Çeşitli sıcak dövme kalıplarının hasar mekanizmalarının incelenmesi

Nuray Beköz Üllen* *(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2705-2559)*
Gülben Baba*(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-0770-7749)*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

Sorumlu yazar e-mail:nbekoz@istanbul.edu.tr

Özet

Sıcak dövme işleminde kullanılan kalıpların ekonomik bir servis ömrü vardır. Bu süre sonunda kalıbın hasara uğraması beklenir. Dövme işleminde kullanılan kalıpların servis ömürleri büyük oranda aşınma, yorulma kırılması ve kalıcı şekil değişimleri gibi nedenlere bağlıdır. Kalıbın servis ömrü dolmadan hasar oluşması üretim sürecini her bakımdan sıkıntıya sokar. Kalıp hasarının zamanında tespiti ekonomik kayıpları önlemek açısından büyük önem taşır. Böyle bir durumla karşılaşmamak için işletmelerde kalıpların hasar analizleri yapılarak istenmeyen durumların tekrarlanmaması ve gerekli tedbirlerin önceden alınması sağlanmalıdır. Bu çalışma içerisinde ele alınan konuların ve kullanılan görsellerin amacı da belirtilen kayıpları azaltmaya yöneliktir. Sıcak iş takım çeliklerinde oluşan hasar mekanizmaları; çeliğin üretim aşamasında, kalıbın işlenmesi aşamasında ve kalıbın çalışması aşamasında meydana gelebilir. Bu çalışmada, işletmelerde en fazla hasara sebep olarak da bilinen kalıbın çalışma şartlarında oluşan hasar mekanizmaları ele alınmıştır. Bu amaçla, Aran Sıcak Dövme San. Ltd. Şti. tarafından kullanılan farklı sıcak iş takım çeliği kalıplarının hasar analiz çalışmaları yapılmıştır. Servis ömrünü tamamlamış farklı parçaların üretiminde kullanılan kalıplarda oluşan hasarlar görsel muayene yoluyla incelenmiştir. Çözüm önerileri, hasarların detaylı görüntülerini ve buna uygun açıklamalarını içermektedir. Elde edilen veriler değerlendirilerek her bir sıcak dövme kalıbı için hasarın cinsi, sebebi ve mekanizması tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre tespit edilen hasarların sebebi; aşınma, ısıl yorulma, yapışma, korozyon ve plastik deformasyonun sebep olduğu bükülme ve distorsiyon olarak belirlenmiştir. İncelenen tüm kalıplarda hasar mekanizmalarının birden fazla olduğu ve birbiriyle etkileşim içinde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hasar analizi, Sıcak dövme, Takım çeliği, Görsel muayene.

Investigation of the failure mechanisms of various hot forging dies

Abstract

Dies used in hot forging process have an economical service life. After this period, the die is expected to be damaged. The service life of the dies used in the forging process depends largely on reasons such as wear, fatigue fracture and plastic deformation, etc. Formation of damage to the die before the service life of the die expires puts the production process in trouble. Timely detection of die damage is crucial to prevent economic losses. In order to avoid such a situation, damage analysis of the dies must be done in the enterprises and necessary precaution must be taken in advance. The purpose of the topics and visuals used in this study is to reduce the specified losses. Damage mechanisms in hot work tool steels; it can occur during the production stage of the steel, the processing stage of the die and the working stage of the die. In this study, the mechanisms of damage that occur during the working phase of the die, which causes the most damage in the enterprises, was investigated. For this purpose, damage analysis studies of different hot work tool steel dies used by Aran Hot Forging Industry and Trade Ltd. Company were carried out. Damages in dies that have completed their service life have been examined by visual inspection method. Solution suggestions include detailed views of the damage and corresponding explanations. The data obtained were evaluated and the type, cause and mechanism of the damage were tried to be determined for each hot forging die. Accordingly, the cause of the damage detected; bending and distortion caused by wear, thermal fatigue, adhesion, corrosion and plastic deformation. It was determined that the damage mechanisms were more than one and interacted with each other in all the dies examined.

