

**İŞ MAKİNALARININ JANTLARINDA STATİK
YAŞLANMANIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Ahmet BÜLBÜL

**İŞ MAKİNALARININ JANTLARINDA STATİK YAŞLANMANIN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ahmet BÜLBÜL

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır.**

**KARABÜK
Haziran 2014**

Ahmet BÜLBÜL tarafından hazırlanan “İŞ MAKİNALARININ JANTLARINDA STATİK YAŞLANMANIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ramazan KAÇAR

.....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/ 06/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Ramazan KAÇAR (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ (KBÜ)

.....

...../...../2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ahmet BÜLBÜL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İŞ MAKİNALARININ JANTLARINDA STATİK YAŞLANMANIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet BÜLBÜL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Ramazan KAÇAR

Haziran 2014, 127 sayfa

Günümüzdeki teknolojik gelişmeler sonucu maden, inşaat, yol yapımı gibi alanlarda ağır iş makineleri geniş yelpazede kullanılmaktadır. Bu makineler kullanımları sırasında statik ve dinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. İş makinelerinin; jantları statik yüklerin yanı sıra fren balatalarındaki sürtünmeden kaynaklanan ısı, üretim sürecindeki kaynak termal çevrimi ve kaynak sonrası uygulanan gerilim giderme ısı işleminin yanı sıra boya ve galvanizleme sürecindeki termal çevrimden kaynaklanan ısıdan etkilenebilir. Statik yüklere maruz kalan jantların zamanla deforme olması ve beklenen çalışma ömrünü sağlayamaması bu alanda karşılaşılan en büyük sorunlardan biri haline gelmiştir. Deformasyona ve ısıya bağlı olarak jant çeliklerinde üretim sürecinde veya servis şartlarında deformasyon yaşlanması oluşabilir.

Çalışmada belirli oranda soğuk şekillendirmeye uğramış jant çeliklerinde statik yaşlanmanın etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, iş makinelerinin jantüretiminde kullanılan çelikler temin edilerek temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra % 5 öndeforme edilerek farklı sıcaklık ve zaman dilimlerinde yaşlandırılarak optimum yaşlanma zamanı ve sıcaklığı belirlenmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri belirlenerek mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak optimum yaşlandırma parametresine sahip numunelerin servis şartlarındaki maruz kaldığı dinamik yüklerin numune üzerindeki etkisi yorulma deneyi ile belirlenmiştir. Sonuç olarak, yaşlanmaya bağlı olarak meydana gelen dayanım artışı yorulma dayanımını olumlu etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Jant çelikleri, statik gerinim yaşlanması, mekanik özellikler, mikroyapı.

Bilim Kodu :916.1.092

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN EFFECT OF STATIC AGING ON THE HEAVY CONSTRUCTION WHEEL RIM

Ahmet BÜLBÜL

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Ramazan KAÇAR

June 2014, 127 pages

As a result of technological development, the heavy construction equipment is widely used in mining, construction and road construction industry. These machines are used under the static and dynamic load in the service condition. Heavy machine equipment wheel rim can be affected from static load, and heats which are generated by brake lining pads, weld thermal cycle during the manufacturing process, post weld heat treatment, paint baking or galvanization process. One of the most important problems of heavy construction equipment wheel rim is deformation under the static load which causes minimum service life. The static strain ageing related with deformation as well as heat can occur in the wheel rim steel during the manufacturing as well as service condition. The goal of this study is investigation of static strain ageing in the cold deformed heavy construction equipment wheel rim steel. For this purpose; the 5 % pre-strain wheel rim steel was static strain aged at different temperature for different intervals so; the optimum ageing temperature and

ageing time was determined for as received and homogenization+normalized heat treated condition. The mechanical properties of test samples were determined and the microstructure was evaluated. In addition, the sample which has got optimum aging parameters was carried out for fatigue test in order to determine fatigue behaviors under the dynamic load. Finally, it was determined that the fatigue strength of the steel is positively affected by increasing strength due to strain ageing.

Keywords : Wheel rim steels, static strain ageing, mechanical properties, microstructure.

Science Code :916.1.092

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Ramazan KAÇAR'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmasındaki deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakóltesi öğretim üyesi, çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ, Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK, Doç. Dr. Halil DEMİR, Arő. Gör. Hayriye ERTEK EMRE, Dr. Mustafa TÜRKMEN ve Arő. Gör. Musa YILDIRIM' a teőekkürü bir borç bilirim.

Bu yüksek lisans tez alıőması, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonu tarafından KBÜ-BAP-13/1-YL-020 numaralı proje ile desteklenmiőtir.

Ayrıca, bu günlere gelmemde desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bana dürüstlüğün, hak yememenin ve kalp kırmamanın en büyük erdem olduğunu öğreten AİLEME sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
ÇELİKLERİN YAŞLANDIRILMASI VE YORULMA DAVRANIŞLARI.....	4
2.1. ÇELİKLER.....	4
2.1.1. Genel Yapı Çelikleri.....	5
2.2. JANT ÇELİKLERİ.....	6
2.3. YAŞLANMA SERTLEŞMESİ.....	7
2.3.1. Statik Yaşlanma Sertleşmesi.....	9
2.3.2. Dinamik Yaşlanma Sertleşmesi.....	11
2.4. YAŞLANMADA KARBON VE AZOT ATOMLARININ ETKİSİ.....	12
2.4.1. Karbon ve Azotun Ferrit ve Östenit Fazı İçerisinde Çözünürlüğü.....	13
2.4.2. Karbon ve Azot Atomlarının Ferrit ve Östenit İçerisinde Difüzyonu	14
2.4.3. Karbon ve Azot Atomlarının Yaşlanma Sertleşmesindeki Rolü	16
2.4.4. Diğer Alaşım Elementlerinin Yaşlanma Sertleşmesine Etkileri.....	18
2.4.5. Yeralan Alaşım Elementlerinin Yaşlanma Sertleşmesine Etkileri	18
2.5. METALİK MALZEMELERİN YORULMA DAVRANIŞI	21
2.5.1. Yorulma Çatlağı Oluşumu	24
2.6. YORULMA DENEY CİHAZLARI VE TÜRLERİ	24

	<u>Sayfa</u>
2.6.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	25
2.6.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	26
2.6.2.1. Döner Eğme Gerilmeli Yorulma Deney Düzeneği.....	26
2.6.3. Burulma Gerilmeli Yorulma Deneyi	28
2.6.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	28
2.7. YORULMA DENEYİ İLE İLGİLİ TERİMLER.....	28
2.7.1. Çevrim	28
2.7.2. Gerilme	28
2.7.3. Gerilme Aralığı, Genliği ve Oranı	29
2.7.4. S-N Diyagramı (Wöhler Diyagramı).....	29
2.7.5. Yorulma Dayanımı, Yorulma Sınırı ve Yorulma Ömrü.....	30
2.8. YORULMA DENEY NUMUNELERİ.....	30
2.8.1. Dairesel Kesitli Numuneler	31
2.8.2. Dikdörtgen Kesitli Numuneler	31
2.9. YORULMA DENEYİNİN UYGULANIŞI	32
2.10. MALZEMEDE YORULMA OLAYINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	33
2.10.1. Malzeme Cinsinin, Bileşiminin ve Yapısının Etkisi.....	33
2.10.2. Yüzey Özelliklerinin Etkisi	33
2.10.3. Çentik Etkisi	34
2.10.4. Gerilmelerin Etkisi	34
2.10.5. Korozyonun Etkisi.....	35
2.10.6. Sıcaklığın Etkisi.....	35
2.10.7. Deney Hızının Etkisi.....	35
BÖLÜM 3.	37
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
3.1. MATERYAL VE YÖNTEM	37
3.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEME.....	37
3.3. ÇEKME DENEY NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	38
3.4. HOMOJENLEŞTİRME+NORMALİZASYON ISIL İŞLEMLERİNİN UYGULANMASI.....	39
3.5. TEST NUMUNELERİNE ÖNDEFORMASYON İŞLEMİNİN UYGULANMASI.....	41

	<u>Sayfa</u>
3.6. STATİK GERİNİM YAŞLANDIRMA İŞLEMİ.....	42
3.7. YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	43
3.7.1. Çekme Deneyi	43
3.7.2. Döner Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	43
3.7.3. Sertlik Ölçümü.....	45
3.8. METALOGRAFİ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI	46
3.9. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	47
3.9.1. Optik Mikroskop İncelemeleri.....	47
3.9.1.1. Tane Boyutu Ölçümü ve Faz Oranlarının Belirlenmesi	48
3.9.2. Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemesi.....	48
BÖLÜM 4.	49
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	49
4.1.SONUÇLAR VE İRDELEMESİ	49
4.2.TEMİN EDİLDİĞİ ŞEKLİYLE YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN DENEYSEL SONUÇLARI	49
4.2.1. Mikroyapı İncelemesi ve Sonuçların İrdelenmesi	50
4.2.2. Mekanik Özellik Deney Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi.....	53
4.2.2.1. Çekme Deney Sonucu.....	53
4.2.2.2. Yorulma Deneyi Sonucu.....	60
4.2.2.3. Sertlik Ölçüm Sonucu	62
4.2.2.4. Temin Edildiği Şekliyle Yaşlandırılan Numunelerin Yaşlanma Davranışları	63
4.3.HOMOJENLEŞTİRME+NORMALİZASYON ISIL İŞLEMİ UYGULANDIKTAN SONRA 50°C'DE YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN DENEYSEL SONUÇLARI.....	66
4.3.1. Mikroyapı Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi	66
4.3.2. Mekanik Özellik Deney Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi.....	70
4.3.2.1. Çekme Deney Sonucu.....	70
4.3.2.2. Yorulma Deneyi Sonucu.....	78
4.3.2.3. Sertlik Ölçüm Sonucu	79
4.3.2.4. Homojenleştirme+Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulanmış Şekliyle Yaşlandırılan Numunelerin Statik Yaşlanma Davranışları	81

