


Cevat Çiçek 

Doğu Pres A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Bursa

Cemil Günhan Erhuy * 

Doğu Pres A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Bursa

Hasan Melih Kınagu 

Doğu Pres A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Bursa

Niyazi Efe 

Doğu Pres A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Bursa

Onur Saray 

Bursa Teknik Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Bursa

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 20-05-2020

Kabul: 07-08-2020

*Sorumlu Yazar: Cemil Günhan Erhuy
Email: cemilerhuy@dogupres.com

Plastiklik Özelliği Son Derece Sınırlı Olan Yüksek Dayanımlı Paslanmaz Çelik Sacların Hassas Kesilebilme Kabiliyeti Üzerine Kalıp Profil Geometrisinin Etkisi

Hassas kesme işlemi, dar boyutsal toleranslara sahip ve kesme yüzey kalitesinin, geleneksel kesme yöntemleri ile kıyaslandığında çok daha üstün olmasının istendiği sac parçaların imalatı için başvurulan özel bir yöntemdir. Sac malzeme özellikleri ile kesme kalıbının tasarımı ve işlem parametreleri, sac metallerin hassas kesilebilme kabiliyetine etki eden başlıca faktörlerdir. Bu çalışmada, otomotivde yakıt sistemlerinde kullanılan, yüksek dayanımlı ve plastiklik özelliği çok sınırlı olan DIN 1.4310 kalitesindeki paslanmaz çelik sacdan mamul bir pul için hassas kesme prosesi sayısal olarak incelenmiştir. Seçilen üç farklı kalıp profil geometrisinde, sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizler ile bu sacın hassas kesilebilme kabiliyeti araştırılmıştır. Kalıp kesme ağzında düz profilden kademeli geometrilere geçildikçe, kesme yüzeylerinde kopmanın azaldığı ve yüzey kalitesinin iyileştiği görülmüştür. Tek kör bilemeli kalıp profili ile kesme yüzey kalitesi belli düzeyde iyileşirken; pulun silindirik taşlanmasına gerek duyulmayacak şekilde en iyi kesme yüzey kalitesine, çift kademeli kör bileme ve bu iki bileme arasında bir kalibrasyon düzlüğü içeren kalıp profiliyle ulaşılmıştır. Diğer yandan, ağır bir hidrostatik basınç altında gerçekleşen kesme nedeniyle pul alın yüzeyinde ortaya çıkan bombeleşmenin, kademeli profillerle tasarlanan kalıplarda daha fazla olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, hassas kesme proses parametreleri optimize edilmedikçe, alın taşıma ile pulda bir ek bitirme işleminin gerekli olacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sac metal, hassas kesme, DIN 1.4310, paslanmaz çelik, yüksek dayanım, düşük plastiklik özelliği, sonlu elemanlar analizi, kalıp tasarımı, profil geometrisi, gerilme üç eksenliliği, yüzey kalitesi, bombeleşme.

GİRİŞ

Sac metalin, bir kesme kalıbı (matris) ve bastırıcı (pot çemberi) arasına sabitlenerek zımba ile kesildiği geleneksel bir sac kesme yöntemi göz önüne alınırsa, zımbanın sacı kalıp boşluğuna doğru iten hareketi esnasında, kesme yüzeyinde bir çatlakın başlangıcına kadar plastik deformasyon meydana gelmektedir. Bu deformasyona uğrayan bölgede, zımbanın uyguladığı kuvvetin etkisi ile nihayetinde bir çatlak oluşmakta; kesilen parça da sac iskeletinden veya ana gövdeden ayrılmaya başlamaktadır. İlk olarak, sacın, zımba ile kalıp arasında kalan kesme yüzeyinde yoğun kayma gerilmeleri meydana gelmekte; bunların yoğunlaştığı bölgede sac ayrılmaktadır. Parça, kesme prosesinin ilk aşamasında ana gövdeden kesilme ile ayrıldığı için, kesme yüzeyi parlak; yüzey pürüzlülük değerleri düşüktür. Kesme prosesinin devamında iş parçası ana malzemeden koparak uzaklaştığından, kopan kısımda

yüzey mat ve pürüzlü olmaktadır. Kesme yüzeyinin yapısına ise, ilk oluşan çatlak yön vermektedir [1]. Geleneksel kesme yöntemlerinde söz konusu olan bu mekanizmalar nedeniyle, kesme yüzeyinin kalitesi belli bir seviyenin üzerine çıkamamakta ve parçadan beklenen geometrik ölçüler, dar tolerans aralıklarına girememektedir. Hatta çoğu kez, kesilen yüzeylere çapak alma gibi ek işlemler uygulanmaktadır.

Hassas kesme işleminde ise, sacın, kesim yüzeyi boyunca nerdeyse hiç kopma oluşmadan; tüm kesitin, kayma gerilmesi altında plastik deformasyona maruz kalarak kesilebilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemde sac, kesme kalıbı (matris) ve bastırıcı (kılavuz kalıp) arasında yüksek bir baskı kuvveti ile sıkıştırılmakta ve kesilecek kısım, zımba tarafından kalıp boşluğuna itilerek kesme gerçekleşmektedir. Kalıpta, geleneksel bir kesme işlemindeki kesme boşluğu sac kalınlığının yaklaşık %5'i civarındayken, hassas kesimlerde bu

boşluk çok daha az olup, sac kalınlığının %1'i veya daha altında kesme boşluğu verilebilmektedir. Bu da hassas kesme preslerinin ve kalıp elemanlarının son derece hassas boyutlarda ve rijit yapılarda olmasını gerektirmektedir. Yüksek bir basınç altında yüzeyleri sıkıştırılarak tutulan sac metalin, çok dar bir kesme boşluğu boyunca plastik akışa zorlanan kısmı, ağır bir hidrostatik basınca maruz kalarak ekstrüzyona benzer bir davranış sergilemekte ve nihayetinde, neredeyse hiç kopma gerçekleşmeden iskeletinden ya da ana sac gövdeden kesilip ayrılmaktadır. Kayma gerinimi ile ortaya çıkan plastik deformasyon nedeniyle, kesme yüzeyi parlak; yüzey pürüzlülük değerleri çok düşük olmaktadır. Hassas kesme işlemi ile imal edilen sac parçalarda, bitirme amaçlı ikincil bir yüzey işlemine çoğu zaman gerek kalmaz; bu sayede üretim süresi ve operasyon maliyetleri ciddi ölçüde azalabilir [2-3].

