

Yüksek Mukavemet Çeliklerinin Derin Çekme Oranlarının Geliştirilmesi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar

Erdem Kayhan

Dr.

ATILIM Üniversitesi
Otomotiv Mühendisliği Bölümü
Ankara

Bilgin Kaftanoğlu

Prof. Dr.

ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

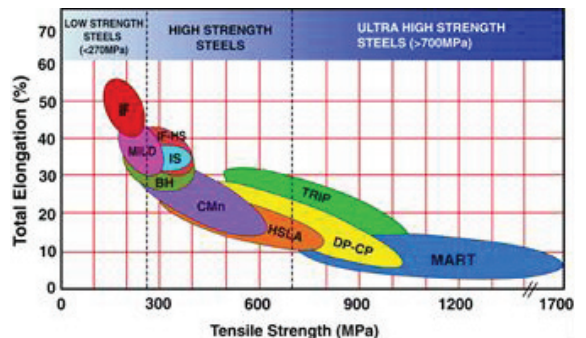
Yapılan deneysel çalışmada; sıcaklığın, çelik malzemelerin şekillendirilmesine olan olumlu etkisinden faydalanılarak DP600, IF ve HSLA çeliklerine ait derin çekme sınır oranlarının artırılması araştırılmış ve yeni bir uygulama yöntemi geliştirilmiştir. Uygulanan yöntem şu şekilde açıklanabilir; derin çekme uygulaması öncesinde; test parçasının flanş bölgesinde 275 - 180 °C aralığında sıcaklık değişimi; numunenin kenar bölgesinden, indüksiyon ile ısıtılması ve numune merkezine, zimba deliğinden su damlatılarak kısmen soğutulması suretiyle elde edilmiştir. Derin çekme işlemi, kalıbın alt tarafından çekilmekte olan numunenin ortasına doğru uygulanan yoğun su soğutması ile birlikte uygulanmıştır. Ön ısıtma sonucunda numunenin yüzey sıcaklığındaki değişim flanş bölgesi içinde iki farklı noktaya odaklanmış kızıl ötesi sıcaklık ölçüm cihazlarından alınan veriler ile takip edilerek kontrollü ısıtma uygulanmıştır. DP600, IF ve HSLA çelikleri ile gerçekleştirilen ılık deneylerde, derin çekme sınır oranlarında (LDR), oda sıcaklığında elde edilen değerlere göre %25,58 e kadar artış sağlanmıştır. Derin çekme işleminin ılık sıcaklık seviyesinde yapılması, malzemenin iç yapısında belirgin bir değişimin gerçekleşmesini önlenmiş, diğer bir deyişle malzeme özelliklerinin üst seviyede korunması sağlanmıştır. Zimba tarafından numuneye uygulanan kuvvet, zımbanın ilerleyişine, derin çekme yüksekliğine karşılık olacak şekilde kayıt edilmiştir. Oda ve farklı sıcaklıklarda DP600, IF ve HSLA çeliklerinin malzeme karakterizasyonları, yapılan çekme testleri sonucunda elde edilmiştir. Ayrıca, derin çekme öncesi ve sonrasında iç yapı, sertlik ve geri yaylanma miktarlarındaki değişimler incelenmiştir..

Anahtar Kelimeler: Metal şekillendirme, Derin çekme, Ilık derin çekme.

GİRİŞ

Araç imalat endüstrisinde; hafif metallerin ve kompozit malzemelerin kullanılması ile toplam araç ağırlıklarının ve yakıt tüketimlerinin, azaltılması amaçlanmaktadır. Yüksek mukavemet çeliklerinin düşük kalınlıkta kullanılması araç ağırlıklarının azaltılmasına olan olumlu etkisine ek olarak araç emniyet gereklilikleri için de çözüm olmaktadır. Çelikler; fiyat/performansı ile rekabet gücü yüksek malzemelerdir. Araç imalat sanayisinin ihtiyaçlarını karşılayacak yeni tip çeliklerin geliştirilme çalışmalarına; gerek yapısal değişiklikler gerekse farklı alaşım malzemelerinin ilave edilmesi ile devam edilmektedir. Şekil 1 de yeni nesil çelik malzemeler özetlenerek gösterilmiştir. Düşük mukavemete sahip IF ve HSLA çelikleri, düşük alaşımlı yüksek uzama

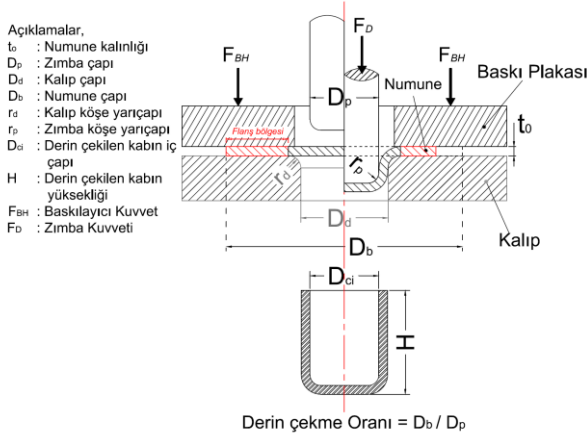
oranına sahip malzemelerdir. Yüksek ve çok yüksek mukavemete sahip çeliklerin özelliği ise yüksek dayanımlarına rağmen düşük uzama oranlarına sahip olmalarıdır. Bunlardan bazıları ise DP, TRIP ve Mart serisi sac çelik malzemelerdir.



Şekil 1. Çelik malzemelerin özellikleri

Düşük süneklığe sahip yüksek mukavemet çeliklerinin derin çekilerek oda sıcaklığında şekillendirilmeleri için yüksek baskı ve zımba kuvvetlerinin sağlandığı büyük kapasitede preslere ihtiyaç vardır. Yüksek kapasiteye sahip preslerin tasarım, üretim ve işletme maliyetleri yüksektir. Soğuk şekillendirilmiş parçalarda bazı önemli sorunlar mevcuttur. Bu sorunlardan bazıları, parçanın istenilen mukavemette olmaması, baskı sonrası oluşan yüksek kalıntı gerilimleri, malzeme geri yaylanmasından kaynaklanan şekil ve ölçü bozukluklarıdır.

Derin çekme işlemine ait temel terimler ve açıklamalar Şekil 2 de verilmiş olup buna göre (LDR, Limiting Drawing Ratio) derin çekme sınır oranı $LDR = D_b/D_p$ formülü ile tanımlanır.