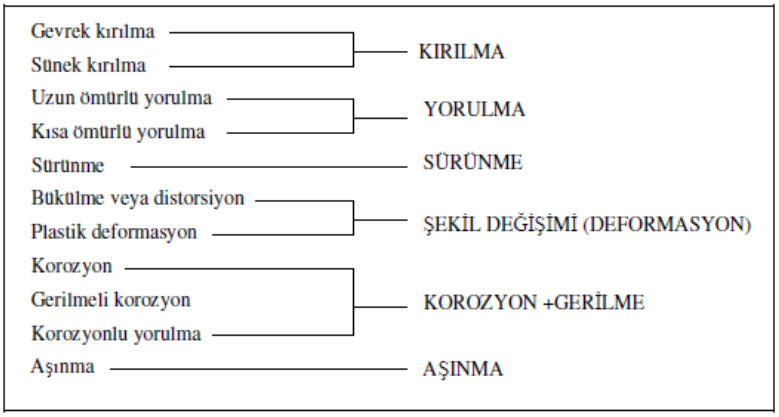
Keywords: Failure analysis, Hot forging, Tool steel, Visual inspection.

GİRİŞ

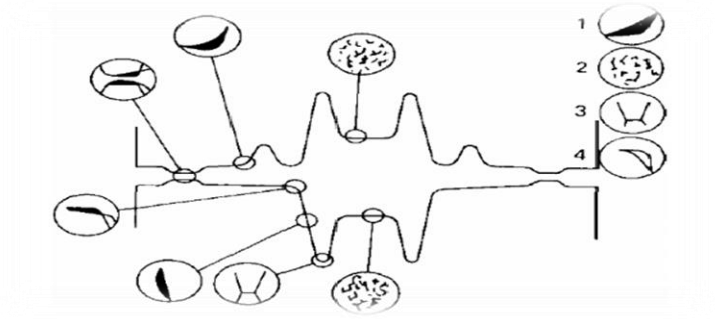
Dövme işlemi, darbe veya basınç altında kontrollü bir plastik deformasyon sağlanarak, metale istenen şekli verme, tane boyutunu küçültme ve mekanik özelliklerini iyileştirme amacıyla uygulanan bir plastik şekil verme yöntemidir (Abachi, 2004). Dövme işlemlerinin çoğu sıcak olarak yapılır. Yüksek sıcaklıklarda hem malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti daha yüksektir, hem de metalin plastik deformasyon direncinin düşük olması nedeniyle işi gerçekleştirmek için uygulanan kuvvet daha küçük olmaktadır. Günümüzde üretimde; daha ekonomik, hatasız ve kaliteli bir süreç sanayinin gelişmesi ve ayakta durabilmesi için oldukça önemlidir. Sıcak dövme işleminde hatasız parça üretebilmek için oluşabilecek hataları önleyici tedbirler almak gerekir. Sıcak dövme işlemlerinde kullanılacak kalıp malzemesinin sahip olması gereken özellikler; homojen sertleşebilme kabiliyeti, aşınmaya karşı dayanım, dayanımını yüksek sıcaklıklarda sürdürmesi, yüksek tokluk, ısıl gerilmelerden kaynaklanan yorulmaya karşı yüksek dayanıklılık, mekanik yorulma özelliklerinin yüksek olmasıdır (Abachi ve diğ., 2010; Ebara ve Kubota, 1986). Bu kadar özelliği bir arada barındırmasına rağmen, sıcak dövme işleminde kullanılan kalıpların ekonomik bir servis ömrü vardır. Dövme işleminde kullanılan kalıpların servis ömürleri büyük oranda aşınma direnci, yorulma kırılması ve kalıcı şekil değişimi gibi nedenlere bağlıdır (Yiğitarslan, 2009).