Sac metallerin hassas kesilebilme kabiliyeti, sac malzemenin mekanik özellikleri başta olmak üzere, proses parametreleri ve kalıp sisteminin tasarımına bağlı olmakta ve literatürde bu faktörlerin etkisinin incelendiği çok sayıda çalışma yer almaktadır. Söz konusu çalışmalar ve endüstriyel uygulamalar birlikte göz önüne alınırsa, hassas kesmede istenen kalitelere ulaşmaya engel olan problemler için, kesme boşluğu, takım malzemesi ve kaplaması, sacın malzemesinin iç yapısı [1, 4, 5, 6], sac yüzeyine uygulanan basınç veya karşı kuvvet [7] değeri, kesme veya zımba hızı, V-halkası kullanımı [8, 9] gibi çeşitli parametrelerin doğru seçilebilmesine dayalı olarak geliştirilen birçok çözümün, esasen o probleme özel olduğu görülebilir. Ayrıca, kesme kalitesini iyileştirme amacıyla kauçuk besleme [3], ultrasonik titreşim [10] gibi bazı özel uygulamalar veya özgülleştirilmiş V-halkası tasarım esaslarını [11, 12] konu alan çalışmalar da literatürde dikkat çekmektedir.

Hassas kesme işleminde iş parçası kalitesinin doğru tahmin edilebilmesi için, hasar oluşumunun doğru bir şekilde yorumlanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, sayısal çalışmaların önemi göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür. Çatlak başlangıcı, deformasyonun gelişim eğilimi [13], kesme işlemi sonrasındaki iş parçası malzemesindeki faz dağılımları [14] sayısal analizlerden tahmin edilebilmekte; bu tahminler de deneyler ile doğrulanabilmektedir. Ayrıca, tekniğin bilinen durumu itibarıyla deneysel çalışma yapılması mümkün olmayan negatif kesme boşluğuna sahip kesme ekipmanı kullanımı gibi senaryolar da sayısal çalışmalara konu olabilmektedir [15].

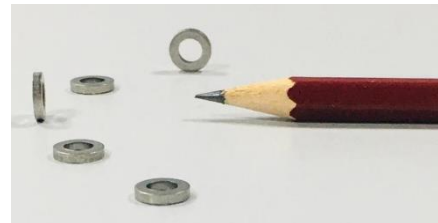
Hassas kesme kalıplarının tasarımında V-halkası kullanıldığında, kesme kenarının önünde bu halkanın saca batması ile mevcut gerilme halinin üzerine binen bir hidrostatik basınç etkisi doğurmaktadır. Diğer bir ifadeyle bu batma, gerilme halini üç eksenli basmaya doğru yaklaştırmakta; onun da çatlakları baskılama

etkisi ile sacın hassas kesilme kabiliyeti artmaktadır. Ancak, V-halkası kullanımı, endüstriyel uygulamalar için pek tercih edilmemektedir. Zira istenen batma derinliğinin, özellikle sert saclarda sağlanabilmesi ve halkanın hassas işlenmesi zordur. Ucunun kırılması veya aşınması halinde, onarım için tüm kalıp yüzeyi ile birlikte işlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, hassas kesme kalıplarının gelişim istikametlerinden biri, V-halkası içermeyen tasarımlar olmuştur [7, 16]. Bu çalışmada, DIN 1.4310 standardında üretilmiş, plastik şekillendirilme ve de hassas kesilme kabiliyeti çok az olan yüksek dayanımlı bir paslanmaz çelik sac için, hassas kesme kalıbının V-halkası içermeyecek şekilde tasarımına odaklanılmıştır. Seçilen üç farklı profil geometrisi ile tasarlanan kalıplarda yapılacak hassas kesme işlemleri, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve proses simülasyonları ile parçanın kesme yüzeylerinin ve biçimsel kalitesinin tahminine yönelik elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kesme yüzeylerindeki toplam düzgün kesme boyu ve üst yüzeyde meydana gelen bombeleşmenin yüksekliği ile irdelenen bu sayısal çalışmanın sonuçları, hassas kesme kalıplarında profil geometrisine dayalı kesme stratejisinin önemini ortaya koymuştur.

MATERYAL ve METOT

Hassas kesme proseslerinin incelenmesi amacıyla bu çalışmada ele alınan parça, otomotiv sektöründe yakıt sistemlerinde kullanılan ve boyutları Şekil 1'de görülen bir puldur. Pulların kesildiği sacın malzemesi DIN 1.4310 / EN X12CrNi177 / AISI 301 kalitesinde paslanmaz çelik olup, bu malzemenin standartlarda tanımlanmış olan kimyasal bileşimine Tablo 1'de yer verilmiştir. Söz konusu paslanmaz çeliğin sevke tabi haldeki mekanik özellikleri, üretim sürecindeki ısı işlem ve deformasyon geçmişine göre tanımlanan kondisyonuna göre değişmektedir. Pulların kesileceği sac malzemenin beklenen akma dayanımı minimum 1.200 N/mm²; çekme dayanımı 1.350-1.550 N/mm² ve kopma uzaması minimum %5 olarak belirtilmiştir. Beklenen sertlik değeri ise 420-480 HV aralığındadır.

Bu değerler, sac malzemenin plastiklik özelliği veya şekillendirilebilme kabiliyetinin son derece sınırlı bir düzeyde olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 1. Hassas kesme ile imal edilen pullar

Tablo 1. Pulların imal edildiği DIN 1.4310 / EN X12CrNi177 / AISI 301 kalite paslanmaz çelik için tanımlanmış standart kimyasal bileşim

Element	C	Si	Mn	Ni	P
%	0,05-			6,00-	
Ağırlık	0,15	≤ 2,00	≤ 2,00	9,50	≤ 0,045
Element	S	Cr	Mo	N	Fe
%		16,00-		≤ 0,11	
Ağırlık	≤ 0,015	19,00	≤ 0,80		Kalan

Sac malzemeden, ASTM E8M standardında göre, (ilk ölçme uzunluğu 50 mm, daraltılmış bölgenin ilk genişliği 12,5 mm olan tipte) tel erozyon ile kesilerek hazırlanan numuneler ile oda sıcaklığında $10^{-3} s^{-1}$ 'lik bir gerinim hızıyla üç tekrarlı olarak yapılan çekme testlerinden elde edilen sonuçların ortalaması, pulun şartnamesine göre, bu malzemeden beklenen mekanik özelliklerin sağlandığını göstermiştir.

