

T.C.
Niğde Üniversitesi
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ROT BAŞLARINDA İNDÜKSİYON YÜZEY SERTLEŞTİRME
İŞLEMİNİN ÖMÜR VE MEKANİK KUVVET
DAYANIMLARINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAYHAN ALTINEL

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ROT BAŞLARINDA İNDÜKSİYON YÜZEY SERTLEŞTİRME
İŞLEMİNİN ÖMÜR VE MEKANİK KUVVET
DAYANIMLARINA ETKİSİ

KAYHAN ALTINEL

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Serkan TOROS

Haziran 2015

Kayhan ALTINEL tarafından **Yrd. Doç. Dr. Serkan TOROS** danışmanlığında hazırlanan “**Rot başlarında İndüksiyon Yüzey Sertleştirme İşleminin Ömür ve Mekanik Kuvvet Dayanımlarına Etkisi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Aytakin POLAT



Üye : Yrd.Doç.Dr. Serkan TOROS



Üye : Yrd.Doç.Dr. Murat DİLMEÇ



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/..../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/..../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



(Kayhan ALTINEL)

ÖZET

ROT BAŞLARINDA İNDÜKSİYON YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ÖMÜR VE MEKANİK KUVVET DAYANIMLARINA ETKİSİ

ALTINEL, Kayhan

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

:Yrd. Doç. Dr. Serkan TOROS

Haziran 2015, 51 sayfa

Bu yüksek lisans çalışmasında, rot başlarında indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin ömür ve mekanik kuvvet dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Rot başı üretiminin en önemli imalat adımlarından biri olan indüksiyon işlemi ile sertleştirilmiş rot başı malzemelerin mekanik testleri yapılmıştır. Ayrıca indüksiyon işlemine tabi tutulmuş ve tutulmamış rot başı parçalarının tasarımları yorulma ömrü ve mekanik dayanım özellikleri açısından analizlerde de simüle edilmiştir. Simülasyonlarda rot başları, malzeme özelliklerinin boyutsal ölçülere göre değişebildiği fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FGM) şeklinde modellenmiştir. Ayrıca, deneyler ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının uyumlu olup olmadığının anlaşılması amacıyla analizlerde indüksiyonlu ve indüksiyonsuz malzemelerin özellikleri 3D rot başı modeli için tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde FGM şeklindeki modellemenin sonuçlara katkısını öğrenmek adına indüksiyon işlemine tabi tutulmuş mafsal millerinin eğilme testi, mafsal çıkma testi ve darbe testlerinin analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, rot başı parçalarının malzeme özellikleri FGM şeklinde tanımlandığı zaman, analiz sonuçları deneysel sonuçlara daha yakın bulunmuştur. Ayrıca indüksiyon işlemine tabi tutulmuş mafsal milleri, indüksiyonsuz mafsal millerine göre daha uzun ömre sahip olmuş ve daha fazla yük taşımışlardır.

Anahtar Sözcükler: İndüksiyon işlemi, rot başı, fonksiyonel dereceli malzeme, FGM, fatik ömrü

SUMMARY

EFFECTS OF THE INDUCTION PROCESS ON THE ROD END MATERIALS FOR FATIGUE LIFE AND MECHANICAL FORCES STRENGTH

ALTINEL, Kayhan

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Serkan TOROS

June 2015, 51 pages

In this MSc thesis study, effects of the induction process on the rod end materials for fatigue life and mechanical forces strength have been investigated. One of the most important manufacturing steps of the rod end materials is the induction process which mechanical tests of the hardened rod end materials with the induction process have been performed. Additionally, rod end materials which are inducted and non-inducted are simulated in the view of the fatigue life and mechanical strength properties of the design. In the simulations the rod end parts are modeled as functionally graded materials where the mechanical properties of the materials are changeable with the dimensions. Additionally, the non-inducted material properties and fully strengthened materials properties are defined for rod end geometry in order to comprehend the contribution of the definitions on the congruity of the FEM results with the experiments. In the finite element simulations, the contribution of the FGM modelling on the inducted ball pins is investigated by performing the bending test, pull out test and impact test analysis simulations. Consequently, when the materials properties of the rod end parts are defined as functional graded the FEM results are found more close to the experimental results. Additionally, the wholly inducted ball pins carry more loads and have a longer life than the non-inducted materials.

Keywords: Induction process, rod end, functional graded material, FGM, fatigue life

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, rot başlarında indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin ömür ve mekanik kuvvet dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Süspansiyon sistemleri içerisinde büyük bir öneme sahip olan rot başları, buldukları konum itibariyle aracın seyahati süresince yol koşullarına bağlı olarak sayısız darbelere ve birçok eksenel/radyal yönde gelen kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu kapsamda malzemelerin ömür ve mekanik kuvvet dayanımını artıran indüksiyon işleminin rot başlarında etki derecesi araştırılmıştır. İndüksiyon işlemi uygulanmış rot başlarında ömür (fatigue) testi, mafsal çıkma (pull out) testi, eğilme (bending) testi ve darbe (impact) testlerinin deneyleri ve sonlu elemanlar analiz simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlarda rot başları, deneysel sonuçlar ile çok yakın sonuçlar veren fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FGM) şeklinde modellenerek analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Serkan TOROS' a en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Kemal ALTINEL' e, annem Güzide ALTINE' e, kardeşlerime ve hayat arkadaşım Sebahat GÜRBÜZ' e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I. GİRİŞ	1
1.1 Rot Başlarının Önemi ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar	1
1.2 İndüksiyon Yüzey Sertleştirme İşlemi.....	4
1.2.1 İndüksiyon işleminin tarihçesi	4
1.2.2 İndüksiyon işlemi ile yüzey sertleştirme prensibi.....	5
1.2.3 İndüksiyon akımı ile sertleştirmenin avantaj ve dezavantajları.....	6
BÖLÜM II. ROT BAŞLARINDA İNDÜKSİYON YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ÖMÜR VE MEKANİK KUVVET DAYANIMLARINA ETKİSİ	8
2.1 Rot Başlarına İndüksiyon Yüzey Sertleştirme İşleminin Uygulanması	8
2.2 Rot Başlarında Ömür Dayanımı İçin İndüksiyon Sertleştirmenin Önemi	13
2.3 Rot Başlarında Radyal Kuvvetlere Karşı İndüksiyon Sertleştirmenin Önemi	16
2.4 Rot Başlarında Eksenel Kuvvetlere Karşı İndüksiyon Sertleştirmenin Önemi	17
2.5 Rot Başlarında Darbe Kuvvetlerine Karşı İndüksiyon Sertleştirmenin Önemi	19

BÖLÜM III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER.....	20
3.1 Mafsal Milllerinde İndüksiyon Sertleştirme nin Ömür Dayanımına Etkisi.....	20
3.1.1 Deneyin amacı (Ömür Testi)	20
3.1.2 Deneysel prosedür.....	20
3.1.3 Sonuçlar ve tartışma.....	21
3.2 Rot Başlarında Eksenel Kuvvetlere Karşı İndüksiyon Sertleştirme nin Etkisi.....	23
3.2.1 Deneyin amacı (Pull Out / Mafsal Çıkma Testi)	23
3.2.2 Deneysel prosedür.....	24
3.2.3 Sonuçlar ve tartışma.....	26
3.3 Rot Başlarında Radyal Kuvvetlere Karşı İndüksiyon Sertleştirme nin Etkisi	29
3.3.1 Deneyin amacı (Bending / Eğilme Testi)	29
3.3.2 Deneysel prosedür.....	29
3.3.3 Sonuçlar ve tartışma.....	32
3.4 Rot Başlarında Darbe Kuvvetlerine Karşı İndüksiyon Sertleştirme nin Etkisi	38
3.4.1 Deneyin amacı (İmpact / Darbe Testi).....	38
3.4.2 Deneysel prosedür.....	38
3.4.3 Sonuçlar ve tartışma.....	41
BÖLÜM IV. SONUÇLAR	46
KAYNAKLAR	48
ÖZ GEÇMİŞ	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 2.1. 41Cr4 malzemenin indüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerin özellikleri...11	
Tablo 2.2. C45 malzemenin indüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerin özellikleri.....12	
Tablo 3.1. Mafsal mili gruplarının maksimum ve minimum sertlik değerleri.....21	
Tablo 3.2. Mafsal mili gruplarının yorulma test sonuçları.....22	
Tablo 3.3. Pull out test sonuçları.....26	
Tablo 3.4. Mafsal mili bölgelerinin sertlik ve çekme dayanım değerleri.....30	
Tablo 3.5. Mafsal millerinin darbe testi eğilme açısı değerleri.....41	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Ticari bir süspansiyon aksamında kullanılan rot başı.....	1
Şekil 1.2. İndüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işleminin şematik gösterilişi.....	6
Şekil 2.1. Rot başlarının araca bağlantı sistemi.....	14
Şekil 3.1. C45 ve 41Cr4 malzemelerin çekme testi sonuçları.....	25
Şekil 3.2. Rot başı pull out testi analizinin mesh yapısı.....	25
Şekil 3.3. Rot başı pull out testi analizinin mesnet şartları.....	26
Şekil 3.4. Pull out testinde mafsal milinde meydana gelen stres gerilmesi.....	27
Şekil 3.5. Pull out testinde rot başı gövdesinde meydana gelen stres gerilmesi.....	28
Şekil 3.6. FGM mafsal mili eğilme testi analizinin mesh yapısı.....	32
Şekil 3.7. FGM mafsal mili eğilme testi analizinin mesnet şartları.....	32
Şekil 3.8. FGM mafsal milinin birinci bölgesinde meydana gelen stres gerilmesi.....	34
Şekil 3.9. FGM mafsal milinin ikinci bölgesinde meydana gelen stres gerilmesi.....	34
Şekil 3.10. FGM mafsal milinin üçüncü bölgesinde meydana gelen stres gerilmesi.....	35
Şekil 3.11. FGM mafsal milinin dördüncü bölgesinde meydana gelen stres gerilmesi.....	35
Şekil 3.12. FGM mafsal milinin 181 kN'luk kuvvet için hesaplanan güvenlik faktörü...	36
Şekil 3.13. İndüksiyonsuz mafsal milinde meydana gelen stres gerilmesi.....	37
Şekil 3.14. Tüm hacimde indüksiyonlu mafsal milinde meydana gelen stres gerilmesi...	38
Şekil 3.15. Darbe (İmpact) test prosedürü	39
Şekil 3.16. FGM mafsal mili darbe testi analizinin mesh yapısı.....	40
Şekil 3.17. FGM mafsal mili darbe testi analizinin mesnet şartları.....	40
Şekil 3.18. (a) İndüksiyonlu ve (b) indüksiyonsuz mafsalların teknik resimleri.....	41
Şekil 3.19. İndüksiyonlu mafsal milinin darbe testi analizinin eğilme açısı değeri.....	43
Şekil 3.20. İndüksiyonlu mafsal milinin darbe testi analizinde meydana gelen stres gerilmesi.....	43
Şekil 3.21. İndüksiyonsuz mafsal milinin darbe testi analizinin eğilme açısı değeri.....	44
Şekil 3.22. İndüksiyonsuz mafsal milinin darbe testi analizinde meydana gelen stres gerilmesi.....	44

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. Rot kolunda yorulma ile meydana gelen hasar.....	2
Fotoğraf 2.1. Rot başı mafsal milinin indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi.....	8
Fotoğraf 2.2. Rot başı gövdesinin indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi.....	9
Fotoğraf 2.3. Rot başı gövdesinin ve mafsal milinin sertleştirilmiş kesit görüntüleri.....	9
Fotoğraf 2.4. İndüksiyon işlemi uygulanmış mafsal milinin bakalite alınmış kesiti	10
Fotoğraf 2.5. 41Cr4 malzemenin indüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerin mikroyapısı.....	11
Fotoğraf 2.6. C45 malzemenin normalize edilmiş ferrit-perlit tanecik yapısı.....	12
Fotoğraf 2.7. Malzeme yorulması sonucu çeşitli yerlerinden kırılmış rot başları.....	13
Fotoğraf 2.8. Rot başlarına gelen radyal kuvvetlerin gösterimi.....	16
Fotoğraf 2.9. Radyal yükleme sonucunda hasara uğramış mafsal milleri.....	17
Fotoğraf 2.10. Rot başlarına gelen aksel kuvvetlerin gösterimi.....	18
Fotoğraf 2.11. Aksel yükleme sonucunda hasara uğramış rot başları.....	18
Fotoğraf 3.1. Dinamik ömür test istasyonu.....	21
Fotoğraf 3.2. Mafsal mili gruplarının indüksiyon sertlik bölgeleri.....	22
Fotoğraf 3.3. Grup-1 Mafsal millerinin yorulma test sonucu görüntüleri.....	23
Fotoğraf 3.4. Grup-2 Mafsal millerinin yorulma test sonucu görüntüleri.....	23
Fotoğraf 3.5. Pull out test prosedürü ve çekme-basma-bükme test istasyonu.....	24
Fotoğraf 3.6. Pull out testi sonucunda gövdede meydana gelen deformasyon bölgeleri.....	27
Fotoğraf 3.7. FGM'li mafsal milinin sertlik bölgelerinin kesit görüntüsü.....	30
Fotoğraf 3.8. Eğilme test prosedürü ve çekme-basma-bükme test istasyonu.....	31
Fotoğraf 3.9. Mafsal milinin eğilme test sonucu görüntüsü.....	33
Fotoğraf 3.10. Darbe (İmpact) test istasyonu.....	39
Fotoğraf 3.11. İndüksiyonsuz mafsal millerinin darbe testi sonrası görüntüler.....	42
Fotoğraf 3.12. İndüksiyonlu mafsal millerinin darbe testi sonrası görüntüleri.....	42

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

μm	Mikrometre
mm	Milimetre
Mpa	Megapascal
kN	Kilonewton
kg	Kilogram
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
Hz	Hertz
HV	Vickers sertlik değeri
HRC	Rockwel sertlik değeri

Kısaltmalar

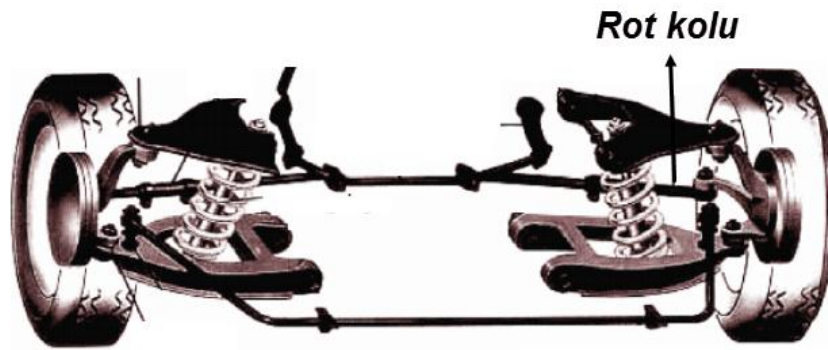
FGM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (Functional Graded Material)
-----	---

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Rot Başlarının Önemi ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar

Günümüzde otomotiv üreticilerinin ve ürettikleri otomobillerin sayısı dikkate alındığında rekabet gün ve gün artmaktadır. Bu bağlamda üreticiler araç kalitesini artırmak amacı ile araçta kullanılan bileşenlerin, daha dayanıklı ve uzun ömürlü ancak bir o kadarda ekonomik olması üzerindeki çalışmalarına yoğunluk vermişlerdir. Proses olarak otomobillerde kullanılan rot başları döküm veya dövme işlemi olmak üzere iki farklı şekilde üretilmektedir. Mevcut yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri bulunmasına karşın yoğun olarak sanayide üretim hızı ve nihai ürün için beklenen birtakım mekanik özelliklerin üstünlüğü nedeni ile dövme işlemi yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda özellikle bu sistemlerde birçok sınırlayıcı parametrenin birlikte sağlanabildiği malzeme seçimini gerçekleştirmek ve/veya farklı spektlere uygun parça tasarımı yapmak büyük önem arz etmektedir. Mevcut taleplerde belirtilen kriterlerin seviyesinin artırılması, bu parçalarda farklı malzemelerin kullanımının uygunluğunun araştırılmasını zorunlu hale getirmiştir. Fakat farklı malzeme seçimine yönelmek maliyeti artırdığından dolayı birtakım proses değişikliği ile mevcut malzemede mukavemetin ve ömrün artırılması çalışmaları daha da önem kazanmıştır.



Şekil 1.1. Ticari bir süspansiyon aksamında kullanılan rot başı (Falah ve ark., 2007)

Rot başları otomobillerde yönlendirme aksamında kullanılan, direksiyon kolunu eğri boyuna bağlamaktadır. Ayrıca konvansiyonel tip süspansiyon sistemlerde ise eğri boyunun rotal etrafında dönmesini sağlamaktadır. Direksiyon rot kolundan gelen

hareketi eğri boyuna iletir ve böylece oluşan itme kuvveti neticesinde teker yol eksenine dik olarak dönmektedir. Şekil 1.1’de rot başlarının ticari bir süspansiyon aksamındaki kullanımını gösterilmektedir. Rot başlarının kullanım yeri dikkate alındığında aracın seyri veya durağanlığı süresince birçok dinamik ve statik kuvvetlere maruz kalmaktadır. Rot başlarında bu bağlamda yorulma, darbe (impact) kırılma, aşınma ve gerilme yığılması neticesinde oluşan hasarlar büyük çoğunlukla karşımıza çıkmaktadır (Sheldon GL., 1983). Bu bakımdan araçların süspansiyon sistemlerinin düzenli olarak kontrol edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Rot başlarında meydana gelen bu tip hasarların sebebi parçaların uygun olmayan dizaynı, bu dizaynın paralelinde yanlış montaj işlemleri, parçaların aşırı yük altında çalışması ve/veya parça üzerine gelen dinamik yüklemelerin belirlenen sınırların çok üzerinde olması, üretim esnasında parça üzerindeki kritik birtakım bölgelerde gereksiz gerilme artışlarına yol açabilecek üretim metotları, yanlış malzeme ve üretim süreçleri ve nihai parça üzerine uygulanan uygunsuz ısıl işlemler olarak sıralanabilmektedir. Bu tip hasarların giderilmesine yönelik çalışmalar daha çok geometrik düzenlemeleri içermekte olup kullanılacak sistemlerin ilave sınırlayıcı özelliklerinden ötürü bu tip çalışmalarda da kısıtlı olmaktadır. Falah ve ark. (2007), yapmış oldukları çalışmada rot kolunda meydana gelen hasarı deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan incelemede rot kolunda meydana gelen hasarın yorulma cinsi olduğunu ve bu hasarın rot kolundaki en ince bölgede çatlak başlangıcı ile vuku bulunduğunu belirtmişlerdir. Fotoğraf 1.1’de yapılan çalışmada rot kolunda meydana gelen hasar gösterilmektedir.



Fotoğraf 1.1. Rot kolunda yorulma ile meydana gelen hasar (Falah ve ark., 2007)

Benzer bir çalışma da Ossa ve ark. (2011) tarafından AISI-SAE 5140 (41Cr4) çeliğinden imal edilmiş rod başı sistemi için yapılmıştır. Çalışmada rod başında meydana gelen hasarın sebebi sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak belirlenmeye çalışılmış, problemin giderilmesine yönelik çözüm önerilerinde bulunmuşlardır. Yapılan çalışmada öncelikle hasarın yorulma kaynaklı olduğunu ve Fotoğraf 1.1’de gösterilen milin yataklanma bölgesinde meydana gelmekte olduğunu belirlemişlerdir. Bu durumun sebebi olarak da hatalı ısıl işlem süreci ve/veya hatalı geometrik tasarımını göstermişlerdir. Alsaran ve ark. (2002), rot başlarında kullanılan AISI-SAE 5140 (41Cr4) çeliğine uygulanan ısıl işlemin yorulma dayanımı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişler endurance limitini 416 MPa olarak belirlemişlerdir. Benzer bir çalışma Bayrak ve ark. (2007) tarafından DIN 41Cr4 ve DIN 42CrMo4 çeliklerine uygulanmıştır. Yapılan çalışmada malzemelerin ısıl işlem süreci ile yorulma dayanımlarının artırılabilirdiği sonucu verilmiştir. Malzemelerin içyapı özellikleri mekanik özelliklerin belirleyici kistaslarını oluşturmakta olup, bu özelliklerde alaşımlandırma elementlerinin miktarı ve çeşitliliğinden etkilenmektedirler. Ayrıca şekillendirme işlemi kapsamında farklı metotların da parçaların dayanımları üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Kim ve ark. (2002) ise yapmış olduğu çalışmada rot başı için döküm ile ön şekil verilmiş alüminyum parçanın daha sonra dövme işlemi ile nihai şeklini kazandırılması neticesindeki bir takım mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca malzeme içerisine eklenmiş Ti, B, Sr ve Zr gibi alaşımlandırma elementlerinin malzemenin şekillendirilebilme kabiliyeti ve dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak alaşımlandırma elementlerinin genel olarak malzemenin tane boyutlarını küçülttüğü ve dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir.

