

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**FARKLI ISIL İŞLEMLERİN AISI 8620 VE AISI 5115 ÇELİK DİŞLİ
ÇARKLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Serhan GENÇOĞLU

**Danışman
Doç. Dr. Aysel YAZICI**



MANİSA-2019

Serhan
GENÇOĞLU

**FARKLI ISIL İŞLEMLERİN AISI 8620 VE AISI 5115 ÇELİK DİŞLİ
ÇARKLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

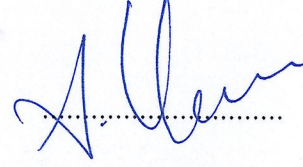
2019

TEZ ONAYI

Serhan GENÇOĞLU tarafından hazırlanan " Farklı Isıl İşlemlerin AISI 8620 ve AISI 5115 Çelik Dişli Çarkların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi " adlı tez çalışması 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

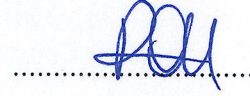
Danışman

Doç. Dr. Aysel YAZICI
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



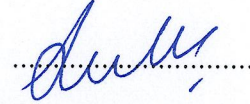
Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Recep Onur UZUN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Ege Anıl DİLER
Ege Üniversitesi



TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Serhan GENÇOĞLU



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER DİZİNİ.....	II
KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Çeliklerde Yapılan Yüzey Sertleştirme İşlemleri.....	3
2.1.1. Sementasyon.....	3
2.1.1.1. Gaz Sementasyon.....	4
2.1.1.2. Düşük Basıncılı Sementasyon (LPC)	7
2.1.2. Nitrüleme.....	8
2.1.2.1. Plazma Nitrüleme	12
2.2. Sertlik	14
2.3. Yüzey Pürüzlülük Özellikleri.....	15
2.4. Isıl İşlemler Sonrası Dişli Çarklarda Boyutsal Değişim	16
2.5. Metalografi	17
2.6. Dişli Çarklarda Yorulma	17
3. MATERYAL VE METOT	19
3.1. Materyal.....	19
3.2. Metot	22
3.2.1. Yüzey Sertleştirme Yöntemleri	22
3.2.2. Sertlik Dağılım Profiline Belirlenmesi.....	22
3.2.3. Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Belirlenmesi.....	23
3.2.4. Dişlilerde Boyutsal Değişimlerin Belirlenmesi	23
3.2.5. Metalografi Deneyleri.....	24
3.2.6. Yorulma Analiz Metodu	24
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	28
4.1. Sertlik Dağılımı	28
4.2. Yüzey Pürüzlülük Değerleri.....	31
4.3. Isıl İşlem Sonrası Dişli Çarklarda Meydana Gelen Boyutsal Değişimler	32
4.4. Mikroyapı Fotoğrafları	33
4.5. Yorulma Analizleri.....	38
4.5.1. AISI 5115 Dişlisi için Yorulma Analizi	38
4.5.2. AISI 8620 Dişlisi için Yorulma Analizi	44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	54

SİMGELER DİZİNİ

A₃	Fe-C denge diyagramında ötektoid altı çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığı
Ac₁	Fe-C denge diyagramında ötektoid reaksiyon sıcaklığı
C	Karbon
CH₄	Metan
C₂H₂	Asetilen
C₂H₄	Etilen
C₃H₈	Propan
CO	Karbonmonoksit
CO₂	Karbondioksit
Cr	Krom
d_a	Diş üstü çapı
d_f	Diş dibi çapı
Fe	Demir
Fe₃C	Sementit
FeO	Demir (II) Oksit
h	Saat
H₂	Hidrojen Gazı
HNO₃	Nitrik Asit
H₂O	Su Buharı
k	Sementasyon sıcaklığına bağlı sabit
KCN	Potasyum Siyanür
m_n	Normal modül
m_t	Alın modülü
mbar	milibar
Mn	Mangan
N	Azot
N₂	Azot Gazı
NaCN	Sodyum Siyanür
NH₃	Amonyak

Nm	Newtonmetre
O₂	Oksijen Gazı
P_n	Normal diş adımı
P_t	Dişli alın adımı
Ra	Aritmetik ortalama pürüzlülüğü
Rz	Maksimum pürüzlülük derinliği
Rq	Kuadratik ortalama pürüzlülüğü
rpm	Revolutions per minutes (dakikadaki devir sayısı)
s	Saniye
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
X	Sementasyon derinliği
z	Diş sayısı
z_i	İdeal diş sayısı
α- Fe	Ferrit (hacim merkezli kübik kristal)
γ -Fe	Kalıntı östenit faz (yüzey merkezli kübik kristal)
γ' nitrit	Fe ₄ N
ε nitrit	Fe ₂₋₃ N
µm	Mikrometre (uzunluk birimi)

KISALTMALAR DİZİNİ

AGMA	American Gear Manufacturers Association (Amerikan Dişli Üreticileri Birliđi)
AISI	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
DQ	Double Quenching (Çift Sertleştirme)
HB	Brinell Sertliği
HRC	Rockwell Sertliği
HV	Vickers Sertliği
LPC	Low Pressure Carburising (Düşük Basınçlı Sementasyon)
LPG	Liquified Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
MQ	Genel Endüstriyel Uygulamalar ve Orta Düzey Güvenirlilik Gereksinimi
ME	Yüksek Güvenirlilik Gereksinimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Nitrülenmiş tabakaların oluşumu	8
Şekil 2.2. Demirde ϵ ve γ nitritlerin çekirdeklenmesinin gösterimi	9
Şekil 2.3. Demir-azot denge diyagramı.....	10
Şekil 2.4. Demir-azot denge diyagramı zamana bağlı olarak nitrürasyon derinliği.....	10
Şekil 2.5. Alaşım elementlerinin çeliğin nitrürasyon sonrası sertliğine etkisi	11
Şekil 2.6. Alaşım elementlerinin 400 HV sertlik değerinde ölçülen nitrürasyon derinliğine etkisi (Nitrürasyon işlemi 520 °C de 8 saat süreyle yapılmıştır)	11
Şekil 2.7. Plazma nitrürasyon tertibatının şematik gösterimi	13
Şekil 2.8. Plazma nitrürleme mekanizması (Kobel'in modeli)	13
Şekil 2.9. Yüzey pürüzlülük değerlerinin şematik gösterimi	16
Şekil 2.10. Dişli çarkta gerilmelerin şematik dağılımı.....	18
Şekil 2.11. Dişlilerde yorulma kırılması	18
Şekil 3.1. Dişli çark üzerinde boyutların gösterimi.....	19
Şekil 3.2. AISI 8620 dişlisinin teknik resmi	21
Şekil 3.3. AISI 5115 dişlisinin teknik resmi	21
Şekil 3.4. Sertlik ölçme cihazı ve numune	23
Şekil 3.5. Dişli çarklarda ısıl işlemler sonrası boyut değişimlerinin ölçülmesi..	23
Şekil 3.6. AISI 5115 (A) ve AISI 8620 (B) çelik dişli çarkların katı modellemeleri	24
Şekil 3.7. AISI 5115 dişlisi için oluşturulan kabuklar (A) ve katı model montajı (B)	25
Şekil 3.8. AISI 8620 dişlisi için oluşturulan kabuklar (A) ve katı model montajı (B)	25
Şekil 3.9. AISI 5115 (A) ve AISI 8620 (B) çelik dişli çarkların eş dişli montajları.....	26
Şekil 3.10. AISI 5115 mesh görüntüsü	27
Şekil 3.11. AISI 8620 mesh görüntüsü	27
Şekil 4.1. AISI 8620 malzemedan yapılan dişlilerde $\frac{1}{2}$ diş yüksekliğinde sertlik dağılım profili	28
Şekil 4.2. AISI 5115 malzemedan yapılan dişlilerde $\frac{1}{2}$ diş yüksekliğinde sertlik dağılım profili	29
Şekil 4.3. Düşük basınçlı sementasyon (LPC) yapılmış AISI 5115 helisel dişli çark numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2) ..	34
Şekil 4.4. Sementasyon işlemi yapılmış AISI 5115 helisel dişli çark numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2)	34
Şekil 4.5. Plazma nitrürleme işlemi yapılmış AISI 5115 helisel dişli çark numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2)	35
Şekil 4.6. Isıl işlem görmemiş helisel dişli çark numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2)	35
Şekil 4.7. Düşük basınçlı sementasyon (LPC) işlemi yapılmış AISI 8620 dişli numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2)	36
Şekil 4.8. Plazma nitrürleme yapılmış AISI 8620 çelik numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2)	36
Şekil 4.9. Sementasyon (DQ) yapılmış AISI 8620 çelik numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2).....	37

Şekil 4.10.AISI 5115 dişlisi ısıtıl işlem görmemiş numunenin von Mises gerilme sonuçları	39
Şekil 4.11.AISI 5115 dişlisi ısıtıl işlem görmemiş numunenin von Mises maksimum gerilme noktası.....	39
Şekil 4.12.AISI 5115 dişlisi ısıtıl işlem görmemiş numunenin 1,000,000 turdaki hasar yüzdesi	40
Şekil 4.13.AISI 5115 dişlisi ısıtıl işlem görmemiş numunenin ömür tur sayısı....	41
Şekil 4.14.AISI 5115; ısıtıl işlem görmemiş (A), düşük basınçlı sementasyon (B), plazma nitrüleme (C) ve gaz sementasyon (D) numunelerinin ömür tur sayıları	41
Şekil 4.15.AISI 5115; ısıtıl işlem görmemiş (A), düşük basınçlı sementasyon (B), plazma nitrüleme (C) ve gaz sementasyon (D) numuneleri hasar yüzdeleri.....	42
Şekil 4.16.AISI 8620 dişlisi ısıtıl işlem görmemiş numunenin von Mises gerilme sonuçları	45
Şekil 4.17.AISI 8620 dişlisi ısıtıl işlem görmemiş numunenin von Mises maksimum gerilme noktası.....	45
Şekil 4.18.AISI 8620 dişlisi ısıtıl işlem görmemiş numunenin 1,000,000 turdaki hasar yüzdesi	46
Şekil 4.19.AISI 8620 dişlisi ısıtıl işlem görmemiş numunenin ömür tur sayısı....	47
Şekil 4.20.AISI 8620; ısıtıl işlem görmemiş (A), düşük basınçlı sementasyon (B), plazma nitrüleme (C) ve gaz sementasyon (D) numunelerinin ömür tur sayıları	47
Şekil 4.21.AISI 8620; ısıtıl işlem görmemiş (A), düşük basınçlı sementasyon (B), plazma nitrüleme (C) ve gaz sementasyon (D) numuneleri hasar yüzdeleri.....	48

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. k sabiti değerleri.....	7
Tablo 3.1. Denemeye alınan AISI 5115 (16MnCr5) ve AISI 8620 (21NiCrMo2) çeliklerin kimyasal kompozisyonu (wt %, Fe kalan) ..	19
Tablo 3.2. Helisel dişli çarkların hesaplanan geometrik değerleri.....	20
Tablo 3.3. İncelenen helisel dişli çarklara uygulanan ısıtma işlemler	22
Tablo 3.4. Dişlilerin devamlı çalışma tork değerleri ve devirleri	26
Tablo 4.1. AISI 5115 çeliğinden üretilen dişli çarkların yüzey pürüzlülük değerleri	31
Tablo 4.2. AISI 8620 çeliğinden üretilen dişli çarkların yüzey pürüzlülük değerleri	32
Tablo 4.3. AISI 5115 dişli çarklarda meydana gelen boyutsal değişim değerleri	32
Tablo 4.4. AISI 8620 dişli çarklarda meydana gelen boyutsal değişim değerleri	33
Tablo 4.5. AISI 5115 numunelerinin ölçme derinliğine göre akma gerilmesi değerleri	38
Tablo 4.6. AISI 5115 dişlileri von Mises akma gerilme değerleri.....	40
Tablo 4.7. AISI 5115 dişlileri yorulma analizi sonucu ömür tur sayıları	42
Tablo 4.8. AISI 5115 dişlilerinin yorulma analizi sonucu ömür saat değerleri ..	42
Tablo 4.9. AISI 5115 dişlilerinin yorulma analizi sonucu hasar yüzdeleri.....	43
Tablo 4.10. AISI 8620 numunelerinin ölçme derinliğine göre akma gerilmesi değerleri.....	44
Tablo 4.11. AISI 8620 dişlileri von Mises akma gerilme değerleri.....	46
Tablo 4.12. AISI 8620 dişlilerinin yorulma analizi sonucu ömür tur sayıları	48
Tablo 4.13. AISI 8620 dişlilerinin yorulma analizi sonucu ömür saat değerleri	48
Tablo 4.14. AISI 8620 dişlilerinin yorulma analizi sonucu hasar yüzdeleri.....	49

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aőamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aőamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. AYSEL YAZICI' ya, çalıőmalarımın yürütülmesi sırasında işbirliği yaptığım ve deney numunelerinin temini konusunda her türlü imkan ve desteği veren Ege Redüktör Firması Makine Mühendisi Sayın MÜMİN SABAN ve Makine Yüksek Mühendisi Sayın FULYA SABAN' a, çalıőmalarım sırasında yardım ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim değerli iş arkadaşlarım Makine Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Teknik Hizmetler Biriminde çalışan Makine Mühendisi Sayın BURAK GENÇ ve Makine Mühendisi Sayın ERAY DURUPINAR' a, numunelerin ısııl işlemleri sırasında yardımlarını esirgemeyen Batı Isıl İşlem Firmasından Sayın ELİF KINALI NUMANOĞLU' na, Akademi Metalurji Firmasından Metalurji ve Malzeme Mühendisi Sayın LEVENT ALTUNTAŐ' a, Er&Mir Tekstil ve Makine San. Tic. Ltd. Şti. Firmasından Sayın ERSİN KORKMAZ' a ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Serhan GENÇOĞLU
Manisa, 2019

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Farklı Isıl İşlemlerin AISI 8620 ve AISI 5115 Çelik Dişli Çarkların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Serhan GENÇOĞLU

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aysel YAZICI

Bu çalışmada AISI 8620 (DIN 21NiCrMo2 / 1.6523) ve AISI 5115 (DIN 16MnCr5 / 1.7131) çeliklerinden yapılan, modülü 1.5 ve 2 olan helisel dişli çarklara uygulanan düşük basınçlı sementasyon, gaz sementasyon ve plazma nitrürleme yüzey sertleştirme ısıl işlemlerinin dişli çarkların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Isıl işlem öncesi ve sonrasında dişli çark numunelerin sertlik dağılım profili, yüzey pürüzlülüğü, mikroyapılarında meydana gelen değişimler, boyutsal değişimleri ve numunelerin ömür değerleri kontrol edilmiştir. Numune mikroyapılarında meydana gelen değişimler optik mikroskop ve Clemex Vision Lite programı kullanılarak, numunelerin sertlik dağılım profili Emcotest Duroscan 20 mikrosertlik cihazı kullanılarak, yüzey profilleri ise Mitutoyo SJ-301 optik profilmetre ile incelenmiştir. Isıl işlemler sonrası dişlilerde meydana gelen boyutsal değişimlerin ölçülmesi için, 0.001 mm hassasiyetli mikrometre kullanılmıştır. Dişlilerin yorulma analizleri Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD programı kullanılarak yapılmıştır.

Yapılan incelemeler sonucunda, düşük basınçlı sementasyon işleminin gaz sementasyona göre istenen yüzey sertlik ve efektif sert tabaka kalınlığı değerlerini çok daha kısa işlem sürelerinde sağladığı belirlenmiştir. Uygulanan plazma nitrürleme işlem koşullarında, meydana gelen beyaz tabaka kalınlığı ve malzeme iç kısımları sertlik değerleri her iki çelik dişlide de istenen aralıklarda olmakla beraber, AISI 8620 çeliğinden yapılan ve modülü 1.5 olan dişlilerde elde edilen toplam difüzyon tabakası kalınlığı gerekli minimum değeri sağlayamamıştır. Isıl işlemler sonrası helisel dişlilerde en büyük boyutsal artışın, yüksek işlem sıcaklıklarında uzun işlem süreleri nedeniyle gaz sementasyon işlemi sonucunda meydana geldiği saptanmıştır. Isıl işlemler sonucunda dişlilerin yüzey pürüzlülük değerlerinin değişiklik gösterdiği ve iyi bir yüzey kalitesi için denenen tüm ısıl işlemler sonrasında yüzey bitirme işlemlerinin gerekli olduğu kanısına varılmıştır. Isıl işlemler sonrası meydana gelen yüzey sertliği ve sert tabaka derinliğinin yapılan ısıl işlem türlerine göre farklılık göstermesi dişlilerin ömürlerini etkilemiştir.

Anahtar Kelimeler: (Helisel Dişli, Isıl İşlem, Plazma Nitrürleme, Düşük Basınçlı Sementasyon, Gaz Sementasyon, Yorulma Analizi)

2019, 54 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Investigation of The Impact of Various Heat Treatment Techniques on The Mechanical Properties of AISI 8620 and AISI 5115 Steel Gear Wheels

Serhan GENÇOĞLU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aysel YAZICI

In this study, the mechanical impacts on helical gear wheels that are made of AISI 8620 (DIN 21NiCrMo2 / 1.6523) and AISI 5115 (DIN 16MnCr5 / 1.7131) steels with modules 1.5 and 2 have been investigated after the application of surface hardening heat treatment using several techniques including low-pressure carburizing, gas carburizing, and plasma nitriding. Hardness distribution profile, surface roughness, the alteration on microstructure, dimensional changes, and lifetime value of the gear wheel samples have been examined comparing the values from before and after the heat treatment process. The alterations on the microstructure of the samples has been examined using optical microscope and Clemex Vision Lite programs, whereas hardness distribution profile has been examined using Emcotest Duroscan 20 microhardness device, and surface profiles has been examined using Mitutoyo SJ-301 profilometer. In order to measure the dimensional changes on the gear wheels, 0.001 mm sensitive micrometer has been used. Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD program has been leveraged for the fatigue analysis of the gear wheels.

The detailed examination revealed that the low-pressure carburizing is more effective compared to gas carburizing in reaching the desired surface hardness and effective thickness of the hard layer values in a shorter time span of the application process. After the application process of the plasma nitriding, the thickness of the white layer and hardness value of material interior parts values has been observed to be in the desired intervals for both types of steel gear wheels, however the obtained total thickness of diffusion layer of the gear wheels made of AISI 8620 steel (module 1.5) could not reach the minimum value required. The maximum dimensional increase of the helical gear wheels after the heat treatment has been observed with the gas carburizing application, as a result of the long processing interval at high temperatures. It was concluded that heat treatment alters the surface roughness values of the gear wheels, and for the desired level of surface quality, surface-finish treatments is needed after the entire heat treatment applications have been completed. A correlation between the types of heat treatment and the resulting surface hardness and depth of hard layer values has been determined, and this differentiation is proven to have an impact on the lifetime of the gear wheels.

Keywords: (Helical Gear, Heat Treatment, Plasma Nitriding, Low Pressure Carburizing, Gas Carburizing, Fatigue Analysis)

2019, 54 pages

1. GİRİŞ

Dişli çarklar makine sistemlerinde hareket ve güç ileten en önemli elemanlardır. Bir dişli çarkı mekanik iletimin en önemli şeklidir [1]. Yüksek iletim verimliliği, kompakt yapı, dengeli iletim oranı, yüksek güvenilirlik, yüksek dayanıklılık ve bunun gibi birçok avantaja sahiptir [2]. Dişli çarklar hareket-güç aktarımı nedeniyle zor şartlar altında çalışırlar. Dişliler çevrim sürecinde eğilme gerilmesi, temas gerilmesi ve darbe kuvveti gibi çeşitli kuvvetlere maruz kalırlar. Bu yüzden dişliler özellikle çoklu hata formlarına, diş yanı aşınmasına, dökülmeye, aşınmaya, diş eğilme yorulmasına eğilimlidirler [3,4]. Hareketin iletimi esnasında zorlayıcı en büyük etken sürtünmedir ve bunun bir sonucu olarak dişlilerde aşınma meydana gelir. Dişli çarklarda sürtünmenin azaltılması ve aşınma direncinin artırılması, dişlilerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine bağlıdır. Dişlilerin yüzey sertliğinin artması ve yüzey pürüzlülüğünün azalması, transmisyon verimliliğinin artmasına ve dişli çarkların ömrünün uzamasına imkan sağlamaktadır.