Şekil 2. Derin çekme terimleri ve açıklamalar

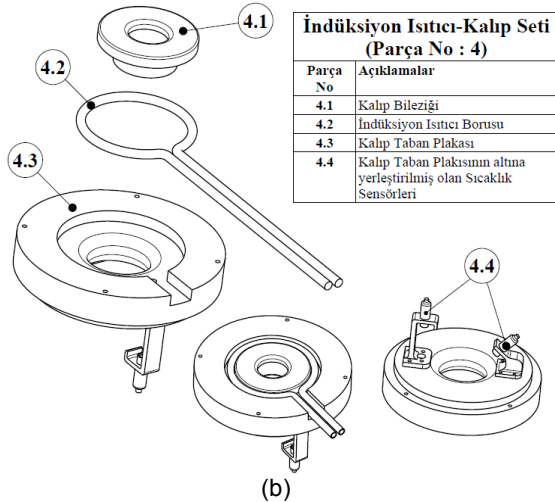
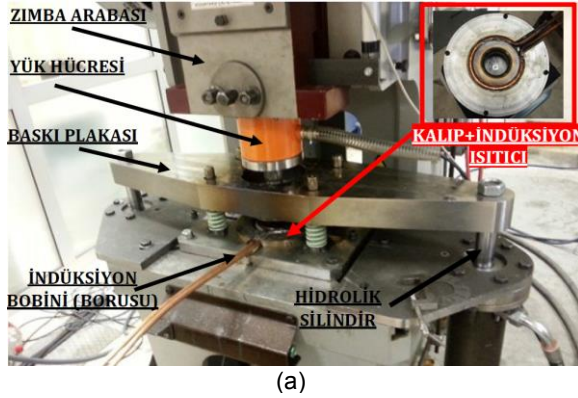
Yüksek sıcaklıklarda sac metal şekillendirmenin sağladığı avantajlar olan malzemenin süneklığının geliştirilmesi, şekillendirme kuvvetlerinde ve geri yaylanma oranlarında azalma buna bağlı olarak yatırımsal ve enerji sarfında meydana gelecek kazançlar Neugebauer ve arkadaşları [1] tarafından belirtilmiştir. Kleiner ve arkadaşları [2] bölgesel ısıtılan alüminyum sac malzemelerin şekillendirmesinde yüksek derin çekme oranlarına ulaşıldığı gösterilmiştir. Bölgesel ısıtmanın; alüminyum, titanyum ve yüksek mukavemete sahip çelik malzemelerin derin çekme oranına etkilerinin ayrıca araştırılması gerektiği vurgulanmıştır. Mori ve arkadaşları [3] elektrik direnci ile 800 °C' a kadar ısıttıkları kalıpta derin çekme deneyleri yapmışlardır. Isıtıcı elektrodların kalıba yerleşiminde meydana gelen sorunlardan dolayı numune eş sıcaklık dağılımı sağlanamamıştır. Ayrıca, derin çekilen parçalarda oksitlenme oluşumu gözlemlenmiştir. Bruschi ve arkadaşları [4] oda ve yüksek sıcaklıklarda malzeme modellemesi ve test yöntemleri konularında geniş bir değerlendirmede bulunmuşlardır. Kaya ve arkadaşları [5]; kalınlıkları 1,2 – 1,3 mm arasında, Al 5754-O, Al 5052-H32, ve Mg AZ31-O, Alüminyum ve Mağnezyum alaşım

malzemelerini kullanarak eş sıcaklık dağılımsız derin çekme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kalıp ve baskı plakasını, elektrik kartuş ısıtıcılar ile 310 °C' a kadar ısıtıp, oda sıcaklığında zımba kullanarak yaptıkları deneylerin sonucunda sınır oranlarında artış sağlamışlardır. Yoshihara ve arkadaşları [6] yaptıkları çalışmada bölgesel ısıtma ve soğutma uygulayarak Mağnezyum alaşımlarının derin çekme sınırının geliştirilmesinde başarılı sonuçlar almışlardır. Aynı çalışmanın sonuçları, baskı kuvvetinin kontrollü olarak uygulanmasının, derin çekme sınır oranına olumlu etkisinin olduğunu göstermiştir. Gelin ve arkadaşları [7] ise yüksek sıcaklıklarda visko plastik davranış modellemesini, ılık sıcaklıkta sac metal şekillendirme işleminin sayısal analizinde kullanmışlar, elde ettikleri sayısal analiz sonuçlarını deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Shipton ve arkadaşları [8] Titanyum (IMI 125) ve Titanyum bakır alaşım (IMI 230) malzemelerinde sıcaklığın anizotropiye olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, işlem sıcaklığının artırılması ile derin çekilen parçalarda anizotropiden kaynaklanan kulak sayılarında ve kulak yüksekliklerinde azalma meydana geldiğini gözlemlenmişlerdir. Ayrıca, yüksek derin çekme oranlarına, ısıtılmış kalıp ve soğuk zımba kullanılarak ulaşıldığı belirtilmiştir. Takuda ve arkadaşları [9] ılık sıcaklık seviyesinde yapılan derin çekme işleminin derin çekme sınır oranına olan olumlu etkisini göstermişlerdir. 304 paslanmaz çelik malzeme kullanarak yaptıkları derin çekme deney sonuçlarını sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Derin çekme sınırında en büyük artış 150 °C' in altındaki sıcaklıklarda soğuk zımba kullanarak yaptıkları deneylerde meydana gelmiştir. Doege ve arkadaşları [10]; deneylerde ticari Mağnezyum alaşım malzemelerinin derin çekme sınırlarının geliştirilmesini araştırmışlardır. Kalıp ve baskı plakasını birlikte ısıtırak yaptıkları derin çekme deney sonuçları; flanş bölgesini hedefleyen ön ısıtmanın derin çekme sınır oranının geliştirilmesine olumlu etkisinin olduğunu göstermiştir. Moon ve arkadaşları [11] sıcaklık kontrollü derin çekme yöntemini uygulayarak, Al-1050 malzemesinin derin çekilme sınırının geliştirilmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Isıtılmış numunenin sürekli soğutulan zımba ile çekilmesi, çekilen numunenin yan yüzeylerinde oluşan gerilmeyi azaltarak derin çekme sınır oranında artış meydana geldiğini belirtmişlerdir. Sıcak derin çekilerek şekillendirmede lazer ile ısıtmanın zımba kuvvetinde %25 e kadar azalma meydana getirdiği D. Schuöcker [12] tarafından bildirilmiştir. Önerilen lazer ile ısıtmanın, düşük şekillendirilme kabiliyetine sahip malzemelerin şekillendirilmesinde uygulanabilecek bir yöntem olduğu fakat konu hakkında daha çok araştırma yapılması gerektiği ayrıca bildirilmiştir. Ota ve

arkadaşları [13] yaptıkları sayısal analizlerde sıcak derin çekilmekte olan malzemenin yırtılma potansiyeli yüksek bölgelerinin soğutulduğu model kullanmışlardır. Önerilen model ile yapılan sayısal analiz sonuçları, eş değer sıcaklık dağılımına sahip benzer analiz sonuçlarına göre şekillendirme sınır derinliklerinde % 71 e ulaşan gelişme elde etmişlerdir. El-Morsy ve arkadaşları [14] alaşım Magnezyum AZ31' in sıcak derin şekillendirme sınır oranının geliştirilmesini yaptıkları sonlu elemanlar analizleri ile araştırmışlardır. Sayısal analiz sonuçları, kalıp ve baskılayıcı plakanın 300 °C sıcaklığında zımbanın ise oda sıcaklığında uygulanması, AZ31 malzemesinin derin çekme sınır oranını artırdığını göstermiştir. Bölgesel ısıtmanın önemi, Kopp, R. [15] tarafından hazırlanan “Metal şekillendirme teknolojisinde gelişme sağlayacak eğilimler” başlıklı makalesinde sunulmuştur.