Son yıllarda gerek malzemelerin çeşitli şekillendirme koşulları altındaki davranışlarının belirlenmesi gerekse de üretim sonrası geliştirilen sistemler üzerine gelen yüklerin ne gibi etkiler oluşturduğunu belirlemek adına sonlu elemanlar yazılımlarının kullanımı endüstride ve akademik alanlarda giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle sanayi bağlamında analiz programları sayesinde ciddi oranda kazanımlar elde edilmektedir. Dövme ve şekillendirme gibi işlemlerin kullanıldığı imalat endüstrisinde simülasyon çalışmaları sayesinde; fiziksel ve sayısal modellemelerin gerçek kalıplar ve ekipman ile denemeler yapmaya göre daha ucuz olduğu, bilgisayar destekli tasarımda takımlar üzerinde değişiklik yapmanın daha fazla zaman tasarrufu sağladığı, sonuçların gerçek denemelere göre çok daha hızlı alınabildiği görülmektedir (Vazquez, V. Ve Altan, T.,

2000). Ayrıca analizlerde 3D tasarım yardımı ile geometrik optimizasyonlar yapılarak rot başlarının ömür ve mekanik kuvvet dayanımları geliştirilmektedir.

1.2 İndüksiyon Yüzey Sertleştirme İşlemi

1.2.1 İndüksiyon işleminin tarihçesi

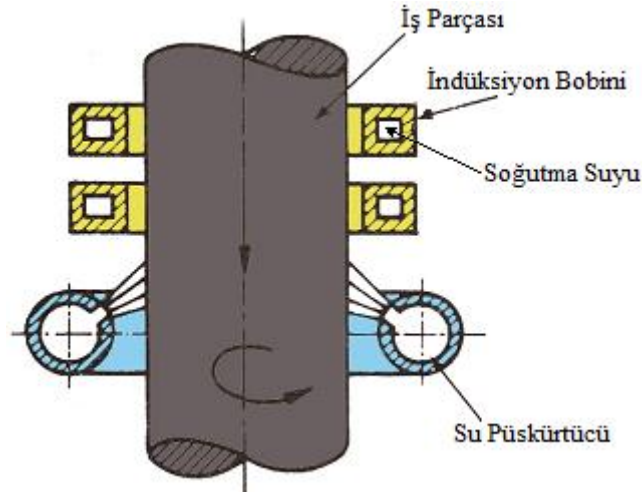
İndüksiyonla ısıtmanın temel prensibi, teorik düzeyde Faraday (1791–1867) zamanında biliniyordu. Fakat bu zamanda indüksiyonla ısıtma işlemi için gerekli güç kaynaklarının bulunmamasından dolayı teorik prensiplerin uygulamaya geçmesi mümkün olmamıştır. İndüksiyon işlemi ile ilgili ilk patent 1897 yılında İngiltere’de Ferranti tarafından alınmıştır. Bulunan bu indüksiyon ocak tipine, metal bobinin dışına konduğu için “ halka” veya “nüveli” ocak adı verilmiştir. Bu alanda ticari ilk uygulama ise 1900 yılında İsveç’te Gysimge’de Kjellin tarafından kurulan 80 kg kapasitede ve 73 kW gücünde çelik ergitme ocağı olmuştur. Daha sonralarında 1906’da Essen (Almanya)’da Röchling Roden hauser tarafından 750 kW’lık bir güç ve 5 Hz frekans ile çalışan indüksiyon ocağı geliştirilmiştir. İndüksiyon ocaklarının bu zamanda en büyük problemi pahalı ve bakım güçlükleri fazla olan jeneratörlere ihtiyaç gösteren frekans düşüklüğü olmuştur. Nitekim 1900-1910 yılları arasında metalin karbon almasını engelleyen cüruf örtüsü altında çalıştırılan ilk Heroult tipi ocaklarının piyasaya çıkarılması ile bu indüksiyon ocakları bütün özelliklerini kaybederek terkedilmiştir. 1916’da Ajax Metal Company’den Dr.G.H.Clamer, Leeds and Northrup’tan elektrik enerjisi ile ısı enerjisi elde edilmesi konusunda temel prensiplerle herhangi bir yanlışlığın bulunup, bulunmadığının araştırılmasını istemiştir. Bunun üzerine Dr. Northrup bu konudaki çalışmaları sonucunda “ ümit verici “ olarak görünen tek yöntemin yüksek frekanslı indüklenmiş akımlarla ısıtma yöntemi olduğunu belirtmiştir. Şebeke frekansında daha yüksek bir frekans ile çalışmada karşılaşılan en büyük sorun kompanzasyon kondansatörlerinin yarattığı sorunlar olmuştur. General Electric Company’ nin kâğıt kondansatör üretimi ile bu sorun da çözümlenmiş ve şebeke frekansının üzerinde çalışma imkânları artmıştır. İlk orta frekans ergitme ocağı 1927 yılında Sheffield’ da Electric Furnace Company (EFCO) tarafından gerçekleştirilmiş, bu tarihten sonra paslanmaz çelik üretimi ve özel alaşım hazırlanmasında kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

İkinci dünya savaşından sonra otomotiv endüstrisinin gelişimi elektromanyetik indüksiyon ile ısıl işlemin önemini arttırmış, daha değişik uygulamaları için çalışmalar hızlandırılmış ve yüzey sertleştirme işlemleri için radyo frekansında ısıtıcılar geliştirilmiştir. Dalma etkisi dolayısıyla kontrol edilebilir işlem derinliği, kayıpların diğer sistemlere göre az oluşu, bantta seri üretim için uygulama kolaylıkları, yüzey sertleştirme işlemlerinde elektromanyetik indüksiyon ile ısıtma yönteminin kullanımını yaygınlaştırmıştır. İndüksiyon ısıtıcılarının kullanılmaya başlandığı dönemlerde ilk yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle orta frekans ısıtıcılar hem ilk yatırım, hem de periyodik bakım giderleri açısından pahalı bir sistem oluşturmuştur. 1966 yılından itibaren yarıiletken güç sistemlerinin geliştirilmesi ile indüksiyon için yeni bir devir başlamıştır. Bu devrede son zamanlarda kaydedilen en önemli gelişme değişen frekanslı (VSP) indüksiyon ocakları olmuştur. Yarı iletken teknolojinin gelişimi ile bu ekonomi sorunu önemini kaybetmiş ve bu alandaki çalışmaları günümüzde oldukça yaygınlaşmasını sağlamıştır.

1.2.2 İndüksiyon işlemi ile yüzey sertleştirme prensibi

İndüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işlemi, indüksiyon bobini tarafından üretilen ısı enerjisi çelik yüzeyinin hızlı bir şekilde östenit fazına tavlmasını sağlar ve hemen arkasından gelen soğutma sıvısı vasıtası ile hızla soğutularak östenit fazındaki tavllanmış bölgenin martenzite dönüşmesi sağlanmaktadır. Gerilimleri ve bununla ilgili çatlama önlemek için 50-60°C sıcaktaki su, tuz ya da yağ banyosu kullanılabilir. Sertleştirmeden sonra, gerilmeleri gidermek ve artık östeniti kübik martenzite dönüştürmek için, 150-200°C sıcaklığında menevişleme yapılır. Oluşturulan sert tabakanın derinliği tavlama işlemi gerçekleştirilen indüksiyon bobininin ilerleme hızına bağlı olarak değişmektedir. İlerleme hızı yüksek olursa derinlik az olmakta, ilerleme hızı düşük olursa derinlik fazla olmaktadır. İndüksiyon işlemi ile sertleştirmede malzeme seçiminde sınırlandırma gerektirir. Malzemede düşük karbon miktarlarında, difüzyonla sertleştirme yöntemlerinde ulaşılabilen yüksek sertlik değerlerine ulaşılamamaktadır. Malzemede yüksek karbon miktarlı çeliklerin sertleştirilmesinde ise çatlama tehlikesi oluşmaktadır. Dolayısı ile indüksiyonla yüzey sertleştirmede kullanılacak çelikler genellikle % 0,4 – 0,75 karbon içermelidir. Ayrıca indüksiyon yüzey sertleştirmesi uygulanmadan önce iş malzemesinin mikro yapı özellikleri belirli ısıl işlemler ile oluşturulmalıdır.

İndüksiyon akımı ile yüzey sertleştirmede alternatif akım yük sargısı, ısıtılacak olan yüzeyi sıkıca sarar. İşlem yapılacak parçayı saran su soğutmali bakır indüksiyon bobinlerinin içerisinde yüksek frekanslı alternatif akım geçirilerek, yüksek frekanslı bir manyetik alan oluşturulur. Bu yüksek frekanslı akımlar metalin yüzeyinde hareket etmeye başlar ve metalin bu akımlara karşı gösterdiği dirençten dolayı parça yüzeyi ısınır. Burada elektrik direkt olarak parçaya değil, parçayı saran yük sargısına (bobine) verilmektedir. Bu sayede indüksiyon işlemi ile parçanın yüzeyinde elektrik akımı meydana gelir ve yüzey birkaç saniye içerisinde sertleştirme (su verme) sıcaklığına ulaşır. Şekil 1.2’de indüksiyon akımı ile yüzey sertleştirmenin yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere bakır indüksiyon bobininden geçen yüksek frekanslı alternatif akım iş parçasının yüzeyine yakın bir bölgeden geçerek bir elektrik alanı meydana getirmektedir. Çelik yüzeyindeki elektrik akımına I dersek, $Q=I^2R$ ilişkisine göre ısı üretir. Burada Q ısı, R çeliğin elektrik direncidir (Thelning, K.E., 1984).



Şekil 1.2. İndüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işleminin şematik gösterilişi

1.2.3 İndüksiyon akımı ile sertleştirmenin avantaj ve dezavantajları

Avantajları;

- İndüksiyon işlemi ile yüzey sertleştirmede, malzemenin ısınma süresi çok düşük olduğundan çevrenin ısınması çok azdır,
- Zamanın değerli olduğundan dolayı seri üretim için kullanılmaya çok uygundur,

- Bu yöntem ile iş parçası kısa süre içerisinde ısındığından etrafa gaz yayılmaz ve daha temiz çevre sağlanır,
- Alevle sertleştirmeye oranla daha yüksek ısı girdisi sağlanır,
- Kullanımı ve elde edilebilirliği kolaydır, küçük tesislerde bile kullanılabilir,
- Elektrik ortamında otomatik kontrol yöntemi ile ısıtma daha iyi ayarlanır,
- Parçaların seri imalatında zaman ayarı, elektriksel olarak yüzeye tatbik edilen sıcaklığın ve sertleşme derinliğinin otomatik olarak ayarlanması oldukça kolaydır.

Dezavantajları;

- En önemli dezavantajı elektrik üretimi ve ayarlama aletleri gerekli olan tesis oldukça masraflıdır,
- Bobin sargıların imal edilmesi ve geliştirilmesi oldukça pahalıdır,
- Komplike bobin sargıların gerektiği durumlarda ve bunun yanında parça sayısı da çok az ise maliyet çok artar,
- İndüksiyon yüzey sertleştirme işleminin yapılabilirliği, malzemede bulunan karbon oranına göre karar verilmesi sebebi ile malzeme seçiminde sınırlama getirmesi iyi olmayan yönlerindedir.

BÖLÜM II

ROT BAŞLARINDA İNDÜKSİYON YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN ÖMÜR VE MEKANİK KUVVET DAYANIMLARINA ETKİSİ

2.1 Rot Başlarına İndüksiyon Yüzey Sertleştirme İşleminin Uygulanması

Süspansiyon sistemleri içerisinde büyük bir öneme sahip olan rot başları, buldukları konum itibarıyla ani kuvvetler ile birlikte birçok aksel ve radyal yönde gelen kuvvetlere maruz kalmaktadır. Ayrıca rot başları oynar eklem bağlantılarına sahip olmalarından dolayı sürtünmenin etkisi ile parçaların aşınmaları da söz konusudur. Çoğu zaman parçanın tüm hacminde homojen bir sertlik artışı istenmez, yalnızca yüzeyin sertlik artırılmasıyla yetinilebilir. Böylece, malzemenin cidar tabakasında kimyasal bileşimi değiştirilmeksizin yüzeyin sertleştirilmesi ile parçalarda aşınmaya daha dayanıklı sert bir yüzey, darbeye ve titreşime dayanıklı sünek bir çekirdek yapısı elde edilir. Fotoğraf 2.1 ve Fotoğraf 2.2’de rot başı parçalarının (rot başı gövdesi ve mafsal mili) sertleştirme (indüksiyon) işlemine tabi tutulması gösterilmektedir.

Süspansiyon sistemi içerisinde rot başlarını karşı parçaya bağlantısını sağlayan mafsal milleri bir gövde yuvası içerisinde hareket edecek şekilde yataklanır ve rot başını hareketli bir mekanizmaya dönüştürür. Bu parçanın hareketi sırasında sürekli ve ani darbeler ile beraber sürtünme direncine karşı da dayanıklı olması gerekmektedir. Dolayısı ile 41Cr4 malzemedeki sıkça üretilen mafsal milleri indüksiyon yüzey sertleştirme işlemine tabi tutularak ömür ve mekanik kuvvet dayanımları artırılmaktadır.



Fotoğraf 2.1. Rot başı mafsal milinin indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi



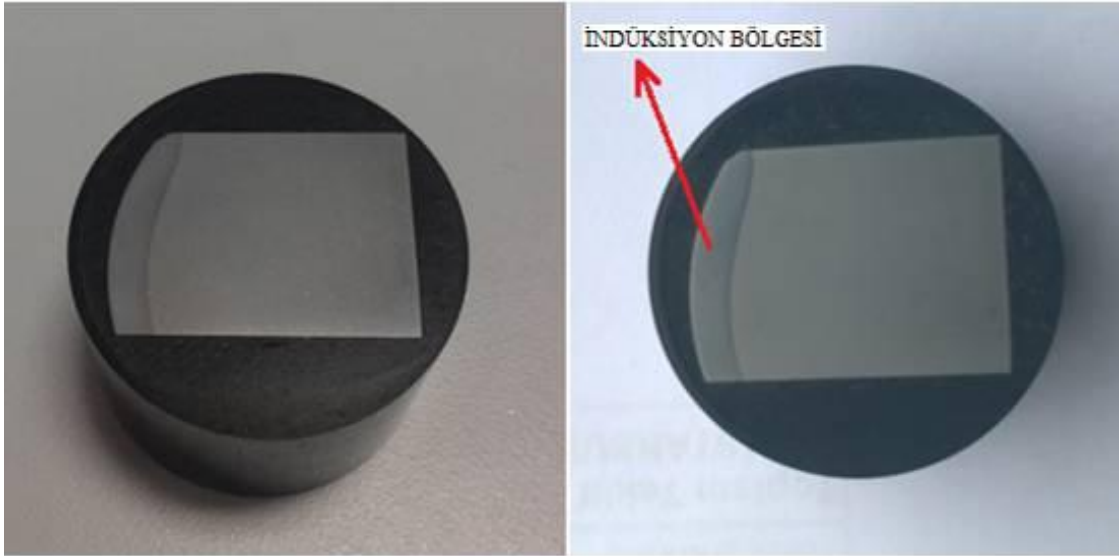
Fotoğraf 2.2. Rot başı gövdesinin indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi

Mafsal milleri ile rot başı gövdeleri çalışma esnasında birbirleri ile temas halinde bulduklarından, metal metal sürtünmelerden dolayı aşınma söz konusu olmaktadır. Bu sebepten dolayı iki metal yüzeyin de aşınma dirençlerinin yüksek olması için yüzeylerin sert bir yapıda olması istenmektedir. Ayrıca rot başı gövdesi, mafsal milinden gelen kuvvetleri taşıyabilmeli ve gövde yuvası içerisinde yataklanan mafsal milinin çıkmaması gerekmektedir. Dolayısı ile 41Cr4 malzeme mafsal millerinde olduğu gibi, C45 malzemeden sıkça yapılan rot başı gövdesinin iç kısımları da indüksiyon cihazı ile 900°C - 1100°C aralığında ısıtıldıktan sonra, parçalar ani su banyosundan geçirilerek yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmaktadır. İndüksiyon işlemi ile yüzeyi sertleştirilmiş mafsal milinin ve rot başı gövdesinin kesitleri Fotoğraf 2.3'te gösterilmiştir.



Fotoğraf 2.3. Rot başı gövdesinin ve mafsal milinin sertleştirilmiş kesit görüntüleri

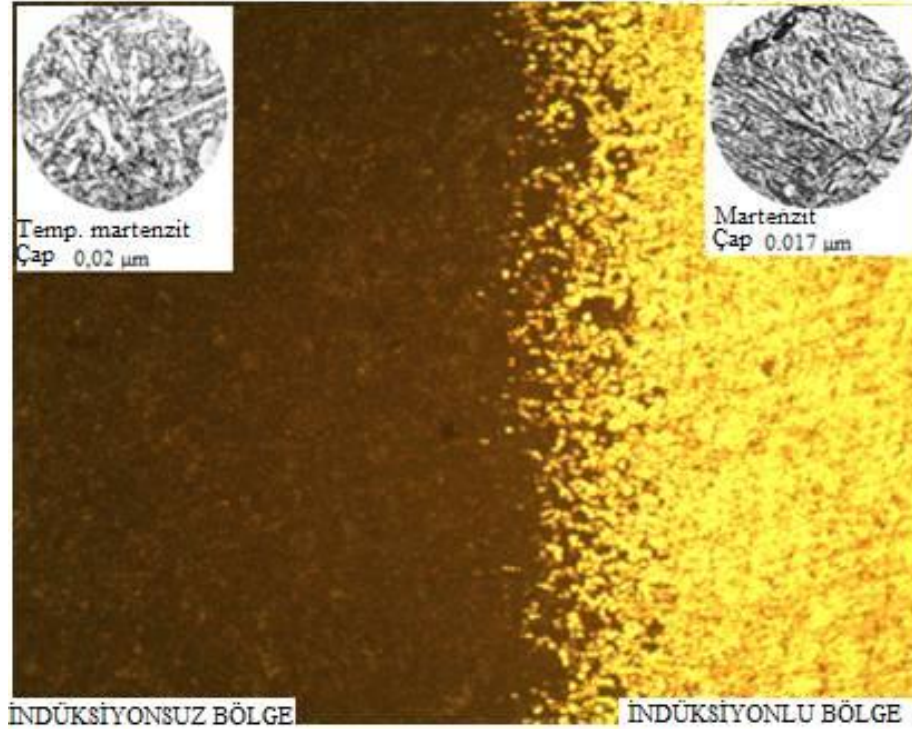
41Cr4 malzeme mafsal milleri indüksiyon işlemine tabi tutulmadan önce, ortalama 75 dakika tav fırınında 850 °C ile 870 °C sıcaklık aralığında ısıtıldıktan sonra 40 °C - 90 °C sıcaklığındaki yağ havuzundan geçirilip sertleştirilerek martenzit tanecik yapısına getirilir. Çeliklerde, sementitten sonra gelen en sert faz martenzit yapısıdır. Fakat elde edilen bu yapı gevrek olduğundan dolayı rot başları için pek elverişli değildir. Ayrıca martenzit oluşumu çelik içerisinde iç gerilmelerin oluşmasına neden olduğundan, parçalar 570 °C - 610 °C sıcaklık aralığında ortalama 75 dakika boyunca meneviş fırınından geçirilip martenzit olan tanecik yapısı temperlenmiş martenzit yapısına dönüştürülür. Menevişlemenin amacı çelikteki kalıntı gerilmeleri gidermek ve çeliğin süneklik ve tokluğunu artırmaktır. Çelikler menevişlendiklerinde süneklikleri artar, buna karşılık sertlik ve mukavemetleri azalır. Menevişleme işleminden sonra mafsal millerinin dış yüzeyleri merkeze doğru belirli bir kalınlıkta indüksiyon yüzey serleştirme işlemine tabi tutularak tekrardan martenzit tanecik yapısı elde edilir. Böylece malzeme sertliğinin yüzeyden merkeze doğru azalması, parçanın gelen darbelere karşı dayanıklı, aşınma direncinin yüksek olmasını ve tok bir davranış göstermesini sağlamaktadır.