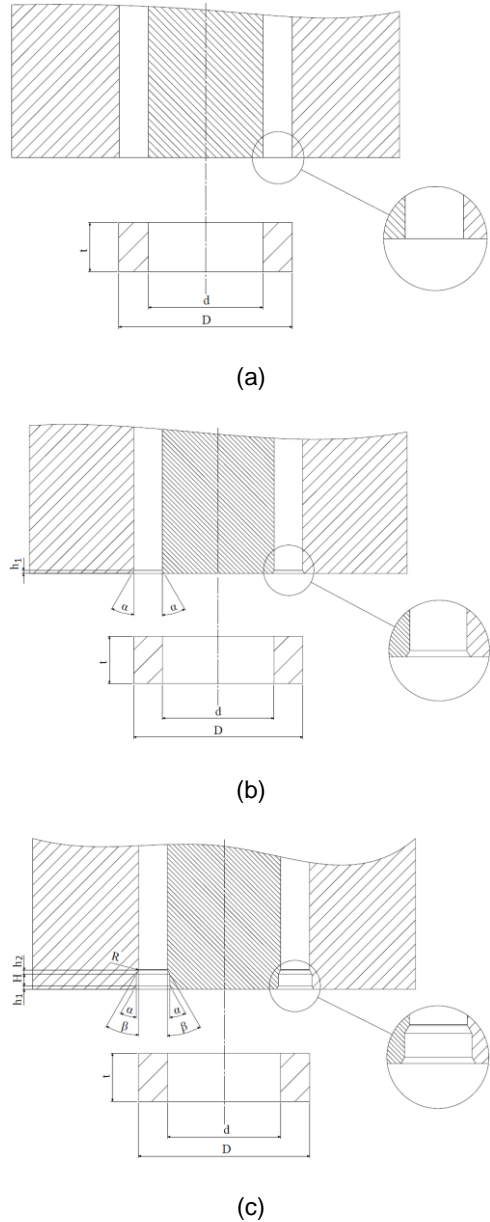
Pulun iç ve dış çapının aynı anda kesildiği hassas kesme proseslerinde kullanılmak üzere, Şekil 2'de şematik olarak görülen, kesme ağzı için farklı profil geometrilerine sahip üç tip kalıp tasarlanmıştır. İlk kalıp (Şekil 2.a), herhangi bir kademe içermeyen, düz bir profile sahip olduğundan, bu geometri "D" olarak anılacaktır. İkinci geometride (Şekil 2.b) ise, kalıp kesme ağzında havşa şeklinde bir pah yer almaktadır. Bu profilin endüstrideki yaygın tabiri "kör bileme" olduğundan, kısaca "KB" olarak anılacaktır. Üçüncü tip geometride (Şekil 2.c) ise, kalıp profilinde kesme ağzından itibaren iki pah (kör bileme) yer almakta; aralarında da kalıp eksenine paralel yönde bir düzlük bulunmaktadır. Bu düzlük, endüstride "kalibrasyon mesafesi" olarak tabir edildiğinden, söz konusu profil kısaca "KB/KAL/KB" olarak gösterilecektir.

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Farklı tip profil geometrileri ile tasarlanmış hassas kesme kalıpları kullanılarak gerçekleştirilen kesme proseslerinin analiz edilmesinde, iki boyutlu aksenal simetrik sonlu eleman modelleri kullanılmış olup, bu modellerin temsili Şekil 3'te verilmiştir. Oluşturulan modele göre, fiziksel kalıp sistemi ile uyumlu olarak, 1 mm/s'lik hız ile hareket eden bir zımbanın, pulun çevresini kesen dış kalıp, sabit delik zımbası, bastırıcı (pot çemberi) ve itici görevi de üstlenen karşı baskı çemberi arasında hareketi kısıtlanmış sacı kesmeye zorladığı görülmektedir (Şekil 3).

Hassas kesme prosesinin sayısal modelleri ticari MSC Simufact programında hazırlanarak MSC Marc paket programında çözdürülmüştür. Hassas kesilecek sacın kesim bölgesinde, ortalama büyüklüğü 0,05 mm

olan, dört adet düğüm noktasına sahip kare elemanlar (Marc eleman numarası 10) kullanılmak suretiyle ağ yapıları oluşturulmuştur (Şekil 3).



Şekil 2. Hassas kesme kalıpları için seçilen farklı profil geometrileri: Düz- D profil (a), tek kör bilemeli- KB profil (b) ve çift kör bileme ve tek kalibrasyonlu- KB/KAL/KB profil (c)

Kesme işlemi sırasında ortaya çıkan aşırı plastik deformasyon nedeniyle, her bir iterasyon adımında uygulanabilecek maksimum eşdeğer plastik gerinim değeri 0,2 olarak sınırlandırılmıştır. Bu değeri aşan eşdeğer plastik gerinimlerin ortaya çıkması halinde, iterasyonlar durdurularak, aynı eleman boyutu ile yeniden ağ örülmesi sağlanmıştır.



Şekil 3. Kullanılan sonlu elemanlar modeli ve kalıp sistemi bileşenlerinin şematik gösterimi

Ağ yapısının çözdürülmesinde, çatlak oluşumu ve ilerlemesinin temsili için Cockroft-Latham (C-L) [17] hasar modeli kullanılmış; bu modeldeki kritik hasar eşiği değeri hem çekme testleriyle hem de deneysel hassas kesme simülasyonlarıyla kalibre edilmiştir. Kalibrasyon çalışması kapsamındaki deneysel kesme işlemlerinde, ticari olarak üretilen bir pulun profil boyutları Mahr Marsurf XC 20 model bir kontur ölçüm cihazında ölçülerek, sonlu eleman modelinden elde edilenler ile uyumlu hale geldiği kritik hasar eşiği ve sürtünme katsayısı değerleri belirlenmiştir.

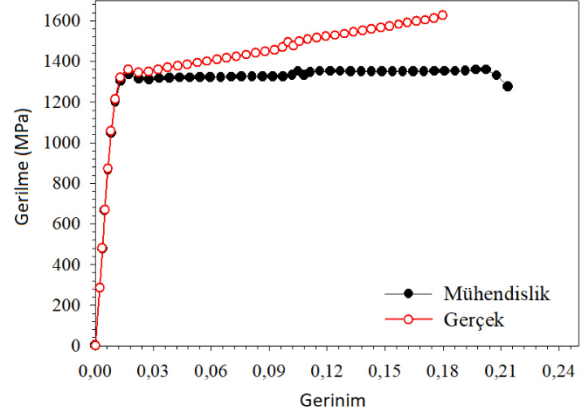
Sistemdeki kalıp elemanları rijit kabul edilmiştir. Kalıp elemanları ile sac malzeme arasındaki yüzey etkileşimleri Coulomb Yasasına göre modellenmiştir. Sonlu eleman modelinde, ortam, sac metal ve kalıp elemanlarının sıcaklıkları sabit 20 °C olarak alınmış; plastik deformasyon kaynaklı adyabatik ısınmalar ve sürtünme sonucu meydana gelen sıcaklık artışları ile bunun sac malzemenin mekanik davranışı üzerindeki etkileri göz ardı edilmiştir. Sonlu eleman modelinden, hassas kesme işlemi sonrası meydana gelen eşdeğer plastik şekil değiştirme (gerinim), ortalama gerilme ve hasar birikimi gibi mekanik büyüklükler ile hassas kesme (düzgün/temiz kesim) boyu ve bombeleşme yüksekliği gibi teknolojik/endüstriyel açıdan önemli olan geometrik değerler ve kesme prosesinde oluşan kuvvetler hesaplatılarak karşılaştırılmıştır.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Malzemenin Mekanik Karakterizasyonu ve Proses Modelinin Kalibrasyonu