Isıl işlemlerin temel amacı, istenen bölgede istenen mikroyapıyı oluşturarak dişlinin ömrünü uzatmaktır. Dişli çarklarda yapılan yüzey sertleştirme ısıl işlemleri sert ve aşınmaya dayanıklı bir yüzey ve tok bir çekirdek sağlar. Yüzey sertleştirme işlemi genellikle % 0.25 ve altında C içeren, düşük karbonlu çeliklere uygulanır. Sementasyon (karbürleme) yüzey sertleştirme yönteminde düşük karbonlu çelik parçaların yüzeylerine kontrollü ortamlarda ve yüksek sıcaklıkta difüzyon yoluyla karbon emdirilir. Karbon emilimini takiben parçalar hızla soğutulur, parça yüzeylerinde martenzit fazı içeren bir katman oluşturulur. Bu sertleştirme yönteminde; düşük karbonlu çelikler çok yüksek oranda karbon içeren ortamlarda 850 °C ila 1000 °C arasında ısıtılırlar. Karbonun kolayca nüfuz edebilmesi için çelik, östenitik faz sıcaklığı (A₃) üzerinde bir sıcaklıkta ısıtılır. Karbürleme katı, gaz ve sıvı-tuz banyosu ortamlarında yapılabilir. Endüstriyel uygulamalarda, yaygın olarak gaz karbürizasyon işlemleri, endotermik atmosfer kullanılarak yapılmaktadır. Düşük basınçlı sementasyon ısıl işlemi, vakumlu fırınlarda çok düşük basınç ve yüksek sıcaklıklar altında hidrokarbon gazlardan faydalanılarak gerçekleştirilen bir yüzey sertleştirme işlemidir. Düşük basınçlı sementasyon için kullanılan hidrokarbon gazları genellikle asetilen (C₂H₂) ve propan (C₃H₈) dır. Nitrürleme ısıl işleminde, malzemenin yüzeyinden difüzyon yoluyla azot (N) emdirilerek malzemenin yüzey özelliklerinin

değişmesi sağlanır. Nitrürleme yüzey sertleştirme işlemi, alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde A_{c1} sıcaklığının altında, genellikle 450–650 °C difüzyon sıcaklıklarında gerçekleştirilir. Plazma nitrürleme yönteminde azot difüzyonu, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgede termokimyasal reaksiyonlarla vuku bulur. Azot difüzyonu sonucunda oluşan nitrürler ve malzemenin özelliklerine etkisi, alışımlı diğer nitrürleme yöntemlerinde olduğu gibidir. Termo-kimyasal reaksiyonların oluşması için gerekli azot, azot gazının ya da azot içeren bir gaz veya gaz karışımının yüksek gerilimli doğru akım ile iyonlara ayrıştırılması ile elde edilmektedir. Plazma nitrürleme ısıl işleminde gaz olarak genellikle azot ya da amonyak kullanılır.

Dişli tasarımında, doğru geometrinin oluşturulmasının yanı sıra uygun malzeme seçimi ve ısıl işlemlerin doğru yapılması dişlilerin sorunsuz çalışabilmesi bakımından çok önemlidir. Dişli üretim süreçlerinde boyutsal değişim ve çarpılmalar üzerinde etkili olan unsurlar; geometri, sertleşebilirlik (malzemenin karbon ve alaşım içeriği), karbürleme atmosferindeki karbon potansiyeli, karbürleme sıcaklığı ve sertleştirme sıcaklığı, sertleştirme ortamı tipi, sıcaklığı ve karıştırılma durumu, sertleştirilmiş tabakadaki karbon içeriği, sert tabaka kalınlığı, artık östenit miktarı ve karbidler gibi birçok unsur etkilidir. Doğru ve uygun ısıl işlemlerin yapılmasıyla, dişli çarklarda meydana gelebilecek boyutsal değişimlerin-çarpılmaların ve aşınma miktarının azaltılabileceği bilinmektedir. Dişli çarklara uygulanan farklı ısıl işlemler sonucu oluşan basma kalıcı gerilmelerin dişli çarkların çalışma performansı ve dayanımı üzerinde etkisi büyüktür ve bu gerilme değerlerinin ve özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Yüzey sertleştirme sonucu dişlilerde meydana gelen basma kalıcı gerilmeler yorulma sınırını arttırmaktadır.

Bu çalışmada AISI 8620 (DIN 21NiCrMo2 / 1.6523) ve AISI 5115 (DIN 16MnCr5 / 1.7131) çeliklerinden yapılan helisel dişli çarklara uygulanan sementasyon, düşük basınçlı sementasyon (LPC) ve plazma nitrürleme gibi farklı ısıl işlemlerin dişli çarkların sertlik, boyutsal değişim, yüzey pürüzlülük, mikroyapı ve yorulma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Çeliklerde Yapılan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

TS 1112 EN 10052 Standardına göre sertleştirme ikiye ayrılır;

1) Sertleştirme: Östenitlenen çeliğin hızlıca soğutularak martenzit dönüşümün meydana geldiği ısı işlemidir. Bazı durumlarda beynit dönüşümü tercih edilebilir. Sertleştirme genellikle % 0.25 ve daha fazla C içeren çeliklere uygulanır.

2) Yüzey sertleştirme: Genellikle % 0.25 ve altında C içeren çeliklere uygulanır. Yüzey sertleştirme ısı işlemleri sert ve aşınmaya dayanıklı bir yüzey ve tok-özlü bir çekirdek sağlar. Yapılan bu işleme "yüzey sertleştirme" adı verilir. Başlıca yüzey sertleştirme işlemleri, sementasyon, nitrürleme, alevle sertleştirme, indüksiyonla sertleştirme ve borlamadır.

2.1.1. Sementasyon

Sementasyon işlemi, düşük karbonlu çelikler için çok yaygın kullanılan bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Sementasyon işleminde, düşük karbonlu çelik parçaların yüzeylerine kontrollü ortamlarda ve yüksek sıcaklıkta difüzyon mekanizması ile karbon emdirilir. Bu işlemi takiben karbon emdirilen parçalar hızlıca soğutularak yüzeylerinde martenzit fazı içeren bir katmanın oluşması sağlanır [5]. Bu sertleştirme yönteminde; düşük karbonlu çelikler çok yüksek oranda karbon içeren ortamlarda 850 °C ila 1000 °C arasında ısıtılırlar. Karbonun kolayca nüfuz edebilmesi için çelik östenitik faz sıcaklığı (A₃) üzerinde bir sıcaklıkta ısıtılmalıdır. Isıtma sırasında ortamdan karbon emen çelik takibinde ani soğutmaya tabi tutularak sertleştirilir. Bu işlem sonunda yüzeyde karbonun % 0.80 ile % 0.90 arasında bir değere ulaşması amaçlanır. Sementasyonun amacı düşük karbonlu, sertleştirilemeyen çeliklerde sert bir yüzey sağlamaktır. Sementasyon işlemi sonrasında yüzeyi sert, iç kısımları daha yumuşak materyal elde edilmiş olur. Sementasyon işlemi sert aşınmaya dirençli yüzey ve tok çekirdeğin eşsiz birleşimini sağlar.

Yüzeydeki karbon oranı ve difüzyon tabakasının derinliği, ortam sıcaklığı, ortamın karbon oranı ve ürünün ortamda tutulma sürelerine bağlı olarak değişir.

Sementasyon işlemi, malzemede eğilme, aşınma, burulma ve yorulma dayanımını yükseltir [5]. Sertleştirme işlemi boyunca dış katmanda karbürlenen martenzit, çekirdekten çok daha fazla hacim artışına maruz kaldığı için yüzey sertleştirme işlemi yüzeyde kalıntı basma gerilmeleri yaratır. Bu da parçaların yorulma dayanımında iyileşme sağlar. Kalıcı basma gerilmeleri, eğilme ve burulma yükleri sırasında çekme gerilmesine karşı iş yapar, bu da çatlak başlangıcının sadece yüksek gerilme seviyelerinde gerçekleşebilmesine ve var olan çatlağın yavaş ilerlemesine neden olur.

Karbürleme katı, gaz ve sıvı-tuz banyosu ortamlarında yapılabilir. Karbon difüzyonu için yüksek sıcaklıklar gerekli olduğundan, sıvı karbürleme ortamı olarak ergiyik tuzlar kullanılır. Daha çok NaCN ve nadiren de KCN tuz banyoları kullanılır. Tuz banyoları bu maddelerden başka klorürler ve toprak alkali metaller içerirler. Genellikle odun kömürü katı karbon verici madde olarak kullanılır. Gaz karbürlemede genellikle metan (CH_4) ve propan (C_3H_8) kullanılır.

2.1.1.1. Gaz Sementasyon

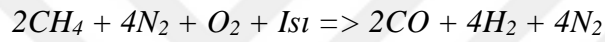
Düşük karbonlu çelikten üretilen parçaların yüzeylerine kontrollü atmosfer koşullarında ve yüksek sıcaklıkta difüzyon mekanizması ile karbon emdirilir. Bu işlemi takiben, karbon emdirilen parçalar hızlıca soğutularak yüzeylerinde martenzit fazı içeren sert bir tabakanın oluşması sağlanır. Gaz ortamında karbürizasyonda üç ana adım vardır:

- 1) Atmosferden çelik yüzeyine karbon taşınması,
- 2) Yüzey kimyasal reaksiyonları ve metal yüzey tarafından karbonun atmosferden absorbe edilmesi ve,
- 3) Absorbe edilen karbon atomlarının çeliğin kütlesine doğru difüzyonu.

Endüstriyel uygulamalarda, yaygın olarak gaz karbürizasyon işlemleri, endotermik atmosfer veya nitrojen / metanol karışımı kullanılarak yapılmaktadır. Doğal gaz veya propanın bulunmadığı dünyanın bazı bölgelerinde, alternatif atmosfer olarak gaz halindeki nitrojen ve sıvı metanol kullanılır ve doğrudan jeneratör olmadan fırına verilir. Bununla birlikte, bu tür atmosferde hem atmosfer hem de iş yükünün kalitesi açısından bazı problemler vardır [6]. Endotermik gaz, güçlü bir oksijen azaltıcı atmosfer gerektiren uygulamalar için birçok ısı işlem fırınında kullanılan ortak bir

denge atmosferidir. Endotermik gaz bir gaz değil, farklı gazların karışımıdır. Doğal gazdan (CH₄) üretilen endotermik gaz temel olarak % 40 hidrojen gazı (H₂), % 40 azot gazı (N₂), % 19.5 - % 19.8 karbon monoksit gazı (CO), % 0.2 - 0.5 karbon dioksit (CO₂), % 0.1' in altında su buharı (H₂O) ve % 0.1' in altında metan (CH₄) gazlarından oluşur. LPG veya propan (C₃H₈) 'dan üretilen endotermik gaz % 31 hidrojen gazı (H₂), % 46 azot gazı (N₂), % 22.5 - % 22.8 karbon monoksit gazı (CO), % 0.2 - 0.5 karbon dioksit (CO₂), % 0.1' in altında su buharı (H₂O) ve % 0.1' in altında propan (C₃H₈) gazlarından oluşur. Bu gaz karışımlarını üretmenin en yaygın ve ekonomik yöntemi bir endotermik gaz jeneratörünün kullanılmasıdır. Jossart, (2016), yaptığı çalışmada endotermik gaz jeneratörü içerisinde meydana gelen bir dizi kritik reaksiyonu belirtmiştir [7];

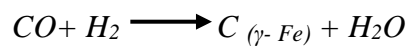
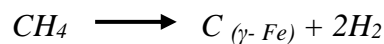
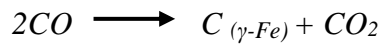
Baskın Doğal Gaz (CH₄) Reaksiyonu:



Baskın LPG veya Propan (C₃H₈) Reaksiyonu:

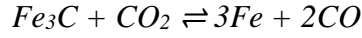


Endotermik gaz jeneratöründe üretilen gaz, gaz karbürizasyon prosesi sırasında karbon taşıyıcı atmosfer olarak doğrudan fırın içine verilir. Karbürizasyon atmosferinde eş zamanlı olarak yaklaşık 180 kimyasal reaksiyonun meydana geldiği tahmin edilmektedir. Collin ve ark., (1972), gaz sementasyonun çelikler üzerindeki karbon konsantrasyonu ile ilgili yaptıkları çalışmada kimyasal reaksiyonlar arasından aşağıdaki üç reaksiyonun öneminden bahsetmişlerdir. Bu reaksiyonlar karbürizasyon atmosferinden çelik yüzeye olan karbon transfer oranını belirlemektedir [8].



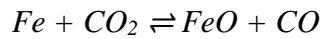
Collin ve ark., (1972), yaptıkları çalışmada, karbürizasyonun en hızlı şekilde CO molekülüne ayrışmasıyla devam ederken, reaksiyonların CO₂ gibi yan ürünlerinin

dekarbürizasyon görevi gördüğünü saptamışlardır. Dekarbürizasyon, çeliğin genel mukavemetini ve yorulma direncini azaltır. Dekarbürizasyon reaksiyonu [8];



CO₂ çeliğin içindeki karbonu alarak, yüzeyde karbon azalmasına sebep olur. İstenmeyen dekarbonizasyonu önlemenin bir yolu, CO ve H₂ fazlalığı gibi indirgeyici gazların varlığını korumaktır. O₂ ve CO₂ gibi oksitleyici gazlar dekarbonizasyonu kolaylaştırır.

Gaz karbürizasyonda atmosferde bulunan oksitleyicilerin (H₂O, CO₂) varlığı nedeniyle, yüksek oranda Ti, Si, Mn ve Cr içeren demir alaşımlarında taneler arasında-sınırlarında oksitlenmeler meydana gelir. Kırılğan olan bu taneler arası oksitler, çalışma sırasında yorulma-kırılma çatlağının yayılmasının başlangıç noktası olabilir. Gaz sementasyon proseslerinde oluşan yüzey oksidasyonu ve uzun işlem süreleri malzemelerin bazı mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Endüstriyel uygulamalarda, gaz sementasyon sonrası oluşan yüzey oksitlenmelerinden kurtulmak için taşlama işlemi yapılır. Ancak taşlama işlemi ek bir maliyetin yanı sıra, işlenen ürünlere ek gerilmeler yükler. Oksidasyon reaksiyonları, endotermik gazda fazla miktarda CO₂ veya herhangi bir O₂ olduğunda ortaya çıkar. Böyle bir reaksiyonun bir örneği, aşağıda görülebilen demir oksidasyonudur [8]:



Bu oksidasyon reaksiyonu, oksijeni fırından çıkartarak ve CO₂ varlığını en aza indirerek azaltılabilir. İstenmeyen reaksiyonların önlenmesine yardımcı olmak için, endotermik gaz atmosferini oluşturan CO₂, H₂O, CH₄, N₂, H₂ ve CO konsantrasyonları ölçülmelidir. Karbürleme sıcaklığındaki bir artış hem fırın atmosferinde hem de çelikte kütle aktarım hızını artırır, aynı zamanda aşırı östenit tane büyümesini teşvik eder. Sıcaklığının yükselmesi sementasyon derinliğinin artmasına yardımcı olmaktadır. Kaya, (2015), sementasyonun çelikler üzerindeki sertlik değişimini incelemiş ve *Harris* eşitliğine göre aşağıdaki denkleme değinmiştir [9];

$$X = k \cdot (t)^{1/2} \quad (2.1)$$

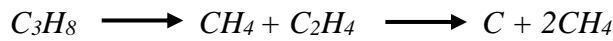
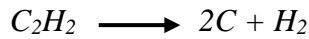
Denklem (2.1)'de; **X**: sementasyon derinliği (mm), **t**: sementasyon süresi (h) ve **k**: sementasyon sıcaklığına bağlı sabittir.

Tablo 2.1. k sabiti değerleri [9].

Sementasyon sıcaklığı, °C	875	900	925
Katsayı, k	0.34	0.41	0.52

2.1.1.2. Düşük Basıncılı Sementasyon (LPC)

LPC (düşük basınçlı sementasyon, vakum sementasyon) vakumlu fırınlarda, çok düşük basınç ve yüksek sıcaklıklar altında hidrokarbon gazlardan faydalanılarak gerçekleştirilen bir yüzey sertleştirme işlemidir. Vakum karbürizasyon için kullanılan hidrokarbon gazları, asetilen (C_2H_2), propan (C_3H_8) ve nadiren etilen (C_2H_4) 'dir. Düşük basınçta düşük ayrışma nedeniyle metan (CH_4) kullanılmamaktadır. Geçmişte propan, vakumlu karbürizasyonda kullanılan birincil ortamdı. Ancak, propan ayrışması, gazın çeliğin yüzeyi ile temas etmesinden önce ortaya çıkar ve böylece serbest karbon veya kurum-is meydana gelir. Bu kontrolsüz kurum-is oluşumu, metal yüzeye karbon difüzyonunu yavaşlatır ve ilave ısıl işlem ekipmanı bakımı ihtiyacını doğurur. Dolayısıyla zaman, üretkenlik kaybına neden olur. Yapılan çalışmalar, asetilenin vakumlu karbürizasyon için iyi performans gösteren bir gaz olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, asetilenin kimyası propan veya etileninkinden çok farklıdır. Asetilen ayrışması iki karbon atomu sağlar ve reaktif olmayan metan oluşumunu önler. Davis, (2002), yaptığı çalışmada düşük basınçlı karbürlemede karbonun çelik yüzeyine iletimini aşağıdaki reaksiyonlar yoluyla belirtmiştir [10];



LPC' de 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 [11]. Bu yöntemin avantajı çelik yüzeyinin çok temiz kalması, vakum ortamının karbonu çelik yüzeyine

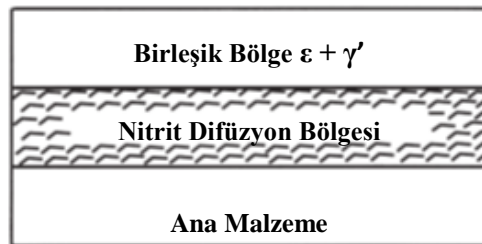
daha hızlı transfer etmesi ve gaz sementasyon proseslerinde görülen taneler arası ve yüzey oksidasyonun oluşmamasıdır. Vakum sementasyonda oksidasyon tabakasının oluşmaması yüzeyde homojen sertlik dağılımına imkân sağlar.

Gaz karbürlemede, yüzeyde aşırı karbon konsantrasyonu kalıntı östenit oranını artırır ve tane sınırlarına karbürlerin çökmesine neden olur. Bu durum gaz karbürlemede malzemenin yorulma, aşınma ve tokluk mukavemetlerini olumsuz yönde etkiler. Düşük basınçlı vakum sementasyonda proses gazı ortama fasıllı olarak verilir. Gaz verilisinin ardından gazın difüze olması için beklenir. Böylelikle karbonun yüzeyde yoğunlaşması önlenir. Bunun bir sonucu olarak sementasyon derinliği sağlanır, karbonun iç yapıya difüzyonuna imkan sağlanmış olur. İlave olarak LPC geleneksel sementasyonla karşılaştırıldığında boyutsal kontrol, düşük çarpılma, öngörülebilir ve yinelenabilir boyutsal kontrol sağlar. Ayrıca taşlama ve temizlik gibi sonraki üretim işlemlerine gerek duyulmaması yöntemin diğer avantajlarından biridir.

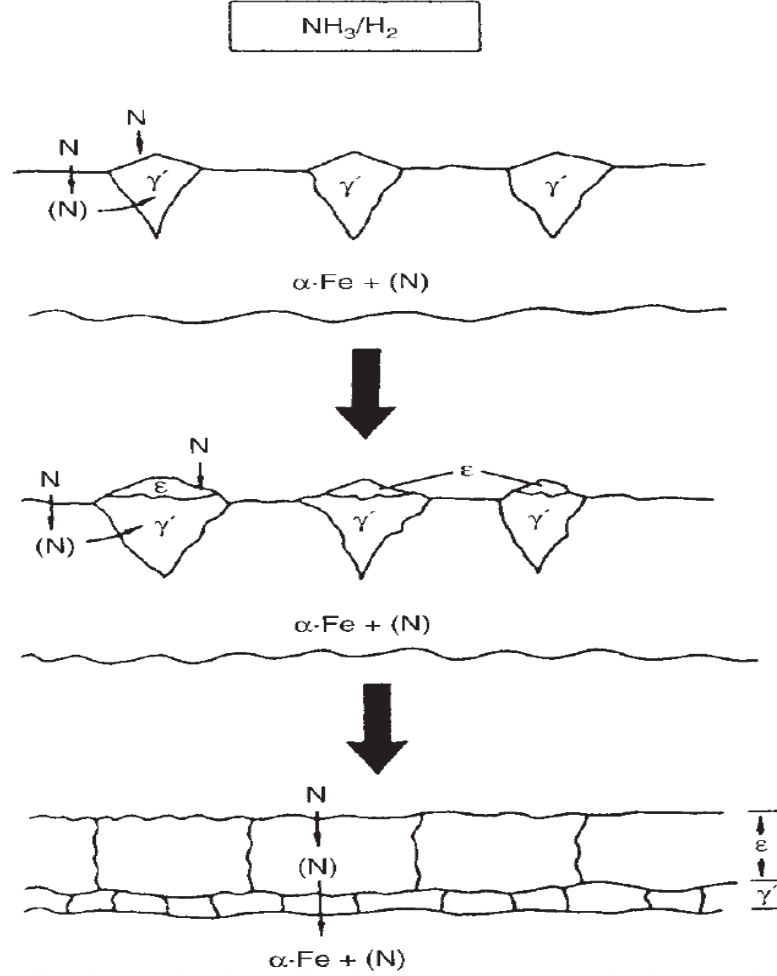
Karbon potansiyelinin ölçülmesi ve ayarlanmasıyla kontrol edilebilen gaz karbürizasyonu ile karşılaştırıldığında, LPC termodinamik dengenin yokluğundan dolayı karbon potansiyeli ile kontrol edilemez [12]. Diğer yandan, vakumlu karbürizasyon fırını yatırımı, gaz karbürizasyon fırınından çok daha pahalıdır ve bu fırınlar daha sık ve dikkatli bir bakım gerektirmektedir.