Fotoğraf 2.4. İndüksiyon işlemi uygulanmış mafsal milinin bakalite alınmış kesiti

İndüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerin mikro yapısını ve tanecik büyüklüğünü incelemek için Fotoğraf 2.4'te gösterildiği gibi 41Cr4 malzeme mafsal milinin küre kısmından bir kesit bakalite alınmıştır. Mikroyapı görüntüleri için numuneler zımparalanıp alümina süspansiyon ile parlatıldıktan sonra % 2'lik nital ile 20–60 sn

bekletme süreleriyle dağlanmıştır. Tane boyutu analizinde ise tane sınırlarının ortaya çıkarılması için % 15 HCl, % 85 etil alkol ile dağlanan numunelerin iç yapı görüntüleri optik mikroskop ile elde edilmiştir. İndüksiyon yüzey sertleştirme işlemi ile elde edilmiş martenzit yapı ve yüzey sertleştirme işlemi görmemiş bölgelerin mikroyapıları Fotoğraf 2.5'te görüntülenmiştir. İki bölge birbiri ile difüze olacak şekilde i içe geçmiştir.



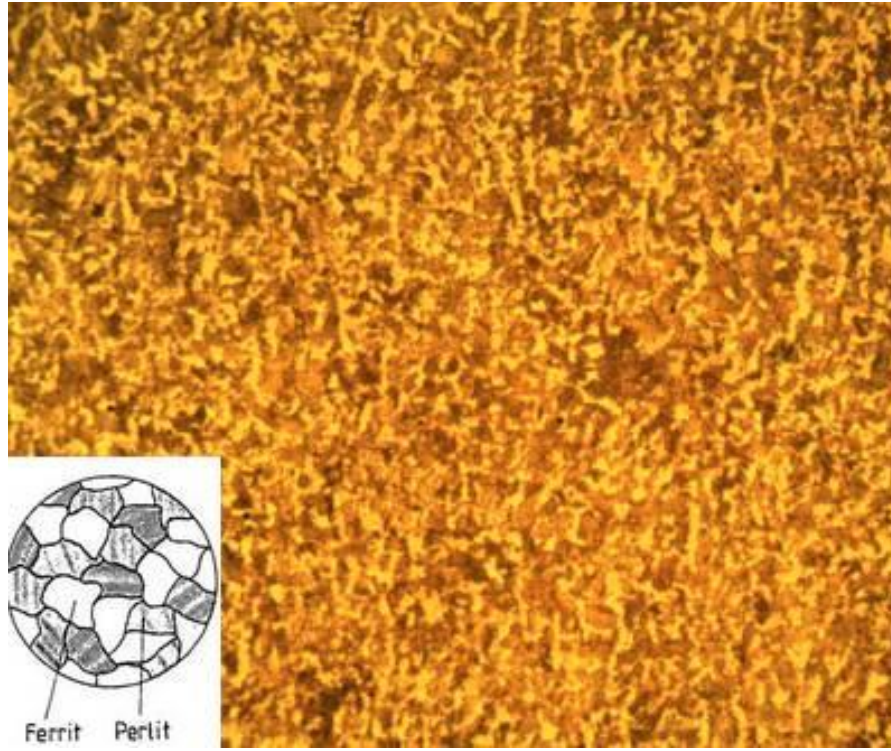
Fotoğraf 2.5. 41Cr4 malzemenin indüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerin mikroyapısı

Malzemenin tanecik yapısı küçüldüğünde daha sert bir yapı elde edilmektedir. Dolayısı ile malzemenin ömür ve mekanik kuvvet dayanımları artmış olmaktadır. 41Cr4 malzemenin indüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerinin sertlik HRC değerleri, tanecik yapısı ve ortalama tanecik çapları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. 41Cr4 malzemenin indüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerin zellikleri

Bölge	Bölge Sertliği (HRC)	Tanecik Yapısı	Ortalama Tanecik Yapı apı (μm)
İndüksiyonlu Bölge	56-62	Martenzit	0,017
İndüksiyonsuz Bölge	26-33	Temperlenmiş Martenzit	0,020

C45 malzeme rot başı gövdeleri de indüksiyon işlemine tabi tutulmadan önce, ortalama 75-105 dakika arası tav fırınında 860 °C ile 880 °C sıcaklık aralığında ısıtıldıktan sonra havada soğumaya bırakılır. Normalleşme tavlaması olarak adlandırılan bu ısıtım işlemi yüksek sıcaklıkta dövülmüş parçada, kaba taneli ferrit-perlit yapıyı ince taneli ferrit-perlit yapıya getirmek için uygulanır. Ayrıca normalize edilmiş malzemenin sertliği düşer, talaş kaldırma kolaylaşır ve sıcak dövme esnasında parçada meydana gelen iç gerilmeler giderilmiş olmaktadır. C45 malzeme rot başı gövdesinin normalize edilmiş tanecik yapısı Fotoğraf 2.6'da gösterilmiştir.



Fotoğraf 2.6. C45 malzemenin normalize edilmiş ferrit-perlit tanecik yapısı

C45 malzemenin de indüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerinin sertlik HRC, tanecik yapısı ve ortalama tanecik çapları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. C45 malzemenin indüksiyonlu ve indüksiyonsuz bölgelerin özellikleri

Bölge	Bölge Sertliği	Tanecik Yapısı	Ortalama Tanecik Yapı Çapı (μm)
İndüksiyonlu Bölge	56-62 HRC	Martenzit	0,017
İndüksiyonsuz Bölge	172-216 HB	Ferrit-Perlit	0,026

2.2 Rot Başlarında Ömür Dayanımı İçin İndüksiyon Sertleştirmenin Önemi

Malzeme yavaşça artan yüklere maruz bırakıldığı zaman, belirli bir sınır gerilmede dayanımı sona erişip deforme olmaktadır. Bulunan bu gerilme değerine malzemenin statik dayanımı adı verilmektedir (Tankut N. ve Zor M., 2012). Ancak değişken gerilmelerin etkisi altındaki elemanlarda bunların maksimum değerleri değil tekrar sayısı önemlidir. Çevrimsel olarak değişen gerilmeler malzemenin içyapısında bazı yıpranmalara sebep olmakta ve kopma olayı statik sınırların çok altında meydana gelmektedir. Değişken gerilmelerin etkisi ile malzemenin içyapısındaki değişikliklere yorulma ve elemanın kopuncaya kadar dayandığı süreye de ömür adı verilmektedir. Malzemenin ömrü genellikle çevrim sayısı ile ifade edilir. Değişken zorlanmada kopma, içyapıdaki veya dış yüzeydeki bir süreksizlik noktasından başlar. Bu nokta civarında malzeme yorulur bir çatlak meydana gelir. Zamanla bu çatlak derinleşir, sonunda çatlak dışındaki bölgedeki gerilme mukavemet sınırını aşarak elemanın birden bire kırılmasına neden olur. Bu şekilde oluşan kırılma yüzeylerinde iki bölge görülmektedir. Kırılma yüzeyinin bir kısmı mat ve düz, diğer kısmı ise parlak ve tanelidir. Birinci bölge önceden meydana gelen ve zamanla büyüyen çatlağı, ikinci bölge ise birden bire kopan bölgeyi göstermektedir. Birçok parça başlangıçta çok iyi çalışabilir yalnız belli bir süre sonra yüklemenin çevrim sayısına bağlı olarak yorulma hasarına uğrayarak işlevselliğini yitirmektedir (Yuksel Chaush, 2008). Malzeme yorulması sonucu çeşitli yerlerinden kırılmış rot başı görüntüleri Fotoğraf 2.7’de gösterilmiştir.



Fotoğraf 2.7. Malzeme yorulması sonucu çeşitli yerlerinden kırılmış rot başları

Literatürde rot başlarının mekanik performansı üzerinde çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Rot başı malzemeleri için yapılan önemli çalışmalardan biri Bayrak ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır (Bayrak ve ark., 2007). Yapılan çalışmada DIN 41Cr4 ve DIN 42CrMo4 malzemelerin ısıtılma süreci ile yorulma dayanımlarının artırılabilirdiği ve 41Cr4 malzemenin tavlama sıcaklığı seviyesi 42CrMo4 malzemenin daha düşük seçildiğinde, her iki malzeme için aynı akma mukavemetini elde etmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Asi ve Yeşil (2013), uçakların SAE 4340 malzeme piston kollarının arıza nedenini araştırmışlardır. Çalışmada hatanın malzeme yorulmasına dayalı olduğu ve çatlakların malzeme yüzeyinden başladığı saptanmıştır. Falah ve ark. (2007), AISI 8620 çelikten imal edilen rot başlarının başarısızlık nedenlerini araştırmışlardır. Yapılan incelemede rot başlarında meydana gelen hasarın yorulma cinsi olduğu ve bu hasarın rot başlarındaki en ince bölgede çatlak başlangıcı ile vuku bulduğunu belirlemişlerdir. Dolayısı ile malzemenin ömür dayanımları otomotiv sektöründe hem maliyet yönünden hem de güvenlik yönünden çok önemli bir konu olmuştur. Bu kapsamda indüksiyon sertleştirme işlemi, rot başı üretiminde malzemenin dayanımının artırılması için vazgeçilmez bir süreç haline gelmiştir.

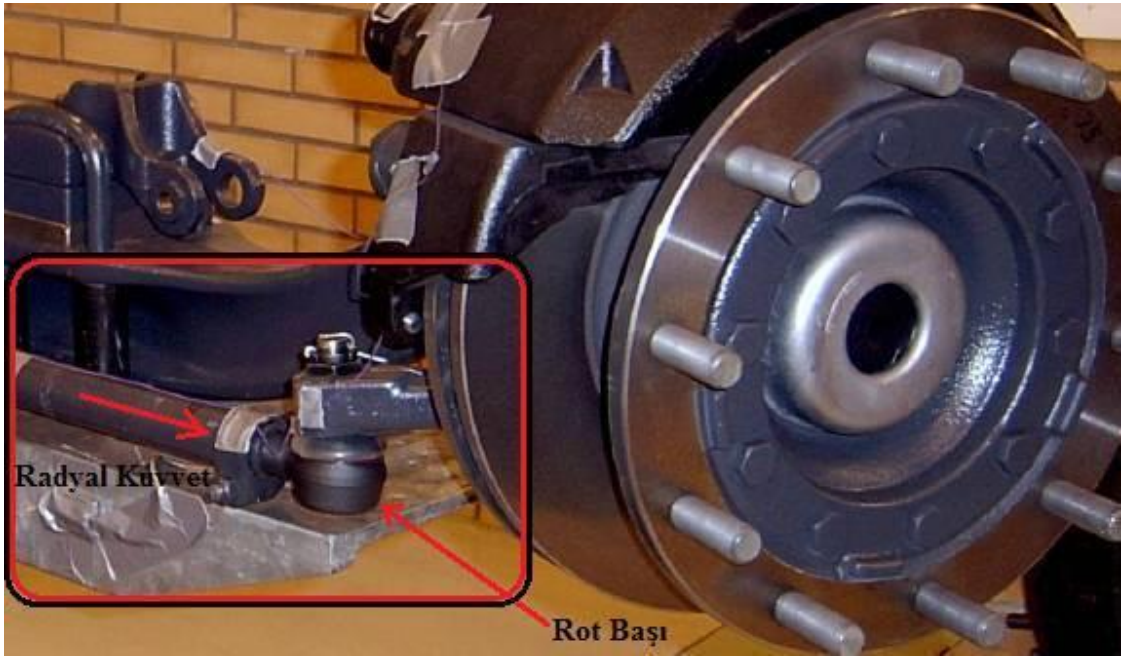
Rot başlarında malzemelerin ömür dayanımlarını etkileyerek yorulmalarına etki eden faktörleri aşağıdaki gibi genelleyebiliriz (Temiz V., 2002).

- Gerilme hali: Gerilme genliği, ortalama gerilme, iki eksenli gerilme halinin varlığı, kayma gerilmeleri vb. durumlar yorulma ömrünü azaltmaktadır.
- Geometri: Malzemede yorulma çatlaklarını başlatabilecek ve gerilme yığılmalarına neden olan süreksizlerin varlığı yorulma ömrünü etkilemektedir.
- Artık gerilmeler: Kaynak, döküm, dövme, talaşlı imalat vb. işlemler sonunda oluşan artık gerilmeler yorulma ömrünü azaltmaktadır.
- Malzeme türü: Yorulma ömrü malzeme türüne göre büyük değişiklikler gösterebilir.
- İç kusurların boyutları ve dağılımı: Dövme esnasında malzemenin üst üste katlanması ve döküm sonrası oluşan boşluklar yorulma ömrünü önemli derecede azaltmaktadır.
- Tane büyüklüğü: İndüksiyon işlemi ile de sağlanabilen küçük tane büyüklüğü malzeme için uzun yorulma ömrü anlamına gelmektedir.

- Yükleme doğrultusu: İzotrop olmayan malzemeler için önemlidir.
- Çevre: Gaz ortamı, korozyon, erozyon vb. gibi çevre şartları yorulma ömrünü çok etkilemektedir.
- Sıcaklık: Çok yüksek ve çok düşük sıcaklıklarda çalışma malzemedeki yorulma ömrünü azaltmaktadır.

2.3 Rot Başlarında Radyal Kuvvetlere Karşı İndüksiyon Sertleştirme'nin Önemi

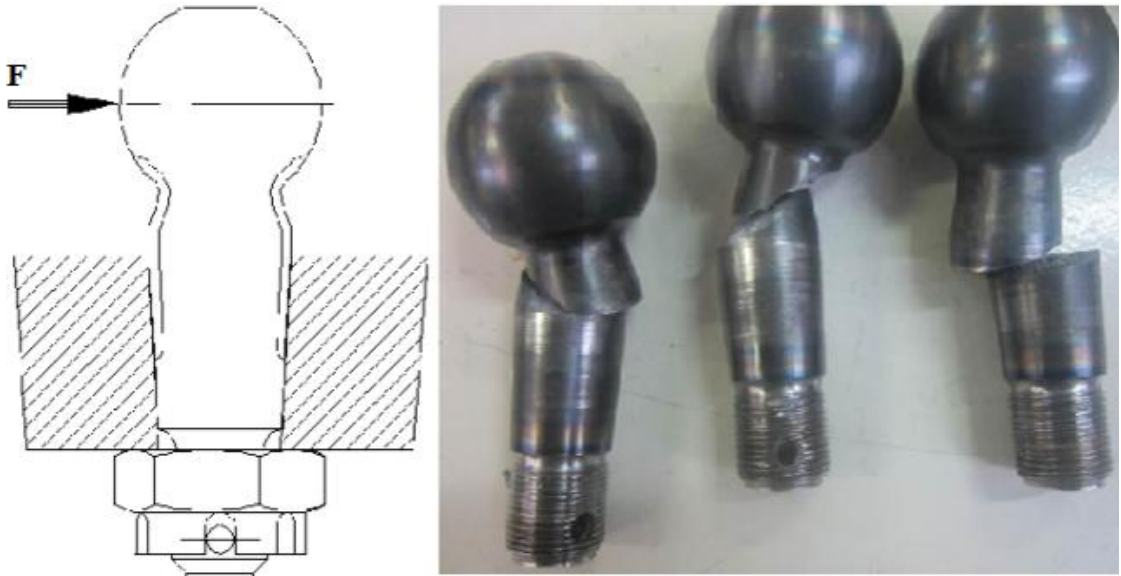
Süspansiyon sisteminin bağlantı elemanları olan rot başları, çalışma bölgesi itibarıyla sınırlı hareket etme kabiliyetindedirler. Yüklemelerin sistem üzerine gelmesi durumunda rot başı mafsallarının yuvalandığı gövdenin kenar bölgesine dayanmasıyla birlikte bir eğme kuvveti oluşmaktadır. Fotoğraf 2.8'de gösterildiği gibi rot başı, mafsal milin konik bölgesinden sabitlenmiş ve rot başı gövdesi içerisinde yataklanan mafsal miline radyal yönden bir kuvvet etkimektedir. Radyal yönden gelen bu kuvvetleri mafsal mili karşılayamaz ve kırılır ise direksiyon ile teker bağlantısı kesilmektedir.



Fotoğraf 2.8. Rot başlarına gelen radyal kuvvetlerin gösterimi

Radyal yönden gelen kuvvetlerin etkisiyle mafsal millerinin üzerinde kayma gerilmeleri oluşmakta ve eğilme durumları söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla mafsalların eğilmesi

neticesinde rot başlarının hareket kabiliyetleri sona ermiş olacak ve direksiyonun hareketi engellenmiş olacaktır. Rot başlarında indüksiyon sertleştirme işleminin yapılması ile radyal yüklemeye karşısındaki dayanım miktarının artırılması sağlanacaktır. Sertleştirilmiş bölgenin akma noktası yükseleceğinden dolayı malzeme daha yüksek kuvvetlere karşı dayanabilecek, kırılmayacak veya eğilmeyecektir. Rot başlarında özellikle mafsal millerinin tasarımı gereği küre bölgesinin altında bir boyun bölgesi oluşturulmaktadır. Bu boyun bölgesi mafsal millerinin rot başı gövde yuvası içerisinde daha çok hareket etmesini sağlamakta olup sistem için en kritik bölge olarak karşımıza çıkmaktadır. Fotoğraf 2.9'da şematik olarak mafsal miline gelen radyal yükün gösterimi ve yüklemeye durumunda hasara uğramış parçalar görülmektedir.



Fotoğraf 2.9. Radyal yüklemeye sonucunda hasara uğramış mafsal milleri

2.4 Rot Başlarında Eksenel Kuvvetlere Karşı İndüksiyon Sertleştirmenin Önemi

Rot başı mafsal milleri yatakladıkları gövde yuvası içerisinde aksel olarak yüksek yüklere maruz kaldığı zaman, rot başı gövdesinin iç kısımlarını ve ağız bölgesini deformasyona uğratarak dışarı çıkmaya çalışmakta (pull out), ya da aksel olarak ters yöndeki yükler karşısında gövdenin kapak kısmını patlatarak mafsalın gövdeden çıkışı gözlemlenmektedir (push out). Dolayısı ile rot başlarına aksel yönden gelen bu kuvvetlerin etkisi ile mafsal millerinin yuvalandıkları gövdelerden ayrılmasıyla direksiyon teker bağlantısı kesilmiş olacaktır.



Fotoğraf 2.10. Rot başlarına gelen aksel kuvvetlerin gösterimi

Yataklama elemanı olarak kullanılan gövde parçasının iç yüzeyine ve mafsal milinin dış yüzeyine indüksiyon sertleştirilmesi yapıldığında malzemelerin temas bölgelerindeki akma değerleri artırıldığından parçaların yüklere karşı dayanımları artmaktadır. Parçalara gelen aksel yük öncelikle indüksiyonlu sert bölgeye etki etmektedir. Rot başına gelen hedef yük değeri aşıldığında gövde malzemesinin indüksiyonlu bölgesi sert yapısından dolayı çatlamaya başlayacak ve mafsal mili gövde yuvası içerisinde malzemeyi sündürerek dışarı çıkacaktır. Fotoğraf 2.11'de görüleceği üzere mafsal milleri rot başı gövdelerini deformasyona uğratarak sistemden ayrılmışlardır.



Fotoğraf 2.11. Aksel yüklemesi sonucunda hasara uğramış rot başları

2.5 Rot Başlarında Darbe Kuvvetlerine Karşı İndüksiyon Sertleştirme'nin Önemi

Rot başlarının çalışma ortamları göz önüne alındığında önemli olan bir diğer husus ise sistemin darbe direncine haiz olması gerektiğidir. Süspansiyon sistemleri bir aracın seyahati süresince yol koşullarına bağlı olarak sayısız ani darbe şeklindeki yüklere maruz kalmaktadır. Bu anlamda süspansiyon parçalarının darbe direncinin de yüksek olması beklenmektedir. Bu direnç geometrik optimizasyon, malzeme değişikliği ya da ısıtma işlemi uygulama yöntemleri ile sağlanabilmektedir. Geometrik düzeltmeler araçta istenmeyen fazla ağırlığa sebebiyet vermektense ve montaj elemanlarında genel itibari ile büyümeyi gerektirdiğinden dolayı pek tercih edilmemektedir. Bunun yerine alternatif malzemeler ve farklı operasyonlar ile iyileştirme yoluna gidilmektedir. Parçaların üzerinde ani yükleme sonucunda oluşan gerilim malzemede kırılmaya sebebiyet vermektedir. Malzemenin kırılması için oluşan bu gerilimin, kristalleri bir arada tutan (kohezif kuvvet) ya da kaymasını engelleyen kuvvetten fazla olması gerekmektedir. Eğer malzeme plastik olarak şekil değiştirmeye fırsat bulamadan kırılırsa buna gevrek kırılma adı verilmektedir. Kırılan yüzeyin görüntü şekli düz bir ayrılma yüzeyidir. Çoğu durumda ise malzeme kırılmadan plastik deformasyona uğramaktadır. Malzemede 45° açı yapan kayma gerilmesi oluşmakta ve gerilme kritik kayma gerilimini aştığı anda plastik deformasyon gerçekleşmektedir. Bu durumda malzeme önce plastik deformasyona uğramakta ardından da kırılma oluşmaktadır. Sünek kırılma adı verilen bu kırılmada malzeme yüzeyi girintili çıkıntılı bir görünüme sahiptir (Alp E., 2012).