4.4.HOMOJENLEŞTİRME+NORMALİZASYON ISIL İŞLEMİ SONRASI 160°C SICAKLIKTA FARKLI SÜRELERDE YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN DENEYSEL SONUÇLARI	84
4.4.1. Mikroyapı Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi	84
4.4.2. Mekanik Özellik Deney Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi.....	87
4.4.2.1. Çekme Deney Sonucu.....	88
4.4.2.2. Yorulma Deneyi Sonucu.....	95
4.4.2.3. Sertlik Ölçüm Sonucu	96
4.4.2.4. Homojenleştirme+Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulandıktan Sonra160°C ‘de Yaşlandırılan Numunelerin Statik Yaşlanma Davranışları	99
4.5. JANT ÇELİKLERİNİN STATİK YAŞLANMA DAVRANIŞI.....	102
4.6. JANT ÇELİKLERİNİN YORULMA DAVRANIŞI	113
BÖLÜM 5	117
GENEL SONUÇLAR	117
KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	127

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Statik yaşlanma sertleşmesinin gerilme-uzama diyagramı üzerinde gösterilmesi.....	10
Şekil 2.2. Dinamik yaşlanma sertleşmesi neticesinde vanadyum mikroyaşlanma çeliğinin gerilme-uzama diyagramında meydana gelen değişim.....	12
Şekil 2.3. 60°C’de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerindeki değişim	17
Şekil 2.4. Karbon, azot ve manganın %10 plastik deformasyondaki dayanıma etkisi.....	19
Şekil 2.5. Düşük karbon ve mangan içeren çeliğin yüksek sıcaklık çekme dayanımına kromun etkisi.....	20
Şekil 2.6. Dönen destekli kiriş yorulma test düzeneği	23
Şekil 2.7. R. R. Moore döner eğme gerilmeli yorulma makinesinin şematik resmi.....	27
Şekil 2.8. Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik S–N eğrileri	29
Şekil 2.9. ASTM E–466’ya göre aksel gerilmeli yorulma deneyi numuneleri.....	30
Şekil 3.1. Çekme deneyi numuneleri.....	38
Şekil 3.2. Çekme deney numunelerinin hazırlanma ölçüleri.....	38
Şekil 3.3. Çekme deney numune boyutları.....	39
Şekil 3.4. Protherm marka ısı işlem fırını	40
Şekil 3.5. Deney numunelerine uygulanan ısı işlemlerin Fe-Fe ₃ C denge diyagramı ile ilişkili şematik gösterimi	41
Şekil 3.6. Shimadzu marka çekme deney cihazı	41
Şekil 3.7. Çekme testi sonrası deney numuneleri.....	43
Şekil 3.8. Döner eğme gerilmeli yorulma test cihazı	44
Şekil 3.9. Dairesel kesitli döner eğme gerilmeli yorulma deney numunesi boyutu	45
Şekil 3.10. Deneyde kullanılan test numuneleri.....	45

Sayfa

Şekil 3.11. Mikrosertlik test cihazı	46
Şekil 3.12. Reçine ile soğuk kalıba alınan metalografi numuneleri	46
Şekil 3.13. Parlatma cihazı.....	47
Şekil 4.1. Temin edildiği şekliyle deney numunesi mikroyapı görüntüsü.....	50
Şekil 4.2. Deneyde yaşlandırılan numunelerin mikroyapısı	51
Şekil 4.3. Temin edildiği şekliyle; 160°C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi gerilme-% uzama eğrileri	54
Şekil 4.4. Temin edildiği şekliyle, %5 öndeformasyon işleminden sonra 160°C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin yaşlandırma zamanı ile akma ve çekme dayanımları arasındaki ilişki	55
Şekil 4.5. Temin edildiği şekliyle 160°C sıcaklıkta 10, 20, 45 ve 120 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunelerin kırık yüzeyresimleri.....	58
Şekil 4.6. Temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi	61
Şekil 4.7. Temin edildiği şekliyle, %5 öndeformasyon işleminden sonra 160°C sıcaklıkta farklı zamanlarda yaşlandırılan numunelerin ortalama sertlik sonuçları.....	62
Şekil 4.8. Temin edildiği şekliyle, 160°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanına bağlı olarak akma dayanımı ve sertlik ilişkisi	63
Şekil 4.9. Temin edildiği şekliyle, 160°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanına bağlı olarak yalnızca yaşlanmadan dolayı dayanım artışı (ΔY_2) ve sertlik ilişkisi	64
Şekil 4.10. Deneylerde kullanılan temin edildiği şekliyle, homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi sonrası, havada soğutulmuş suda soğutulmuş, yağda soğutulmuş numunelerin mikroyapı görüntüsü.....	67
Şekil 4.11. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulandıktan sonra % 5 öndeformasyon uygulanan; 50°C sıcaklıkta farklı zamanlardayaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	68

Şekil 4.12. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyondan sonra 50°C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi gerilme-% uzama eğrileri	71
Şekil 4.13. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 50°C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin yaşlandırma zamanı ile akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişki	72
Şekil 4.14. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 50°C sıcaklıkta farklı yaşlandırmazamanında yaşlandırılmış numunelerin kırık yüzey resimleri	75
Şekil 4.15. Temin edildiği şekliyle, homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış numunelerin (S-N) yorulma eğrisi	78
Şekil 4.16. Temin edildiği şekliyle, homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle ve % 5 öndeformasyon sonrası 50 °C sıcaklıkta 300 dakika yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.....	79
Şekil 4.17. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyon sonrası, 50°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin ortalama sertlik sonucu.....	80
Şekil 4.18. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyondan sonra, 50°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine bağlı olarak akma dayanımı - sertlik arasındaki ilişki	82
Şekil 4.19. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyondan sonra, 50°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine bağlı olarak yalnızca yaşlanmadan dolayı akma dayanımında değişim (ΔY_2) - sertlik arasındaki ilişki.....	82
Şekil 4.20. Deneylede kullanılan temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi yapılmış şekliyle numunelerin mikroyapı görüntüsü	85
Şekil 4.21. Deneylede kullanılan homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyon uygulandıktan sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zamanlarda yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	86
Şekil 4.22. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası, 160°C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi gerilme - % uzama eğrileri	88

Şekil 4.23. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin yaşlandırma zamanı ile akma ve sertlik dayanımı arasındaki ilişki	89
Şekil 4.24. Homojenleştirme + normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyona işleminden sonra 160°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılmış numunelerin kırık yüzey resimleri.....	92
Şekil 4.25. Temin edildiği şekliyle, homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.....	95
Şekil 4.26. Temin edildiği şekliyle, homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle ve % 5 öndeformasyon sonrası 160 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.....	96
Şekil 4.27. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyon işlemi sonrası 160°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin ortalama sertlik sonucu.....	97
Şekil 4.28. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyondan sonra, 160°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine bağlı olarak akma dayanımı - sertlik arasındaki ilişki	99
Şekil 4.29. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyondan sonra, 160°C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerin yaşlanmadan dolayı akma dayanımı (ΔY_2) - sertlik ilişkisi.....	100
Şekil 4.30. Temin edildiği şekliyle, homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle 50 °C sıcaklıkta homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle 160°C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin akma, çekme dayanımı, ΔY_2 ve sertlik ile yaşlanma zamanı arasındaki ilişki	103

Şekil 4.31. Temin edildiği şekliyle 160 °C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerin homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve 50 °C sıcaklıkta 300 dakika süreyle yaşlandırılan numunelerin homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve 160 °C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi 115

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Genel yapı çelikleri kalite denklik tablosu	6
Çizelge 2.2. Demirde metalik olmayan elementlerin atomik boyutları	13
Çizelge 2.3. HMK ve YMK yapılarında uygun boşluk alanlarının büyüklüğü	13
Çizelge 2.4. γ ve α demirinde karbon ve azotun çözünürlüğü	14
Çizelge 2.5. Bazı elementlerinin ferrit ve östenit içerisinde difüzyonu	15
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi (% ağırlık)	37
Çizelge 4.1. Temin edildiği şekliyle, % perlit ve ferrit oranları ile tane boyutları ...	51
Çizelge 4.2. Temin edildiği şekliyle; 160 °C sıcaklıkta 10 dakika, 20 dakika, 45 dakika ve 120 dakika yaşlandırılan numunelerin % perlit ve ferrit oranları ile tane boyutları	54
Çizelge 4.3. Temin edildiği şekliyle, %5 öndeformasyon işleminden sonra 160°C sıcaklıkta farklı zamanlarda yaşlandırılan numunelerinortalama çekme deney verileri.....	69
Çizelge 4.4. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulandıktan sonra %5 öndeformasyon uygulanmış 50°C sıcaklıkta 10 dakika, 20 dakika, 45 dakika, 120 dakika, 180 dakika ve 300 dakikayaşlandırılan numunelerin % perlit ve ferrit oranları ile tane boyutları	72
Çizelge 4.5. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyon işleminden sonra 50°C sıcaklıkta farklı zamanlarda yaşlandırılan numunelerin ortalama çekme deney verileri	87
Çizelge 4.6. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulandıktan sonra %5 öndeformasyon uygulanmış 160°C sıcaklıkta 10 dakika, 20 dakika, 30 dakika, 60 dakika ve 90 dakika yaşlandırılan numunelerin % perlit ve ferrit oranları ile tane boyutları	89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Mpa : Megapaskal

°C : Santigrat derece

Cr : Krom

W : Wolfram

V : Vanadyum

Mo : Molibden

Nm : Newtonmetre

F : Kuvvet

Mn : Manganez

P : Fosfor

S : Kükürt

Si : Silisyum

Ni : Nikel

Al : Alüminyum

N : Azot

σ : Gerilme (N/mm²)

P: Uygulanan kuvvet(Newton)

L: Uzaklık (mm)

d : Numune çapı (mm)

KISALTMALAR

AISI : Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü(American Iron and Steel Institute)

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu(Scanning Electron Microscope)

EN : Avrupa Normu (European Norm)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüz endüstriyel uygulamalarında kullanım alanı bulan ağır iş makinelerinin önemi büyüktür. Bu makineler aracılığı ile maden sahalarında, yol yapımında, inşaat alanlarında kazı çalışmaları yapılmakta tonlarca yük bir yerden başka bir alana nakledilmektedir.