Ele alınan pulun imal edildiği DIN 1.4310 kalite paslanmaz çelik saca oda sıcaklığında yapılan çekme testleriyle belirlenmiş olan mühendislik ve gerçek gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4'te görülmektedir. Sac malzeme 1.316 MPa gibi nispeten yüksek bir gerilme değerinde belirgin akma davranışı sergiledikten sonra plastik deformasyona başlayıp 1.394 MPa değeri ile belirlenen çekme dayanımına kadar pekleşmiştir ve

maksimum üniform gerinim değeri 0,18 olarak elde edilmiştir (Şekil 4, Tablo 2). Üniform deformasyon alanında $\sigma = K \varepsilon^n$ denklemine uyan pekleşme üssü ve dayanım katsayısı ise, sırasıyla 0,09 ve 1.946 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Üniform deformasyon sonrasında, boyun verme ile başlayıp kopma ile son bulan uzama, sınırlı bir düzeyde kalmış olup kopma uzaması %21 olarak ölçülmüştür (Şekil 4, Tablo 2).



Şekil 4. Pulların imal edildiği DIN 1.4310 kalite paslanmaz çeliğin oda sıcaklığındaki çekme testlerinden elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme-gerinim eğrileri

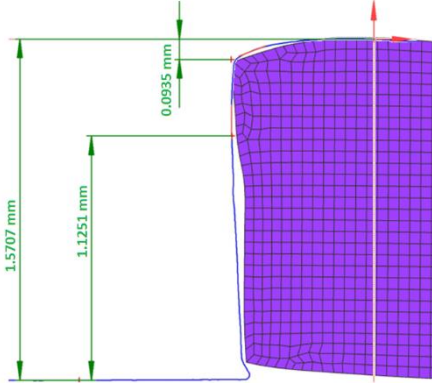
Tablo 2. Pulların imal edildiği DIN 1.4310 kalite paslanmaz çeliğin oda sıcaklığındaki çekme testleri ile belirlenen mekanik özellikleri

Akma dayanımı (MPa)	1.316±8
Çekme dayanımı (MPa)	1.394±15
Maksimum üniform gerinim	0,18±0,014
Kopmadaki uzama yüzdesi	%21±%1,3
Pekleşme üssü, n	0,09±0,007
Dayanım katsayısı, K (MPa)	1.946±30

Malzemede gözlenen bu deformasyon davranışı, mekanik özellikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, yüksek akma dayanımı sonrası belirgin bir pekleşme göstermeden çekme dayanımına ulaşılmasından ötürü plastiklik özelliğinin sınırlı kaldığı söylenebilir.

Kesme prosesinin simülasyonu için gerekli olan hasar mekanizmasına ait parametrelerin belirlenmesi için kurgulanan kalibrasyon kalıbından kesilen örnek pulların geometrik özellikleri ile simülasyondan elde edilen sonuç Şekil 5 ve Tablo 3'te karşılaştırılmıştır. Pulda bombeleşme yüksekliği ve düzgün kesim boyu, sırasıyla 0,092±0,004 mm ve 0,4184±0,06 mm olarak ölçülmüştür. Aynı boyutlar için simülasyon çalışması ile belirlenmiş olan hesaplamalı değerler ise, sırasıyla 0,101 mm ve 0,428 mm'dir. Elde edilen bu değerler karşılaştırıldığında, oluşturulan simülasyon modelinin bombeleşme yüksekliği ve düzgün kesme boyunu, sırasıyla %91 ve %97 doğrulukta tahmin edebildiği

anlaşılmaktadır (Tablo 3). Sonuçlar arasında görülen bu uyum, kesme prosesi sonrasında kullanılan C-L hasar mekanizmasına ait kritik hasar eşiğinin 0,11 ve sürtünme katsayısının 0,15 olarak seçilmesi ile elde edilmiştir. Söz konusu parametrelerin kullanılmasıyla oluşturulacak simülasyon modellerinin, DIN 1.4310 kalitede sac malzemenin hassas kesme proseslerinin yüksek doğrulukta modellenebileceği göstermektedir.



Şekil 5. Kalibrasyon analizinden elde edilen sonuçlar ile kalibrasyon kalıbında hassas kesilen pullardaki profil tarama sonuçlarının karşılaştırılması

Tablo 3. Deneysel ve hesaplamalı kalibrasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar

	Bombeleşme yüksekliği (mm)	Düzgün kesim boyu (mm)
Deneysel	0,092±0,004	0,4184±0,06
Hesaplamalı 1	0,101	0,428

Farklı Ağız Geometrisine Sahip Kalıpların Hassas Kesme Performanslarının Değerlendirilmesi:

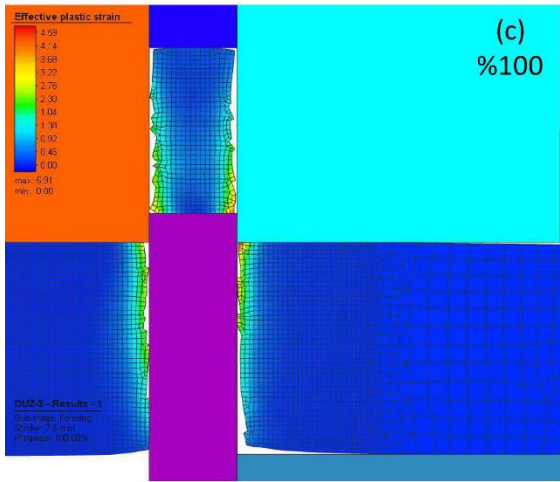
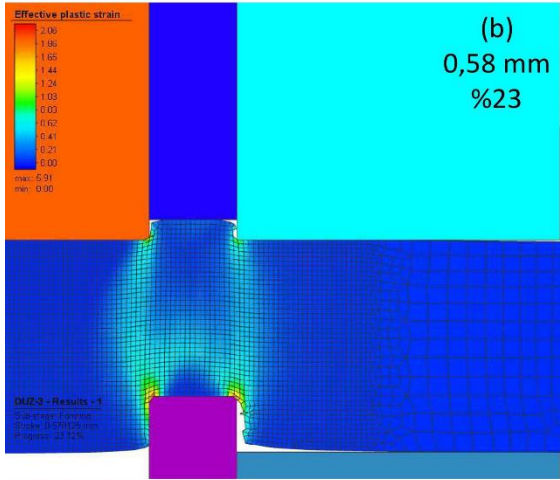
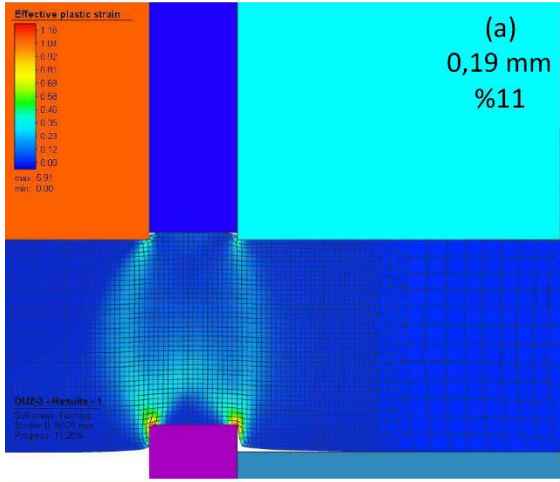
Düz profil geometrili kalıp ile uygulanan hassas kesme işlemindeki kesme evreleri ile proses sonunda sac kesitinde söz konusu olan efektif plastik gerinim dağılımı Şekil 6'de verilmiştir. Bu işlemde, hareketli zımbanın deplasmanı ile plastik deformasyonun, karşı baskı çemberinin köşelerinden başladığı ve yaklaşık 45°'lik bir açıyla yönelmiş deformasyon bantları dahilinde gerçekleştiği görülmektedir. Beraberinde, sacın kalınlık doğrultusunda, karşı baskı çemberinin yüzeyine ulaşan ikincil deformasyon bantlarının oluşumu da dikkat çekmektedir (Şekil 6.a). Bu kesme prosesinin iki farklı deformasyon bandı dahilinde sürmesi, büyük oranda, kesilen pul (sac) kalınlığının et kalınlığına kıyasla çok daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Kesmenin tüm kademelerindeki bu deformasyon davranışı dahilinde, hareketli zımba 0,19 mm'lik bir deplasman yaptığında kesme evresi tamamlanmakta ve koparma evresi başlamaktadır. Hareketli zımba stroku 0,58 mm değerine ulaştığında, karşı baskı çemberi tarafında da koparma evresinin başladığı saptanmıştır (Şekil 6.b). Strokun artması ile

çatlağın ilerlemesi sonucunda en büyük efektif plastik gerinim değerinin, deformasyon bantlarının kesiştiği bölgelerde 5,91'e ulaştığı görülmüştür (Şekil 6.c).

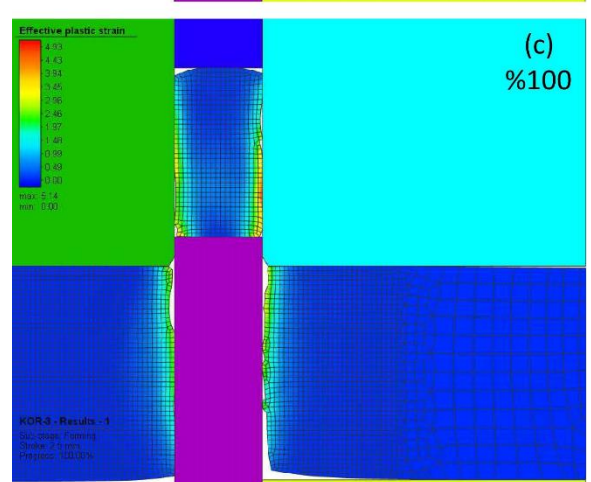
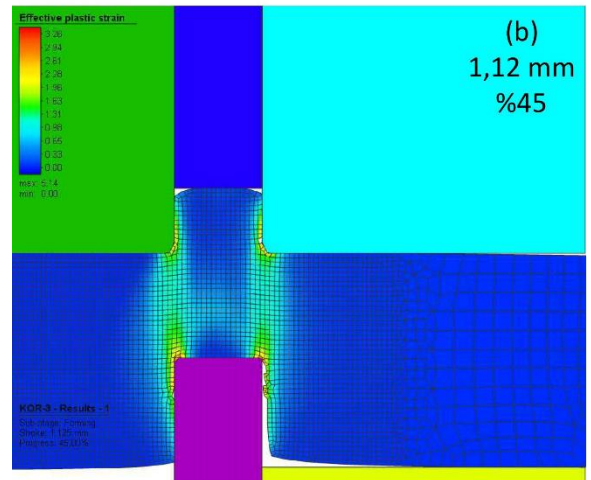
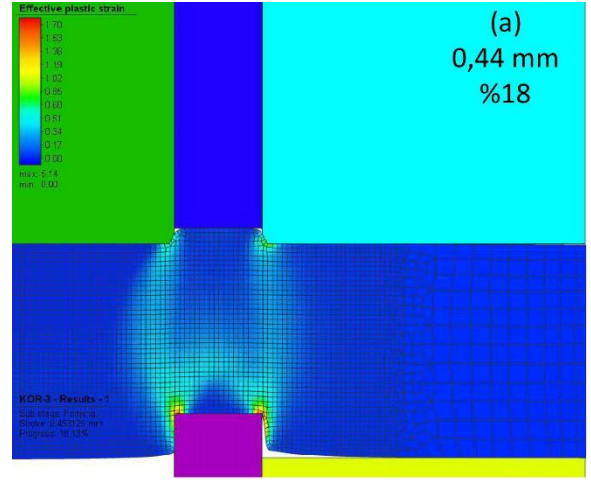
Profil geometrisinde tek kör bilemeli olan kalıp ile yapılan hassas kesme işleminde ise, efektif plastik deformasyon davranışının farklı proses aşamalarında sac kesitindeki dağılımı Şekil 7'de görülmektedir. Bu proseste, kör bileme uygulamasının, kesme sırasında meydana gelen deformasyon davranışında belirgin bir değişikliğe neden olmadığı; hareketli zımba tarafında çatlağın, 0,44 mm gibi nispeten daha yüksek değerlerde olan bir zımba deplasmanı sonrasında olduğu dikkat çekmektedir (Şekil 7.a). Diğer yandan, karşı baskı çemberi tarafında kesmenin koparmaya dönüştüğü strok değeri gözle görülür biçimde artmış ve 1,12 mm değerine ulaşmıştır (Şekil 7.b). Bu kesme prosesinde sacdaki efektif gerinim değeri ise 5,14 seviyelerinde ortaya çıkmıştır (Şekil 7.c).