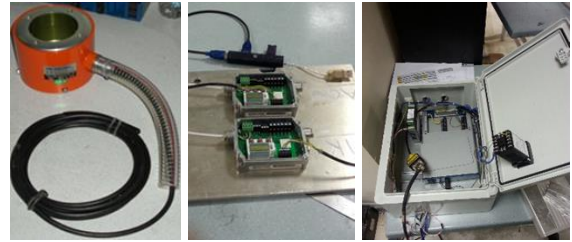
DENEY DÜZENEGİ

Yüksek mukavemet çeliklerinin derin çekme deneyleri için bir mekanik pres gerekli ekipmanlar, ölçüm cihazları ve sistemler ile donatılarak geliştirilmiştir. Şekil 3 (a) da geliştirilen deney düzeneği pres ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) Deney düzeneği genel, (b) İndüksiyon ısıtıcı-kalıp seti ve sıcaklık sensörleri

Deney düzeneğinde kullanılan presin kapasitesi 800 kN olup 1 MN kapasitesinde yük hücresi ile donatılmıştır. Baskı kuvveti, iki adet eş-simetrik hidrolik silindir tarafından tahriklenen baskı plakası ile numuneye uygulanır. Pres arabasına yük hücresi, yük hücresine de zımbanın bağlanması ile pres tarafından derin çekilen numuneye uygulanan kuvvet verileri kayıt altına alınmıştır. Zimba, kalıp ve kalıp bileziği krom, molibden ve vanadyumdan oluşan alaşım soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneği ölçüm cihazları; (a) TML merkez bölgesi boşluklu tip baskı algılayıcı yük hücresi, KCE - 1MNA (b) OPRIS CT Lazer (OPTCT3MH1CF3) sıcaklık sensörleri (c) National Instrument NI USB - 6259 M Series DAQ Device; BNC Veri kayıt cihazı

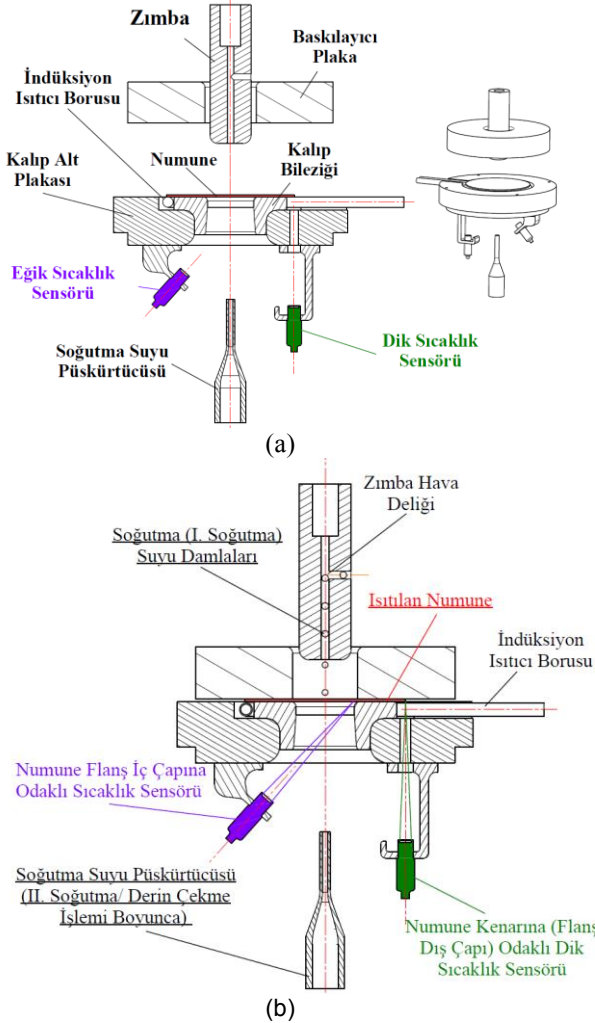
İki adet OPRIS CT Lazer (OPTCT3MH1CF3) sıcaklık sensörü ve TML marka KCE-1 MN model numaralı yük hücresinin yaptığı ölçümler, veri sinyalleri olarak NI USB - 6259 M serisi veri toplama cihazına gönderilmiştir. Taşınabilir bir bilgisayara yüklenen ticari yazılım aracılığıyla sensör okumaları görüntülenmiş ve kayıt edilmiştir. Sıcaklık sensörleri kalıp plakasının alt yüzeyine odaklanma geometrisi gözetilerek en uygun konumda sabitlenmiştir. Yüzeye dik pozisyonda yerleştirilen sensör, flanş dış çap bölge sıcaklığını; diğeri ise açılı konumlandırılarak iç çap bölge sıcaklığını derin çekme süresince ölçmüştür. Derin çekme deneylerinde kullanılan kalıp ve zimba geometrisi Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Zimba ve kalıp geometrisi

Numune Kalınlıkları	d_{Zimba}	$d_{Kalıp}$	$r_{Kalıp Köşe} = r_{Zimba Köşe}$
$t_0=0,8 \text{ mm}$	43,00 mm	45,00 mm	4,00 mm
$t_0=1,2 \text{ mm}$	42,12 mm	45,00 mm	6,12 mm
$t_0=1,5 \text{ mm}$	40,89 mm	44,63 mm	8,13 mm
$t_0=1,57 \text{ mm}$			

Numune çapında bükülen indüksiyon bobinin (Şekil 3 (b) Parça No: 4.2) elektrik yalıtımı, dış yüzeyine sarılan yumuşak mika ile yapılmış olup; kalıp taban plakasının içine kalıp bileziği ile sınırlandırılacak (Şekil 3 (b)) şekilde yerleştirilmiştir. Isıtılan numunenin flanş bölgesi

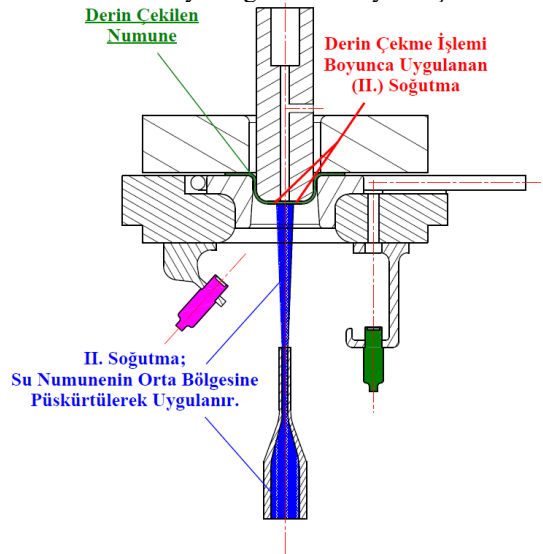
sıcaklık ölçümü, kalıp taban plakasının altına sabitlenmiş ve iki farklı noktaya odaklı, kızılötesi sıcaklık sensörleri (bakınız Şekil 5 (a)) ile yapılmıştır. Zımbanın ortasına açılan hava giriş deliği (bakınız Şekil 5 (b)), ısıtma işleminde parçanın merkezine su damlatılarak soğutulması amacıyla da kullanılmıştır. Isıtılmakta olan parçaya kısmi soğutma uygulanmasının amacı flanş bölgesinde istenilen sıcaklık dağılımını oluşturmak içindir.



