



1.2367 Takım Çeliğinden İmal Edilmiş Enjeksiyon Yolluk Burcunda Hasar Analizi ve Geometrik Tasarımda İyileştirme ile Hasarı Önleme

Bekir YALÇIN*¹, Berkay ERGENE, Serdar NAR

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta.

(Alınış Tarihi/Received: 26.04.2019, Kabul Tarihi/Accepted: 23.10.2019)

*İlgili yazar/Corresponding Author: bekiryalcin@isparta.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Takım çeliği
Şekillendirme ve
enjeksiyon kalıbı
Çatlak oluşumu
Sonlu eleman analizi
Tasarım iyileştirme

Özet: Takım çeliği şekillendirme ve enjeksiyon kalıplarının/ekipmanlarının imalatında yaygın kullanılan bir malzemedir. Enjeksiyon ve şekillendirme kalıpları, çalışma sırasında tekrarlı yüksek basınç ve ısıya maruz kalmaktadırlar ve bu çalışma koşulu kalıplarda beklenmeyen zamanda çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Sürekli ve tekrarlı yüklerin devamında ise başlayan çatlakların ilerlemesi sonucu kalıbın işlevini yerine getirememesi ve/veya imalatın durmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, tekrarlı mekanik ve ısıl yüklenme neticesinde çatlayarak fonksiyonunu yitiren 1.2367 sıcak iş takım çeliği enjeksiyon yolluk burcunun, hasarının oluşum nedeni bir dizi sonlu eleman analizi ve optik araştırma ile belirlenmeye çalışılmış ve oluşan bu çatlak hasarını önlemek için enjeksiyon yolluk burcu tasarımında değişikliğe gidilmiştir. Sonuç olarak, tasarımda yapılan iyileştirme ile enjeksiyon yolluk burcunda meydana gelen gerilmelerde düşüş görülmüş ve mekanik yüklere karşı dayanımında iyileşme elde edilmiştir.

Failure Analysis in Injection Gate Brush Manufactured from 1.2367 Tool Steel and Prevention of Failure with Geometric Design Improvement

Keywords

Tool steel
Forming and
injection mold
Crack formation
Finite element analysis
Design improvement

Abstract: Tool steel is a widely used material in forming and manufacturing of injection molds / equipments. Injection and forming dies are subjected to repetitive high pressure and heat during operation, which leads to unexpected formation of cracks in the die. In case of continuation of continuous and repeated loads, starting crack causes the die lose its function or stopping injection process. In this study, a series of finite element analyzes and optical investigations have been carried out to determine the cause of the damage of 1.2367 hot work tool steel injection gate brush which has lost its function as a result of repetitive mechanical and thermal loading, and the design of the injection gate brush has been changed to prevent this damage. As a result of new designing of injection gate brush, a decrease in stresses of gate brush under working was observed. Hereby, the strength of injection gate brush was improved.

1. Giriş(Introduction)

Takım çelikleri değişik oranlarda karbon içeriğine sahip olmakla birlikte, kullanım amacına göre diğer çeliklere nazaran yüksek oranda Cr, Mo, W, Ti, V, Ni, Co gibi alaşım elementleri içeren ve uygulanan sertleştirme ve temperleme ısıl işlemleri ile yüksek dayanım, tokluk ve aşınma direncine sahip olabilen malzemelerdir. Takım çelikleri, bu özelliklerinden dolayı sıcak ve soğuk şekillendirme kalıp matrisi ve zımbalarının, enjeksiyon kalıplarının ve sac metal kesme/delme kalıplarının imalatında yaygın olarak tercih edilmektedirler. Takım çeliklerinin bu uygulamalardaki performansı, başlangıçta seçilen malzemenin alaşım içeriğine, uygulanan ısıl işlemlere, takım çeliğinin imalat yöntemine, takım ve kalıbın geometrik tasarımına bağlıdır (Attaullah, 1999). Ayrıca, takım çeliklerinin delme, kesme ve enjeksiyon döküm kalıp uygulamalarında Ark PVD (Physical Vapor Deposition) ve CVD (Chemical Vapor Deposition) kaplama yöntemleri ile TiN, CrN, TiAlN, AlTiN ve TiCN gibi sert seramik film kaplamalara oldukça uygun olduğu ve bu sayede aşınma dirençlerinin önemli bir seviyede iyileştirilebildiği görülmektedir (Yalçın, 2002). Amerikan Demir Çelik Enstitüsü' ne göre, bu çelikler yaklaşık 100 farklı kombinasyona sahip ancak bunlardan 40' ının ilgili sektörlerde yaygınca kullanıldığı ifade edilmektedir. Tablo 1' de takım çeliklerinin sınıflandırılması ile ilgili detay bilgi verilmiştir (Roberts ve Cary, 1980).

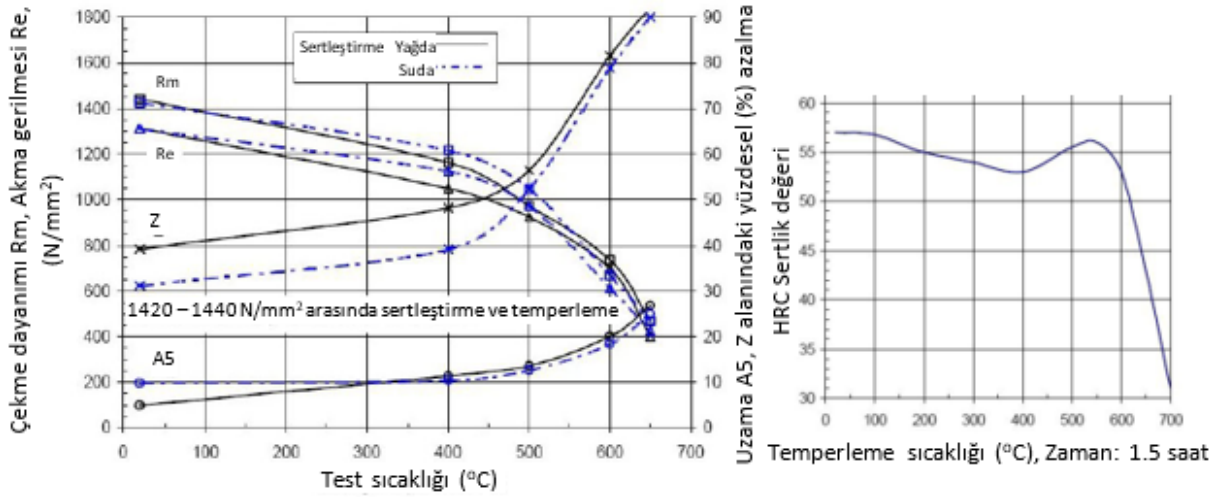
Tablo 1. Amerikan Demir Çelik Enstitüsü' ne göre takım çeliklerinin (TÇ) sınıflandırılması (Classification of tool steel according to American Iron Steel Institute) (Roberts ve Cary, 1980).