Kalıbın servis ömrü dolmadan hasar oluşması üretim sürecini olumsuz etkiler. Böyle bir durumla karşılaşmamak için işletmelerde kalıpların hasar analizleri yapılarak istenmeyen durumların tekrarlanmaması ve gerekli tedbirlerin önceden alınması sağlanmalıdır. Hasar analizi, mühendislik uygulamalarında kullanılan parçaların hasara uğraması sonrası, hasar nedeninin bulunması ve ileride aynı sorun ile karşılaşmamak için gereken önlemlerin alınması süreçlerini kapsar (Ebara ve Kubota, 1986). Hasar analizi, hasar mekanizmasını ve kök nedeni belirlemek için yapılan kapsamlı incelemedir. Ürünün ideal durumu ile mevcut durumu arasındaki farkları gösterir. Bu yöntemde, birçok faktör göz önüne alınarak iyileştirici çözümler geliştirilir. Kök neden analizi, veri toplama ve analiz etmeyi, iyileştirici ve/veya önleyici aksiyonlar almayı, veriyi sunmayı ve pratik öneriler oluşturmayı içerir (Kayalı ve diğ. 1997). Analizi sonucunda, hasarın nedeninin belirlenmesi, ileride aynı tür hataların oluşmasını engelleyerek, ekonomik kayıpların büyük ölçüde engellenmiş kaliteli üretime olanak verir. Sıcak iş takım çeliklerinde oluşan hasar mekanizmaları; çeliğin üretim aşamasında, kalıbın işlenmesi aşamasında ve kalıbın çalışması aşamasında meydana gelebilir (Bayramoğlu, 2008). Bu çalışmada, işletmelerde en fazla hasara sebep olarak da bilinen kalıbın çalışma şartlarında oluşan hasar mekanizmaları ele alınmıştır. Çalışma şartlarında oluşan hasar mekanizmaları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kalıbın çalışma aşamasında oluşan hasar mekanizmaları (Zhu ve diğ., 2002)



Hasar mekanizmaları birbiriyle etkileşim içindedir. Hasar analizi sırasında, hasarlı parçada birden fazla hasar mekanizmasına rastlamak mümkündür. Bu nedenle yükleme şekli, gerilme şekli çalışma sıcaklığı, çalışma ortamı ve çalışma süresi analiz sırasında önemli parametrelerdir. Sıcak dövmede kalıplar, şekil değiştirme esnasında yüksek ısıl ve mekanik gerilmelere maruz kalırlar. Bu gerilimler nedeniyle kalıplar aşınma ve termo-mekanik yorulma sonucu hasara uğrarlar (Zhu ve diğ., 2002; Civelekoğlu, 2003). Sıcak dövme kalıplarında meydana gelmesi muhtemel olan hasar mekanizmalarının şematik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Sıcak dövme kalıplarında oluşabilecek hasar mekanizmaları (Zhu ve diğ., 2002)
1) aşınma 2) termal yorulma 3) mekanik yorulma 4) plastik deformasyon

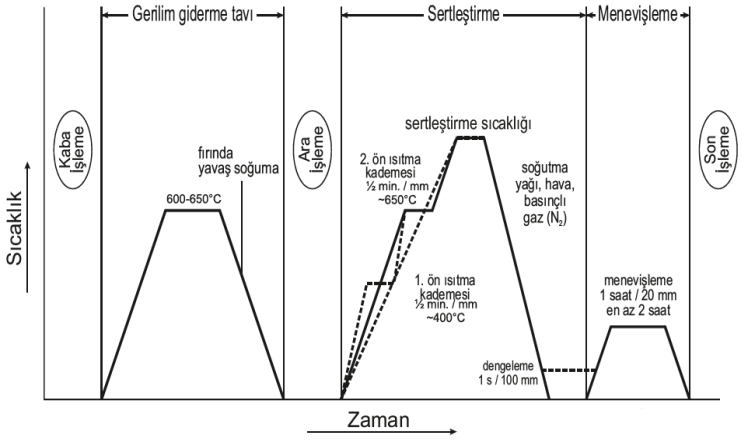
Hatanın nedeninin bulunması ve çözümlenmesi, ileride yapılacak tasarımların daha az hata içermesine, daha uzun süre hizmet verebilecek parçaların tasarımlanmasına ve parçaların çalışma koşullarının iyileştirilmesine imkân verecektir. Endüstride Sıcak Dövme işlemi ile üretilen parçalar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Buna rağmen endüstride bu konu ile ilgili yazılı doküman çok az sayıdadır. Bu çalışmada farklı parçaların üretiminde kullanılan, servis ömrünü tamamlamış 1.2714 sıcak iş takım çeliği kalıplarında oluşan hasarlar görsel muayene yoluyla incelenmiştir.

