



Ø12x60,5 Rotilin Ardışık Kalıpta Soğuk Dövme İşleminde Meydana Gelen Çatlak Oluşumunun İncelenmesi

Investigation of Crack Evolution in Multi-Stage Cold Forging Operation of Ø12x60.5 Ball Stud

Cenk Kılıçaslan 

Norm Civata San. ve Tic. A.Ş. 10007 Sok. No:1/1 A.O.S.B. Çiğli, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: cenk.kilicaslan@normcivata.com

Geliş Tarihi / Received: 09.04.2019

Kabul Tarihi / Accepted: 05.08.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI: 10.21205/deufmd.2020226413

Atıf şekli/ How to cite : KILIÇASLAN, C. (2020). Ø12x60,5 Rotilin Ardışık Kalıpta Soğuk Dövme İşleminde Meydana Gelen Çatlak Oluşumunun İncelenmesi. DEUFMD, 22(64),137-145.

Öz

Rotiller otomotiv sektöründe kullanılan ve aracın aks sisteminde yer alan bağlantı elemanlarıdır. Tekerleklerden gelen düşey ve yatay kuvvetleri taşıyan bu bağlantı elemanlarının yapısal bütünlüğü ve mukavemeti kritik öneme sahiptir. Bu nedenlerden dolayı rotiller diğer imalat işlemlerine göre daha mukavim parçalar üretilmesini mümkün kılan soğuk dövme yöntemi ile üretilmektedirler. Soğuk dövme işlemi oda sıcaklığında uygulandığından dolayı metallerin sünekliği ılık ya da sıcak dövmeye kıyasla daha düşüktür ve bu durum malzemenin çatlama riskini arttırmaktadır. Bu noktada dövme işlemi sırasındaki yağlama ve sürtünme gibi tribolojik değişkenlerin yanı sıra dövme sırasındaki mekanik değişkenlerin de yapılan kalıp tasarımları ile en iyilenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada 8.8 kalite Ø12x60,5 rotillerin küre altında meydana gelen çatlak oluşumu irdelenmiştir. Çalışma kapsamında hasarlı numuneler optik mikroskop altında incelenerek çatlak yayılımı tespit edilmiş ve hasarın malzeme kaynaklı olup olmadığı belirlenmiştir. Soğuk dövme işlemi ayrıca simufact.forming sonlu elemanlar programında hazırlanan simülasyon modelleri ile analiz edilmiştir. İncelemeler ve simülasyonlar çatlak oluşumunun dövme kaynaklı olduğunu göstermiştir. Sabit kalıp üzerinde kullanılan radyus değerinin düşük olması nedeniyle dövme sırasında gerinim hızının ve yüksek sıcaklığın lokalize olarak küre altında biriktiği ve oluşan kayma bandı üzerinde çatlama meydana geldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rotil, Soğuk dövme, Simülasyon, Çatlak, Metal dövme.

Abstract

As fastening parts, ball studs are used in vehicle axle systems in automotive industry. Structural integrity and strength of these axial and lateral load carrier fasteners are crucial. Due to these requirements, ball studs are produced using cold forging method which ensures more reliable strength to the parts in contrast to other manufacturing methods. Cold forging operations are conducted at room temperature and this leads to increase material's tendency to cracking due to decreased ductility which is higher in warm and hot forging operations. As a result of that, mechanical variables should be optimized with the correct design of tools and dies as well as tribological conditions like friction and lubrication in forging. In this study, crack evolution beneath the Ø12x60.5 ball stud sphere was investigated. Damaged specimens were examined using an optical microscope

to determine crack propagation and the possibility of material depended crack formation was revealed. Numerical analysis of cold forging operation was also conducted and simulation models of were prepared in simufact.forming finite element software. Examinations and simulations showed that crack evolution is directly related to forging operation. High strain rate was observed beneath the ball stud sphere in localized manner during forming and this was assumed to lead crack evolution due to shear band formation coupled with high temperature presence.

Keywords: Ball stud, Cold forging, Simulation, Crack, Metal forging.

1. Giriş

Bağlantı elemanları makine elemanları grubunun önemli üyelerinden biri olup, yapıların bütünlüğüne, güvenliğine ve performansına direkt etkisi olan bileşenlerdir. Bağlantı elemanları boyutlarına, talep edilen mukavemet değerlerine, karmaşıklıklarına ve boyut/yüzey toleranslarına göre farklı yöntemler ile imal edilmektedirler. Ancak malzeme içerisindeki lif akışının kesilmemesi, ürünlerin daha mukavim olması ve yüksek üretim hızı gibi nedenlerle metal şekillendirme yöntemleri tercih edilmektedir. Bağlantı elemanı tipine göre kullanılacak olan metal şekillendirme yöntemi değişmektedir. Sektörde kullanılan bağlantı elemanlarının büyük bir çoğunluğu dövme işlemleri ile üretilmektedir. Dövme tipi olarak soğuk, ılık ya da sıcak dövme metodlarından uygun olan kullanılmaktadır. Bu metodlardan sağladığı avantajlar sebebi ile soğuk dövme öne çıkmaktadır. Soğuk dövme oda sıcaklığındaki hammaddeler üzerinde gerçekleştirilen, son üründe daha yüksek yüzey kalitesi, boyut hassasiyet ile daha yüksek mekanik özellikler sağlayan bir yöntemdir. Tüm bu avantajlarına rağmen soğuk dövme koşullarında malzeme sünekliği ılık ya da sıcak dövme koşullarında olduğu gibi yüksek değildir ve bu nedenle malzemenin plastik deformasyon sırasında hasara uğrayıp çatlama riski bulunmaktadır. Bu duruma ek olarak operasyon kaynaklı bazı durumlar da malzeme çatlağına neden olabilmektedir. Bunlara örnek olarak uygun olmayan kalıp tasarımı, ekstrüzyon işlemindeki yüksek deformasyon oranları, pres hızının uygun olmaması, yetersiz yağlama, kalıp yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması ve hammadde hataları verilebilir. Özellikle hammadde yüzeyinde var olan çizgisel hatalar ile dövme sebepli şekillenme hataları V- şekilli ve açıyla ilerleyen derin çatlak oluşumlarına sebep olmaktadır [1].