Ana Sınıflar	AISI Kodları	Özellikler					
		Aşınma Direnci	Tokluk	Sıcak Sertlik	Sertlik HRc	İşlenebilirlik	Maliyet
Suda serleşen TÇ	W tipi	2-4	3-7	1	58	9	1
Şok yüke dirençli TÇ (S Tipi)	S Tipi	2-3	4-6	2	50-60	8	1-2
Özel Amaçlı TÇ	L Tipi (Düşük alaşımlı)	1-3	6-7	2	45-62	8	1
	F Tipi (Karbon Tungsten Tipleri)	3-4	7-8	3-5	50-58	7-8	2-3
Kalıp TÇ	P1-P6 Tipleri (Düşük karbon tipleri)	1	9	1-4	60-64	8	1
	P20-P21 Tipleri	1-5	5-8	2-6	40-57	8	1
Soğuk iş TÇ	Q Tipi (Yağda sertleşebilen tipler)	4	3	3	57-62	8	1
	A Tipi (Orta alaşımlı havada sertleşebilen tipler)	6-9	4	5-6	57-62	8	1
	D Tipi (Yüksek karbon ve krom tipleri)	8-9	1-2	6	58-66	2-3	3
Sıcak iş TÇ	H1-H19 Tipleri(Krom esaslı tipler)	3	9	6	38-55	8	1
	H20-H39 Tipleri (Tungsten esaslı tipler)	4-6	4-6	8	40-58	5-6	4
	H40-H59 Tipleri (Molibden esaslı tipler)	3	9	6	40-58	8	1
Yüksek Hız TÇ	T Tipi (Tungsten esaslı tipler)	7-9	1-3	8-9	63-69	1-5	3-5
	M Tipi (Molibden esaslı tipler)	7-9	1-3	8-9	63-69	1-5	3-5

Tablodaki değerler 1' de 9' a doğru arttığında, belirtilen özelliklerde artma anlamına gelmektedir.

Tablo 1'e göre takım çeliği seçimini örnekleyecek olursak, metal enjeksiyon kalıp matrislerinde sıcak sertlik ve tokluk özellikleri ön plana çıkan H tipi sıcak iş takım çelikleri seçilirken, soğuk kesme işlemi yapan zımbalarda sertlik, aşınma dayanımı ve tokluk özellikleri ön plana çıkan A tipi soğuk iş takım çelikleri ve kesici takımların imalatında da yüksek hız takım çelikleri tercih edilmelidir. Bir başka örnekte ise, şok yüke maruz kalan bir uygulamada yüksek toklukla birlikte yüksek dayanım ve ortalama aşınma dayanımına sahip F veya L tipi takım çeliği önerilmektedir (Højerslev, 2001). Dolayısıyla, takım çeliğinin seçiminde çeliğin kullanılacağı uygulama, çalışma sırasındaki muhtemel ısıl, mekanik ve tribolojik yükler, yükün niteliği (darbeli, değişken, statik, titreşimli) gibi parametreler göz önüne alınmalı ve ayrıca takım çeliğine uygulanacak ısıl işlem programı da bu parametrelere göre seçilmelidir.

Bu bağlamda, örneğin 1.2367 sıcak iş takım çeliğinin test sıcaklığı ile sertleştirme ve temperleme şartlarının, bahsedilen sıcak iş takım çeliğinin çekme, akma dayanımlarını ve sertliğini etkilediği Şekil 1' de görülebilmektedir.

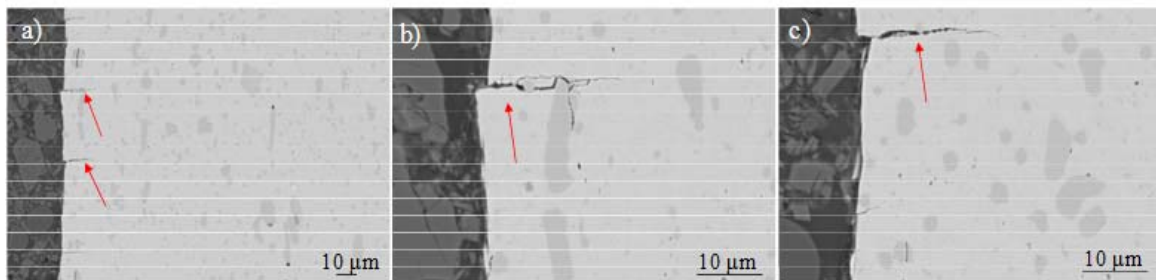


Şekil 1. 1.2367 sıcak iş takım çeliğinin sertleştirme ortamı ve test sıcaklığına göre değişen mekanik özellikleri (Mechanical properties of 1.2367 hot work tool steel which change with hardening atmosphere and testing temperature) (Steelselector, 2019).

Takım çeliklerinde, gerek yanlış malzeme seçimi gerekse uygun ısıl işlem programının uygulanmaması ile birlikte dayanım sınırının üstünde çalışma sonucu sıklıkla çatlak oluşumu ve çatlağın ilerlemesi ile de beklenmeyen bir periyotta endüstriyel parçanın fonksiyonunu yitirmesi problemi ile karşılaşmaktadır. Özellikle, soğuk iş takım çelikleri çalışma yüklerinin aşırılması durumunda ve değişken yükler altında kırılmaya hassastırlar ve kırılma sünek ya da gevrek olabilmektedir (Gonzalez, 2013). Her iki kırılma şeklinin de, çalışma yüklerinden doğan gerilmelerin takım çeliğinin akma dayanımının üstüne çıkması durumunda gerçekleştiği, kırılmaya neden olan hasar mekanizmalarının farklı olduğu ve genelde kırık yüzeylerinin hem gevrek hem de sünek kırılmanın birlikte olduğu rapor edilmektedir (Gonzalez, 2013).

