

Gaz ve Düşük Basıncılı Sementasyon Yapılmış Helisel Dişli Çarkların Yorulma Analizi

Serhan GENÇOĞLU¹, Aysel YAZICI²

¹ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Turgutlu-MANİSA

² Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Turgutlu-MANİSA

e-posta: serhangencoglu@hotmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5213-536X>

Sorumlu yazar e-posta: aysel.yazici@cbu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1290-7104>

Geliş Tarihi: 05.04.2020

Kabul Tarihi: 14.12.2020

Öz

Bu çalışmada AISI 8620 ve AISI 5115 çeliklerinden yapılan, modülü 1.5 ve 2 olan helisel dişli çarklara uygulanan gaz sementasyon ve düşük basınçlı sementasyon yüzey sertleştirme ısıl işlemlerinin dişli çarkların yorulma ömrü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yorulma analizi Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD programı kullanılarak yapılmıştır. Helisel dişli çarkların ömür değerleri, yüzey sertleştirme işlemleri sonrasında oluşan sertlik dağılımına bağlı olarak belirlenmiştir. Düşük basınçlı sementasyon işleminin gaz sementasyon işlemine kıyasla, istenen yüzey sertlik ve efektif sert tabaka kalınlığını çok daha kısa işlem sürelerinde sağladığı belirlenmiştir. Dişlilerin ömür değerleri ve hasar yüzdeleri, malzemenin kimyasal içeriği, efektif sert tabaka kalınlığı ve yüzey sertlik değerlerinden etkilenmiştir. AISI 5115 helisel dişli çarklarda 36 Nm tork ve 1400 rpm çalışma değerleri için ömür tur sayıları; ısıl işlem görmemiş dişlide 366,240,718, düşük basınçlı sementasyon yapılmış dişlide 790,471,887, gaz sementasyon yapılmış dişlide ise 720,619,942 tur olarak saptanmıştır. Bu değerler 132 Nm tork ve 212 rpm çalışma değerleri için, AISI 8620 helisel dişli çarklarda sırasıyla 167,327,793 ve 614,293,058 ve 629,203,913 tur olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler

Helisel Dişli Çark; Gaz Sementasyon; Düşük Basıncılı Sementasyon; Çift Sertleştirme; Yorulma Analizi

Fatigue Analysis of Gas and Low-Pressure Carburized Helical Gears

Abstract

In this study, the effect of case hardening treatments such as gas carburizing and low-pressure carburizing on the fatigue life was investigated for helical toothed gears made of AISI 8620 and AISI 5115 steels with modules 1.5 and 2. Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD program was used for the fatigue analysis of the gear wheels. The total life values of the helical gears were determined depending on the hardness distribution that occurs as the result of case hardening treatments. Compared to the gas carburizing, it was found that the low-pressure carburizing process provided the desired surface hardness and effective case depth values within shorter processing times. The total life values and damage percentages of gears were influenced by the chemical content of the material, effective case layer thickness, and surface hardness values. For 36 Nm torque and 1400 rpm operating values in AISI 5115 helical gear wheels, fatigue life cycle was determined as 366,240,718 turns in non-heat-treated gear, 790,471,887 turns in low-pressure carburizing, and 720,619,942 turns in gas carburizing. These values were determined as 167,327,793 and 614,293,058, and 629,203,913 turns for 132 Nm torque and 212 rpm operating values in AISI 8620 helical gears wheels, respectively.

Keywords

Helical Gears; Gas Carburizing; Low Pressure Carburizing; Double Quenching; Fatigue Analysis

1. Giriş

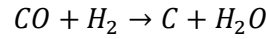
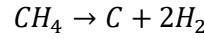
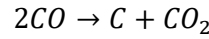
Dişli çarklar makine sistemlerinde hareket ve güç ileten en önemli elemanlardır. Hareket ve güç aktarımında dişli çarklar, yüksek iletim verimliliği, kompakt yapı, dengeli iletim oranı, yüksek güvenilirlik, yüksek dayanıklılık ve bunun gibi birçok avantaja sahiptir (Fernandes *et al.* 2015a, Fernandes *et al.* 2015b). Dişli çarklar hareket-güç aktarımı nedeniyle zor şartlar altında çalışırlar. Dişli çarklar çevrim sürecinde eğilme gerilmesi, temas gerilmesi ve darbe kuvveti gibi çeşitli kuvvetlere maruz kalırlar. Bu yüzden dişli çarklar özellikle çoklu hata formlarına; diş yanı aşınmasına, dökülmeye, aşınmaya, eğilme yorulmasına eğilimlidirler (Dengo *et al.* 2015, Savaria *et al.* 2015).

Dişli çarklarda yorulma davranışı; sertlik, mikro yapı, yapıdaki artık gerilmeler, ve sert tabaka ile çekirdek arasındaki gerilmeler ve gerilmelerin dağılımına bağlı olarak değişir. Bu nedenle dişli çarklarda yorulma davranışı oldukça karmaşık bir konudur. Dişlilerin yüzey sertliğinin artması ve yüzey pürüzlülüğünün azalması, transmisyon verimliliğinin artmasına ve dişli çarkların ömrünün uzamasına imkan sağlamaktadır. Dişli çarkların tasarımında, doğru geometrinin oluşturulmasının yanı sıra uygun malzeme seçimi ve ısıl işlemlerin doğru yapılması dişlilerin sorunsuz çalışabilmesi bakımından önemlidir.

Dişli çarklarda yapılan yüzey sertleştirme ısıl işlemleri sert ve aşınmaya dayanıklı bir yüzey ve tok bir çekirdek sağlar. Sementasyon (karbürleme) yüzey sertleştirme işleminde, düşük karbonlu çelik parçaların yüzeylerine kontrollü ortamlarda ve yüksek sıcaklıkta difüzyon yoluyla karbon emdirilir. Karbonun kolayca nüfuz edebilmesi için çelik östenitik faz sıcaklığı (A_3) üzerinde bir sıcaklıkta (850 °C - 1000 °C) ısıtılır. Sementasyon işlemi sonunda, iş parçası yüzeyinde karbon içeriğinin % 0.80 ila % 0.90 arasında bir değere ulaşması hedeflenir. Yüzeydeki karbon oranı ve difüzyon tabakasının derinliği; ortam sıcaklığı, ortamın karbon oranı ve ürünün ortamda tutulma sürelerine bağlı olarak değişir (Davis 2002). Karbon emilimini takiben parçalar hızla soğutularak, parça yüzeyinde martenzit fazı içeren

bir katman oluşturulur. Sementasyon işlemi malzemenin eğilme, aşınma, burulma ve yorulma dayanımını yükseltir (Krauss 1991). Sementasyon katı, gaz ve sıvı-tuz banyosu ortamlarında yapılabilir.