Metal şekillendirme işlemleri insanlığın varlığından beri süregelen üretim yöntemlerinden biridir. Özellikle son yıllarda gelişen malzeme teknolojisi ile çok daha karmaşık parçalar şekillendirilmeye başlanmıştır. 2000 yılından itibaren metal şekillendirme konusu hakkındaki gelişmeler Jeswiet ve arkadaşları[2] tarafından yapılan derleme çalışmada bulunabilir. Daha karmaşık parçaların soğuk dövülmesi iki ana probleme sebep olmaktadır; i) yüksek dövme kuvvetleri nedeni ile oluşan düşük kalıp ömürleri ve ii) dövülen malzeme üzerinde oluşan mikro/makro çatlaklar. Literatüre bakıldığında dövme işlemi ve dövme sırasında malzemede oluşan hasarlar üzerinde oldukça fazla çalışmanın olduğu görülebilir. Bu çalışmaların milat taşlarından biri Cockcroft ve Latham[3] tarafından yapılan çalışmadır. Burada malzemelerin çok küçük deformasyon durumlarında çatlama ancak ekstrüzyon gibi yüksek deformasyon içeren işlemlerde ise çatlama konusu ele alınmış ve çatlama hadisesi karmaşık gerilme durumu ile açıklanmıştır. Yazarlar geliştirdikleri sünek çatlama kriterinde ana tetikleyicilerin kayma ve çekme gerilmeleri olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle kriterlerinde ana değişken olarak boyutsuz bir değer kullanmışlardır ve bu değişken maksimum asal gerilmenin efektif gerilmeye olan oranıdır. Çatlama hadisesi aynı zamanda gerilmeler sonucunda meydana gelen deformasyon ölçütüne (gerinime) bağlanmıştır. Cockcroft ve Latham modeli olarak adlandırılan bu model, birçok metal şekillendirme simülasyon programında başarı ile kullanılmaktadır. Cao [4] yapmış olduğu çalışmada metal şekillendirme için kullanılan sünek kırılma modellerini incelemiştir. Landre ve diğerleri [5] soğuk dövme işlemlerinde meydana gelen kırılmanın tahmininde kullanılan Cockcroft ve Latham modeli kritik hasar eşiğinin çıkarılması üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada AISI 1045 karbonlu çeliğinden silindirik, konik (tapered) ve göbekli (flanged) olarak

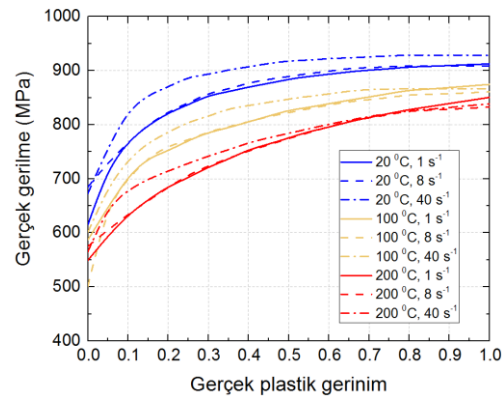
adlandırılan numuneler üzerinde basma testleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel olarak numunelerde çatlak oluşturduktan sonra nümerik olarak testler simüle edilmiş ve çatlamanın olduğu andaki kritik hasar eşikleri belirlenmiştir. Çalışma sonunda Cockcroft ve Latham modelinin çatlama hadisesini %10'dan daha düşük bir hata oranında tahmin ettiğini görmüşlerdir. Sabih ve diğerleri [6] soğuk kafa şişirme işleminde kafa içerisinde enine meydana gelen çatlak oluşumunu incelemişlerdir. Burada ürün malzemesi 1038 çeliğidir. Bu çalışmada bu gibi çatlakların adyabatik kayma bantları nedeni ile oluştuğu sonucuna varılmıştır. Kafa şişirme işlemindeki yüksek gerinim hızı neden ile ana kayma bölgesi yüksek sıcaklığa çıkmaktadır ve burada kayma bandı oluşmaktadır. Bu bant üzerinde malzeme içerisinde bulunan mikro delikler birleşerek ani çatlak oluşumlarına sebep olabilmektedir. Watanabe ve diğerleri [7] içi boş shaftın dövmesinde shaft ucunda meydana gelen çatlamanın tahmini için Cockcroft ve Latham ve Oyane kırılma modellerini kullanmışlardır. Ancak bu denklemler kritik bölgeleri verebilmesine karşın kırılma yönü ile alakalı yüksek tahmin yapamamaktadır. Yazarlar kırılma kriterindeki kullanılan efektif gerinim yerine kırılmayı tetikleyen asal gerilmenin neden olduğu gerinim değerini kullanarak hesaplama yapmışlar ve kırılma yönü olarak daha doğru sonuçlara ulaşmışlardır. Quan ve diğerleri [8] 42CrMo çeliğinin sünek kırılma eşiğinin bulunması amacı ile 4 farklı gerinim hızında (0,01, 0,1, 1 ve 10 s⁻¹) ve 4 farklı sıcaklıkta (850, 925, 1000 ve 1075 °C) basma testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan testler sonucunda 0,01 s⁻¹-0,1 s⁻¹ gerinim hızı aralığında sıcaklık arttıkça kritik hasar eşiğinin arttığı, 1 s⁻¹-10 s⁻¹ gerinim hızı aralığında ise kayda değer bir değişimin görülmediği görülmüştür. Artan gerinim hızı ile malzeme sertliğinde meydana gelen artışın, yine artan gerinim hızı ile malzeme içerisinde meydana gelen sıcaklığın etkisi ile dengelendiği ve böylece malzemeye ait hasar eşiğinde kayda değer bir değişim olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bu çalışmada 41Cr4 özel dövme çeliğinden soğuk dövme ile şekillendirilen 8.8 kalite Ø12x60,5 rotilde meydana gelen çatlak oluşumu incelenerek hasar analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalarda soğuk şekillendirme yöntemlerinden silindirik kafa şişirme üzerinde durulduğu görülmüştür.

