teşkil eder. Elektrostatik yüklü bulutların oluşturdukları yüksek elektriksel alan, serbest elektronları hızlandırır ve bu elektronlar hava molekülleriyle çarpışarak yeni iyonlar ve serbest elektronlar oluşturur. Yük-

selen elektrik alanı atomik taneciklerin sayısını hızla artırır ve yalıtkan kırılımı adı verilen bir eşik değer aşıldığında oluşan plazma kanalı üzerinden, elektriksel boşalım gerçekleşir. Bu ani boşalım plazma temas yüzeylerinde, yüksek hızda atomik taneciklerin bombardımanı, sıcaklık ve basınç yükselmesi ile sonuçlanır. Elektriksel Kıvılcımla İşleme (EKİ) elektrik yüklü elektrotlar arasında oluşturulan kontrollü ardışık kıvılcımların termal etkilerini kullanan bir malzeme şekillendirme yöntemidir. Bir elektrik darbe üreticiden sağlanan açık aralık gerilimi ile yüklenmiş takım elektrotu ve iş parçası dielektrik sıvı içinde birbirlerine doğru yaklaştırılır. Bu yaklaşma hareketi elektrotlar arasında bulunan sıvının yalıtım direncini düşürür ve kritik eşığa ulaşıldığında

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: nihalekmekci@hotmail.com

kırılma gerçekleşir. Plazma kanalının oluşumuyla elektrotlar arasındaki elektrik gerilimi düşer ve güç kaynağından sağlanan akım, darbe süresi boyunca uygulanır. Elektron ve iyon bombardımanı etkisinde kalan iş parçasının ve takım elektrotunun yüzeylerinde sıcaklık ve basınç aniden yükselir. Ulaşılan bu sıcaklık malzemenin buharlaşma sıcaklığının çok üstündedir ancak plazma kanalındaki yüksek basınç buharlaşmayı engellemektedir. Darbe süresi bittiğinde ise plazma kanalı kapanır, basınç aniden düşer ve kızgın eriyik metal aniden buharlaşır. Buharlaşan malzeme dielektrik sıvı içerisinde katılarak ortamdaki uzaklaştırılır. Benzer biçimde, takım elektrot ve iş parçası yüzeylerinde kalan eriyik malzeme hızla katılır ve geriye mikroskobik kraterler kalır. Hızla uygulanan ardışık kıvılcımlar ve kontrollü ilerleme ile elektrot dişi şekli, iş parçası üzerine bu yöntemle işlenir. Yöntemin termal doğası, iş parçasının sertlik ve mukavemeti gibi mekanik özelliklerinden etkilenmemektedir. Malzemenin termal ve elektriksel özellikleri işleme karakteristiğinde belirleyicidir. İşleme sırasında iş parçası ve takım elektrot arasında kuvvetlerin oluşmaması, karmaşık üç boyutlu geometrilerin sert malzemeler üzerine, narin yapılu takım elektrotlar kullanarak işlenebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bakımdan EKİ yöntemi kalıpcılık başta olmak üzere, savunma ve havacılık endüstrisi gibi yüksek mukavemetli ve sert malzemelerin işlenmesinin kaçınılmaz olduğu alanlarda yoğun biçimde kullanılmaktadır.

Elektrotlar arasında kıvılcım oluşumu, yüksek ısı geçişi, elektrotlar arasında gerçekleşen elektro-kimyasal ve fiziksel değişimler işlem doğasının anlaşılabilmesini güçleştirmektedir. İş parçası yüzeyi, uygulanan ardışık kıvılcımların ısı etkisi ile hızla erimekte ve yeniden katılmaktadır. Katılma dielektrik ortamda ve yoğun allotropik dönüşümler ile birlikte gerçekleşmektedir. EKİ'ye tabi parçalarda, kıvılcım etkisi altında oluşan mikroyapı değişimleri, yöntemin anlaşılması açısından önem kazanmaktadır. EKİ yöntemi ile işlenmiş çeliklerin kesit analizleri, bilinen dağlayıcı asitlere karşı direnç gösteren ve en üstte yer alan beyaz bir katmana işaret etmektedir. Gerçekte bu katman işlem sırasında kullanılan dielektrik sıvı ve takım elektrot malzemesinin etkileri altında yeniden katılan bölgedir. Beyaz tabaka olarak adlandırılan katman, işleme koşullarına ve ortama bağlı olmaksızın oluşmaktadır (Crookall ve Khor 1974). Oluşan bu katman sertliği ise çeliklere su verilerek ulaşılabilecek değerlerden daha yüksektir. Araştırmacılar, hidrokarbon sıvılar kullanılarak çelikler işlendiğinde oluşan beyaz katmanın yapısını, ötektik üstü beyaz dökme demir ledeburit yada tam östenitik yapıyı takip eden östenitik-

sementit matris biçimde tanımlamışlardır (Massarelli ve Marchionni 1977). İşleme sırasında dielektrik sıvıdan yeniden katılan yüzeye yoğun karbon yayılımı gerçekleşmekte ve beyaz katmanın karbon içeriği ana faz malzemeye oranla dokuz kat artmaktadır (Rebelo vd. 1998). Yeniden katılan katman altında, katı fazda kıvılcımın ısı etkisine maruz malzeme, temperlenmiş ince taneli bir mikroyapıya sahiptir ve yeniden katılmış katmana oranla daha serttir (Lim vd. 1991). Bu yapıyı aşırı temperlenmiş bir katman takip eder ve ardından ana faz malzemeye ulaşılır. Özellikle, sertleştirilebilir takım çelikleri bu yöntem ile işlendiğinde martenzit oluşumu yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaşmakta ve sertliği arttırmaktadır. Ancak sertleştirilemeyen çelikler işlendiğinde, beyaz tabakada dentritik taneler gelişmekte ve sertleşme, ana faz malzemesinin kristal yapısına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir (Ghanem vd. 2003).