2.1.2. Nitrürleme

Bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemi olan nitrürleme ile, malzemenin yüzeyinden difüzyon yoluyla azot (N) verilerek malzemenin yüzey özellikleri değiştirilir (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2).



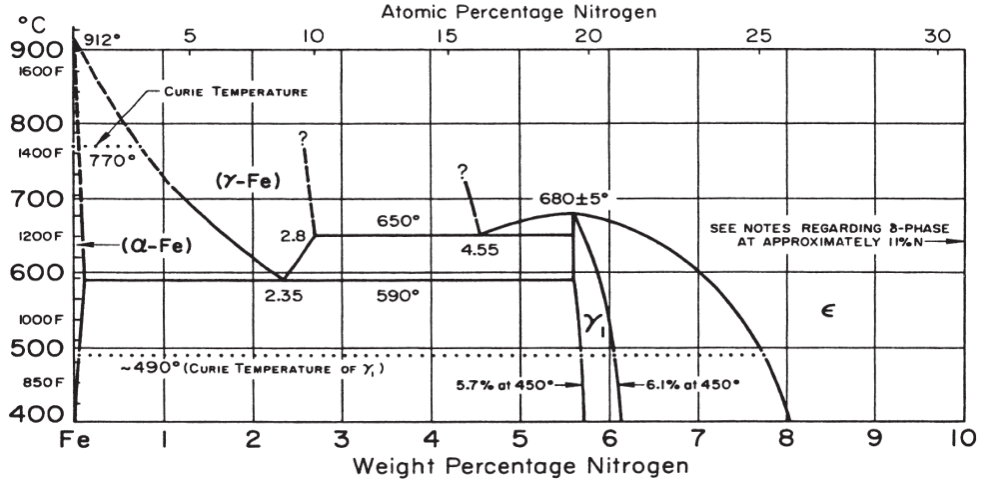
Şekil 2.1. Nitrürlenmiş tabakaların oluşumu [13].



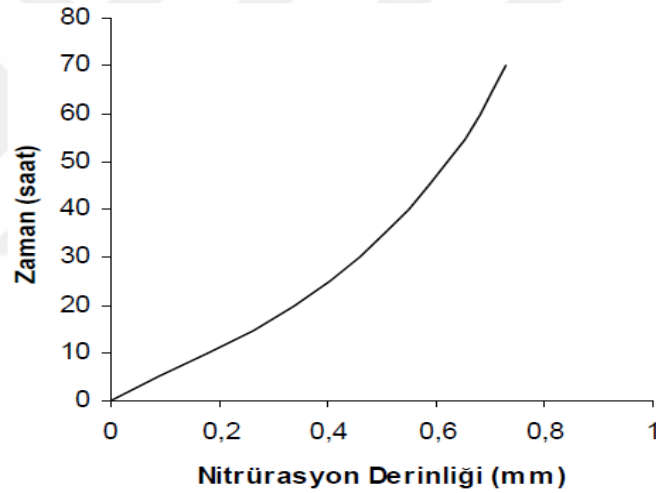
Şekil 2.2. Demirde ϵ ve γ' nitritlerin çekirdeklenmesinin gösterimi [14].

Nitrüleme yüzey sertleştirme işlemi, alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde A_{c1} sıcaklığının altında, genellikle 450 – 650 °C difüzyon sıcaklıklarında yapılır. Yüzey sertliği ve sertleşme derinliği, işlem süresi, sıcaklık, ortam ve demir esaslı malzemenin alaşım içeriğine bağlıdır (Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4).

Nitrüleme işlemi alüminyum, krom, molibden, titanyum ve vanadyum gibi nitrür oluşturan elementleri içeren çeliklere uygulanmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajı ferritik bölgede nispeten düşük işlem sıcaklığında yapılmasıdır. Hızlı soğutmaya gerek olmadığı için materyal boyutlarındaki değişim, çarpılmalar minimum seviyede kalır. Ancak, ferritin düşük çözünürlüğü ve düşük işlem sıcaklığı, sığ bir yüzey tabakasının oluşmasına neden olur ve difüzyon bölgesi dahilinde sertlik hızlıca düşer.



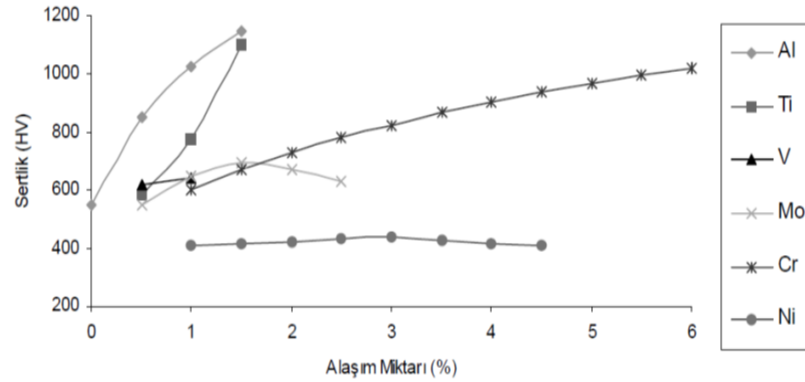
Şekil 2.3. Demir-azot denge diyagramı [13].



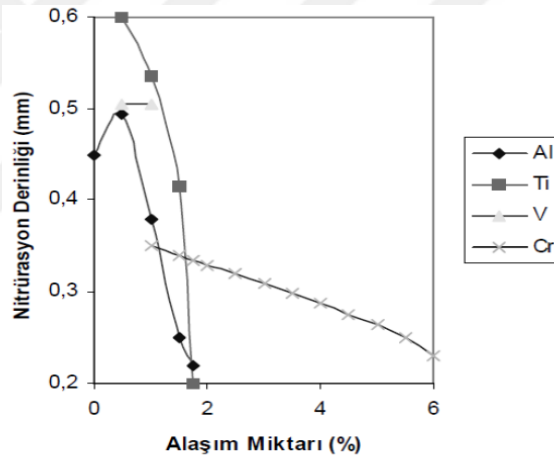
Şekil 2.4. Demir-azot denge diyagramı zamana bağlı olarak nitrürasyon derinliği [15].

Nitrüleme genellikle aşırı yüklemeye maruz kalan yüzeylerde yüksek yüzey sertliği sayesinde aşınma, sürtünme, pullanma ve sarmalara karşı yüksek direnç oluşturur. Özellikle yüzey basma gerilmeleri geliştirilerek yorulma dayancı artırılır. Nitrüleme işlemi sonucunda yüzeyde meydana gelen katman; beyaz ve difüzyon katmanı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Beyaz katman ya da diğer adıyla bileşik katman kübik veya hegzagonal nitrürlerden oluşur. Beyaz katmanın altında çözülmüş azot ve sert nitrür çökeltilerinin bulunduğu difüzyon katmanı yer alır.

Alaşım elementlerinin çeliğin nitrürasyon sonrası sertliğine etkisi Şekil 2.5’de, alaşım elementlerinin nitrürasyon derinliğine etkisi Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.5. Alaşım elementlerinin çeliğin nitrürasyon sonrası sertliğine etkisi [16].



Şekil 2.6. Alaşım elementlerinin 400 HV sertlik değerinde ölçülen nitrürasyon derinliğine etkisi (Nitrürasyon işlemi 520 °C de 8 saat süreyle yapılmıştır) [16].

Çelikteki C içeriği, yüzeyde ϵ ($Fe_{2-3}N$) ve γ' (Fe_4N) nitritlerin oluşumunu etkiler. Tipik bir nitrüleme çeliğinde, gaz nitrülemeye yaklaşık % 0.4 C içeren bir çelikte γ' ve ϵ fazların oranları yaklaşık eşittir. Çelikte C içeriği yükseldikçe beyaz tabakada (birleşik bölge) ϵ fazı artarken , karbon oranı düştükçe γ' fazı artar [13]. Yüzeyde meydana gelen beyaz katman aşınma, sürtünme, pullanma ve sarma hasarlarına karşı korumada rol oynar. Beyaz katmanın altındaki difüzyon katmanı ise

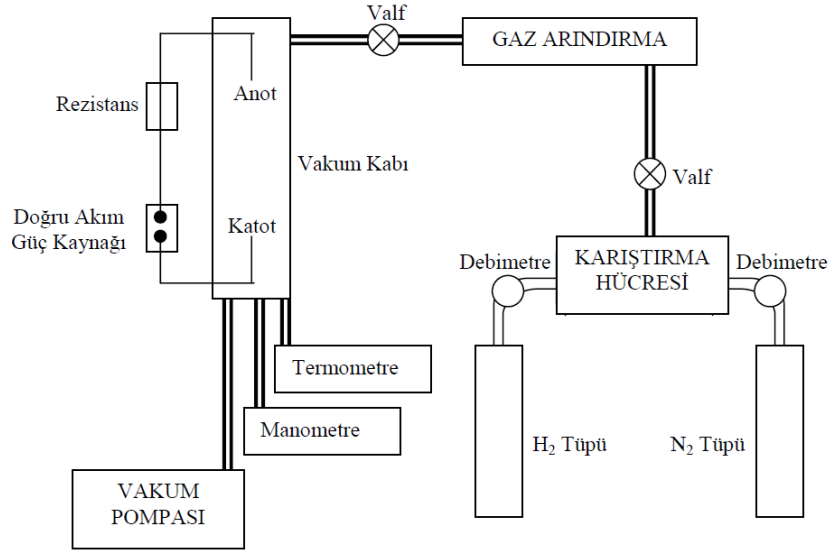
yorulma dayancını iyileştirir ve sert beyaz katmana destek olur. Sıvı, gaz ve plazma (ion) olmak üzere üç farklı nitrürleme prosesi bulunmaktadır.

2.1.2.1. Plazma Nitrürleme

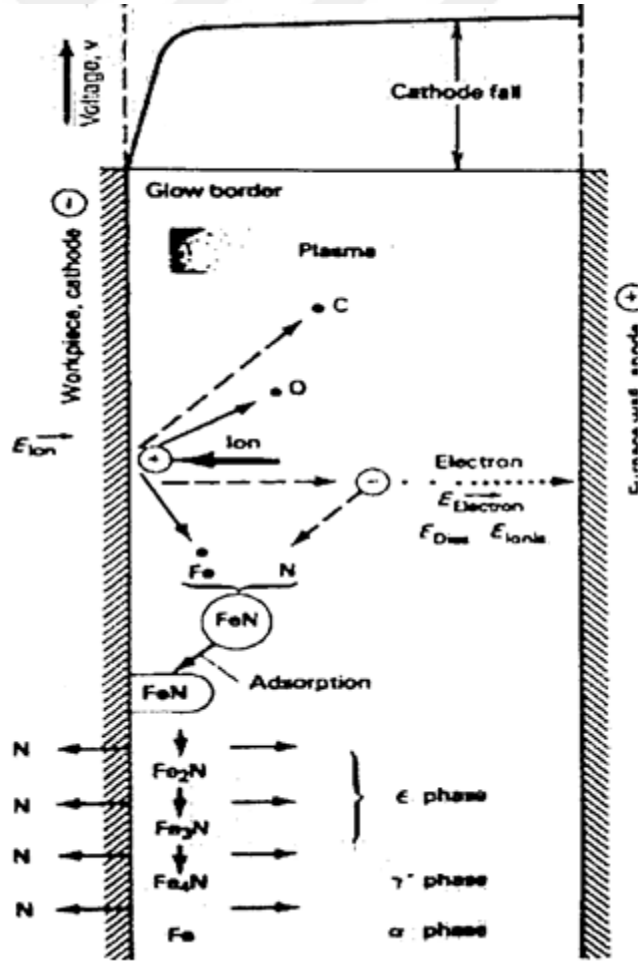
Plazma nitrürleme yönteminde termo-kimyasal reaksiyonlar neticesinde yüzeye azot difüzyonu sağlanır. Parça yüzeyine azot difüzyonuyla meydana gelen nitrürler ve malzemenin özelliklerine etkisi diğer nitrürleme yöntemleriyle aynıdır. Bu yöntemde, termo-kimyasal reaksiyonların oluşması için gerekli azot, azot gazının ya da azot içeren bir gaz veya gaz karışımının yüksek gerilimli doğru akım ile iyonlara ayrıştırılması ile sağlanır. Bu yöntemde gaz olarak genellikle azot ya da amonyak kullanıldığı görülmektedir. Nitrür partiküllerinin oluşması için ihtiyaç duyulan aktifleşme enerjisi, fırın cidarı ile parça arasında oluşturulan yüksek gerilim ile azot verilecek parçaya doğru ivmelendirilen iyonların parça yüzeyini bombardımanı sonucunda ortaya çıkar [17].

Plazma nitrürleme yönteminin başlıca sağladığı avantajlar olarak; düşük işlem sıcaklığı nedeniyle boyutsal değişimin az olması, temiz bir yüzey sağlanması, nitrür tabakasının yüksek toklukta olması, diğer nitrürleme yöntemlerine kıyasla parça yüzey pürüzlülüğünün daha az olması, mekanik özellikleri iyileştirme, yüksek korozyon direnci, kaynaklanabilirlik ve otomasyona uyumlu olması söylenebilir.

Plazma nitrürleme tertibatının şematik gösterimi Şekil 2.7 ve plazma nitrürleme mekanizması-iyon yüzey etkileşimlerinin şematik gösterimi Şekil 2.8 'de gösterilmiştir.



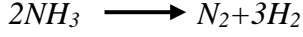
Şekil 2.7. Plazma nitrürasyon tertibatının şematik gösterimi [17].



Şekil 2.8. Plazma nitrürleme mekanizması (Koebel'in modeli) [13].

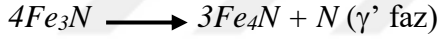
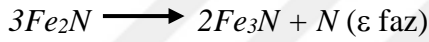
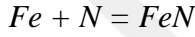
Amonyum gazı ısı altında ayrışır;

1 Nitrojen: 3 Hidrojen



Pye, (2003), yaptığı çalışmada plazma nitrürlemede metalin yüzeyinde meydana gelen 4 reaksiyonu belirtmiştir [13];

1. Reaksiyon; $e^- N_2=N+N+2e^-$
2. Reaksiyon; $N^+ \longrightarrow \text{İş parçası}$
3. Reaksiyon; $Fe+N= FeN$
4. Reaksiyon;



2.2. Sertlik

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Malzemelerin mukavemeti sertlik ile ilgilidir. Malzeme yüzeyinde sertliğin artırılması, malzemenin aşınma miktarını azaltır. Batıcı ucun geometrisine ve uygulanan kuvvet büyüklüğüne göre, başlıca sertlik ölçme yöntemleri şunlardır;

- Brinell sertlik ölçme metodu,
- Vickers sertlik ölçme metodu ve,
- Rockwell sertlik ölçme metodudur.

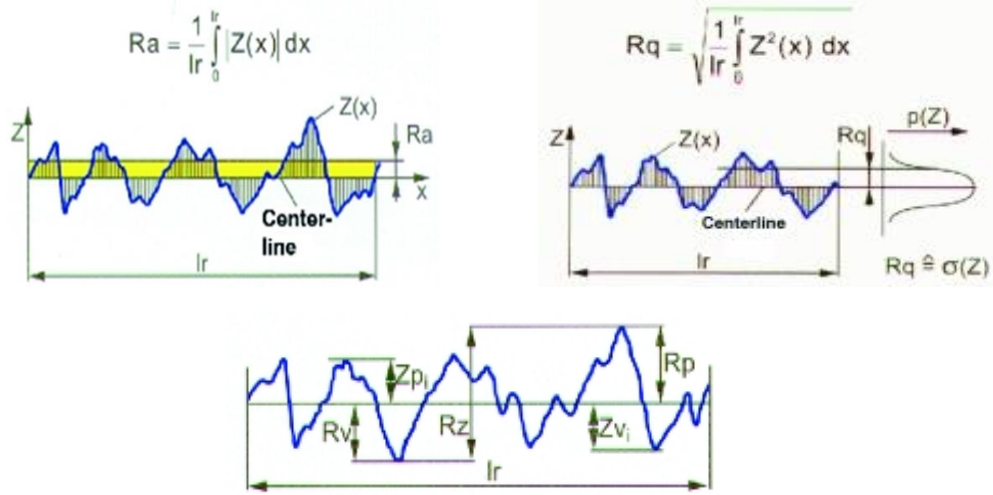
Dişli çarklarda hareketin iletimi esnasında zorlayıcı en büyük etken sürtünmedir ve bunun bir sonucu olarak dişlilerde aşınma meydana gelir. Dişli çarklarda sürtünmenin azaltılması ve aşınma direncinin artırılması, dişlilerin yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır.

Dişlilerin yüzey sertliğinin artması ve yüzey pürüzlülüğünün azalması, transmisyon verimliliğinin artmasına ve dişli çarkların ömrünün uzamasına imkan sağlamaktadır. Dişlilerde izin verilebilir gerilme değerlerini elde etmek için, aşınma ve eğilme kapasitesinin MQ (genel endüstriyel uygulamalar ve orta düzey güvenilirlik gereksinimi) ve ME (yüksek güvenilirlik gereksinimi) seviyesinde olması gerekmektedir ve minimum yüzey sertliği 58 HRC veya 655 HV istenir. Yüksek yüzey sertliği yorulma direncini azaltmaz ancak işlenirliği zorlaştırır ve aşınma dayanımı yüzey sertliğine bağlı olarak artar [18].

2.3. Yüzey Pürüzlülük Özellikleri

Pürüzlülük, işleyici bir ucun malzemenin yüzeyinde bir ucundan başlayıp diğer ucuna kadar temas ederek oluşturduğu pek çok düzensiz kısa dalga boylarıdır. Ortalama aritmetik pürüzlülük (R_a), maksimum pürüzlülük derinliği (R_z) ve ortalama kuadratik pürüzlülük (R_q) değerleri, yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde kullanılan parametre ölçüleridir [19].

R_a parametresi yüzey pürüzlülüğü profiline karşılık gelen y- koordinatlarının aritmetik ortalamasıdır. Aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün y-koordinatlarının merkez hattındaki ortalama aritmetik sapmayı tanımlamaktadır. R_z ; yüzey pürüzlülüğüne karşılık gelen y-koordinat aralıklarının ölçülmesine yol teşkil eder. R_z parametresi, beş ölçü bölümünden IR nin maksimum pürüzlülük derinliğine karşılık gelen değerlerin aritmetik ortalaması olarak hesaplanmakta ve bu parametre DIN 4768 e göre ortalama pürüzlülüğü ifade etmektedir. R_q parametresi ise yüzey pürüzlülüğü profiline karşılık gelen y-koordinatlarının kuadratik ortalaması olarak tanımlanır. R_q parametresi yüzey profilinin y-koordinatlarının merkez hattından ortalama kuadratik sapması olduğu için profilin ordinatlarından standart sapmayı ifade etmekte ve R_a parametresinden istatistiksel olarak daha önemli hale gelmektedir (Şekil 2.9) [19].



Şekil 2.9. Yüzey pürüzlülük değerlerinin şematik gösterimi [19].

Dişli çarklarda sürtünmenin azaltılması ve aşınma direncinin artırılmasında yüzey pürüzlülüğü önemli bir parametredir. Azalan yüzey pürüzlülüğü, dişlilerin transmisyon verimliliğini artırır ve ömürlerini uzatır. Genellikle dişlilerde çatlama, pürüzün, çentiğin olduğu bir noktada başlar. Kırılmalar çatlaktan başladığı ve pürüzler de çatlağın başlamasını sağladığı için önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça yükü taşıyacak olan temas yüzey alanı azaldığı için aşınma miktarı artar. Dişlilerde yüzey pürüzlülüğünün azalması dişlilerin daha sessiz çalışması bakımından da önemli bir konudur.

2.4. Isıl İşlemler Sonrası Dişli Çarklarda Boyutsal Değişim

Dişli tasarımında, doğru geometrinin oluşturulması dişlilerin sorunsuz çalışabilmesi bakımından çok önemlidir. Dişli üretim süreçlerinde meydana gelen çarpılmaların-boyutsal değişimlerin % 50 - 60'ı uygun olmayan materyal seçiminden kaynaklanır [20,21]. Dişli üretim süreçlerinde meydana gelen çarpılmaların-boyutsal değişimlerin % 20 - 40' ı ise fırın tipi, soğutma ortamı, soğutmanın üniformitesi ve işlem gazlarından etkilenir [22]. Atraszkiewicz ve ark., (2012), dişli çarklarda ısıl işlemler sonrası yüksek basınçlı gazla yapılan sertleştirme boyutsal değişimler üzerindeki etkilerini incelemiştir [23]. Dişli çarklarda ısıl işlem sonrası meydana gelen boyutsal değişimler önemlidir ve bu boyutsal değişimlerin ortadan kaldırılması ve yüzey kalitesinin artırılması için taşlama işlemi yapılmaktadır.