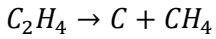
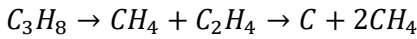
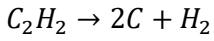
Gaz ortamında sementasyon; atmosferden çelik yüzeyine karbon taşınması, yüzey kimyasal reaksiyonları, metal yüzey tarafından karbonun atmosferden absorbe edilmesi ve absorbe edilen karbon atomlarının çeliğin kütlesine doğru difüzyonu aşamalarını içerir. Karbürizasyon atmosferinde eş zamanlı olarak yaklaşık 180 kimyasal reaksiyonun meydana geldiği tahmin edilmekle birlikte, karbürizasyon atmosferinden çelik yüzeye olan karbon transfer oranını belirleyen üç reaksiyon önemlidir ve bu reaksiyonlar (Collin *et al.* 1972) aşağıda verilmiştir;



Karbürizasyon en hızlı şekilde CO molekülünün ayrışmasıyla devam ederken, reaksiyonların CO_2 gibi yan ürünleri dekarbürizasyon görevi görür. CO_2 çeliğin içindeki karbonu alarak, yüzeyde karbon azalmasına (dekarbürizasyon) sebep olur. Çeliğin genel mukavemetini ve yorulma direncini azaltan dekarbürizasyonu önlemenin bir yolu, CO ve H_2 gibi indirgeyici gazların varlığını korumaktır. O_2 ve CO_2 gibi oksitleyici gazlar dekarbürizasyonu kolaylaştırır (Collin *et al.* 1972).

Sementasyon proseslerinde oluşan karbür tabakasının üniformitesi oldukça zayıftır ve yüzey oksidasyonu ciddi bir sorundur (Ryzhov *et al.*, 2010). Endüstriyel uygulamalarda, gaz sementasyon sonrası oluşan yüzey oksitlenmesinden kurtulmak için taşlama işlemi yapılır. Ancak taşlama işlemi ek bir maliyetin yanı sıra işlenen ürünlere ek gerilmeler yükler. Düşük basınçlı sementasyon; karbür morfolojisi, boyutu, dağılımı, yüzey karbon içeriği ve katman derinliği üzerinde doğru kontrol sağlayan yeni bir teknolojidir ve dişli üretiminde kullanılan

çeşitli çeliklere uygulanır (Gawroński *et al.* 2010, Wang, *et al.* 2019). Düşük basınçlı sementasyon işlemi; vakumlu fırınlarda çok düşük basınç ve yüksek sıcaklıklar altında, hidrokarbon gazlardan yararlanılarak gerçekleştirilir. Düşük basınçlı sementasyon (Low Pressure Carburizing - LPC) için kullanılan hidrokarbon gazları; asetilen (C_2H_2), propan (C_3H_8), ve nadiren bir etilen (C_2H_4) 'dir. LPC de karbon çelik yüzeyine aşağıdaki reaksiyonlar yoluyla iletilir (Davis 2002);



LPC işleminde oksijen bulunmayan bir hidrokarbon gazı kullanıldığından ve fırın haznesi mevcut olabilecek herhangi bir oksijenin giderilmesi için düşük bir basınca (2-20 mbar) pompalandığı için metal oksitlerin oluşumu önlenir (Poor *et al.* 2007). Bu işlemin avantajı; çelik yüzeyinin çok temiz kalması, vakum ortamının karbonu çelik yüzeyine daha hızlı transfer etmesi, ve gaz sementasyon proseslerinde görülen taneler arası ve yüzey oksidasyonun oluşmamasıdır. LPC işleminde oksidasyon tabakasının oluşmaması yüzeyde homojen sertlik dağılımına imkân sağlar. Bu yöntemde proses gazı ortama fasıllı olarak verilir ve gaz verilisinin ardından gazın difüze olması için beklenir. Böylelikle karbonun yüzeyde yoğunlaşması önlenir. Bunun bir sonucu olarak sementasyon derinliği sağlanır ve karbonun iç yapıya difüzyonuna imkan sağlanmış olur. İlave olarak, LPC geleneksel sementasyonla karşılaştırıldığında boyutsal kontrol, düşük çarpılma, öngörülebilir ve yinelenebilir boyutsal kontrol sağlar.

Makine elemanları dinamik yük ve gerilmelere maruz kalırlar. Makine elemanına tesir eden yükler statik olsa bile kesitinde meydana gelen gerilmeler değişken olabilmektedir. Değişken gerilmelerin etkisi altındaki makine elemanlarında, yüklerin maksimum değerleri değil tekrar sayısı önemlidir. Çevrimsel olarak değişen gerilmelerin malzeme iç

yapısında yıpranmalara neden olduğu bilinmektedir. Bunun bir sonucu olarak, kopma olayının statik sınırların çok altında meydana gelebileceği bilinmektedir (Chaush 2008). Teorik olarak malzemenin sonsuz devir sayısında taşıyabileceği yük yorulma dayanımı olarak tanımlanır (Akkurt 2005). Gerilme hali, geometri, malzeme türü, iç kusurların dağılımı ve boyutları, artık gerilmeler, yükleme doğrultusu, tane büyüklüğü ve çevre koşulları yorulmayı etkiler.

Mahakul *et al.* (2020), paslanmaz çelik, Ti-3Al-8 V-6Cr-4Mo-4Zr (SS) kompozit malzeme ve ZnAC41A alaşımından üretilen alın dişlilerde SolidWorks simülasyon yazılımını kullanarak; gerinim, gerilme dağılımı ve yük altında deformasyonun sayısal analizini yapmıştır. Zarzoor *et al.* (2018), alın dişlilerde Solidwork kullanarak yaptıkları eğilme direnci analizleri sonucunda elde ettikleri sonuçların, AGMA metodunu kullanarak yaptıkları teorik hesaplamalarla uyum içerisinde olduğunu bildirmektedir. Solidworks programı; arayüz, iki boyutlu çizimden üç boyutlu geometrik yapı oluşturma, parça modelleme, montajlama ve sonlu elemanlar yöntemine göre yapılan statik analiz gibi modülleri ile kullanışlı, kolay, hızlı ve hatasız uygulama olanakları sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, AISI 8620 ve AISI 5115 helisel dişli çarklara uygulanan gaz sementasyon ve düşük basınçlı sementasyon yüzey sertleştirme işlemlerinin dişli çarkların yorulma ömrü üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Bu amaçla Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD programı kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