HASAR ANALİZİ YAPILAN SICAK DÖVME KALIPLARI

Bu çalışmada servis ömrünü tamamlamış farklı parçaların üretiminde kullanılan sıcak dövme kalıplar; Aran Sıcak Dövme San. Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Kalıp malzemesi iyi bir ısıl iletkenliğe ve termal şok direncine sahip olan CrMoV alaşımlı DIN 1.2714 (55NiCrMoV7) sıcak iş takım çeliğidir. Orta ve büyük ölçekli dövme kalıplarında standart malzemedir. DIN 1.2714 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 2'de, kalıba uygulanan ısıl işlem basamakları Şekil 2'de verilmektedir.

Tablo 2. 1.2714 çeliğin kimyasal analizi

C	Cr	Mo	Ni	V
0,55	1,10	0,50	1,70	0,10



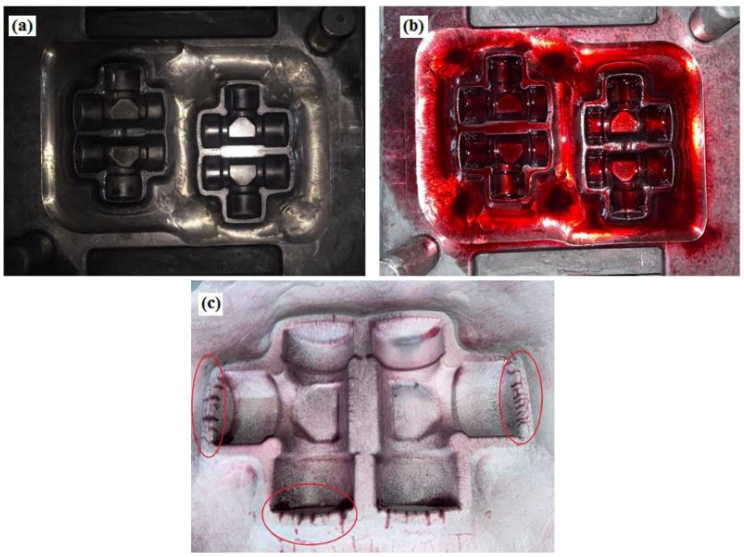
Şekil 2. 1.2714 sıcak iş kalıbın ısıl işlem basamakları

Sıcak dövme kalıplar hem malzemelerinin hem de uygulanan ısıl işlem süreçlerinin maliyetli olmasından dolayı, yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumu gibi kaliteyi etkileyen parametrelerin optik bir yardımcı kullanarak veya kullanmaksızın muayene edilmesi gerekmektedir. Bu sektörde gözle muayene genellikle bir başka tahribatsız muayene metodunun uygulanmasından önce yapılması gereken bir çalışmadır. Tahribatsız muayene yöntemleri için hazırlanmış uygulama standartlarının çoğunda da öncelikle gözle muayene yapılması ve bulguların kaydedilmesi istenir. Bu çalışmada da servis ömrünü tamamlamış

farklı parçaların üretiminde kullanılan kalıplarda oluşan hasarlar görsel muayene yoluyla incelenmiştir. Ayrıca bazı kalıplarda tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan penetrant muayene yöntemi de kullanılmıştır. Bu yöntem için; kalıp yüzeyinde ön temizlik, penetrantın uygulanması, penetrasyon için bekleme, ara temizlik, geliştirme, inceleme, değerlendirme ve rapor hazırlama ve son temizlik aşamaları uygulanmıştır. Çözüm önerileri, hasarların detaylı görüntülerini ve buna uygun açıklamalarını içermektedir. Elde edilen veriler değerlendirilerek her bir sıcak dövme kalıbı için hasarın cinsi, sebebi ve mekanizması tespit edilmeye çalışılmıştır.