EKİ yönteminde hidrokarbon sıvılar ile birlikte su da dielektrik işleme sıvısı olarak kullanılmaktadır. Çeliklerin suda işlenmesi beyaz tabakada kalıntı östenit oluşumunu azaltmakta ve yüzeyde oksit oluşumunu hızlandırmaktadır. Takım elektrot malzemesinin seçimi, beyaz tabakada kalıntı östenit oluşumunda etkilidir ve tabakanın mekanik özelliklerini değiştirmektedir (Ekmekci 2007). Katılma sırasında, beyaz tabakada oluşan farklı metalürjik yapılar ve ana faz malzemesinin direngen davranışı yüzeyde yüksek kalıntı gerilmelere (Ekmekci vd. 2006) ve işleme koşullarına bağlı olarak çatlamalara neden olmaktadır (Ekmekci 2009). Farklı dielektrik sıvılar kullanımının yanında, sıvılar içerisine eklenen asılı toz katkı maddelerinin işleme performansına ve işlenen malzeme özelliklerine etkileri, yoğun çalışılan bir araştırma alanı olarak son yıllarda incelenmektedir. Örneğin gazyağına manganez tozu karıştırılarak elde edilen dielektrik ortamda, takım çelikleri bu yöntem ile işlendiğinde, yeniden katılan katman sertliğinin %73 oranında arttığı belirlenmiştir (Kumar ve Singh 2010). Dielektrik sıvıya grafit (Batish vd. 2012) ya da tungsten (Bhattacharya vd. 2013, Gill ve Kumar, 2015) toz katkısı kullanılarak işlenen kalıp çelik yüzeylerinde de benzer sertlik artışları görülmüştür. Yeniden katılmış ve ısı etkilenmiş katmanların uğradığı mikroyapısal değişimler ve sonuçta ortaya çıkan sertlik ayrıca işleme derinliği ve işlem sırasında kullanılan elektriksel parametreler ile de değişmektedir (Zeilmann vd. 2015). Benzer şekilde; karbon çeliklerinin EKİ yöntemiyle işlenmesinde, katkısız dielektrik sıvı ve tungsten karbür (Patowari vd. 2011) ve mangan (Gill ve Kumar, 2016) tozlarının bakır ile sinterlenmesi sonucu elde edilen takım elektrotu kullanıldığında, yeniden katılan

katmanda sertlik değişimleri görülmüştür. Dubleks çelik yüzeylerinde dielektrik sıvı ve takım elektrot malzemelerine bağlı olarak mikro çatlakların oluşum mekanizmaları ana faz malzeme özelliklerinden etkilenmektedir (Ekmekci 2016).

Elde edilen bulgular; EKİ sırasında takım elektrot, dielektrik sıvı ve iş parçası arasında, yüksek sıcaklık altında yoğun malzeme taşınımı gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu tür etkileşimler özellikle yeniden katılacak katman mikro yapısına ve sertliğine etki etmektedir. Özellikle EKİ'ye tabi çift fazlı çeliklerde elde edilen yüzeylerin mikro çatlak oluşum karakteristiğinde görülen farklılaşmalar, yeniden katılacak katman mikro yapısı ve sertliklerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bakımdan, çalışmada ısıl çevrimler ve malzeme taşınım etkisi altında EKİ yöntemi ile işlenen çift fazlı çeliklerin yeniden katılmış katmanlarında gerçekleşen mikro yapı ve mikro sertlik değişimleri incelenmiştir.

## 2. Gereç ve Yöntem

10 mm çapında ve 8 mm uzunluğunda çift fazlı çelik numunelere (Çizelge 1) ilk aşamada gerilim giderme tavi uygulanmış ve ardından yüzeyleri parlatılmıştır. EKİ Ajan CNC Model 983 marka 4 eksenli dalma tip erozyon tezgahı ile yapılmıştır. Tezgahın dielektrik sıvı çevrim sistemi yeniden düzenlenerek farklı dielektrik sıvılarının ve katkı malzemelerinin denenebilmesi için uygun duruma getirilmiştir. İşlemlerde katkısız dielektrik sıvı ile birlikte, sıvıya eklenen katkıların yeniden katılacak katman üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için dielektrik sıvıya 15 g/l SiC toz karıştırılarak işleme yapılmıştır. Böylelikle 8 numuneden oluşan parametrik bir deney dizisi oluşturulmuştur (Çizelge 2).

Ardından numuneler kesit incelemeleri için METKON MICRACUT 201 marka hassas testere ile işleme düzlemine dik biçimde kesilmiştir. Kesilen numuneler 25 mm kalıp seti kullanılarak METKON ECOPRESS 50 marka bakalit presi vasıtasıyla epoksi ile kalıplanmış ve

standart metalografik numune hazırlama aşamalarına tabi tutulmuştur. Bu aşamada numuneler sırası ile 400, 800 ve 1200 kum kâğıt zımparalama işlemi ardından, 6, 1 ve 0.25 µm elmas solüsyonlar ve keçeleri kullanılarak parlatılmıştır. Isıl etkilenmiş katmanlar içerisinde olası karbür oluşumlarının ortaya çıkarılabilmesi için 16g kromik asit, 20 g NaOH ve 145 ml saf su ile dağlama çözeltisi hazırlanmıştır. Bütün numuneler hazırlanan çözelti içerisinde 120 °C sıcaklıkta 20 dakika süre boyunca tutulmuş ve ardından oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Ardından, ana faz mikro yapısının ortaya çıkarılması için oda sıcaklığında 20 saniye süre boyunca numuneler 8.5 g FeCl<sub>3</sub>, 2.4 g CuCl<sub>2</sub>, 122 ml HCl, 6 ml HNO<sub>3</sub>, 122 ml C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O çözeltisine batırılarak dağlanmıştır.

Dağlama işleminin ardından, Metkon IMM 901 model optik mikroskop ile numunelerin kesit görünüşleri alınmıştır. Mikroskop ile bilgisayara görüntü dijital kamera aracılığı ile aktarılabilen ve görüntüler analiz yazılımı ile incelenebilmektedir. Kesit üzerinde derinliğe bağlı sertlik değişimleri Shimadzu marka HVM-G21 model Vickers mikro sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. İzler 20 sn süre boyunca 5g yük uygulanarak elde edilmiştir.

## 3. Bulgular

### 3.1. Toz Katkısız Elektriksel Kıvılcım ile İşlemede Kesit Mikroyapısı

Üst üste binmiş krater benzeri geometrik şekiller kıvılcımlarla işlenmiş yüzeyleri en basit şekli ile tanımlamaktadır. İş parçası yüzeyine etkileyen her bir kıvılcım, içerdiği enerji ve etkiye süresine bağlı karakteristik bir krater oluşturur. Hızlı ve yoğun termal çevrimlerin etkisi altında işlenen yüzey ergimekte ve ardından hızla katlaşmaktadır. Saf suda bakır takım elektrot kullanılarak işlenmiş çift fazlı çeliklerin kesit mikro yapısı incelendiğinde (Şekil 1a) yeniden katılacak katmanın kullanılan dağlama çözeltisine tepki vererek, mikro yapısını açığa çıkardığı görülmüştür. Katman nispeten homojen kalınlıktadır ve ana faz malzemesine doğru

**Çizelge 1.** Numunelerin kimyasal bileşimi (wt %).

Malzeme	C	Cr	Ni	Mo	Mn	P	S
DIN 1.4442	0.03	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	2.0	0.035	0.015