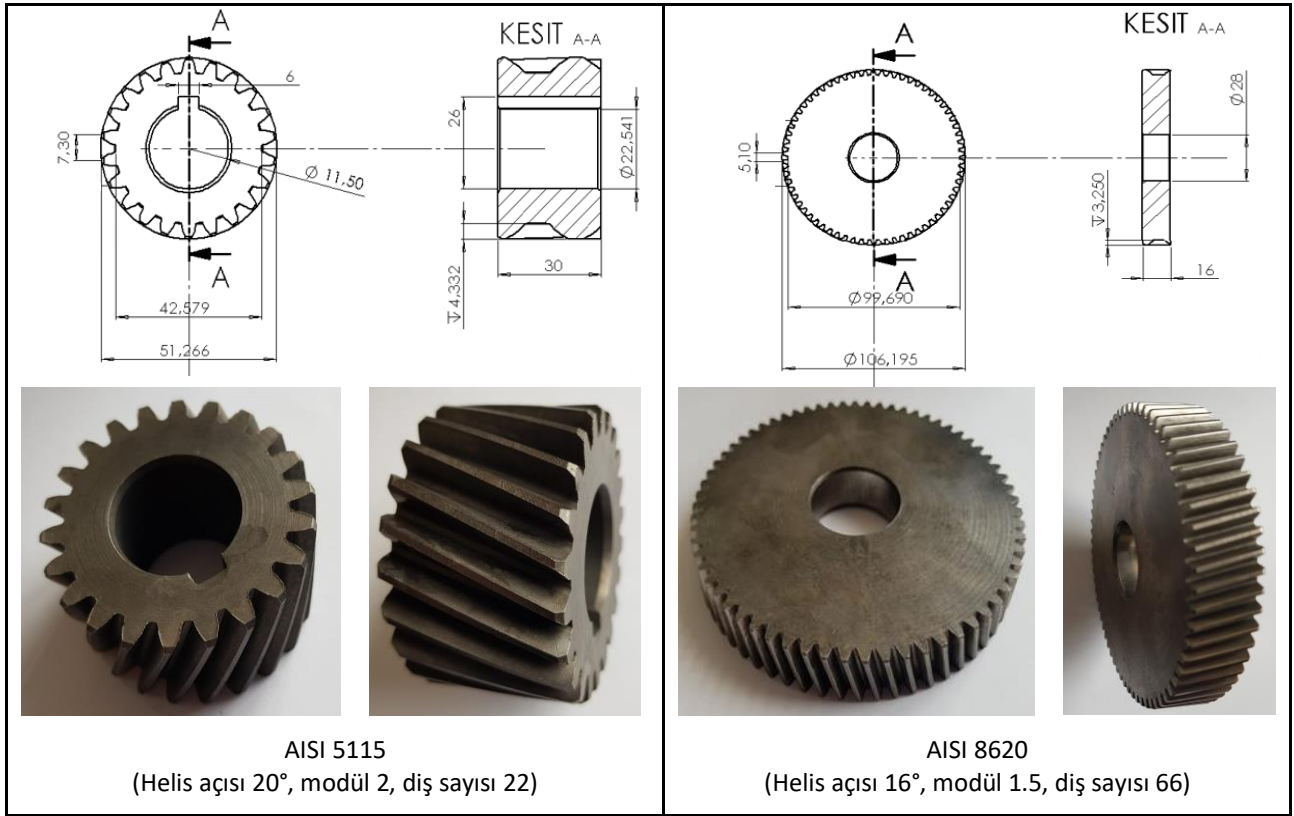
AISI 8620 ve AISI 5115 çelikleri dişli üretiminde yaygın olarak kullanılan sementasyon çelikleridir. Denemeye alınan helisel dişli çark numunelerin kimyasal içerik analizleri Bruker Q4 Tasman metal spektrometre ile yapılmış ve analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Helisel dişli çarklar malzemenin testere ile kesimi, tornada istenen çapa getirilmesi ve azdırma tezgahında dişlerin açılması adımları izlenerek üretilmiştir. Üretilen helisel dişli çarkların boyutları Şekil 1' de verilmiştir.

Denemelerde helisel dişli çarklara uygulanan yüzey sertleştirme ısı işlem koşulları Çizelge 2’ de verilmiştir. Mikroyapı fotoğraf çekimi ve sertlik dağılım profilinin belirlenmesinde, numuneler sırasıyla 80-120-240-400-800-1200-2000 kum SiC kağıtlar ve 6 µm elmas süspansiyon kullanılarak parlatılmıştır. Mikroyapı fotoğraf çekimi için parlatılan numuneler nital 2 (% 98 etil alkol, % 2

HNO₃) ile 10 saniye dağlanmış. Mikroyapı fotoğraflarının çekilmesinde Nikon ECLIPSE MA100 optik mikroskop ve Clemex Vision Lite bilgisayar programı kullanılmıştır. Sertlik değerleri Emcotest Duroscan 20 mikro-sertlik cihazı ile (Şekil 2) 10 N yükün 10 saniye etki ettirilmesiyle Vickers sertlik ölçme yöntemine göre (ASTM 2017) saptanmıştır.

Çizelge 1. Denemeye alınan AISI 8620 ve AISI 5115 çeliklerin kimyasal kompozisyonu (% Fe kalan)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Ti
AISI 8620	0.224	0.242	0.613	0.006	<0.150	0.402	0.223	0.406	0.187	0.034	0.0013
AISI 5115	0.193	0.298	1.106	0.006	<0.150	0.896	0.017	0.081	0.194	0.019	0.0017



Şekil 1. Helisel dişli çarkların boyutları.



Şekil 2. Sertlik ölçme cihazı ve örnek numuneler.

Çizelge 2. Helisel dişli çarklara uygulanan yüzey sertleştirme ısıl işlem koşulları

Isıl İşlem	Sıcaklık, Atmosfer Potansiyeli ve Süre	Sertleştirme Ortamı	Temperleme (Sıcaklık/ Süre)
Düşük Basıncılı Sementasyon (LPC)	Nötral ortamda numune sıcaklıkları 700°C den 900 °C ye 45 dakikada çıkarıldı. Ortam basıncı:700mbar 1.adım: 350ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 15 dakika+ 2. adım: 100ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 10 dakika + 3.adım (3 kez): 80ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 10 dakika + Sertleştirme için numune sıcaklığı 860°C ye indirilmiştir.	Yağ / 70°C	200 °C / 120 dakika
Sementasyon	960°C, 1.35% C, 2 h + 960°C, 0.75 % C, 1 h + 820°C, 0.75%C, 1 h	Yağ /100 °C	170 °C / 120 dakika
Sementasyon (çift sertleştirme-double quenching-DQ)	1. Sertleştirme 960°C, 1.35% C, 2 h + 960°C, 0.75 % C, 1 h + 820°C, 0.75%C, 1 h 2. Sertleştirme 925 °C, 1.20%C, 1 h 40 dakika+ 925 °C, 0.75%, 30 dakika+ 860 °C, 0.75% C, 30 dakika	Yağ /100°C	170 °C / 120 dakika
		Yağ/ 60 °C	160 °C / 70 dakika