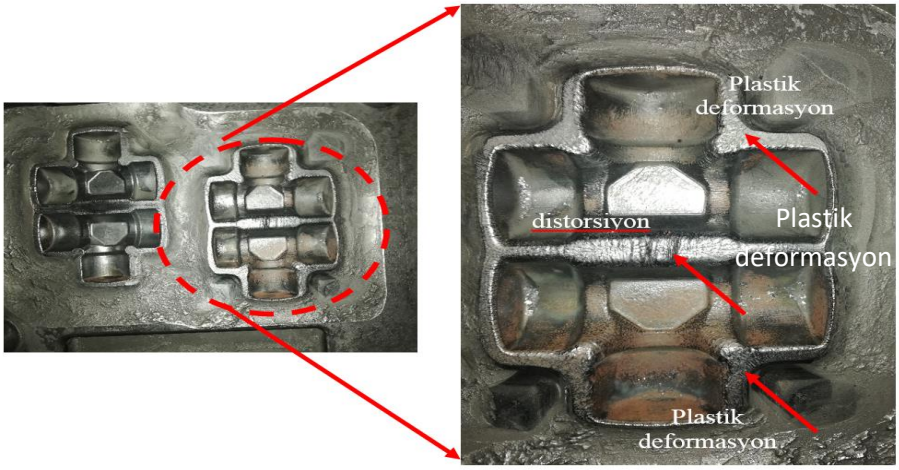
HASAR ANALİZİ VE DEĞERLENDİRMESİ

Servis ömrünü tamamlamış farklı hasar mekanizmaları gösteren sıcak iş kalıplarının fotoğrafları Şekil 3-10'de gösterilmiştir. Şekil 3'de penetrant muayene yöntemi ile hasar analizi yapılan bağlantı kolu dövmek amacıyla kullanılan sıcak dövme kalıbının fotoğrafları farklı süreçlerde verilmiştir. Geliştiricinin kalıp yüzeyine uygulanması sonrası ortaya çıkan termal yorulma sonucu oluşan kılcal çatlaklar net olarak görülmektedir. Kalıbın çapak bölgesindeki ısıl yorulma çatlaklarının oluştuğu şekilden görülmektedir. Uygulamada kullanılan pek çok makine parçası ve yapı elemanı tekrarlı yüklere ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu koşullar altında çalışan metalik malzemeden yapılmış parçalarda, gerilmeler malzemenin statik mukavemetinden küçük olsa dahi belirli bir çevrim sayısından sonra yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayı meydana gelir. Meydana gelen bu olay yorulma olarak adlandırılır (Bayramoğlu ve diğ., 2008; Gronostajski ve diğ., 2016). Sıcak iş takım çelikleri kullanım alanları gereği yoğun oranda sürtünme, darbe, mekanik ve termal yüklemelere maruz kalan çeliklerdir. Özellikle yüksek basınçlı kalıp döküm uygulamalarında ısıl yorulma hasarı kalıp ömrünü sınırlandıran en önemli faktördür. Sıcak dövme kalıplarında ısıl yorulmaya bağlı hasar, iş parçası ile kalıp yüzeyinin en uzun süre temas ettiği bölgelerde görülür. Proses esnasında kalıp yüzeyinde, sıcak iş parçasının temasıyla sıcaklığı artan, akabinde yağlama ile soğuyan bir ısınma-soğuma döngüsü gerçekleşmektedir. Eğer kalıpta bu gibi sürekli sıcaklık değişimi sebebi ile çatlama oluşursa bu duruma ısıl yorulma denir. Kalıp yüzeyinden ince çatlak ağları, kalıbın ısıl yorulmaya maruz kaldığının bir göstergesidir (Barrau ve diğ., 2003).



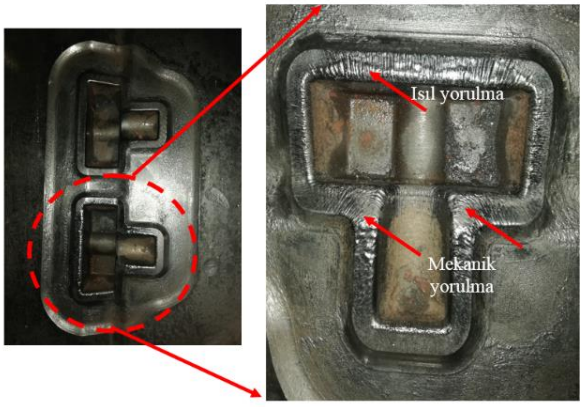
Şekil 3. (a) Sıvı penetrant kontrolünden önce yüzeyi temizlenmiş kalıp, (b) penetrant sıvısının yüzey süreksizliklerine nüfuz etmesi ve (c) geliştiricinin kalıp yüzeyine uygulanması ve süreksizliklerin ortaya çıkması