2.5. Metalografi

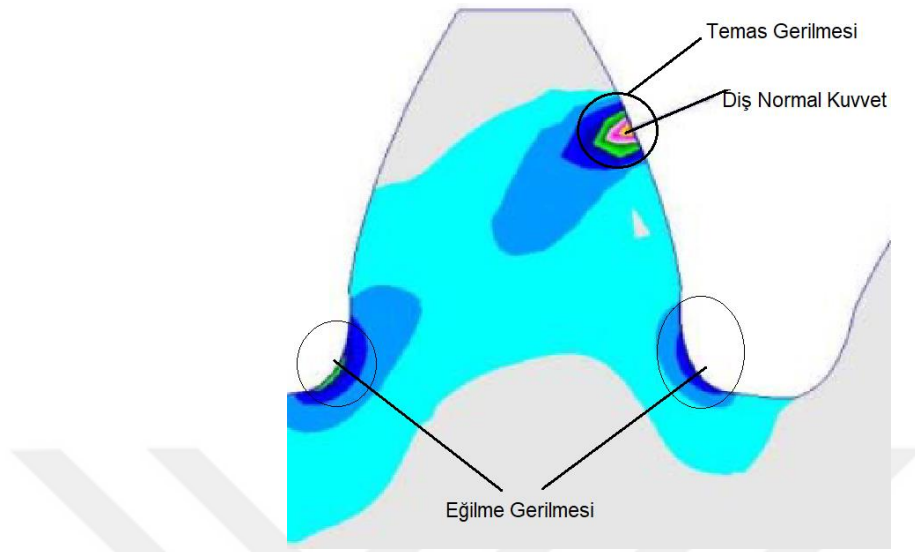
Metalografik muayene ile malzemelerin iç yapısı hakkında bilgi sahibi oluruz. Metalografik muayene bizlere malzemelerin geçirdiği işlemler, iç yapıdaki kusurlar, tane boyutları gibi konularda bilgi verir. Bu muayene sayesinde malzemenin ömrü, çalışma şartları gibi kritik bilgiler öngörülebilir olur. Isıl işlemler sonrası malzemenin mikroyapısında meydana gelen değişikliklerin malzemenin mekanik özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir. Bu nedenle ısı işlemler sonrası materyalin iç yapısının incelenmesi büyük önem arz eder.

2.6. Dişli Çarklarda Yorulma

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, yüklerin 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 gelebildiği bilinmektedir. Değişken gerilmelerin etkisi altındaki malzemenin iç yapısında meydana gelen değişikliklere yorulma ve bu makine elemanın kopuncaya kadar mukavemet gösterdiği süre ise ömür olarak adlandırılır [24]. Teorik olarak malzemenin sonsuz devir sayısında taşıyabileceği yük yorulma dayanımı olarak tanımlanmaktadır [25].

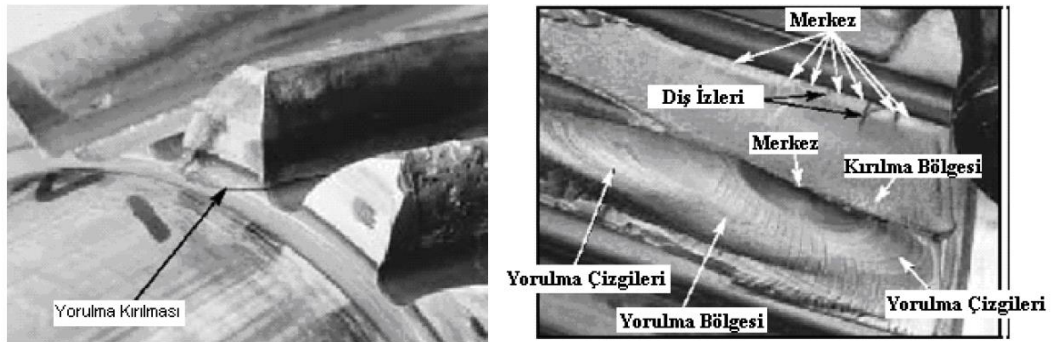
Yorulmaya genellikle içyapıda mevcut kusurlar civarında meydana gelen yerel gerilme birikimleri sebep olur. İçyapıda kusurlar civarında meydana gelen gerilmeler ortalama gerilmeden daha büyüktür. Gerilmeler nedeni ile yerel plastik şekil değiştirmeler meydana gelir. Dislokasyonlar hareket ederek kayma bantlarını oluştururlar. Bu bantlarda yüzeyde çıkıntılar ve çöküntülerin oluşmasının sebebi gerilme birikimleridir. Bu olaylar neticesinde malzeme pekleşir, gevrekleşir ve neticede mikro çatlaklar meydana gelir. Mikro çatlaklar zamanla ilerler ve bunun sonucunda ani yorulma kırılmalarına yol açar. Yorulmaya etkiyen faktörler; gerilme hali, geometri, malzeme türü, iç kusurların dağılımı ve boyutları, artık gerilmeler,

yüklemeye doğrultusu, tane büyüklüğü ve çevre koşullarıdır. Bir dişli çarkın maruz kaldığı gerilmeler şematik olarak Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Dişli çarkta gerilmelerin şematik dağılımını [18].

Dişlilerin ömrü genellikle çevrim sayısı ile tarif edilir. Değişken zorlanmalarda kopma içyapıdaki veya dış yüzeydeki bir süreksizlik noktasından başlar. Bu nokta civarında malzeme yorulur ve bir çatlak oluşur. Zamanla bu çatlak derinleşir, sonunda çatlak dışındaki bölgedeki gerilme dayanım sınırını aşarak elemanın birdenbire kırılmasına yol açar (Şekil 2.11). Ancak unutulmamalıdır ki materyallerin hasara uğramasında sadece yorulma değil, sürünme ve plastik deformasyon da rol oynar. Bunların birbirlerinden ayrılmasının zor olması nedeniyle, yorulma deneyleri adı altında elde edilen sonuçlar ömür değerleri olarak verilir.



Şekil 2.11. Dişlilerde yorulma kırılması [26].

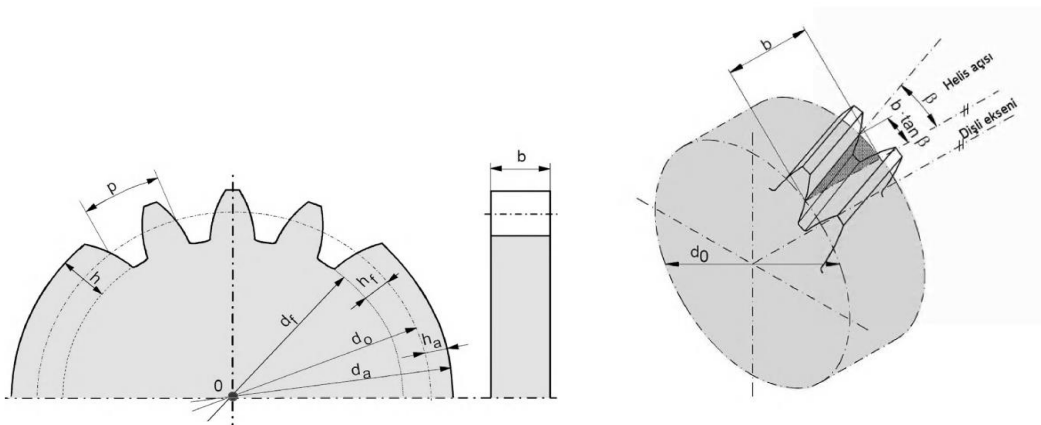
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışmada kullanılan AISI 8620 (DIN 21NiCrMo2/1.6523) ve AISI 5115 (DIN 16MnCr5/1.7131) çelikleri, dişli çark, dişli komponentleri ve shaft üretiminde kullanılan sementasyon çelikleridir. Denemeye alınan helisel dişli çark numunelerin kimyasal içerik analizleri BRUKER Q4 TASMAN metal spectrometre ile yapılmış ve analiz sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir. Helisel dişli çarklar Ege Redüktör firması tarafından malzemenin testere ile kesimi, tornada istenen çapa getirilmesi ve azdırma tezgahında dişlerin açılması adımları izlenerek üretilmiştir. Helisel dişlilerin hesaplanan geometrik değerleri Tablo 3.2’de, teknik çizimleri ise Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Denemeye alınan AISI 5115 (16MnCr5) ve AISI 8620 (21NiCrMo2) çeliklerin kimyasal kompozisyonu (wt %, Fe kalan)

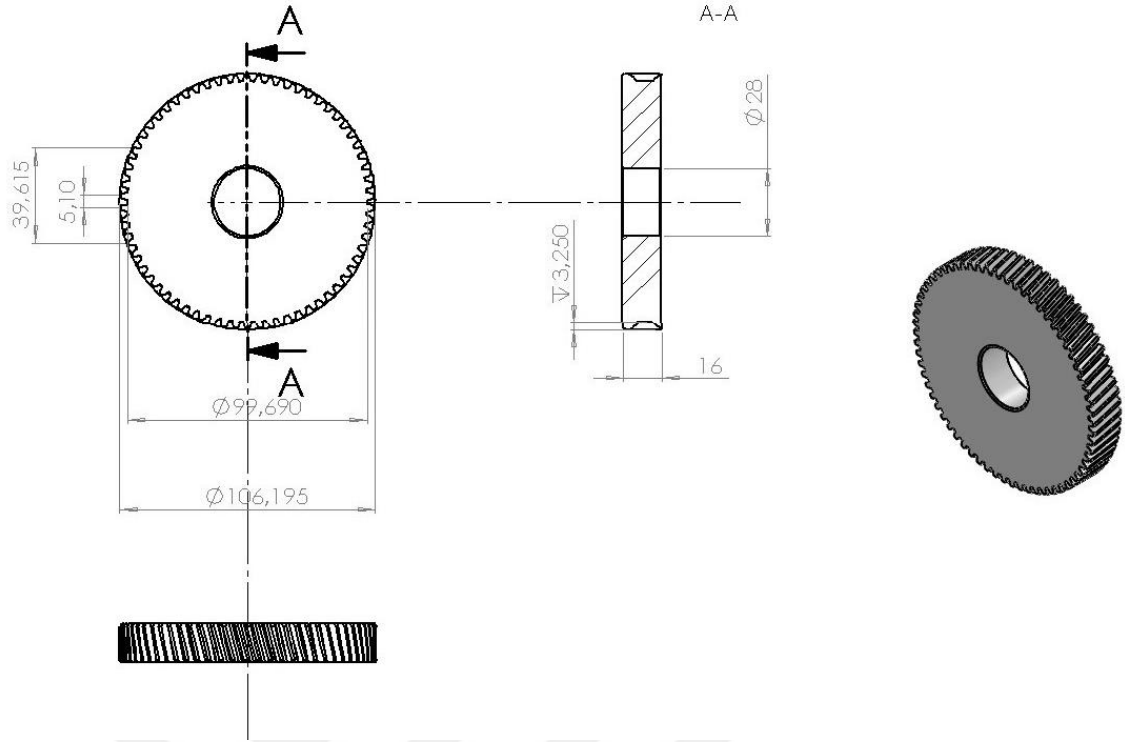
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Ti
21NiCrMo2	0.224	0.242	0.613	0.006	<0.150	0.402	0.223	0.406	0.187	0.034	0.0013
16MnCr5	0.193	0.298	1.106	0.006	<0.150	0.896	0.017	0.081	0.194	0.019	0.0017



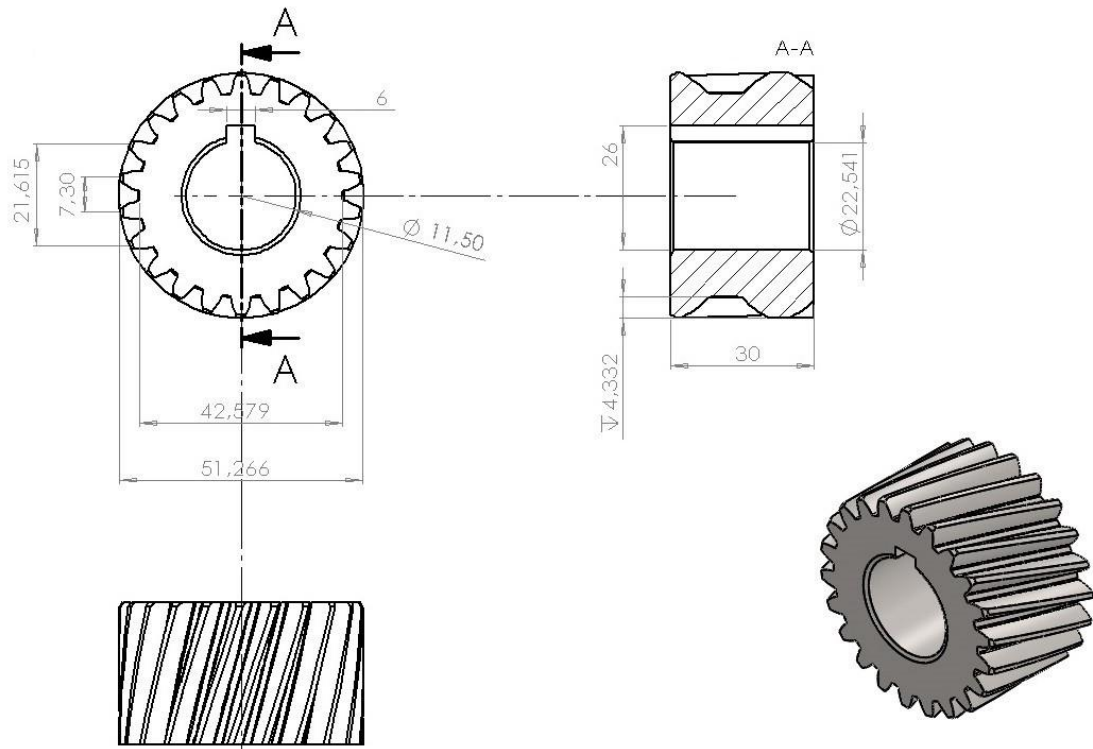
Şekil 3.1. Dişli çark üzerinde boyutların gösterimi

Tablo 3.2. Helisel dişli çarkların hesaplanan geometrik değerleri

Helisel Dişli Çark Elemanları	Simgesi	Formülü	Formülü	AISI 8620	AISI 5115
Helis Ayar Açısı	$\cos \beta$	$\cos \beta = m_n / m_t$	$\cos \beta = P_n / P_t$	16°	20°
Normal Adım	P_n	$P_n = \pi * m_n$	$P_n = P_t * \cos \beta$	4.71	6.28
Alın Adımı	P_t	$P_t = \pi * m_t$	$P_t = P_n / \cos \beta$	4.90	6.68
Normal Modül	m_n	$m_n = P_n / \pi$	$m_n = m_t \cos \beta$	1.5	2
Alın Modülü	m_t	$m_t = P_t / \pi$	$m_t = m_n / \cos \beta$	1.56	2.13
Bölüm Dairesi Çapı	d	$d = m_t * z$	$d = m_n * z / \cos \beta$	102.98	46.86
Diş Üstü Çapı	d_a	$d_a = d + 2m_n$	$d_a = m_f * (z + 2 \cos \beta)$	105.98	50.86
Diş Dibi Çapı	d_f	$d_f = d - 2,33 * m_n$	$d_f = m_t (z - 2,33 \cos \beta)$	99.48	42.20
Diş Yüksekliği	H	$h = 2m_n + c$	$h = 2,167m_t * \cos \beta$	3.25	4.33
Diş Sayısı	Z	$z = d / m_t$	$z = d \cos \beta / m_n$	66	22
İdeal Diş Sayısı	Z_i	$Z_i = z / \cos^3 \beta$	-	74.30	26.5
Eksenler Arası Mesafe	A	$a = \frac{d_1 + d_2}{2}$	$a = m_t (z_1 + z_2) / 2$	59.29	95.77
Dişlilerin Çalışma Boşluğu	C	$0,167m_n$	-	0.25	0.334
Diş Genişliği	B	$\sim 10m_n$	-	15	20



Şekil 3.2. AISI 8620 dişlisinin teknik resmi



Şekil 3.3. AISI 5115 dişlisinin teknik resmi

3.2. Metot

3.2.1. Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

Denemelerde helisel dişli çarklara uygulanan yüzey sertleştirme ısıl işlem koşulları Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3. İncelenen helisel dişli çarklara uygulanan ısıl işlemler

Isıl İşlem	Sıcaklık, Atmosfer potansiyeli ve süre	Sertleştirme ortamı	Temperleme (Sıcaklık/ Süre)
Plazma Nitrürleme	450 °C / 30 h, Gaz basıncı: 2 mbar Gaz oranları: (N ₂ :H ₂): 3:1 Isıtma 4 h ve soğutma 4 h vakum altında	-	-
Düşük Basıncılı Sementasyon (LPC)	Nötral ortamda numune sıcaklıkları 700 °C den 900 °C ye 45 dakikada çıkarıldı. Ortam basıncı: 700 mbar 1.adım: 350 ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 15 dakika+ 2. adım: 100 ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 10 dakika+ 3.adım (3 kez): 80 ml 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 (Double Quenching-çift sertleştirme: DQ)	1. Sertleştirme 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
	2. Sertleştirme 925 °C, 1.20 % C, 1 h 40 dakika+ 925 °C, 0.75 % C, 30 dakika+ 860 °C, 0.75 % C, 30 dakika.	Yağ / 60 °C	160 °C / 70 dakika

3.2.2 Sertlik Dağılım Profiline Belirlenmesi

Sertlik dağılım profiline belirlenmesinde, numuneler sırasıyla 80-120-240-400-800-1200-2000 kum SiC kağıtlar ve 6 µm elmas süspansiyonla parlatılmıştır. Sertlik 10 N yükün 10 saniye etki ettirilmesiyle Vickers sertlik ölçme (Emcotest Duroscan 20) cihazıyla (Şekil 3.4) dış yüzeyinden merkeze doğru yapılmıştır.



Şekil 3.4. Sertlik ölçme cihazı ve numune

3.2.3. Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Belirlenmesi

Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ-301 optik profilmetre ile belirlenmiştir. Ölçümler, 4 numune üzerinde ve her bir numune üzerinde üç farklı bölgede yapılarak ortalanmıştır.

3.2.4. Dişlilerde Boyutsal Değişimlerin Belirlenmesi

AISI 8620 dişliler için Mitutoyo marka 25-50 mm ölçüm aralıklı 0.001 mm hassasiyetli mikrometre kullanılarak ölçüm alınmıştır. AISI 5115 dişliler için Mitutoyo marka 0-25 mm ölçüm aralıklı 0.001 mm hassasiyetli mikrometre kullanılarak ölçüm alınmıştır. AISI 8620 dişlileri için $k = 9$ diş üzerinden, AISI 5115 dişlileri için $k=4$ diş üzerinden ölçüm alınmıştır.



Şekil 3.5. Dişli çarklarda ısıl işlemler sonrası boyut değişimlerinin ölçülmesi

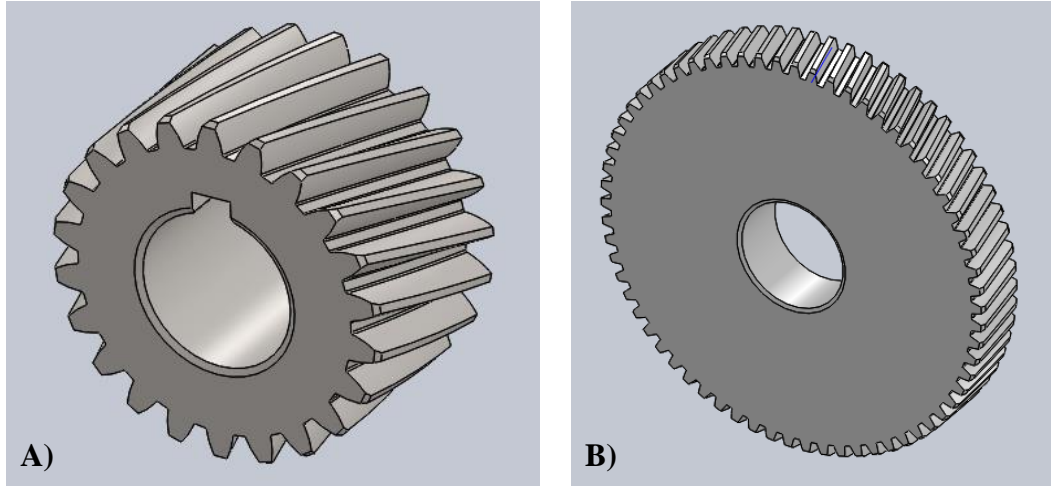
3.2.5. Metalografi Deneyleri

Mikroyapı fotoğrafları çekimi için numuneler sırasıyla 80-120-240-400-800-1200-2000 kum SiC kağıtlar ve 6 µm elmas süspansiyon kullanılarak parlatılmıştır ve takiben nital 2 (98 % ethyl alcohol, 2 % HNO₃) ile 10 saniye dağlanmıştır. Mikroyapı fotoğraflarının çekilmesinde Nikon ECLIPSE MA100 optik mikroskop ve Clemex Vision Lite bilgisayar programı kullanılmıştır.