Isıl işlemler de malzemelerin darbe dayanımlarını etkilemektedir. C45 rot başı gövde malzemesi normalize ısıtılardan geçirilerek darbe toklukları artırılmaktadır. Ayrıca temperleme sıcaklığı arttıkça çeliğin enerji absorbe etme kabiliyeti de artmaktadır. Temperlenmiş martenzitik yapı özelliğinde olan 41Cr4 mafsal malzemesi hem mukavemet açısından hem de darbe mukavemeti açısından iyi seviyededir. Ek olarak bu rot başı malzemelerinin dış yüzeyleri indüksiyon sertleştirme işlemine tabi tutulup akma dayanımları artmaktadır. Fakat belirli kalınlıkta yüzeyi sertleştirilmiş çeliklerin bu bölgelerdeki kırılma özelliklerinin artması ile birlikte darbe dirençleri azalmaktadır. Yüksek dayanımına sahip olan bu kırılma yapı malzemeyi akma sınırı altındaki darbelerle karşı korumaktadır. Daha yüksek darbeler de ise indüksiyonlu yüzeyde çatlaklar meydana gelmektedir. Çatlayarak kırılan bu sert yapı darbeleri sönmüyleyerek parçaların daha çok eğilmesini ve kullanılamaz hale gelmesini önlemektedir.

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ANALİZLER

3.1 Mafsal Millerinde İndüksiyon Sertleştirme Ömür Dayanımına Etkisi

3.1.1 Deneyin amacı (Ömür Testi)

Yapılacak olan deneysel çalışmada, indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin ömür dayanımına olan etkisi araştırılacaktır. Bu kapsamda araçta direksiyondan verilen hareketi, tekerleklere ileterek tekerleklerin düşey eksene göre dönmesini sağlayan rod başlarında kullanılan, 41Cr4 malzeme mafsal millerinin belirli bölgelerine ayrı ayrı indüksiyon yüzey sertleştirme operasyonları uygulanarak parçalar ömür testine tabi tutulacaktır.

3.1.2 Deneysel prosedür

41Cr4 malzemedan üretilmiş mafsal milleri indüksiyon işlemine tabi tutulmadan önce, ortalama 75 dakika tav fırınında 850 °C ile 870 °C sıcaklık aralığında ısıtılıp 40 °C - 90 °C sıcaklığındaki yağ havuzundan geçirilmiştir. Sertleşen parçalardaki artık gerilmelerin alınması ve daha tok bir yapının elde edilmesi amacıyla mafsal milleri 570 °C - 610 °C sıcaklık aralığında ortalama 75 dakika meneviş fırınından geçirilerek tanecik yapıları temperlenmiş martenzit yapısına dönüştürülmüştür. Sonrasında mafsal millerinde belirlenen bölgelere indüksiyon cihazı ile 900°C-1100°C aralığında ısıtma yapıp, parçalar ani su banyosuna tabi tutulmuştur. Böylece belirlenen yüzeylerin tanecik yapıları martenzite dönüştürülmüştür. Bölgesel olarak gerekli sertlik değerlerine ulaşan mafsal milleri ömür dayanım karşılaştırması için Fotoğraf 3.1'de gösterilen ömür test cihazında (SERVOTEST) test edilmiştir. Test sistemi ± 200 kN dinamik yükleme kapasitesine ve ± 150 mm deplasman yeteneğine sahiptir. Ayrıca sistemde 30 Hz frekansa kadar parçalar test edilebilir. Deneysel çalışmada, mafsal milleri ömür karşılaştırması için 5 Hz frekansta, ±20 kN radyal yükte 500.000 çevrim için ömür performansları belirlenmiştir.



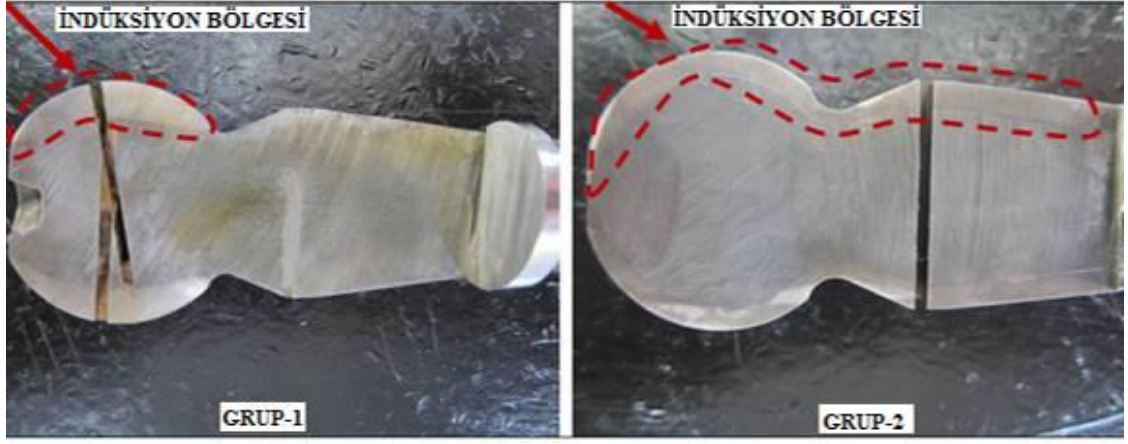
Fotoğraf 3.1. Dinamik ömür test istasyonu

3.1.3 Sonuçlar ve tartışma

Fotoğraf 3.2’de görüntüleri bulunan iki farklı numune grubu gösterilmiştir. Birinci grup mafsalsal millerine indüksiyon işlemi sadece mafsalsal küresine uygulanmış, mafsalsal boğazı ve konik bölgelerine indüksiyon işlemi uygulanmamıştır. İkinci grup mafsalsal millerine ise mafsalsal küresinden şaft koniklik bitimine kadar tüm yüzeye indüksiyon işlemi uygulanmıştır. 41Cr4 malzemeden üretilmiş bu mafsalsal milleri, indüksiyon işleminin yapılmış olduğu bölgelerdeki etkilerin belirlenmesi amacıyla orta düzlemlerinden kesilerek küre, boyun ve konik kısımlarından sertlik değerleri alınmıştır. Mafsalsal mili bölgelerinin yüzey sertlik değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Birinci grup mafsalsal millerinin bölgesel Vickers sertlik değerleri, indüksiyon işlemi yapılmış küre kısımlarında 638,9 – 832,9 HV aralığında, indüksiyon işlemi yapılmamış boyun ve konik kısımlarında ise 271,4 – 297,9 HV aralığındadır. Ancak tüm yüzeye (küre, boyun ve konik) indüksiyon işlemi uygulanmış ikinci grup mafsalsal millerinin Vickers sertlik değerleri 639,6 – 845,1 HV aralığındadır.

Tablo 3.1. Mafsalsal mili gruplarının maksimum ve minimum sertlik değerleri

Grup No	Mafsalsal mili küre kısmı (HV)		Mafsalsal mili boyun kısmı (HV)		Mafsalsal mili konik kısmı (HV)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Grup 1	638,9	832,9	274,4	297,9	271,4	278,0
Grup 2	640,8	829,7	639,6	842,9	688,5	845,1



Fotoğraf 3.2. Mafsal mili gruplarının indüksiyon sertlik bölgeleri

Farklı bölgelerinden indüksiyon işlemine tabi tutulmuş mafsal millerinin (Grup 1 ve Grup 2) dinamik test sistemi vasıtasıyla yorulma dayanımları belirlenmiştir. Mafsal mili gruplarına uygulanan test koşulları ve elde edilen test sonuçları Tablo 3.2 'de verilmiştir. Birinci grup mafsal millerinde indüksiyon işleminin sadece mafsal küresine uygulanıp, boyun ve konik kısımlarına uygulanmamasından dolayı parçalar hedef çevrim sayısını tamamlayamadan radyal yorulma testi sırasında boyun bölgelerinden kırılmıştır. İkinci grup mafsal millerinde ise indüksiyon işleminin mafsal küresinden konik bitimine kadar tüm bölgelere uygulanmasından dolayı mafsal millerinin dayanımları artmış ve kırılmamışlardır. Birinci grup mafsal milleri test sisteminde ancak 164.342 ve 218.178 çevrim sayısı yapmışlardır. İkinci grup mafsal milleri ise hedef değeri olan 500.000 çevrim sayısını tamamladığından dolayı test sistemi durdurulmuştur.

Tablo 3.2. Mafsal mili gruplarının yorulma test sonuçları

Grup No	Parça No	Çevrim Sayısı	Kuvvet (kN)	Frekans (Hz)	Sonuç
Grup-1	1. parça	164.342	±20	5	Boyun kısmından kırıldı.
	2. parça	218.178			Boyun kısmından kırıldı.
Grup-2	1. parça	525.677			Kırılma gözlenmedi.
	2. parça	526.045			Kırılma gözlenmedi.

Rot başı montajı yapılarak yorulma test cihazına bağlanıp test edilen 1. grup ve 2. grup mafsal millerinin test sonrası görüntüleri sırasıyla Fotoğraf 3.3 ve Fotoğraf 3.4'te verilmiştir.



Fotoğraf 3.3. Grup-1 Mafsal millerinin yorulma test sonucu görüntüleri



Fotoğraf 3.4. Grup-2 Mafsal millerinin yorulma test sonucu görüntüleri

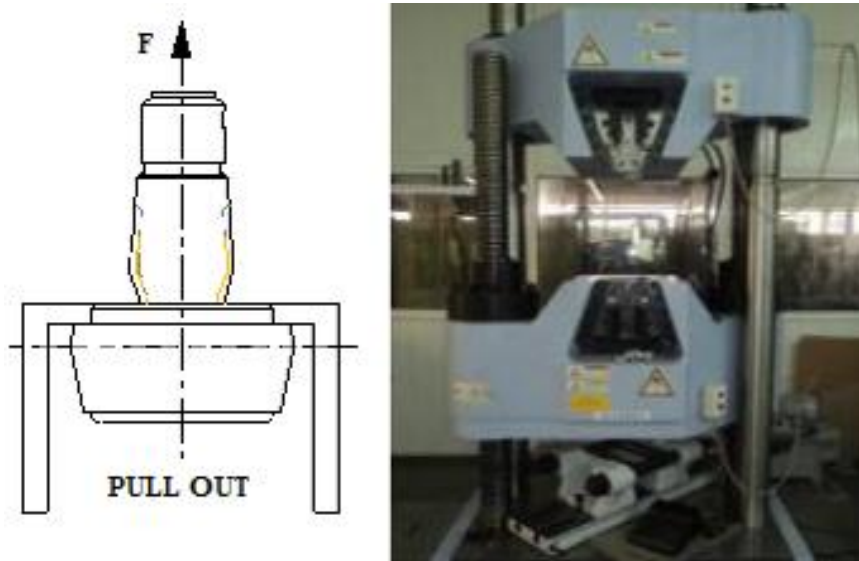
3.2 Rot Başlarında Eksenel Kuvvetlere Karşı İndüksiyon Sertleştirmenin Etkisi

3.2.1 Deneyin amacı (Pull Out / Mafsal Çıkma Testi)

Bu çalışmada, 41Cr4 malzeme rot başı mafsal mili ve C45 malzeme rot başı gövdesi indüksiyon işlemine tabi tutularak rot başı montajı yapılacaktır. Rot başına eksenel yönde bir kuvvet uygulanarak mafsal milinin yuvalandığı gövdenin içerisinden çekilip çıkarılması esnasında indüksiyon sertleştirme işleminin kuvvet dayanımına etkisi gözlemlenecektir. Ayrıca eksenel yükleme ile yapılan pull out testi ANSYS Workbench V14.0 kullanılarak gerçekleştirilecek ve analizin sonuçları gerçekte gerçekleştirilen test ile karşılaştırılacaktır.

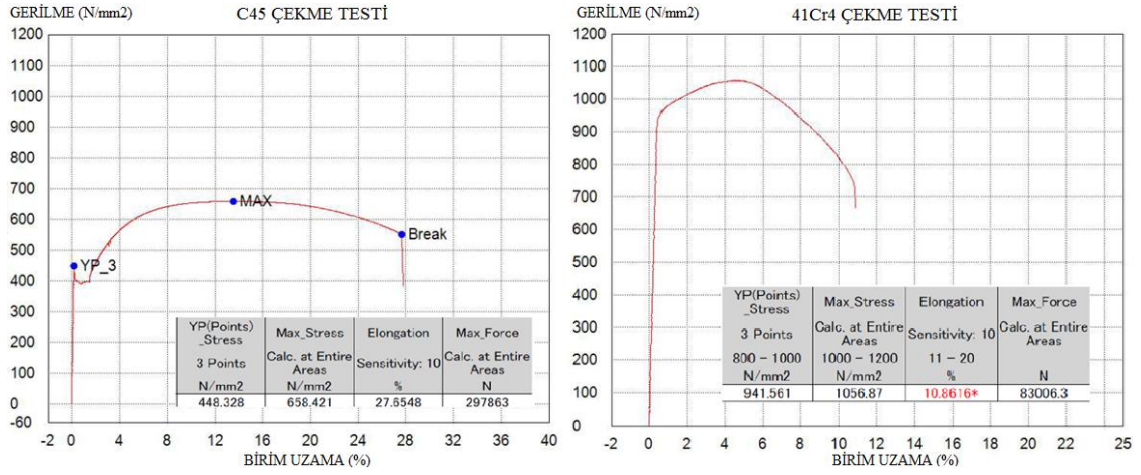
3.2.2 Deneysel prosedür

Pull out testi için 41Cr4 malzemeden üretilmiş mafsal milleri öncelikle 75 dakika tav fırınında 850 °C ile 870 °C sıcaklık aralığında ısıtılıp 40 °C - 90 °C sıcaklığındaki yağ havuzundan geçirilmiştir. Sertleşen parçalardaki artık gerilmelerin alınması ve daha tok bir yapının elde edilmesi amacıyla mafsal milleri 570 °C - 610 °C sıcaklık aralığında ortalama 75 dakika meneviş fırınından geçirilmiştir. Sonrasında mafsal millerinde belirlenen bölgelere indüksiyon cihazı ile 900°C-1100°C aralığında ısıtma yapıp, parçalar ani su banyosuna tabi tutulmuştur. C45 malzeme rot başı gövdeleri de normalize ısıl işlemi için 75-105 dakika arası tav fırınında 860 °C - 880 °C sıcaklık aralığında ısıtıldıktan sonra havada soğumaya bırakılmıştır. Aynı şekilde gövdeler de indüksiyon işleminden geçirilerek rot başı parçalarının yüzeyleri sertleştirilmiştir. Fotoğraf 3.5'te gösterilen 600 kN dinamik yükleme kapasitesine sahip olan (SHIMADZU) test cihazında parçalar test edilmiştir.



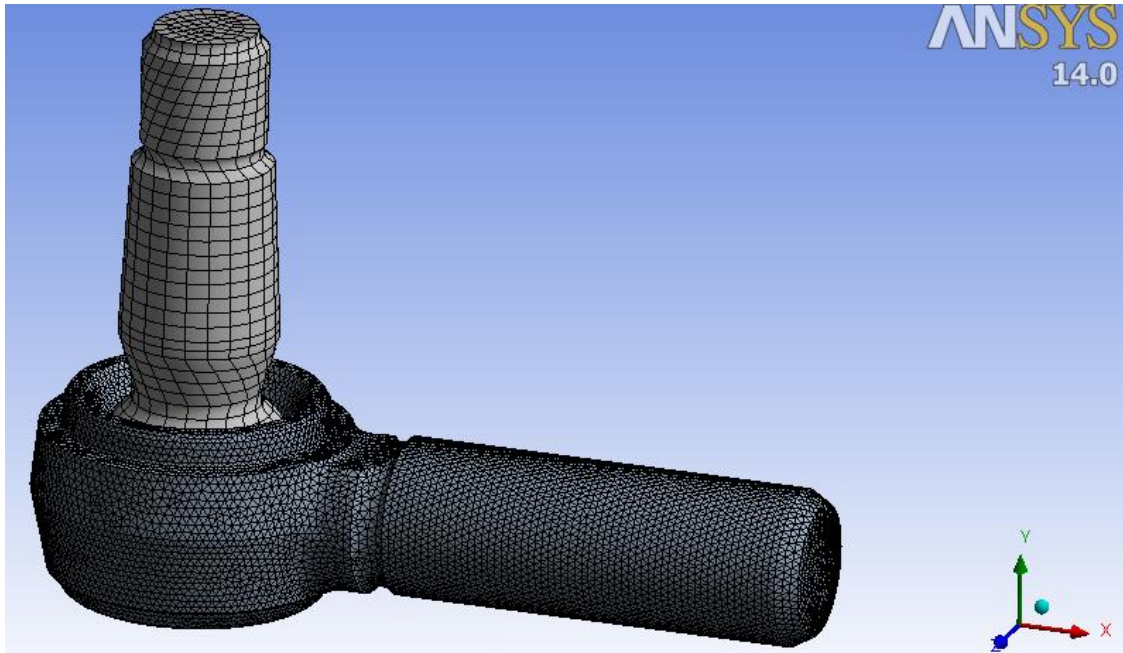
Fotoğraf 3.5. Pull out test prosedürü ve çekme-basma-bükme test istasyonu

Ayrıca pull out test prosedürü ANSYS Workbench V14.0 analiz programında birebir uygulanarak indüksiyon işleminin etki sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda analizlerde kullanılmak üzere indüksiyon sertleştirilmesi yapılmamış, fakat ısıl işlemlerden geçirilmiş C45 ve 41Cr4 malzemelerinin çekme deneyi sonuçları Şekil 3.1'de gösterilmiştir. C45 malzemesinin akma noktası yaklaşık 448 N/mm², 41Cr4 malzemenin ise 941,5 N/mm² olarak belirlenmiştir.

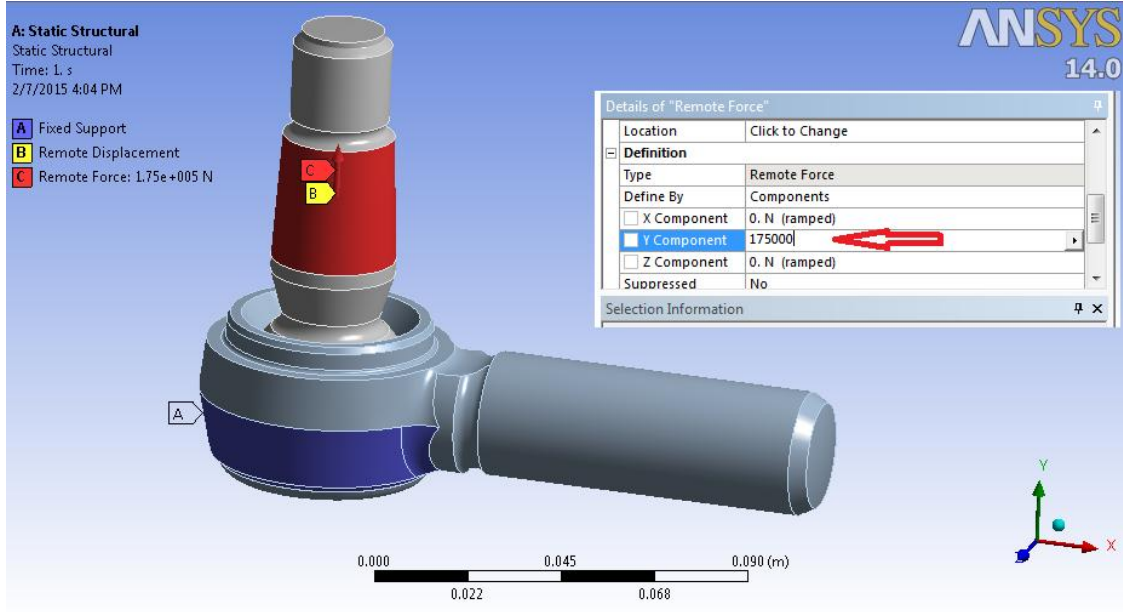


Şekil 3.1. C45 ve 41Cr4 malzemelerin çekme testi sonuçları

Pull out deneyi için rot başı 3D modeli ANSYS V14 analiz programına alınarak, Şekil 3.2’de gösterilen mafsallı miline düzgün yüzey yapısından dolayı 2.580 elementlik hex dominant (karesel) mesh uygulanmıştır. Buna karşın rot başı gövdesine karmaşık yüzey yapısından dolayı 310.256 elementlik tetrahedrons (üçgensel) mesh uygulanmıştır. Pull out test prosedürü analiz programına birebir yansıtılarak, rot başı gövdesi alt kısmından sabitlenmiş ve mafsallı milini rot başı gövdesinden çıkarmak için y (eksenel) yönünden 175 kN’luk bir kuvvet uygulanmıştır. Rot başına uygulanan mesnet şartları Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Rot başı pull out testi analizinin mesh yapısı



Şekil 3.3. Rot başı pull out testi analizinin mesnet şartları

3.2.3 Sonuçlar ve tartışma

Pull out testinde rot başı gövdesi alt kısmından sabitlendikten sonra mafsal miline aksenal yönden bir kuvvet uygulanmıştır. Bu kuvvet mafsal miline rot başı gövdesinden çıkana kadar uygulanmaya devam edilmiştir. Yapılan testlerde aksenal kuvvetler Tablo 3.3'te gösterildiği gibi 191,5 kN ve 193,3 kN olarak karşımıza çıkmıştır. Ayrıca test sonuçlarında malzemelerde meydana gelen deformasyon bölgeleri Fotoğraf 3.6'da gösterilmiştir. Rot başı gövdesinin ağız kısımlarında ve iç orta bölgede halka şeklinde çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar, indüksiyon işleminden dolayı rot başı gövdesinin iç kısmındaki sert tabakada meydana gelmiştir. Fakat mafsal millerinde herhangi bir deformasyon görülmemiştir.