Lastik tekerli bu ağır iş makinelerinin jantları, genellikle genel yapı çeliği sınıfında yer alan soğuk şekillendirmeye uygun jant çeliklerinden imal edilmektedir. İmalat aşamasında bu malzemeler soğuk şekillendirmenin yanı sıra kaynaklı birleştirme işleminde maruz kalmaktadır. Ek olarak imalat sonrası koruma amaçlı boyama işleminden sonra fırında kurutma işlemine tabi tutulmaktadır. Ayrıca servis şartlarında ağır iş makinelerinin jantları statik ve dinamik yükler etkisi altında kalmaktadır. Açık şantiye şartları düşünüldüğünde fren balatalarındaki sürtünmeye bağlı olarak jantların ısınmasında söz konusudur. Bu sebeplerden dolayı ağır iş makinelerinin jantlarında statik gerinim yaşanması oluşabilir.

Genel olarak literatürde statik gerinim yaşanma sertleşmesi, plastik deformasyondan sonra meydana gelen yaşlanma olarak tanımlanabilir. Statik yaşlanma sertleşmesinin etkisi, çeliğin akma dayanımında ve sertlikte bir artış fakat % uzamada bir düşüş olarak görülür. Bu etkilere, hareket eden dislokasyonlar ve onları kilitleyen karbon ve azot arayer atomlarının yanı sıra ikincil faz parçacıklarının sebep olduğu bilinmektedir. Çelik içerisinde bulunan C ve N gibi arayer atomları yaşlanma sertleşmesinin oluşumunu kolaylaştırarak çeliğin şekillendirilebilme özelliğini düşürür. Böylece beklenmedik çatlamalara ve kırılmalara neden olabilir. Bu açıdan değerlendirildiğinde katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunan arayer atomları yaşlanma sertleşmesine neden olduklarından çelik için zararlı olarak kabul edilir.

Ağır iş makinelerinin jant çelikleri servis şartlarında statik yüklere maruz kaldığından, meydana gelebilecek soğuk deformasyon sonrası fren balatalarındaki sürtünmeden kaynaklanabilecek ısıdan dolayı sıcaklığın 50  C üzerine çıkabilme olasılığı mevcuttur. Bu sebeple uzun zaman dilimlerinde bir yaşlanma eğilimi beklenebilir. Ayrıca retim sürecinde soğuk şekillendirme sonrası uygulanan kaynaklı birleştirme işleminden kaynaklanan termal çevrimin yanı sıra üretim süreci sonunda koruma amaçlı uygulanacak boyama ve müteakiben yaklaşık 160 C sıcaklıkta uygulanacak fırında kurutma işlemindeki ısıdan etkilenerek jant çeliklerinin yaşlanabileceği dşnlmektedir.

Bu sebeple, çalışmada ağır iş makinelerinin elik jant imalatında kullanılan S275JRC kalite çeliğin temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra 50 ve 160  C sıcaklıkta, farklı yaşlandırma zamanlarında statik gerinim yaşlanmadavranışının araştırılması gerektiği dşnlmektedir.

Bu amaçla, iş makinelerinin jant üretiminde kullanılan S275JRC kalite elik, temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra % 5 öndeforme edilmiştir. Deforme edilen numunelerfarklı sıcaklık ve zaman dilimlerinde yaşlandırılarak optimum yaşlanma zamanı ve sıcaklığı belirlenmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri belirlenerek mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca optimum yaşlandırma parametresine sahip numunelerin servis şartlarındaki maruz kaldığı dinamik yüklerin numune üzerindeki etkisi yorulma deneyi ile belirlenmiştir.

Sonuç olarak ticari olarak temin edildiği şekliyle 160  C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında test edilen numunelerin 20 dakika yaşlandırma zamanında yaşlanmadan dolayı maksimum akma dayanımına ulaşırken, homojenleştirme+normalizasyon ısıl işleminden sonra aynı sıcaklıkta yaşlandırmada sürecinde yaşlanmadan kaynaklanan maksimum akma dayanımındaki artışa 30 dakika yaşlandırma zamanında ulaşılmıştır. Çalışma şartlarını göz önünde bulundurarak homojenleştirme+normalizasyon ısıl işleminden sonra 50  C sıcaklıkta yaşlandırılan numunede yaşlanmadan kaynaklanan akma dayanımındaki maksimum artış 300 dakika gibi uzun bir yaşlandırma zamanında elde edilmiştir. Çalışmada en göze batan

hususlardan bir tanesi de yaşlandırılmazamanı ve süresine baēlı olarak aşırı yaşlanmaevresinden sonra tekrar bir dayanım artışı tespit edilmesidir. Bu duruma çeliēin mikroyapısına baēlı olarak çözünen sementit veya tane sınırlarındaki çökeltilerin gerisi geriye difüzyonla çözünerék ortama bırakılan arayer atomlarının tekrar hareketli dislokasyonlarla etkileşime girerek ikinci defa yaşlanmadan dolayı dayanım artışına neden olduēu düşünölmektedir.

BÖLÜM 2

ÇELİKLERİN YAŞLANDIRILMASI VE YORULMA DAVRANIŞLARI

2.1. ÇELİKLER

Kimyasal bileşiminde % 2'ye kadar karbon bulunduran demir-karbon (Fe-C) alaşımı çelik olarak adlandırılır. Çelikte kullanılan bir sınıflama karbon oranıdır. % 0,25'e kadar az karbonlu, % 0,25-0,55 arası orta karbonlu ve % 0,55 karbon üzeri ise yüksek karbonludur [1-2]. Kimyasal bileşiminde karbondan başka, farklı oranlarda diğer alaşım elementleri ve empürite (saf olmayan, kirlilik yaratan) elementlerde bulunur. Çeliğe farklı özellikler kazandıran, içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin içyapısıdır. Değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler yapılarak (ıslah, normalizasyon vs.) çeliğin içyapısı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelik üretilebilir [3-4].

Dünyada 2008 yılı içerisinde üretilen çelik miktarı 1.307 milyon tondur. Çin 502 milyon ton, Japonya 119 milyon ton, ABD 91,5 milyon ton çelik üretimi gerçekleştirmiştir. Türkiye'de ise 2008 yılı içerisinde üretilen çelik miktarı 26,8 milyon tondur [3].

Manganez (Mn), Fosfor (P), Kükürt (S) ve Silisyum (Si) üretim sırasında hammaddeden kaynaklanan empürite elementler olup çelik bünyesinde belirli oranlarda bulunur. Diğer elementler ise (Cr, Ni v.b.) ferro-alyajlar halinde istenilen miktarlarda çelik bünyesine ilave edilir.

Vasıflı çelikler alaşımsız, düşük alaşımlı ve alaşımlı çelikler olup kitlesel olarak üretilen çeliklerden bazı noktalarda ayrılmaktadır. Bu noktalar; üretim yöntemi, üretim araçları ve alt limitlerde bulunan S, P ve diğer empüriteler ile çözünmüş gaz miktarları olarak ifade edilebilir. Çelikler; bileşimlerine, üretim yöntemlerine, son

üretim yöntemine, ürün şekline, kullanım yerleri, üretim programları ve deoksidasyon durumlarına göre sınıflandırılırlar. Çok az karbon miktarlı çelikler, yumuşak demir olarak da adlandırılır. Bunlar makine imalatında konstrüksiyon malzemesi olarak pek az kullanılırlar, daha çok elektroteknikte, örneğin röle demiri olarak önemi vardır [4-7].

Genel yapı çeliklerinin tercih edilmesinde; görünüş, şekillendirilebilirlik, kenar bükme yeteneği, çekmeye uygunluk, kalıpta dövmeğe uygunluk, dikişli boru yapımı, gevrek kırğınlığa dayanım ve kaynak edilebilme özellikleri ön planda yer alır [1].

2.1.1. Genel Yapı Çelikleri

Genel yapı çelikleri toplam çelik üretimi içinde en büyük paya sahip çelik grubudur. Genel yapı çeliklerinin imalat endüstrisinde tercih edilmesinin fazla olması bu çeliklerin standartlarına büyük bir itina gerektirmektedir. Genel yapı çeliklerinin belirlendiği Avrupa Standardı EN 10025 ile ilgili son değişiklik Aralık 2000'de yayınlanmıştır. Bu çeliklerin standartlarında çekme dayanımlarını esas alan kısa gösterimler yerine mukavemet hesaplarında daha çok kullanılan akma sınırlarını esas alan kısa gösterimler kullanılmıştır.

Kimyasal etkilere dayanıklılık ve imalat sırasında sertleştirme işlemleri öngörülmeyen genel olarak konstrüksiyon çelikleri olarak düşünölen yapı çelikleri, kullanım yerine göre seçilmelerinde, öncelikle akma gerilmesi değeri göz önünde bulundurulur. Bunun yanında yeterli süneklilik ve gerektiğinde tokluk aranır. Bu arada söz konusu çeliklerin en başta kaynak olmak üzere, talaş kaldırma, soğuk şekil verme (örneğin bükme, zımbalama, derin çekme) gibi bazı imal usulleri ile ilgili teknolojik özellikleri de büyük önem taşıyabilir [8,9].