Şekil 4'de sıcak şekil değişimi sonrası plastik deformasyon ve distorsiyon oluşumu görülmektedir. Plastik deformasyon daha çok keskin köşelerde ve uzun çıkıntılarda görülür. Çünkü dövme kalıplarındaki keskin köşeler ve uzun çıkıntılar gibi ince geometriler plastik olarak şekil değiştirmeye ve hasar göremeye en yatkın alanlardır. Plastik deformasyonu en çok etkileyen parametreler dövme sıcaklığı, dövme parçasının büyüklüğü ve geometrisi, dövme çevrim süreleridir (Panesar ve Batish, 2008)

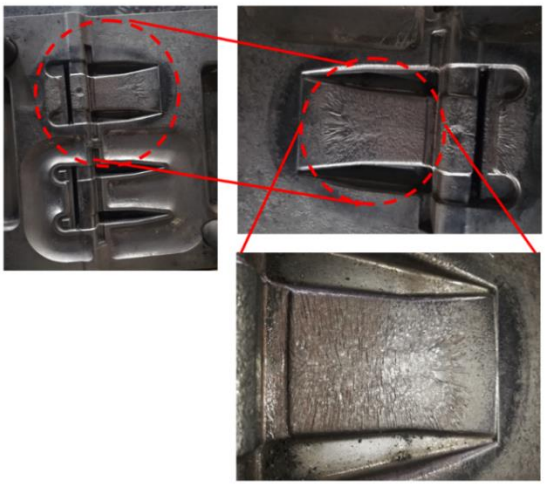


Şekil 4. Sıcak dövme kalıbında plastik deformasyon ve distorsiyon oluşumu

Şekil 5'de sıcak şekil değişimi sonrası ısıl (termal) ve mekanik yorulmaların oluşumu görülmektedir. Şekil 6 ve 7'de ise termal yorulma sonrası oluşan çatlaklar görülmektedir. Sıcak kalıp yüzeylerinde termal ve mekanik yorulma ve aşınma hasar tiplerine sıklıkla rastlanmaktadır. Aşınma direnci, sıcak dövme kalıp çeliğinin önemli özellikleridir ve yorulma dayanımını önemli oranda etkiler. Özellikle ısıl yorulmalar sıcak dövme kalıplarında en çok rastlanan hasar türüdür. Sıcak dövme kalıplarında ısıl yorulmaya bağlı hasar, iş parçası ile kalıp yüzeyinin en uzun süre temas ettiği bölgelerde görülür. Proses esnasında kalıp yüzeyinde, sıcak iş parçasının temasıyla sıcaklığı artan, yağlama ile soğuyan bir ısınma-soğuma döngüsü gerçekleşmektedir. Eğer kalıpta bu gibi sürekli sıcaklık değişimi sebebi ile çatlama oluşursa bu duruma ısıl yorulma denir. Kalıp yüzeyinden ince çatlak ağları, kalıbın ısıl yorulmaya maruz kaldığının bir göstergesidir (Abashi, 2004; Ebare ve Kubota, 1986). Mekanik yorulma haşarıda dövme kalıplarında gözlenen bir hasar mekanizması olup tekrar eden mekanik yükler hasarın oluşuma sebep olur. Mekanik yüklemeler sırasında meydana gelen distorsiyonlar çeliğin termal genleşme katsayısına bağlı olarak ısıl ve mekanik yorulma gerilimlerine neden olmakta ve bu gerilimlerin çeliğin ilgili sıcaklıktaki çekme mukavemetinin üzerine çıkması durumundan hasar meydana gelmektedir.



Şekil 5. Sıcak dövme kalıbında ısıl ve mekanik yorulma oluşumu



Şekil 6. Sıcak dövme kalıbında ısıl yorulma sonrası oluşan sıcak çatlaklar



Şekil 7. Sıcak dövme kalıbında ısıl yorulma sonrası çatlak başlangıcı

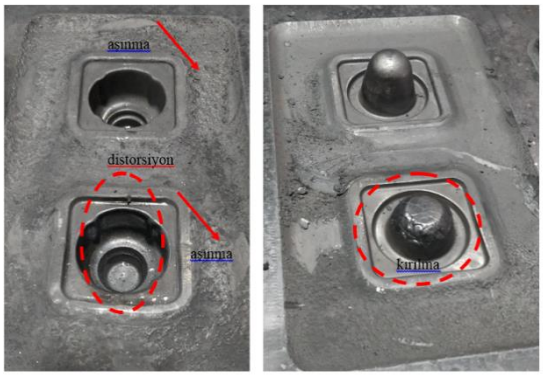
Şekil 8'de sıcak dövme kalıbında kullanım sonrası meydana gelen plastik deformasyon, ısıl yorulma ve aşınma oluşumu görülmektedir. Aşınma hasarı iki malzemenin birbiri üzerinde çalışması esnasında; her iki yüzeyden ya da birinden malzeme kaybının meydana gelmesidir. Kalıbın çıkıntılı kısımlarında ya da birbirine değen kısımlarında metal kayıpları meydana gelmektedir.