Yorulma analizlerinin yapılmasında, Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD programında öncelikle katı model oluşturulmuş, Toolbox'da ANSI Metrik formunda bulunan dişli çarklar bölümünden helisel dişli seçilmiş, analizi yapılacak numunelerin diş sayıları, modülleri, diş açıları ve dişli boyutları girilerek katı modeller oluşturulmuştur. Farklı yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda meydana gelen sert tabaka derinlik değerlerinden yararlanılarak katı modellere kabuklar oluşturulmuş ve katı model ile birleştirmeleri yapılmıştır (Şekil 3). Sementasyon işlemleri sonrası malzeme yüzeyinde oluşan efektif

sert tabaka kalınlığının belirlenmesinde $\frac{1}{2}$ diş yüksekliğinde sertliğin 50 HRC \approx 513 HV değerine düştüğü mesafe esas alınmıştır (ANSI/AGMA 2004). Efektif sert tabaka kalınlığı boyunca elde edilen sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak elde edilen ortalama Vickers sertlik (HV) değerleri Pavlina ve Tyne' nin (2008) geliştirdiği denklem (1)'de yerine konularak, kabuklar için tanımlanması gereken akma gerilmesi değerleri MPa cinsinden bulunmuştur.

$$Akma Gerilmesi = - 90.7 + 2.876 \cdot HV \quad (1)$$

Oluşturulan kabuklar için ortalama akma gerilme değerleri esas alınmıştır ve malzeme kabuk özellikleri Solidworks malzemeler bölümünde güncellenmiştir. Aynı yaklaşım kabuk altındaki kısımların ortalama sertlik ve akma gerilme değerlerinin belirlenmesinde gösterilmiştir. Numunelerin analizini gerçekleştirmek için çalışacakları eş dişlileri oluşturularak montajla birleştirilmiştir. Eş dişli kabuk malzemelerinin gerilme değerleri de numunelerde olduğu gibi güncellenerek dişli grubu montajı tamamlanmıştır. Yapılan dişli grup montajlarında eş dişlilerin göbeklerine sabitleme ve döner mafsal özelliği atanmıştır. Redüktör içerisinde çalışan bu dişliler için tork değeri ve devir sayısı olarak, redüktör üreticisi firmanın verdiği devamlı çalışma değerleri kullanılmıştır (Çizelge 3). Dişlilerin devamlı çalışma tork değerleri statik analizde saat yönünde etki ettirilerek yükleme işlemi yapılmıştır. Katı modelleme kalitesini değerlendirmek için en temel ve en doğru yöntem, kaba mesh ile başlayıp yüksek hata oranlarını görerek sınır koşulları hakkında bilgi sahibi olmak, sonra mesh boyutunun belirli oranlarda küçültülerek ince mesh ile önceki gerilme değerinin karşılaştırılmasıdır. Gerilme değerinin bir önceki ile bir sonraki oran arasındaki değişimin çok az olduğu eleman boyutu yeterli mesh boyutunu verecektir. Katı modellemeler üzerinde yapılan mesh yakınsamaları sonucu elde edilen grafik incelendiğinde (Şekil 4) mesh aralığının maksimum 5 mesh boyutunda olmasının uygun olduğu saptanmıştır. Oluşturulan dişli montaj gruplarının yüklemeleri yapıldıktan sonra mesh oluşturma bölümünden; maksimum mesh aralığı 5 mm, minimum mesh aralığı 1 mm ve mesh ölçüm oranı 1.6 olacak şekilde mesh parametreleri girilerek mesh işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3). Statik analiz yapılarak bulunan sonuçlar ile yorulma analizine geçilmiştir. Solidworks programında yorulma analizi modülü, belirtilen sınır koşullarda (yükleme, malzemenin akma gerilmesi, deformasyon miktarı vb.) çalışan elemanın analizini gerçekleştirir. Belirlenmiş bir katı modellemede yorulma analizi sonucu hasarın görülebilmesi için; yükleme türü, döngü sayısı, malzeme türü ve gerilim

dalgalanmaları bilgileri gereklidir. Belirli bir malzeme türüne yönelik gerekli bilgi, S-N eğrisi tarafından sağlanır. Yapılan çalışmada AISI 8620 ve AISI 5115 dişlileri için ayrı ayrı yorulma analizi etütleri açılarak ısıl işlem görmemiş dişlilere ait katı modellemelerin statik analizleri etüde eklenmiştir. Isıl işlem görmemiş dişlilere ait yorulma analizi S-N eğrisi seçimi veri tabanındaki "Karbonlu Çelik" modülünde yapılmıştır. Isıl işlem gören AISI 8620 ve AISI 5115 dişlilerinde her bir ısıl işlem metodu için ayrı ayrı yorulma analizi etütleri açılarak ısıl işlem görmemiş dişlilere ait statik analizler etüde eklenmiştir. Isıl işlem gören numunelerin ölçüm derinliğine (sert tabaka kalınlığı) göre hesaplanan gerilme değerleri S-N eğrisi veri tablosunda kullanılarak her bir ısıl işlem türü için S-N eğrisi tanımlanmıştır. Böylece program, girilen veriler ile doğrusal bir interpolasyon yaparak hesaplama gerçekleştirecektir. Diğer bir sınır koşulu yüklemeyi ve program bu yüklemeyi devir sayısı olarak almaktadır. Analiz sonucunda her bir ısıl işlem görmüş dişli için hata yüzdesi %100 olana kadar yükleme devir sayısı değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Elastisite modülü ve poisson oranı çelik olarak Solidworks kütüphanesinden kullanılmıştır.

Çizelge 3. Dişli çarkların çalışma değerleri

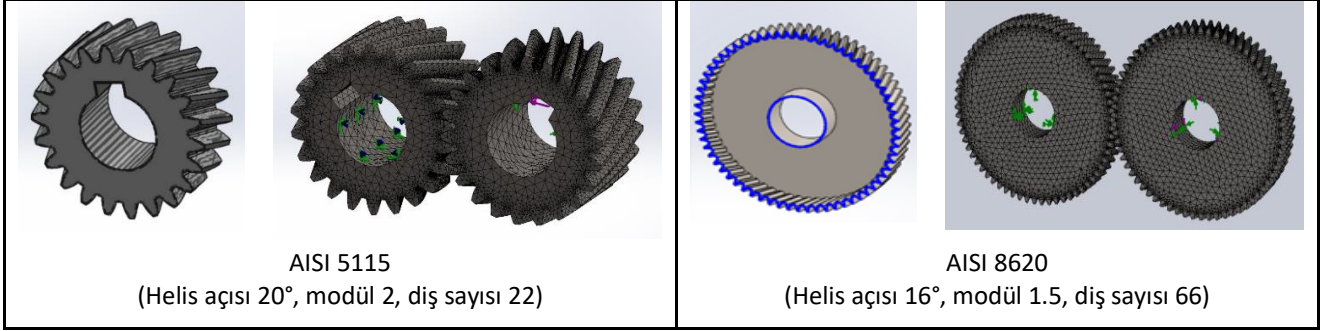
Dişli Çark	Tork (Nm)	Devir Sayısı (rpm)
AISI 5115	36	1400
AISI 8620	132	212