Genel yapı çeliği, çekme dayanımı ve akma sınırı ile tanımlanan ancak biçimlendirme (ısıl işlem uygulanmamış) suretiyle yapılan ve normalleştirme tavı uygulanmış veya uygulanmamış durumdaki alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerdir. Genel olarak yapı çelikleri, akma dayanımı 460 MPa altındaki çelikleri

kapsamaktadır [10-12].Çizelge 2.1’de farklı standartlarda genel yapı çelikleri kalite denklik tablosu verilmiştir.

Çizelge 2.1. Genel yapı çelikleri kalite denklik tablosu.

Yapı çeliği Kalite Denklik Tablosu								
Malzeme No	DIN	SAE/AISI	AFNOR	UNI	BS	JIS	EN	GOST
1.0038	St37-2, S235JRG2		E24- 2NE	Fe 360 B	Fe 3610B			St3ps
1.0570	St52-3, S355JO, S355J2G3		E36-3, E36-4	Fe 510 B, C, D	Fe510 D 1 FF	SM490 A, B, C		17GS
1.0060	St60-2, E335	A572Gr-65	A 60-2	Fe 60-2	Fe510 D 1 FF	SM 570		St6ps
1.0070	St 70-2		A 70-2	Fe 70-2	Fe 690- 2FN			St0
1.1170	28Mn6	1330	20M5	C28Mn	150M19	SCMn1	28Mn6	30G
1.1231	Ck67	1070	XC68	C70	060A67	S70C	2C67	65G
1.0035	St 34-2		A33	Fe 320	Fe 310-0			
1.0144	St 44-3	A573Gr-70	E 28-3	Fe430B, Fe 430C	Fe 430 D1FF	SM 400 A, B, C		St4kp

İş makineleri jant imalatında kullanılan çelikler de yapı çelikleri grubunda yer almaktadır.

2.2. JANT ÇELİKLERİ

Kimyasal etkilere dayanıklılık ve imalat sırasında sertleştirme işlemi öngörülme genl olarak konstrüksiyon çelikleri olarak düşünölen yapı çelikleri kullanım yerine göre seçilmelerinde, öncelikle akma dayanımları göz önünde bulundurulur. Bunun yanında yeterli süneklilik ve gerektiğinde tokluk aranır. Normalizasyon tavı uygulanmış veya uygulanmamış olarak temin edilebilirler.

Yapı çeliklerinin en başta kaynak olmak üzere, talaş kaldırma, soğuk şekil verme (örneğin bükme, zımbalama, derin çekme) gibi bazı imal usulleri ile ilgili teknolojik özellikleri de büyük önem taşır. Çeliklerin kaynak işlemi söz konusu ise sadece dayanımlarına göre değil, toklukları da göz önünde bulundurularak seçilmeleri gerekir.

Çeliklerin kaynağa uygunluğu için genel bir garanti verilmesi yanıltıcı olabilir. Çünkü konstrüksiyonun kaynak sırasındaki ve sonrasındaki davranışları kullanılan malzemenin özelliklerinden başka, boyutları, üretim ve işletme koşullarıyla ilgilidir. Ayrıca yapılan kaynak işleminin şekli çok önemlidir.

“Yapı çelikleri” terimi çok geniş bir dizi uygulama alanında kullanılan çelikleri kapsar. Değişik ülke standartlarında bunların kapsamı değişik tutulsada temel yaklaşım bakımından birbirine benzerler. Daha önce ifade edildiği gibi toplam çelik üretimi içerisinde en büyük paya sahiptirler.

Alaşımız çelik olarak, sıcak şekillendirmeden sonra normalleştirilmiş, bazen de soğuk şekillendirilmiş durumda kullanılırlar. Bu çeliklerden özellikle çekme ve akma dayanımları göz önünde tutularak, örneğin altyapı, üstyapı, köprü, depolama kabı, taşıt ve makine yapımı gibi çeşitli mühendislik kavramlarında yararlanılır [13].

2.3. YAŞLANMA SERTLEŞMESİ

Yaşlanma sertleşmesi, karbon (C) ve azot (N) gibi arayer atomlarının dislokasyonların hareketini engellemesiyle metal ve alaşımların mekanik özelliklerinin değişmesidir [14-16]. Mekanik özelliklerdeki değişim plastik deformasyondan sonra meydana geliyorsa bu durum statik yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırılır. Eğer yaşlanma sertleşmesi olayı plastik deformasyon sırasında meydana geliyorsa bu dinamik yaşlanma sertleşmesi olarak tanımlanır [17,18].

Yaşlanma sertleşmesi ile ilgili ilk çalışmalar Baird tarafından yazılan iki makale ile başlamıştır. Birinci makalede yer alan atomların dinamik yaşlanma sertleşmesine ve akma noktasına etkisi yazar tarafından araştırılmıştır. İkinci makalede yazar, arayer atomları ve dislokasyonların etkileşiminden meydana gelen yaşlanma sertleşmesinin çeliğin mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu iki makale, yaşlandırma sertleşmesi ile ilgili çalışmalara ışık tutmuş ve tutmaya da devam etmektedir [19,20]. Dinamik ve statik yaşlanma sertleşmesi çeliğin mekanik özelliklerini farklı şekilde etkiler. Genellikle dinamik yaşlanma sertleşmesi çeliğin şekillendirilebilme özelliğini ve çalışma sertleşmesini etkilerken, statik yaşlanma sertleşmesi çeliğin

akma dayanımını etkiler. Statik yaşlanma sertleşmesi ile ilgili çalışmaların birçoğu belli bir deformasyondan sonra yaşlandırılan numunelerde yeni bir akma noktasının meydana gelmesine dayanmaktadır. Bu olay çeliğin statik yaşlanma sertleşmesine maruz kaldığını gösteren en önemli göstergedir [19-24].

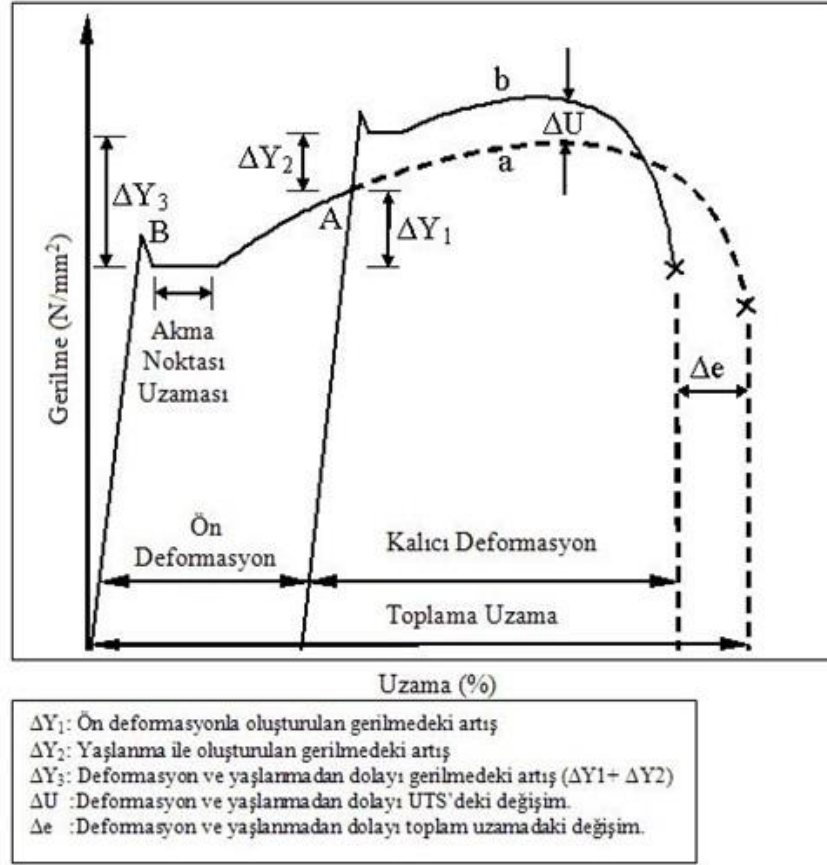
1949 yılında Cottrell ve Bilby, karbon ve azot gibi arayer atomlarının dislokasyonların hareketini engellediğini ve dislokasyonları bu arayer atmosferinden kurtarmak için daha fazla gerilme uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir[25]. Bunun sonucunda oda sıcaklığında yapılan çekme deneylerinde üst ve alt akma noktaları elde edilmiştir. Bununla beraber Glen Cottrell ve Bilby'den farklı olarak arayer atomlarının oluşturduğu atmosferle dislokasyonların etkileşiminden ziyade çökeltilelerle dislokasyonların etkileşiminin çeliğin dayanımının artmasına neden olduğunu belirtmiştir[26].

Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi çeliklerde yaşlanma sertleşmesi olayının meydana gelmesine neden olan en önemli etken C ve N gibi arayer atomlarının katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunmasıdır. Çelik içerisinde ağırlık olarak % 0,0001'den % 0,001'e kadar karbon ya da azot arayer atomu bulunması yaşlanma sertleşmesi oluşması için yeterli görülmektedir [20].

2.3.1. Statik Yaşlanma Sertleşmesi

Statik yaşlanma sertleşmesi, plastik deformasyondan sonra meydana gelen yaşlanma olarak tanımlanabilir. Statik yaşlanma sertleşmesinin etkisi, akma gerilmesinde bir artış ve % uzamada bir düşüş olarak görülmektedir. Bu etkilere hareket eden dislokasyonlar ve onları kilitleyen karbon ve azot arayer atomlarının neden olduğu kabul edilmektedir [19].