Sünek kırılmanın, takım çeliğinin sertleştirme ve temperleme sonrası yapısında bulunan birincil sert karbürlerin etrafında çekirdeklendiği ve dolayısıyla karakteristik olarak bu çeliklerin kimyasal içerindeki Mo, Cr, V, W gibi elementlerin ısıl işlem sonrası birincil sert karbür oluşumu eğilimlerinden dolayı sünek kırılma dayanımlarının düşük olduğu bilinmektedir (Picas, 2012; Yokoi vd., 2003). Dolayısıyla, herhangi bir uygulama için seçilen takım çeliğinin performansını arttırmak için, uygulanacak ısıl işlemle mikro yapısal tasarıma ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 2' de, 1.2379 takım çeliğinden imal edilmiş zımbada, sürtünme kuvvetleriyle oluşan plastik deformasyon hasar mekanizmasının neden olduğu yorulma çatlağı çekirdekleme görülmektedir. Şekil 2-a' da görüleceği üzere, yüzeyde çatlak çekirdekleme ve Şekil 2-b ve Şekil 2-c' de ise zımbada oluşan sürtünme kuvvetlerinin tesiriyle çatlak yaklaşık 30 mikron seviyesine ulaşmıştır ki bu da zımbanın kırılma ile son bulan hasara uğrayacağına göstergesidir.



Şekil 2. 1.2379 takım çeliğinden imal edilmiş zımbada, sürtünme kuvvetleriyle oluşan plastik deformasyon hasar mekanizmasının neden olduğu yorulma çatlağı çekirdekleme (Fatigue crack nucleation caused by plastic deformation damage mechanism caused by friction forces on 1.2379 tool steel) (Alfredsson ve Olsson, 2003).

Takım çeliklerinin genel alaşım içeriğine bakıldığında, başta karbon olmak üzere değişik oranlarda krom, tungsten, molibden, vanadyum, manganez, kobalt, silikon, nikel bulunmakta olup, karbon yapının sertleşme kabiliyetini değiştirirken, krom elementinin ise takım çeliği yapısında 900-1100 °C sıcaklık aralığında çözünen Cr₂₃C₆, Cr₇C₃ gibi sert karbür oluşumuna sebep olarak aşınma direnci ile birlikte dayanımında iyileşme sağlamaktadır (Hoyle, 1988). Takım çeliğinde, tungsten ve molibden elementlerinin benzer etkiye sahip olduğu

rapor edilmekte olup (Højerslev, 2001). Bu içeriğin tane inceltmesine, ikincil karbürlerin oluşmasına ve dolayısıyla yüksek sıcaklıkta çalışmasına imkân vermektedir. Bununla birlikte vanadyum içeriğinin de, tane inceltme özelliğinin yanında impürite ve nitrojenin yapıda homojen çözünmesini sağlayarak sertlik ve kesme direncini arttırdığı (Pippel vd., 1999) manganez içeriğinin sertleşme derinliğini arttırdığı ve yağda sertleşebilirlik özelliğini kazandırdığı ifade edilmektedir (Ayrıca, kobalt elementinin genellikle yüksek hız çeliğinin içeriğinde bulunduğu, 650 °C sıcaklığa kadar termal stabilite sağladığı, yapının sertliğini 67-70 HRC mertebesine ulaştırdığı, diğer yandan tokluk ve aşınma direncinde düşüş meydana getirdiği belirtilmektedir (Hoyle, 1988; Vogel vd., 1978). Silikon içeriğinin ise, matristeki karbon içeriğinin çözünebilirliğini arttırdığı ve karbür dağılımına etkisinin olmadığı, sünekliliği düşürmekle birlikte temper stabiliteyi ve sertleşme derinliğini arttırdığı rapor edilmektedir (Hoyle, 1988; Vogel vd., 1978, Pippel vd., 1999). Nikel' in de, sertleştirme ısıl işlemi sırasında çatlak ve distorsiyon eğilimini düşürdüğü, dayanım, tokluk ve sertliği arttırdığı vurgulanmaktadır (Højerslev, 2001). Bu bağlamda, kalıplılık esasıyla imalat işlemlerinin temel elemanı olan kalıpların imalatında yaygın kullanılan ve yüksek alaşım içeriğine sahip takım çelikleri, ciddi mekanik, ısıl ve sürtünme yükleri altında çalışmaktadırlar. Bu malzemelerin beklenmedik bir zamanda hasarını önlemek, kalıp çalışma sürelerini arttırmak ve yüksek kalıp maliyetlerini düşürme ihtiyaçları, araştırmacıları bu ihtiyaçları giderme yolunda çalışmalar yapmaya sevk etmiştir. Takım çeliklerinde hasar oluşum mekanizmalarıyla ilgili yapılan literatür araştırmasında; Seriacopi vd. (Seriacopi vd., 2019), takım çeliklerine termo-mekanik yüklemenin etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir ve çalışmalarının sonucunda, ısıtma ve soğutma yük çevrimlerinde gerilme konsantrasyonlarının ara ve ikincil faz partiküllerinin olduğu bölgede yoğunlaştığı, karbür oluşumlarının artmasıyla kırılma tokluğunda düşüş meydana geldiği vurgulanmaktadır. Schwingenschlögl vd. (Schwingenschlögl vd., 2019) 1.2367 ve yeni 1.2388 takım çelikleri ile sıcak presleme sırasında sürtünme ve aşınma mekanizmalarını deneysel olarak çalışmışlardır. Sıcak presleme sırasında, yeni 1.2388 takım çeliğinin sertliğindeki artışla yapışmadan kaynaklanan (adheziv) aşınma hasarına karşı direncinin arttığı, termal ısıl iletim özelliğinin 1.2367 takım çeliğine göre daha iyi olduğu ve sıcak şekillendirme takımlarında daha performanslı çalışabileceği ifade edilmektedir. Solic vd., (Solic vd., 2018) östenitleme sıcaklığına bağlı olarak yüksek karbonlu takım çeliğinde su verme çatlağı üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, su verme çatlağının, östenitleme sırasında sıcaklık kontrolünün zayıf olması sonucu yüksek östenitleme sıcaklığında geliştiğini, yüksek östenitleme sıcaklığının östenit tane gelişimini aşırılaştırdığını ileri sürmektedirler. Picas ve arkadaşları da (Picas vd., 2010), soğuk iş takım çeliklerinin yorulma çatlağı çekirdeklenmesi üzerine mikro yapının etkisini araştırmışlardır. Araştırmalarında, soğuk iş takım çeliklerinde çatlak çekirdeklenmesinin statik ve dinamik yükleme ile gerçekleştirilebileceğini, statik yüklemeye uygulanan gerilmenin takım çeliğinin muhteviyatında bulunan birincil karbür ağının kırılma dayanımını aşması durumunda birincil karbürlerin kırılması sonucu ile çatlağın çekirdeklendiği ileri sürülmektedir. Ayrıca, çevrimli yükleme altında soğuk iş takım çeliğinde çatlak gelişimi statik yüklemeye göre değil de, çatlağın birincil karbürlere yerleştikten sonra metalik matrise yayıldığı ve kırılmanın metalik matriste gözlemlenen çatlak şeklinde meydana geldiği vurgulanmaktadır (Picas vd., 2010) Yapılan bir tez çalışmasında da (Özgür, 2008), sıcak iş takım çeliklerindeki başlıca hasar mekanizmaları üç gruba ayrılmış olup, bunlar sırasıyla sıcak iş takım çeliği üretim esnasında oluşan hasarlar, kalıbın işlenmesi sırasında oluşan hasarlar ve son olarak da kalıbın çalışma koşullarında meydana gelen hasarlardır. Kalıbın çalışma koşullarında meydana gelen hasarlar da kendi içerisinde korozyon, erozyon, yapışma ve ısıl yorulma olarak ifade edilmektedir. Bishenden ve Bholal ise sıcak iş kalıp yüzeylerinin iki nedenden dolayı büyük bir zorlama altında olduğunu rapor etmişler ve bu nedenleri kalıp sıcaklığının en yüksek olduğu bölgenin kalıp yüzeyi olması ve kalıp yüzeyi ile kalıp çekirdeği arasındaki sıcaklık farkının yüksek olması olarak nitelendirmişlerdir (Bishenden ve Bholal, 2001). Klobcar vd. ise (Klobcar, 2007) bu zorlanmaların, sıcaklık artışından dolayı kalıp çeliğinin yumuşaması ve kalıp iç ve dış yüzeylerinin eşit oranda ısınmamasına bağlı olarak oluşacak çekme-basma gerilmelerinin ısınarak mukavemetini belli bir düzeyde yitiren kalıp çeliğinin akma mukavemetinden daha yüksek olması gibi durumlarda kalıp yüzeyinde çatlaklar oluşturabileceğini belirtmiştir. Ayrıca, kalıp yüzeyindeki sıcaklık yükselmelerinden dolayı ortaya çıkan çatlaklar ağ biçimindeki kılcal çatlaklar olup ısıl yorulma çatlakları (heat checking) olarak ifade edilirken, kalıp yüzeyi ile kalıp çekirdeği arasındaki sıcaklık farkı çok yüksek ise, kalıp yüzeyinde derin çatlaklar meydana gelir ve bu çatlaklar da gerilme çatlakları (gross checking) olarak belirtilmiştir (Özgür, 2008). Başka bir makalede ise (Hatman, 2009), gerilme çatlaklarının özellikle radyüslerle, işleme hatalarıyla ya da malzeme içindeki kalıntılarla buluştuğunda kırılmanın kaçınılmaz olduğu vurgulanmaktadır. Yeşildal ise (Yeşildal, 2018) deneysel bir çalışma gerçekleştirerek H13 sıcak iş takım çeliğinin yorulma dayanımının ısıl işlemlerle nasıl değiştiği hususunda veriler elde etmiştir. Elde ettiği verilere göre, H13 sıcak iş takım çeliğinin ısıl işlem görmemiş halde yorulma dayanımı 470 MPa iken, ısıl işlemler sonucu yaklaşık 750-850 MPa civarındadır.