Şekil 4. (a) Zımba, baskı ve kalıp sistemi detay gösterimi (b) Ön ısıtma-soğutma uygulaması

Bu deneysel çalışma; temel olarak yüksek mukavemet, DP600, HSLA ve IF çeliklerinin bölgesel ısıtma ile derin çekme sınır oranının artırılmasının sağlanacağı yeni bir uygulama yönteminin geliştirilmesine odaklıdır. Geliştirilen uygulama yöntemi şöyle açıklanabilir; derin çekilecek numunenin her iki yüzeyi sürtünmenin olumsuz etkilerini azaltmak için flanş bölgesi ile sınırlı olmak üzere grafit ya da grafit+teflon ile yağlanır, numune daha sonra kalıp bileziğinin üzerine uygun pozisyonda yerleştirilir. Kalıbın üzerine yerleştirilen numuneye baskı kuvveti

hidrolik pistonların tahrik ettiği baskı plakası tarafından uygulanır. Numune baskı kuvvetinin etkisi altında ısıtılır, çünkü sıcaklık artışı malzemede mevcut kalıntı gerilmelerini etkinleştirerek parçanın şekil değiştirmesine (Distortion) ve kalıp üzerindeki konumunun değişmesine neden olur. Derin çekme öncesi istenmeyen bu değişikliklerin önlenmesi için test numunesi baskı kuvvetinin etkisi altında ısıtılır. Derin çekme işleminde numunenin flanş bölgesinde yarıçap doğrultusunda oluşan baskı kuvvetlerinin büyüklüğü belirli bir değeri aştığında parçanın buruşmasına neden olur. Buruşmanın engellenmesi için parçanın flanş bölgesine baskı kuvveti uygulanır. Geliştirilen yöntemde baskı kuvveti, ısıtma ile uygulanmaya başlar ve derin çekme işleminin sonuçlanmasına kadar devam eder. Derin çekme işleminde numunede farklı tipte birçok deformasyon meydana gelmektedir. Deformasyonların kaynağı farklı gerilmelerdir. Çekilmekte olan numune yarıçap doğrultusunda baskı, bükülme, geri yönde bükülme, tek ve çift yönlü gerilmelere maruz kalır. Isıtma işleminin sonlandırılmasının ardından derin çekme işlemi soğuk zımbanın numuneye doğru hareketiyle başlar.



Şekil 6. Derin çekilmekte olan numuneye soğutma uygulaması

Soğuk zımba, derin çekilmekte olan sıcak numunenin kalıp içine doğru çekilen kısmının sıcaklığını, ilerleyişe paralel olarak iletim yolu ile ısı transferinin sonucunda sıcaklığında azalmaya neden olur. Sıcaklığı azalan numune bölgesinin mukavemeti artar, böylece yan yüzeylerde oluşan gerilmelerden kaynaklanan yırtılmalar önlenerek parçanın daha derin çekilmesi mümkün olur. Numunenin, çekilmekte olan kısmının mukavemetinin artırılması, yüksek oranlarda başarılı derin çekme yapılması için çok önemlidir. Geliştirilen yöntemde zımbanın soğuk olmasının yanında kalıbın alt tarafından kalıp içine doğru

çekilmekte olan parçanın taban merkez bölgesine su püskürtülerek soğutma hızı artırılır. Soğuk su püskürtülerek uygulanan soğutma işlemi soğuk zınbanın derin çekme için parçaya doğru hareketiyle başlar.

MALZEME KARAKTERİZASYONLARI

Araştırmaya esas olan malzeme, bir çift faz çeliği olan DP600 yüksek mukavemet çeliği olup özellikle araç imalat sanayisinde yaygın kullanımı olan bir çelik malzemedir. Tablo 1 de içeriğindeki alaşım oranları yüzde olarak gösterilmiştir. Araştırmada kullanılan malzeme kalınlıkları 0,8, 1,2 ve 1,6 mm dir.

Tablo 2. DP600 çeliğinin kimyasal analiz sonucu

Kimyasal Bileşenler* (%)					
Cr	0,808	Al	0,0468	Ni	0,0477
Mn	1,47	C	0,0833	Cu	0,0291
Co	0,0123	Si	0,366	Fe	97

*DP 600 malzemenin, düşük yüzdeliklerdeki diğer bileşenleri

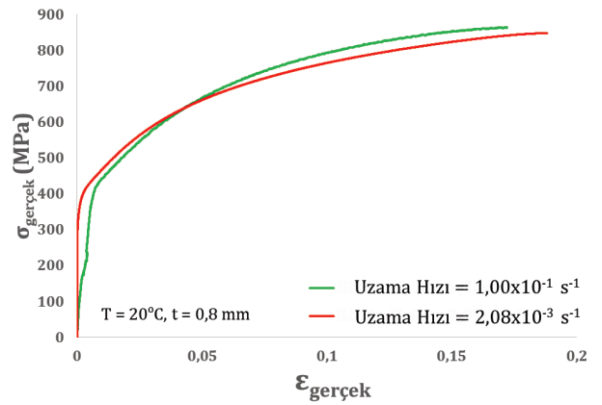
Pb, Sn, Mg, As, Zr, Bi, Ca, Ce, Se, La, Sb,
Ta, N, B, Zn, Te, Ti, Nb, Mo, W, S, V, P

Araştırmada kullanılan 7128 ve 7140 sınıfı yüksek mukavemet düşük alaşım çelikleri ve DC04 standart numaralı serbest arayer (IF) sınıfı tek faz çelikleri, geliştirilen derin çekme yönteminin doğruluğunun karşılaştırmasında kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan malzemelerin çekme testleri 300KN Zwick tek eksenli çekme test cihazında yapılmıştır. Ilık, 150-300 °C sıcaklık aralıklarında çekme testleri ise Şekil 7'de gösterilen Baehr deformasyon dilatometresinde yapılmıştır. Malzemelerin bütün kalınlıkları için oda ve ılık sıcaklıklarda akış eğrileri elde edilmiştir. Yapılan testler hadde yönünde, hadde yönüne dik ve 45° derece açılı yönde tekrarlanmış, malzemelerdeki anizotropi ayrıca araştırılmıştır. Farklı birim uzama hızlarında, 1×10^{-1} ve $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, gerçekleştirilen testlerde ise şekillendirme hızının etkisi (Strain Rate Dependency) araştırılmıştır. DP600 malzemenin derin çekme öncesinde ve sonrasında farklı bölgelerinden alınan örnekler incelenerek içyapı (Microstructure) analizleri ve sertlik değerlerindeki değişiklikler araştırılmıştır.