3.2.6. Yorulma Analiz Metodu

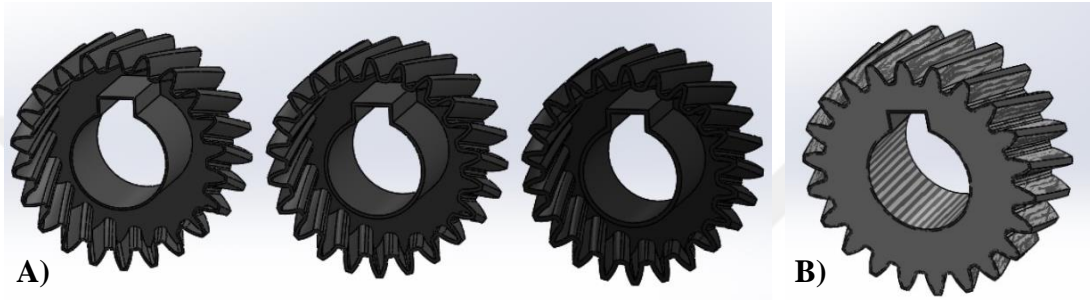
Farklı ısıl işlem türlerinin AISI 8620 ve AISI 5115 çelik dişli çarkların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırıldığı bu çalışmada yapılan yorulma analizlerinde Solidworks Premium 2015 SP 2.0 CAD programı kullanılmıştır.

Solidworks programında analizlerin yapılabilmesi için öncelikle katı model oluşturulması gerekmektedir. Toolbox'da ANSI Metrik formunda bulunan dişli çarklar bölümünden helisel dişli seçilmiş, analizi yapılacak numunelerin diş sayıları, modülleri, diş açıları ve dişli boyutları girilerek Şekil 3.6'da görülen katı modeller oluşturulmuştur.

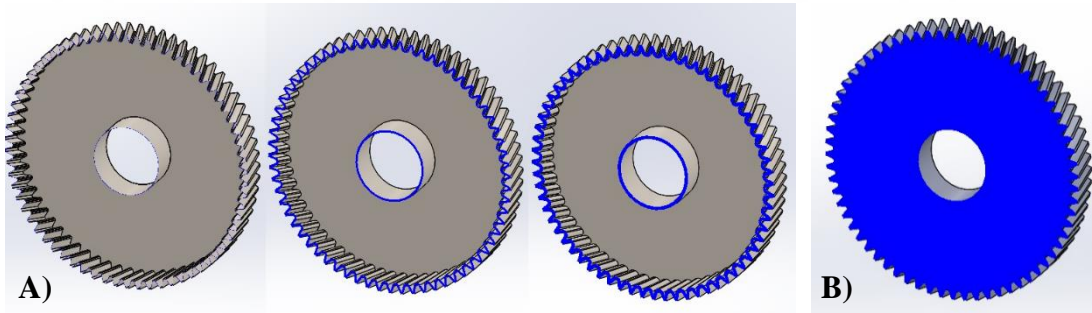


Şekil 3.6. AISI 5115 (A) ve AISI 8620 (B) çelik dişli çarkların katı modellemeleri

Farklı ısı işlemler sonucunda meydana gelen sert tabaka derinlik değerlerinden yararlanılarak katı modellere Şekil 3.7.A ve Şekil 3.8.A'da gösterilen kabuklar oluşturulmuş, Şekil 3.7.B ve Şekil 3.8.B'de gösterildiği gibi katı model ile birleştirmeleri yapılmıştır. Kabuk kalınlık değerleri olarak farklı ısı işlemlerde elde edilen sertlik derinlikleri girilmiştir. Sertlik derinlikleri; sertlik ölçme sonuçları, malzeme türü ve dişli kalite sınıfları için uygun olan prosedürlerin belirtildiği ANSI/AGMA 2001-D04'de sert tabaka kalınlığı ve toplam difüzyon tabakası kalınlığını hesaplama esaslarına göre belirlenmiştir [27].



Şekil 3.7. AISI 5115 dişlisi için oluşturulan kabuklar (A) ve katı model montajı (B)



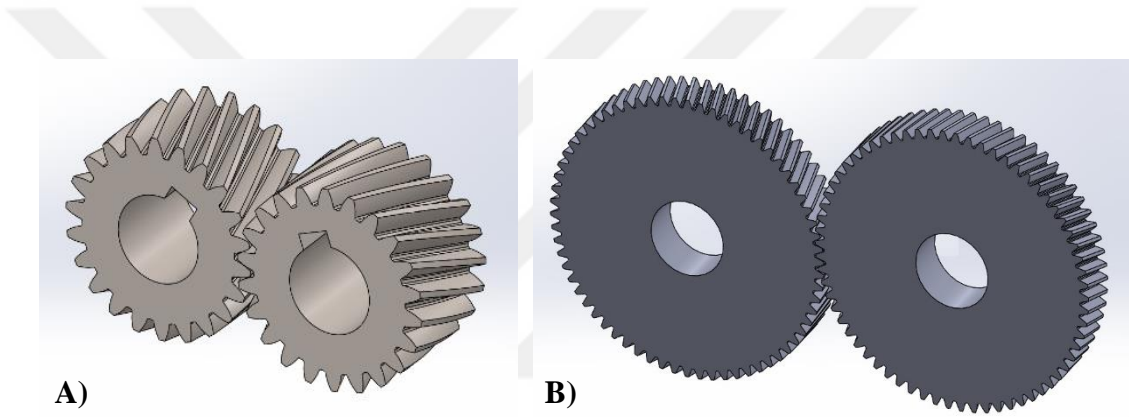
Şekil 3.8. AISI 8620 dişlisi için oluşturulan kabuklar (A) ve katı model montajı (B)

Ölçüm sonucu elde edilen yüzey sertlikleri (HV) denklem (3.1)'de yerine konularak [28] kabuklar için tanımlanması gereken akma gerilmesi değerleri MPa cinsinden bulunmuştur.

$$\text{Akma Gerilmesi} = - 90.7 + 2.876 \cdot \text{HV} \quad (3.1)$$

Oluşturulan kabuklara malzeme ataması yapılırken, numune malzemelerinin mekanik özellikleri esas alınarak hesaplamalardan elde edilen akma gerilmesi değerleri girilmiş ve malzeme kabuk özellikleri Solidworks Malzemeler bölümünde güncellenmiştir. Kabuk malzemelerine tanımlanan akma gerilmesi değerleri, ısı işlemlerde elde edilen sert tabaka kalınlıklarının ortalamaları alındıktan sonraki gerilme değerleri karşılıklıdır.

Numunelerin analizini gerçekleştirmek için çalışacakları eş dişlileri oluşturularak Şekil 3.9’da görüldüğü gibi montajla birleştirilmiştir. Eş dişli kabuk malzemelerinin gerilme değerleri de numunelerdeki gibi güncellenerek dişli grubu montajı tamamlanmıştır.



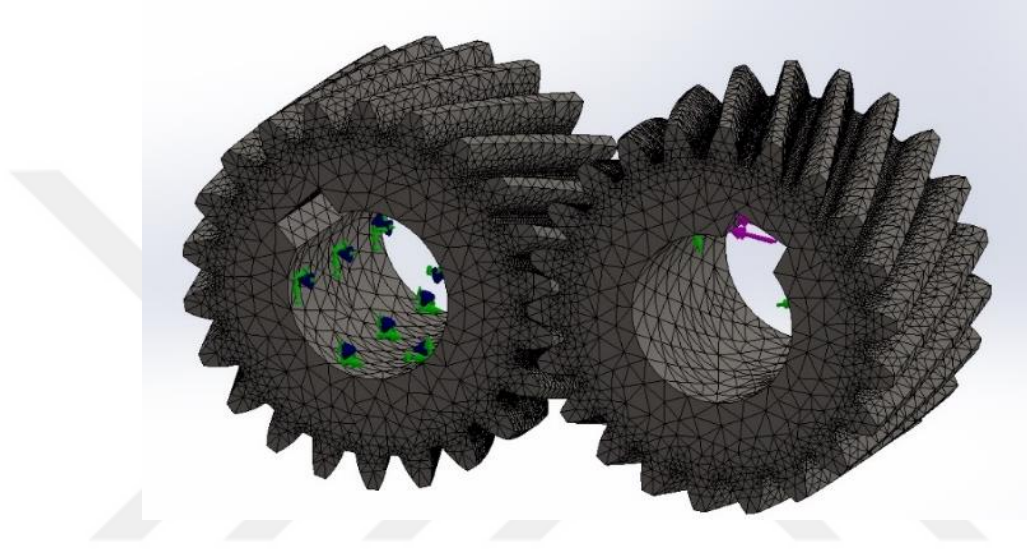
Şekil 3.9. AISI 5115 (A) ve AISI 8620 (B) çelik dişli çarkların eş dişli montajları

Yapılan dişli grup montajlarında eş dişlilerin göbeklerine sabitleme ve döner mafsallı özelliği atanmıştır. Tablo 3.4’ de görülen dişlilerin devamlı çalışma tork değerleri statik analizde saat yönünde etki ettirilerek yükleme işlemi yapılmıştır. Redüktör içerisinde çalışan bu dişlilerin firma tarafından verilen devamlı çalışmadaki devir sayıları yorulma analizi bölümünde ömür hesaplamasında kullanılmıştır.

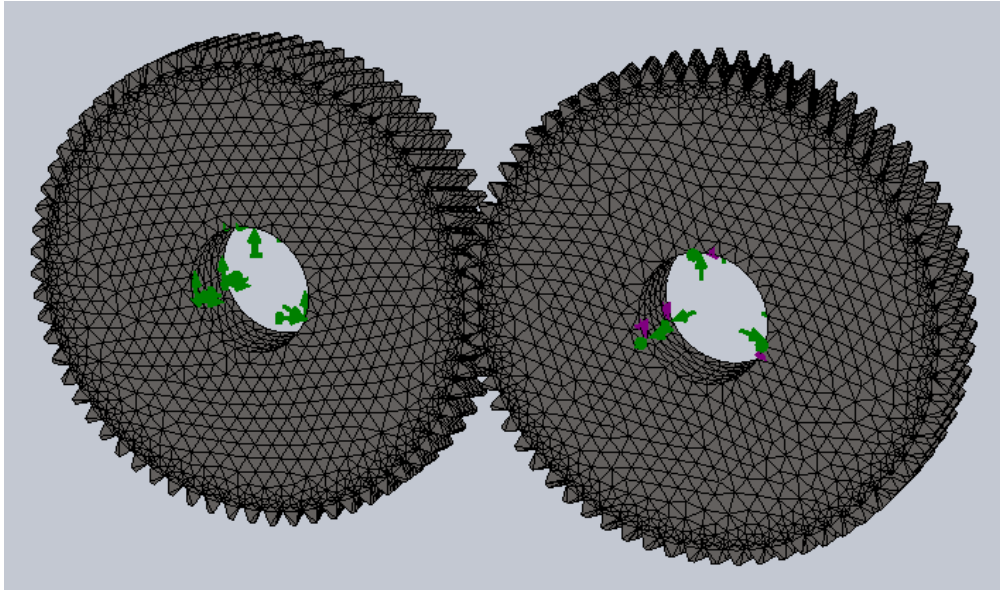
Tablo 3.4. Dişlilerin devamlı çalışma tork değerleri ve devirleri

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

Sonlu elemanlar yöntemlerinde, oluşturulan katı modelin geometrisine en yakın çizgilerle modelin gerçek çiziminin temsili *mesh* işlemi olarak adlandırılır. Oluşturulan dişli montaj gruplarının yüklemeleri yapıldıktan sonra mesh oluşturma bölümünden iyi bir mesh kalitesi elde etmek için; maksimum mesh aralığı 5 mm, minimum mesh aralığı 1 mm ve mesh ölçüm oranı 1.6 olacak şekilde mesh parametreleri girilerek mesh işlemi tamamlanmıştır. Statik analiz yapılarak bulunan statik analiz sonuçları ile yorulma analizine geçilmiştir.



Şekil 3.10. AISI 5115 mesh görüntüsü

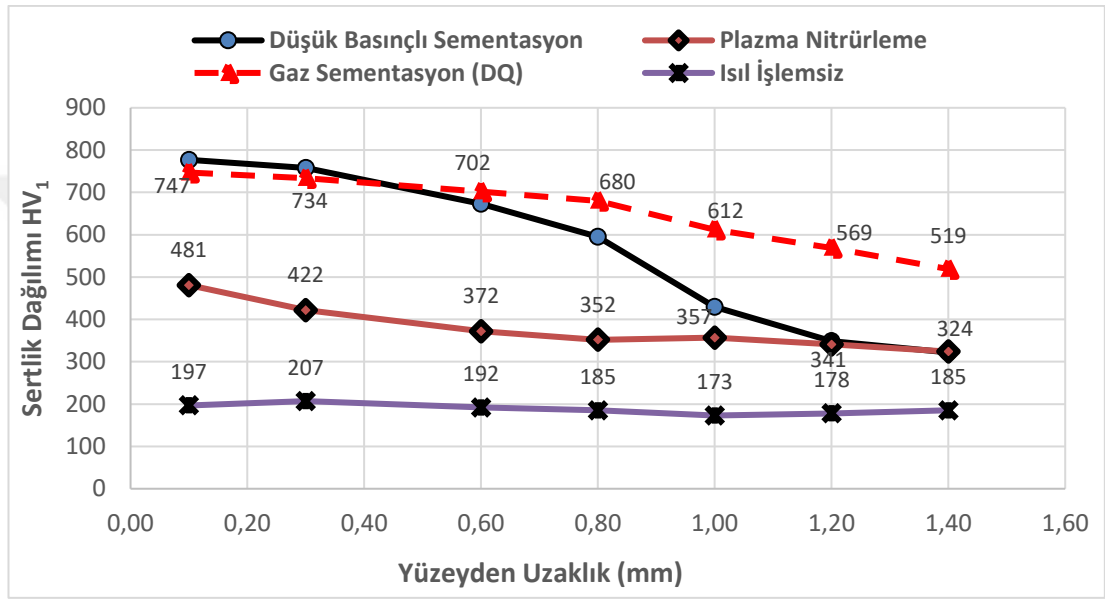


Şekil 3.11. AISI 8620 mesh görüntüsü

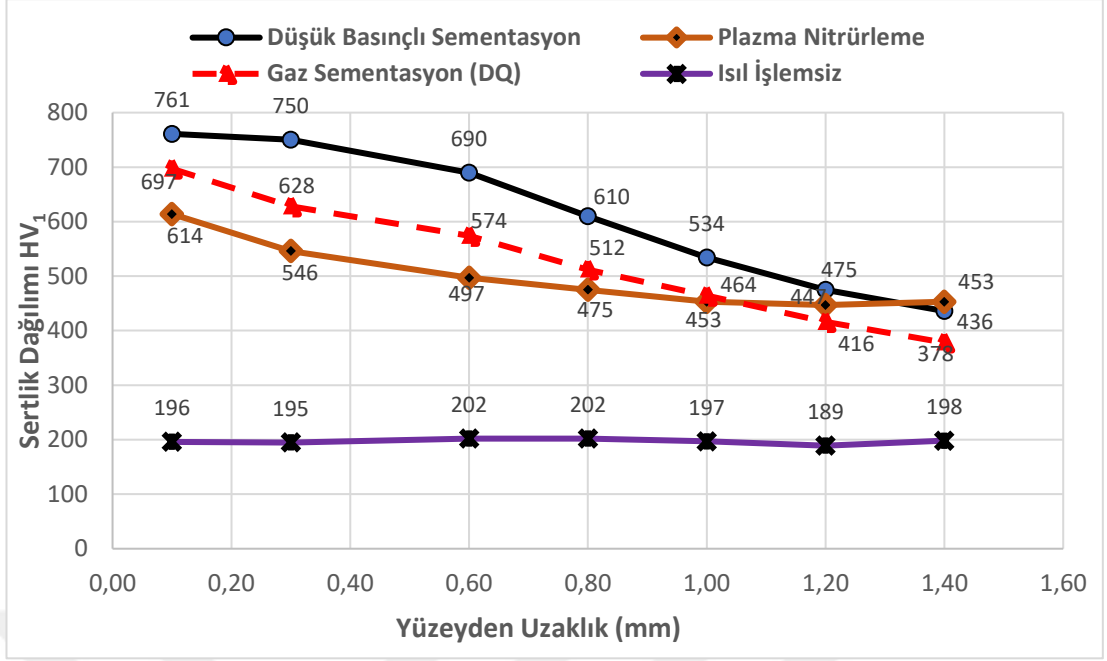
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Sertlik Dağılımı

Isıl işlem uygulanmamış ve ısıl işlem uygulanmış dişlilerin sertlik dağılım profilleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Yüzey sertleştirme yapılmış tüm numunelerde sertlik yüzeyden merkeze doğru azalmaktadır.



Şekil 4.1. AISI 8620 malzemedan yapılan dişlilerde ½ diş yüksekliğinde sertlik dağılım profili



Şekil 4.2. AISI 5115 malzemeden yapılan dişlerde $\frac{1}{2}$ diş yüksekliğinde sertlik dağılım profili.

Karbürleşmiş ve yüzeyi sertleştirilmiş dişlerde istenen yüzey sertlik değeri 58-64 HRC dir (kalite 2 ve kalite 3 dişliler için) [27]. Karbürleme işlemi 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. Nitrürlenmiş numunelerde ise toplam efektif sert tabaka kalınlığı esas alınmış ve toplam efektif sert tabaka kalınlığının belirlenmesinde, yaklaşık olarak sertliğin 400 HV ye düştüğü mesafe değeri dikkate alınmıştır [27]. Normal yüzey sertleştirme koşullarında, sementasyon yapılan dişlilerde önerilen efektif sert tabaka kalınlığı değer aralıkları ANSI/AGMA 2001-D04' de verilen formüllere göre; AISI 5115 çeliğinden yapılan ve modülü 2 olan helisel dişliler için 0.63 - 1.62 mm olarak bulunmuştur. AISI 8620 çeliğinden yapılan ve modülü 1.5 olan helisel dişli çarklar için ise bu değer aralığı 0.80 - 2.16 mm' dir. Nitrürleme yapılan dişlilerde önerilen minimum toplam sert tabaka kalınlığı değerleri, modülü 2 olan dişliler için 0.45 mm, modülü 1.5 olan dişliler için ise 0.48 mm olarak bulunmuştur [27].

Yukarıda bahsedilen yaklaşımlardan hareketle, AISI 5115 helisel dişlileri için efektif sert tabaka kalınlığı gaz sementasyonda 0.8 mm, LPC işleminde ise 1.05 mm olmuştur. Bu dişlilerde plazma nitrürleme işleminde toplam sert tabaka kalınlığının 1.4 mm olduğu tespit edilmiştir. Sert tabaka kalınlığı dişlinin temas ve kırılma direncini etkileyen önemli bir parametredir. Yeterli kalınlıkta sert tabaka kalınlığının elde edilmesi dişlinin temas direncinin geliştirilmesi bakımından oldukça önemlidir. Bu efektif sert tabaka derinlik değerleri LPC işleminde 55 dakikalık bir işlem süresinde elde edilirken, gaz karbürlemede işlem süresi 4 h, plazma nitrürlemede ise 30 h olmuştur (Tablo 3.3). LPC işlemi, incelenen diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine kıyasla, dişlilerde istenen yüzey sertlik ve efektif sert tabaka derinlik değerlerini çok daha kısa işlem sürelerinde sağlamıştır. Bir yandan uzun işlem süreleri sementasyonda efektif sert tabaka derinliğini arttırırken, diğer yandan tanelerin kabalaşmasına yol açmaktadır. Oysaki, tanelerin kabalaşması yük taşıma kapasitesini olumsuz etkilemektedir [18,30]. Plazma nitrürlemede, düşük işlem sıcaklığı dolayısıyla ferritin düşük çözünürlüğünün bir sonucu olarak sığ bir sert yüzey tabakası oluşmuştur ve sertliğin difüzyon bölgesi dahilinde hızlıca düştüğü görülmüştür (Şekil 4.2).

AISI 8620 helisel dişlileri için ise efektif sert tabaka kalınlığı değerleri gaz sementasyon (DQ) işleminde 1.4 mm, LPC işleminde ise 0.9 mm olmuştur. Plazma nitrürleme yapılmış dişlilerde, toplam sert tabaka kalınlığının 0.4 mm olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.1). Gaz karbürlemede işlem süresinin uzaması ve iki kez sertleştirme uygulanması efektif sert tabaka derinliğini arttırmıştır. Bu çelikte, LPC işlemi yeterli yüzey sertliği ve efektif sert tabaka derinliğini çok kısa işlem süresinde sağlamıştır (Tablo 3.3 ve Şekil 4.1).

Literatürden görüleceği üzere, düşük basınçlı sementasyon (LPC) işleminde, proses gazının ortama fasıllı olarak verilmesi ve difüzyon süreci % C konsantrasyonunun yüzeyde yoğunlaşmasını önleyerek sementasyon derinliğinin oluşumuna ve % C un iç yapıya difüzyonuna olanak sağlar. İlave olarak, LPC işleminde oksidasyon tabakasının oluşmaması yüzeyde homojen sertlik dağılımına imkân sağlar. Gaz karbürlemede, yüzeyde aşırı karbon konsantrasyonu kalıntı östenit oranını artırır ve bu da sertliği bir miktar düşürür. Literatür sonuçlarıyla uyumlu olarak, her iki çelikten yapılan dişlilerde, LPC işleminin gaz sementasyona göre çok daha kısa işlem sürelerinde daha yüksek bir yüzey sertliği ve efektif sert tabaka derinliği sağladığı görülmüştür.