Şekil 2.1 düşük karbonlu çeliğin gerilme-uzama diyagramında statik yaşlanma sertleşmesinin oluşumunu göstermektedir [27]. Burada, normalize edilmiş yumuşak çeliğin gerilme-uzama diyagramı Şekil 2.1'deki (a) eğrisinde görülmektedir. Eğer numune akma sınırını aşmış belirli bir oranda plastik deformasyona maruz kalırsa ve çekme test cihazı durdurulup ardından fazla bekletilmeden çekme testine devam edilirse gerilme-uzama eğrisi farklı bir akma noktası göstermez ve (a) eğrisini takip eder. Ancak; numune belirli bir oranda plastik deformasyona uğradığında test cihazı durdurulur ve numune oda sıcaklığında veya oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda (25-400 °C) belli bir süre bekletilir. Daha sonra çekme işlemine tabi tutulursa ilk akma noktasına göre daha yüksek bir akma noktası oluştuğu ve gerilme-uzama eğrisinin (b) eğrisini takip ettiği görülür. Akma noktasındaki bu artış, statik yaşlanma sertleşmesinin en önemli göstergesi olarak kabul edilir [28]. Ayrıca statik yaşlanma neticesinde çekme dayanımında bir artış, % uzama değerinde ise bir azalma meydana gelebilir, fakat bunlar her zaman olmayabilir. Yaşlanma sertleşmesi olayı çeliklerin sünek/gevrek geçiş sıcaklığını, yüksek sıcaklık dayanımını, elektriksel ve manyetik özelliklerini de etkileyebilir [20].



Şekil 2.1. Statik yaşlanma sertleşmesinin gerilme-uzama diyagramı üzerinde gösterilmesi [27].

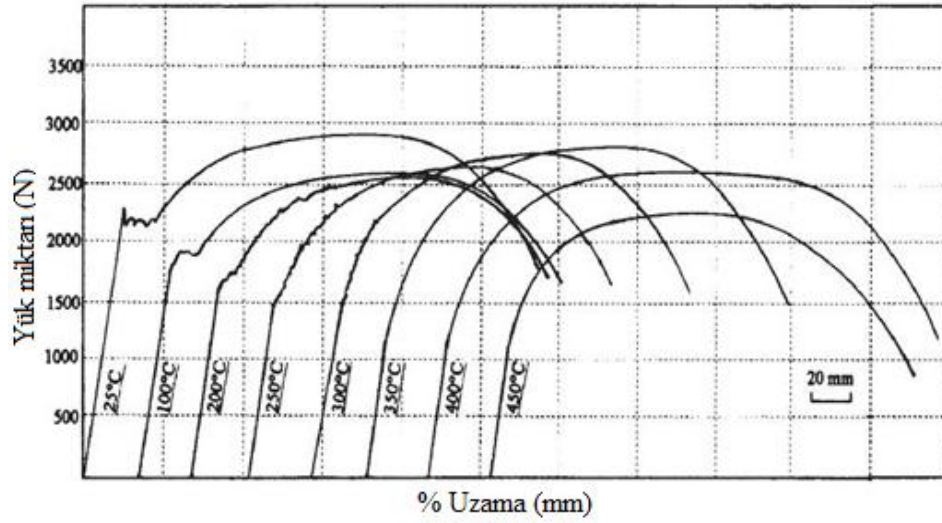
Yapılan literatür araştırmalarında, yaşlanma sertleşmesinin çelik içerisinde arayer atomlarının bulunmasından kaynaklandığını göstermişlerdir [29-31]. Yaşlanma sertleşmesinin etkisini azaltmak için, katı çözültide arayer atomlarının oranını % 0,0001'den aşağıya düşürülmesi gerektiğini ve arayer atomlarının % 0,002 oranında olduğunda yaşlanma olayının maksimuma ulaştığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Gündüz ve Kaçar C-Mn-Al-V-N mikroalaşım çeliğinde yaşlanma sertleşmesinin oluştuğunu ve özellikle havada soğutulan numunelerin herhangi bir ısıl işlem görmemiş numunelere göre daha fazla statik yaşlanmaya maruz kaldığını göstermişlerdir [32]. Yapılan geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) çalışmalarında, havada soğutulmuş numunelerin ana malzemeden elde edilen numunelere göre daha fazla karbon ve azotu katı ergiyik içerisinde bulundurduğu belirtilmiştir.

2.3.2. Dinamik Yaşlanma Sertleşmesi

Dinamik yaşlanma sertleşmesi, plastik deformasyon esnasında meydana gelen yaşlanma olarak tanımlanabilir. Dinamik yaşlanmanın düşük karbonlu çeliklerde en çok görüldüğü sıcaklık aralığı 150–250 °C'dir. Bu sıcaklık aralığında meydana gelen dinamik yaşlanma olayı mavi kırılmalık etkisi olarak adlandırılmaktadır. Mavi kırılmalık, C ve N atomlarının yüksek sıcaklıkta dislokasyonların hareketini engellemesinden dolayı oluşmaktadır [33-35]. C ve N atomu içermeyen çeliklerin çekme dayanımları 25–500 °C aralığında yapılan sıcak çekme testlerinden sonra düzgün olarak düşerken, C ve N ilavesiyle 100–350 °C sıcaklık aralığında yapılan testlerde dayanımda artış sağlamaktadır. Azot düşük sıcaklıklarda (25–200 °C) karbona göre daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan dinamik yaşlanma sertleşmesinin oluşmasına neden olur. Fakat 200 °C üzerindeki sıcaklıklarda karbon, çözünürlüğünün artmasından dolayı, dinamik yaşlanma sertleşmesinin oluşmasında başlıca rol oynar [20].

Yüksek sıcaklıklarda yapılan çekme testi sonucunda gerilme-uzama diyagramında görülen testere dişi (zig-zag) akma davranış ve çalışma sertleşmesi oranındaki artış dinamik yaşlanma sertleşmesinin nedeni olarak kabul edilmektedir. Ancak bazı durumlarda, testere dişi (zig-zag) davranış görülmediği halde yaşlanma sertleşmesi oluşabilir. Mulford ve arkadaşları [36], Li CC ve arkadaşları [37] tarafından yapılan çalışmalarda, karbonlu çeliklerde testere dişi davranış olmadanda yaşlanmanın oluşabileceği gösterilmiştir [36,37]. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi oda sıcaklığında yapılan çekme testleriyle, yüksek sıcaklıklarda yapılan çekme testleri kıyaslandığında; akma noktasından itibaren maksimum çekme noktası arasındaki bölgede bir dikleşme olması çalışma sertleşmesinin bir göstergesidir. Bu şekilde artan bir çalışma sertleşmesi oranı dinamik yaşlanma sertleşmesinin bir belirtisidir.

Dinamik yaşlanma sertleşmesi, çekme testi sırasında sıcaklığın etkisiyle hareket eden dislokasyonlar ile arayer atomlarının etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Yaşlanma, sadece dislokasyonların serbest hareketi esnasında değil, aynı zamanda bekleme süresi olarak bilinen ve dislokasyonların geçici olarak kayma düzlemindeki bölgesel engellerde tutulduğu süre boyunca ortaya çıktığı ileri sürülmüştür [38-44].



Şekil 2.2. Dinamik yaşlanma sertleşmesi neticesinde vanadyum mikroalaşım çeliğinin gerilme-uzama diyagramında meydana gelen değişim [38].

Daha önce ifade edildiği gibi, karbon çeliklerde yaşlanma sertleşmesine neden olmaktadır. Ancak düşük sıcaklıklarda ferrit fazı içerisinde çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle azot ile karşılaştırıldığında 0–200 °C sıcaklık aralığında çok daha az yaşlanma sertleşmesi oluşturur. Bunun yanında çelik, östenit bölgesinden hızlı bir şekilde soğutulduğunda karbon katı çözültide kalmış ise düşük sıcaklıklarda dinamik yaşlanma sertleşmesi ortaya çıkabilir. Karbon nedeniyle meydana gelen yaşlanma sertleşmesi, azot tarafından meydana gelen yaşlanma sertleşmesi kadar kolay ortaya çıkmamaktadır. Yaşlanma sıcaklığı değiştikçe bazı istisnalar olabilir, fakat düşük sıcaklıklarda bu durum oldukça geçerlidir.

2.4. YAŞLANMADA KARBON VE AZOT ATOMLARININ ETKİSİ

Çeliklerin yaşlanma davranışlarında arayer atomlarından olan azot ve karbonun etkisi ferrit ve östenit fazlarındaki bu atomların çözünürlüğü ve yayılımı ile yakından ilişkilidir. Bu iki durum ayrı ayrı ele alınmalıdır.

2.4.1. Karbon ve Azotun Ferrit ve Östenit Fazı İçerisinde Çözünürlüğü

Çizelge 2.2’de belirtildiği gibi C ve N atomlarının çapları Fe atomuyla kıyaslandığında oldukça küçüktür. Küçük olmalarından dolayı bu atomlar α -Fe (ferrit) ve γ -Fe (ostenit) kristal kafesinde arayer atomu olarak yer bulurlar. Fakat mangan, nikel, krom gibi metalik alaşım elementleri daha büyük atom çapına sahip olduklarından kristal kafes içerisinde yer alan atomu olarak bulunurlar. Küçük atom çapına sahip olan C ve N atomları kristal kafes içerisindeki oktahedral boşluklara oturmaktadır [45].

Çizelge 2.2. Demirde metalik olmayan elementlerin atomik boyutları [45].

Element:	Atomik yarıçap, r (Å)	r / r _{Fe}
α -Fe	1.28	1.00
B	0.94	0.73
C	0.77	0.60
N	0.72	0.57
O	0.60	0.47
H	0.46	0.36

Çizelge 2.3’de hacim merkezli kübik (HMK) ve yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafeslerinde bulunan oktahedral ve tetrahedral boşlukların çapları verilmiştir. Çizelge 2.2 ve 2.3’den görüldüğü gibi, C ve N atomlarının çapları kristal kafesteki arayer boşluklarının çaplarından büyüktür. Bu durumda C ve N atomları arayer boşluklarına oturduklarında kristal kafesi distorsoyona uğratacağı açık olarak görülmektedir.

Çizelge 2.3.HMK ve YMK yapılarında uygun boşluk alanlarının büyüklüğü [45].