Şekil 7. Baehr deformasyon dilatometresi ve test numunesi

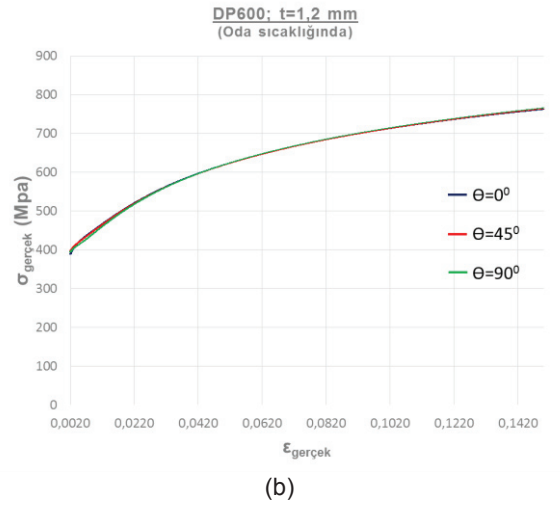
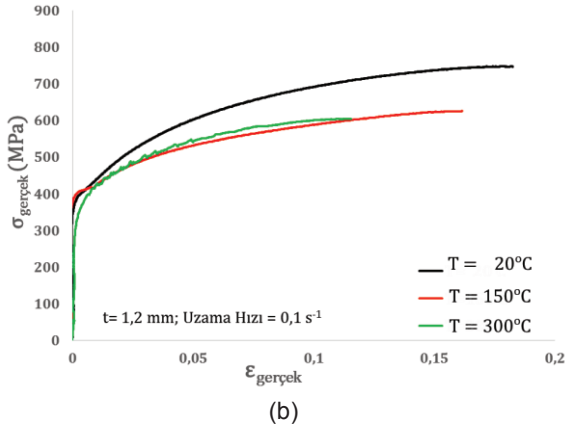
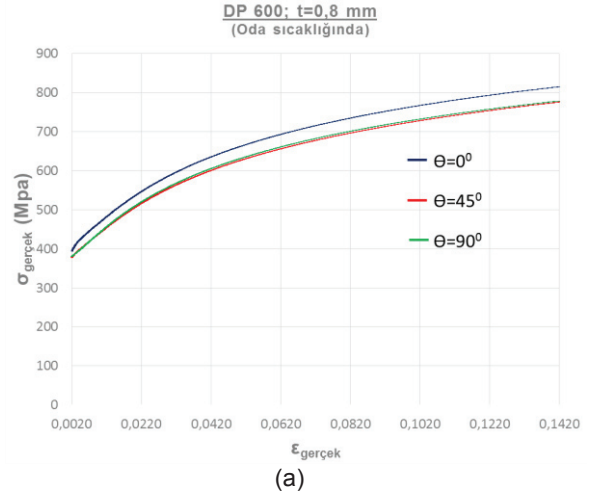
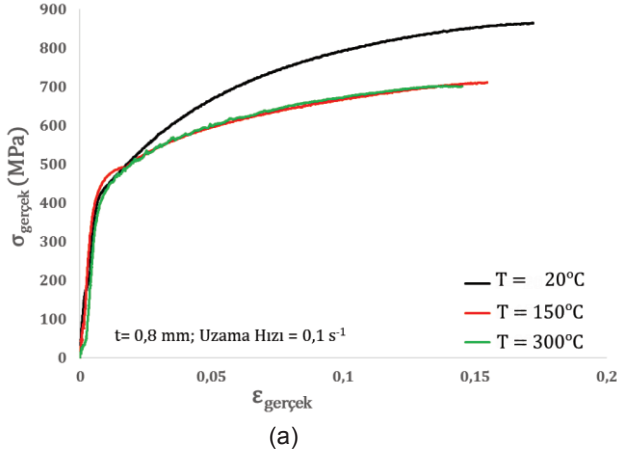
Malzeme karakterizasyonları için oda ve ılık sıcaklıklarda yapılan çekme testlerinde deformasyon hızı, derin çekme deneylerinin gerçekleştirildiği 80 ton kapasitesindeki eksantrik presin karakteristik hız eğrisi gözetilerek $0,1 \text{ s}^{-1}$ seçilmiştir. Şekil 8 de iki farklı birim uzama hızında, 0,8 mm kalınlığında DP600 çift faz çelik malzemenin çekme test sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Benzer sonuçlar diğer kalınlıklardaki DP600 çeliğinin test sonuçlarında elde edilmiştir. Şekil 8 den anlaşılacağı gibi farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen çekme test sonuçları birbirine yakın akış grafikleri vermiştir. Derin çekme deneyleri, 80 ton kapasitesindeki eksantrik pres üzerinde kurulan düzenekte yapılmıştır. Deformasyon hızındaki değişim malzeme akma eğrisinde sınırlı oranda farklılık yaratmış olması ve derin çekme deneylerinin aynı düzenek kullanarak yapılma gerekliliğinden dolayı deformasyon hızındaki değişiminin etkileri detaylı olarak incelenmemiştir.



Şekil 8. DP600 çeliği için, deformasyon hızındaki değişimin akma eğrisine olan etkisi

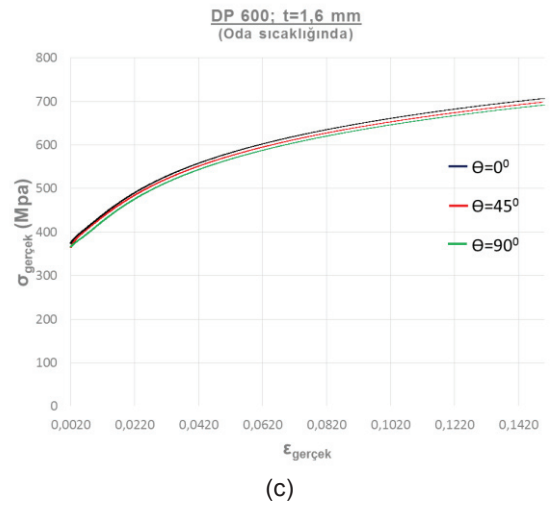
Ayrıca, derin çekme boyunca malzeme farklı deformasyon hızlarında şekillendirilir, bir başka söyleyiş ile malzemenin her noktası zamana bağlı farklı deformasyon hızlarında değişime uğrar. Bu çalışma için deformasyon hızının ortalama $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ yakın bir değerde olduğu söylenebilir.

Sıcaklığın DP600 sac çelik malzemenin akış eğrilerine olan etkisi incelenmiş, oda, 150 ve 300 °C sıcaklıklarında yapılan çekme test sonuçları, Şekil 9 (a) ve (b) verilmiştir. Benzer test verileri $t=1,6 \text{ mm}$ için de bulunmuştur. Bu sonuçlara göre; DP600 çeliğinin akma dayanımında, ılık sıcaklık seviyesinde, 150 ve 300 °C, önemli bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 9. Farklı sıcaklıklarda DP600 çift faz çeliğinin akış eğrileri (a) t=0,8 mm (b) t=1,2 mm

DP600 çeliğinin hadde yönü, hadde yönüne dik ve 45° derece açı yönünde farklı kalınlıkları için oda sıcaklığında yapılan çekme testlerinin sonuç grafikleri Şekil 10' da verilmiştir. Farklı üç yönde yapılan çekme test sonuçları 1,2 mm için aynı 1,6 mm için ise çok yakındır. Kalınlığı 0,8 mm olan malzemede hadde yönünde diğer iki yöndeki değerlerine göre daha yüksek değerlerde akma eğrisine sahiptir. Şekil 11 te görüldüğü gibi oda sıcaklığında derin çekilen parçalarda, anizotropinin göstergesi olan kulak şekillenmesi oluşmamış olup 1,6 kalınlıkta DP600 çeliğinde ise dört adet, az bir yükseklikte oluşmuştur. Bununla beraber derin çekme sıcaklığının artması ile beraber kulak oluşumları meydana gelmiştir. Oluşan kulak sayısı dördü geçmemiş fakat sıcaklığın ve numune çapının artması ile beraber kulak yükseklikleri de artmıştır. Kulaksız derin çekme işlemi gerçekleşmesi için numunenin flanş bölgesine uygulanan baskı kuvvetinin ve uygulama yöntemi başta olmak üzere, deformasyon hızı, sıcaklık ve ısıtma konularında yeni araştırmaların yapılması gerekmektedir.



Şekil 10. DP600 çeliğinin hadde yönü, hadde yönüne dik ve 45° dereceli açı yönündeki akma grafikleri; 0,1 s⁻¹. (a) t=0,8 mm (b) t=1,2 mm (c) t=1,6 mm

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

DP600, HSLA ve IF çelikleri ile yapılan derin çekme deneylerinin sonuçları, kalınlık, derin çekme sınır oranı, uygulama sıcaklığı ve uygulanan yağlayıcı bilgileri ile birlikte Tablo 4 te özetlenerek verilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde Grafit yağlayıcı kullanılmıştır., Flanş bölgesinin sıcaklığı 275- 180 °C ılık sıcaklık aralığında gerçekleştirilen deneylerde önce tek yağlayıcı grafit, daha sonra karışık yağlayıcı grafit ve Teflon (PTFE) birlikte kullanılmıştır. Deney sonuçları ılık sıcaklık seviyesinde grafit ve Teflon nun birlikte kullanıldığı karışık tip yağlamanın derin çekme sınır oranını artırılmasına olumlu etkisinin olduğunu göstermiştir. Bunun nedeninin; kullanılan kağıt formundaki Teflonun ısı yalıtımı sağlayarak flanş bölgesinde ısının kalınlık yönünde dengeli dağılmasını,

sonucunda da malzemenin akma dayanımında belirgin bir azalmanın sağlandığı böylece derin çekilme işleminde flanş bölgesindeki malzemenin akışına karşı oluşan direncin zayıfladığı düşünülmektedir. Benzer etkiler diğer deney malzemeleri olan HSLA ve IF çelikleri ile yapılan derin çekme deneylerinde de gözlemlenmiştir.