Çift kör bilemeli ve kalibrasyon düzlüğü içeren kademeli profil geometrisine sahip kalıp ile yapılan kesme işleminde, efektif plastik gerinimin farklı kesme aşamalarındaki dağılımı Şekil 8'de verilmiştir. Buradaki deformasyon halinin, kademe olarak ifade edilen çap daralma bölgesinden geçişinden önce, düz ağızlı kalıptaki (Şekil 6) ve tek kör bilemeli kalıptaki (Şekil 7) kesimlerde ortaya çıkan deformasyon hali ile büyük oranda benzer olduğu dikkati çekmektedir. Buna karşılık, deformasyonun kademe içinde devam eden bölümünde, hareketli zımbanın yüzeyine 45°'lik açı ile yönelmiş deformasyon bantlarının etkinliğini yitirdiği anlaşılmaktadır (Şekil 8.b). Diğer bir deyişle, lokal plastik deformasyonun, daha çok sacın kalınlık doğrultusunda yönelen deformasyon bantlarında sürdüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra, çift kademe kör bilemeli ve kalibrasyon düzlüğü içeren hassas kesme kalıbında, hareketli zımba tarafında kopmanın başladığı hareketli zımba stroku önemli oranda artmış ve 0,44 mm değerine ulaşmıştır (Şekil 8.a). Karşı baskı çemberi tarafında ise, zımbanın 2,06 mm'lik deplasmanı sonrası, kademe geçişi öncesinde çatlak oluşmaktadır (Şekil 8.b). Bu kalıptaki kesme işlemi kapsamında, efektif plastik gerinimin 5,60 düzeyinde ortaya çıktığı anlaşılmaktadır (Şekil 8.c).

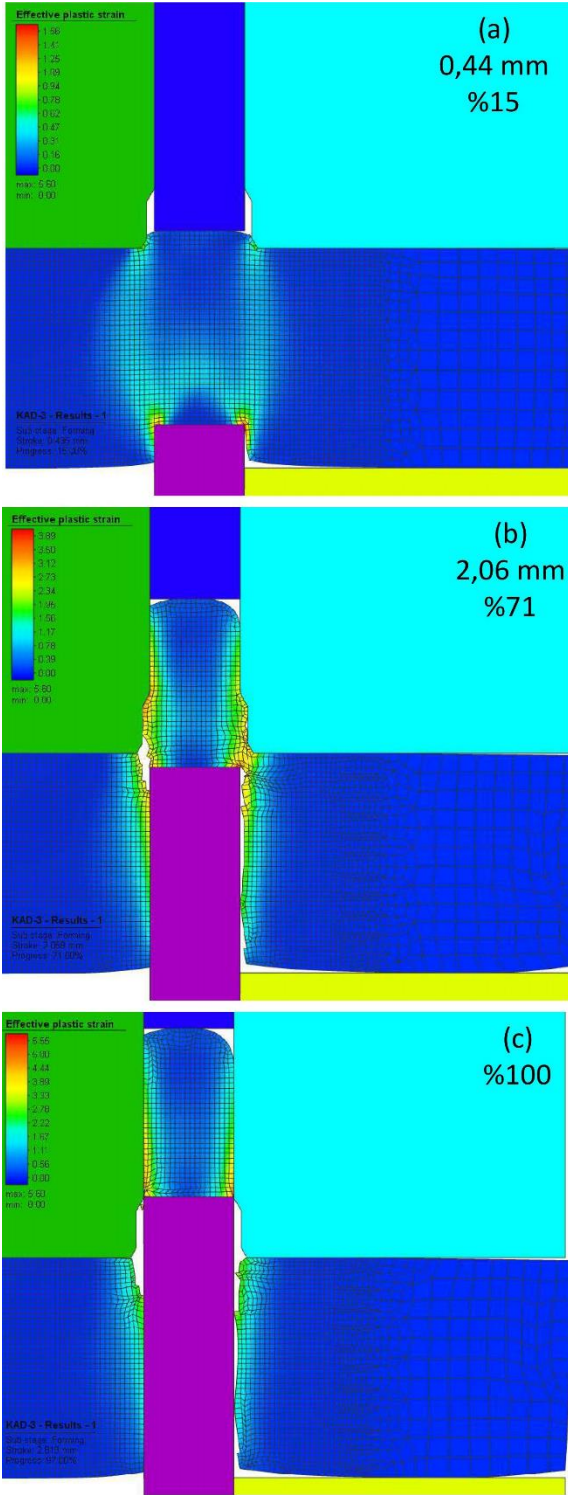
Farklı profil geometrilerine sahip kesme kalıpları ile hassas kesilen pulların işlem sonrasında geometrik özelliklerindeki değişimler ise Şekil 9'da verilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre, düz profilli kalıp ile yapılan hassas kesme prosesi ile elde edilen pulun hem iç çap hem de dış çap kesim yüzeylerinde düzgün/temiz bir kesme boyunun neredeyse elde edilemediği; pulun kesiti boyunca kesimin büyük oranda kopma şeklinde meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, kopmanın, hareketli zımbanın çok düşük stroklarında meydana gelmesine istinaden, bombeleşme yüksekliğinin çok düşük bir seviyede (yaklaşık 0,035 mm) kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 9.a).



Şekil 6. Düz profil geometrisine sahip (D) kalıpla yapılan hassas kesmede hareketli zımba tarafında (a), karşı baskı çemberi tarafında çatlak başlangıcı sırasında (b) ve kesme sonunda (c) efektif plastik gerininin sac kesitindeki dağılımı



Şekil 7. Tek kör bilemeli profil geometrisine sahip (KB) kalıpla yapılan hassas kesmede hareketli zımba tarafında (a), karşı baskı çemberi tarafında çatlak başlangıcı sırasında (b) ve kesme sonunda (c) efektif plastik gerininin sac kesitindeki dağılımı

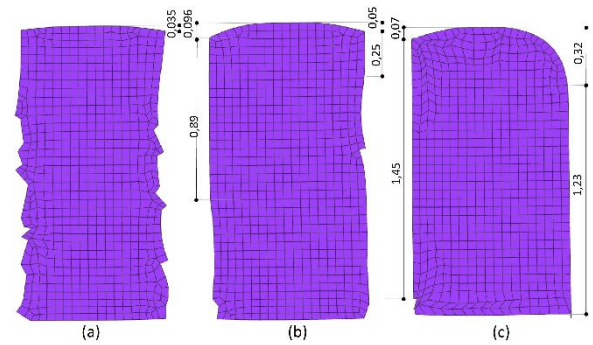


Şekil 8. Çift kör bileme ve kalibrasyon düzlüğü içeren (kademeli) profil geometrisine sahip (KB-KAL-KB) kalıpla yapılan hassas kesmede hareketli zımba tarafında (a), karşı baskı çemberi tarafında çatlak başlangıcı sırasında (b) ve kesme sonunda (c) efektif plastik gerininim sac kesitindeki dağılımı

Tek kör bilemeli profile sahip kalıp ile uygulanan hassas kesme prosesinde, düzgün kesme boyu, iç ve dış yüzeylerde sırasıyla 0,89 mm ve 0,25 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 9.b). Bombeleşme yüksekliği ise, iç ve dış yüzeylerde, sırasıyla yaklaşık 0,01 mm ve 0,05 mm gibi düşük değerler almıştır.

