Sürtünme Karıştırma İşleminin Delik Genişleme Şekillendirilebilirliğine Etkisi

T. KÜÇÜKÖMEROĞLU[1], S.M. AKTARER[2]

[1]Makina Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye
[2]Otomotiv Teknolojisi Bölümü, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye

Araç üretim aşamasında temel beklentilerden biri saç metalin şekillendirilebilirlik kabiliyetinin yüksek olmasıdır. Özellikle kenar kıvırma işlemleri esnasında oluşan kenar çatlakları önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Otomotiv üretiminde kullanılan çeliklerin şekillendirilebilirlik kabiliyetinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada sürtünme karıştırma işlemi (SKİ) uygulanmış çift fazlı otomotiv çeliğinin kenar kıvırma biçimlendirilebilirliği delik genişletme testi ile karakterize edilmiştir. Sürtünme karıştırma işlemi 5mm uç çapına ve 13mm omuz çapına sahip tungsten karbür bir takım ile gerçekleştirilmiştir. Proses edilen bölgenin ve ana malzemenin şekillendirilebilirlik testleri metalik saclar için delik genişletme testi (ISO 16630) standardına göre % 50 oranında küçültülmüş bir kalıp kullanılarak Instron-3220 üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney esnasındaki delikteki genişleme ve çatlak oluşumu kalıbın içine yerleştirilen kamera ile kayıt altına aşınmıştır. Deney sonrası numuneler optik ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş ve delik genişletme oranları hesaplanmıştır. Ana malzeme ile kıyaslandığında SKİ numunede, zımba kuvveti yaklaşık % 40 ve delik genişletme oranı da yaklaşık % 26 artış sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler : Sürtünme karıştırma işlemi, Çift fazlı çelik, Delik genişleme testi, Delik genişleme oranı

1. Giriş

Araç ağırlığının azaltılması, yakıt sarfiyatının düşürülmesi ve araç güvenliğinin arttırılması amacıyla gelişmiş yüksek dayanımlı çeliklerin (GYDÇ) geliştirilmesi üzerine yoğun çalışmalar devam etmektedir. GYDÇ çelik sınıfı içerisinde, yüksek mukavemet ve süneklik arasındaki ideal denge nedeniyle çift fazlı (Dual Phase, DP) çelikler otomotiv gövde elamanlarının üretiminde en yaygın kullanılanlarıdır [1]. Çift fazlı çelikler daha çok yüksek şekillendirilebilirlik kabiliyetinin gerektiği derin çekme, gererek şekillendirme ve kenar kıvırma işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Kenar kıvırma işlemleri ise otomotiv gövde elamanlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir [2]. Kenar kıvırma işlemi esnasında oluşan kenar çatlakları önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Kenar kıvırma şekillendirilebilirliği, sac levhada çatlak oluşmadan istenilen şekle dönüşebilme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır [3]. Delik genişletme testi, kenar şekillendirilebilirliğini karakterize etmek için kullanılan yöntemlerden biridir [4].

Otomotiv endüstrisinde kullanılan gelişmiş yüksek dayanımlı çeliklerin kimyasal bileşimini değiştirmeden mekanik özelliklerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Çift fazlı çeliklerin kimyasal bileşimini değiştirmeden mekanik özellikleri aşırı plastik deformasyon (APD) teknikleri ile geliştirilebilmektedir [5,6]. Sac malzemelerin bölgesel olarak mekanik özelliklerinin geliştirilmesi dikkate alındığında sürtünme karıştırma işlemi diğer APD yöntemleri arasında daha ideal bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada sürtünme karıştırma işlemine tabi tutulmuş çift fazlı çeliğin kenar kıvırma şekillendirilebilirliği delik genişletme testi ile karakterize edilmiştir.

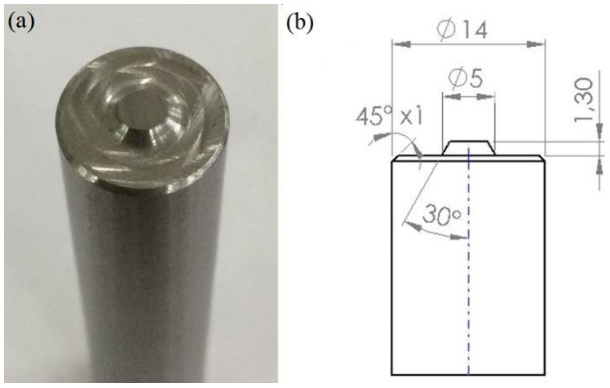
2. Deneysel Süreç

Bu çalışmada, 1,5mm kalınlığında DP600 kalite sıcak haddelenmiş sac levhalar kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 DP600 malzemesinin kimyasal bileşimi [7].