Yapılan bu deneysel çalışmanın sonuçları özet olarak Tablo 3 te verilmiştir. Derin çekme sınır oranında, oda sıcaklığında elde edilen değerlere göre en yüksek oranda artış 25,58 % ile 1,2 mm kalınlığındaki DP600 çeliğinde olmuştur. DP600 malzemelerin bütün kalınlıklarında derin çekme sınır oranlarında artış diğer HSLA ve IF çeliklerine oranla daha yüksek olmuştur. Geliştirilen yöntemin sanayi uygulamasında, parçaların daha az aşamada derin çekilerek üretimleri sağlanabilecektir.

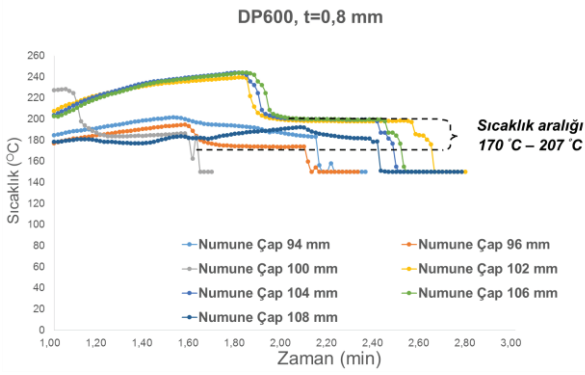
Tablo 3. DP600, HSLA ve IF çeliklerine ait derin çekme sınır oranları

Malzeme		AHSS (DP600)		HSLA (Erd 7128)		HSLA (Erd 7140)		IF (DC04)	
Yağlayıcı	Sıcaklık	D _{Numune}	DÇSO*	D _{Numune}	DÇSO*	D _{Numune}	DÇSO*	D _{Numune}	DÇSO*
Kalınlık		t₀=0,8 mm		t₀=0,8 mm		t₀=0,8 mm		t₀=0,8 mm	
Grafit	Oda Sıcaklığı	90,0 mm	2,09					102,0 mm	2,37
Grafit	Ilık	107,0 mm	2,49					112,0 mm	2,60
Grafit + PTFE	Ilık	110,0 mm	2,56					114,0 mm	2,65
Yüzde Artış		22,22%						11,76%	
Kalınlık		t₀=1,2 mm		t₀=1,2 mm		t₀=1,2 mm		t₀=1,5 mm	
Grafit	Oda Sıcaklığı	86,0 mm	2,04	90,0 mm	2,14	90,0 mm	2,14	97,0 mm	2,30
Grafit	Ilık	100,0 mm	2,38	102,0 mm	2,42	96,0 mm	2,28	108,0 mm	2,57
Grafit + PTFE	Ilık	108,0 mm	2,57	110,0 mm	2,61	104,0 mm	2,47	116,0 mm	2,76
Yüzde Artış		25,58%		22,22%		15,56%		19,59%	
Kalınlık		t₀=1,6 mm		t₀=1,5 mm		t₀=1,5 mm		t₀=1,57 mm	
Grafit	Oda Sıcaklığı	88,0 mm	2,09	88,0 mm	2,15	88,0 mm	2,15	95,0 mm	2,32
Grafit	Ilık	98,0 mm	2,33	94,0 mm	2,30	92,0 mm	2,25	97,0 mm	2,37
Grafit + PTFE	Ilık	104,0 mm	2,47	106,0 mm	2,59	106,0 mm	2,59	116,0 mm	2,84
Yüzde Artış		18,18%		20,45%		20,45%		22,11%	

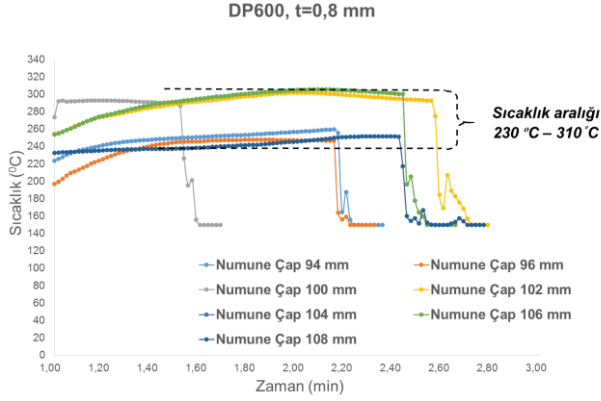
*DÇSO : Derin Çekme Sınır Oranı



Şekil 11. Oda ve ılık sıcaklıklarda derin çekilen numuneler



(a)



(b)

Şekil 11. DP600, t=0,8 mm çeliğine uygulanan ön ısıtma-soğutma sonucunda numunenin flanş bölgesinde oluşan sıcaklık değişimi (a) Flanş iç çap bölgesine ait sıcaklık grafiği (b) Flanş dış çap bölgesine ait sıcaklık grafiği

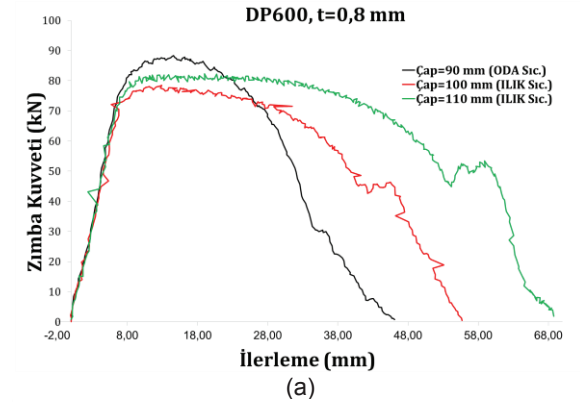
Uygulanan ısıtma-soğutma sonucunda flanş bölgesinin sıcaklığında meydana gelen değişim, sıcaklık sensörleri tarafından iki farklı noktadan yapılan okumalar ile kayıt edilmiştir. Flanş iç ve dış çap bölge sıcaklıkları sırayla açılı (Şekil 12 (a)) ve dik (Şekil 12 (b)) konumlandırılan sensörler tarafından ölçülmüştür. Şekil 12 (a) da görüleceği gibi numunenin sıcaklığında meydana gelen az miktardaki düşüşün nedeni; indüksiyon ile ısıtılmakta olan numunenin merkezine, zımbanın hava deliğinden soğutma amacıyla su damlatılmasıdır. Numune dış çap bölgesinin sıcaklığında meydana gelen küçük miktardaki azalmaların (Şekil 12 (b)) nedeni numunenin merkezine uygulanan soğutmanın iletilen bağıl etkisinden kaynaklanmaktadır. Flanş bölgesi sıcak değişimi istenilen değerlere ulaşınca derin çekme işlemi kalıbın alt tarafından numunenin merkezine doğru püskürtülerek uygulanan yoğun su soğutması ile eş zamanlı olarak başlar ve derin çekme işleminin sonlandırılmasına kadar devam eder. Çekme işlemi boyunca uygulanan bu yoğun su soğutmanın etkisi ile sıcaklık grafiklerinde ani düşüş meydana gelmiştir. Kullanılan sıcaklık sensörleri 150 °C altındaki sıcaklıklar için okuma yapmamaktadır. Derin çekme sınırının artırıldığı; araştırmada

kullanılan bütün malzemelere ait flanş sıcaklık aralıkları Tablo 4 te özetlenerek verilmiştir.