**Çizelge 2.** EKİ işleme parametreleri.

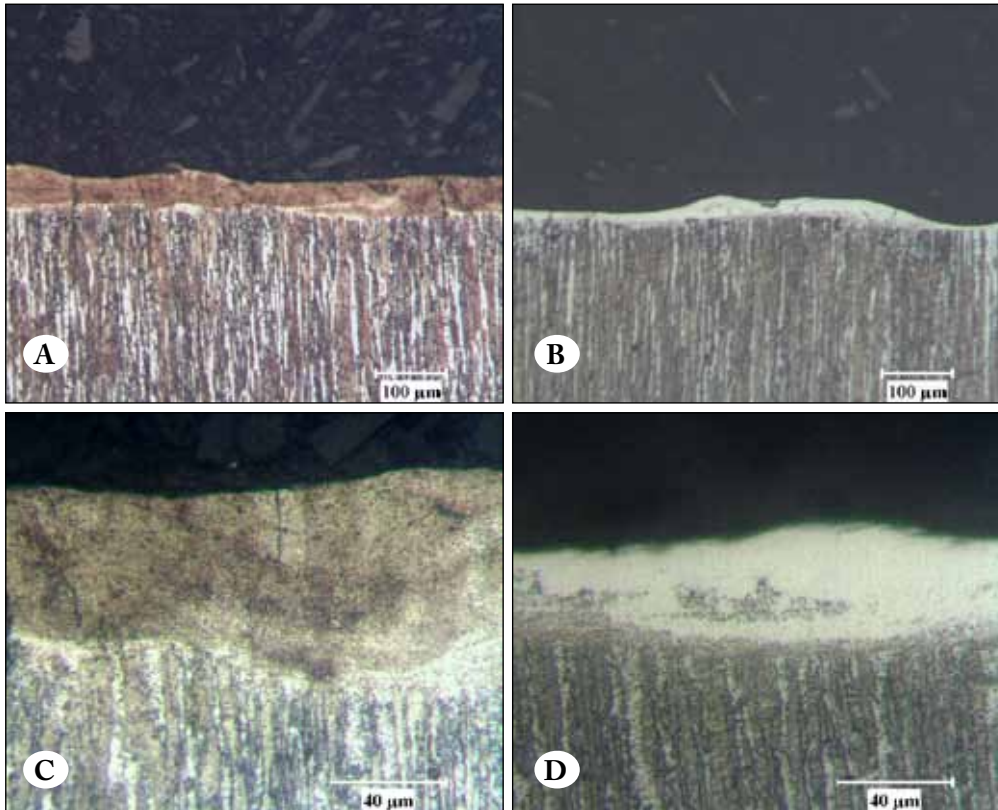
Darbe süresi (µs)	Darbe Akımı (A)	Polarite	Takım Elektrot	Dielektrik Sıvı
400	42	+	Bakır, Grafit	Deiyonize su, EKİ yağı

yönelmiş çatlaklara rastlanmaktadır. İşlemede grafit takım elektrot kullanıldığında ise durum ilgi çekicidir (Şekil 1b). Yeniden katılan katman, kullanılan dağlama çözeltilisine tepki vermediği için beyaz görünümünü korumaktadır. Ayrıca, kalınlığı da değişkenlik göstermektedir. Elde edilen bu sonuç özellikle takım elektrotunun yeniden katılan katmanın mikro yapısı üzerindeki etkisini ortaya koyması açısından dikkat çekicidir.

İşleme sırasında takım elektrot malzemesinden yüzeye plazma kanalı aracılığı ile iyonlar taşınmakta ve eriyik malzemeye nüfuz etmektedir. Taşınan bakır iyonları ile zenginleşen eriyik metalin termal özelliklerinin de değiştiği düşünülebilir. Ancak böylesine bir yaklaşım, yeniden katılan katman kalınlığındaki artışın açıklanması açısından yetersizdir. Çünkü bakır açısından zenginleşen malzemenin ısı iletim katsayısının artması beklenir ve bu yönde bir artış yeniden katılan katman kalınlığının azalması ile sonuçlanır. Bu durumda takım elektrot malzemesinin etkisi, elektriksel boşalmanın gerçekleştiği anda oluşan plazma kanalının özellikleri ile ilişkilendirilebilir. Plazma kanalındaki bakır iyonları, ısı enerjisinin iş parçasına daha yüksek verimlilikte aktarılmasını sağlayarak yeniden katılan katman kalınlığını yükseltmektedir.

Yeniden katılan katman daha yüksek büyütmede incelendiğinde, bakır takım elektrot kullanımı ile katmanın ince taneli yapısı ortaya çıkmaktadır (Şekil 1c). Özellikle katı fazda dönüşüme uğramış bölgeye yaklaşıldığında katmanlar arası geçiş bölgesi belirginleşmektedir. Katı fazda dönüşüme uğramış katman kalınlığı düşüktür (~3 µm) ve ana faz malzemesinin genel mikro yapısı bu katmanı takip etmektedir. Grafit takım elektrot kullanıldığında yeniden katılan katmanın tane yapısı belirsizdir ve ince ısı etkilenmiş yapı bu katmanı takip etmektedir (Şekil 1d). Yeniden katılan katman kalınlığının azaldığı bölgelerde katı fazda işlemin ısı etkisi ile dönüşüme uğramış bölgenin kalınlığı artmaktadır. Ayrıca, krater çeperlerine yığılarak kalınlaşma eğilimi gösteren yeniden katılan katman yer yer dağlama çözeltilisine tepki vererek iç yapısını ortaya çıkarmıştır.

EKİ hidrokarbon bazlı dielektrik sıvıda yapıldığında, yeniden katılan katmanın genel görünümü hızla değişmektedir. Katman kalınlığı kesit boyunca belirli bölgelerde kalınlaşmaktadır (~50 µm). Ancak, eriyik metal yığılmalarının dışında kalan bölgelerde katman kalınlığı incelmektedir (~1 µm). Bakır takım elektrot ile işleme yapıldığında (Şekil 2a) belirgin yığılmalar, içerisinde gaz



**Şekil 1.** Suda EKİ ile işlenmiş çift fazlı çeliklerin kesit görüntüleri. **A)** Bakır takım elektrot kullanarak işlemede genel görünüm **B)** Grafit takım elektrot kullanarak işleme genel görünüm **C)** Bakır takım elektrot kullanarak işleme de yeniden katılan ve ısı etkilenmiş katmanlar **D)** Grafit takım elektrot kullanarak işleme de yeniden katılan ve ısı etkilenmiş katmanlar.