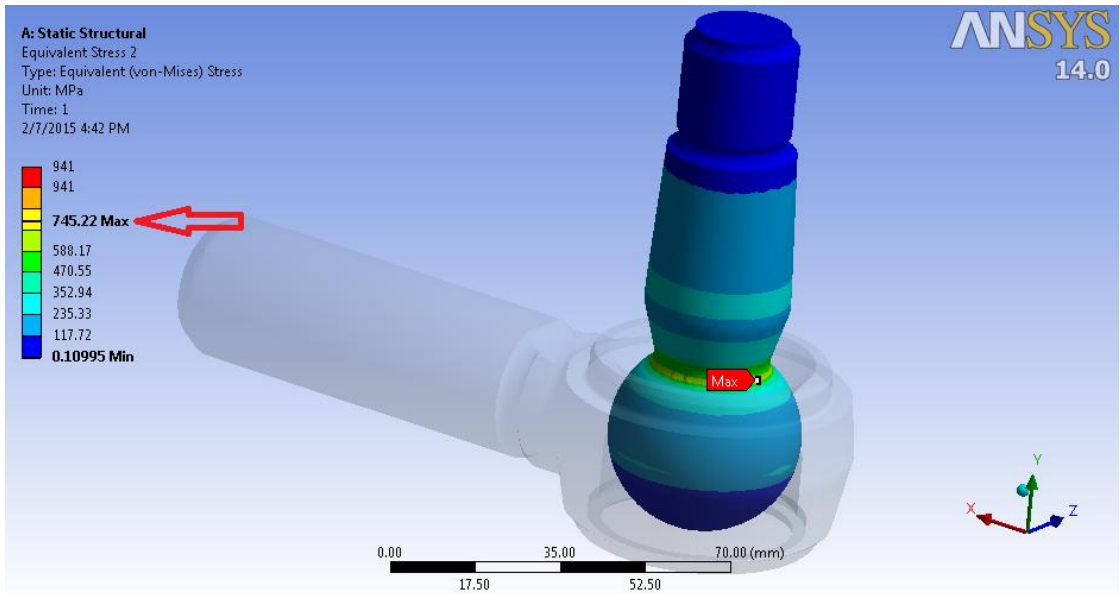
Tablo 3.3. Pull out test sonuçları

Parça No	Pull Out Test Yüğü (kN)
Rot Başı 1	191,5 kN
Rot Başı 2	193,3 kN



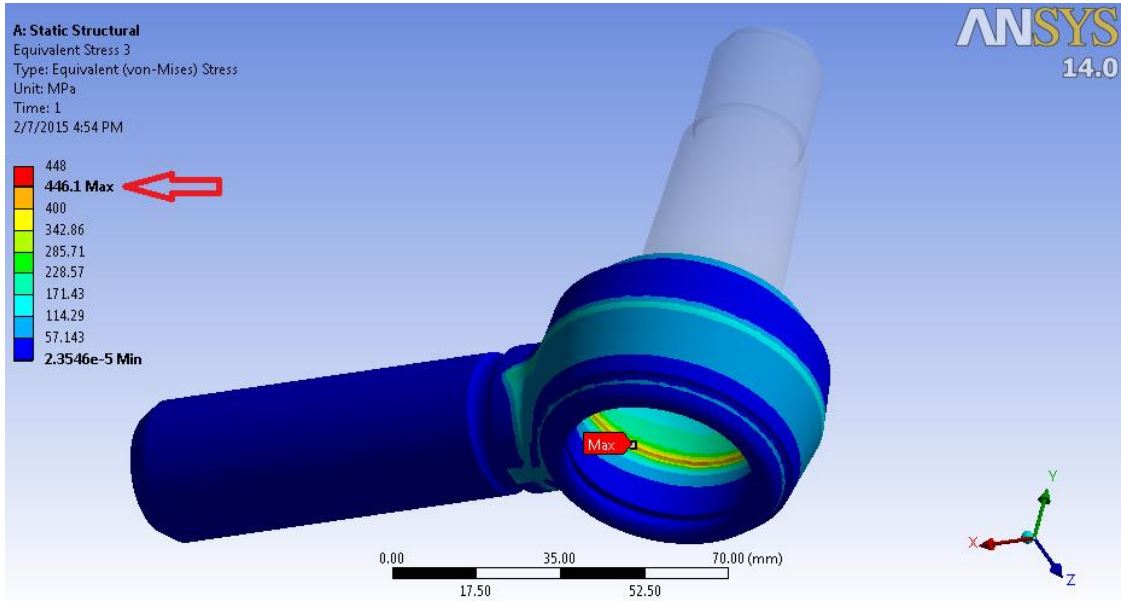
Fotoğraf 3.6. Pull out testi sonucunda gövdede meydana gelen deformasyon bölgeleri

Analiz çalışması da Şekil 3.1’de verilen rot başlarında kullanılan malzemelerin indüksiyon işlemine tabi tutulmamış akma noktalarına göre gerçekleştirilmiştir. Mafsal milinin 175 kN’luk eksenel kuvvet ile rot başı gövdesinin içerisinden çıkarılması esnasında mafsal milinin boğaz kısmında maksimum 745,22 MPa değerinde bir gerilme meydana gelmiştir (Şekil 3.4). 41Cr4 mafsal mili malzemesinin akma noktası 941 MPa olduğundan bu gerilme değeri karşısında mafsal milinde herhangi bir deformasyon meydana gelmemiştir.



Şekil 3.4. Pull out testinde mafsal milinde meydana gelen stres gerilmesi

C45 rot başı gövde malzemesinin akma noktası Şekil 3.1’de çekme deneyi grafiğinde 448 Mpa olarak verilmiştir. Pull out testi analizinde 175 kN’luk yük değeri karşısında C45 rot başı gövde malzemesinde 446,1 MPa’lık bir gerilme meydana gelmiştir (Şekil 3.5). 175 kN yük değeri aşıldığı zaman gövde malzemesi belirtilen maksimum gerilme bölgesinden başlayarak deformasyona uğrayacaktır. Analiz programında kullanılan rot başı malzemelerinin yüzey kaliteleri ve yapıları hatasız olarak kabul edilecek olursa, rot başı malzemelerinin indüksiyonsuz olarak maksimum ulaşacağı pull out test yük değeri 175 kN olarak ortaya çıkmaktadır. Pull out test analizinin sonucundan da anlaşılacağı üzere mafsalsız milinde herhangi bir deformasyon gözlenmezken, rot başı gövdesinde gerçekte yapılan testlerde de belirtildiği yerlerden deformasyonlar ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.5. Pull out testinde rot başı gövdesinde meydana gelen stres gerilmesi

Mafsalsız millerine ve rot başı gövdelerine indüksiyon işlemi uygulanarak yapılan pull out testlerinde bir kuvvet artışının olduğu gözlemlenmektedir. Malzemelerin yüzeylerindeki 1,5-3,0 mm’lik indüksiyon sertliği malzemelere fazladan bir kuvvet dayanımı kazandırmıştır. indüksiyon işlemi yapılmayan rot başlarında 175 kN’luk bir kuvvet dayanımı ortaya çıkmıştır. Buna karşı indüksiyon işlemi yapılmış rot başlarında ortalama olarak 192 kN’luk bir kuvvet dayanımı meydana gelmiştir. Sonuç olarak indüksiyon sertleştirme işlemi bu rot başı tasarımına bağlı olarak pull out test yükünde yaklaşık olarak % 10’luk bir kuvvet dayanımını artırdığı söylenebilir.

3.3 Rot Başlarında Radyal Kuvvetlere Karşı İndüksiyon Sertleştirme Etkisi

3.3.1 Deneyin amacı (Bending / Eğilme Testi)

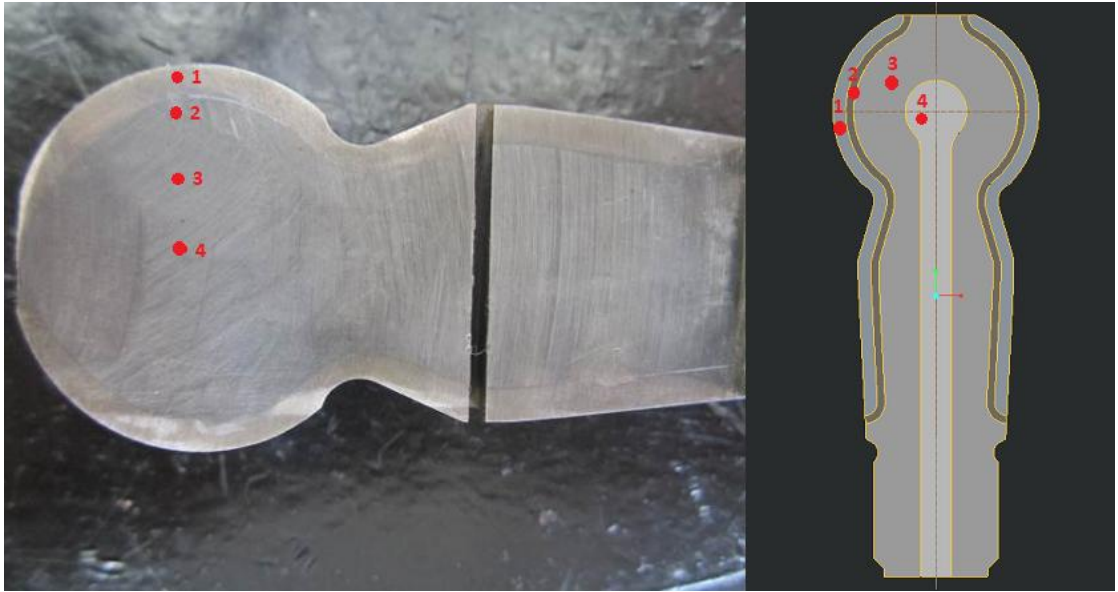
Bu çalışmada, 41Cr4 malzeme rot başı mafsal mili indüksiyon işlemine tabi tutularak radyal yönde bir kuvvet uygulanacaktır. Mafsal milinde indüksiyon sertleştirme işleminin radyal kuvvet dayanımına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenecektir. Ayrıca radyal yükleme ile yapılan eğilme testi sonlu elemanlar analiz yazılımı ANSYS Workbench V14.0 kullanılarak gerçekleştirilecektir. Çalışmada, indüksiyon sertleştirme işlemi uygulanmış mafsal milinin dış yüzeyinden merkezine doğru katmanlar şeklinde değişen sertlik değerleri analiz programında fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (Functional Graded Material) şeklinde tanımlanarak analizler yapılacaktır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FGM) bir yüzeyinden diğer yüzeylere doğru elastisite modülü, yoğunluk, sertlik, mukavemet, tanecik yapısı gibi mekanik ve kimyasal yapı faktörleri değişkenlik gösterebilmektedir. Dolayısıyla analizde her malzeme katmanının özelliği ayrı ayrı tanımlanacaktır.

Literatürde FGM çalışmaları genelde kompozit ve seramik malzemeler için tanımlanmıştır. Katı oksit yakıt pili hücrelerinde kullanılan seramik malzemeler, metaller ve kompozitlerin kırılma dayanıklılığı, aşınma ve ısı dirençlerinin hesapları yapılmıştır. Ayrıca kırılma mekaniği ve ömür hesapları için FGM halen araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Özellikle sonlu elemanlar yazılımları içinde malzeme tanımlaması şeklindeki analizler, sorunların çözüm noktası haline gelmiştir. Sabuncuoğlu ve ark. (2012), periyodik yükleme için fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tanımlayarak çatlak yayılmasını araştırmışlardır. Benzer bir çalışma, Gao ve ark. (2008), tarafından basit bir 2D modellemesi için gerçekleştirilmiştir. Bhattacharya ve ark. (2014), döngüsel termal yük altında alüminyum malzemeyi FGM şeklinde tanımlayarak yorulma ömrünü araştırmışlardır. Ayrıca FGM'nin termal yükleme koşullarını da Kokini ve ark. (2002) ve Fazarinca ve ark. (2011) tarafından değerlendirilmiştir.

3.3.2 Deneysel prosedür

Eğilme testi için 41Cr4 malzeme mafsal milleri gerekli ısı işlem prosedürlerinden geçirildikten sonra indüksiyon işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan indüksiyon işlemi

sonucunda mafsal millerinin yüzeylerinden merkezlerine doğru katmanlar şeklinde bölgeler oluşmuştur. Fotoğraf 3.7’de kesit görüntüsü verilmiş mafsal milinde gösterildiği gibi sertlik bölgeleri 4 kısımda ele alınmıştır. Yaklaşık olarak 2,5 mm kalınlığındaki birinci bölge indüksiyon işleminin tam olarak efektif olarak belirlendiği bölgedir. İkinci bölge ince bir zar şeklinde 1,5 mm’lik geçiş bölgesidir. Üçüncü bölge malzemenin büyük bir bölümünü oluşturan kısımdır. Son olarak dördüncü bölge malzemenin en yumuşak olan çekirdek kısmıdır. İndüksiyon işleminden sonra bölgelerde oluşan sertlik değerleri ve bu değerlerin çekme mukavemet dayanımları Tablo 3.4’te verilmiştir. Bölgelerdeki sertlik değerlerine karşılık gelen mukavemet dayanımları sertlik dönüşüm tablosundan alınmıştır. Tablodan da anlaşılacağı üzere sertlik değerleri malzemenin yüzeyinden merkezine doğru yüksek varyasyonlar göstermektedir. Bu nedenle gerçek değerlerin elde edilmesi için sonlu elemanlar analizlerinde bu gibi varyasyonların sabit varsayılması doğru değildir.

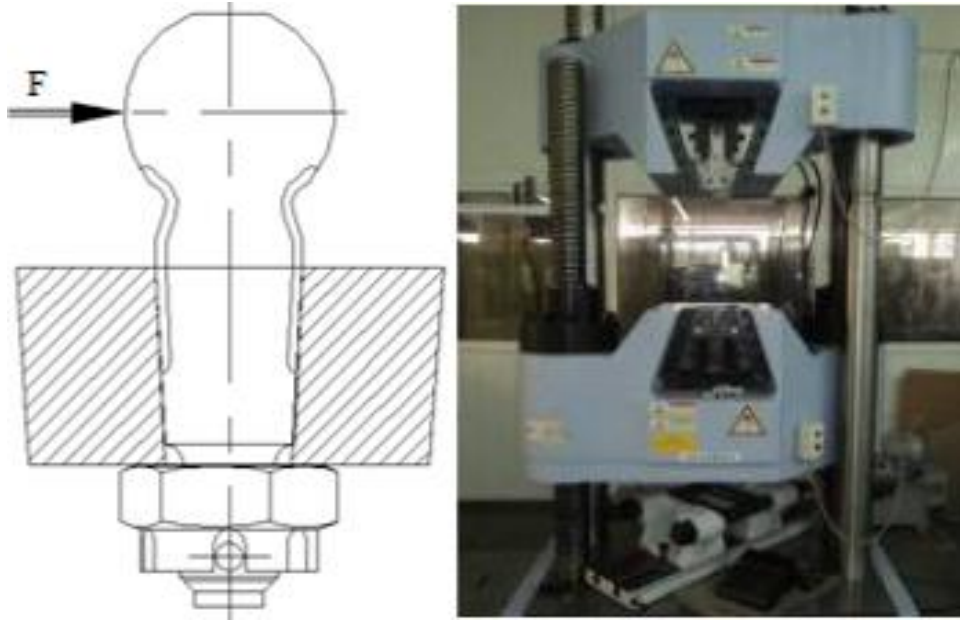


Fotoğraf 3.7. FGM’li mafsal milinin sertlik bölgelerinin kesit görüntüsü

Tablo 3.4. Mafsal mili bölgelerinin sertlik ve çekme dayanım değerleri

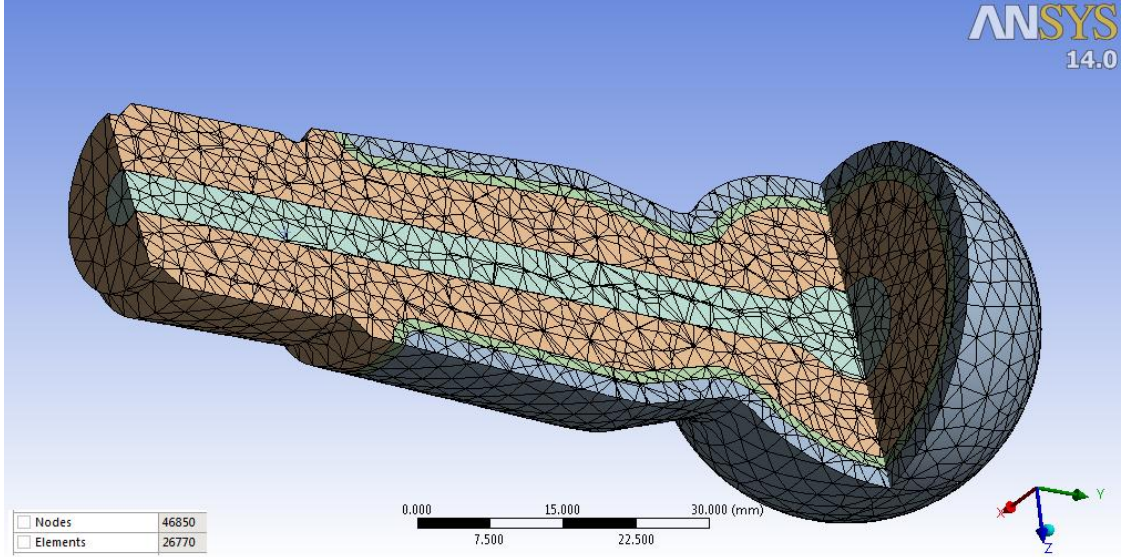
Bölge No	Bölge Sertlik Değerleri (HRC)	Çekme Dayanım Değerleri (N/mm ²)
1	57	2140
2	40	1260
3	28	920
4	26	870

Mafsal milleri gerekli ısıtma işlem süreçlerinden geçirilip indüksiyon işlemine tabi tutulduktan sonra eğilme testi için Fotoğraf 3.8’de gösterilen 600 kN dinamik yükleme kapasitesine sahip (SHIMADZU) test cihazında test edilmiştir. İndüksiyon işlemine tabi tutularak sertleştirilmiş mafsal millerinin radyal kuvvetlere karşı olan direnç artışı araştırılmıştır. Bu kapsamda mafsal milleri konik kısımlarından bir aparat ile sabitlenerek küre merkezlerine radyal yönden bir kuvvet uygulanmıştır. Mafsal milleri kırılıncaya kadar bu kuvvet artırılmıştır.