Bu çalışmada, 1.2367 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş plastik enjeksiyon yolluk burcunda meydana gelen çatlak hasarını önleme adına bir dizi sertlik ölçümü, metalografik incelemenin akabinde dalgalı değişken yüklemeye maruz kalan yolluk burcu tasarımında iyileştirme çalışması yapılmıştır. Tasarımı iyileştirilen yolluk burcu, gerçek çalışma koşullarından doğan sınır şartı ve statik maksimum yükleme ile sonlu eleman analizine

tabii tutularak yeni tasarlanan burcun üzerinde oluşan gerilmeler belirlenmeye çalışılmış ve tasarım değişikliğinin kalıpta oluşan gerilmeye etkisi ortaya konulmuştur.

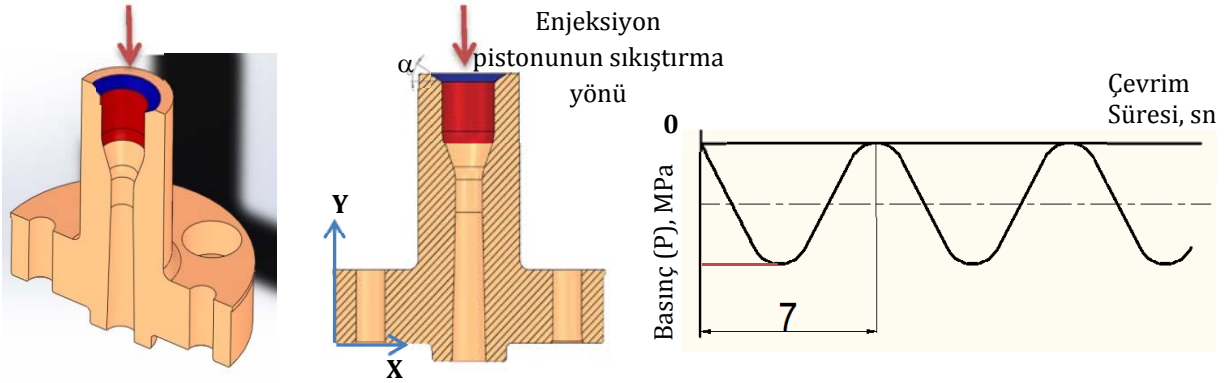
2. Malzeme ve Metot(Material and Method)

2.1. Hasar analizi(Failure analysis)

Plastik enjeksiyon sırasında hasar gören yolluk burcu 1.2367 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş ve kesit görüntüsü Şekil 3' de verilmiştir. Şekil 3-a' da görülen burç enjeksiyon sırasında, mavi renkle gösterilen α eğimli yüzeye -Y yönünde enjeksiyon pistonunun uyguladığı 0 kN-112 kN aralığında dalgalı değişken yüklerle birlikte, kırmızı ile gösterilen iç yüzeyde 0 MPa-19 MPa aralığında dalgalı değişken basınca maruz kalmaktadır. Burca tesir eden yük ve basınç çevrimi her 7 sn'de bir gerçekleşmekte ve yük çevrimi ile ilgili gösterim Şekil 3-b' de verilmiştir. Yolluk burcundaki çatlak hasarının oluşum nedeniyle ilgili metalografik analiz ve sertlik ölçümü yapılmıştır. Yolluk burcunun kimyasal içeriği ve ısıtım sonrası mekanik özellikleri Tablo 2' de verilmiştir.