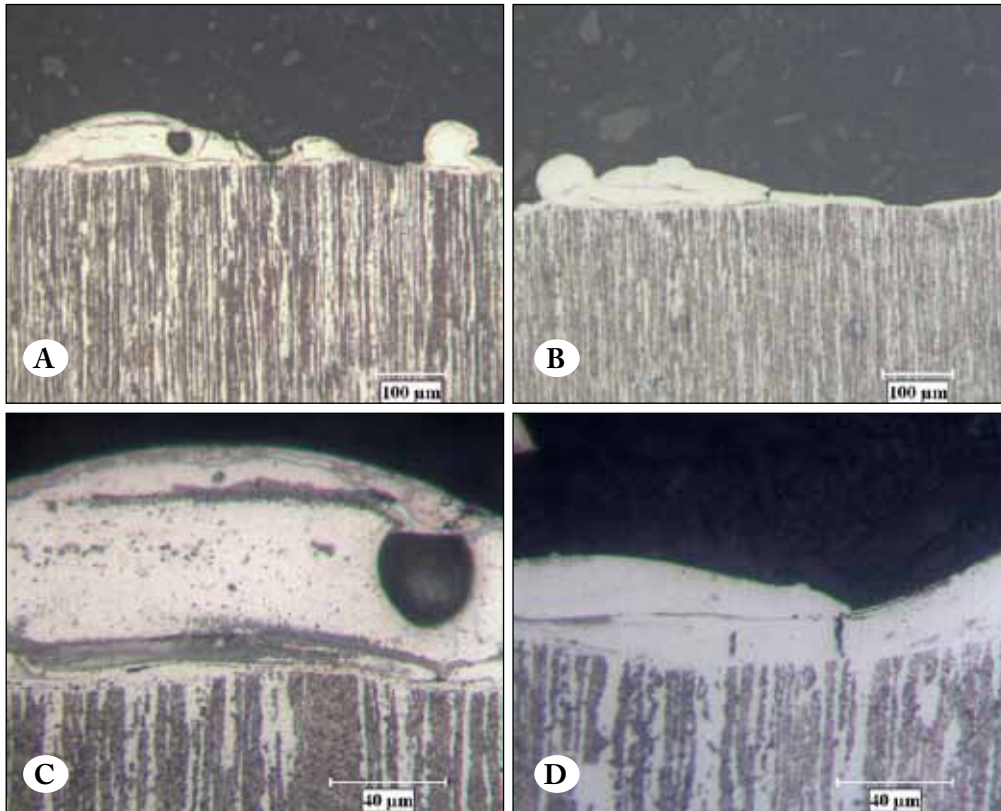
boşlukları, yığılma kenarlarında küre benzeri oluşumlar ile karşılaşılmıştır. Grafit elektrot kullanımı ile yeniden katılan katmanın ortalama kalınlığının düştüğü ancak bakır elektrot kullanımına benzer şekilde geometrik yapıların oluştuğu görülmektedir (Şekil 2b). Yığılma bölgelerde yapılan incelemeler (Şekil 2c) hızlı ısı çevrimleri sonucunda meydana gelen tane yönelmelerini göstermektedir. Eriyik metal işlem sırasında akarak üst üste binmiş yapılar oluşturmuştur (Şekil 2d). Çubuksu taneler ısının çekildiği doğrultuyu göstermektedir. Yakın bir noktada atan bir kıvılcım, katman üzerine eriyik metal akışına sebep olmakta ve yüksek sıcaklıktaki eriyik metalin ısı etkisi altında tekrar dönüşüme uğramaktadır. Yeniden katılan katmanı takip eden ve katı fazda dönüşümleri gösteren ısı etkilenmiş katman, daha önce incelenen örneklerde olduğu gibi incedir ve ana faz malzemesi bu katmanı takip etmektedir.

Yeniden katılan katmanda şekillenen gaz boşluğunun işlem sırasında eriyik metalin hacimsel kaynaması sırasında ani katılma sonucu oluştuğu düşünülebilir. Ancak, böyle bir durumda yeniden katılan katman içerisinde daha fazla sayıda benzer boşluklar ile karşılaşılması gerekirdi. Ayrıntılı incelemeler, bu tür boşluk oluşumlarının daha çok krater yanaklarında eriyik metalin akışı sırasında hapsedilen gazlar ile gerçekleştiği sonucunu öne çıkarmaktadır. Hapsedilen gaz

kıvılcımın etki ettiği süre boyunca genişmekte ve etki süresi sonunda aniden çökmektedir. Yeniden katılan katmanda oluşan mikro çatlaklar değerlendirildiğinde ise, suda işlenen numunelerde çatlak genişliğinin düşük ve katman içerisinde sonlandığı görülmektedir. Yağda işlenen numunelerde ise çatlak genişlikleri daha büyüktür. Numunelerin kesit görüntüleri detaylı biçimde incelendiğinde yer yer bu çatlakların ana faz malzemesine doğru nüfuz ettikleri görülmüştür.

### 3.2. Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcım ile İşlemede Kesit Mikro Yapısı

Dielektrik sıvıya eklenen toz katkılarının işlemede malzeme kaldırma hızını değiştirdiği bilinmektedir. İşlenen yüzeyin yapısı üzerindeki etkileri ise daha çok ısı etkilenmiş katman kalınlıklarındaki değişimlerle açıklanmaktadır. Suda SiC toz katkısı ve bakır takım elektrot kullanılarak işlenen yüzeylerde yeniden katılan katman, toz katkısız suda işlenenlerle benzer özellikler gösterir (Şekil 3a). Ancak ortalama katman kalınlığı (~36 µm) nispeten düşüktür. Toz katkılı EKİ grafit takım elektrot ile yapıldığında (Şekil 3b) sonuçlar yine katkısız işleme ile benzerlik gösterir. Yeniden katılan katman yağda işlemeye oranla yüzeye daha homojen yayılmıştır ve genel olarak tek katmanlı bir



**Şekil 2.** Yağda EKİ ile işlenmiş çift fazlı çeliklerin kesit görüntüleri  
**A)** Bakır takım elektrot kullanarak işleme  
**B)** Grafit takım elektrot kullanarak işleme  
**C)** Bakır takım elektrot kullanarak işleme de yeniden katılan ve ısı etkilenmiş katmanlar  
**D)** Grafit takım elektrot kullanarak işleme de yeniden katılan ve ısı etkilenmiş katmanlar.