3. Bulgular

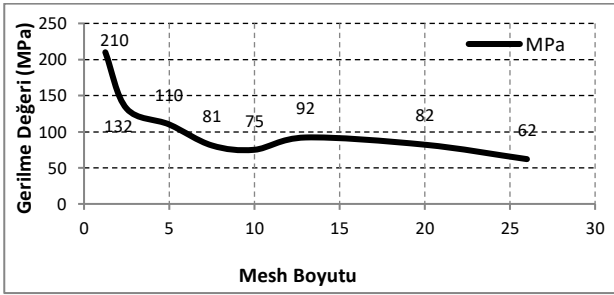
Numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5' de verilmiştir. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunelerde mikroyapı temperlenmiş martenzittir; yüzey karbonca zengin martenzit ve bir miktar artık östenitden oluşmaktadır. Isıl işlem görmemiş numunelerde yapı perlit ve ferritten oluşmaktadır. Sementasyon yapılmış dişlilerde istenen yüzey sertlik değeri, kalite 2 ve kalite 3 dişliler için 58-64 HRC' dir (ANSI/AGMA 2004). Yüzey sertleştirme işlemleri sonrası, incelenen dişli çark numunelerin ½ diş yüksekliğinde yüzeyden merkeze doğru sertlik dağılım değerleri Çizelge 4' de, bu sertlik değerlerine karşılık gelen akma gerilme değerleri Çizelge 5' de verilmiştir.

Statik analizler sonucunda elde edilen von Mises akma gerilme değerleri Çizelge 6' da, ısıtılmış helisel dişlilerin von Mises gerilme dağılımı ve von Mises maksimum gerilme bölgesi Şekil 6' te verilmiştir. Kabuk ve kabuk altı bölgeler için ortalama sertlik değerlerine karşılık gelen akma gerilme değerleri girilerek yapılan yorulma analizleri

sonucunda elde edilen ömür-tur sayıları Çizelge 7' de, redüktör üreticisi firmanın verdiği devamlı çalışma koşulları dikkate alınarak hesaplanan ömür-saat değerleri Çizelge 8' de, hasar yüzdeleri ise Çizelge 9 ve Çizelge 10' da verilmiştir. Ömür ve % hasar değerlerinin belirlenmesinde akma sınırı esas alınmıştır.



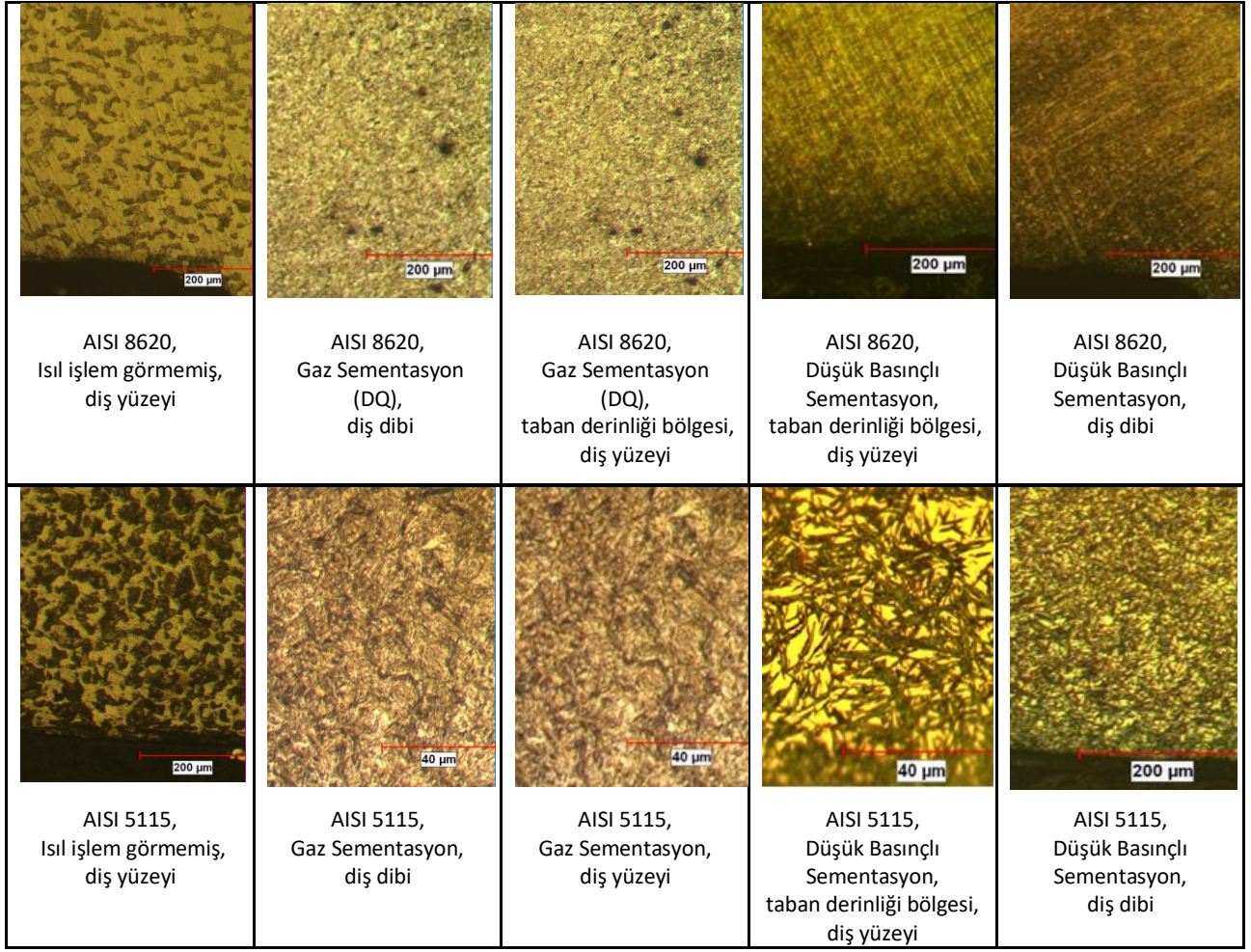
Şekil 3. Helisel dişli çarklar için oluşturulan kabuğun katı model montajı ve mesh görüntüleri.



Şekil 4. Katı modellemelerin yakınsama eğrisi.