Nitrüleme işleminde dişlilerde minimum iç kısımların sertliğinin ise 28 HRC (kalite 2) ve 32 HRC (kalite 3) olması önerilmektedir [27]. Yapılan plazma nitrüleme işlemi bu koşulları sağlamıştır.

4.2. Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Isıl işlem uygulanmamış ve ısıl işlem uygulanmış dişlilerin yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarının ortalamaları Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’ de verilmiştir.

Tablo 4.1. AISI 5115 çeliğinden üretilen dişli çarkların yüzey pürüzlülük değerleri

Isıl İşlem	Ortalama Ra (μm)	Ortalama Rz (μm)	Ortalama Rq (μm)
Isıl işlem öncesi			
Ortalama	1.885	11.425	2.330
Standart Sapma	± 0.247	± 0.106	± 0.354
Düşük Basıncılı Sementasyon			
Ortalama	1.973	13.593	2.525
Standart Sapma	± 0.279	± 3.427	± 0.389
Plazma Nitrüleme			
Ortalama	2.165	13.678	2.685
Standart Sapma	± 0.841	± 7.585	± 1.081
Gaz Sementasyon			
Ortalama	1.380	9.030	1.725
Standart Sapma	± 0.910	± 5.616	± 1.128

Tablo 4.1 ve 4.2’ den görüldüğü üzere, en düşük yüzey pürüzlülük değerleri gaz karbürleme işleminde elde edilmiştir. Ancak dişlilerde istenen asgari yüzey pürüzlülük değerlerini sağlayabilmek için ($Ra \leq 0.3 \mu\text{m}$), tüm ısıl işlemler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin, ısıl işlem sonrası yüzey işleme işlemlerini gerekli kıldığı görülmektedir.

Tablo 4.2. AISI 8620 çeliğinden üretilen dişli çarkların yüzey pürüzlülük değerleri

Isıl İşlem	Ortalama Ra (μm)	Ortalama Rz (μm)	Ortalama Rq (μm)
Isıl İşlem Görmemiş			
Ortalama	1.903	11.047	2.357
Standart Sapma	± 0.373	± 3.185	± 0.475
Düşük Basıncılı Sementasyon			
Ortalama	2.190	14.153	2.848
Standart Sapma	± 1.162	± 7.519	± 1.598
Plazma Nitrüleme			
Ortalama	1.948	10.805	2.360
Standart Sapma	± 0.190	± 1.671	± 0.281
Gaz Sementasyon (DQ)			
Ortalama	1.643	9.603	2.030
Standart Sapma	± 0.509	± 4.443	± 0.666

Dişlilerin yüzey pürüzlülüğünün artması, sürtünmenin artmasına dolayısıyla transmisyon verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır. Sürtünmenin artması diş yüzeylerinde sıcaklığın artmasına, buda yağların akıcılığını azaltarak aşınma riskini arttırmaktadır.

4.3. Isıl İşlem Sonrası Dişli Çarklarda Meydana Gelen Boyutsal Değişimler

Isıl işlem sonrası dişli çarklarda meydana gelen boyutsal değişimlerin “Wk” ölçüm sonuçlarının ortalamaları Tablo 4.3 ve 4.4 ’de verilmiştir.

Tablo 4.3. AISI 5115 dişli çarklarda meydana gelen boyutsal değişim değerleri

AISI 5115 için Wk = 4 (mm)			
Isıl İşlem Görmemiş	Plazma Nitrüleme	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon
Ortalama = 21.615	Ortalama = 21.643	Ortalama = 21.603	Ortalama = 21.676
Standart Sapma ± 0.010	Standart Sapma ± 0.021	Standart Sapma ± 0.021	Standart Sapma ± 0.021

Tablo 4.4. AISI 8620 dişli çarklarda meydana gelen boyutsal değişim değerleri

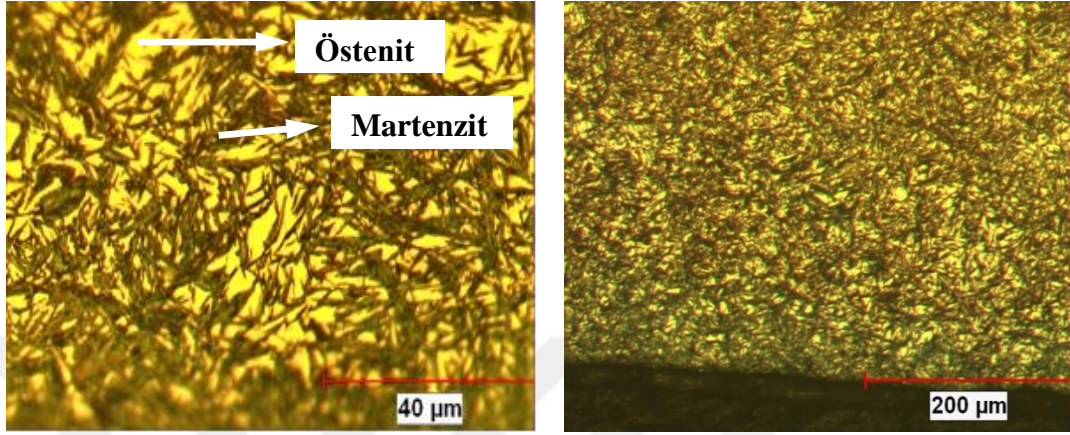
AISI 8620 için $W_k = 9$ (mm)			
Isıl İşlem Görmemiş	Plazma Nitrüleme	Düşük Basıncılı Sementasyon	Gaz Sementasyon (DQ)
Ortalama = 39.615	Ortalama = 39.606	Ortalama = 39.643	Ortalama = 39.656
Standart Sapma ± 0.037	Standart Sapma ± 0.012	Standart Sapma ± 0.031	Standart Sapma ± 0.031

Tablo 4.3' den görüleceği üzere, AISI 5115 dişlilerinde en büyük boyutsal değişim gaz karbürleme işleminde meydana gelmiştir, bunu plazma nitrüleme ve LPC işlemleri izlemiştir. AISI 8620 dişlilerinde ise en büyük boyutsal değişim gaz karbürleme (DQ) işleminde meydana gelmiş olup, bunu LPC ve plazma nitrüleme işlemleri izlemiştir (Tablo 4.4). Boyutsal değişim ve çarpılmaların, dişlinin geometrisi, malzemenin karbon ve alaşım içeriğinden, karbürleme atmosferinin karbon içeriğinden, karbürleme sıcaklığı ve sertleştirme sıcaklığı, sertleştirme ortamı, sıcaklığı ve ortamın karıştırılması gibi parametrelerden etkilendiği bilinmektedir [29]. Gaz karbürlemede yüksek işlem sıcaklıklarında uzun işlem süreleri tanelerin kabalaşmasına neden olarak bu sonuca yol açmıştır [30]. Isıl işlemler sonrasında dişlilerde meydana gelen distorsiyonların giderilmesi üreticilere ek maliyet getirirken, diğer yandan distorsiyonlar sonucu meydana gelen kalıcı gerilmeler dişlilerin yorulma ömrünü olumsuz etkilemektedir.

4.4. Mikroyapı Fotoğrafları

Numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.3 ve 4.9' da verilmiştir. Sementasyon işlemi görmüş numunelerde yüzey karbonca zengin martenzit ve bir miktar artık östenitden (γ Fe- yüzey merkezli kübik faz) oluşmaktadır. Sementasyon işlemleri sonucunda yüzeyde karbon oranının yükselmesi nedeniyle yüzey katmanlarda yapı plaka martenzitdir. Yüzey altı, yüzeye göre daha düşük karbon içeren martenzit ve ince beynitik yapıdan oluşmaktadır. Yüzeyden merkeze doğru karbon içeriği ve artık östenit miktarı azalmaktadır. Plazma nitrüleme işlemi sonucunda yüzeyde ϵ ve γ' nitritlerden oluşan birleşik katman (beyaz katman)'ın kalınlığı AISI 5115 dişlileri için yaklaşık olarak 6 - 7.7 μm aralığında, AISI 8620 dişlileri için ise 7 - 7.7 μm aralığında değişmiştir [27].

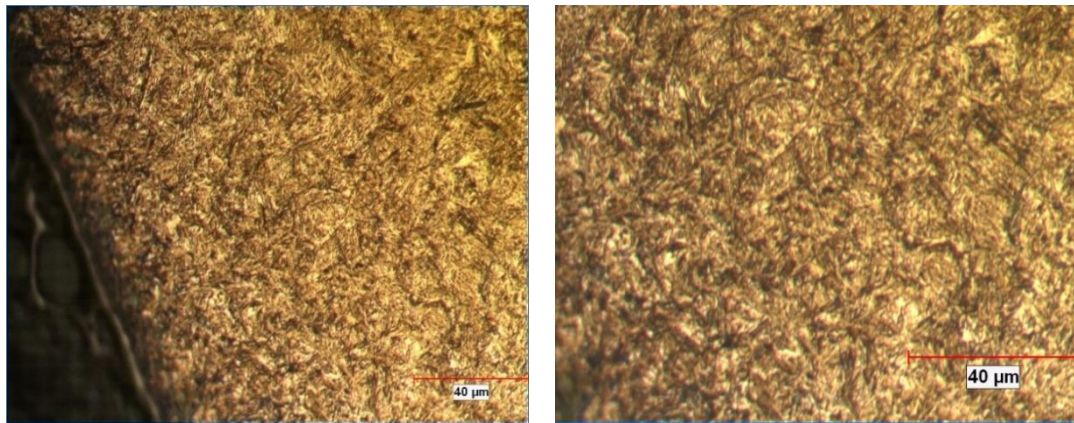
Nitrüleme işlemi sonrasında, dişlilerde maksimum beyaz tabaka kalınlığının 0.0008 (kalite 2) ve 0.0005 (kalite 3) inch olması önerilmektedir [27]. Yapılan plazma nitrüleme işlemi bu koşulları sağlamıştır. Isıl işlem görmemiş numunelerde yapı ferrit ve perlitten oluşmaktadır (Şekil 4.6).



LPC, yağda serleştirme 70 °C,
temperleme 200 °C / 120 dakika,
taban derinliği bölgesi-diş yüzeyi

LPC, yağda sertleştirme / 70 °C,
temperleme 200 °C / 120 dakika,
diş dibi

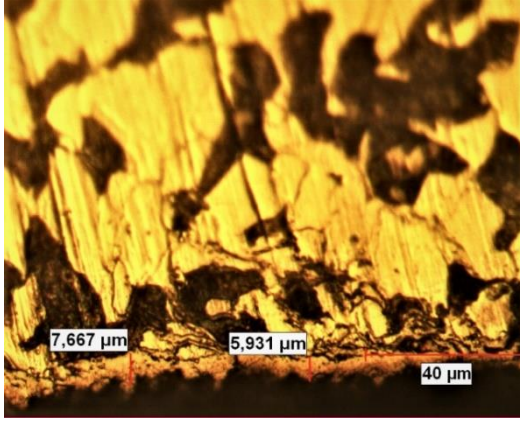
Şekil 4.3. Düşük basınçlı sementasyon (LPC) yapılmış AISI 5115 helisel dişli çark numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2).



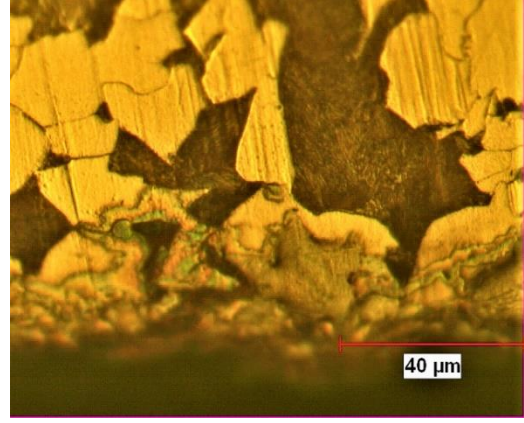
Sementasyon,
yağda sertleştirme / 100 °C,
temperleme 170 °C / 120 dakika

.Sementasyon,
yağda sertleştirme / 100 °C,
temperleme 170 °C / 120 dakika

Şekil 4.4. Sementasyon işlemi yapılmış AISI 5115 helisel dişli çark numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2).

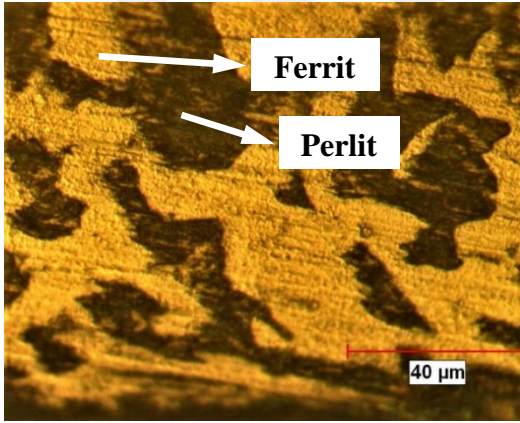


Plazma nitrüleme,
taban derinliği bölgesi-diş yüzeyi

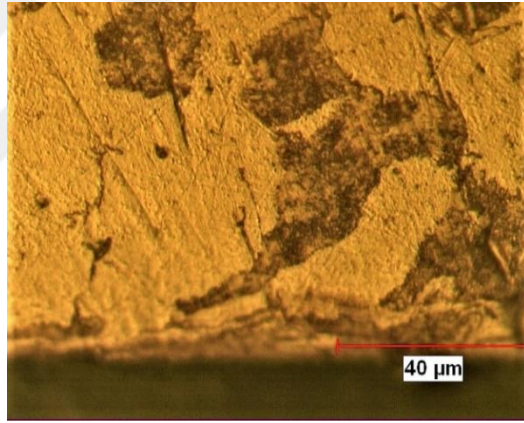


Plazma nitrüleme,
diş dibi

Şekil 4.5. Plazma nitrüleme işlemi yapılmış AISI 5115 helisel dişli çark numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2).

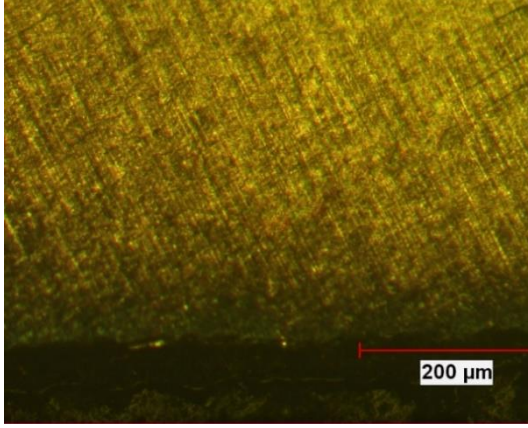


AISI 5115; Isıl işlem görmemiş, diş
yüzeyi

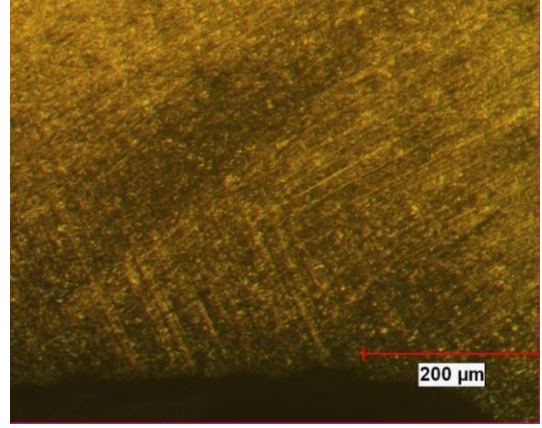


AISI 8620; Isıl işlem görmemiş, diş
yüzeyi

Şekil 4.6. Isıl işlem görmemiş helisel dişli çark numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2).

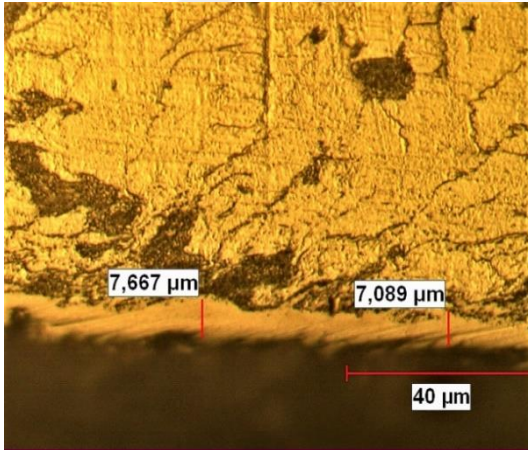


LPC, Yağda sertleştirme / 70 °C,
temperleme 200 °C / 120 dakika,
taban derinliği bölgesi-diş yüzeyi

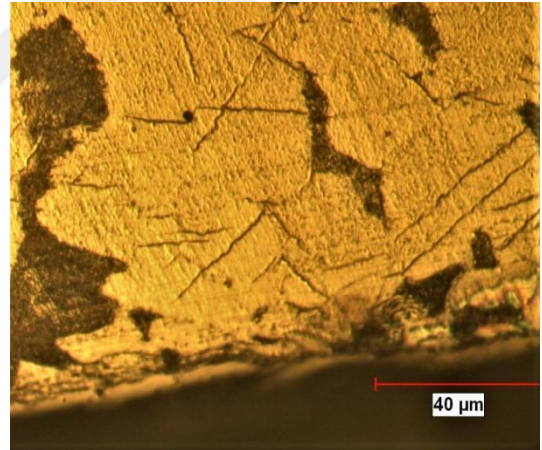


LPC, Yağda serleştirme / 70 °C,
temperleme 200 °C / 120 dakika,
diş dibi

Şekil 4.7. Düşük basınçlı sementasyon (LPC) işlemi yapılmış AISI 8620 dişli numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2).

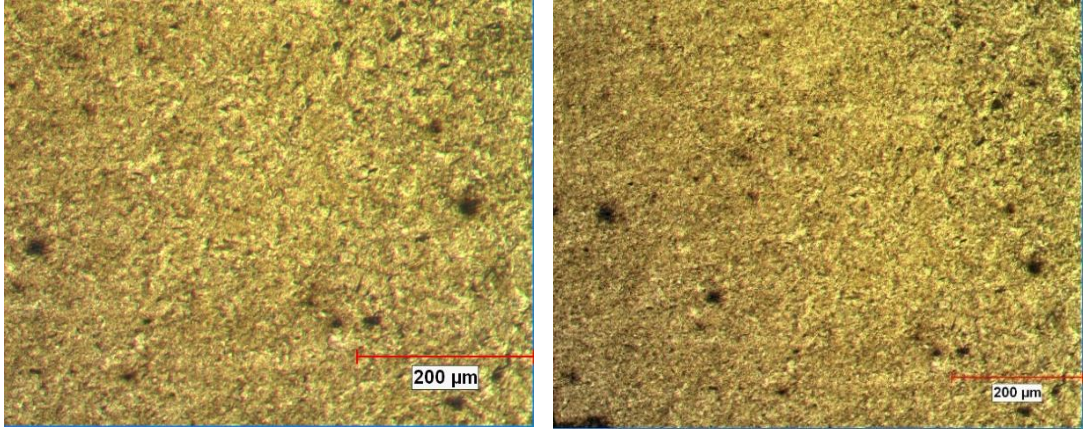


Plazma nitrürleme,
taban derinliği bölgesi-diş yüzeyi



Plazma nitrürleme,
diş dibi

Şekil 4.8. Plazma nitrürleme yapılmış AISI 8620 çelik numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2).



Gaz Sementasyon (DQ)
diş dibi

Gaz Sementasyon (DQ)
taban derinliği bölgesi-diş yüzeyi

Şekil 4.9. Sementasyon (DQ) yapılmış AISI 8620 çelik numunelerin mikro yapı fotoğrafları (Dağlama: Nital 2).

4.5. Yorulma Analizleri

4.5.1. AISI 5115 Dişlisi için Yorulma Analizi

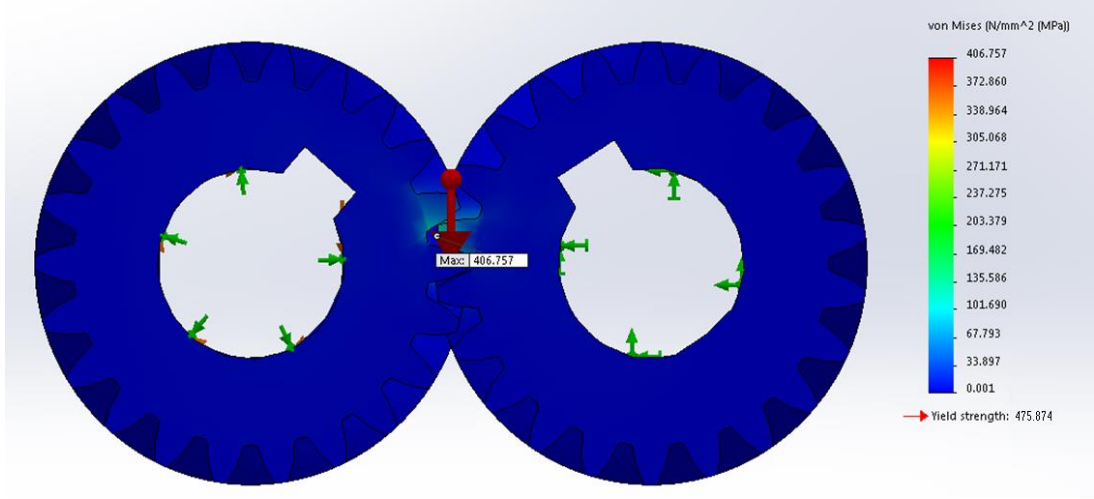
Yorulma analizi metodu bölümünde verilen denklem (3.1) 'den yararlanılarak elde edilen akma gerilmesi değerleri Tablo 4.5 'de verilmiştir.