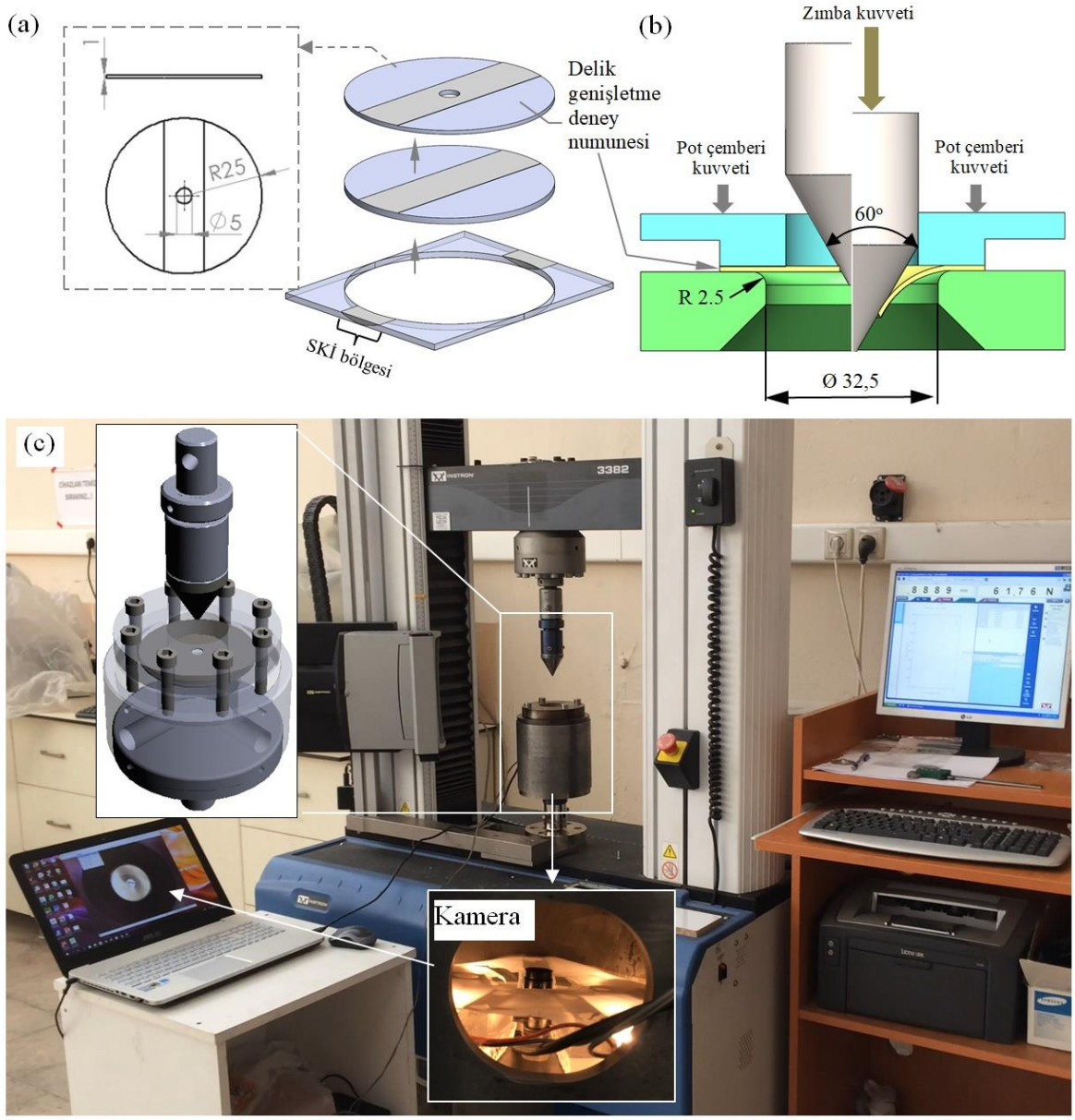
	Kimyasal Bileşim (ağırlık %)										
Malzeme	C	Mn	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
DP 600	0,060	1,476	0,330	0,045	0,040	0,667	0,034	0,003	0,062	0,004	Kal.