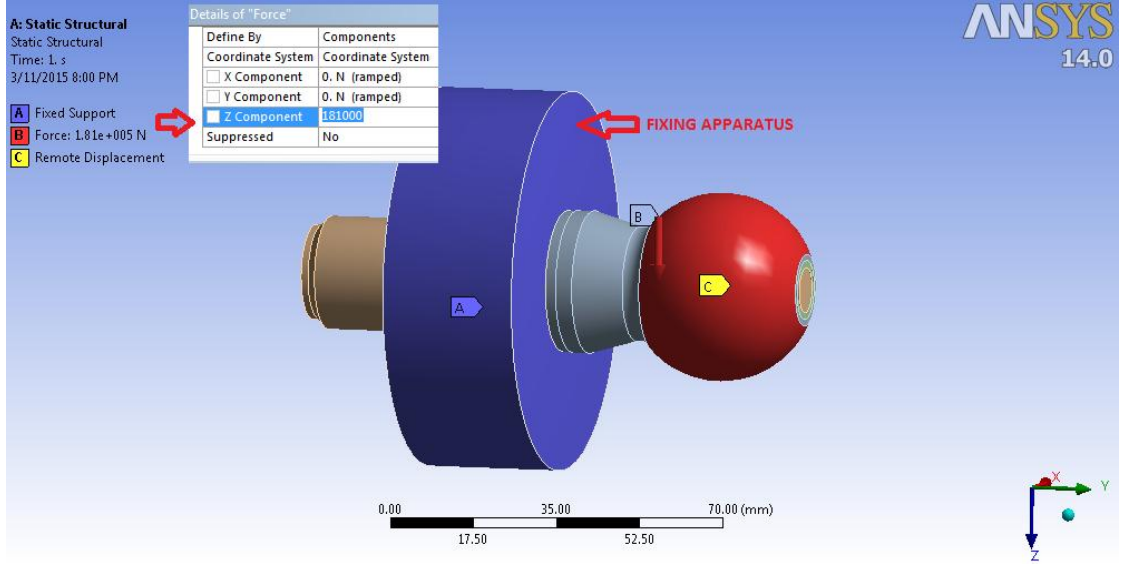


Fotoğraf 3.8. Eğilme test prosedürü ve çekme-basma-bükme test istasyonu

Ayrıca FGM’li eğilme (Bending) test prosedürü ANSYS Workbench V14.0 analiz programında birebir uygulanarak, mafsal millerinde indüksiyon sertleştirme işleminin radyal kuvvet dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda analizlerde kullanılmak üzere Tablo 3.4’te verilen bölgelerin sertlik değerlerine göre mafsal milinin FGM şeklinde 3D modeli oluşturulmuştur. Bending deneyi için FGM’li 3D mafsal mili modeli ANSYS V14 analiz programına alınarak, Şekil 3.6’da gösterildiği gibi 26.770 elementlik tetrahedrons (üçgensel) mesh yapısı ile örülmüştür. Eğilme (Bending) testinin mesnet şartları da analiz programında Şekil 3.7’de gösterildiği gibi mafsal miline uygulanmıştır. Mafsal mili bir aparat ile konik bölgesinden sabitlendikten sonra küre merkezine z (radyal) yönünden 181 kN’luk bir kuvvet uygulanmıştır.



Şekil 3.6. FGM mafsals mil eğilme testi analizinin mesh yapısı



Şekil 3.7. FGM mafsals mil eğilme testi analizinin mesnet şartları

3.3.3 Sonuçlar ve tartışma

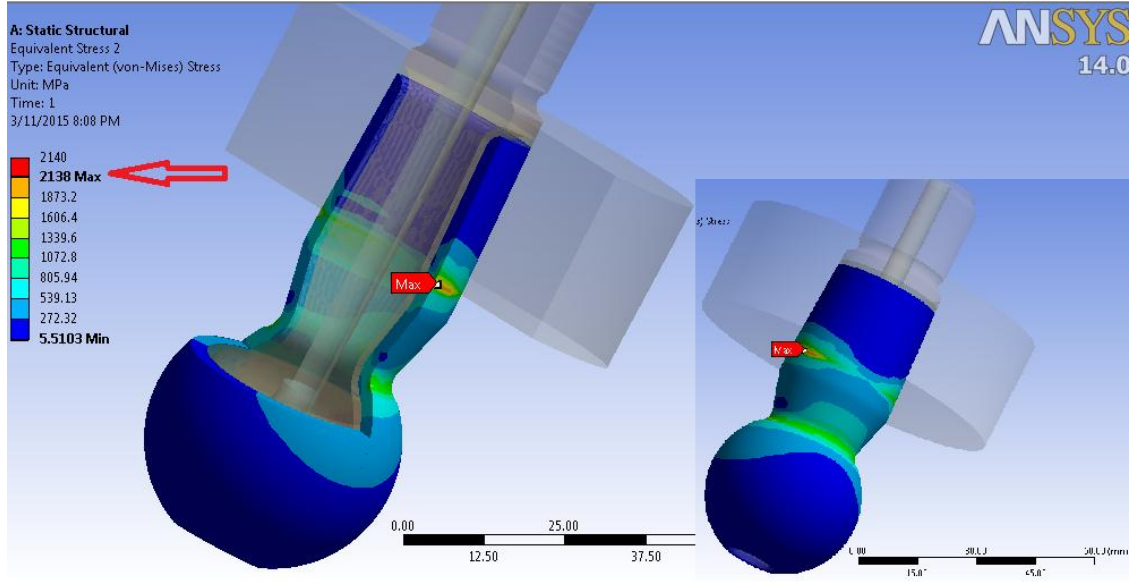
Rot başı mafsals miline indüksiyon işleminden sonra test istasyonunda eğilme (Bending) testi uygulanmıştır. Parça Fotoğraf 3.9'da gösterildiği gibi 181 kN'luk yük değerinde konik başlangıcından boyun bölgesine doğru açılı bir şekilde kırılmıştır. Ayrıca resimde kırılan mafsals milinin en dışındaki sertleştirilmiş indüksiyon bölgesi de net bir şekilde görülebilmektedir.



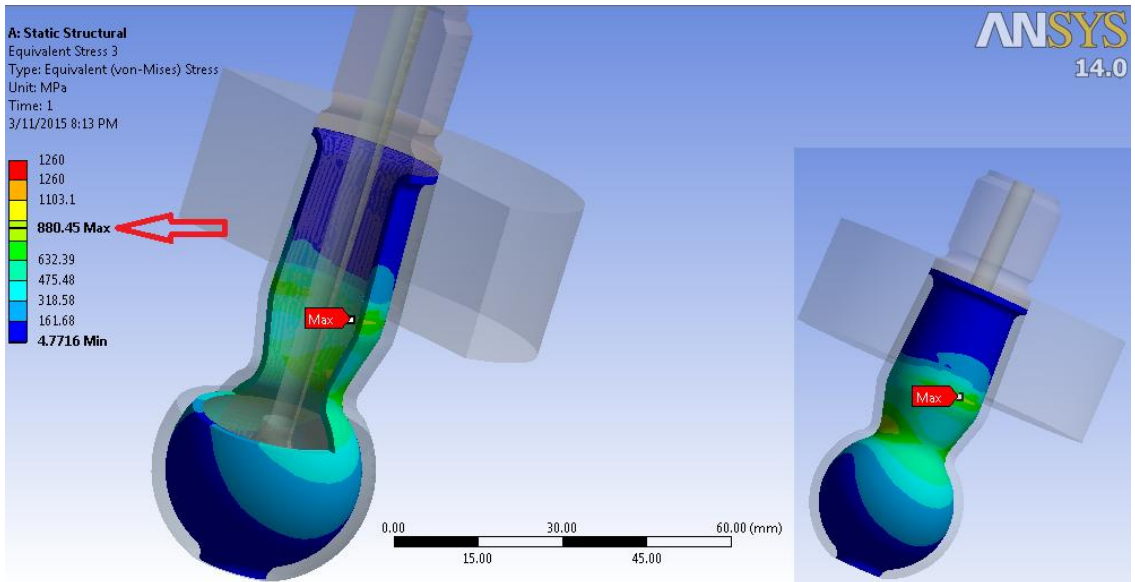
Fotoğraf 3.9. Mafsal milinin eğilme test sonucu görüntüsü

Analiz çalışmasında Tablo 3.4'te verilen FGM şeklindeki mafsal milinin farklı bölgelerindeki sertlik değerlerine karşılık gelen çekme dayanım değerleri kullanılmıştır. Yapılan analiz çalışmasında sertlik bölgelerinin akma noktaları farklılık gösterdiğinden dolayı bölgeler analizde ayrı ayrı ele alınarak incelenmiştir. FGM şeklinde modellenen mafsal miline kuvvet uygulandığı zaman kırılma en dış yüzeyden başlayarak devam etmiştir. Eğilme (Bending) testinde maksimum 181 kN kuvvet uygulandığı zaman mafsal milinin birinci bölgesi olan en dıştaki indüksiyonlu bölgeden deformasyon başlamıştır. Şekil 3.8'de analizde gösterildiği gibi bölgede 2138 N/mm^2 değerinde gerilme meydana gelmiştir. Bu gerilme değeri malzemede 57 HRC'lik sertlik değerine karşılık gelen 2140 N/mm^2 çekme dayanımına yaklaşmıştır. Dolayısı ile daha fazla kuvvet etki ettirildiğinde mafsal mili bu bölgede deformasyona uğrayacaktır. Mafsal milinin ortalama 40 HRC sertliğindeki ikinci bölgesi olan geçiş bölgesi 181 kN'luk yük değeri karşısında 1260 N/mm^2 çekme dayanımı sınırına yaklaşmamıştır. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi bölgede oluşan gerilme değeri $880,45 \text{ N/mm}^2$ civarlarında kalmış ve herhangi bir deformasyon oluşmamıştır. Mafsal milinin büyük bir bölümünü oluşturan ortalama 28 HRC sertliğindeki üçüncü bölgesi de 181 kN'luk yük değeri karşısında 920 N/mm^2 çekme dayanımı sınırına yaklaşmamıştır. Bu yük değerinde bölgede herhangi bir deformasyon söz konusu olmamıştır. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi bölgede oluşan gerilme değeri $808,44 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlenmiştir. Son olarak mafsal milinin ortalama

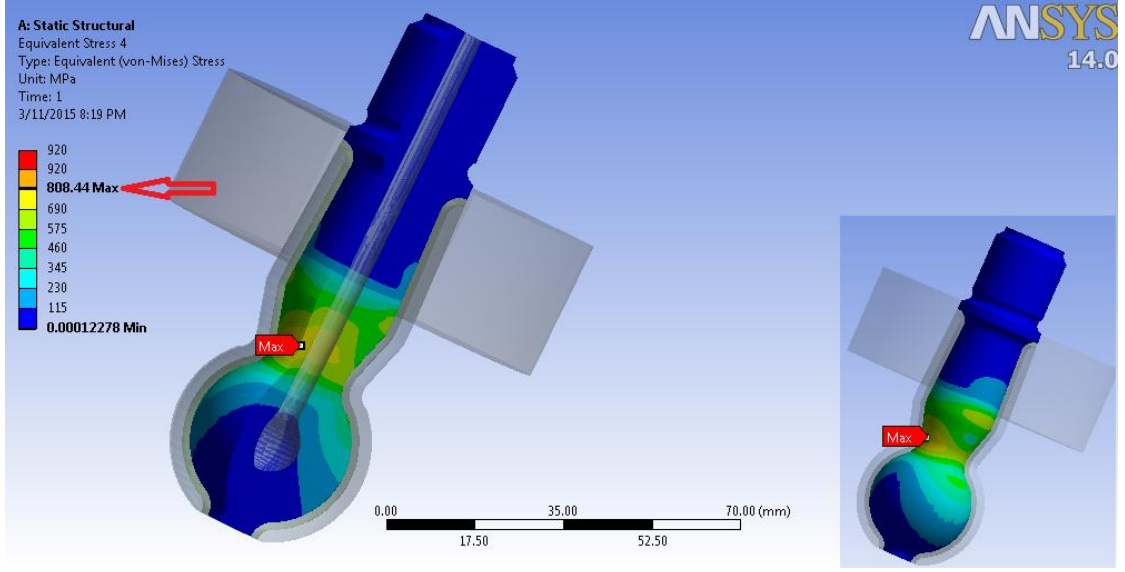
26 HRC sertliğindeki çekirdek kısmı olan dördüncü bölgesi ise 181 kN'luk yük değeri karşısında 870 N/mm^2 çekme dayanımı sınırına yaklaşmamıştır. Şekil 3.11'de analiz çalışmasında gösterildiği gibi bölgede oluşan gerilme değeri $728,46 \text{ N/mm}^2$ 'de sınırlı kalmıştır ve herhangi bir deformasyon meydana gelmemiştir.



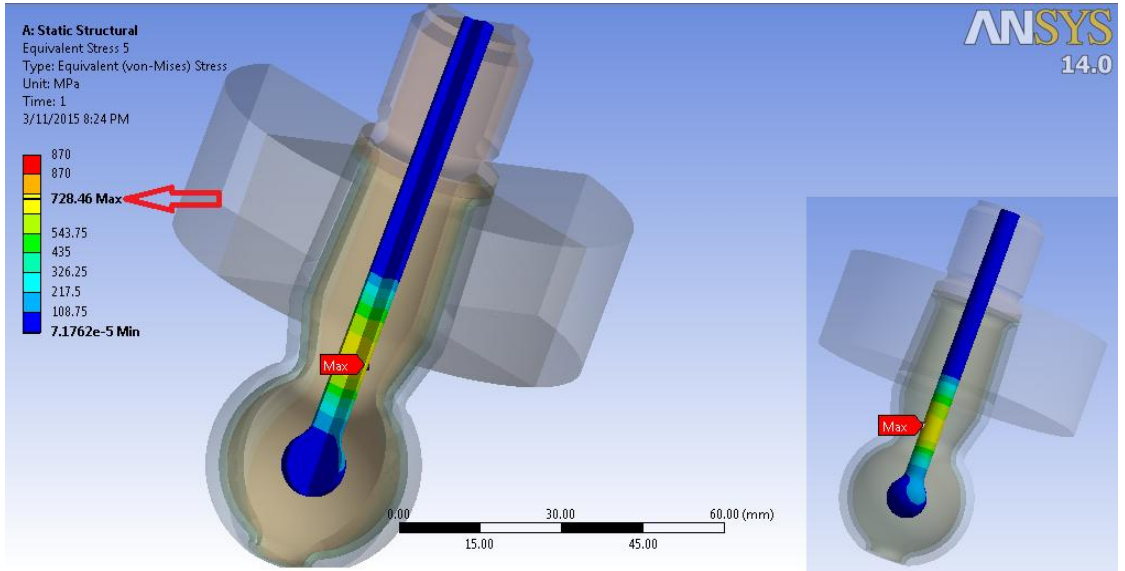
Şekil 3.8. FGM mafsals milinin birinci bölgesinde meydana gelen stres gerilmesi



Şekil 3.9. FGM mafsals milinin ikinci bölgesinde meydana gelen stres gerilmesi



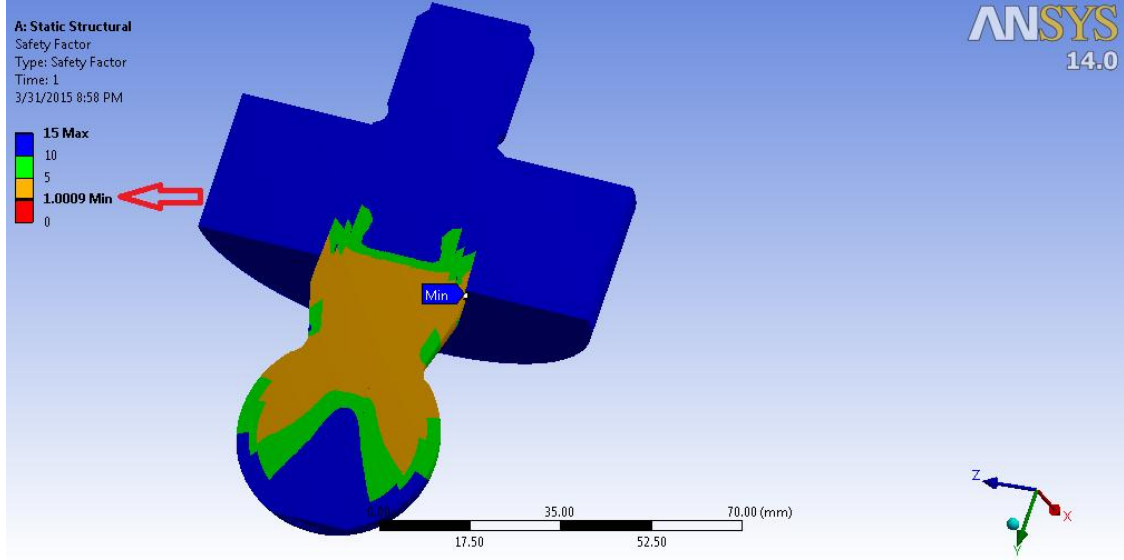
Şekil 3.10. FGM mafsals milinin üçüncü bölgesinde meydana gelen stres gerilmesi



Şekil 3.11. FGM mafsals milinin dördüncü bölgesinde meydana gelen stres gerilmesi

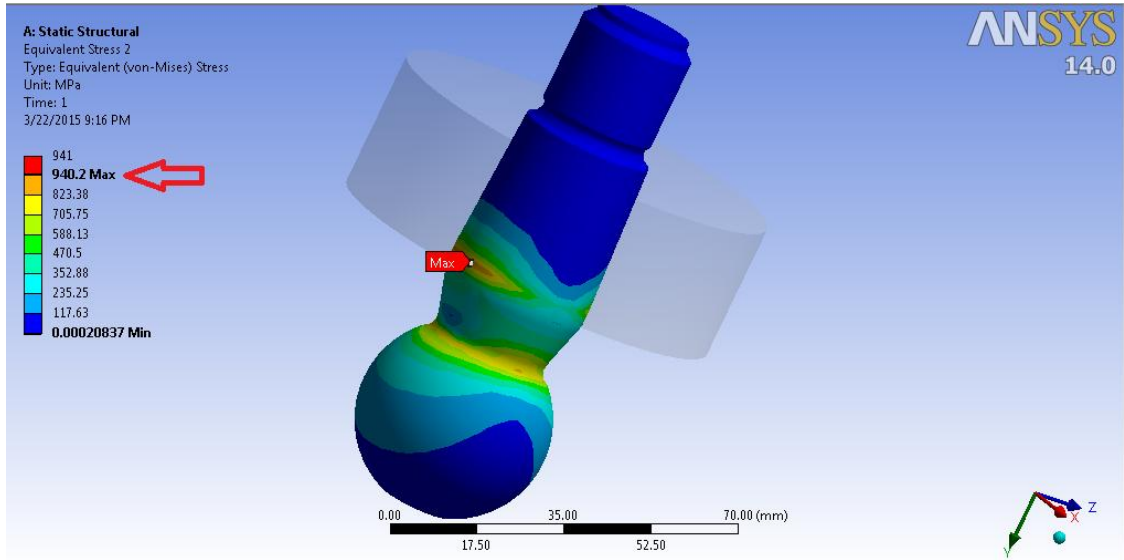
Sertlik değerlerine göre katmanlara ayrılmış mafsals milinde analizde de anlaşılacağı üzere deformasyon parçanın en dış bölgesinden başlamıştır. Sertlik değerlerinin dış yüzeyden merkeze doğru azalması ile birlikte bölgelerde oluşan gerilmeler de yüzeyden merkeze doğru azalmıştır. Analizde ortaya çıkan sonuç ile gerçekte yapılan bending eğme deneyinin hem kuvvetsel hem de kırılma yerlerinin aynı olması analizi büyük oranda doğrulamaktadır. Ayrıca analizde Şekil 3.12’de gösterildiği gibi parçanın güvenlik faktörü de hesaplanmıştır. 181 kN’luk kuvvet değeri için güvenlik faktörü 1,0009 olarak ortaya çıkmıştır. Bu kuvvet değeri aşıldığı zaman güvenlik faktörü de

bir'in (1) altına düşecektir ve analizde mafsal milinin üzerinde kırmızı bölgeler oluşmaya başlayacaktır. Sonuç olarak 181 kN'luk yük değeri aşıldığı zaman malzeme deformasyona uğrayacaktır.