Çizelge 4. Isıl işlem sonrası elde edilen sertlik değerleri (HV₁)

½ diş Yüksekliğinde Yüzeyden Uzaklık (mm)	AISI 5115 Helisel Dişli			AISI 8620 Helisel Dişli		
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
0.10	196	761	697	197	769	747
0.30	195	750	628	207	739	734
0.60	202	690	574	192	694	702
0.80	202	610	512	185	589	680
1.00	197	534	464	173	439	612
1.20	189	475	416	178	366	569
1.40	198	436	378	185	324	519



Şekil 5. Numunelerin mikroyapı fotoğrafları.

Çizelge 5. Sertlik değerlerine bağlı olarak hesaplanan akma gerilme değerleri (MPa)

½ diş Yükseğinde Yüzeyden Uzaklık (mm)	AISI 5115 Helisel Dişli			AISI 8620 Helisel Dişli		
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
0.10	472.9	2097.9	1913.8	475.8	2120.9	2057.6
0.30	470.1	2066.3	1715.4	504.6	2034.6	2020.2
0.60	490.2	1893.7	1560.1	461.4	1905.2	1928.2
0.80	490.2	1663.6	1381.8	441.3	1603.2	1864.9
1.00	475.8	1445.1	1243.7	406.8	1171.8	1669.4
1.20	452.8	1275.4	1105.7	421.2	961.9	1545.7
1.40	478.7	1163.2	996.4	441.3	841.1	1430.7

Çizelge 6. von Mises akma gerilme değerleri (MPa)

AISI 5115 Helisel Dişli			AISI 8620 Helisel Dişli		
Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
475.87	1833.34	1642	450.39	1810.33	1788.14

Çizelge 7. Dişlilerin ömür-tur sayısı

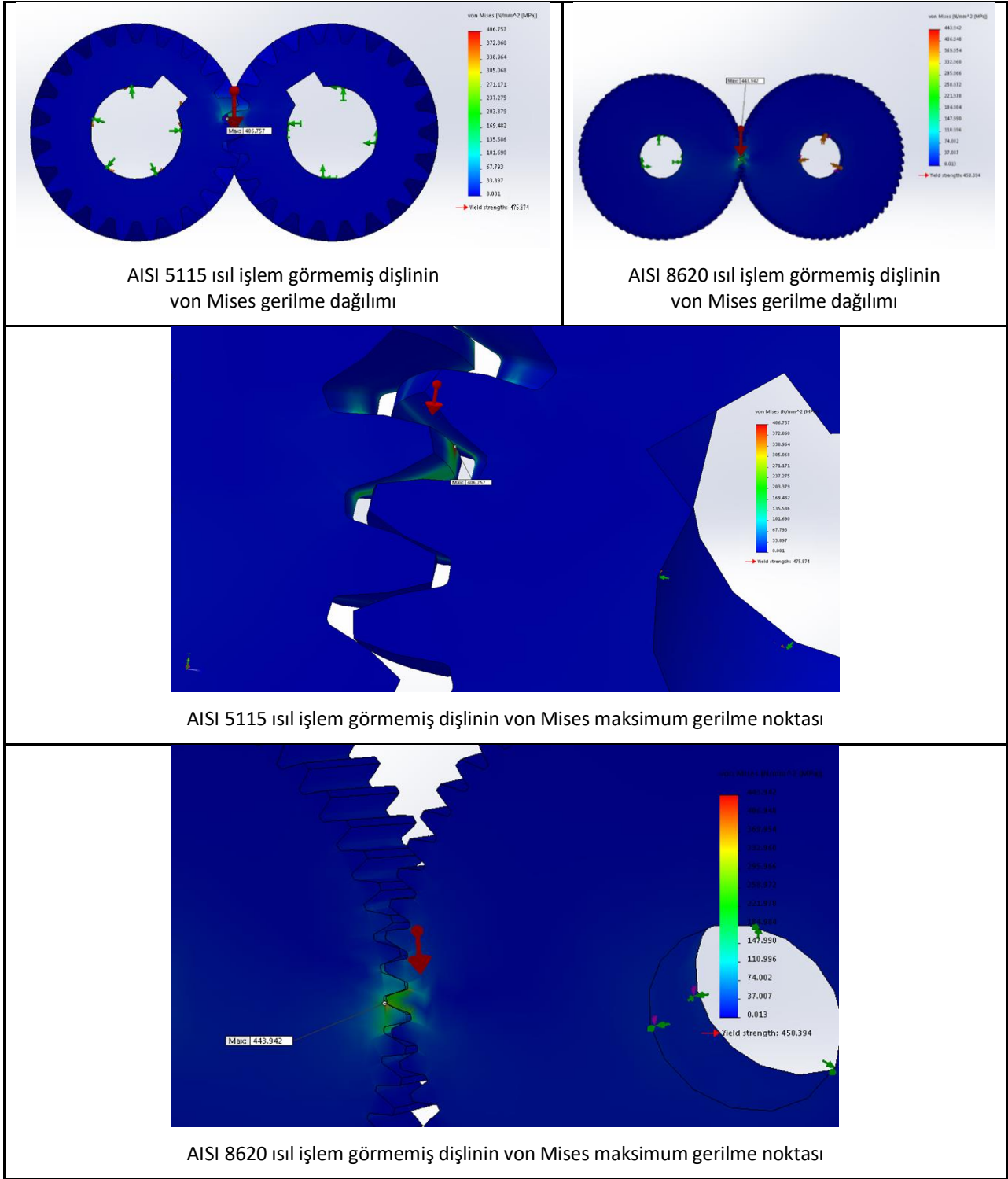
AISI 5115 Helisel Dişli (Tork: 36 Nm, 1400 rpm)			AISI 8620 Helisel Dişli (Tork: 132 Nm, 212 rpm)		
Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
366,240,718	790,471,887	720,619,942	167,327,793	614,293,058	629,203,913

Çizelge 8. Dişlilerin ömür-saat değerleri

AISI 5115 Helisel Dişli (Tork: 36 Nm, 1400 rpm)			AISI 8620 Helisel Dişli (Tork: 132 Nm, 212 rpm)		
Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
4360	9410.4	8578.8	13154.7	48293.4	49465.7

Çizelge 9. AISI 5115 helisel dişliler için yorulma analizi sonucunda elde edilen % hasar değerleri

Tur Sayıları	AISI 5115 Helisel Dişli (Tork: 36 Nm, 1400 rpm)		
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon
1,000,000	0.273	0.126	0.138
5,000,000	1.365	0.632	0.693
10,000,000	2.730	1.265	1.387
20,000,000	5.460	2.530	2.775
50,000,000	13.652	6.325	6.938
100,000,000	27.304	12.650	13.876
250,000,000	68.261	31.626	34.692
366,240,718	100.0	46.331	50.823
500,000,000	-	63.253	69.384
642,473,148	-	81.277	89.155
720,619,942	-	91.163	100.0
790,471,887	-	100.0	-



Şekil 6. Isıl işlem görmemiş helisel dişlilerin von Mises gerilme dağılımı ve von Mises maksimum gerilme bölgesi.