Çift kör bileme ve bir kalibrasyon düzlüğü içeren profile sahip kalıp ile uygulanan hassas kesmede, düzgün kesim boyu ve bombeleşme yüksekliği, diğer profil geometrilerine sahip kalıplardan elde edilen değerlere kıyasla belirgin olarak artmıştır (Şekil 9.c). Söz konusu kalıp ile pulun iç ve dış yüzeylerindeki düzgün kesme boyu, sırasıyla 1,45 mm ve 1,23 mm olarak; sırasıyla 0,07 mm ve 0,32 mm değerlerinde belirlenen bombeleşme yükseklikleri ile birlikte elde edilmiştir (Şekil 9.c).

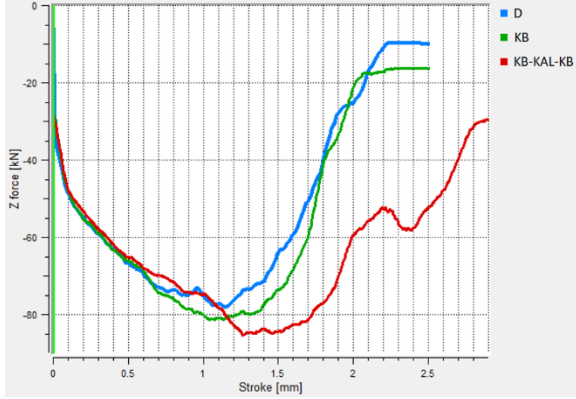
Profil geometrisi farklı kalıplar ile yapılan hassas kesme işlemleri sırasında hareketli zımbaya etki eden kuvvetin değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, hassas kesme için gerekli kuvvetin, kalıp profil geometrisinin farklı tipleri için benzer karakteristikler sergilediği anlaşılmaktadır (Şekil 10). Hassas kesmede düz ağızlı kalıp yerine, sırasıyla tek kör bilemeli kalıp ve kalibrasyon düzlüğü içeren çift kör bilemeli (kademeli) kalıp kullanılması halinde hem zımba kuvvetinin hem de söz konusu kuvvetin maksimum değerinin ortaya çıktığı strok değerinin artış gösterdiği söylenebilir (Şekil 10).



Şekil 9. Düz (a), tek kör bileme içeren (b) ve çift kör bileme ile kalibrasyon düzlüğü içeren (c) profil geometrilerine sahip kalıplarla hassas kesilen pulların geometrik özellikleri

Üç farklı kalıp geometrisi ile hassas kesilen pulun geometrik açıdan özellikleri karşılaştırılacak olursa, düz profil kalıpla kesilen pulun endüstriyel alanda pek de kabul edilebilir bir nitelikte olmadığı aşikardır (Şekil 9.a). Yapılan analizler, kalıpta basit geometrik değişiklikler sonucu kesim kalitesinin kabul edilebilir seviyelere taşınmanın mümkün olduğunu göstermiştir (Şekil 9.b-c). Buradaki iyileşmenin, farklı kalıp profil geometrileri ile yapılan kesimlerde meydana gelen deformasyon ile bağlantılı olduğu düşünülmektedir. Genel itibariyle, çatlak oluşum ve ilerleme sürecini ilgilendiren en etkin parametrelerden

başında metal şekillendirme işlemlerindeki gerilme halinin geldiği; deformasyon sırasında gerilme matrisinde hidrostatik bileşenin bası yönündeki değerinin artması ile çatlak başlangıcının daha yüksek gerinin değerlerine doğru kaydığı, ilerlemesinin baskılanıp şekillendirilme sınır gerinimlerinin arttığı bilinmektedir [16, 18, 19, 20].

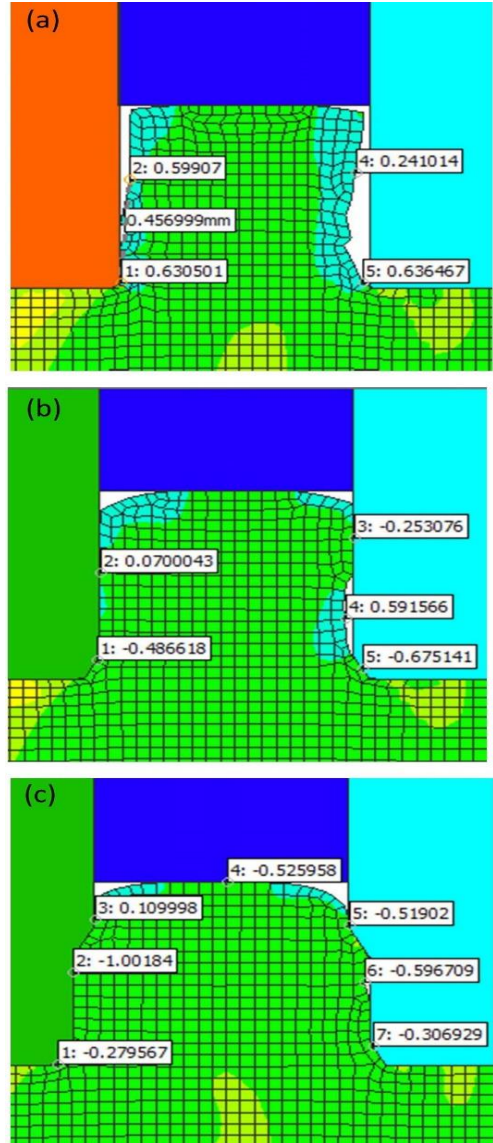


Şekil 10. Farklı profil geometrisine sahip kalıplar ile yapılan hassas kesme işlemlerinde zımba kuvvetinin strok ile değişimi

Hidrostatik gerilme bileşeni, gerilme tensöründeki normal bileşenlerin ortalamasıdır. Hidrostatik gerilme bileşeninin eşdeğer gerilmeye oranlanması “gerilme üç eksenliliği” kavramını oluşturmuştur [15-16]. Bu kavram, temel olarak, plastik deformasyon sırasında sistemin çatlak oluşumuna yatkınlığının belirlenmesine yönelik olarak kullanılmaktadır [14-16]. Söz konusu parametrenin artan değerleri ile birlikte, sistemdeki mikro-boşluk oluşumuna bağlı hasarın daha belirgin hale geldiği bilinmektedir. Bu çerçevede, çalışmada incelenen hassas kesme kalıbı profil geometrilerine yönelik olarak, ortalama normal gerilme bileşenleri açısından yapılan değerlendirmenin esası Şekil 11’de verilmiş; üç farklı geometriye sahip kalıp için, toplam kesme strokunun yarısında, gerilme üç eksenliliği parametresinin geometrideki dağılımı gösterilmiştir.