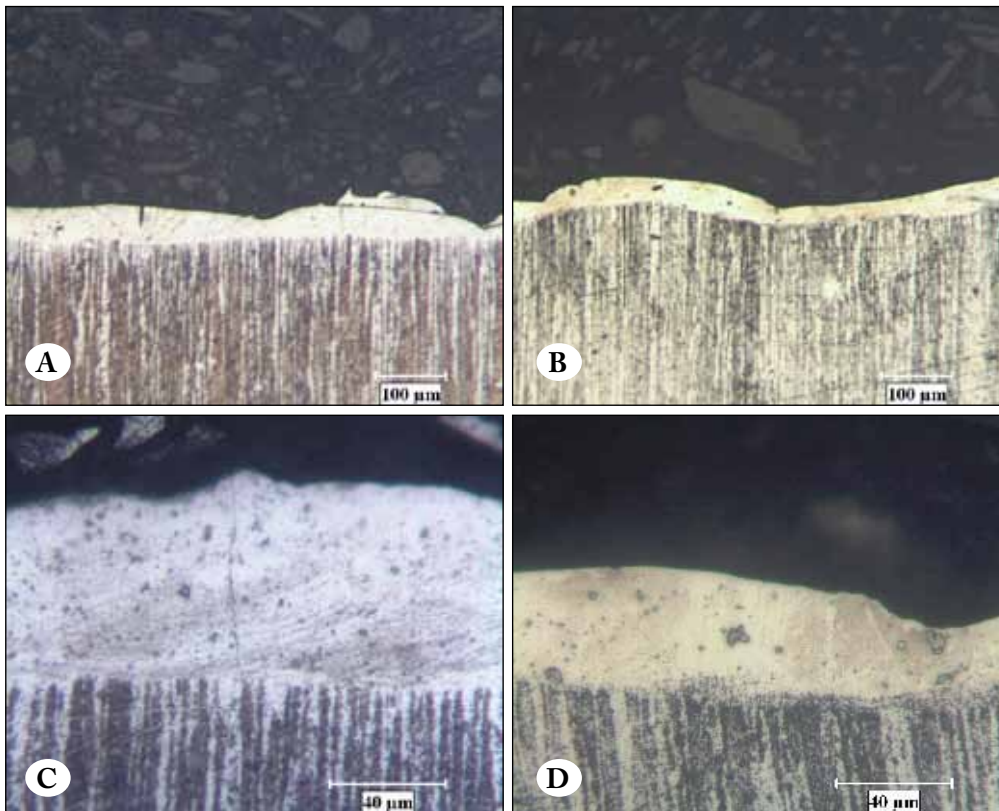
görünüm sergiler. Bakır takım elektrot kullanılarak işlenen numune daha yüksek büyütme ile incelendiğinde (Şekil 3c) ısı çevrimlerin neden olduğu yönelmeler görülmektedir. Katılaştıran katman içerisinde var olan ince mikro çatlakların sayısı azalsa da dielektrik sıvıya eklenen toz katkılarının, mikro çatlak oluşumu üzerinde beklenen etkiyi sağlamadığı görülmektedir. Grafit takım elektrot kullanıldığında ise mikro çatlakların oluşumu büyük oranda baskılanmıştır (Şekil 3d). Çatlama oluşumunda ortaya çıkan bu farklılık toz katkısının katılma mekanizması üzerinde etkili olduğuna işaret etmektedir. Grafit takım elektrot ve dielektrik sıvıya eklenen toz katkıları, katılma sırasında oluşan dönüşüm gerilmelerini düşürmektedir.

Hidrokarbon bazlı dielektrik sıvıya SiC toz katkısı ile işleme yapıldığında, yeniden katılaştıran katman kalınlığı değişkendir. Bakır (Şekil 4a) ya da grafit takım elektrot (Şekil 4b) kullanımı sonucu değiştirmemektedir. Ancak, bakır elektrot kullanıldığında (Şekil 4c) yeniden katılaştıran katmanın dağlama çözeltisine daha yüksek oranda tepki verdiği görülmektedir. Katman içerisinde mikro çatlak oluşumu büyük oranda azalmıştır. Ancak, grafit takım elektrot kullanımı (Şekil 4d) düşük oranda olsa da yeniden katılaştıran katmanda mikro çatlak sayısını artırmaktadır.

İncelenen her numune için yeniden katılaştıran katman kalınlığı en az 20 farklı noktada ölçülerek ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 3). Sonuçlar, katkısız su da bakır takım elektrot kullanılarak yapılan işlemenin, grafit elektrotu kullanımına göre, yeniden katılaştıran katman ortalama kalınlığını %28 oranında arttırdığını ortaya koymaktadır. Benzer bir sonuç suya SiC toz katkısı eklendiğinde de geçerlidir ve ortalama katman kalınlığında ölçülen artış %50'yi geçmektedir. EKİ yağda yapıldığında ise ortalama katman kalınlıkları, takım elektrot malzemesinden ya da dielektrik sıvıya eklenen toz katkılarından etkilenmemektedir. Yeniden katılaştıran katman kalınlığındaki değişimler %15'den daha küçüktür.

### 3.3. Mikro Sertlik

Yeniden katılaştıran katman kalınlığının inceliği ve EKİ yönteminin doğasında barındırdığı karmaşık fiziksel olgular, değişime uğramış yüzeyin mikro sertliğinin incelenebilmesini güçleştirmektedir. Mikro sertlik ölçümlerinde, farklı işleme koşulları için karşılaştırılabilir sonuçların elde edilebilmesi önem taşımaktadır. Bu bakımdan, incelenen bütün numunelerin kesit yüzeylerinde, yeniden katılaştıran katman kalınlığının ortalama kalınlık değerine en yakın kalınlığa sahip bölgelerde sertlik ölçümleri yapılmıştır. İncelenen



**Şekil 3.** Suda 15 g/l SiC toz katkılı EKİ ile işlenmiş çift fazlı çeliklerin kesit görüntüleri. **A)** Bakır takım elektrot kullanarak işleme **B)** Grafit takım elektrot kullanarak işleme **C)** Bakır takım elektrot kullanarak işlemede yeniden katılaştıran ve ısı etkilenmiş katmanlar **D)** Grafit takım elektrot kullanarak işlemede yeniden katılaştıran ve ısı etkilenmiş katmanlar.

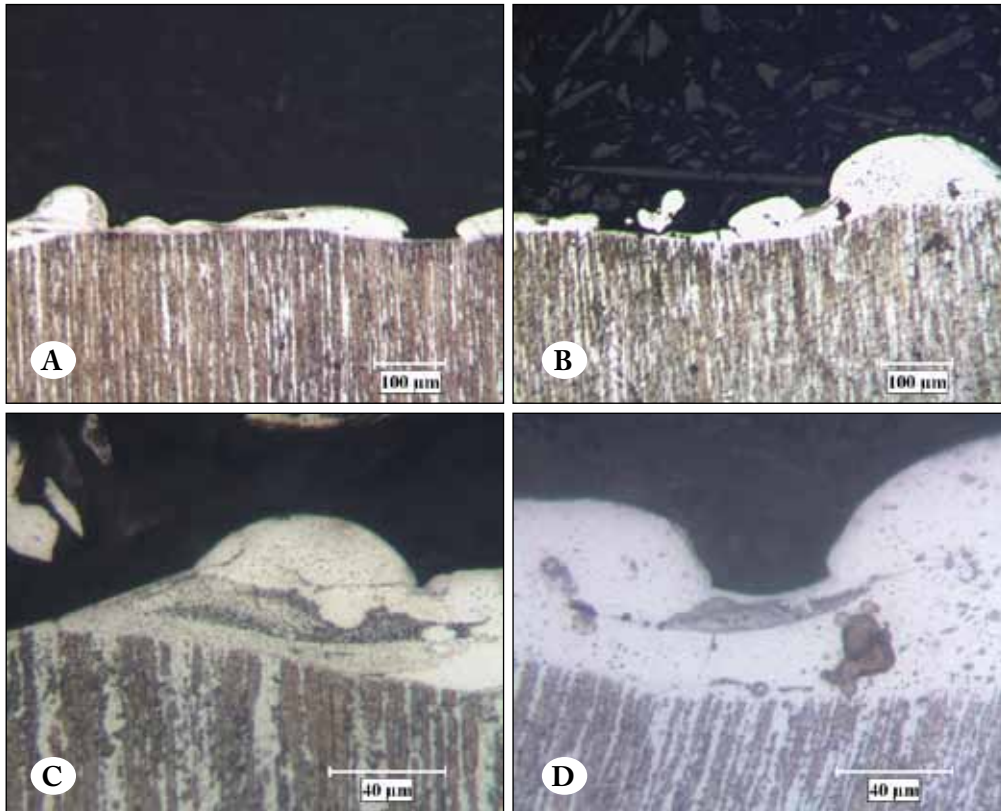
yüzeylerde sertlik iz boyutlarının doğru ölçülebilmesi ve ölçüm yapılan bölgenin mikro yapısının ayırt edilebilmesi amacıyla, numuneler daha düşük (~3 saniye) sürelerde dağlanmıştır.