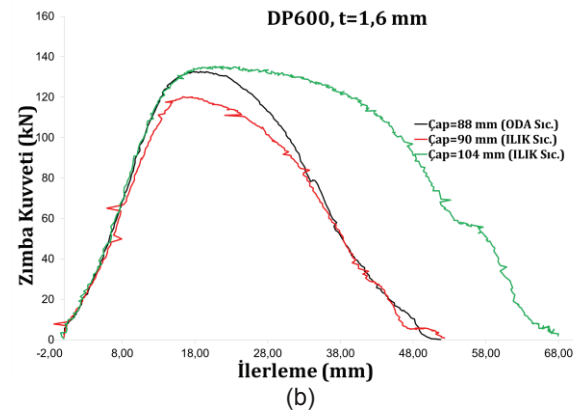
Tablo 4. DP600, HSLA ve IF çeliklerine ait derin çekme öncesi flanş bölgesi sıcaklık aralıkları

Malzeme Standardı	Kalınlıklar	Acılı konumlandırılan kızılötesi sıcaklık ölçer	Dik konumlandırılan kızılötesi sıcaklık ölçer
		Sıcaklık Aralığı	Sıcaklık Aralığı
DP600	0,80	170 - 207	230 - 310
	1,20	165 - 195	245 - 295
	1,60	180 - 225	220 - 300
ERD 7128	1,20	170 - 200	245 - 290
	1,50	175 - 210	235 - 295
ERD 7128	1,20	170 - 190	250 - 295
	1,50	165 - 190	220 - 275
DC04 (IF Steel)	0,80	165 - 195	215 - 305
	1,20	170 - 195	250 - 290
	1,57	160 - 195	235 - 278

0,8 ve 1,6 mm kalınlıklarında DP600 çelikleri için zımba tarafından numuneye uygulanan derin çekme kuvvet ölçümleri Şekil 11b' de verilmiştir. Ölçümler zımbaya bağlı yük hücresi tarafından yapılmıştır. Benzer sonuçlar diğer malzemeler ile yapılan deneylerde de elde edilmiştir. Derin çekme işleminde numunenin sıcaklığındaki artış, zımba tarafından uygulanan kuvvetin azalmasını sağlar. Oda ve ılık sıcaklık seviyesinde gerçekleştirilen deneylerde; derin çekme oranının artması ile şekillendirme kuvvetinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

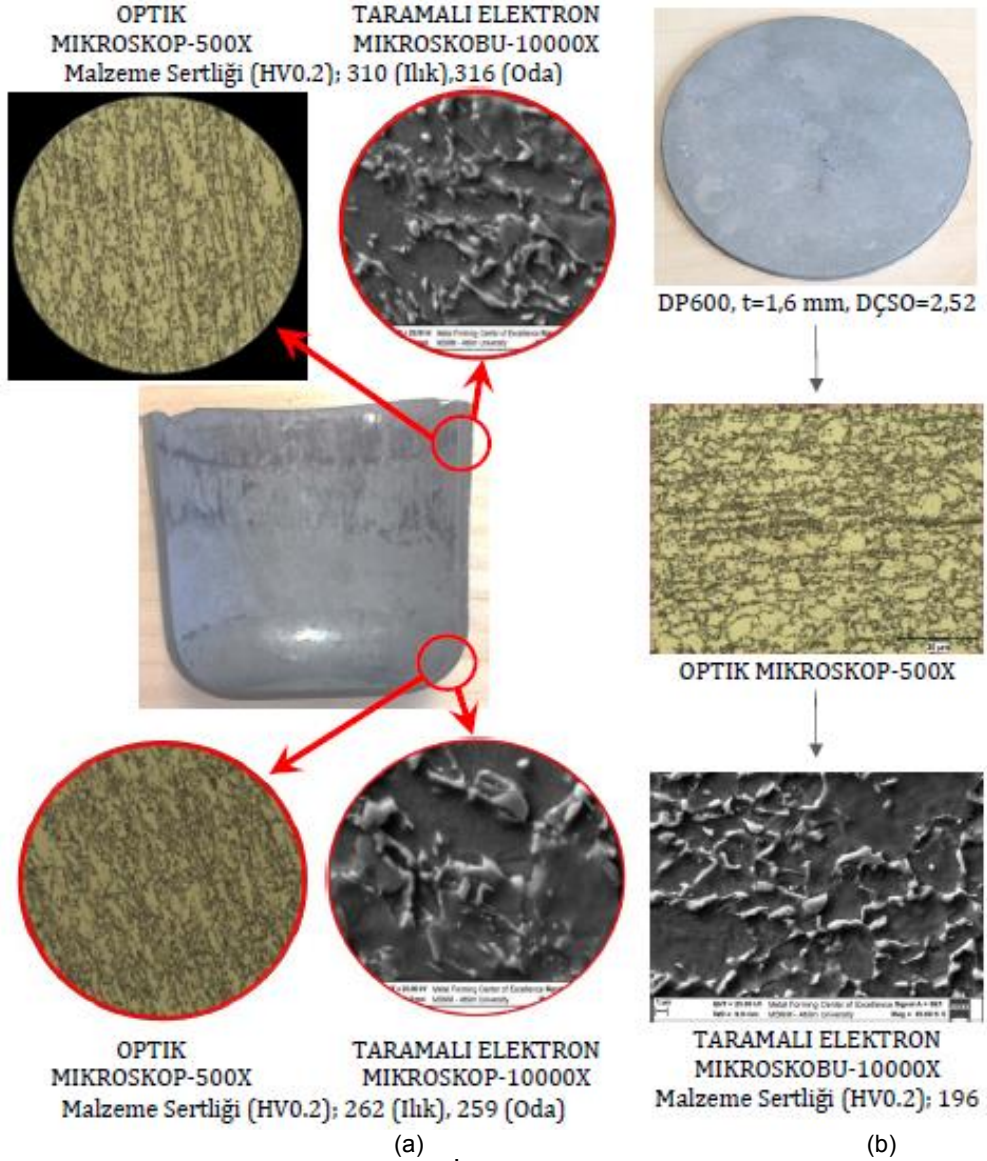


(a)



(b)

Şekil 13. DP600 çeliğinin, oda ve ılık derin çekme işlemlerinde zımba tarafından uygulanan kuvvet grafikleri (a)t=0,8 mm (b)t=1,6 mm



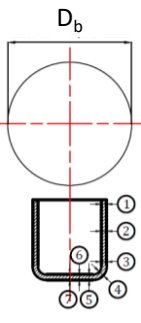
Şekil 14. DP600 çeliğinin, DP600 Çeliğinin iç yapı görüntü analizleri ve bölgesel sertlik değerleri