İncelenen çalışmalarda kafa şişirme operasyonlarında dövme işleminin düz sabit kalıplar ile yapılmaktadır. Aşık civatası ve rotillerin sahip oldukları kafa şişirme operasyonlarında ise yarım küre formulu kalıplar ile malzeme şekillendirilmektedir ve gerilme profilleri çok daha karmaşık yapıdadır. Ayrıca literatürde bulunan çalışmadan farklı olarak bu çalışmada tel çekme ve adımlı şekillendirmeden gelen malzeme sertleşme ve sıcaklık etkileri de göz önüne alınarak son şekillenme adımındaki hasar oluşumu incelenmiştir. Çalışma kapsamında çatlak oluşumu görülen rotillerden numuneler hazırlanarak malzeme akışları ve çatlak ilerlemesi optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Dövme sırasında malzemede oluşan mekanik ve termal değişkenlerin tespiti için her bir dövme kademesine ait sonlu elemanlar simülasyon modelleri simufact.forming yazılımı kullanılarak hazırlanmış ve çözülmüştür. Nümerik ve deneysel buluntular bir araya getirilerek hasar alma nedeni saplanmış olup çözümüne yönelik tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

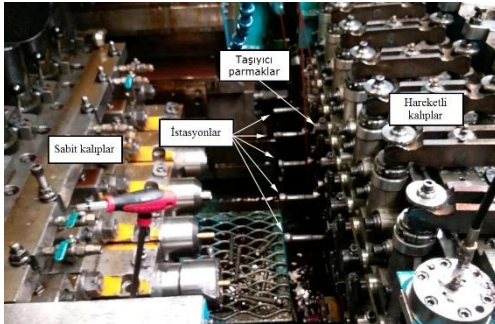
Rotilin üretiminde yüksek alaşımlı dövme çeliği olan 41Cr4 çelik alaşım kullanılmaktadır. Testler sonucunda çeliğin çekme dayanımı 610 MPa ve sertlik değeri 170 HV olarak tespit edilmiştir. Nümerik simülasyon programında kullanılmak üzere alaşım farklı gerinim hızlarında ve sıcaklıklarda test edilerek akış eğrileri belirlenmiştir (Şekil 1). Akış eğrileri üç farklı gerinim hızı (1, 8 ve 40 s⁻¹) ve üç farklı sıcaklıkta (20, 100 ve 200 °C) yapılan basma testleri ile elde edilmiştir.



Şekil 1. 41Cr4 soğuk dövme çeliğine ait akış eğrileri.

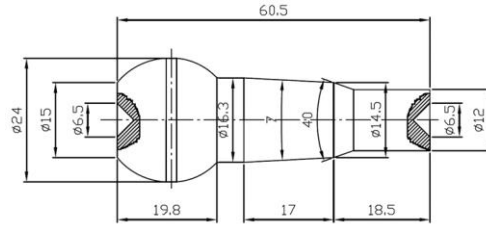
Soğuk dövme öncesinde alaşım gerilme giderme tavlmasına alınmıştır. Malzemeler kule fırın içerisinde 620 °C atmosfer sıcaklığında 7,5 saat boyunca tavlansmıştır ve daha sonra kontrollü bir şekilde fırın içerisinde 10 saat içerisinde soğutulmuştur. Tavlama sonrası çıkan hammadde yüzeyleri asit ile yıkanmakta ve durulanmaktadır. Aktivasyon banyosundan sonra çinko-fosfat, son olarak da sabun ile kaplanmaktadır. Bu işlemin amacı dövme işlemine kadar hammadde yüzeyini korozyondan korumak ve dövme işlemi sırasında kalıp ile malzeme arasında meydana gelen sürtünme katsayısını minimum düzeye çekmektir. Yüzey işlemden çıkarılan kangal şeklindeki hammadde, dövme presine içeriye alınmaktadır. Hammadde, dövme presine geçişte tel çekme kalıbı içerisinden geçmektedir ve çapında %5 azalma meydana gelmektedir. Bu şekilde hammadde kesitinde bulunan ovalleşme ve dalgalanma giderilmektedir.