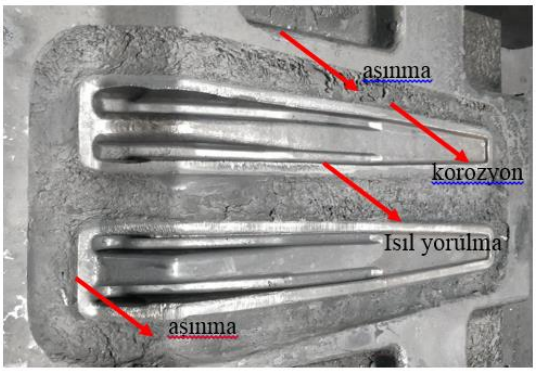
Şekil 8. Sıcak dövme kalıbında plastik deformasyon, ısıl yorulma ve aşınma oluşumu

Şekil 9'da sıcak dövme kalıbında meydana gelen aşınma, distorsiyon ve kırılma oluşumu görülmektedir. Distorsiyon hasarları sürekli kullanılan kalıplarda yüksek sıcaklıkların sonucudur. Aşınmalar ve kırılmalar ise yüksek basıncın sonucudur (Abachi, 2004; Ebara, 1986). Aşınma hasarı iki malzemenin birbiri üzerinde çalışması esnasında; her iki yüzeyden ya da birinden malzeme kaybının meydana gelmesidir. Kalıbın çıkıntılı kısımlarında metal kayıpları meydana gelmektedir. Bu hasarlar yüksek sıcaklıktaki malzemeye şekil vermek

için uygulanan aşırı basıncın etkisiyle erkek ve dişi kalıbın birbirine yüksek şiddette kuvvet uygulaması esnasında meydana gelmiştir. Şekil 10'da sıcak dövme kalıbında meydana gelen aşınma, ısıl yorulma ve korozyon oluşumu görülmektedir. Isıl yorulma hasarları sürekli kullanılan kalıplarda yüksek sıcaklıkların sonucudur. Temel sebebi tekrar eden termal çevrimdir. Korozyon, ergimiş metalin kalıbın yüzeyi ile şiddetli kuvvetin etkisiyle birbirine teması sonucu meydana gelen bir hasar türüdür. Bu hasar türünde kalıbın dizaynı ve sıcaklık en önemli parametrelerdir (Abachi ve diğ. 2010; Ebara, 2010).



Şekil 9. Sıcak dövme kalıbında aşınma, distorsiyon ve kırılma oluşumu



Şekil 10. Sıcak dövme kalıbında aşınma, ısıl yorulma ve korozyon oluşumu

Sıcak dövme işlemlerinde kalıp ömrünü etkileyen faktörler termal yorulma, plastik deformasyon ve aşınmadır. Bunlar arasında termal yorulma, sıcak dövme kalıplarında temel hasar nedenidir. Sıcak dövme kalıplarının ömrü genellikle yüzey çatlaması ve ardından malzeme ayrılmasıyla kısalır. Sıcak dövme kalıbı arızalarının çoğu ölçü köşesinden başlamıştır. Bu nedenle kalıp tasarımında şekil ve ölçü köşesinin boyutlarının doğru belirlenmesi çok önemlidir (Lavtar ve diğ., 2011; Yiğitarslan, 2009).