Çizelge 10. AISI 8620 helisel dişliler için yorulma analizi sonucunda elde edilen % hasar değerleri

Tur Sayıları	AISI 8620 Helisel Dişli (Tork: 132 Nm, 212 rpm)		
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
1,000,000	0.597	0.162	0.158
5,000,000	2.988	0.813	0.794
10,000,000	5.976	1.627	1.589
20,000,000	11.952	3.255	3.178
50,000,000	29.881	8.139	7.946
100,000,000	59.762	16.278	15.893
167,327,793	100.0	27.239	26.593
250,000,000	-	40.697	39.732
353,070,263	-	57.475	56.113
500,000,000	-	81.394	79.465
614,293,058	-	100.0	97.630
629,203,913	-	-	100.0

4. Tartışma ve Sonuç

Dişliler için istenen yüzey sertlik değerleri yapılan LPC ve gaz sementasyon işlemleri ile sağlanmıştır (Çizelge 4). Efektif sert tabaka kalınlığı (sertliğin 50 HRC \approx 513 HV değerine düştüğü mesafe), AISI 5115 çeliğinden yapılan helisel dişli çarklar için gaz sementasyonda 0.8 mm, LPC işleminde ise 1.05 mm olmuştur. Bu değer-AISI 8620 helisel dişlileri için, gaz sementasyon işleminde (iki kez sertleştirme-DQ) 1.4 mm, LPC işleminde ise 0.9 mm olmuştur. Sert tabaka kalınlığı dişlinin temas ve kırılma direncini etkileyen önemli bir parametredir. Yeterli kalınlıkta sert tabaka kalınlığının elde edilmesi, dişlinin temas direncinin geliştirilmesi bakımından önemlidir (Gençoğlu and Yazıcı, 2020). Ancak diğer yandan gereğinden yüksek sert tabaka kalınlığının diş çatlaması / kırılması problemlerine neden olabileceği unutulmamalıdır.

ANSI/AGMA (2004)' e göre, sementasyon yapılan dişlilerde ve normal kabuk kalınlığı durumunda, bitirme işlemleri sonrası önerilen minimum efektif

sert tabaka kalınlığı (he_{min}) değeri aşağıda verilen (2) numaralı ampririk denkleme göre hesaplanabilir. Sert tabaka kalınlığı, diş temas yükleri ve diş dibi gerilme bantlarının neden olduğu kesme gerilmeleri karşılayabilmek için yeteri kalınlıkta olmalı, ancak çekirdekte yüksek kalıntı çekme gerilmeler ve kırılğan diş uçlarına neden olacak yüksek kalınlıkta da olmamalıdır. Optimum efektif sert tabaka kalınlığı, daha düşük sert tabaka kalınlığında çukurlaşma eğilimi ile daha yüksek sert tabaka kalınlığında diş çatlaması / kırılması arasında hassas bir denge sağlar (ANSI/AGMA 2004). Ancak ANSI/AGMA (2004)' e göre standartta önerilen değerler sadece bir kılavuz olarak kullanılabilir ve bu değerler dişli müşterisi ile üretici firma arasında bir anlaşma konusu olabilir. Dişlilerde maksimum performans sağlayabilmek için; uygulama, yükleme ve üretim proseslerinde detaylı çalışmalar yapılmalı ve efektif sert tabaka kalınlığı dikkatle seçilmelidir.

$$he_{min} = 0.119935 \times Pnd^{*-0.86105} \quad (2)$$

* Pnd: Bölüm dairesi çapının her bir inch' lik bölümüne düşen diş sayısını gösterir ve birimi (1 / inch) dir.

Sementasyonla elde edilen sert tabaka kalınlığı işlem sıcaklığına ve süreye bağlı olarak artmaktadır. Yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde elde edilen efektif sert tabaka kalınlık değerleri önerilen h_{min} değerini sağlamıştır. LPC işlemi gaz sementasyona kıyasla, dişlilerde istenen yüzey sertlik ve minimum efektif sert tabaka kalınlığı değerlerini çok daha kısa işlem sürelerinde sağlamıştır. Düşük basınçlı sementasyon (LPC) işleminde, proses gazının ortama fasıllı olarak verilmesi ve difüzyon süreci C konsantrasyonunun yüzeyde yoğunlaşmasını önleyerek sementasyon derinliğinin oluşumuna ve C' nun iç yapıya difüzyonuna olanak sağlar. Gaz sementasyonda yüzeyde aşırı karbon konsantrasyonu kalıntı östenit oranını artırır ve bu da sertliği bir miktar düşürür. Ramasamy et al. (2019), SAE 8620 ve 20CrMo malzemelerinden üretilen dişli çarklara yapılan sementasyon işlemlerinde, yapıda artık östenite oranının azalmasının yorulma direncini iyileştirdiğini bildirmektedir. Yüksek sıcaklıklarda uzun işlem sürelerinin; bir yandan sert tabaka derinliğini arttırırken, diğer yandan tane büyüklüğünü ve taneler arası oksitlenmeyi arttırması (özellikle Mn, Cr ve Si içeren alaşımlarda), ve yine kalıntı gerilmelerin profilinin değişimine neden olmasının bir sonucu olarak, dişlinin temas ve eğilme yorulma direncini olumsuz olarak etkilediği bildirilmektedir (ANSI/AGMA 2004, Errichello and Milburn, 2020). Tanelerin kabalaşması yük taşıma kapasitesini olumsuz etkiler (ANSI/AGMA 2004, Tobie et al. 2017).

Yorulma analizleri sonucu hesaplanan dişlilerin ömür değerleri ve hasar yüzdeleri; malzemenin kimyasal içeriği, dişlilerin çalışma tork ve devri, yüzey sertleştirme ısıl işlemi sonucunda elde edilen efektif sert tabaka kalınlığı ve yüzey sertlik değerlerine bağlı olarak değişmiştir (Çizelge 7 - 10). Çizelge 7 - 10' dan görüleceği üzere, her bir dişli malzeme grubu kendi içerisinde değerlendirildiğinde, sertlik ve efektif sert tabaka kalınlığının artmasıyla ömür- tur sayılarının arttığı ve % hasar oranlarının düştüğü görülmektedir. AISI 5115 çeliğinden yapılan dişlilerde, ömür değerlerinin LPC işleminde gaz sementasyona kıyasla arttığı, hasar yüzdelerinin azaldığı