Kristal kafes yapısı		Yarıçap (r) (Å)	Demir içerisindeki boşluk yarıçapı (Å)
HMK	Tetrahedral	0.29r	0.37
	Oktahedral	0.15r	0.19
YMK	Tetrahedral	0.23r	0.28
	Oktahedral	0.41r	0.51

r = demirin atomik yarıçapı (Å)

Ayrıca C ve N atomlarının ferrite nazaran östenit içerisinde daha yüksek çözünabilirliğe sahip olduğu Çizelge 2.4'den anlaşılmaktadır. Buna neden olarak östenit fazındaki arayer boşluklarının, ferrit fazındaki boşluklardan daha büyük olması gösterilebilir. Ferrit bölgesinde ise C ve N atomlarının çözünürlüğü düşmektedir. Örneğin, C atomunun ferrit bölgesinde maksimum çözünürlüğü ağırlık olarak % 0,025 iken, N atomununki ise % 0,1'dir. Arayer atomlarının östenit ve ferrit fazlarında sahip olduğu farklı çözünürlük, çeliklerin ısıl işlemlerle mekanik özelliklerinin değişmesine ve yaşlanma sertleşmesinin oluşmasına neden olur.

Çizelge 2.4. γ ve α demirinde karbon ve azotun çözünürlüğü [45].

		SICAKLIK (°C)	ÇÖZÜNÜRLÜK	
			% Ağırlık	% Atomik ağırlık
C	γ	1150 723	2,04 0,80	8,8 3,6
	α	723 20	0,02 <0,00005	0,095 <0,00012
N	γ	650 590	2,8 2,35	10,3 8,75
	α	590 20	0,10 <0,0001	0,40 <0,0004

2.4.2. Karbon ve Azot Atomlarının Ferrit ve Östenit İçerisinde Difüzyonu

α -ferrit fazı içerisinde C ve N atomlarının difüzyonu, eşitlik 2.1 ve 2.2'de verilen formüllerle hesaplanır. Burada; D_C ve D_N karbon ve azotun yayınma katsayısı, Q aktivasyon enerjisi, T sıcaklık ve R ise gaz sabitidir. Çizelge 2.5'de bazı element atomlarının ferrit ve östenit içerisinde difüzyonu verilmiştir.

$$D_c = 6,2 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad (Q = 80 \text{ kJ mol}^{-1}) \quad (2.1)$$

$$D_N = 3,0 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad (Q = 76 \text{ kJ mol}^{-1}) \quad (2.2)$$

Çizelge 2.5. Bazı element atomlarının ferrit ve östenit içerisindeki difüzyonu [45].

Çözen	Çözünen	Aktivasyon Enerjisi, Q (kJ mol ⁻¹)	Frekans Faktörü, D ₀ (cm ² s ⁻¹)	Yayınım Katsayısı (cm ² s ⁻¹)	Sıcaklık Aralığı (°C)
α	C	80	6.2 x 10 ⁻³	1.8 x 10 ⁻⁶	
	N	76	3.0 x 10 ⁻³	1.3 x 10 ⁻⁶	
	Fe	240	0.5		700-750
	Co	226	0.2	2.1 x 10 ⁻¹¹	700-790
	Cr	343	3.0 x 10 ⁴		
	Ni	358	9.7	3.7 x 10 ⁻¹¹	700-900
	P	230	2.9	2.0 x 10 ⁻¹⁰	860-900
γ	C	135	0.15	1.5 x 10 ⁷	900-1050
	Fe	269	0.18	2.2 x 10 ⁻¹³	1060-1390
	Co	364	3.0 x 10 ²	24.0 x 10 ⁻¹² (1050°C'de)	1050-1250
	Cr	405	1.8 x 10 ⁴	58.0 x 10 ⁻¹² (1050°C'de)	1050-1250
	Cu	253	3.0	15.0 x 10 ⁻¹¹	800-1200
	Ni	280	0.77	7.7 x 10 ⁻¹³	930-1050
	P	293	28.3	3.6 x 10 ⁻¹²	1280-1350
	S	202	1.35	1.5 x 10 ⁻⁹	1200-1350
	W	376	1.0 x 10 ³	12.0 x 10 ⁻¹² (1050°C'de)	1050-1250

Çizelge 2.5'dengörüldüğü gibi, ferrit içerisinde C ve N arayer atomlarının difüzyonu yeralan atomlarının difüzyonundan daha fazladır. Arayer atomlarının difüzyonunun fazla olması demirin sementasyon ve nitrüleme işlemleriyle yüzeyinin sertleşmesine olanak sağlar. Bu durum demir için bir avantaj olarak düşünülebilir. Fakat çelik içerisinde bulunan C ve N gibi arayer atomları yaşlanma sertleşmesinin oluşumunu kolaylaştırarak çeliğin şekillendirilebilme özelliğini düşürür. Beklenmedik

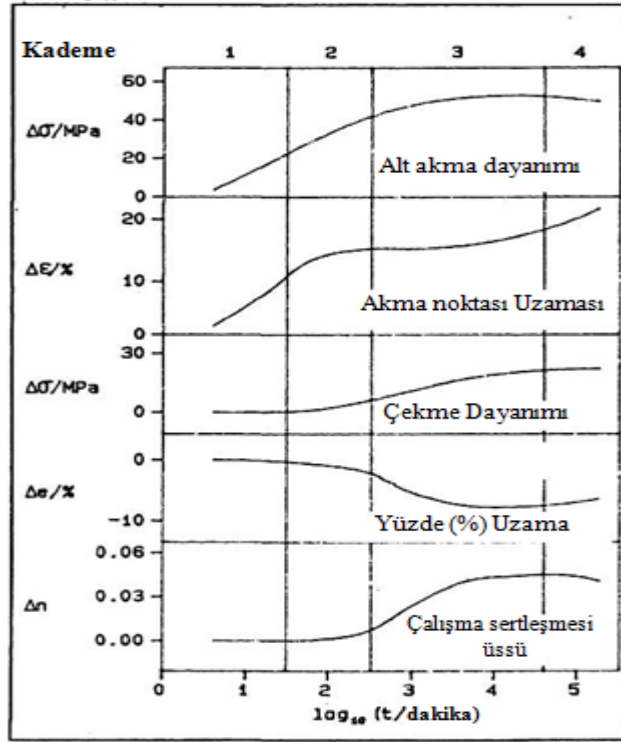
çatlamalara ve kırılmalara neden olabilir. Bu açıdan değerlendirildiğinde katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunan arayer atomları yaşlanma sertleşmesine neden oldukları için çelik için zararlıdır.

Ayrıca oda sıcaklığında azotun difüzyonu $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{sn}$ iken karbonun difüzyonu $3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{sn}$ 'dir [46]. Bu durum oda sıcaklığında azotun difüzyonunun karbona nazaran daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu nedenle çeliklerde oda sıcaklığında meydana gelen yaşlanma sertleşmesi daha yüksek difüzyon hızına sahip olan azot atomunun dislokasyonların hareketini engellemesiyle oluşur.

2.4.3. Karbon ve Azot Atomlarının Yaşlanma Sertleşmesindeki Rolü

Yaşlanma sertleşmesi katı ergiyik içerisinde bulunan serbest azot ve karbon miktarıyla direkt olarak ilgilidir. Azotun meydana getirdiği yaşlanma sertleşmesi düşük yaşlanma sıcaklıklarında (200 °C ve altı) meydana gelirken, karbonun meydana getirdiği yaşlanma sertleşmesi 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu farklılık bölüm 2.4.1'de açıklandığı gibi C ve N atomlarının ferrit fazı içerisinde farklı çözünürlüğe sahip olmasından kaynaklanır [20].

Bölüm 2.3'de açıklandığı gibi C ve N arayer atomları öndeformasyon sonrasında yaşlanma sırasında dislokasyonların hareketini engelleyerek çeliklerin akma dayanımında bir artışa ve % uzama değerinde bir azalmaya neden olmaktadır. Mekanik özelliklerdeki bu değişim çeliklerin statik yaşlanma sertleşmesine maruz kaldığının bir göstergesidir. Şekil 2.3'de 60 °C'de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan düşük karbonlu bir çeliğin mekanik özelliklerindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 2.3. 60 °C'de farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerindeki değişim.

Şekil 2.3'den görüldüğü gibi 60 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yapılan yaşlandırma işlemi çeliğin mekanik özelliklerini dört aşamada etkilemektedir. 1. aşamada çeliğin akma noktası ve akma noktası uzaması yükselirken diğer mekanik özellikler değişmeden kalır. 2. aşamada akma noktası artmaya devam ederken akma noktası uzaması sabit kalır. Akma noktası uzamasının bitiminden sonra çalışma sertleşmesinde bir değişim olmadan dayanım yükselir. 3. aşama, 2. aşamaya benzemekle birlikte çalışma sertleşmesi yükselmekte bunun sonucu olarak maksimum çekme dayanımı artarken % uzama değeri düşmektedir. Bu nedenle 2. ve 3. aşama yaşlanma sertleşmesinin en etkin olduğu aşamalar olarak bilinmektedir. 4. aşama ise aşırı yaşlanmanın meydana geldiği aşamadır. Bu aşamada dayanım düşer fakat akma uzaması sabit kalır veya küçük taneli malzemelerde artış bile olabilir.

Wilson ve Russel, 1. aşamanın C ve N arayer atomlarının dislokasyonlar etrafında oluşturmuş olduğu atmosfer neticesinde meydana geldiğini belirtmektedirler [29]. 2. aşamanın ise karbür veya nitrür çökeltilerinin dislokasyon hareketini engelleyerek çeliğin dayanımının artmasına neden olduğunu ifade etmektedirler. Lesslie ve Keh

ise 3. aşamanın yeni dislokasyonların meydana geldiği ve bu dislokasyonların hareket etmesiyle çalışma sertleşmesinin yükseldiği aşama olarak belirtmişlerdir [47]. Wilson ve Russel 4. aşamada çökeltilerin dislokasyon üzerinde çözündüğünü ve bunun sonucunda çeliğin akma dayanımında düşme meydana geldiğini ifade etmişlerdir [29].