Ilık sıcaklık seviyesinde başarılı bir şekilde derin çekilen 1,6 mm kalınlığında DP600 çeliğinde meydana gelen mikro içyapı değişimleri optik mikroskop ve taramalı electron mikroskobundan elde edilen görüntüler kullanılarak incelenmiştir. Şekil 14 (b) de derin çekilmek için hazırlanan numunenin 500 kat büyütülen optik mikroskop görüntüsü ve 10.000 kat büyütülen taramalı electron mikroskobu görüntüleri, ölçülen mikro viker sertlik (HV0,2) değeri 196 ile birlikte verilmiştir. Şekil 14 (a) da ise derin çekilmiş numunenin en çok deformasyona uğrayan bölgesinin analizleri benzer şekilde yapılarak bölgesel sertlik değerleri ile birlikte belirtilmiştir. Mikro Vickers sertlik ölçüm sonuçları; ılık derin çekilen parçanın taban kenar bölgesinde (196 dan 262 ye) sertliğin arttığını, daha büyük artışın ise (196 dan 310 a) derin çekilen parçanın ağzına yakın bir başka söyleyiş ile flanşın çekilen son

bölgesinde meydana geldiğini göstermektedir. Benzer karşılaştırma oda sıcaklığında derin çekilen parçanın taban kenar bölgesinde (196 dan 259 a) sertliğinin arttığını, daha büyük artışın ise (196 dan 316 ya) parçanın ağız bölgesinde meydana gelmiştir. Derin çekme sınırında ılık yapılan uygulamanın, oda sıcaklığında yapılan uygulamaya göre 18% in üzerinde artış meydana gelmiş olmasına rağmen sertlik değerlerindeki artış miktarının aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca, optik mikro içyapı görüntüleri karşılaştırıldığında belirgin bir değişimin meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Derin çekilmek üzere hazırlanan numune % 26 martensitik ve % 74 ferritik içyapı oluşumları tespit edilmiş, derin çekme sonrasında bu yapılarda meydana gelen değişim $\pm\%2,3$ gibi sınırlı bir oranda kalmıştır. Ilık derin çekilen parçanın iç malzeme yapı değişimlerinin sınırlı seviyede gerçekleşmiş olmasının nedeninin

kalıcı şekil değiştirmenin tahmin edilebilecek etkilerinden olup sıcaklık artışından kaynaklanmamaktadır. Derin çekilen parçanın kalınlığındaki değişim Tablo 5 te verilmiştir. Farklı sıcaklık ve yağlayıcı kullanarak derin çekilerek elde edilmiş kapların ağız bölgesinin kalınlığının arttığı diğer bütün bölgelerde azaldığı görülmüştür. Kalınlıkta olan azalma oranı uygulanan her üç durum için birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar derin çekme sınır oranının artırılması için ısıtmanın önemini ve ısıtmanın flanş bölgesi ile sınırlı olması gerekliliğini göstermiştir.

Tablo 5. DP600 1,6 mm, derin çekilen parçanın kalınlığının değişimi

DP 600, t=1,6 mm				
D _b	Bölge No	D _b		
		88,0	98,0	104,0
		Ölçümler		
		Oda (grafit)	Ilık (Grafit)	Ilık (Grafit+PTFE)
	1	2,03	2,11	1,87
	2	1,66	1,61	1,58
	3	1,54	1,52	1,49
	4	1,26	1,30	1,34
	5	1,37	1,34	1,44
	6	1,40	1,45	1,37
	7	1,43	1,42	1,43

SONUÇLAR

Ilık sıcaklık seviyesinde numune flanş bölgesi ısıtılarak derin çekme yöntemi DP600, HSLA ve IF çeliklerine uygulanmıştır. Derin çekme öncesinde test parçasının flanş bölgesinde 275- 180⁰ C aralığında sıcaklık değişimi elde etmek için numune indüksiyon ile ısıtılmış, gereğinde de merkezine zımba deliğinden su damlatılmıştır. Geliştirilen yöntem ile derin çekme sınır oranında % 25,58' e varan artış sağlanmıştır. Bahr deformasyon dilatometresi ile 150- 300⁰ C sıcaklıklarında çekme deneyleri yapılarak malzeme karakteristikleri bulunmuştur. Araştırmanın diğer sonuçları ise numunenin sıcaklığının artırılması ile uygulanan zımba kuvveti azalmış, numunenin ılık sıcaklık seviyesinde ısıtılmış olmasından dolayı malzeme içyapısında belirgin bir değişim gerçekleşmemiş, yapılan sertlik ve kalınlık ölçümlerinde kabın taban bölgesine yakın bölgelerde birbirine yakın, ağız bölgesinde ise sınırlı oranda farklılık tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde derin çekmenin gerçekleştiği flanş bölgesinin akma dayanımı işlem öncesinde ılık seviyede ısıtılmak suretiyle düşürülmelidir. Ayrıca, derin çekilmekte olan numunenin kalıbın içine çekilen kısmının süratle soğutulması oluşan gerilmelere karşı dayanımı artırılmalıdır. Derin çekilen parçalarda gözlemlenen en yaygın hata kabın taban radyus ve/veya yan yüzey bölgelerinde

meydana gelen yırtılma ile derin çekme işleminin tamamlanmamış olmasıdır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından 111M448 numaralı ve Atılım üniversitesi tarafından ATÜ-BAP-1011-13 numaralı projelerle ile sağlanan finansal destek, ATILIM Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne ve çalışanlarına, deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar için teşekkür ederler

KAYNAKÇA

1. Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M., Sterzing, A., 2006, Sheet metal forming at elevated temperatures, Annals of the CIRP, 55/2: 793-816
2. Kleiner, M., Geiger, M., Klaus, A., 2003, Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming, Annals of the CIRP, 52/2: 521-542
3. Mori, K. Maki, S., Tanaka, Y., 2005, Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating, Annals of the CIRP, 54/1: 209-212
4. Bruschi, S., Altan, T., Banabic, D., Bariani, P.F., Brosius, A., Cao, J., Ghiotti, A., Khraisheh, M., Merklein, M., Tekkaya, A.E., 2014, Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming., Annals of the CIRP, 63/2: 727-749
5. Kaya, S., Spampinato, G., Altan, T., 2008, An Experimental Study on Nonisothermal Deep Drawing Process Using Aluminium and Magnesium Alloys, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130 / 061001-1: 061001-11
6. Yoshihara, S., Nishimura, H., Yamamoto, H., Manabe, K., 2003, Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a local heating and cooling technique: circular cup deep drawing process, Journal of Materials Processing Technology, 142: 609-613
7. Gelin, J.C., Moisan, A., 1986, Application of a Thermo-Viscoplastic Model to the Analysis of Defects in Warm Forming Conditions, Annals of the CIRP, 35/1:157-160
8. Shipton MH, Roberts WT., 1991, Hot deep drawing of titanium sheet. Materials Science and Technology Volume 7, Issue 6 pp. 537-540
9. Takuda H, Mori K, Masachika T, Yamazaki E, Y Watanabe, 2003, Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing. Journal of

- Materials Processing Technology, Volumes 143–144, 20, Pages 242–248
10. Doege E, Kurz G, Gong R L, 2001, Development of a formulation to describe the work softening behaviour of magnesium sheets for heated deep drawing processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 50, Issue 1, 2001, Pages 177–180
 11. Moon YH, Kang YK, Park JW, Gong SR, 2001, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 9, July 2001, Pages 1283–1294
 12. Schuöcker D, 22 August 2001, Mathematical modeling of laser-assisted deep drawing, Journal of Materials Processing Technology, Volume 115, Issue 1, Pages 104–107.
 13. Ota, E. , Yogo, Y., Iwata, T., et al., 2014, Formability improvement technique for heated sheet metal forming by partial cooling, Key Engineering Materials, Volume 622-623, 2014, Pages 279-283
 14. El-Morsy, A.-W. , Manabe, K.-I., July 2006, Finite element analysis of magnesium AZ31 alloy sheet in warm deep-drawing process considering heat transfer effect, Materials Letters, Volume 60, Issue 15, Pages 1866-1870
 15. Kop, R., 15 June 1996, Proceedings of the 6th International Conference on Metal Forming, Some current development trends in metal-forming technology, Journal of Materials Processing Technology, Volume 60, Issues 1–4, Pages 1–9.