SKİ için kullanılan takım tungsten karbürden (WC) imal edilmiş olup takımın omuz çapı 14mm'dir. Takım ucu konik olup koni açısı 30°, pim çapı 5mm ve pim uzunluğu 1,3mm'dir (Şekil 1).



Şekil 1. (a) Kullanılan takımın resmi ve (b) ölçüleri [7].

SKİ için takım eğim açısı 2° ve takım baskı yükü 6kN olarak ayarlanmıştır. Sürtünme karıştırma işlemi 1600dev/dk dönme hızı ve 170mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. SKİ işlemine tabi tutulan plakalardan çapı 50mm olan dairesel kesitli numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin merkezine 4,5mm çapında delik açılmış ve raybalama işlemi ile çapı 5,00mm'ye büyütülmüştür. Numuneler otomatik zımparalama makinasında özel bir bağlama düzeneğine bağlanarak kalınlıkları 1,00mm olana kadar zımparalanmış ve zımpara izlerinin çatlak başlatma eğiliminden kaçınmak için daha sonra yüzeyleri parlatılmıştır. Delik genişletme deneyleri, ISO 16630 metalik saclar için delik genişletme testi standardındaki boyutların %50'si oranında küçültülerek üretilmiş kalıpta gerçekleştirilmiştir. Üretilen kalıp üniversal çekme basma cihazına (Instron-3220) sabitlenmiş ve deney esnasındaki delikteki genişlemeyi kaydedebilmek için kalıbın içine bir kamera yerleştirilmiştir. Delik genişletme deneyinde kullanılan numunelerin boyutlarını, hazırlanışını, kalıbın boyutlarını ve kalıbın cihaz üzerindeki montajını gösteren şematik resim Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2 (a) SKİ uygulanan delik genişletme deney numunesinin boyutları (b) kalıbın boyutları ve şematik gösterimi (c) deney düzeneğinin genel bir görüntüsü [7].

3. Bulgular ve Değerlendirme

Delik genişletme testi esnasında malzemenin şekillendirilebilirlik kabiliyetini ifade eden büyüklük delik genişleme oranıdır (λ) ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır [4].

$$\lambda\,[\%] = \frac{do - di}{di}\,x\,(100) \qquad (1)$$

Burada, *do* (mm) deney sonrası deliğin ortalama çapı ve *di* (mm) deliğin başlangıç çapıdır.

Delik genişletme deney sonrası elde edilen veriler ve yukarıdaki bağıntıya göre hesaplanan delik genişletme oranları Tablo 2'de verilmiştir. SKİ'li numunenin delik genişletme oranı başlangıç malzemesine göre daha yüksektir. Hasarın oluştuğu anda delik genişleme oranları BM için %93,6 SKİ numune için %118 olarak hesaplanmıştır. Chen ve ark. [8] malzemenin plastik gerinim oranındaki (r) artışın delik genişletme oranını arttırdığını bildirmişlerdir. Bu çalışmadaki plastik gerinim oranı (r) çekme testi sonrası elde edilen veriler kullanılarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