Toz katkısız ve toz katkılı EKİ su dielektrik sıvısı kullanılarak yapıldığında, yeniden katılan katman sertliği, ana faz malzeme sertliğine göre değişimler göstermemektedir (Şekil 5). Toz katkıları ile birlikte, işleme sırasında kullanılan takım elektrot malzemesi içinde aynı sonuç söz konusudur. Saf demir ve östenitik çelik iş parçası kullanıldı-

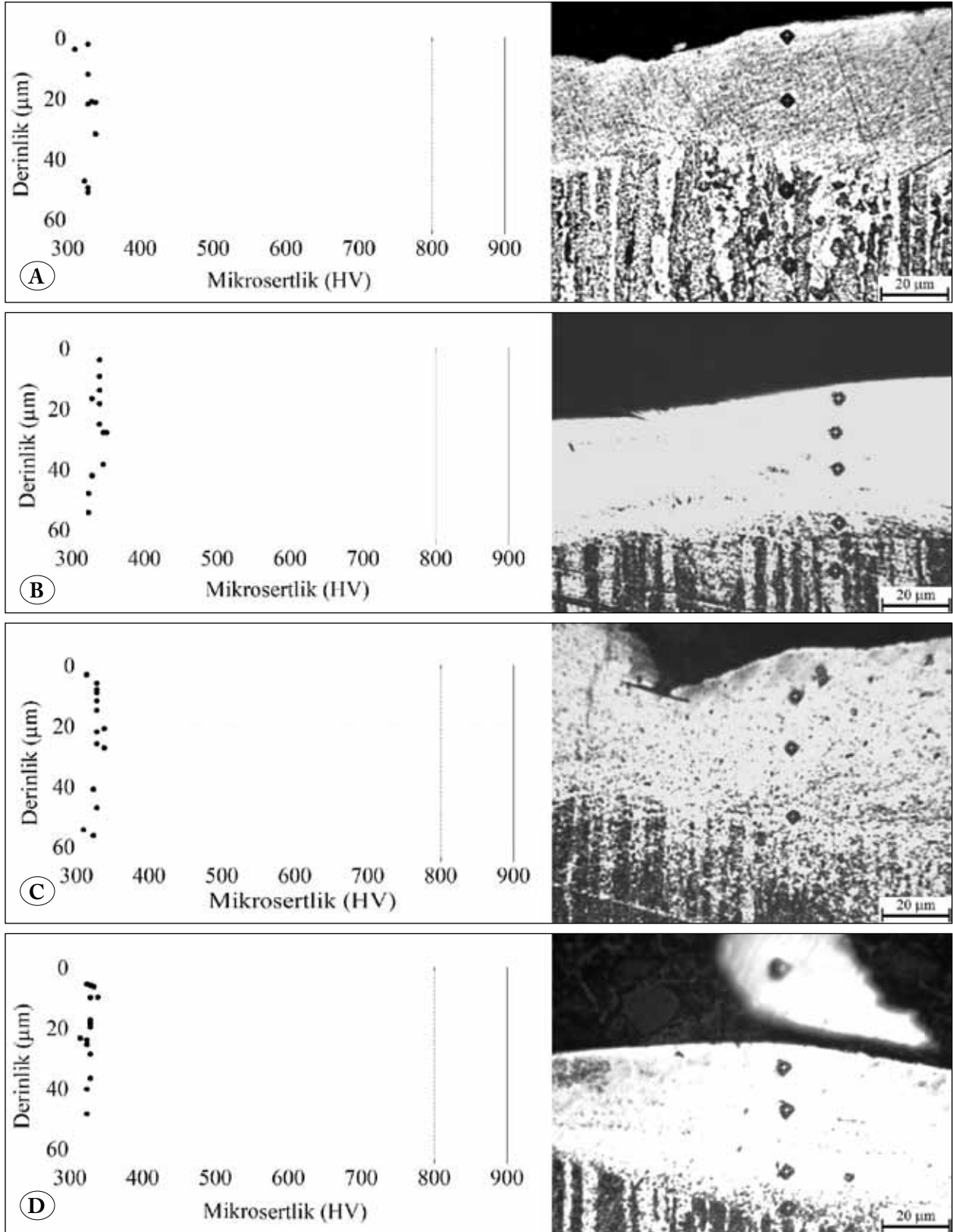
ğında, yeniden katılan katmanda sertlik düşüşleri, ferritik çeliklerde ise ana faz malzeme sertliğinden çok daha yüksek sertlik değerleri daha önce yapılan çalışmalarda ölçülmüştür (Ghanem vd. 2003). Bu açıdan çift fazlı çeliklerde bir denge durumunun olduğu görülmektedir. Östenitik taneler azalırken ferritik taneler sertleşmektedir. Yeniden katılan katman ince yapılı tanelerden oluştuğundan, sertlik ölçümleri dengelenen koşullar altında sonuç üretmekte ve sertlik değişimleri ortalama sertlik değerlerine göre  $\pm 5$  HV sapma göstermektedir. Ölçümlerin, yeniden katılan katmanın

**Çizelge 3.** Yeniden katılan katmanın ortalama kalınlıkları ve standart sapma değerleri.

Dielektrik sıvı	Toz Katkısı	Takım Elektrot	Katman Kalınlığı (ortalama, $\mu\text{m}$ )	Standart Sapma ( $\mu\text{m}$ )
Su	Katkısız	Bakır	44	12
Su	Katkısız	Grafit	36	16
Su	15 g/l SiC	Bakır	58	18
Su	15 g/l SiC	Grafit	34	10
Yağ	Katkısız	Bakır	35	15
Yağ	Katkısız	Grafit	36	16
Yağ	15 g/l SiC	Bakır	36	17
Yağ	15 g/l SiC	Grafit	41	20