belirlenmiştir. AISI 8620 helisel dişli çarklarda çift sertleştirme yapılan gaz sementasyon işleminde elde edilen efektif sert tabaka derinliğindeki artış (Çizelge 4) ömür-tur sayısını arttırıcı etki sağlamıştır. Ancak bu ısıl işlem prosesinde, işlem süresinin LPC işlem süresinin yaklaşık yedi katı bir değerde olduğu (Çizelge 2) göz ardı edilmemelidir. Yüksek sıcaklıklarda işlem sürelerinin uzaması bir yandan enerji tüketim maliyetlerini arttırırken, diğer yandan dişlinin ömrü üzerinde olumsuz etki yapabilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda uzun işlem sürelerinin neden olacağı tane büyüklüğündeki artış, taneler arası oksitlenme, artık gerilmelerin değişiminin temas ve eğilme yorulma direnci üzerindeki etkileri ve gereğinden yüksek sert tabaka kalınlığının neden olabileceği sorunlar ancak mekanik yorulma testleri ile ortaya konulabilir. Bu tür simülasyon çalışmalarının bu bağlamda kısıtlamalar içerdiği unutulmamalıdır.

Gaz ve düşük basınçlı sementasyon yüzey sertleştirme ısıl işlemlerinin AISI 8620 ve AISI 5115 helisel dişli çarkların yorulma ömrüne etkilerinin incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

-Yapılan gaz ve düşük basınçlı sementasyon yüzey sertleştirme işlemlerinin sonucunda elde edilen efektif sert tabaka kalınlık değerleri, dişliler için yeterli temas ve kırılma direncini sağlayacak asgari değer üzerinde.

-Düşük basınçlı sementasyon işleminin gaz sementasyon işlemine kıyasla istenen yüzey sertlik ve efektif sert tabaka kalınlığını çok daha kısa işlem sürelerinde sağladığı belirlenmiştir. Isıl işlem süresinin kısılması enerji tasarrufuna ve dişlinin ömrünün uzamasına imkan sağlar.

-Dişlilerin ömür-tur sayıları, yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda elde edilen yüzey sertliği ve sert tabaka kalınlığının artmasıyla artmıştır. Yüzey sertliği ve sert tabaka kalınlığındaki artış % hasar oranlarının azalmasına neden olmuştur.

Teşekkür

Yazarlar deney numunelerinin temini konusunda her türlü imkan ve desteği sağlayan Ege Redüktör Firmasına, numunelerin yüzey sertleştirme işlemlerinin yapılmasında destek veren Batı Isıl İşlem Firmasından Sayın Elif Kınalı Numanoğlu' na ve Akademi Metalurji Firmasından Sayın Levent Altuntaş' a teşekkür eder.

5. Kaynaklar

Akkurt, M., 2005. Makine Elemanları. Cilt I, Birsen Yayınevi, 21.

ANSI/AGMA 2001-D04, 2004. American National Standard, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth. American Gear Manufacturers Association, USA.

ASTM E92-17, 2017. Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. ASTM International, USA.

Collin, R., Gunnarson, S. and Thulin, D., 1972. Mathematical model for predicting carbon concentration profiles of gas-carburized steel. *Journal of the Iron and Steel Institute*, **210** (10), 785-789.

Davis, J. R., 2002. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics, ASM International, Materials Park, 91.

Dengo, C., Meneghetti G., Dabalà M., 2015. Experimental analysis of bending fatigue strength of plain and notched case-hardened gear steels. *International Journal of Fatigue*, **80**, 145-161.

Errichello, R., Milburn, A., 2020. Optimum Carburized and Hardened Case Depth. *Gear Technology*, 58-65.

Fernandes, C.M.C.G., Marques P.M.T., Martins, R.C. and Seabra J. H.O., 2015a. Gearbox power loss. part II: friction losses in gears. *Tribology International*, **88**, 309-316.

Fernandes, C.M.C.G., Battez A.H., González R., Monge R., Viesca J.L., García A., Martins R.C. and Seabra J.H.O., 2015b. Torque loss and wear of fzg gears lubricated with wind turbine gear oils using an ionic liquid as additive. *Tribology International*, **90**, 309-316.

Gawroński, Z., Malasiński, A. and Sawicki, J., 2010. Elimination of galvanic copper plating process used in

hardening of conventionally carburized gear wheels. *International Journal of Automotive Technology*, **11**, 127-131.

Gençoğlu, S., Yazıcı, A., 2020. Surface Characteristics and Distortion Analysis of the Case-Hardened Helical Gears: A Comparison of Different Case-Hardening Treatments. *Transactions of The Indian Institute of Metals*, **73** (1): 119-126.

Krauss, G., 1991. Metals Handbook. ASM International, Metals Park, OH, 363-375.

Mahakul, R., Thatoi, D. N., Choudhury, S., Patnaik, P., 2020. Design and numerical analysis of spur gear using SolidWorks simulation technique. *Materials Today: Proceedings* (Article in press, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.554>)

Pavlina, E.J. and Van Tyne C.J., 2008. Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **17** (6), 888-893.

Poor, R.P., Barbee, W. and Brug, J.E., 2007. Furnace for vacuum carburizing with unsaturated aromatic hydrocarbons. US Patent No. 7,267,793 B2, United States Patent Application Publication, 1-14.

Ramasamy, R., Sivathanu, S., Neelakandan, V., Ganesan, T., Rao, P.C., 2019. Influence of Retained Austenite on Fatigue Performance of Carburized Gears. SAE Technical Paper 2019-28-0102.

Ryzhov, N.M., Fakhurtdinov, R.S. and Smirnov, A.E., 2010. Cyclic strength of steel 16Kh3NVFBM-Sh (VKS-5) after vacuum carburizing. *Metal Science and Heat Treatment*, **52**, 61-66.

Savaria, V., Monajati H., Bridier F. and Bocher P., 2015. Measurement and correction of residual stress gradients in aeronautical gears after various induction surface hardening treatments. *Journal of Materials Processing Technology*, **220**, 113-123.

Wang, H., Wang, B., Wang, Z., Tian, Y., Misra, R. D. K., 2019. Optimizing the low-pressure car-burizing process of 16Cr3NiWMoVNB gear steel. *Journal of Materials Science and Technology*, **35**(7):1218-1227.

Tobie, T., Hippenstiel F. and Mohrbacher H., 2017.

Optimizing gear performance by alloy modification of carburizing steels. *Metals*, **7** (10),415-475.

Zaroor, A.K., Almuramady, N. and Hussein E. S., 2018. Stress Analysis for Spur Gears Using Solid Works Simulation, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, **9** (11), 927-936.

İnternet kaynakları

- 1- Chaush, Y., 2008. ANSYS Workbench ile Yorulma Analizi, Bitirme Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü.
http://ansys.deu.edu.tr/wp-content/uploads/cmdm/348/1450272307_Yorulma-WB.pdf, (13.12.2020)