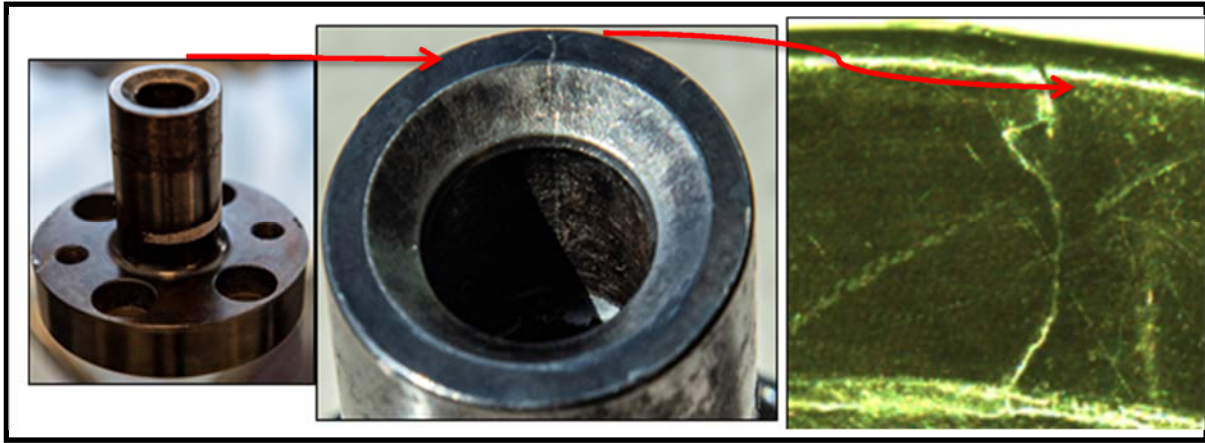
Tablo 2. 1. 2367 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal içeriği ve dayanım değerleri (Chemical content and strength values of 1.2367 hot work tool steel)

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
%	0,38	0,4	0,4	5	2,95	0,5
Akma Dayanımı MPa	1585		Çekme Dayanımı MPa		Sertlik HV	
	1585		1845		567	

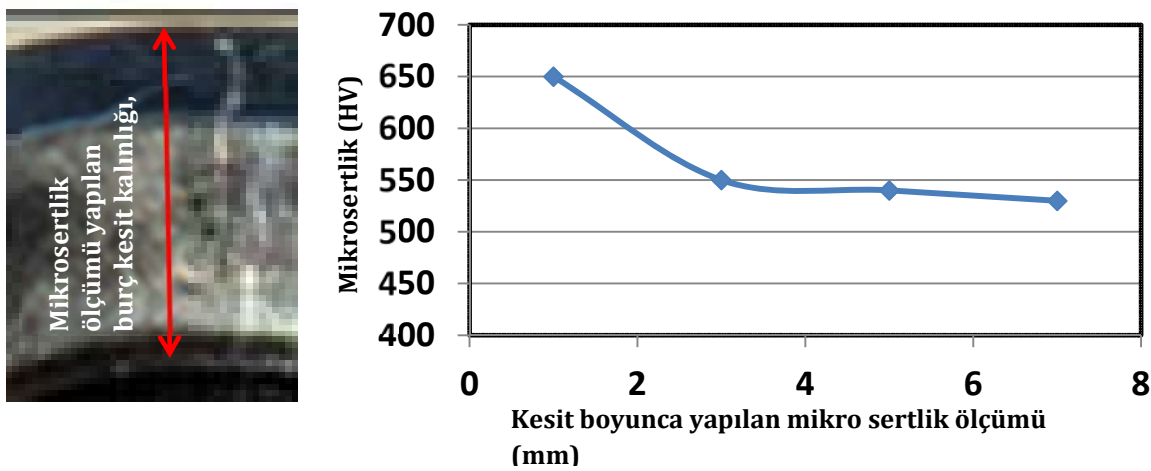


Şekil 3. a) Hasar gören yolluk burcunun kesit görüntüsü (Cross sectional view of failed gate brush), b) kırmızı ile mavi alanların maruz kaldığı yük çevrimi (Load cycle of red and blue area)

Yolluk burcundaki çatlak hasarının makro ve mikro görüntüleri Şekil 4' de görülebilmektedir. Görülen çatlak hasarının eğimli konik yüzeyin büyük çap çizgisi üzerinden başladığı ve önce mikro sertliği iç cidara göre daha yüksek olan dış yüzeye doğru ilerlediği ve çevrimli yüklerin tesiriyle de çatlağın konik yüzeyin küçük çap çizgisine ve burcun silindirik iç yüzeyindeki basıncın tesiriyle de burcun silindirik iç yüzeyine doğru ilerlediği görülmektedir. Burçtaki çatlağın, Şekil 3-a' da görülen enjeksiyon pistonunun sıkıştırma yönüne paralel yönde ilerlediği ve dolayısıyla çatlağın oluşumunda $F_{max}=112$ kN şiddetindeki yüklerle meydana gelen kayma gerilmesinin (τ_{max}) etkili olduğu ve bununla birlikte burcun silindirik iç yüzeyindeki dalgalı değişken basınca ($P_{max}=19$ MPa) çatlağın dik ve silindir içine doğru ilerlediği ve bunun sebebi burcun silindir iç kesitinde doğan gerilmeler olarak yorumlanabilir. Bu bağlamda, yolluk burcunda oluşan bu gerilmelerin tahmini için sonlu eleman analizine ihtiyaç duyulmuştur. Ayrıca, burcun silindir cidarındaki mikrosertlik değişimi yapılan ölçümlerle belirlenmiş ve burç kesitin homojen sertliğe sahip olmadığı görülmüştür. Özellikle, burç silindir cidarının dış yüzeyinde yaklaşık 650 HV mikrosertlik ölçülürken, çatlağın başladığı bölgelerde ortalama 550 HV sertlik ve iç yüzeyde doğru ortalama 530 HV sertlik ölçülmüştür (Şekil 5). Burcun silindir kesitindeki mikrosertlik değişimi, değişken yükler altında çalışan burcun hasarıyla ilgili ilk bulgu olarak değerlendirilmiştir.