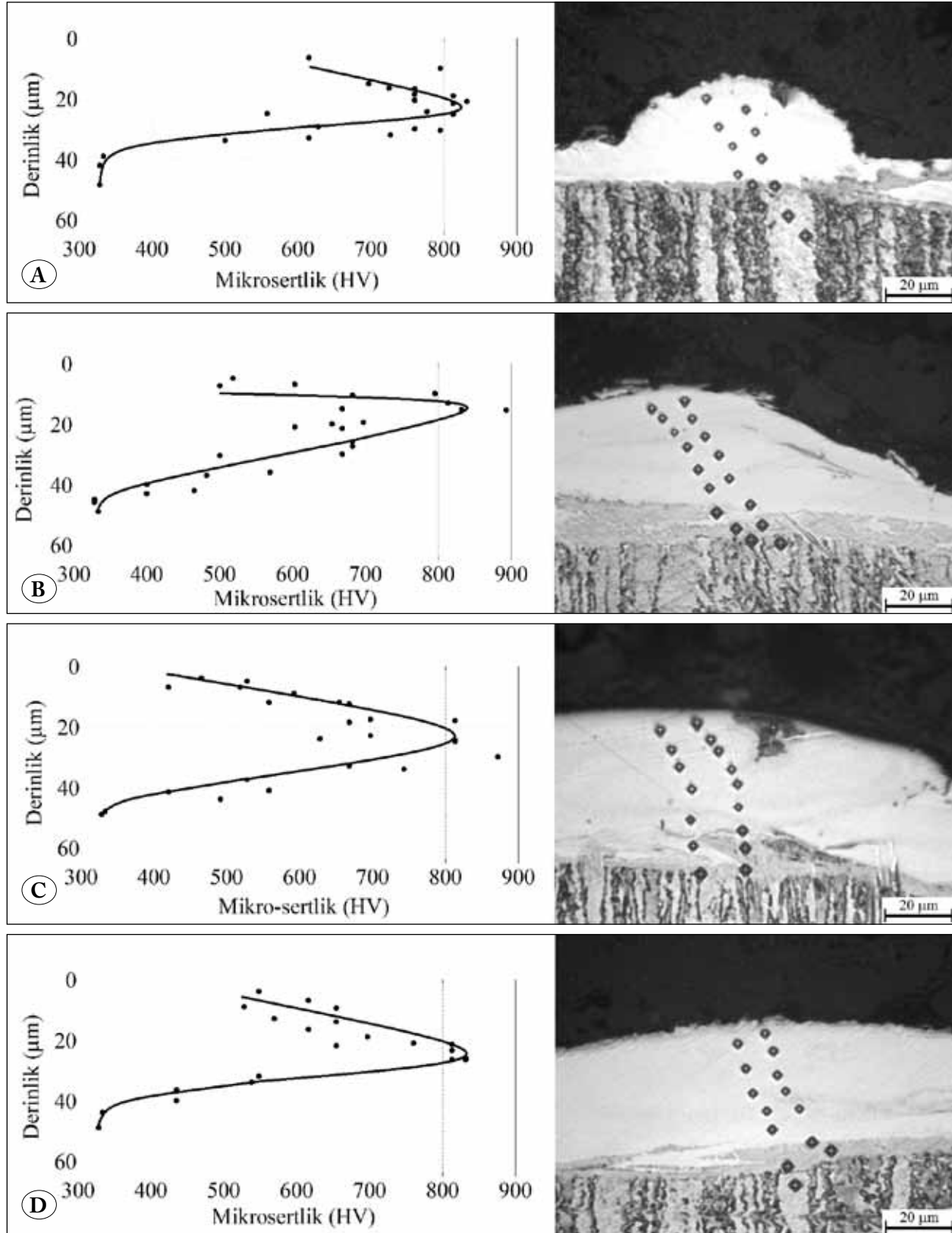


**Şekil 4.** Yağda 15 g/l SiC toz katkılı EKİ ile işlenmiş çift fazlı çeliklerin kesit görüntüleri. **A)** Bakır takım elektrot kullanarak işleme **B)** Grafit takım elektrot kullanarak işleme **C)** Bakır takım elektrot kullanarak işlemede yeniden katılan ve ısıl etkilenmiş katmanlar **D)** Grafit takım elektrot kullanarak işlemede yeniden katılan ve ısıl etkilenmiş katmanlar.



**Şekil 5.** Toz katkısız ve katkılı suda EKİ ile işlenmiş çift fazlı çeliklerde mikro sertlik değişimleri. **A)** Toz Katkısız suda bakır takım elektrot kullanarak işleme. **B)** Toz Katkısız suda grafit takım elektrot kullanarak işleme. **C)** 15 g/l SiC toz katkılı suda bakır takım elektrot kullanarak işleme. **D)** 15 g/l SiC toz katkılı suda grafit takım elektrot kullanarak işleme.





**Şekil 6.** Yağda toz katkısız ve katkılı EKİ ile işlenmiş çift fazlı çeliklerde mikro sertlik değişimleri. **A)** Toz Katkısız yağda bakır takım elektrot kullanarak işleme. **B)** Toz Katkısız yağda grafit takım elektrot kullanarak işleme. **C)** 15 g/l SiC toz katkılı yağda bakır takım elektrot kullanarak işleme. **D)** 15 g/l SiC toz katkılı yağda grafit takım elektrot kullanarak işleme.

yüze ya da ana faz malzemesine yakın bölgelerden alınmış olması sonucu değiştirmemektedir.

EKİ hidrokarbon dielektrik sıvıda yapıldığında ise yeniden katılan katman 850 HV sertliğine ulaşabilmektedir (Şekil 6). Dielektrik sıvı ile temas eden bölgeler nispeten düşük sertlikte ve ana faz malzemeye doğru yöneldikçe sertlik hızla artmaktadır. Genel olarak yüzeyden 20 ila 30 µm derinlikte en yüksek değerine ulaşmakta ve bir tepe oluşumunun ardından düşmektedir.

Toz katkısız EKİ ile işlemede dielektrik sıvıda bakır takım elektrot kullanıldığında yüzey sertliği 600 HV sertliğine ulaşmakta ve yüzeyden 20 ile 25 µm derinlikte en yüksek değerine ulaşmaktadır. Yüzeyden 30 µm derinlikte ani bir düşüş gerçekleşmekte ve 40 µm derinliğe ulaşıldığında ana faz malzeme sertliğine ulaşılmaktadır (Şekil 6a). Grafit takım elektrot kullanıldığında ise en yüksek sertlik değeri yüzeye daha yakın bölgelerde ölçülmüştür. Bakır takım elektrot kullanımı ile karşılaştırıldığında ana faz malzemesine doğru sertlikteki düşüş oransaldır (Şekil 6b).