Tablo 4.5. AISI 5115 numunelerinin ölçme derinliğine göre akma gerilmesi değerleri

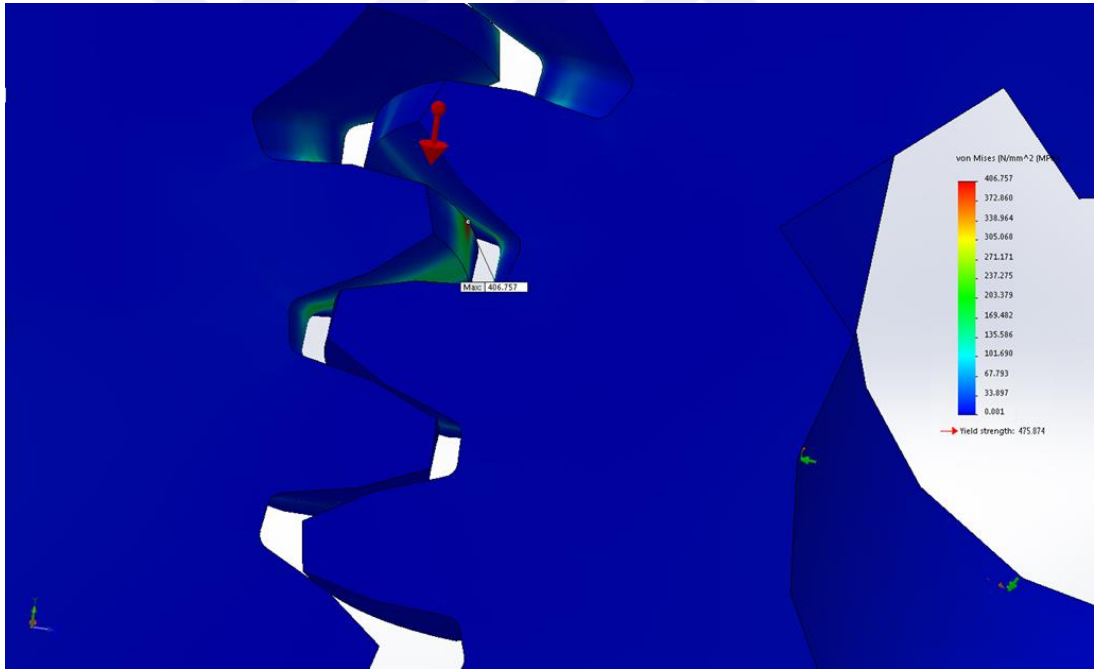
Ölçüm Derinliği (mm)	Ham Numune (MPa)	Düşük Basıncılı Sementasyon (MPa)	Plazma Nitrüleme (MPa)	Gaz Sementasyon (MPa)
0.10	472.9	2097.9	1675.1	1913.8
0.30	470.1	2066.3	1479.5	1715.4
0.60	490.2	1893.7	1338.6	1560.1
0.80	490.2	1663.6	1275.4	1381.8
1.00	475.8	1445.1	1212.1	1243.7
1.20	452.8	1275.4	1194.8	1105.7
1.40	478.7	1163.2	1212.1	996.4

Statik analiz sonucu elde edilen ısıtılmış işlem görmemiş numunelerin von Mises gerilme sonuçları Şekil 4.10' da ve von Mises akma gerilme değerleri Tablo 4.6' da verilmiştir.

Şekil 4.11' de dişliler üzerinde meydana gelen maksimum gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeler gösterilmiştir. Eş dişli gruplarının çalışması esnasında zorlanma bölgeleri diş dibi ve diş üstü olarak görülmektedir. Bu bölgeler renk skalasında kritik bölgeyi ifade eden kırmızı renkle gösterilmiştir.



Şekil 4.10. AISI 5115 dişlisi ısıtılmış numunenin von Mises gerilme sonuçları.



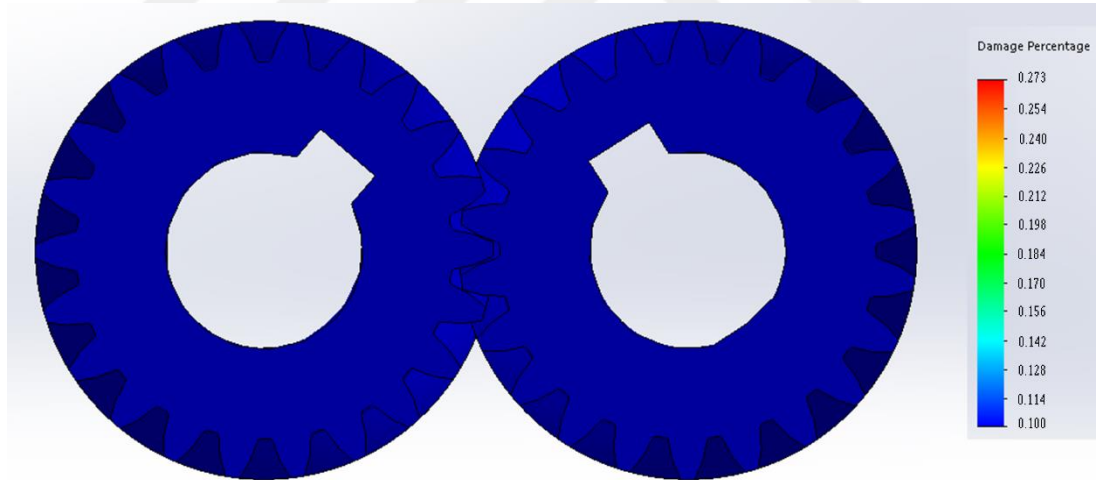
Şekil 4.11. AISI 5115 dişlisi ısıtılmış numunenin von Mises maksimum gerilme noktası.

Tablo 4.6. AISI 5115 dişlileri von Mises akma gerilme değerleri

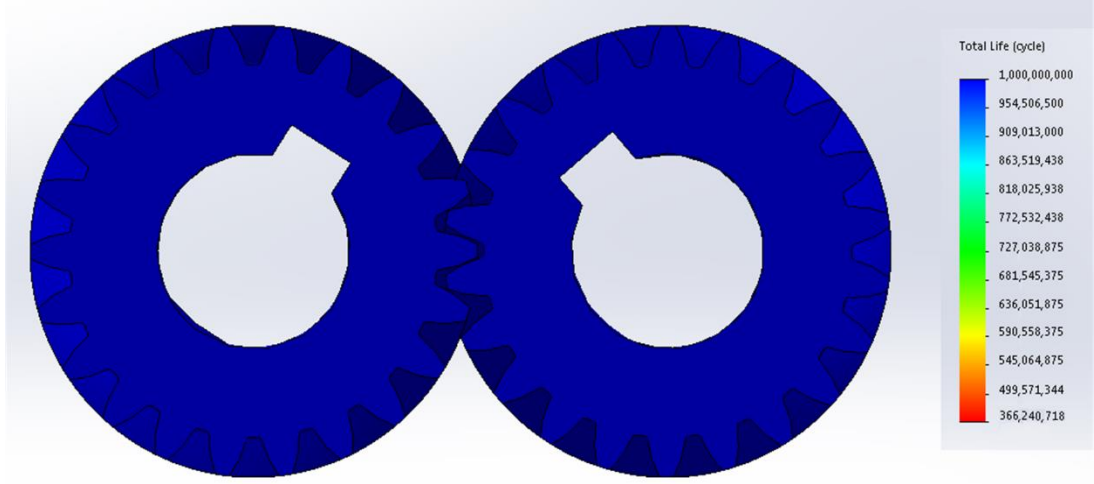
	Isıl İşlem Görmemiş (MPa)	Düşük Basıncılı Sementasyon (MPa)	Plazma Nitrürleme (MPa)	Gaz Sementasyon (MPa)
AISI 5115	475.87	1833.34	1341.13	1642.80

Tablo 4.6 'da elde edilen akma gerilmeleri farklı ısıl işlemler sonucu elde edilen yüzey sertliği ve sert tabaka kalınlığı ile doğru orantılı olarak değişmiştir.

Statik analizleri yapılan dişlilere tekrarlı yükleme koşulu seçilerek yorulma analizi yapılmıştır. Isıl işlem görmemiş numunelere yapılan analiz sonucunda 1,000,000 turdaki hasar yüzdeleri Şekil 4.12 'de gösterilmiş, ömür tur sayıları ise Şekil 4.13 'de gösterilmiştir.

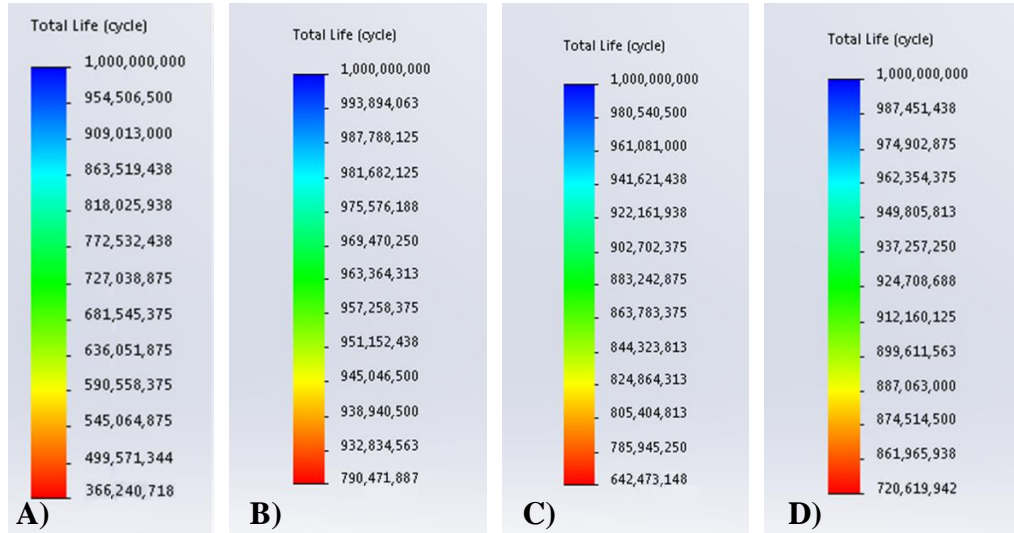


Şekil 4.12. AISI 5115 dişlisi ısıl işlem görmemiş numunenin 1,000,000 turdaki hasar yüzdesi.



Şekil 4.13. AISI 5115 dişlisi ısıtılmış numunenin ömür tur sayısı.

Yorulma analizleri tüm numuneler için yapılarak Şekil 4.14 'de bulunan ömür tur sayıları elde edilmiştir. Elde edilen ömür tur sayıları dişlilerin çalışma devri, uygulanan ısıtma işlemi, uygulanan ısıtma sonucu elde edilen sert tabaka kalınlığı ve yüzey sertliğine bağlı değişmiştir.



Şekil 4.14. AISI 5115; ısıtılmış numune (A), düşük basınçlı sementasyon (B), plazma nitürleme (C) ve gaz sementasyon (D) numunelerinin ömür tur sayıları

Grafiksel olarak gösterilen ömür tur sayıları Tablo 4.7 'de net olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.7. AISI 5115 dişlileri yorulma analizi sonucu ömür tur sayıları

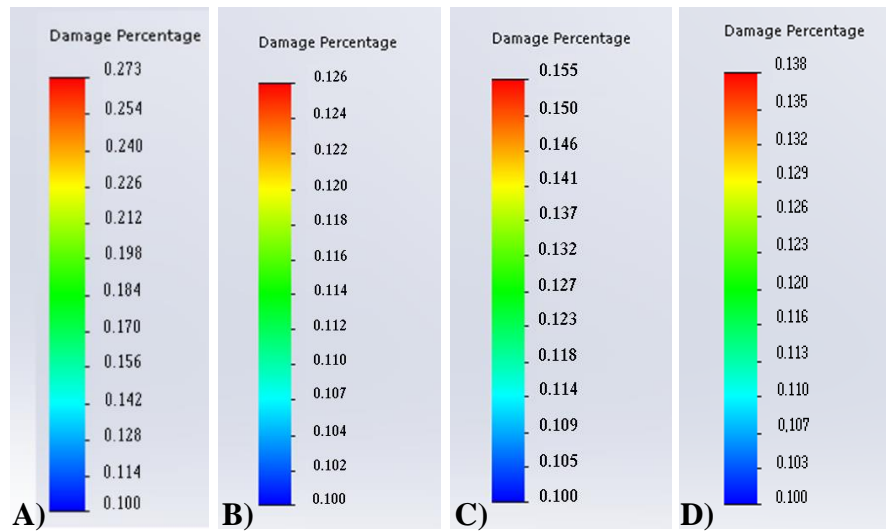
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Plazma Nitrüleme	Gaz Sementasyon
AISI 5115	366,240,718	790,471,887	642,473,148	720,619,942

Dişlilerin devamlı çalışma devirleri kullanılarak ömürleri saat cinsinden hesaplanmış ve Tablo 4.8 'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8. AISI 5115 dişlilerinin yorulma analizi sonucu ömür saat değerleri

	Isıl İşlem Görmemiş (saat)	Düşük Basıncılı Sementasyon (saat)	Plazma Nitrüleme (saat)	Gaz Sementasyon (saat)
AISI 5115 (1400 rpm)	4360	9410.4	7648.5	8578.8

Tüm numunelerin 1,000,000 turdaki hasar yüzdeleri Şekil 4.15 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. AISI 5115; ısıl işlem görmemiş (A), düşük basınçlı sementasyon (B), plazma nitrüleme (C) ve gaz sementasyon (D) numuneleri hasar yüzdeleri.

Değişken tur sayıları girilerek bulunan hasar yüzdeleri Tablo 4.9 'da sunulmuştur. Hasar oranları dişli ömrü ile ters orantılı olarak değişmektedir. Hasar oranlarındaki azalış dişli ömürlerinin artmasına neden olmuştur.

Tablo 4.9. AISI 5115 dişlilerinin yorulma analizi sonucu hasar yüzdeleri

	Ham Numune	Düşük Basıncı Sementasyon	Plazma Nitrüleme	Gaz Sementasyon
Tur Sayıları	AISI 5115	AISI 5115	AISI 5115	AISI 5115
1,000,000	0.273	0.126	0.155	0.138
5,000,000	1.365	0.632	0.778	0.693
10,000,000	2.730	1.265	1.556	1.387
20,000,000	5.460	2.530	3.112	2.775
50,000,000	13.652	6.325	7.782	6.938
100,000,000	27.304	12.650	15.564	13.876
250,000,000	68.261	31.626	38.912	34.692
366,240,718	100.0	46.331	57.008	50.823
500,000,000	-	63.253	77.824	69.384
642,473,148	-	81.277	100.0	89.155
720,619,942	-	91.163	-	100.0
790,471,887	-	100.0	-	-

4.5.2. AISI 8620 Dişlisi için Yorulma Analizi

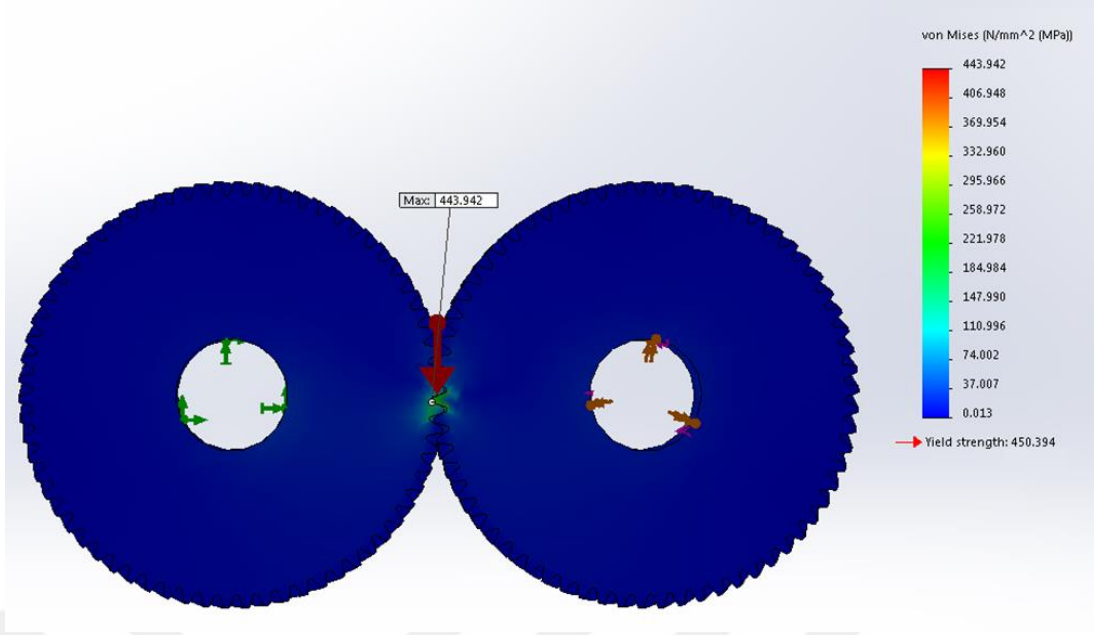
Yorulma analizi metodu bölümünde verilen denklem (3.1) 'den yararlanılarak elde edilen akma gerilmesi değerleri Tablo 4.10 'da verilmiştir.

Tablo 4.10. AISI 8620 numunelerinin ölçme derinliğine göre akma gerilmesi değerleri

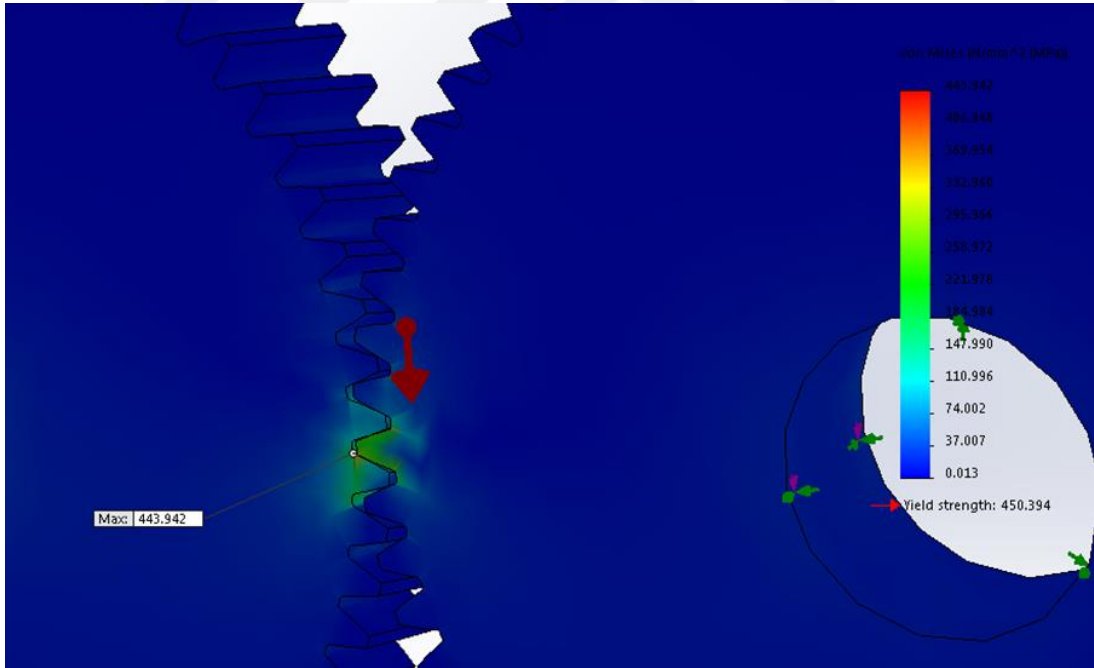
Ölçüm Derinliği (mm)	Ham Numune (MPa)	Düşük Basıncılı Sementasyon (MPa)	Plazma Nitrürleme (MPa)	Gaz Sementasyon (DQ) (MPa)
0.10	475.8	2120.9	1292.6	2057.6
0.30	504.6	2034.6	1122.9	2020.2
0.60	461.4	1905.2	979.1	1928.2
0.80	441.3	1603.2	921.6	1864.9
1.00	406.8	1171.8	936.1	1669.4
1.20	421.2	961.9	890.1	1545.7
1.40	441.3	841.1	841.1	1430.7

Statik analiz sonucu elde edilen ısıtılmış işlem görmemiş numunelerin von Mises gerilme sonuçları Şekil 4.16' da ve von Mises akma gerilme değerleri Tablo 4.11' de verilmiştir.