2.4.4. Diğer Alaşım Elementlerinin Yaşlanma Sertleşmesine Etkileri

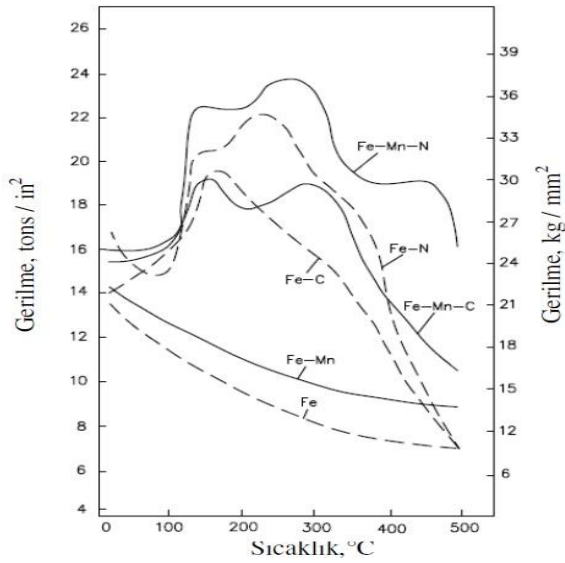
Önceki bölümde yapılan açıklamadan anlaşılacağı gibi C ve N atomları yaşlanma sertleşmesini etkileyen en önemli elementlerdir. Bunlardan başka yaşlanma sertleşmesini etkileyen ve üçüncü sınıf altında toplanabilen elementler vardır. Bunların içerisinde birinci sınıf elementler; nitrür oluşturabilen alüminyum ve bordur. Bu elementler azotu katı ergiyik içerisinde alarak AlN veya BN oluşturur. Böylece düşük sıcaklıklarda N atomundan dolayı meydana gelecek yaşlanma sertleşmesini minimum düzeye düşürür. Her ne kadar N katı ergiyik içerisinde Al veya B tarafından alınsa da yüksek sıcaklıklarda yaşlanma sertleşmesi çelik içerisinde oluşabilir [48]. İkinci sınıf elementler; vanadyum, niyobyum ve titanyum gibi hem karbür hem de nitrür oluşturan elementlerdir. Bu elementler, katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunan C ve N atomlarını karbonitrür olarak dışarı alır. Bunun sonucunda ferrit bölgesinde hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda oluşabilecek yaşlanma sertleşmesini ortadan kaldırır [29]. Üçüncü sınıf elementler ise bakır, nikel, mangan ve fosfor gibi yeralan alaşım elementlerdir. Bunlar karbür ve nitrür yapıcı element değildirler.

2.4.5. Yeralan Alaşım Elementlerinin Yaşlanma Sertleşmesine Etkileri

Bakır, nikel, mangan ve fosfor gibi yeralan alaşım elementleri birinci ve ikinci sınıf elementlerden farklı olup bir önceki bölümde belirtildiği gibi üçüncü sınıf elementler olarak adlandırılmaktadır. Bu elementlerin hiç biri kuvvetli karbür ve nitrür yapıcı elementler değildir. Yalnızca mangan zayıf nitrür (MnN) yapıcı elementtir ve düşük sıcaklıklarda yaşlanma sertleşmesinin oluşmasını çok az da olsa engelleyebilir [48].

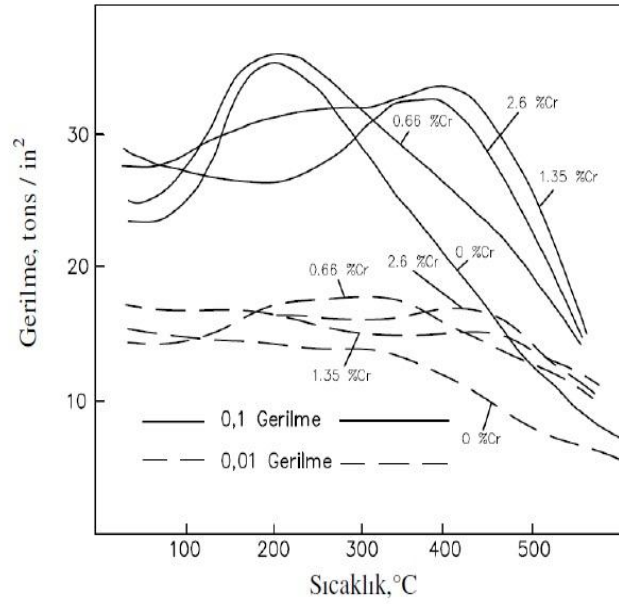
Katı ergiyik içerisinde bulunan yerel alaşım elementlerinin statik yaşlanma sertleşmesine etkileri çok belirgin olmamakla birlikte yaşlanmanın şiddetini düşürdüğü bilinmektedir. Fakat bunun yanında yerel alaşım elementlerinden mangan, krom, molibden, tungsten ve bakır mavi kırılma bölgesinin üstündeki sıcaklıklarda yapılan çekme testi esnasında çeliğin yaşlanma sertleşmesini artırır. Glenbu dayanım artışını, dislokasyonların üzerinde oluşan karbür veya nitürlerin oluşmasına bağlamıştır [26]. Bu karbonitürler düşük sıcaklıklarda dislokasyonların hareketini engelleyerek statik kilitlenmeyi yüksek sıcaklıklara çıkarmıştır. Ayrıca Glenyapmış olduğu çalışmada yerel alaşım elementlerinin çeliğin yüksek sıcaklıklarda bile belirgin akma noktası göstermesine neden olduğunu belirtmiştir [26].

Baird ve Jamiesonmangan miktarının çeliklerin yüksek sıcaklık çekme özelliklerine etkisini detaylı olarak araştırmıştır [33]. Yapılan çalışmada % 1 Mn ilave edilen, karbon veya azot atomundan yoksun olan numunelerin, akma dayanımında 20-500 °C sıcaklık aralığında yapılan çekme testi neticesinde herhangi bir değişim görülmemiştir. Fakat çalışma sertleşmesi oranı sıcaklıkla birlikte artmıştır. Şekil 2.4 karbon, azot ve manganın, demirin % 10 plastik deformasyondaki dayanımına etkisini göstermektedir [19].



Şekil 2.4. Karbon, azot ve manganın % 10 plastik deformasyondaki dayanımına etkisi.

Şekilden görüldüğü gibi C ve Mn'nin bir arada bulunması 300°C sıcaklıkta bir dayanım artışına sebep olurken, N ve Mn'nin bir arada bulunması 450°C'de bir dayanım artışına neden olmuştur. Şekil 2.5'de ise krom oranının düşük karbonlu çeliğin yüksek sıcaklık çekme dayanımına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Düşük karbon ve mangan içeren çeliğin yüksek sıcaklık çekme dayanımına kromun etkisi [19].

Şekilden görüldüğü gibi, krom içermeyen veya çok az miktarda krom içeren bir numunede yaklaşık 200 °C sıcaklıkta bir dayanım artışı görülürken, krom oranı %1,35'e yükseldiğinde yaşlanma sertleşmesinin arttığı görülmektedir. Krom oranının % 2,6'ya çıktığı durumda ise % 1,35'lik orana göre 200 °C sıcaklıkta bir düşme görülürken 400°C sıcaklıkta yeni bir artış görülmektedir. Jones ve Combs [49] içerisinde % 0,44 krom içeren çeliklerin yaşlanma sertleşme özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan çelik malzemeler sıcak ve soğuk haddelemeden sonra 680 °C sıcaklıkta 20 saat tavlanmıştır. Yapılan çalışma neticesinde krom miktarının artması yaşlanma sertleşmesinin hızını 100 °C'de düşürmüştür ve % 0,44 krom içeren numunelerin çekme dayanımında herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Çalışmada elde edilen bu sonuçlar katı ergiyik içerisinde bulunan N atomunun krom tarafından kısmen CrN olarak bağlandığını veya kromun N atomunun dislokasyonlara hareket etmesini engellediğini göstermektedir.

2.5. METALİK MALZEMELERİN YORULMA DAVRANIŞI

Tekrarlı zorlamalara maruz kalan makine parçaları ve yapı elemanlarında, düzenli ya da düzensiz sürekli değişken kuvvet veya momentlerin, eğme, burma, çekme etkimesi, yorulma zorlaması olarak adlandırılır. Periyodik olarak değişen bu gerilmeler elemanın iç yapısında birtakım yıpranmalar ve ayrılmalar doğurur. Tekrarlı gerilmelere maruz kalan malzemelerin akma sınırının çok altındaki gerilmelerde kırılma olayı gerçekleşebilir. Bu olaya genel olarak “yorulma kırılması” denir [50]. Tekrarlanan gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen, belirli bir tekrar sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takiben kırılma olayına neden olur [51,52]. Ancak kısa bir kullanımdan sonra oluşan yorulma şeklindeki olaylara veya malzemenin dikkat çekici biçimde sertleşmesi sonrasında yorulma olayına neden olan gerilmeler malzemenin akma gerilmesi üst sınırından fazla bir şiddetde de gerçekleşebilir [53]. Yorulma kırılması gevrek türden bir kırılma olduğundan nerede ve ne zaman olacağını önceden kestirmek zordur. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makine parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık % 90’ı yorulma nedenlidir [54-57]. Özellikle şaftlar ve diskler gibi dönen parçaların büyük bir kısmı, serviste ilk aşama yorulma hasarına maruz kalırlar ve bazı durumlarda kırılırlar [56-58]. Uzun ömürlü yorulma olayından kaynaklanan hasarlar, genellikle 10^5 çevrim sayılarından daha büyük gerilme çevrim sayılarında oluşur [58].