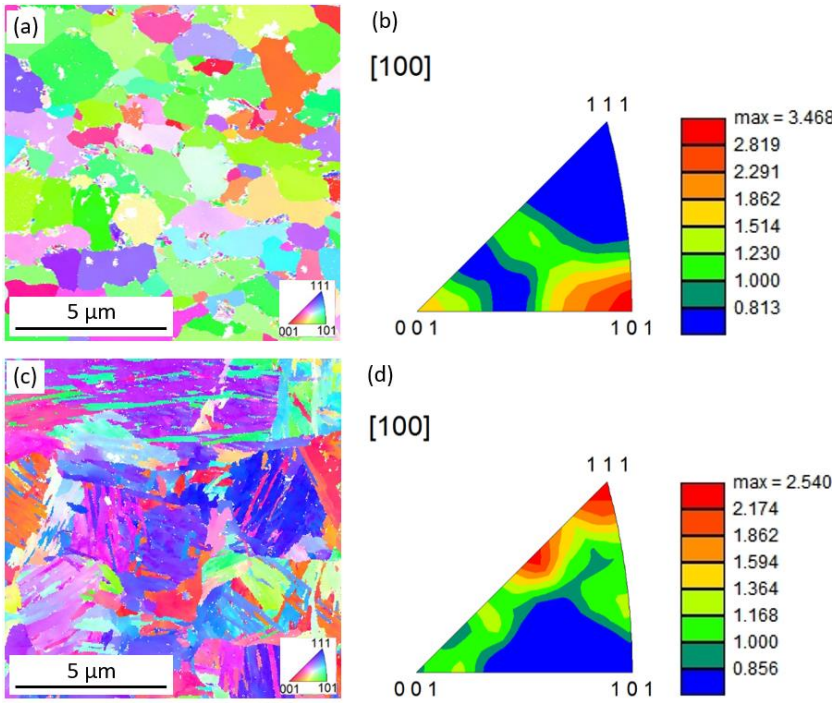
$$r = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_k} = \frac{ln\,(g_s/\,g_i)}{ln\,(k_s/\,k_i)} \qquad (2)$$

Burada εg gerçek genişlik gerinimi ve εk gerçek kalınlık gerinimidir. Yukarıda verilen bağıntıya göre plastik gerinim oranı BM için 0,86 ve SKİ numune için 0,98 olarak hesaplanmıştır. Plastik gerinim oranının iç yapıdaki doku bileşenlerinden ve yoğunluğundan etkilendiği bilinmektedir [9,10]. Plastik gerinim oranın haddeleme düzlemine paralel yönlenmiş (111) düzlemlere sahip doku bileşenlerinin varlığıyla arttığı rapor edilmiştir [9,11,12]. Şekil 4'de verilen başlangıç malzemesinin ve sürtünme karıştırma işlemli numunelerin iç yapısına ait ters kutup şekil haritası ve ters kutup şekillerinden görüldüğü gibi, BM'de (101) || RD doku bileşeni gözlemlenirken, SKİ uygulanmış numunenin karıştırma bölgesindeki dokunun (111) || RD bileşeninde yoğunlaşması, SKİ sonrası plastik gerinim oranındaki artışı desteklemektedir. Dolayısıyla, SKİ uygulanmış numunelerdeki delik genişleme oranındaki artışın nedenlerinden birinin plastik gerinim oranındaki artıştan kaynaklanabileceği düşünülmektedir [3,4,9,13]. Wang ve ark. [14] deformasyon sertleşme üsteli ve plastik gerinim oranındaki artışın kesit incelmesine karşı direncin bir göstergesi olduğundan kenar kıvırma şekillendirilebilirliğini arttıracağını belirtmişlerdir. Diğer taraftan delik genişletme üzerine yapılan bazı çalışmalar nedenini tam olarak açıklayamamakla birlikte daha düşük deformasyon sertleşme üsteli (n) değerine sahip malzemelerin daha yüksek delik genişleme oranına sahip olduğunu ortaya koymuştur [4,8]. Başlangıç malzemesinin 0,18 olan deformasyon sertleşme üsteli SKİ işlemi sonrasında 0,14 düşmesi literatürdeki bu çalışmalarla uyum göstermektedir. Diğer taraftan Wang ve ark. [14] yaklaşımı dikkate alındığında, mevcut çalışmada SKİ sonrası delik genişletme kabiliyetindeki artışa plastik gerinim oranındaki artışın deformasyon sertleşme değerindeki azalmanın olumsuz etkisinden daha çok katkı sağlamış olabileceği düşünülmektedir.

kenar kıvırma şekillendirilebilirliğinin pekleşme ve plastik gerinim oranındaki artışla artabileceğini çünkü bu iki malzeme özelliğinin kesit incelmesine karşı direncin bir göstergesi olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 2 Delik genişletme deneyi sonrası başlangıç malzemesi (BM) ve SKİ numunelerin delik genişleme özelliklileri [7].