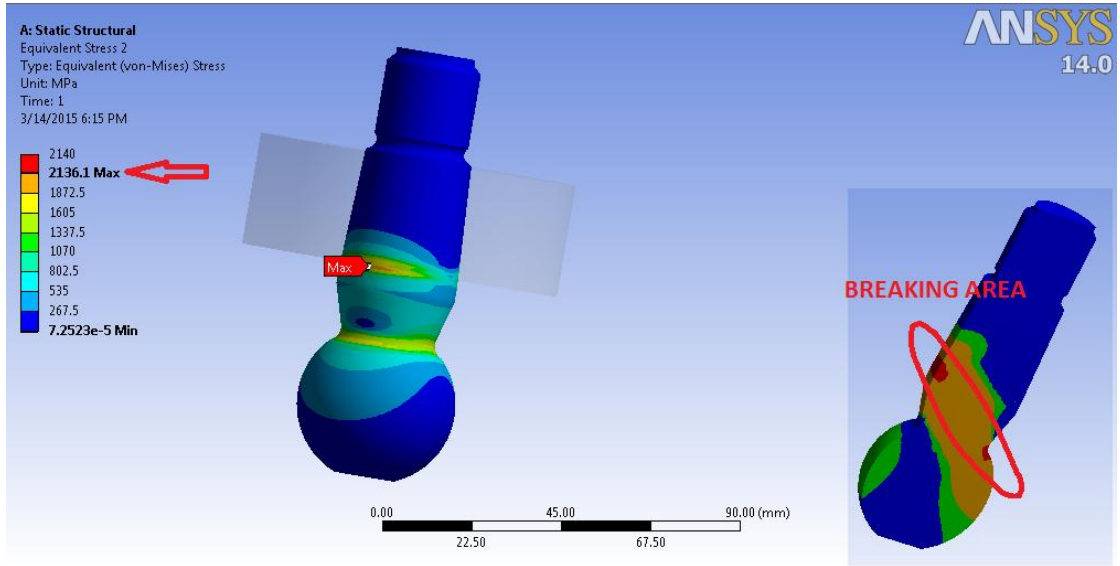
Şekil 3.12. FGM mafsal milinin 181 kN'luk kuvvet için hesaplanan güvenlik faktörü

Ayrıca mafsal millerinde indüksiyon işleminin kuvvet dayanımını ne kadar artırdığını öğrenmek amacıyla ANSYS V14 analiz programında indüksiyon işlemi görmemiş mafsal milinin özellikleri doğrultusunda 3D mafsal mili modeli analize alınmıştır. Model parçası 24.465 elementlik tetrahedrons mesh yapısı ile örülmüştür. Analizde tekrardan mesnet şartları tanımlanarak 133 kN'luk kuvvet uygulanmıştır. Mafsal miline indüksiyon işlemi uygulanmadığı zaman parçanın sertlik değerleri yaklaşık olarak 26-33 HRC olarak karşımıza çıkmıştır. Bu sertlik değerlerine karşılık gelen gerilme dayanımı da yaklaşık olarak 941 N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Analizde maksimum 133 kN kuvvet uygulandığı zaman mafsal milinde $940,2 \text{ N/mm}^2$ 'lik gerilme oluşarak, 26-33 HRC'lik sertlik değerlerine karşılık gelen 941 N/mm^2 çekme dayanımına yaklaşmıştır (Şekil 3.13). Daha fazla kuvvet etki ettirildiği zaman mafsal mili deformasyona uğrayacaktır. Dolayısı ile indüksiyon işlemi uygulanmamış mafsal milinde maksimum kuvvet 133 kN olarak ortaya çıkmıştır. Fakat indüksiyon sertleştirme işlemi yapılan FGM şeklinde modellenen mafsal milinde maksimum kuvvet 181 kN olarak belirlenmişti. Bu analizde anlaşılacağı üzere indüksiyon işlemi, radyal olarak gelen kuvvetlere karşı rod başı mafsal millerinin dayanma direncini yaklaşık olarak %35 artırmıştır.



Şekil 3.13. İndüksiyonsuz mafsal milinde meydana gelen stres gerilmesi

Bilindiği üzere indüksiyon sertleştirme işlemi sadece malzemenin dış yüzeyinde belirli bir tabaka kalınlığı şeklinde olabilmektedir. Fakat indüksiyon sertleştirme işlemi mafsal milinin dış yüzeyinden merkezine kadar uygulanabilseydi, malzemenin indüksiyonsuz haline göre ne kadar kuvvet dayanımını artırdığını öğrenmek amacıyla mafsal milinin 3D modeli analize alınmıştır. Analiz programında eğilme testinin mesnet şartları yeniden tanımlanarak mafsal miline radyal yönden 230 kN’luk bir kuvvet uygulanmıştır. Mafsal milinin dış yüzeyinden merkezine kadar indüksiyon işlemi uygulandığı zaman parçanın sertlik değeri yaklaşık olarak 57 HRC olmaktadır. Bu sertlik değerine karşılık gelen gerilme dayanımı 2140 N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Analizde maksimum 230 kN kuvvet uygulandığı zaman Şekil 3.14’te gösterildiği gibi mafsal milinde $2136,1 \text{ N/mm}^2$ değerinde gerilme meydana gelerek, 57 HRC’lik sertlik değerine karşılık gelen 2140 N/mm^2 çekme dayanım değerine yaklaşmıştır. Daha fazla kuvvet etki ettirildiği zaman mafsal mili deformasyona uğrayacaktır. Dolayısı ile dış yüzeyden merkeze kadar indüksiyon işlemi yapılmış mafsal milinde maksimum kuvvet 230 kN olarak ortaya çıkmıştır. Fakat indüksiyon işlemi yapılmayan mafsal milinde maksimum kuvvet 133 kN olarak belirlenmişti. Analizde ortaya çıkan sonuca göre indüksiyon sertleştirme işlemi mafsal milinin tüm hacmine uygulandığı zaman radyal yönden gelen kuvvetlere karşı mafsal milinin dayanma direncini yaklaşık olarak %70 artırmıştır.



Şekil 3.14. Tüm hacimde indüksiyonlu mafsalsmilinde meydana gelen stres gerilmesi

3.4 Rot Başlarında Darbe Kuvvetlerine Karşı İndüksiyon Sertleştirme Etkisi

3.4.1 Deneyin amacı (İmpact / Darbe Testi)

Bu çalışmada, 41Cr4 malzeme rot başı mafsalsmili indüksiyon sertleştirme işlemine tabi tutularak darbe (İmpact) kuvvetine maruz bırakılacaktır. Mafsalsmilinde indüksiyon sertleştirme işleminin darbe kuvvetlerine karşı dayanma etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenecektir. Ayrıca darbe kuvvetleri ile yapılan impact testi sonlu elemanlar analiz yazılımı ANSYS Workbench V14.0 kullanılarak gerçekleştirilecektir. Çalışmada, indüksiyon sertleştirme işlemi uygulanmış mafsalsmilinin dış yüzeyinden merkezine doğru katmanlar şeklinde değişen sertlik değerleri analiz programında yine fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (Functional Graded Material) şeklinde tanımlanarak analizler yapılacaktır.

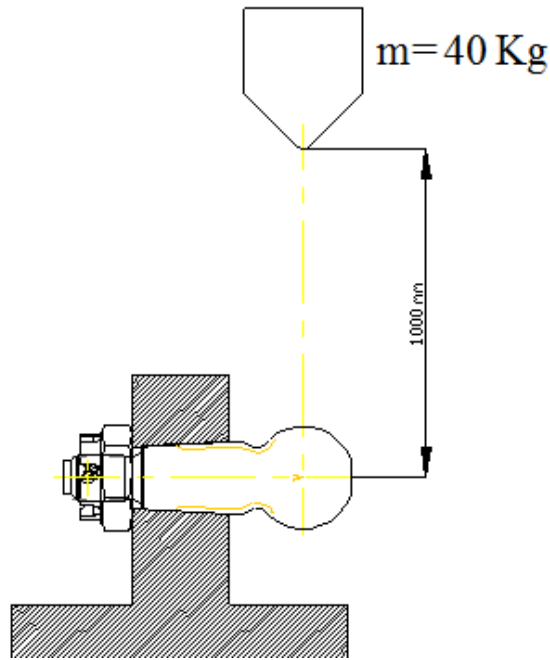
3.4.2 Deneysel prosedür

Mafsalsmilleri gerekli ısı işlem süreçlerinden geçirilip indüksiyon işlemine tabi tutulduktan sonra darbe (İmpact) testi için Fotoğraf 3.10'da gösterilen test cihazında test edilmiştir. İndüksiyon işlemine tabi tutularak dış yüzeyleri sertleştirilmiş mafsalsmilleri ile indüksiyon işlemine tabi tutulmamış mafsalsmillerinin darbe kuvvetlerine karşı dayanımları araştırılmıştır. Bu kapsamda mafsalsmilleri şaft kısımlarından bir aparat ile

sabitlenerek küre kısımlarına bir (1) metre yükseklikten 40 kg'lık bir kuvvet serbest bırakılmıştır. İndüksiyon işlemine tabi tutulmuş mafsal milleri ile bu işleme tabi tutulmamış mafsal millerinin ani darbe karşısında ne kadarlık derece açı ile eğildiğinin tespiti yapılmıştır. Ayrıca indüksiyon sertleştirme işleminin ani darbelere karşı malzemede ne kadar dayanımı artıracığı belirlenmiştir. Uygulanacak olan darbe test prosedürü Şekil 3.15'te verilmiştir.

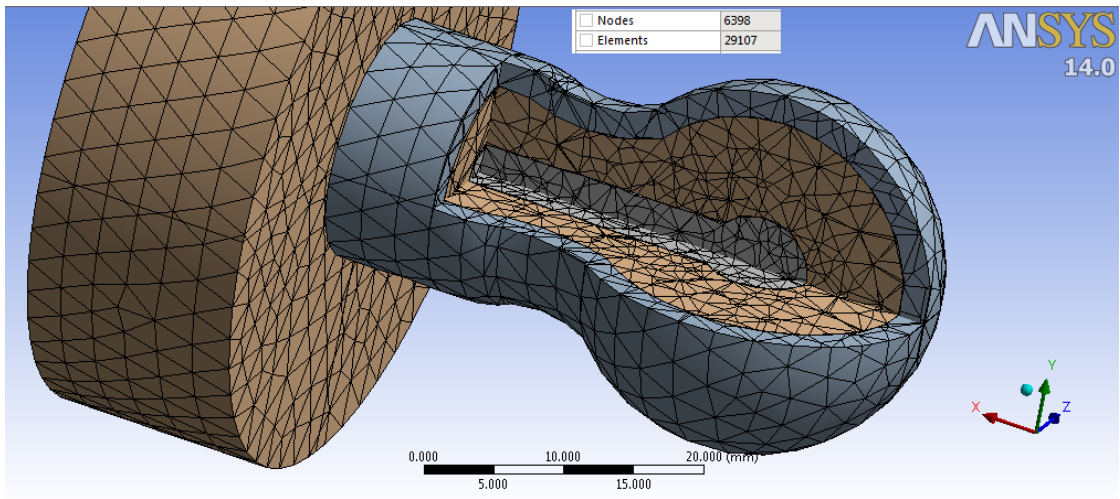


Fotoğraf 3.10. Darbe (İmpact) test istasyonu

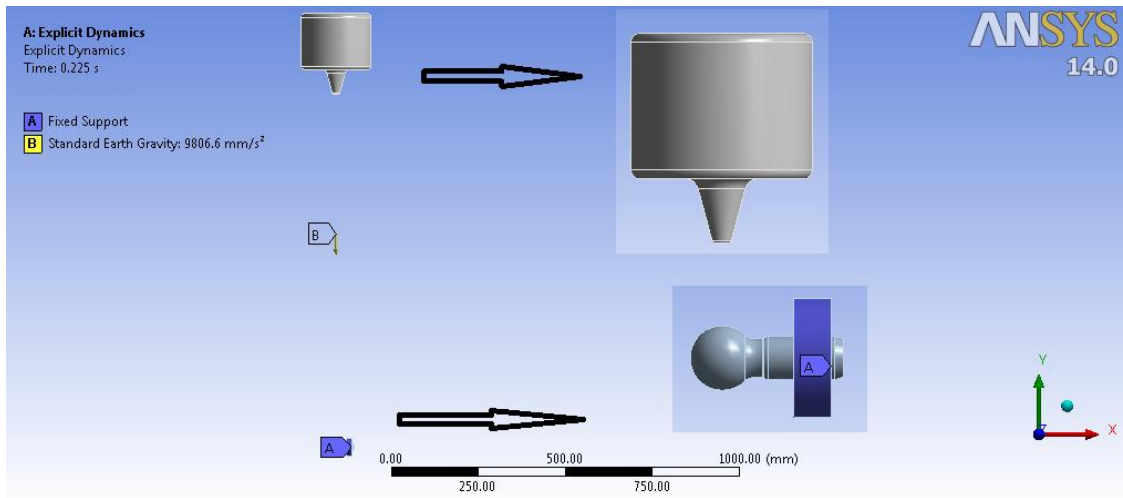


Şekil 3.15. Darbe (İmpact) test prosedürü

Ayrıca FGM şeklindeki mafsal milinin darbe test prosedürü ANSYS Workbench V14.0 analiz programında birebir uygulanarak, mafsal millerinde indüksiyon sertleştirme işleminin darbe dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda bölgelerin sertlik değerlerine göre mafsal milinin FGM şeklinde 3D modeli oluşturularak analiz programına alınmıştır. Analiz ortamında bir aparat ile sabitlenen mafsal miline 29.107 elementlik tetrahedrons (üçgensel) mesh yapısı uygulanmıştır. Daha sonra 40 kg ağırlığındaki bir cisim bir (1) metre yükseklikten mafsal mili küresinin üzerine serbest bırakılmıştır. Analizi yapılan mafsal milinin mesh yapısı ve darbe testi mesnet şartları Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



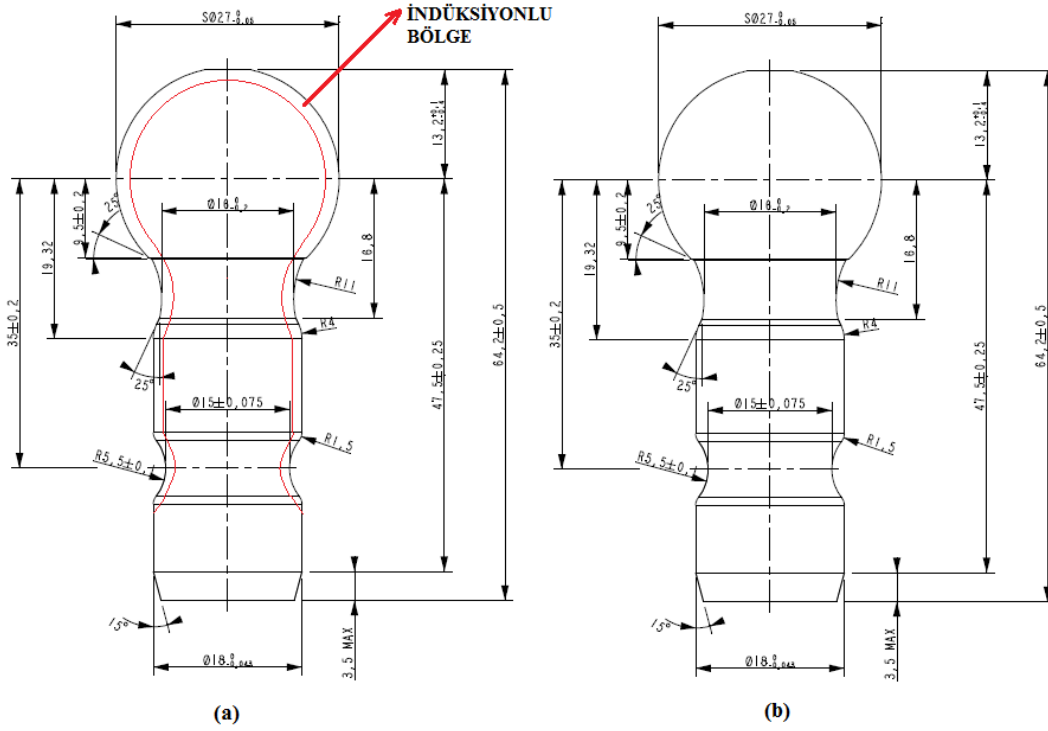
Şekil 3.16. FGM mafsal mili darbe testi analizinin mesh yapısı



Şekil 3.17. FGM mafsal mili darbe testi analizinin mesnet şartları

3.4.3 Sonuçlar ve tartışma

İndüksiyon sertleştirme işlemi yapılmış ve yapılmamış şekilde Şekil 3.18’de teknik resimleri verilen her iki gruptan ikişer adet 41Cr4 malzeme mafsalsal millerine darbe (impact) testi uygulanmıştır. Test sonrası mafsalsal millerinin bükülme açı değerleri Tablo 3.5’te verilmiştir.



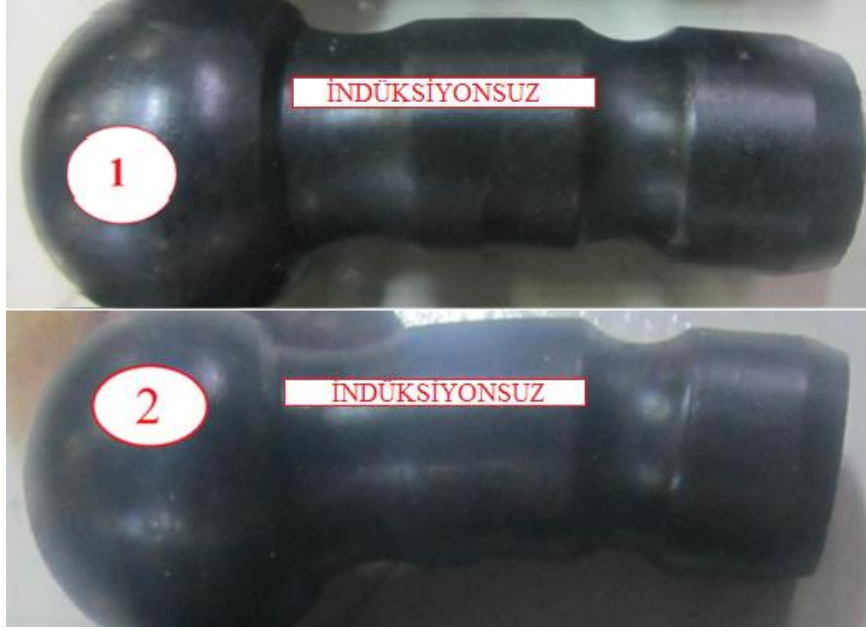
Şekil 3.18. (a) İndüksiyonlu ve (b) indüksiyonsuz mafsalların teknik resimleri

Tablo 3.5. Mafsalsal millerinin darbe testi eğilme açı değerleri

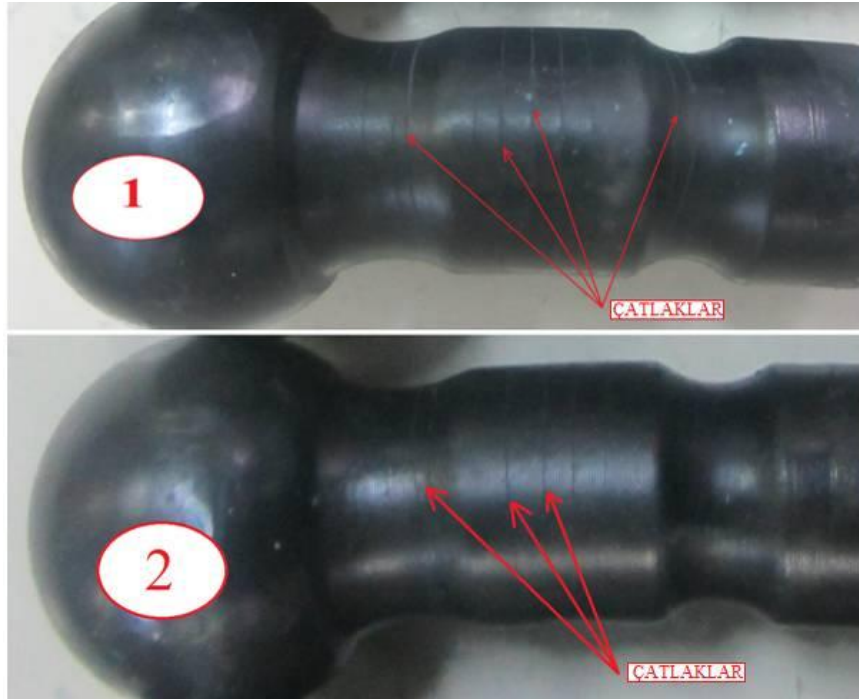
Grup No	Parça No	Eğilme Açısı (°)
İndüksiyonlu Grup	1	9,2°
	2	9,0°
İndüksiyonsuz Grup	1	12,2°
	2	12,5°

İndüksiyon işlemine tabi tutulmamış mafsalsal milleri Fotoğraf 3.11’de gösterildiği gibi darbe (impact) testi sonrasında kuvvetin etkisi ile 12,2° ve 12,5°’lik açı değerleri ile eğilmişlerdir. İndüksiyon işleminde tabi tutulmamış mafsalsal millerinin sertlik değerleri dış yüzeyden merkeze doğru çok farklılık göstermediğinden dolayı darbe etkisi ile

yüzeylerinde çatlaklar gözlemlenmemiştir. İndüksiyon sertleştirme işlemine tabi tutularak yüzeyleri sertleştirilmiş mafsal millerinde ise Fotoğraf 3.12’de gösterildiği gibi darbe testi sonrasında kuvvetin etkisi ile $9,0^\circ$ ve $9,2^\circ$ ’lik açı değerleri ile eğilmişlerdir. Mafsal millerinin yüzeylerinde gözle görülür büyüklüklerde çatlaklar gözlemlenmiştir.