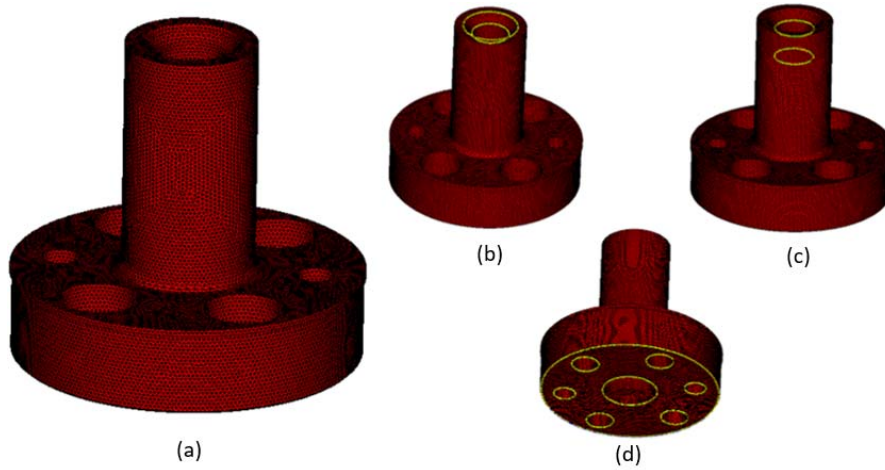
Şekil 4. Yolluk burcunun değişken çalışma yükleri altında çatlama hasarı (cracking damage of gate brush under variable working loads)



Şekil 5. Burçta, çatlak hasarının bulunduğu kesit (a) (Cross section where crack damage occurred) ve kesitin dış yüzeyinden içe doğru mikrosertlik değişimi (b) (change of microhardness from outside along inside of cross section)

2.2. Sonlu eleman analizi (Finite element analysis)

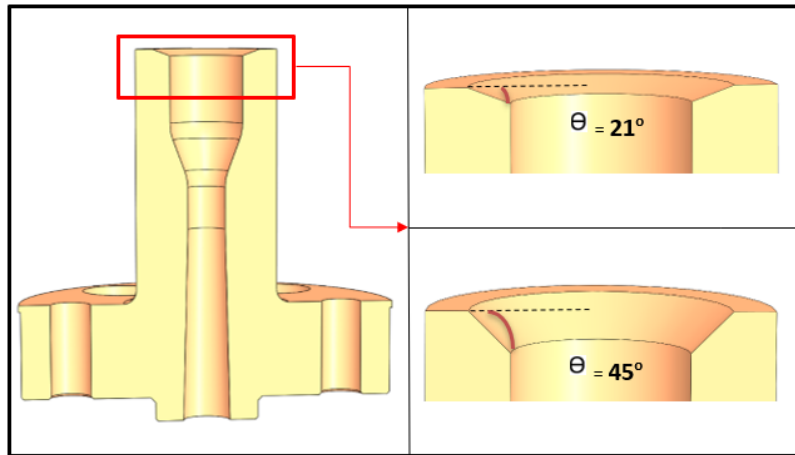
Yapılan bu çalışmanın sonlu elemanlar analizi kısmında, öncelikle solidworks tasarım programında oluşturulan açısı $\theta=30^\circ$ olan enjeksiyon yolluk burcu modeli Ansys sonlu elemanlar analiz programına aktarılmıştır. Aktarılan bu model, 8 node 185 element tipi ve 1 mm element kenar uzunluğu kullanılarak ağ örgüsü (mesh yapısı) elde edilmiştir (Şekil 6). 894671 eleman ve 163033 düğüm noktasına sahip olan ağ örgülü bu modele elastisite modülü 210000 MPa, Poisson oranı 0,3 olan çelik malzeme atanmış ve sınır ve yükleme koşulları olarak ise Şekil 6b'deki sarı bölge ile gösterilmiş alana etkiyen maksimum kuvvet olan 112 kN'luk yükün oluşturacağı gerilme değeri, Şekil 6c'deki alana ise 19 MPa basınç uygulanmış, Şekil 6d'deki alan ise ankastre mesnetlenmiştir. Çatlak oluşması sonucu hasara uğrayan enjeksiyon yolluk burcunda hangi gerilmelerin ne düzeyde meydana geldiği yapılan bu sonlu elemanlar analizi ile anlaşılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonlu elemanlar analizi sonuçları, açısı $\theta=30^\circ$ olan enjeksiyon yolluk burcunda ilgili sınır koşullarında 913,43 MPa Von Mises gerilmesi ve 355,16 MPa kayma gerilmesi olduğunu göstermektedir.



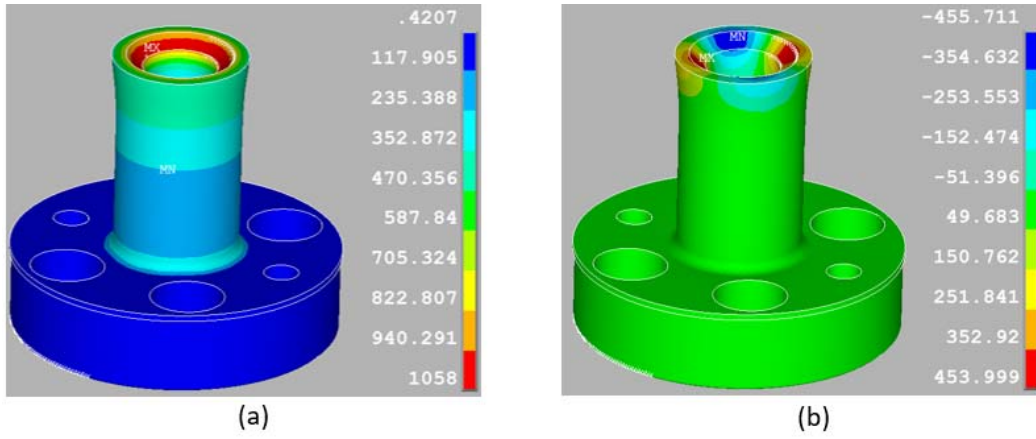
Şekil 6. Ağ örgülü model ve model üzerinde uygulanan yükleme - sınır koşullarının gösterimi a) ağ örgülü model (meshed model), b) Etki eden 112 kN yükün oluşturduğu gerilmenin etki ettiği alan (the area which was exposed to stress caused from 112 Kn load), c) 19 MPa basıncın uygulandığı alan (the area exposed to 19 MPa pressure), d) ankastre mesnetlenen alan (encastre fixed area)