Tel çekme kalıbından geçen malzeme makaralar yardımı ile pres içerisine alınmaktadır. Burada bulunan makas mekanizması hammaddeyi istenilen boyutta kesmektedir. Kesilen malzeme hareketli kalıp tarafında bulunan taşıma parmakları ile dövmenin başlayacağı ilk istasyona verilmektedir. Şekil 2’de dört istasyonlu dövme presine gösterilmektedir. Burada malzeme şekillenmesi birden fazla aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle her aşamanın yapıldığı bölmelere istasyon adı verilmektedir. Bir istasyonda dövülen malzeme diğer istasyona parmaklar ile aktarılmaktadır. Son istasyonda şekillenmesi tamamlanan malzeme dövme alanından uzaklaştırılmaktadır. Dövme presinde sabit kalıplar hareket etmemektedir, hareketli kalıp tarafı ise krank hızında hareket ederek dövme işlemini gerçekleştirilmektedir.



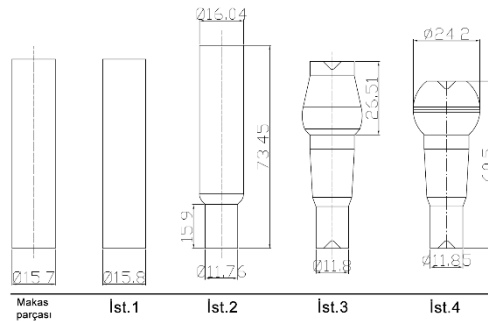
Şekil 2. Dövme presine.

Şekil 3’de Ø12x60,5 rotile ait teknik çizim gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere rotill küre çapı 24 mm, şaft çapı ise 12 mm’dir. Rotiller soğuk dövme işleminin ardından talaşlı imalat işlemleri ile istenilen son şekle getirilmektedir. Bu nedenle ürünün üst ve alt kısımlarında punta delikleri bulunmaktadır.

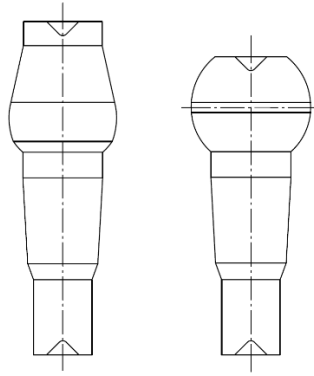


Şekil 3. Ø12x60,5 rotile ait teknik çizim.

Şekil 3’de gösterilen rotill dört istasyonda şekillendirilmektedir. İstasyon adımları Şekil 4(a)’da gösterilmektedir. İlk istasyonda makasta kesilen malzemenin kesme yüzeyleri düzeltilmektedir. İkinci istasyonda yapılan ekstrüzyon işleminden sonra küre için hazırlık yapılmakta, dördüncü istasyonda ise küre son haline getirilmektedir. Üçüncü ve dördüncü istasyona ait görseller Şekil 3(b)’de verilmektedir. Çok adımda şekillenme yapılmasının temel amacı metalin şekillenmesi için gerekli enerjiyi bölmek, böylece tek bir kalıba deformasyon için gerekli yükün etki etmesini engelleyerek düşük kalıp ömürlerinden kaçınmak ve malzemede yaşanabilecek çatlama riskini en aza indirmektir.



(a)



(b)

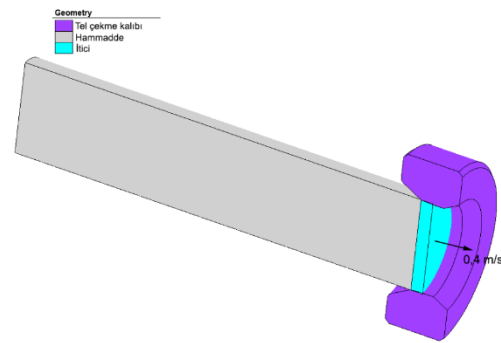
Şekil 4. (a) Çok adımlı dövme işleminde kullanılan istasyon adımları, (b) üçüncü ve dördüncü istasyonda ürün geometrileri.

Hasar analizi için ayrılan dört numune üzerinde makro seviyede incelemeler gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde yer alan çatlakın daha iyi görünmesi amacı ile küre sprej boya ile boyanarak daha sonra temizlenmiştir. Bu şekilde çatlak oluşumu ve ilerleme daha iyi bir şekilde görülmektedir. Numunelerin bir kısmı enine kesitte tel erezyon (EDM) ile kesilmiş ve daha sonra asit dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlama işleminde solüsyon olarak %25 nitrik %75 HCL asit karışımı kullanılmıştır. EDM ile kesilen numuneler 5 dakika boyunca bu karışım içerisinde bekletilmiş ve daha sonra Zeiss lamger M2M optik mikroskop ile incelenmiştir.