Yeniden katılan katman ile ana faz malzemesi arasında yer alan ve katı fazda dönüşüme uğrayan bölgenin daha kalın olmasından ötürü sertlik oransal biçimde düşmektedir. Karbon elementiyile zenginleşen eriyik metalin henüz katılmamış metal üzerine akışı üst üste binen yapıları oluşturmaktadır. Tekrarlı ısıl etkilerin söz konusu olduğu bu bölgelerde sertlikler daha yüksektir. Dielektrik sıvıya SiC toz katkılarının eklenmesi genel anlamda tepe sertliklerinin elde edildiği derinlik değerlerini arttırmaktadır (Şekil 6c, d).

Grafit takım elektrot kullanıldığında ise en yüksek sertlik değerleri yüzeyin 30 µm altındadır. Ayrıca, sertliklerin yüzeyden ve ana faz malzemesinden tepe değerlerin ölçüldüğü bölgelere doğru oransal değişimi göze çarpmaktadır. Katı fazda dönüşüme uğrayan bölgede kalınlaşma daha belirgindir ve oransal sertlik değişimlerini desteklemektedir. Elde edilen bulgular, toz katkılı EKİ sırasında, eriyik metalin daha uzun sürelerde katıldığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, dielektrik sıvıya katılan toz katkılarının ısı taşınım katsayısını düşürmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, dielektrik sıvıdan yüzeye taşınan malzemenin, yeniden katılan katmanın ısı iletim katsayısını düşüreceği de düşünülebilir. Ancak, işlemin karmaşık doğası ve fiziksel özelliklerin ölçülmesinde karşılaşılan güçlükler, hangisinin daha etkili olduğunun belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

#### 4. Sonuçlar

DIN 1.4442 çift fazlı çeliğinin EKİ sonucunda yeniden katılan katman mikro sertliği, kullanılan dielektrik sıvının tipine bağlı değişimler gösterir. İşlemede su dielektrik sıvısı kullanıldığında ana faz malzemesi sertliği yeniden katılan katmanda değişmemektedir. Farklı takım elektrot kullanımı ya da dielektrik sıvıya katılan toz katkıları sonucu değiştirmemektedir. Yeniden katılan katmanın ince taneli yapısı, sertliğinde de artış beklentisi oluşturmaktadır. Ayrıca bakır elektrot kullanımı ile farklılaşan mikro yapısı bu beklentiyi desteklemektedir. Ancak, östenitik tanelerin yumuşama ve ferritik tanelerin sertleşme eğilimleri dengededir. Dielektrik sıvıdan ya da takım elektrotundan yeniden katılan bölgeye malzeme taşınımı, katılan metalin sertliğini değiştirmemektedir.

EKİ, hidrokarbon bazlı dielektrik sıvıda yapıldığında yüzeye yoğun karbon difüzyonu yeniden katılan katman sertliğini arttırmaktadır. Katman sertliğinde artış, ferritik çeliklerin işlenmesi sonucunda elde edilen değerlere yakındır. Bu sonuç, DIN 1.4442 çift fazlı çelikte östenitik tanelerin dönüşüme uğrayarak martenzitik yapıların oluşumuna katkı sağladığını göstermektedir. Takım elektrot malzemesi ve dielektrik sıvıya eklenen toz katkıları ise katılmanın hızını değiştirerek derinliğe bağlı sertlik değişimlerini farklılaştırmaktadır. Ancak her durumda katman içerisinde elde edilen en yüksek sertlik değeri değişmemekte ve 850 HV sertliğine ulaşmaktadır.

#### 5. Kaynaklar

- Batish, A., Bhattacharya, A. Singla, V. K., Singh, G. 2012.** Study of material transfer mechanism in die steels using powder mixed electric discharge machining. *Mater. Manuf. Process.*, 27: 449-456.
- Bhattacharya, A., Batish, A., Kumar, N. 2013.** Surface characterization and material migration during surface modification of die steels with silicon, graphite and tungsten powder in EDM process. *J. Mech. Sci. Technol.*, 27: 133-140.
- Crookall, J.R., Khor, B.C. 1974.** Electro-discharge machined surfaces. *Proc. of 15th Int. Machine Tool Design and Research Conf., Macmillan.* 331-338.
- Ekmekci, B. 2007.** Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). *Appl. Surf. Sci.*, 253: 9234-9240.
- Ekmekci, B. 2009.** White layer composition, heat treatment, and crack formation in electric discharge machining process. *Metall. Mater. Trans. B*, 40: 70-81.

- Ekmecki, B. 2016.** Geleneksel ve SiC toz katkılı yüksek darbe enerjili elektriksel kıvılcımla işlenmiş dubleks çelik yüzeylerin incelenmesi. *Karaelmas Fen ve Müh. Derg.*, 6(1):111-120.
- Ekmecki, B., Tekkaya, A.E., Erden, A. 2006.** A semi-empirical approach for residual stresses in electric discharge machining (EDM). *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 46: 858-868.
- Ghanem, F., Braham C., Sidhom, H. 2003.** Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity. *J. Mater. Process. Technol.*, 142: 163-173.
- Gill, A. S., Kumar, S. 2015.** Surface alloying of H11 die steel by tungsten using EDM process. *Int J Adv Manuf Technol.*, 78: 1585-1593.
- Gill, A. S., Kumar, S. 2016.** Surface roughness and microhardness evaluation for EDM with Cu-Mn powder metallurgy tool. *Mater. Manuf. Process.*, 31: 514-521.
- Kumar, S., Singh, R. 2010.** Investigating surface properties of OHNS die steel after electrical discharge machining with manganese powder mixed in the dielectric. *Int J Adv Manuf Technol.*, 50: 625-633.
- Lim, L.C., Lee, L.C., Wong, Y.S., Lu, H.H. 1991.** Solidification microstructure of electrodischarge machined surfaces of tool steels. *J. Mater. Sci. Technol.*, 7: 239-248.
- Massarelli, L., Marchionni, M. 1977.** Morphology of spark-affected surface layers produced on pure iron and steels by electro discharge machining. *Metal. Technol.*, 4; 100-105.
- Patowari, P. K., Mishra, U. K. Saha, P. Mishra, P. K. 2011.** Surface integrity of C-40 steel processed with WC-Cu powder metallurgy green compact tools in EDM. *Mater. Manuf. Process.*, 26: 668-676.
- Rebelo, J.C., Diaz, A.M., Kremer, D., Lebrun, J.L. 1998.** Influence of pulse energy on the surface integrity of martensitic steels. *J. Mater. Process. Technol.*, 84: 90-96.
- Zeilmann, R. P., Bordin, F. M., Vacaro, T. 2015.** Surface integrity of electrodischarge machined cavities for different depths and radii. *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, 37: 93-104.