2.3. Geometrik tasarımda iyileştirme ve gerilme analizi (Improvement at geometric design and stress analysis)

Belirtilen yükleme koşullarında oluşan gerilmelerden dolayı çatlakların meydana geldiği ve akabinde hasarın oluştuğu sonlu elemanlar analizi sonuçları ile de anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda, enjeksiyon yolluk burcunun açısı (θ) 21° , 24° , 27° , 30° , 33° , 36° , 39° ve 45° olacak şekilde solidworks tasarım programında toplam 8 farklı model oluşturulmuş (Şekil 7) ve oluşturulan bu modellere çalışma koşullarıyla aynı sınır şartı ve yükleme sonucu oluşan Von Mises eşdeğer gerilme (Şekil 8a) ve kayma gerilmeleri (Şekil 8b) sonlu elemanlar analizi ile elde edilmiştir. Şekil 8a'da verilen Von Mises eşdeğer gerilmeler eğimli konik yüzeyde maksimum değerlere ulaşmakta olup, ankastre mesnetlendiği alt kısımlara doğru gidildikçe gerilme değeri giderek azalmaktadır.

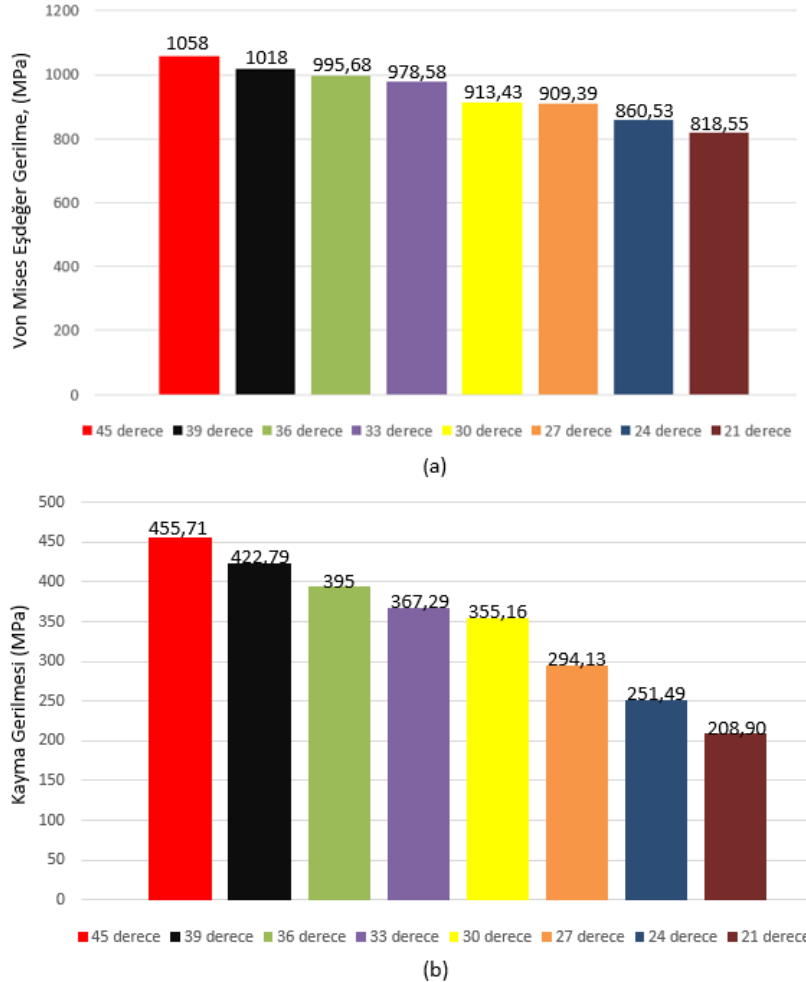


Şekil 7. θ açısının değişimine göre tasarımın değişimi ve 8 farklı modelin oluşturulma aşaması (Variation of design according to change of θ and designing levels of 8 different model)



Şekil 8. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda $\theta=45^\circ$ 'ye ait gerilme sonuçları (Stress results of model with $\theta=45^\circ$ which obtained from finite element analysis) , a) Von Mises eşdeğer gerilme (MPa) (Von Mises Stress, MPa), b) kayma gerilmesi (MPa) (Shear stress, MPa)

Tasarımı yapılan enjeksiyon yolluk burcunun θ açısı değiştirilmesi durumunda Von Mises eşdeğer gerilmesi ve kayma gerilmesine etkisi yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilmiş olup, Şekil 9'da detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 9. Sekiz farklı tasarımda oluşan gerilmeler (Stresses on eight different design) a) Von Mises eşdeğer gerilme (Von Mises stress), b) kayma gerilmesi (shear stress)

Şekil 9.a'ya göre, yolluk burcunun θ açısı 45° iken, yapıda 1058 MPa en yüksek eşdeğer gerilmesi meydana gelirken, θ açısı 21° 'ye doğru eşdeğer gerilme değerleri azalmaktadır ve 818,55 MPa en düşük gerilme değeri 21° 'de elde edilmiştir. Bu çıkarımla, çatlak sonucu hasara uğrayan $\theta=30^\circ$ 'li enjeksiyon yolluk burcu yerine $\theta=21^\circ$

°'lik bir enjeksiyon yolluk burcu kullanılırsa oluşacak gerilme değeri yaklaşık % 10,7 azalarak 913,43 MPa'dan 818,55 MPa'a indirgenmiştir. Oluşan kayma gerilmesi ile θ açısı arasındaki ilişki Şekil 9b'de verilmiştir. Şekil 9b'ye göre, en yüksek 455,71 MPa ve en düşük kayma gerilmesinin 208,90 MPa ile sırasıyla $\theta=45^\circ$ ve $\theta=21^\circ$ 'de meydana geldiği görülmektedir. Hasara uğrayan $\theta=30^\circ$ 'lik enjeksiyon yolluk burcu yerine $\theta=21^\circ$ 'lik enjeksiyon yolluk burcu kullanılması durumunda, çatlak oluşumuna neden olan kayma gerilmesi değeri yaklaşık % 41,2 azalarak 355,16 MPa'dan 208,90 MPa değerine düşmektedir.