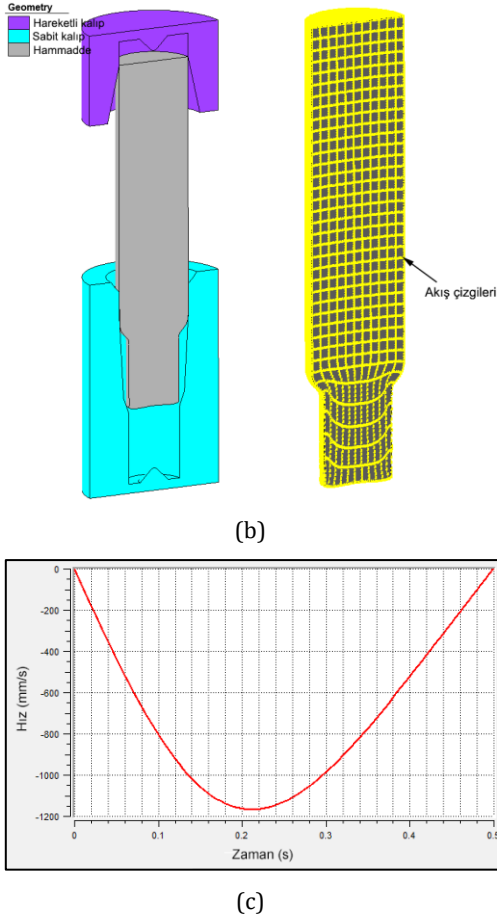
2.1. Sonlu elemanlar simülasyonları

Üretim proseslerinin tamamı soğuk dövme için özel olarak geliştirilen sonlu elemanlar yazılımı olan simufact.forming kullanılarak oluşturulmuştur. Simufact programının sağladığı avantajlardan biri tüm proses bileşenleri modellenen ve bir prostesten alınan malzeme diğer bir prostese girdi olarak verilebilmektedir. Rotaların üretim prosesi tel çekme işlemi ile başlamaktadır. Düşük redüksiyon oranlarında hammadde çapı belirli değerlere düşürülmekte, böylece tedarikçiden geldiği durumda hammadde kesitinde meydana gelebilen ovalleşme engellenmektedir. Bu işleme ait model Şekil 5(a)'da gösterilmektedir. Model hammadde, tel çekme kalıbı ve iticiden meydana gelmektedir. 16 mm olan hammadde çapı tel çekme operasyonu ile 15,5 mm'ye düşülmektedir. Gerçek işleminde itici uç

hammaddeyi ortalama 0,4 m/s hız ile kalıba çekmektedir. Simülasyonda da itici hızı sabit 0,4 m/s olarak tanımlanmıştır. Modelde kalıplar deforme olmayan rijit gövde olarak, hammadde ise elastik-plastik olarak modellenmiştir. Hammadde malzeme modeline elastik ve termal mekanik değişkenler ile malzemeye ait akış eğrileri tanımlanmıştır. Akış eğrileri 20, 100 ve 200 °C için ayrı ayrı modele tanımlanmıştır (Şekil 1). Kalıp sıcaklıklarının kararlı rejim durumunda olduğu kabulü yapılmış ve 60 °C olarak tanımlanmıştır. Hammadde ise oda sıcaklığındadır. Metal şekillendirme simülasyonlarında doğruluğu en fazla etkileyen faktörlerden biri sürtünme modeli ve katsayısıdır. İnce ve Güden [9] tarafından yapılan çalışmada soğuk dövme koşullarında sürtünme katsayısının sabit olmadığı ve işlem sıcaklığı ile değiştiği belirlenmiştir. Kurulan modelde Coulomb sürtünme modeli kullanılmış ve literatürdeki bu çalışmaya göre sıcaklığa göre değişen sürtünme katsayısı tanımlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda sürtünme katsayısı 0,08 civarındadır. Hammadde ağında 2533 adet dört kenarlı 2B sonlu eleman kullanılmıştır. Tel çekme simülasyonu sonunda elde edilen hammadde soğuk dövme simülasyon modeline alınmaktadır. Soğuk dövme simülasyon modeline örnek Şekil 5(b)'de gösterilmektedir. Model hareketli ve sabit kalıplar ile yarı mamulden oluşmaktadır. Simülasyonlarda hammadde üzerine Şekil 5(b)'de gösterildiği şekilde akış çizgileri tanımlanmıştır ve malzeme şekillenmesi ile bu çizgiler şekillenmektedir. Böylece malzeme akışı takip edilebilmektedir. Soğuk dövme simülasyonunda kullanılan pres hızı-zaman grafiği Şekil 5(c)'de verilmektedir. Vuruş stroğu sonunda presin ulaştığı maksimum hız 1,190 m/s civarındadır.



(a)

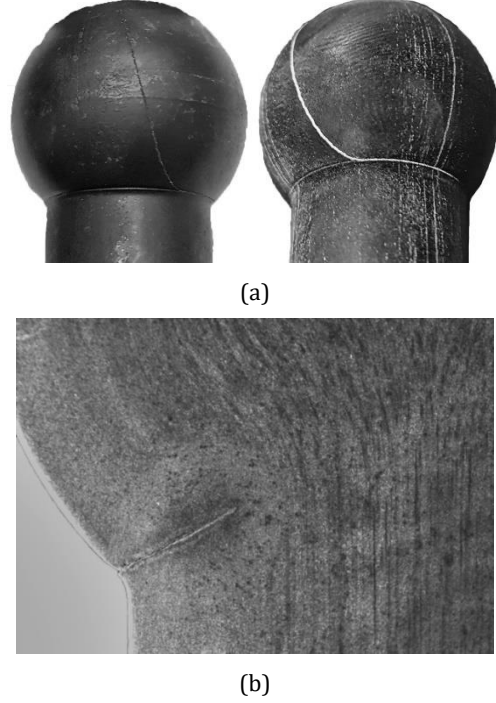


Şekil 5. Sonlu elemanlar simülasyon modelleri; (a) tel çekme işlemi, (b) soğuk dövme işlemi ve (c) soğuk dövme presi hız-zaman grafiği.