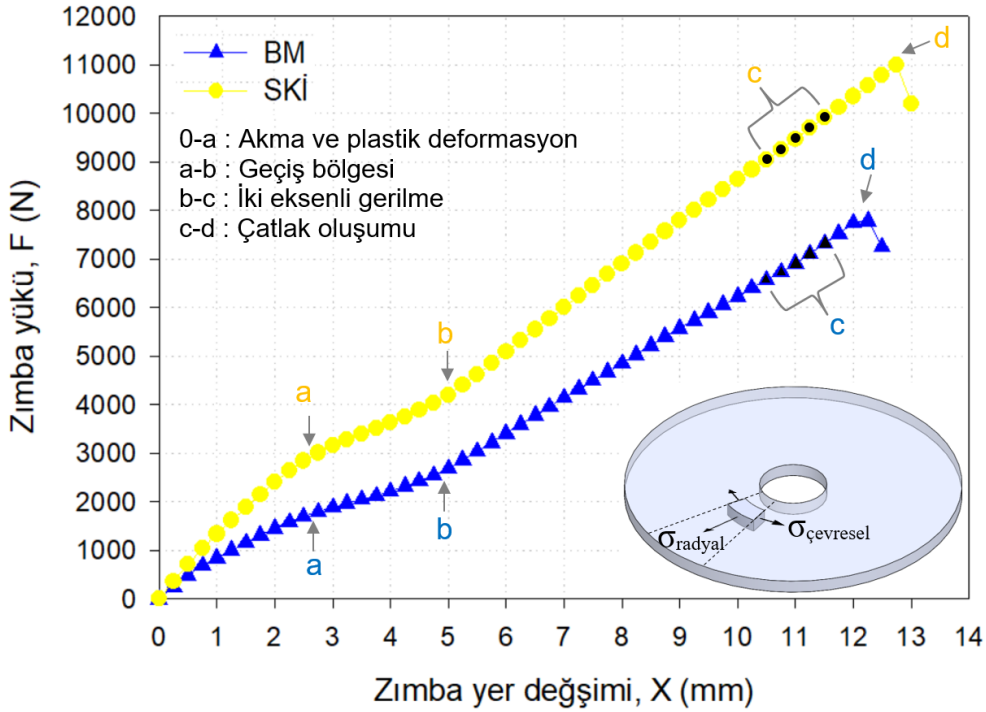
Zımba ilerlemesi (mm)		Durum	Ø d_1 (mm)	Ø d_2 (mm)	Delik genişleme oranı (%)
Hasar	12,5	BM	9,70±0,1	9,66±0,1	93,6
	13,0	SKİ	11,00±0,1	10,80±0,1	118,0



Şekil 4 Başlangıç malzemesinin (a) ters kutup şekli (IPF-RD) haritası ve (b) IPF şekilleri, SKİ numunenin (c) ters kutup şekli (IPF-RD) haritası ve (d)) IPF şekilleri [7].

Şekil 5 BM ve SKİ numunelere ait delik genişletme deneyi esnasında kaydedilen zımba yükü ve zımba yer değişimi eğrilerini göstermektedir. Deney esnasında en büyük zımba yükü BM için 7,85 kN ve SKİ için 10,97 kN olarak kaydedilmiştir. SKİ neden olduğu sertlik artışı delik kenarındaki çatlak oluşumunu geciktirerek daha yüksek delik genişleme oranına yol açacağı