3. Sonuçlar (Results)

Bu çalışmada, θ açısı 30° olan ve yaklaşık 220°C ısı yükü ve Şekil 6' da belirtilen enjeksiyon yükü altında çalışan yolluk burcu hasar görmüş ve yapılan tasarım iyileştirme ve gerilme analizi çalışmasında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Şekil 1'e göre, 1.2367 sıcak iş takım çeliğinin oda sıcaklığındaki dayanım değerlerinin, yaklaşık 200°C sıcaklık altında yaklaşık %7 mertebesinde düştüğü anlaşılmaktadır.
- Metalografik çalışmalar neticesinde çatlak enjeksiyon kuvvetine paralel yönde geliştiği (şekil 4-b) ve çatlak burcun konik yüzeyinin büyük çapında başladığı ve ilk olarak çatlak ısı işlemle yüksek sertlik kazanmış burç dış yüzeyine doğru ve daha sonra burç iç yüzeyindeki basıncın ve enjeksiyon kuvvetinin tesiriyle de çatlak -Y yönünde ilerlediği sonucuna varılmıştır.
- Yolluk burcu, 7 sn lik periyotta tekrarlayan enjeksiyon yükü ve basıncı altında çalışmakta olup, bu yükleme tipinin dalgalı değişken yükleme olduğu ve değişken yüke maruz kalan burcun hasar gören kesitinde belirgin sertlik değişimi tespit edilmiştir ve bunun da çatlak oluşumunun ilk nedeni olduğu düşünülmektedir.
- Sonlu eleman analizlerinde, yük altında çalışan yolluk burcunda elde edilen bileşke gerilme ve kayma gerilme konsantrasyonlarının konik yüzeyde yoğunlaştığı ve hatta çatlak oluştuğu bölgede maksimum çeki niteliğinde kayma gerilmesinin meydana geldiği görülmüştür (Şekil 8b).
- Yolluk burcunda oluşan gerilmeleri düşürebilmek adına, farklı koniklik açıları çalışılmış olup, çatlak sonucu hasara uğrayan $\theta=30^\circ$ 'li enjeksiyon yolluk burcu yerine $\theta=21^\circ$ 'lik bir enjeksiyon yolluk burcu kullanılırsa oluşacak gerilme değeri yaklaşık 913,43 MPa' dan 818,55 MPa değerine; 455,71 MPa kayma gerilmesi de, 208,90 MPa değerine düşürülmüştür.
- Sonuçta, yolluk burcunda yapılan tasarım iyileştirme ile oluşan bileşke ve kayma gerilmeleri göz önüne alındığında, sırasıyla %10,7 ve % 41,2 mertebesinde düşüş elde edilerek yolluk burcunun dayanımında da bu mertebede iyileştirme kaydedilmiştir. Ayrıca, yolluk burcunun tüm kesitinde homojen sertlik elde edilebilmesi için uygun ısı işlem ortamı ve programı önerilmiştir.
-

Teşekkür (Appreciation)

Bu çalışma, Şekeroğlu Plastik AŞ. AR-GE Merkezi' nde gerçekleştirilmiştir ve katkıları için teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

Alfredsson, B. and Olsson, M. (2003). Inclined standing contact fatigue, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 26, 589-602.

Attaullah, A. (1999). Heat Treatment and Toughness Behavior of Tool Steels (D2 and H13) for Cutting Blades. Master theses of Applied Science Graduate Department of Metallurgy and Material Science University of Toronto, Toronto, ABD.

Bishenden, W. and Bhola, R. (2001). Die temperature control, World of the die casting, 112, 51-62.

González, E.M. (2013). Detection of Failure Mechanisms of Tool Steels by means of Acoustic Emission Technique, PhD Thesis of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Department Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain

Hatman, A. (2009), TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Metal Enjeksiyon Kalıplarından Beklentiler ve Hasar Mekanizmaları, ASSAB Çelik ve Isıl İşlem A.Ş., 28-40.

Højerslev, C. (2001). Tool Steels, Risø National Laboratory, Roskilde, Danka Services International A/S.

Hoyle, G. (1988). High Speed Steels, Butterworths.

Klobcar D., Tusek J. and Taljat B., (2007). Thermal fatigue of materials for die casting tooling, Materials science and engineering, 90, 110-115.

Özgür, İ. (2008). Alüminyum enjeksiyon döküm kalıplarında sıvı metal-kalıp etkileşimine yüzey işlemlerinin etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1-73.

Picas, I., Cuadrado, N., Casellas, D., Goetz, A., Llanes, L. (2010). Microstructural effects on the fatigue crack nucleation in cold work tool steels, Procedia Engineering 2, 1777-1785.

Picas, I. (2012). Mechanical behaviour of tools for shearing Ultra High-Strength Steels: influence of the microstructure on fracture and fatigue micro-mechanisms of tool steels and evaluation of micro-mechanical damage in tools, PhD Thesis of Materials and Metallurgy Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Fundació CTM Centre Tecnològic. Spain.

Pippel, E., Woltersdorf, J., Pöckl, G., Lichtenegger, G. (1999). Microstructure and Nanochemistry of carbide Precipitates in High-Speed Steel S 6-5-2-5, Materials Characterization 43:41-55.

Roberts, A.G., Cary, A.R. (1980). Tool Steels, Fourth Edition, American Society for Metal, Metal Park, Ohio, USA.

Schwingenschlögl, P., Niederhofer, P., Merklein, M. (2019). Investigation on basic friction and wear mechanisms within hot stamping considering the influence of tool steel and hardness, Wear, Volumes 426-427, Part A, Pages 378-389.

Seriapopi, V., Fukumasu, N.K., Souza, R.M., Machad, I.F. (2019). Finite element analysis of the effects of thermo-mechanical loadings on a tool steel microstructure, Engineering Failure Analysis 97, 383-398.

Šolić, S., Podgornik, B., Leskovšek, V. (2018). The occurrence of quenching cracks in high-carbon tool steel depending on the austenitizing temperature, Engineering Failure Analysis 92, 140-148.

Steelselector. (2019). <https://steelselector.sij.si/data/pdf/UTOPM07.pdf>, Son erişim tarihi: 01.04.2019

Vogel, C. et al. (1978). Metallurgi for Ingeniører 6th edit. 1993 Geller, Y. Tool Steels, Mir Publishers Moscow.

Yalçın, B. (2002). Yüksek Hız Çeliğinden İmal Edilmiş Kesici Takımların TiN Kaplanması ve Kaplamanın Takım Performansı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, SDÜ. Fen Bil. Enstitüsü, Makine Eğt. Anabilim Dalı.

Yeşildal, R. (2018). The Effect of Heat Treatments on the Fatigue Strength of H13 Hot Work Tool Steel, Preprints, 1-13.

Yokoi, D., Tsujii N., Fukaura K. (2003). Effects of tempering temperature and stress amplitude on low-cycle fatigue behavior of a cold work tool steel, Materials Science Research International, 9(3), 216-222.