3. Bulgular

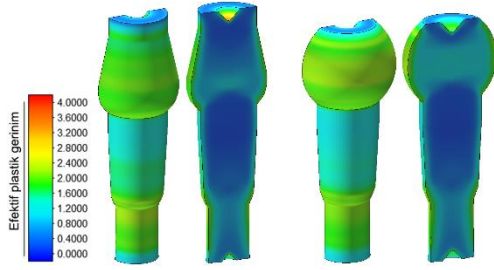
Soğuk dövme işlemi sonrasında rotül küresinde meydana gelen çatlak oluşumu Şekil 6(a)'da gösterilmektedir. Yapılan makro incelemeye göre çatlağın küre altındaki kademedan başladığı, aynı kademe üzerinde radyal olarak ilerlediği ve daha sonra kürede açı ile ilerleyerek küre üstünde sona erdiği görülmektedir. Şekil 6(b)'de çatlak bölgesinin fotoğrafı verilmektedir. Görüleceği üzere çatlağın küre altı yarıçapında başladığı ve bir tarafı Şekil 6(a)'da gösterildiği şekilde küre dışında ilerlerken diğer tarafın da kesit boyunca ilerlediği tespit edilmiştir. Hasar analizi gerilme yığılmasının bu noktada başladığına işaret etmektedir. Bu nedenle

simülasyonlar ile özellikle bu bölgenin incelenmesi gerekmektedir.

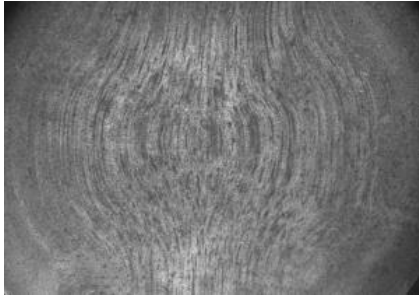


Şekil 6. (a) Üründe dövme sonrası meydana gelen çatlak oluşumu ve (b) çatlak bölgesinin optik mikroskop görüntüsü.

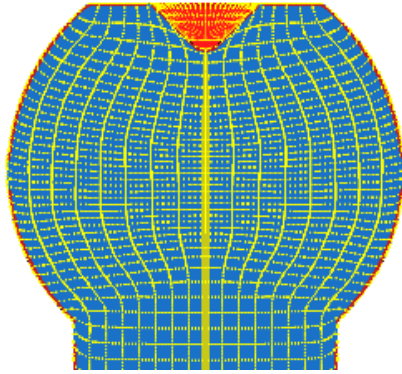
Şekil 7(a)'da üçüncü ve dördüncü dövme istasyonunda yarı mamullerde meydana gelen şekillenme ve efektif plastik gerilim dağılımları gösterilmektedir. Şekillenme incelendiğinde herhangi bir malzeme akış hatasına rastlanmamıştır. Küre altındaki çatlak bölgesinde plastik gerilim değerinin 1,6 civarında olduğu görülmektedir. Bu gerilim değeri şekillenme oranlarının yüksek olduğu soğuk dövme koşullarına göre oldukça düşük bir gerilim değeridir ve çatlama yaratacak büyüklükte değildir. Ayrıca küredeki maksimum gerilimin küre boyunca homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Şekil 7(b) ve (c)'de küredeki deneysel ve nümerik olarak belirlenen akış çizgileri gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere kafa şişirme işleminde merkezdeki çizgiler sabit kalırken küre dışına doğru olan çizgiler radyal olarak açılmaktadır. Çatlamamanın olduğu bölgede ise akış düzensizliğine rastlanmamıştır. Nümerik model sonucu ile deneysel sonuçlar oldukça tutarlıdır.



(a)



(b)

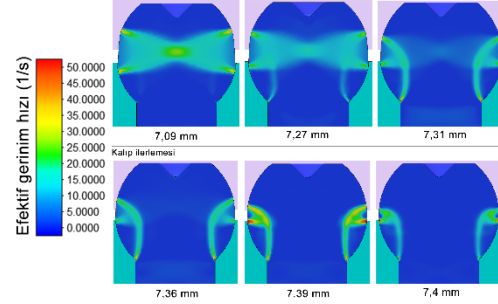


(c)

Şekil 7. (a) Üçüncü ve dördüncü istasyonlarda meydana gelen şekillenme ve plastik gerinim dağılımları ve kürede meydana gelen akış çizgileri; (b) numunede ve (c) simülasyonda tespit edilen akışlar.

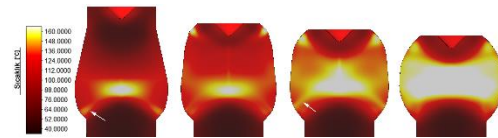
Şekil 8'de küre şişirme işlemi sırasında malzeme içerisinde meydana gelen efektif gerinim hızının değişimi gösterilmektedir. Şişirme sırasında gerinim hızı küre içerisinde "x" şeklinde bir şekil oluşturmaktadır (kalıp ilerlemesinin 7,09 mm olduğu durum) ve beklenildiği üzere en yüksek gerinim hızı malzemenin kalıp ile temasta olan bölgelerinde oluşmaktadır. Baskı arttıkça (7,27 ve 7,31 kalıp ilerlemesi) "x" şeklinde meydana gelen gerinim hızı şeklinin başlangıç kısmının

küre altı radyusu tarafına kaydığı görülmekte, kalıp ilerlemesinin 7,36 mm olduğu durumda ise tamamen bir bant şeklinde bu noktada lokalize olduğu görülmektedir. Kalıp ilerlemesinin 7,39 mm olduğu aşamada ise radyus üzerindeki gerinim değeri 50 s^{-1} civarında maksimum değerdedir ve bant şeklinde kafaya doğru uzamaktadır.