SONUÇLAR

Çeşitli sıcak dövme kalıplarının hasar analizi sonucu elde edilen genel sonuçlar ve çözüm önerileri:

- Sıcak dövme kalıp hasarı; kalıp malzemesi, kalıp tasarımı, kalıp imalatı ve dövme işlemleri gibi çeşitli değişkenlerden etkilenen bir oluşumdur.
- Sıcak dövme kalıp hasarları; takım çeliği seçimi ve kalitesi; kalıp tasarımı ve imalatı; ısı ve yüzey işlemleri; dövme işlemi parametreleri gibi faktörlere bağlıdır. Bu çalışmada gözlenen kalıp hasarları; aşınma, termal ve mekanik yorulma ve plastik deformasyon, distorsiyon, sıcak çatlak, ısıl çatlaklar ve kırılma olarak belirlenmiştir.
- İnceleme sırasında, kalıp yüzeyindeki girintilerde ve boşluklarda yüksek sıcaklığa maruz kalındığı tespit edilmiştir. Bu durumun işlem sırasında dişi ve erkek kalıbın öpüşme süresinin fazla olması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalınması ısıl yorulma çatlaklarının ve plastik deformasyonun olmasında etkili olup kırılmaya yol açmaktadır.
- Sıcak dövme kalıplarının ömrünü iyileştirmek için, her şeyden önce, nihai dövme sırasında kalıp boşluklarının sapmasını azaltmak amacıyla kalıpların tasarımını olabildiğince iyileştirmek gerekir.

- Uygun sıcaklık, malzeme ve yağlama gibi dövme koşullarının sağlanmasının yanı sıra uygun dövme kalıp tasarımı da dövmede oluşacak kusurların çoğunu engellemek için gerekmektedir.
- Çapak hem ön dövmede hem de son dövmede oluşmakta ve parçanın kalıbı doldurması, kalıp aşınmasını azaltarak ömür artışı sağlaması ve yüksek yüzey kalitesi açısından önem taşımaktadır. Kalıp tasarımında bu özellik dikkate alınmalıdır.
- Hasarlı kalıplar mevcut hatalarına göre; hurda veya tekrar işlem görme aşamalarına tabi tutulurlar. Dövme için yeterli kalınlığa sahipse talaşlı imalat yöntemleri ile yüzeyden silme işlemi yapılarak kalıp tekrar işlenir.

TEŞEKKÜR

Deneysel çalışmamızda kullanılan kalıpların temininde ve hataların tanımlanmasında yardımcı olan Aran Sıcak Dövme San. Tic. Ltd. Şti. Proses ve Kalite Kontrol Sorumlusu Mustafa DİLSİZ'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Abachi S 2004. Wear analysis of hot forging dies. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University.

Abachi S, Akkök M, Gökler Mİ 2010. Wear analysis of hot forging dies. Tribology International, 43(1-2): 467-473.

Barrau O, Boher C, Gras RB, Rezai-Aria F 2003. Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging. Wear, 255(7-12): 1444-1454.

Bayramoglu M, Polat H, Geren N 2008. Cost and performance evaluation of different surface treated dies for hot forging process. Journal of Materials Processing Technology, 205(1-3): 394-403.

Civelekoğlu, B 2003. Analysis of forging for three different alloy steels .Doctoral dissertation, Middle East Technical University.

Ebara R, Kubota K 1986. Failure analysis of hot forging dies. In Steel Forgings. ASTM International.

Ebara R, Kubota K. 2008. Failure analysis of hot forging dies for automotive components. Engineering Failure Analysis, 15(7): 881-893.

Ebara R. 2010. Fatigue crack initiation and propagation behavior of forging die steels. International Journal of Fatigue, 32(5): 830-840.

Gronostajski Z, Kaszuba M, Polak S, Zwierzchowski M, Niechajowicz A, Hawryluk M. 2016. The failure mechanisms of hot forging dies. Materials Science and Engineering: A, 657: 147-160.

Kayalı E, Eruslu N, Ürgen Taptık MY, Çimenoğlu H 1997. Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Seminer Notları, İstanbul.

Lavtar L, Muhič T, Kugler G, Terčelj M 2011. Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms. Engineering Failure Analysis, 18(4): 1143-1152.

Panesar SS, Batish AG 2008. Evaluation of Wear Coefficient of Hot Forging Dies in Hammer Forging, Doctoral dissertation.

Yiğitarslan E 2009. Sıcak Dövme İşleminde Karşılaşılan Hatalar, Önlenmesi ve Maliyete Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zhu H, Guo J, Jia J 2002. Experimental study and theoretical analysis on die soldering in aluminum die casting, Journal of materials processing technology, 123: 229-235.