Düz profilli hassas kesme kalıbında, gerilme üç eksenliliğinin pozitif değerler aldığı görülmektedir (Şekil 11.a). Buna karşılık, tek kör bilemeli kalıp ile çift kör bileme ve kalibrasyon düzlüğü içeren kalıpta gerilme üç eksenliliğinin, Şekil 11.b ve Şekil 11.c’de görüldüğü üzere, negatif değerler aldığı ve çift kör bilemeli kademeli kalıba ait gerilme üç eksenliliği değerinin daha düşük seviyelerde ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, çift kör bileme içeren kademeli profil geometrisine sahip kalıpla uygulanan hassas kesme işleminde, kalıpta gerçekleştirilen bir geometrik değişiklik sayesinde, deformasyonun daha yüksek bir hidrostatik basınç altında sürdürülmesinin sağlandığı; bunun da çatlak oluşumunun gecikmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, DIN 1.4310 kalitede paslanmaz çelik gibi yüksek dayanıma sahip ve sınırlı plastiklik özelliği nedeniyle hassas kesme prosesine pek yatkın olmayan sac malzemeler için çift kör bileme yapılmış ve kalibrasyon mesafesi bırakılmış kademeli profile sahip kalıpların, düzgün kesim boyunun ciddi oranda artmasına olanak tanıyarak, temiz kesme yüzeylerinin elde edilmesinde daha etkin olduğu görülmüştür. Bu işlemde, kesim yüzeyinin kalitesi dışında diğer bir geometrik ölçüt olan bombeleşme yüksekliğinin daha düşük seviyelere çekilmesi için farklı parametrelerin (örneğin, baskı çemberinin uyguladığı karşı kuvvetin) etkisinin araştırılması gerektiği değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Düz (a), tek kör bileme içeren (b) ve çift kör bileme ile kalibrasyon düzlüğü içeren (c) profil geometrilerine sahip kalıplarla yapılan hassas kesimlerdeki gerilme üç eksenliliğinin farklı bölgelerde aldığı değerler

TEŞEKKÜR

Hassas kesme analizleri sırasında sağladığı destek nedeniyle Positive Dizayn Mühendislik ve Teknoloji Geliştirme Ltd. Şti. firmasına teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- 1 Mucha, J., An Experimental Analysis of Effects of Various Material Tool's Wear on Burr During Generator Sheets Blanking, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50 (2010) 5-8, 495-507.
- 2 Schmidt, R.A., Birzer, F., Höfel, P., Reh, B., Hellman, M., Rademacher, P. ve Hoffmann, H., *Cold Forming and Fineblanking, A Handbook*, Buderus Edelstahl Bad GmbH, Feintool Technologies AG Lyss, Hoesch Hohenlimburg GmbH, Unternehmensgruppe C.D. Walzholz GmbH und Co.KG, Germany, 2007.
- 3 Aravind, U., Gopalakrishnan, C. K., Uday, C. ve Venugopal, P., The Effect of Using Rubber for Applying Counter Force in Fine Blanking of AISI 304 Stainless Steel, *Procedia Engineering*, 207 (2017), 1523-1527.
- 4 Zhuang, X., Ma, S. ve Zhao, Z., A Microstructure-Based Macro-Micro Multi-Scale Fine-Blanking Simulation of Ferrite-Cementite Steels, *International Journal of Mechanical Sciences*, 128 (2017), 414-427.
- 5 Taşdemir, V., Hassas Kesme İşlemine Malzeme Kalınlığı ve Kalıp Boşluğunun Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 10 (2018) 2, 127-134.
- 6 Majerníková, J. ve Spišák, E., The Effect of Punch-Die Clearance on Blanked Edge Quality in Fine Blanking of Steel Sheets, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika*, 85 (2013) 4, 479-488.
- 7 Wang, J. P., A Novel Fine-Blanking Approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78 (2015) 5-8, 1015-1019.
- 8 Luo, C., Chen, Z., Zhou, K., Yang, X. ve Zhang, X., A Novel Method to Significantly Decrease the Die Roll During Fine-Blanking Process with Verification by Simulation and Experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, 25 (2017), 254-260.
- 9 Thipprakmas, S., Application of Taguchi Technique to Investigation of Geometry and Position of V-Ring Indenter in Fine-Blanking Process, *Materials & Design (1980-2015)*, 31 (2010) 5, 2496-2500.
- 10 Wang, C., Liu, Y., Wan, S., Guo, B., Shan, D. ve Zhang, B., Effect of Ultrasonic Vibration on Deformation in Micro-Blanking Process with Copper Foil, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 34 (2019) 2, 404-409.
- 11 Liu, Y., Tang, B., Hua, L. ve Mao, H., Investigation of a Novel Modified Die Design for Fine-Blanking Process to Reduce the Die-Roll Size, *Journal of Materials Processing Technology*, 260 (2018), 30-37.
- 12 Mao, H., Zhou, F., Liu, Y. ve Hua, L., Numerical and Experimental Investigation of the Discontinuous Dot Indenter in the Fine-Blanking Process, *Journal of Manufacturing Processes*, 24 (2016), 90-99.
- 13 Zhao, P. J., Chen, Z. H. ve Dong, C. F., Experimental and Numerical Analysis of Micromechanical Damage for DP600 Steel in Fine-Blanking Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 236 (2016), 16-25.
- 14 Thipprakmas, S., Improving Wear Resistance of Sprocket Parts Using a Fine-Blanking Process, *Wear*, 271 (2011) 9-10, 2396-2401.
- 15 Fan, W. F. ve Li, J. H., An Investigation on the Damage of AISI-1045 and AISI-1025 Steels in Fine-Blanking with Negative Clearance, *Materials Science and Engineering: A*, 499 (2009) 1-2, 248-251.
- 16 Zheng, Q., Zhuang, X. ve Zhao, Z., State-of-the-Art and Future Challenge in Fine-Blanking Technology, *Production Engineering*, 13 (2019), 61-70.
- 17 Bao, Y. ve Wierzbicki, T., On Fracture Locus in the Equivalent Strain and Stress Triaxiality Space, *International Journal of Mechanical Sciences*, 46 (2004), 81-98.
- 18 Hosford, W.F. ve Caddell, R.M., *Metal Forming- Mechanics and Metallurgy (4th Edition)*, Cambridge University Press, New York, 2011.
- 19 Wu, P.D., Embury, J.D., Lloyd, D.J., Huang, Y. ve Neale, K.W., Effects of Superimposed Hydrostatic Pressure on Sheet Metal Formability, *International Journal of Plasticity*, 25 (2009) 9, 1711-1725.
- 20 Peng, J., Wu, P.D., Huang, Y., Chen, X.X., Lloyd, D.J., Embury, J.D. ve Neale, K.W., Effects of Superimposed Hydrostatic Pressure on Fracture in Round Bars under Tension, *International Journal of Solids and Structures*, 46 (2009) 20, 3741-3749.