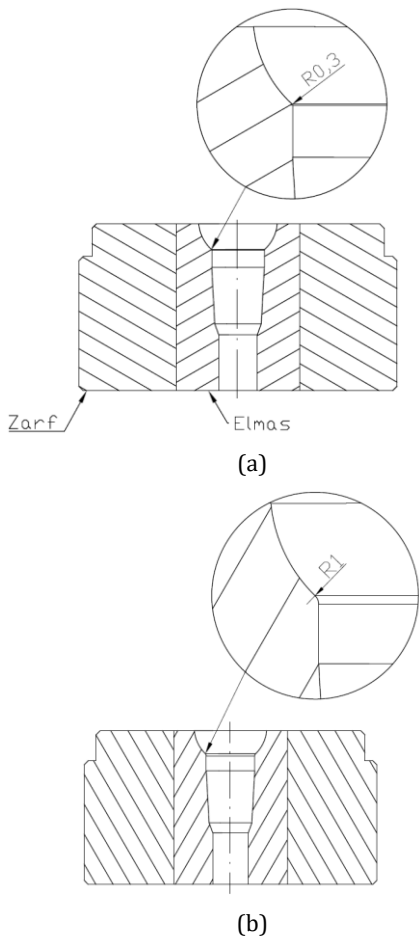
Şekil 8. Dördüncü istasyonda küre şişirme sırasında malzeme içerisinde oluşan efektif gerinim hızı değişimi.

Sabih ve diğerleri [6] yapmış oldukları çalışmada gerinim hızının yüksek olduğu lokal kısımlarda sıcaklık artışının da meydana gelmesi ile malzeme sertliğinde ani düşüşlerin meydana geldiğini ve bunun çatlaklara yol açtığından bahsetmektedirler. Bu bilgiler ışığında küre oluşturma sırasında küredeki sıcaklık değişimi incelenmiştir. Şekil 9'de küre oluşturma sırasında meydana gelen sıcaklık değişimi ve dağılımı verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere hazırlık istasyonundan (üçüncü istasyon) gelen yarı mamulde en yüksek sıcaklık değerleri merkezde ve küre altı radyus bölgesindedir. Dövme işlemi sırasında en yüksek sıcaklık değeri dağılımın (ok ile gösterilmektedir) Şekil 8'de gösterilen maksimum gerinim hızı bantları ile benzer olduğu görülmektedir. Bu durum Sabih ve diğerlerinin [6] bahsettiği duruma oldukça benzerdir.



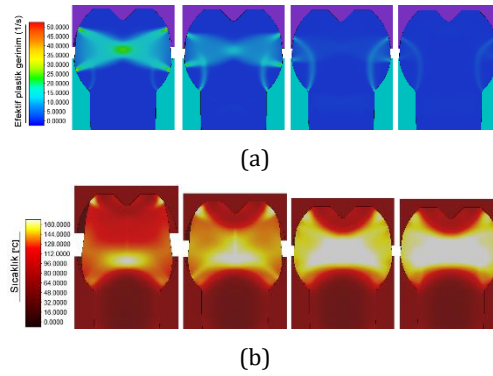
Şekil 9. Dördüncü istasyonda küre şişirme sırasında malzeme içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı.

Yukarıda belirlenen bant ve yüksek sıcaklık oluşumunun küre altı radyus bölgesinde oluşması nedeniyle soğuk dövme kalıbı incelemeye alınmıştır. Şekil 10(a)'da kürenin oluşturulduğu dördüncü istasyon sabit kalıbı gösterilmektedir. Burada küre altındaki radyus değeri 0,3 mm olarak tanımlanmıştır. Radyus değerinin yetersiz olması malzemede lokal olarak gerinim hızının artmasına sebebiyet verebilir. Bu nedenle kalıbın bu noktasındaki radyus malzeme katlanmasına sebebiyet vermeyecek olan maksimum değere, 1 mm, çıkarılmıştır (Şekil 10(b)). Revize edilen bu kalıp ile dövme simülasyonu tekrarlanmıştır.



Şekil 10. Dördüncü istasyon sabit küre kalıbı; (a) mevcut ve (b) revize hali.

Şekil 11(a)'da revize edilen dördüncü istasyon sabit kalıbı ile gerçekleştirilen dövme işlemi sırasında kürede oluşan efektif gerinim hızı değişimi gösterilmektedir. Şekil 8'de gösterilen dağılıma kıyasla kürenin oluşturulduğu son adımlarda gerinim hızının 20 s^{-1} mertebelerinden 10 s^{-1} değerlerine düştüğü görülmektedir. Ayrıca radyus kısmında oluşan lokalize ve yüksek (50 s^{-1}) gerinim hızı da azalarak 20 s^{-1} mertebesine inmiştir. Şekil 11(b)'de küredeki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Sıcaklık değerleri incelendiğinde fark yaratacak bir düşüşün olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni oluşan ana sıcaklığın bir önceki istasyondan gelmesi ve kafa içerisinde hapsolmesidir.



Şekil 11. Revize edilen dördüncü istasyon sabit küre kalıbı ile gerçekleştirilen dövme işleminde oluşan; (a) efektif gerinim hızı ve (b) sıcaklık dağılımı.