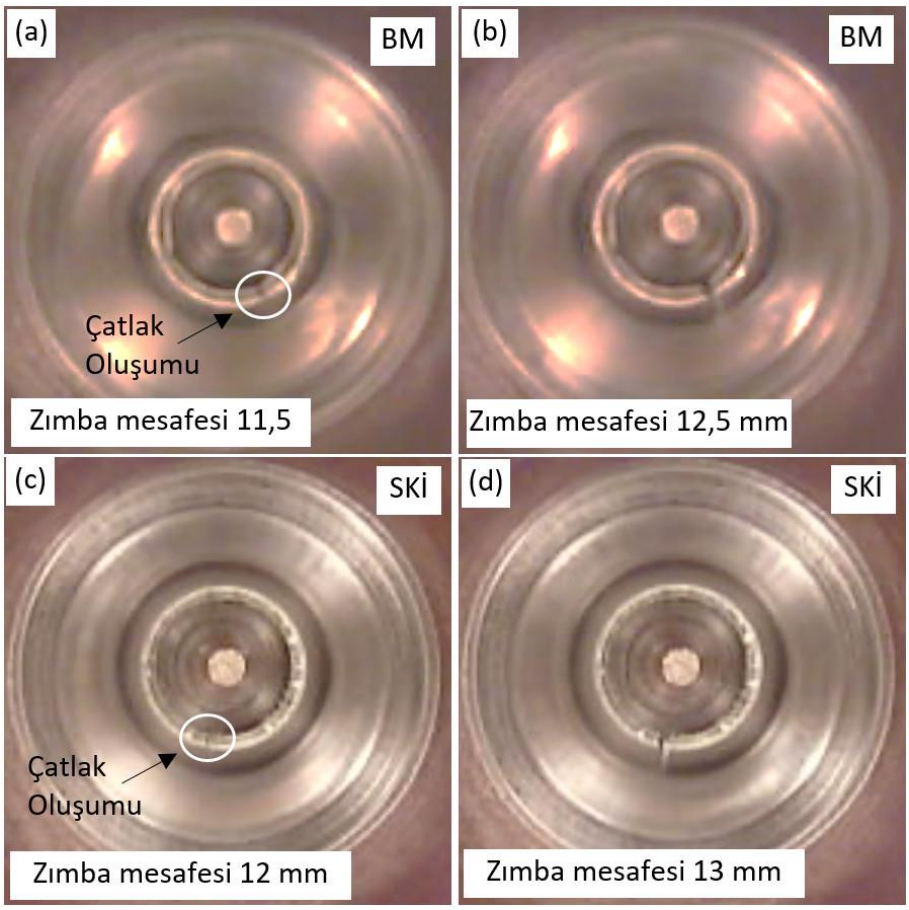
düşünülmektedir. Kim ve ark. [15] gerçekleştirdiği bir çalışma, ferritik-martenzitik bir çift fazlı çeliğin delik genişletme deneyi esnasında, yüksek martenzit oranının ferrit fazında meydana gelecek deformasyonu büyük ölçüde engellemesi sayesinde hasar oluşumun geciktirerek delik genişletme oranını arttırdığını rapor etmişlerdir. Başlangıç malzemesinin haddeleme doğrultusunda uzamış ferritik-martenzitik iç yapısı SKİ sorasında büyük oranda iğnemsi martenzite dönüşmesi (Şekil 4 (a) ve (c)) incelmiş ferrit tanelerini destekleyerek, ferrit tanelerinde oluşacak çatlakların ilerlemesini engelleyerek delik genişletme kabiliyetinde anlamlı bir gelişme sağlamıştır.



Şekil 5 Ana malzemenin ve sürtünme karıştırma işlemi uygulanmış plakaların delik genişletme deneyi esnasında kaydedilen yük (F) –yer değiştirme (X) eğrileri [7].

Deney sırasında çatlak başlangıç noktasının tam olarak tespit edilmesi önem arz etmektedir. Zımba yükü-yer değişimi eğrisinde tam olarak tespit edilemeyen ve "c" bölgesi olarak tanımlanan çatlak başlangıç noktası deney sırasında kayıt altına alınan kamera görüntülerinden tespit edilebilmektedir (Şekil 6). Zımba yükündeki belirgin düşüşün gözlemlendiği an ile çatlak başlangıcının gözlemlendiği an arasında zımbanın yaklaşık olarak 1mm ilerlediği Şekil 6'da verilen kamera görüntülerinde tespit edilmiştir. Dolaysıyla deney esnasındaki çatlağın tam olarak başladığı nokta kamera görüntüleri ile tespit edilebilmiştir. Krempaszky ve ark. [16] delik genişletme

deneyi esnasında, zımba yükünün en yüksek değere ulaşmasından önce oluşan görünür çatlağın nedenini deformasyon sertleşme kabiliyetine ve deliğin üretim yöntemine bağlamışlardır. Yüksek deformasyon sertleşme kabiliyetine sahip numunede görünür ilk çatlağın maksimum zımba yükünden önemli bir mesafeden önce oluştuğunu bildirmişlerdir.



Şekil 6 Zımbanın farklı mesafelerinde alınan kamera görüntüleri (a) ve (b) ana malzeme, (c) ve (d) sürtünme karıştırma işlemli numune [7].