Şekil 4.17 'de dişliler üzerinde meydana gelen maksimum gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeler gösterilmiştir. Eş dişli gruplarının çalışması esnasında zorlanma bölgeleri diş dibi ve diş üstü olarak görülmektedir. Bu bölgeler renk skalasında kritik bölgeyi ifade eden kırmızı renkle gösterilmiştir.



Şekil 4.16. AISI 8620 dişlisi ısıtılmış numunenin von Mises gerilme sonuçları.



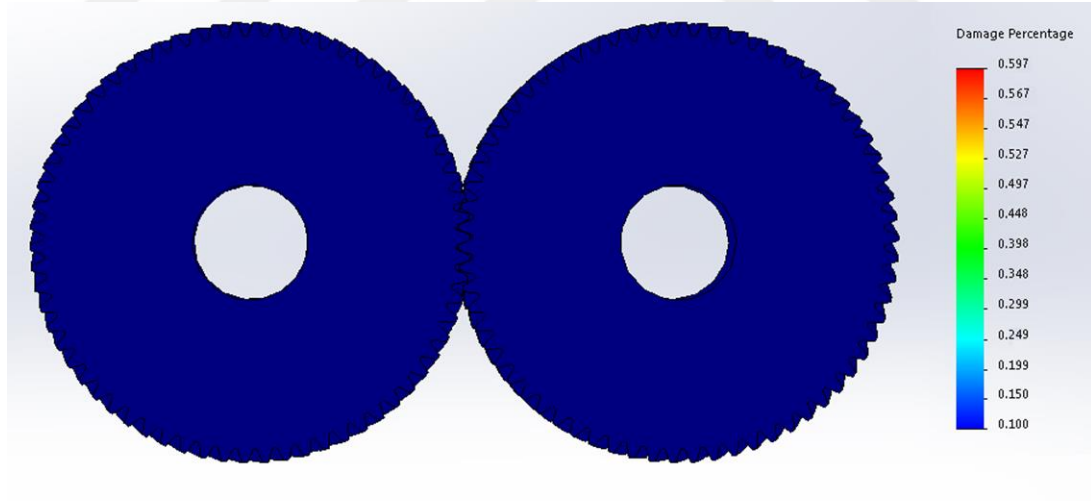
Şekil 4.17. AISI 8620 dişlisi ısıtılmış numunenin von Mises maksimum gerilme noktası.

Tablo 4.11. AISI 8620 dişlileri von Mises akma gerilme değerleri

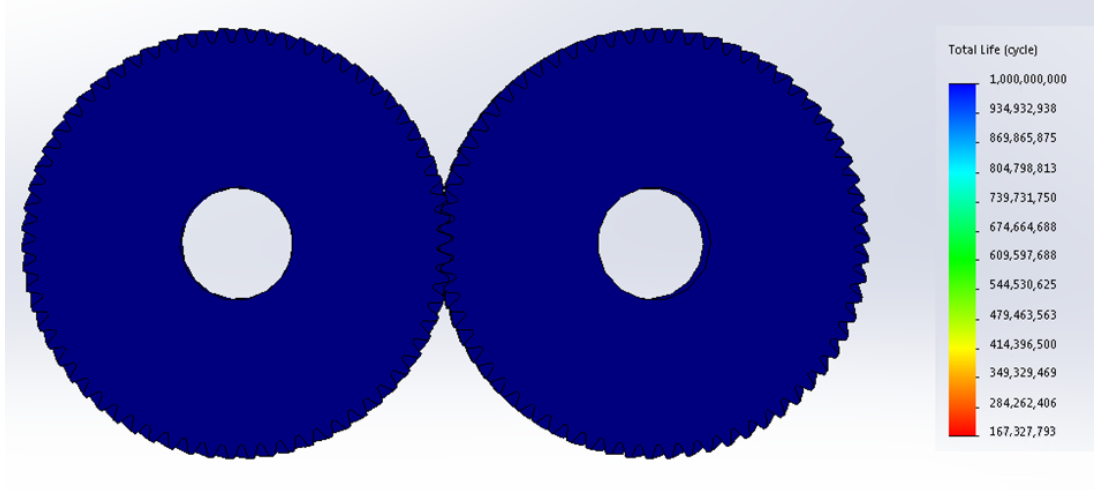
	Isıl İşlem Görmemiş (MPa)	Düşük Basıncı Sementasyon (MPa)	Plazma Nitrürleme (MPa)	Gaz Sementasyon (DQ) (MPa)
AISI 8620	450.39	1810.33	1163.55	1788.14

Tablo 4.11 'de elde edilen akma gerilmeleri farklı ısıl işlemler sonucu elde edilen yüzey sertliği ve sert tabaka kalınlığı ile doğru orantılı olarak değişmiştir.

Statik analizleri yapılan dişlilere tekrarlı yükleme koşulu seçilerek yorulma analizi yapılmıştır. Isıl işlem görmemiş numunelere yapılan analiz sonucunda 1,000,000 turdaki hasar yüzdeleri Şekil 4.18 'da, ömür tur sayıları ise Şekil 4.19 'da gösterilmiştir.

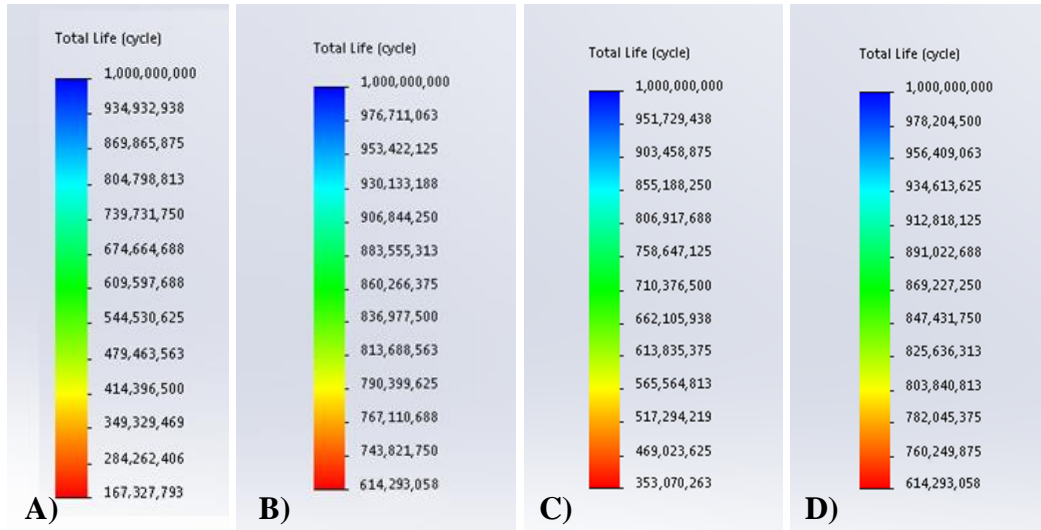


Şekil 4.18. AISI 8620 dişlisi ısıl işlem görmemiş numunenin 1,000,000 turdaki hasar yüzdesi.



Şekil 4.19. AISI 8620 dişlisi ısıtılma işlem görmemiş numunenin ömür tur sayısı.

Yorulma analizleri tüm numuneler için yapılarak Şekil 4.20 'de bulunan ömür tur sayıları elde edilmiştir. Elde edilen ömür tur sayıları dişlilerin çalışma devri, uygulanan ısıtılma işlem, uygulanan ısıtılma sonucu elde edilen sert tabaka kalınlığı ve yüzey sertliğine bağlı değişmiştir.



Şekil 4.20. AISI 8620; ısıtılma işlem görmemiş (A), düşük basınçlı sementasyon (B), plazma nitritleme (C) ve gaz sementasyon (D) numunelerinin ömür tur sayıları.

Grafiksel olarak gösterilen ömür tur sayıları Tablo 4.12 'de net olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.12. AISI 8620 dişlilerinin yorulma analizi sonucu ömür tur sayıları

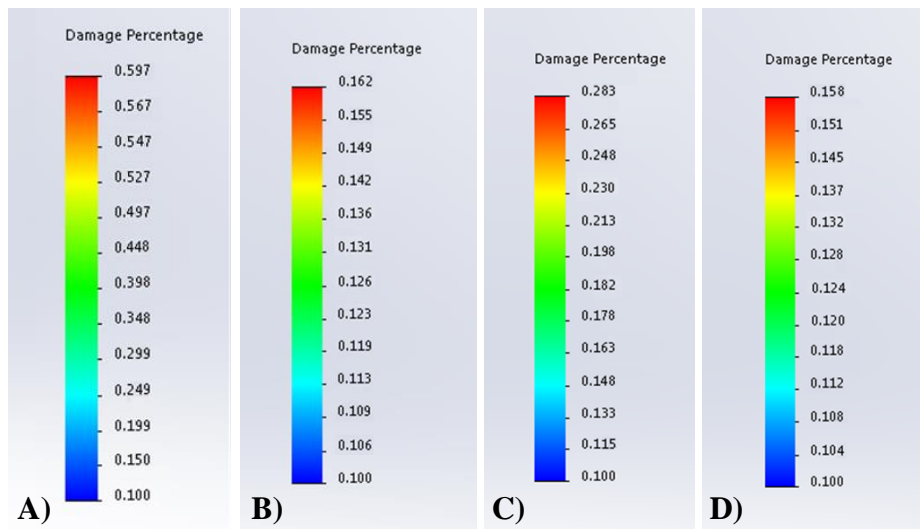
	Isıl İşlem Görmemiş	Düşük Basıncılı Sementasyon	Plazma Nitrüleme	Gaz Sementasyon (DQ)
AISI 8620	167,327,793	614,293,058	353,070,263	629,203,913

Dişlilerin devamlı çalışma devirleri kullanılarak ömürleri saat cinsinden hesaplanmış ve Tablo 4.13 'de gösterilmiştir.

Tablo 4.13. AISI 8620 dişlilerinin yorulma analizi sonucu ömür saat değerleri

	Isıl İşlem Görmemiş (saat)	Düşük Basıncılı Sementasyon (saat)	Plazma Nitrüleme (saat)	Gaz Sementasyon (DQ) (saat)
AISI 8620 (212 rpm)	13154.7	48293.4	27757	49465.7

Tüm numunelerin 1,000,000 turdaki hasar yüzdeleri Şekil 4.21 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. AISI 8620; ısıl işlem görmemiş (A), düşük basınçlı sementasyon (B), plazma nitrüleme (C) ve gaz sementasyon (D) numuneleri hasar yüzdeleri.

Değişken tur sayıları girilerek bulunan hasar yüzdeleri Tablo 4.14 'de sunulmuştur. Hasar oranları dişli ömrü ile ters orantılı olarak değişmektedir. Hasar oranlarındaki azalış dişli ömürlerinin artmasına neden olmuştur.

Tablo 4.14. AISI 8620 dişlilerinin yorulma analizi sonucu hasar yüzdeleri

	Ham Numune	Düşük Basıncı Sementasyon	Plazma Nitrüleme	Gaz Sementasyon
Tur Sayıları	AISI 8620	AISI 8620	AISI 8620	AISI 8620
1,000,000	0.597	0.162	0.283	0.158
5,000,000	2.988	0.813	1.416	0.794
10,000,000	5.976	1.627	2.832	1.589
20,000,000	11.952	3.255	5.664	3.178
50,000,000	29.881	8.139	14.161	7.946
100,000,000	59.762	16.278	28.322	15.893
167,327,793	100.0	27.239	47.392	26.593
250,000,000	-	40.697	70.807	39.732
353,070,263	-	57.475	100.0	56.113
500,000,000	-	81.394	-	79.465
614,293,058	-	100.0	-	97.630
629,203,913	-	-	-	100.0

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı ısıt işlemlerin (düşük basınçlı sementasyon, plazma nitrüleme ve gaz sementasyon) AISI 8620 ve AISI 5115 çelik dişli çarklarının sertlik, boyutsal değişim, yüzey pürüzlülük, mikroyapı ve yorulma ömrüne etkileri incelenmiştir.

Yapılan incelemelerde, düşük basınçlı sementasyon işleminin diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine kıyasla, istenen yüzey sertlik ve efektif sert tabaka kalınlığını çok daha kısa işlem sürelerinde sağladığı belirlenmiştir. Plazma nitrüleme işleminde meydana gelen beyaz tabaka kalınlığı ve malzeme iç kısmındaki sertlik değeri her iki dişlide de istenilen aralıkta olmuştur. Ancak AISI 8620 çeliğinden yapılan ve modülü 1.5 olan dişlide elde edilen toplam difüzyon tabakası kalınlığı gerekli minimum değeri sağlayamamıştır. Yüzey sertleştirilmesi yapılmış tüm numunelerde sertlik yüzeyden merkeze doğru azalmıştır.

Sementasyon işlemi yapılan numunelerin yüzeyinde karbonca zengin martenzit ve bir miktar kalıntı östenit görülmektedir. Yüzey altında ise yüzeye göre daha düşük karbon içeren martenzit ve ince beynitik yapı oluşmuştur. Yüzeyden merkeze doğru karbon içeriği ve kalıntı östenit miktarı azalmıştır. Isıl işlem görmemiş numunelerde ise içyapı ferrit ve perlitten meydana gelmiştir. Plazma nitrüleme işlemi uygulanmış numunelerde yüzeyde ϵ ($Fe_{2-3}N$) ve γ' (Fe_4N) nitritlerden oluşan beyaz katman kalınlığı AISI 5115 dişlileri için yaklaşık olarak 6-7.7 μm aralığında, AISI 8620 dişlileri için ise 7-7.7 μm aralığında değişmiştir.

Isıl işlemler sonrası en büyük boyutsal artış gaz sementasyon işleminde meydana gelmiştir. Gaz sementasyon işlemindeki yüksek sıcaklık ve uzun işlem süresi tanelerin kabalaşmasına yol açıp, boyutsal artışa neden olmuştur.

Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülük değeri gaz sementasyon işleminde elde edilmiştir. Ancak, yüzey pürüzlülük değerlerinin değişkenlik gösterdiği ve istenilen asgari şartları sağlamadığı görülmüştür. Yapılan tüm ısıt işlemler sonrası dişli yüzeylerine yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için işlem uygulanması gerektiği kanısına varılmıştır.

Yapılan yorulma analizleri sonucu hesaplanan dişlilerin ömür tur sayıları, ısıtılma işlemde elde edilen sert tabaka kalınlığı ve yüzey sertliğiyle doğru orantılı olarak değişmiştir. AISI 8620 dişlisi için düşük basınçlı sementasyon ve gaz sementasyon (DQ) yüzey sertlik değerleri birbirine yakın olmasına rağmen gaz sementasyon (DQ) işleminde elde edilen yüzey sertlik derinliğinin yüksek olması ömür tur sayısını arttırıcı etki sağlamıştır. Isıl işlemlerde elde edilen sert tabaka kalınlığı ve yüzey sertliklerindeki artış, değişken tur sayılarındaki hasar oranlarının azalmasına neden olmuştur.



KAYNAKLAR

- [1]. Fernandes, C., Marques, P., Martins, R., Seabra, J. Gearbox Power Loss. Part II: Friction Losses in Gears. *Tribology International*. 2015, 88, 309-316.
- [2]. Fernandes, C., Battez, A.H., González, R., Monge, R., Viesca, J. L., Garcia, A., Martins, R. C., Seabra, J. Torque Loss and Wear of FZG Gears Lubricated with Wind Turbine Gear Oils Using an Ionic Liquid as Additive. *Tribology International*. 2015, 90, 309-316.
- [3]. Dengo, C., Meneghetti, G., M, Dabalà. Experimental Analysis of Bending Fatigue Strength of Plain and Notched Case-Hardened Gear Steels. *International Journal of Fatigue*. 2015, 80 (11), 145-161.
- [4]. Savaria, V., Monajati, H., Bridier, F., Bocher, P. Measurement and Correction Of Residual Stress Gradients In Aeronautical Gears After Various Induction Surface Hardening Treatments. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, 220, 113–123.
- [5]. Krauss, G. *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*. ASM International, Metals Park, OH, 1989, 291-305.
- [6]. Bernard, W. J., Poor, R. P., Barbee, G. W., Gottschalk, J. W. Surface Treatment of Metallic Articales in an Atmospheric Furnace. US Patent No. 20080302281A1. Cleveland, United States Patent Application Publication, 2008, 20.
- [7]. Jossart, J. Endothermic Gas Production Overview. *Atmosphere Engineering Company*. Wisconsin, 2016, 6.
- [8]. Collin, R., Gunnarson, S., Thulin, D. Mathematical Model for Predicting Carbon Concentration Profiles of Gas-Carburized Steel. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1972, 210 (10), 785-789.
- [9]. Kaya, M. SAE 5120 ve 8620 Çeliklere Uygulanan Sementasyon İşleminin Mikroyapı ve Sertlik Değişimlerine Etkisinin Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, 2015, 66 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [10]. Davis, J.R. *Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics*. ASM International, Materials Park, OH, 2002, 349-391.
- [11]. Poor, R. P., Barbee, W., Brug, J. E., Furnace for Vacuum Carburizing with Unsaturated Aromatic Hydrocarbons. US Patent No. 7,267,793 B2. Cleveland, United States Patent Application Publication. 1-14.
- [12]. Yingying, W. Simulation, Optimization and Development of Thermo-Chemical Diffusion Processes. Worcester Polytechnic Institute, Material Science and Engineering, 2013, 136. (Degree of Doctor of Philosophy).
- [13]. Pye, D. *Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing*. ASM International, Materials Park, OH, 2003. 256.
- [14]. Somers, M.A.J., Mittemeijer, E.J. Oxidschichtbildung und Gleichzeitige Gefügeänderung der Verbindungsschicht (Oxide-Layer Formation and Simultaneous Microstructural Changes in the Compound Layer). *HTM Härtereitechnische Mitteilungen.*, 1992, 47(3), 169-174.
- [15]. Thelning K E. *Steel and Heating*. Marcel Decler Inc. New York, 1994, 260-320.
- [16]. Menthe, E., Rie K.T., Schultze J.W., Simson S. Structure and Properties of Plasma-Nitrided Stainless Steel. *Surface and Coating Technology*. 1995, 74-75, 412-416.
- [17]. Özdemir, U., Ertan, M. Plazma (İyon) Nitrüleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*. 2003, 1 (2), 41-48.

- [18].Tobie, T., Hippenstiel, F., Mohrbacher, H. Optimizing Gear Performance by Alloy Modification of Carburizing Steels. *Metals*. 2017, 7(415), 20.
- [19].Yamasa. Yüzey Ölçüm Parametreleri. Erişim 12 Nisan, 2019.
<http://yamasa.com.tr/242/1/4/yamasa/yuzeyolcumparametreleri.aspx>
- [20].Cho, J. R., Kang W. J., Kim M. G., Lee, J. H. Lee. Y. S., and Bae W. B. Distortions Induced By Heat Treatment of Automotive Bevel Gears, *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, 153–154, 476–481.
- [21].Garcia, N. V., Gonzalo O., Quintana I., Pirling T. Residual Stresses and Structural Changes Generated at Different Steps of the Manufacturing of Gears: Effect of Banded Structures, *Materials Science and Engineering: A*. 2011, 528 (15), 5146-5157.
- [22].JóŹwiak W.K., Góralski J., Maniecki T.P., Kula P., Pietrasik R. The Chemical Conditions Associated with Vacuum Carburization of Steel in An Ethylene-Hydrogen Atmosphere, *Chemical Engineering*. 2003, 82 (8), 710-713.
- [23].Atraszkiewicz, R., Januszewicz B., Kaczmarek Ł., Stachurski W., Dybowski K., Rzepkowski, A. High Pressure Gas Quenching: Distortion Analysis in Gears After Heat Treatment, *Materials Science & Engineering A*. 2012, 558, 550-557.
- [24].Chaush Y. ANSYS Workbench İle Yorulma Analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2008, 71 s. (Doktora Tezi)
- [25].Akkurt M., 2005: Makine Elemanları, İstanbul Birsen Yayın Evi, s.21.
- [26].Kızılaslan, K., İşel, B., Yavuz, İ., 2010. Dişli Çarklarda Meydana Gelen Hasar Tipleri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7 (1), 119–129.
- [27].ANSI/AGMA 2001-D04. American National Standard, Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, American Gear Manufacturers Association, Alexandria, Virginia, December 28, 2004.
- [28].Pavlina, E.J., Van Tyne, C.J. Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2008, 17 (6), 888-893.
- [29].ANSI/AGMA 2004-B89. American National Standard, Gear Materials and Heat Treatment Manual, 1995.
- [30].Randak, A., Eberbach, R. Einfluß der Austenitkorngröße auf Einige Eigenschaften des Stahls 16MnCr5. *HTM Härtereitechnische Mitteilungen* 1969, 24 (3), 201–209.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Serhan GENÇOĞLU

Doğum Yeri ve Yılı : İzmir, 1991

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : serhangencoglu@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : İzmir Atatürk Lisesi, 2009

Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2014

Mesleki Deneyim

Makine Mühendisleri Odası İzmir Şubesi-Kontrol Mühendisi 2014-(halen)