Gerinim hızındaki bu iyileşmenin çatlama oluşum riskini en aza indirmesi beklenmektedir. Bu varsayımın üretim şartlarında denenmesi için deneme kalıpları yapılmış ve küre altı radyusu 1 mm'ye getirilmiştir. Çatlağın görüldüğü üretimde 10.000 adet ürün dövülmüş ve yaklaşık 110 adet çatlak ürün tespit edilmiştir. Revize edilen kalıplar ile 25.000 adetlik bir üretim gerçekleştirilmiştir. Dövme işlemi sonunda hiçbir üründe çatlak oluşumu tespit edilmemiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Simülasyon modellerinde kullanılan hasar modelleri ile ya da efektif gerinim değerleri ile çatlak oluşum riskleri görülebilmektedir. Ancak bu çalışmada ele alınan ürün tiplerinde bu yaklaşımlar çatlak oluşum tahmininde yetersiz

kalabilmektedir. Efektif gerinim hızının çatlak oluşumunda etkili olduğu ve kalıp tasarımı ile lokalize olarak artması ile çatlak oluşumunu tetikleyebileceği tespit edilmiştir. Burada elde edilen bulgular He ve Huo'nun [10] çalışmalarında tespit ettikleri durum ile birebir örtüşmektedir. Gerinim hızının artması ile malzeme içerisinde bulunan mikro çatlak ve boşlukların birleşme hızları artmakta ve çatlak oluşumu hızlanmaktadır ya da tetiklenmektedir. Buna ek olarak gerinim hızının yüksek olduğu bölgelerde sıcaklığın artması ile oluşan deformasyon bantları da Sabih ve diğerlerinin [6] belirttiği şekilde etkili olmaktadır. Yüksek deformasyon hızında oluşan ısının atılamaması ve bant üzerinde kalması süneklığın ani artmasına ve plastik gerinimin yükselmesine neden olarak hasar oluşumuna yol açabilmektedir.

Bu çalışmada 41Cr4 özel dövme çeliğinden soğuk dövme ile şekillendirilen 8.8 kalite Ø12x60,5 rotül küresinde soğuk dövme operasyonunda meydana gelen çatlak oluşumu ve nedenleri gerçekleştirilen hasar ve sonlu elemanlar analizleri ile irdelenmiştir. Hasar analizleri çatlak başlangıcının küre altı radyus

bölgesi olduğunu, çatlakın küre yüzeyinde kafaya doğru ve çatlak başlangıç noktasında içeriye doğru çift yönlü olarak ilerlediğini göstermiştir. Dövme işlemine ait sonlu elemanlar analizleri küre oluşturma sırasında küre altı radyus bölgesinde gerinim hızının lokalize olarak dövmede meydana gelen gerinim hızına göre yüksek olduğunu, buna ek olarak sıcaklığında 160 °C civarında olduğunu belirlemiştir. Bu durumun malzeme içerisinde kayma bantı oluşumuna sebep olduğu görülmüştür. Küre sabit kalıbında küre altı radyusu malzeme katlanmasına yol açmayacak en yüksek değer olan 1 mm'ye yükseltilmiştir. Artan alan ile gerinim hızının daha homojen dağılması sağlanmış ve bant oluşumu engellenmiştir. Revize edilen kalıplar ile yapılan seri üretimde dövme çatlaklarına rastlanmamıştır. Çalışma sonunda çatlak oluşumunun yalnızca hasar modelleri ile tespit edilemeyeceği görülmüş olup, tasarımların simülasyonlar ile detaylı bir şekilde irdelenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Metal dövme endüstrisinde meydana gelen kalite hatalarının engellenmesinde kalıp tasarımlarının nümerik simülasyonlar ile irdelenmesinin öneminin de ayrıca altı çizilmelidir

Kaynakça

- [1] Kılıçaslan C. and İnce U. 2016. Failure analysis of cold forged 37Cr4 alloy M10x28 bolts, *Engineering Failure Analysis*, vol. 70, pp. 177-187.
- [2] Jeswiet J., Geiger M., Engel U., Klenier M., Schikorra M., Duflou J., Neugebauer R., Bariani P., Bruschi P. 2018. Metal forming progress since 2000, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 2-17.
- [3] Cockcroft M.G. and Latham D.J. 1968. Ductile and workability of metals, *Journal of the Institute of Metals*, vol. 96, pp. 33-39.
- [4] Cao T. S. 2017. Models for ductile damage and fracture prediction in cold bulk metal forming processes: a review," *International Journal of Material Forming*, vol.10, no.139 DOI: 10.1007/s12289-015-1262-7.
- [5] Landre J., Pertence A., Cetlin P.R., Rodrigues J. M. C., and Martins P. A. F. 2003. On the utilisation of ductile fracture criteria in cold forging, *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 39, no. 3, pp. 175-186, 1.
- [6] Sabih A., Elwazri A., Nemes J.A. , and Yue S. 2006. A Workability Criterion for the Transformed Adiabatic Shear Band Phenomena during Cold Heading of 1038 Steel, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 6, no. 4, pp. 97-105.
- [7] Watanabe A., Fujikawa S., Ikeda A., and Shiga N. 2014. Prediction of Ductile Fracture in Cold Forging, *Procedia Engineering*, vol. 81, pp. 425-430.
- [8] Quan G.Z., Luo G.C., AnMao, Liang J.T., and Dong-senWu. 2014. Evaluation of Varying Ductile Fracture Criteria for 42CrMo Steel by Compressions at Different Temperatures and Strain Rates, *The Scientific World Journal* DOI: 10.1155/2014/579328.
- [9] Ince U. and Güden M. 2013. An iterative numerical method for determination of temperature-dependent friction coefficients in thermomechanical model analysis of cold bolt forging, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, no. 9, pp. 2133-2144.
- [10] He T. and Huo Y. 2018. A New Damage Evolution Model for Cold Forging of Bearing Steel-Balls, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 71, no. 5, pp. 1175-1183.