4. Sonuçlar

1. Sürtünme karıştırma işlemi, delik genişletme deneyi esnasında gerekli maksimum zımba yükünde bir artışa yola açmıştır.
2. SKİ'nin yol açtığı iç yapısal değişim plastik gerinim oranın artmasına yol açarak delik genişleme oranında %26'lik bir artışla kayda değer bir gelişim sergilemiştir.
3. Hem başlangıç malzemesi hem de sürtünme karıştırma işlemli numunelerin görünür ilk çatlak oluşumu maksimum zımba yükünden yaklaşık 1mm önce meydana gelmiştir.

Referanslar

[1] C. Lesch, N. Kwiaton, F.B. Klose, Advanced High Strength Steels (AHSS) for Automotive Applications − Tailored Properties by Smart Microstructural Adjustments, Steel Res. Int. 88 (2017) 1–21. doi:10.1002/srin.201700210.

[2] X. Chen, H. Jiang, Z. Cui, C. Lian, C. Lu, Hole expansion characteristics of ultra high strength steels, Procedia Eng. 81 (2014) 718–723. doi:10.1016/j.proeng.2014.10.066.

[3] S.K. Paul, M. Mukherjee, S. Kundu, S. Chandra, Prediction of hole expansion ratio for automotive grade steels, Comput. Mater. Sci. 89 (2014) 189–197. doi:10.1016/j.commatsci.2014.03.040.

[4] R.J. Comstock, D.K. Scherrer, P.D. Adamczyk, Hole expansion in a variety of sheet steels, J. Mater. Eng. Perform. 15 (2006) 675–683. doi:10.1361/105994906X150830.

[5] M. Thompson, M. Ferry, P.A. Manohar, Simulation of Hot-band Microstructure of C–Mn Steels during High Speed Cooling, ISIJ Int. 41 (2001) 891–899. doi:10.2355/isijinternational.41.891.

[6] C. Li, G. Yuan, F. Ji, J. Kang, D. Misra, G. Wang, Mechanism of Microstructural Control and Mechanical Properties in Hot Rolled Plain C–Mn Steel during Controlled Cooling, ISIJ Int. 55 (2015) 1721–1729. doi:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-040.

[7] S.M. Aktarer, Sürtünme Karıştırma İşleminin Dp 600 Çeliğine Uygulanması: İç Yapı Ve Şekillendirilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2019.

[8] L. Chen, J.K. Kim, S.K. Kim, K.G. Chin, B.C. De Cooman, On the Stretch-Flangeability of High Mn TWIP Steels, Mater. Sci. Forum. 654–656 (2010) 278–281. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.278.

[9] M. Hatherly, W.B. Hutchinson, An Introduction to Textures in Metals, First, Institution of Metallurgists, Minnesota, 1979. https://books.google.com.tr/books?id=-LIvx530W_YC.

[10] C. Mapelli, S. Barella, R. Venturini, Characterization of the Relation among the Mechanical Behavior and the Texture Features in High Martensitic Dual Phase Steels, ISIJ Int. 45 (2006) 1727–1735. doi:10.2355/isijinternational.45.1727.

[11] C.L. Xie, E. Nakamachi, Investigations of the formability of BCC steel sheets by using crystalline plasticity finite element analysis, Mater. Des. 23 (2002) 59–68. doi:https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00043-7.

[12] D.N. Lee, K.H. Oh, Calculation of plastic strain ratio from the texture of cubic metal sheet, J. Mater. Sci. 20 (1985) 3111–3118. doi:10.1007/BF00545175.

[13] S.K. Paul, Non-linear Correlation Between Uniaxial Tensile Properties and Shear-Edge Hole Expansion Ratio, J. Mater. Eng. Perform. 23 (2014) 3610–3619. doi:10.1007/s11665-014-1161-y.

[14] C.-T. Wang, G. Kinzel, T. Altan, Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operations in sheet-metal forming, J. Mater. Process. Technol. 53 (1995) 759–780. doi:10.1016/0924-0136(94)01766-T.

[15] J.H. Kim, M.G. Lee, D. Kim, D.K. Matlock, R.H. Wagoner, Hole-expansion formability of dual-phase steels using representative volume element approach with boundary-smoothing technique, Mater. Sci. Eng. A. 527 (2010) 7353–7363. doi:10.1016/j.msea.2010.07.099.

[16] C. Krempaszky, P. Larour, J. Freudenthaler, E. Werner, Towards More Efficient Hole Expansion Testing, IDDRG 2014 Conf. (2014) 204–209.