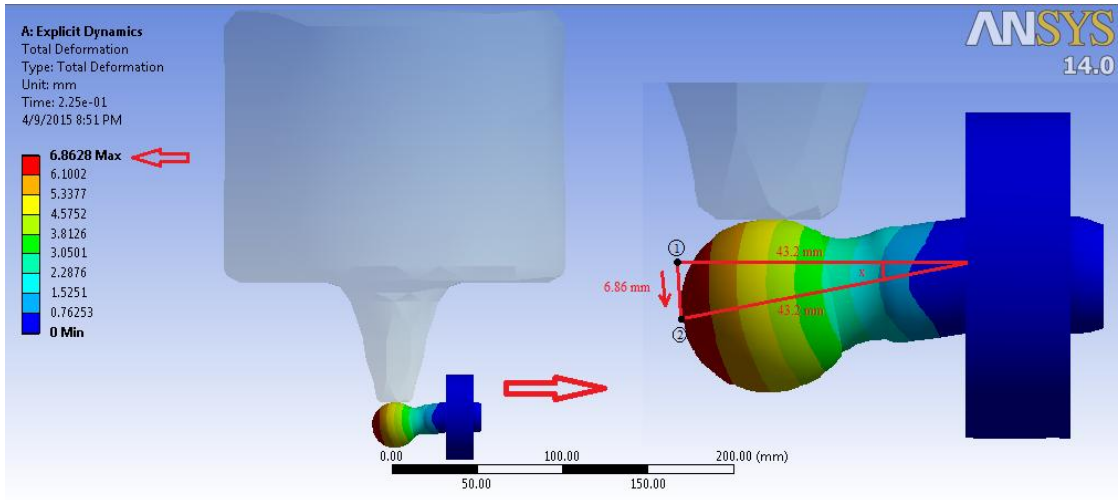


Fotoğraf 3.11. İndüksiyonsuz mafsal millerinin darbe testi sonrası görüntüleri

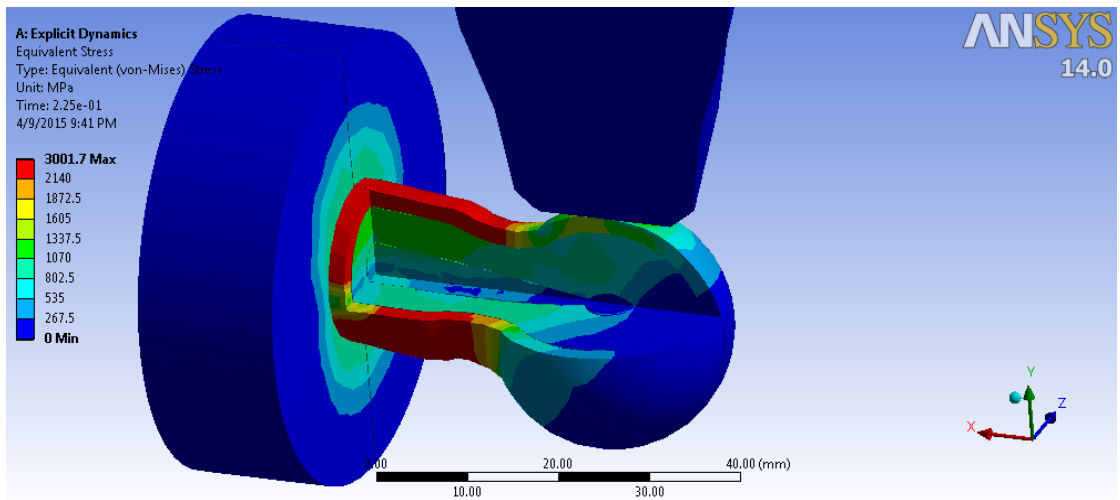


Fotoğraf 3.12. İndüksiyonlu mafsal millerinin darbe testi sonrası görüntüleri

Analiz çalışmasında Şekil 3.19’da görüldüğü üzere 40 kg ağırlığındaki cisim bir metre yükseklikten serbest bırakıldığı zaman yaklaşık olarak 0,225 saniyede aşağı düşmüştür ve mafsalsmilinde maksimum 6,86 mm’lik bir yer değiştirmeye sebebiyet vermiştir. Mafsalsmilinde meydana gelen eğilme açısı ise cos teoreminden 9.1° olarak belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 3.20’de gösterildiği gibi FGM şeklinde modellenen mafsalsmilinde indüksiyonlu bölgeye gelen gerilme değeri $3001,7 \text{ N/mm}^2$ olarak gösterilmiştir. Analizde meydana gelen gerilme, 57 HRC sertlik değerine karşılık gelen 2140 N/mm^2 stress gerilmesini geçtiğinden dolayı indüksiyonlu bölge deformasyona uğramıştır. Çatlayarak deforme olan bu bölge sert yapısından dolayı gelen darbeyi sönümleyerek mafsalsmilinin daha çok eğilmesini engellemiştir.

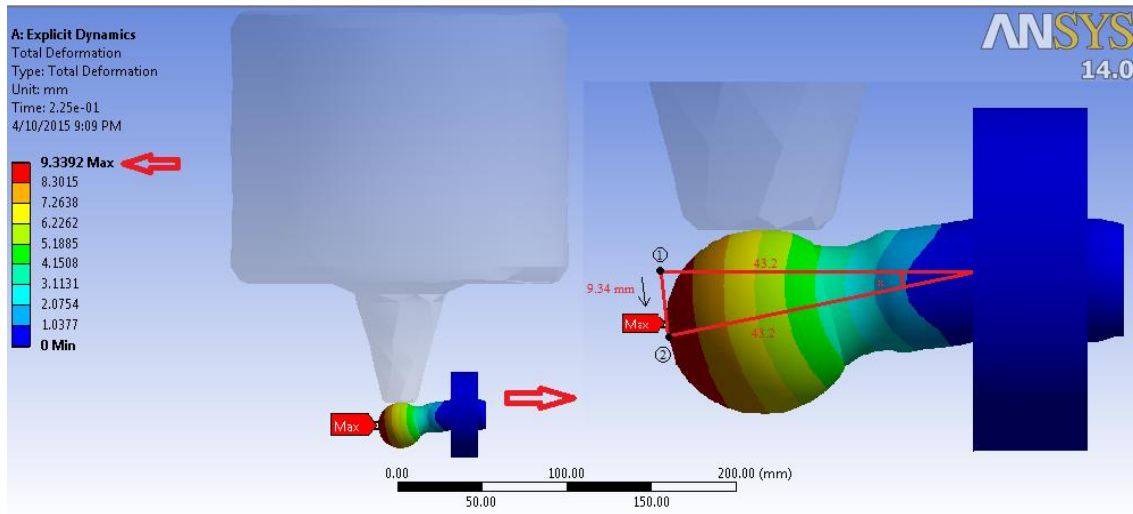


Şekil 3.19. İndüksiyonlu mafsalsmilinin darbe testi analizinin eğilme açısı değeri

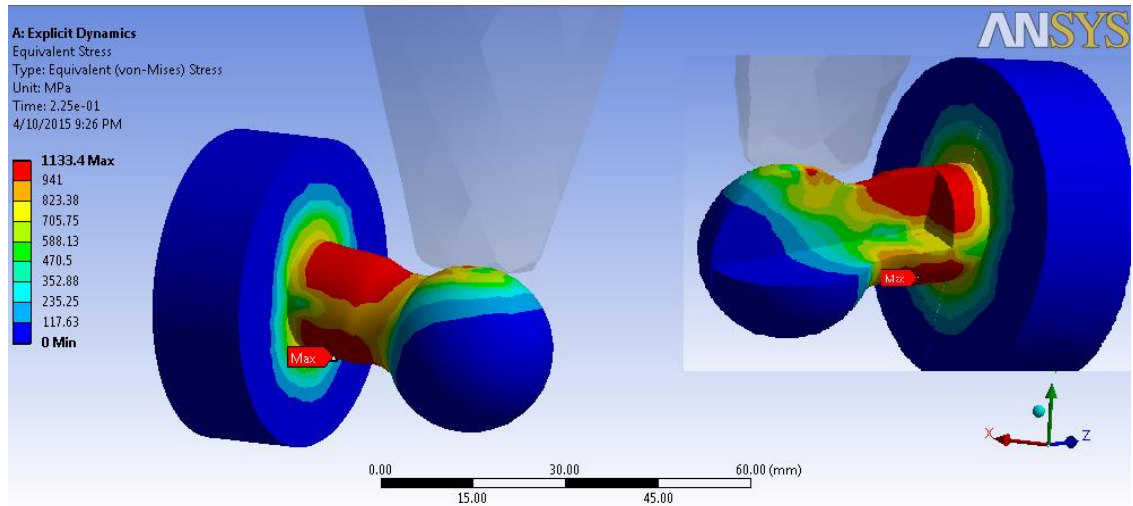


Şekil 3.20. İndüksiyonlu mafsalsmilinin darbe testi analizinde meydana gelen stress gerilmesi

Darbe testi analizinde indüksiyon sertleştirme işlemine tabi tutulmamış mafsal miline aynı mesnet şartları uygulandığı zaman Şekil 3.21’de görüldüğü üzere maksimum 9,34 mm’lik bir yer değiştirme söz konusu olmuştur. Mafsal milinde meydana gelen eğilme açısı ise yine cos teoreminden yaklaşık 12,4° olarak belirlenmiştir. Mafsal milinde meydana gelen gerilmeler Şekil 3.22’de gösterildiği gibi maksimum 1133,4 N/mm² olarak meydana gelmiş ve malzemenin iç bölgelerine kadar ilerlemiştir. Analizde meydana gelen gerilme, 26-33 HRC sertlik değerine karşılık gelen 941 N/mm²’yi geçtiğinden dolayı mafsal mili eğilerek deformasyona uğramıştır.



Şekil 3.21. İndüksiyonsuz mafsal milinin darbe testi analizinin eğilme açısı değeri



Şekil 3.22. İndüksiyonsuz mafsal milinin darbe testi analizinde meydana gelen stres gerilmesi

İndüksiyon sertleştirme işlemi yapılmış mafsal milleri resimlerde de görüldüğü gibi yüzeyleri sertleştirildiğinden daha az açı ile eğilmişlerdir. Ani kuvvet öncelikle mafsal millerinin dış yüzeylerindeki indüksiyonlu bölgelere etki etmiştir ve bu yüzeylerde çatlaklar oluşturmuştur. Bu indüksiyon yüzeyleri dış kuvvetleri sönümleyerek mafsal millerini darbelere karşı daha da dirençli hale getirmiştir. Darbe (impact) testinin sonuçlarına göre indüksiyon işlemine tabi tutulmuş 41Cr4 malzeme mafsal millerinin, indüksiyonsuz mafsal millerine göre ani gelen kuvvetlere karşı %35 daha dirençli olduğu belirlenmiştir.

BÖLÜM IV

SONUÇLAR

Bu yüksek lisans çalışmasında, rot başlarında indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin ömür ve mekanik kuvvet dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda indüksiyon işlemi uygulanmış rot başlarında ömür (fatigue) testi, mafsal çıkma (pull out) testi, eğilme (bending) testi ve darbe (impact) testlerinin deneyleri ve sonlu elemanlar analiz simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- İndüksiyon yüzey sertleştirme işleminin ömür dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda ömür karşılaştırması için iki farklı mafsal mili grubu ele alınmıştır. Birinci grup mafsal millerine indüksiyon işlemi sadece mafsal küresine uygulanmış, ikinci grup mafsal millerine ise tüm yüzeye uygulanmıştır. Mafsal milleri ömür test cihazında 20 kN radyal yük altında 5 Hz'de 500.000 çevrim için test edilmiştir. Birinci grup mafsal millerinde indüksiyon sertleştirme işlemi sadece mafsal küresine uygulandığından parçalar ancak 164.342 ve 218.178 çevrim sayısı yaparak, hedef çevrim sayısını tamamlayamadan boyun bölgelerinden kırılmışlardır. İkinci grup mafsal millerinde ise indüksiyon sertleştirme işlemi tüm yüzeye uygulandığından mafsal millerinin dayanımları artmış ve hedef çevrim sayılarını tamamlayıp kırılmamışlardır. Sonuç olarak indüksiyon işlemi mafsal millerinde ömür dayanımını yaklaşık olarak 2-3 kat artırdığı söylenebilir.
- Rot başlarında aksel yönde bir kuvvet uygulanarak mafsal milinin yuvalandığı rot başı gövdesinin içerisinden çekilip çıkarılması esnasında indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin malzemede kuvvet dayanımına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca ANSYS Workbench V14.0 analiz programında aksel yükleme ile yapılan pull out testlerinin analizleri de yapılmıştır. Mafsal millerine ve rot başı gövdelerine indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi uygulanarak yapılan analizlerde ve deneysel çalışmalarda bir kuvvet artışının olduğu gözlemlenmiştir. Malzemelerin yüzeylerindeki 1,5-3,0 mm'lik indüksiyon yüzey sertliği malzemelerde fazladan bir kuvvet dayanımı sağlamıştır. İndüksiyon sertleştirme işlemi yapılmayan rot başlarında 175 kN'luk bir kuvvet dayanımı ortaya çıkarken, indüksiyon sertleştirme işlemi yapılan rot başlarında bu kuvvet

- 192 kN olarak ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi, rot başlarında aksenal olarak gelen kuvvetlere karşı fazladan %10'luk bir kuvvet dayanımı sağlamıştır.
- Rot başı mafsal millerinde indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin radyal kuvvet dayanımına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Analiz çalışmalarında indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış mafsal milleri, sertlik değerlerinin dış yüzeyinden merkezine doğru değişiklik gösterdiği fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FGM) şekilde tanımlanmıştır. Sertlik değerlerine göre katmanlara ayrılmış mafsal millerinde deformasyonlar en dış tabakadaki indüksiyon bölgesinden başlamıştır. Mafsal millerinin üzerinde oluşan gerilmeler dış yüzeyden merkeze doğru bölge sertlik değerleri ile orantılı olarak azalmıştır. İndüksiyon işlemi uygulanmamış mafsal millerinde maksimum radyal (bending test) kuvvet 133 kN olarak belirlenmiştir. Buna karşın indüksiyon işlemi uygulanmış mafsal millerinde radyal bending test yükü 181 kN olarak meydana gelmiştir. Sonuç olarak indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi, rot başı mafsal millerinde radyal olarak gelen kuvvetlere karşı fazladan %35'lik bir kuvvet dayanımı sağlamıştır. Ayrıca indüksiyon işlemi mafsal millerinin dış yüzeyinden merkezine kadar uygulanabilseydi radyal bending test yükü analizlerde 230 kN olarak ortaya çıkmaktadır. Bu değer de malzemede radyal kuvvetlere karşı dayanma direncini yaklaşık olarak %70 artıracak anlamına gelmektedir.
- Rot başı mafsal millerinde indüksiyon yüzey sertleştirme işleminin darbe (impact) kuvvetlerine karşı dayanma etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca çalışmalarda rot başı mafsal milleri yine FGM şeklinde tanımlanarak analizleri yapılmıştır. Analiz ve deneysel sonuçlara göre indüksiyon yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuş mafsal milleri ani kuvvetin etkisi ile yaklaşık olarak 9,0° - 9,2° derece aralığında eğilmişlerdir. Buna karşın indüksiyon işlemine tabi tutulmamış mafsal milleri ise yaklaşık olarak 12,2° - 12,5° derece aralığında eğilmişlerdir. Darbe kuvvetleri öncelikle mafsal millerinin indüksiyonlu bölgesine etki etmiştir. Bu indüksiyonlu bölge darbe kuvvetlerini sönmüleyerek mafsal millerinin daha fazla eğilmelerini engellemiştir. Sonuç olarak indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi darbe kuvvetlerine karşı mafsal millerinin direncini yaklaşık olarak %35 artırmıştır.

KAYNAKLAR

Alp, E., “Metalik Malzemelerin Darbe Deney Föyü”, *Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi metalurji ve malzeme Mühendisliği Bölümü*, 2012.

Alsaran, A., Karakan, M. and Celik, A., “The investigation of mechanical properties of ion-nitrided AISI 5140 low-alloy steel Materials Characterization”, *Mater Charact* 2002;48:323–7.

Asi, O. and Yesil, Ö., “Failure analysis of an aircraft nose landing gear piston rod end”, *Eng Fail Anal*, 2013;32:283–291.

Bayrak, M., Ozturk, F., Demirezen, M. and Evis, Z., “Analysis of tempering treatment on material properties of DIN 41Cr4 and DIN 42CrMo4 steels”, *J Mater EngPerform* 2007;16(5):597–600.

Bhattacharya, S., Singh, I.V. and Mishra, B.K., “Fatigue life simulation of functionally graded materials under cyclic thermal load using XFEM”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 82 (2014) 41–59

Chaush, Y., “Ansys workbench ile yorulma analizi”, Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İzmir, Şubat, 2008.

“Endüksiyon Yolu ile Isıtma Yöntemi” 15 Şubat 2012 http://www.muhendisizbiz.net/uploadlar/92/endksiyonla_305s305tma.pdf (İndirme Tarihi: 10.05.2015).

Falah, A.H., Alfares, M.A. and Elkholy, A.H., “Failure investigation of a tie rod end of an automobile steering system”, *Engineering Failure Analysis* 14 (2007) 895–902.

Fazarinc, M., Muhič, T., Šalej, A., Bombač, D., Fajfar, P., Terčelj, M. and Kugler, G., “Thermal fatigue testing of bulk functionally graded materials”, *ProcediaEn*, 2011;10:692–7.

Gao, X.W., Zhang, Ch., Sladek, J. and Sladek, V., “Fracture analysis of functionally graded materials by a BEM”, *Composites Science and Technology*, 68 (2008) 1209–1215.

Kim, HR., Seo, MG. and Bae, WB., “A study of the manufacturing of tie-rod ends with casting/forging process”, *J Mater Processing Technol* 2002;125–126:471–6.

Kokini, K., De Jongea, J., Rangaraja, S. and Beardsleyb, B., “Thermal shock of functionally graded thermal barrier coatings with similar thermal resistance”, *Surf Coat Technol* 2002;154:223–31.

Ossa, E.A., Palacio, C.C. and Paniagua, M.A., “Failure analysis of a car suspension system ball joint”, *Engineering Failure Analysis* 18 (2011) 1388–1394.

Sabuncuoglu, B., Dag, S. and Yildirim, B., “Three dimensional computational analysis of fatigue crack propagation in functionally graded materials”, *Computational Materials Science*, 52 (2012) 246–252.

Sheldon, GL., “Unusual Failure of an automobile steering component”, In: *Failure prevention and reliability conference*, Dearborn, Mich., USA, 1983; p. 27–31.

Tankut, N., ve Zor, M., “Ağaç malzemede yorulma performansı üzerine araştırmalar”, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 2012;14(21):18–27.

Temiz, V., “Makina Elemanlarının Sürekli Mukavemete Göre Hesabı” <http://web.itu.edu.tr/temizv/VTDN/Yorulma.pdf>, (İndirme Tarihi: 15.05.2015).

Thelning, K.E., “Bofors El Kitabı, Çelik ve Isıl İşlem” Çeviren: Tekin, A. S: 338-373, İstanbul 1984.

Vazquez, V. and Altan, T., “New concepts in die design - physical and computer modeling applications”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000. 98(2): p. 212-223.

ÖZ GEÇMİŞ

Kayhan ALTINEL 10.10.1987 tarihinde Sivas'ın İmranlı ilçesinde doğdu. İlk orta ve lise öğretimini İmranlı'da tamamladı. 2008 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2013'te bölüm derecesi ile mezun oldu. 2010-2011 tarihinde Erasmus sınavını kazanarak Çek Cumhuriyeti'nde eğitim gördü. 2013-15 yılları arasında direksiyon ve süspansiyon sistem parçaları üreten Doğan Holding'e bağlı Ditaş A.Ş.'de AR-GE sorumlusu ve ürün geliştirme mühendisi olarak çalıştı. 2013-2014 Öğretim yılında Niğde Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı.