Statik yüklere karşı konstrüksiyon hesabı yapılırken akma sınırını esas almak gerekir. Tekrarlanan yüklere karşı yapılan hesaplarda ise farklı bir mukavemet ölçüsüne ihtiyaç vardır. Bu ölçü yorulma mukavemetidir. Yorulma mukavemeti (S), parçayı belli bir çevrim sayısı (N) kadar tatbik edildikten sonra kırarak gerilmedir. S değerinin N değerine bağlı olacağı ortadadır [57].

Yorulma olayına, parçaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısıl genişleme ve büzülmeden doğan ısıl gerilmelerde neden olabilir. Yorulma olayında çatlama genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çatlak başlangıcı için genellikle:

- Yeteri derecede yüksek bir çekme gerilmesi,
- Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi ve dalgalanması,
- Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı gereklidir [59].

Bu ana hususların yanında çok sayıda yan faktörler de çatlak başlangıcı için etkilidir. Yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, gerilmekonsantrasyonu, frekans, mikroyapı (tane boyutu, faz dağılımı, inklüzyonlar vb.) bu yan faktörlere örnek gösterilebilir.

Standart boyut ve belirli yüzey kalitesine sahip numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise koşulların hepsi değişiklik gösterir. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analiz edilmesi güçtür. Bu nedenle yorulma deneyi sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılmazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir verir. Benzer koşulların bulunabileceği parça tasarımında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur.

Yorulma deneyi sonuçlarının bir anlam verebilmesi için aşağıdaki bilgilerin belirtilmesi gerekir [59].

Malzeme özellikleri:

- Malzeme cinsi,
- Malzemenin piyasaya sunulmuş durumu (levha, çubuk vs.),
- Ergitme ve döküm koşulları,
- Son mekanik işlemler ve ısı işlemler,
- Kimyasal bileşim,
- Yüzey durumu ve kalitesi (hadde, taşlama, parlatılmış vs.),

Deney numunesinin şekil ve boyutları,

Deney cihazının tipi, çalışma prensibi ve deneyin yapılışı esnasında uygulanan gerilme ve frekans,

Deneyin yapıldığı ortamın koşulları ve sıcaklığı,

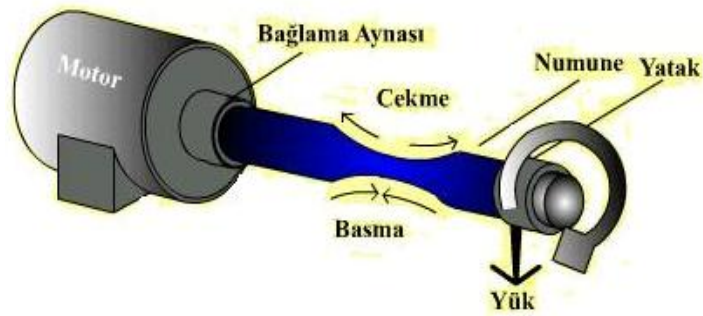
Bazı hallerde malzemenin diğer mekanik özellikleri ile metalografik yapısı.

Son yıllarda önemli parçaların yorulma özellikleri belirlemek için, standart bir deney numunesi yerine, parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma koşullarına benzer şartlarda deneye tabi tutulmaktadır. Böylece daha güvenilir sonuçlar elde edilir.

S-N eğrisi, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bir bağıntı verir. Bu eğrinin çizilmesi için genellikle 8 ile 12 benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme (S_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere, numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına) kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Küçük gerilmeler için çatlamanın veya kırılmanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Deneylerin tümünde gerilme genliği (S_a) deney süresince sabit tutulur [60,62].

Gerilme eksenini olan ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik gösterge çizelgesi kullanılır. Bu ekseninde ya en büyük gerilme (S_{max}), ya en küçük gerilme (S_{min}) ya da gerilme genliğinden (S_a) biri kaydedilir. Çevrim sayısı eksenini olan apsiste ise genellikle logaritmik gösterge çizelgesi kullanılır [63].

S-N eğrileri 10^6 çevrimden sonra genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler. Şekil 2.6'da dönen destekli kiriş yorulma düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Dönen destekli kiriş yorulma test düzeneği [60].

2.5.1. Yorulma Çatlağı Oluşumu

Sabit deformasyon genliğı altında, önce yorulma sertleşmesinin meydana geldiğı, sonra ise plastik şekil değıştirme direncinin azaldığı yani yumuşamanın başladığı anlaşılmıştır. Bu andan itibaren tekrarlanan plastik deformasyon, hem yüzeyde hem de iç kısımda sadece kalıcı kayma bantları içerisinde meydana gelir. Yüzeydeki kalıcı kayma bantları da büyük bir olasılıkla sürekli şekilde, girinti ve çıkıntıları oluşturarak bandın içinde çatlağın başlamasına neden olmaktadır [64,65]. Yorulma sertleşmesi durduğu sırada kayma bantlarının içinde ise oldukça düzgün arı peteğı görünümünde bant düzlemine dik dislokasyon hücrelerinin bulunduğu gözlenmektedir. Kayma bantlarının yumuşak olması, çatlak mekanizmasının bantların kırılmasını sağlayacak yüksek yerel gerilmelerle açıklanmasına imkân vermemektedir. Yorulma çatlağı hemen hemen her zaman en büyük normal gerilmeye dik yönde oluşur [66].

Uygulanan çeşitli ve sürekli sıcaklık değışimlerinden dolayı, yorulma olayı ısı gerilme değışimlerine maruz kalınması sonucunda ısı yorulma şeklinde meydana gelebilir. Isıl yorulma çatlakları alternatif genleşme ve büzülme olaylarını oluşturan tekrarlı ısıtma ve soğutma çevrimleri sonucunda oluşur. Isınma soğuma çevrimleri sırasında, metal soğuduğunda büzülür ve büzülme olayı sonucunda serbestçe hareketinin engellenmesi durumunda malzeme üzerinde yorulma çatlaklarının oluşumuna sebep olabilecek çekme kalıntı gerilmeleri oluşabilir [58,80].

2.6. YORULMA DENEY CİHAZLARI VE TÜRLERİ

Yorulma deneyinde kullanılan cihazlar çok çeşitli olmalarına rağmen, cihazları uyguladıkları gerilme türü açısından 4 ana grupta toplamak mümkündür [60,61].

Eksenel çekme – basma gerilmeleri uygulayan

Eğme gerilmeleri uygulayan

- Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan
- Dönen eğme gerilmesi uygulayan

Burma gerilmesi uygulayan, bileşik gerilme uygulayan cihazlar.

Bu cihaz grupları içinde en çok kullanılanı, çalışma prensibi en basit olan eğme gerilmesi uygulayan cihazlardır. Deneye tabi tutulacak parça çalışma esnasında ne tür gerilmelere uğrayacaksa, o tür gerilmelerin uygulandığı deney cihazının seçilmesi gerekir. Yorulma deney cihazları, çalışma prensiplerine göre mekanik, elektromekanik, manyetik, hidrolik ve elektrohidrolik cihazlar diye sınıflandırılabilirler. Yorulma deneyi cihazlarının tümünde en önemli özellik deney süresince istenen türde ve istenen düzeyde gerilmenin sağlanabilmesidir. Deney cihazlarında çevrim sayısını kaydeden sayaç bulunmalıdır. Sayaç, numune kırıldığı anda otomatik olarak durabilecek özelliğe sahip olmalıdır.

Çalışma sırasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve şiddette olabilir. Ancak yorulma deneyinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında kantitatif bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter kabul edilerek teknik yorumlar yapılabilmektedir.

Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını verir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyi türleri şunlardır [60].

2.6.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi

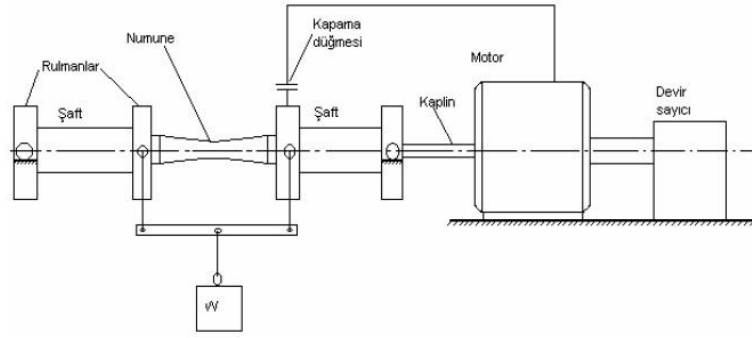
En basit sistem olan eksenel gerilmeli yorulma deneyinde numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme numune enince de üniform olarak dağılır. Eksenel gerilmelerin söz konusu olduğu bir örnek, içten yanmalı motorların bağlantı rotlarıdır. Ancak burada eksenel gerilme yanında eğme kuvvetleri de oldukça etkilidir.

2.6.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

Eğme gerilmeli yorulma deneyi kendi arasında, düzlemsel eğme gerilmeli ve dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi olmak üzere ikiye ayrılır. Düzlemsel eğme gerilmeli deney türünde, numune nötr (tarafsız) bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelerin olduğu en güzel örnek taşıtların makas yaylarıdır. Döner eğme gerilmeli ikinci deney türünde, numune devamlı döner bir nötr eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelere örnek olarak, hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir. Aks başlıklarına (yatakları içinde kalan kısım) gelen yükün etkisi ve tekerleklerdeki tepkiden dolayı aksda eğme gerilmeleri oluşur. Ancak aks devamlı döndüğünden, aksın herhangi bir ekseni her turda bir çekme bir basma gerilmesine uğrar. Bu, Wöhler'i yorulma konusunda çalışmaya yönelten olaydır.

2.6.2.1. Döner Eğme Gerilmeli Yorulma Deney Düzeni

Yorulma testi malzemenin yorulma özelliğini belirlemek amacıyla genellikle basit numunelerle yapılır. Küçük boyuttaki numunelerin kullanıldığı en yaygın yorulma deneyi, dönerken birbiri arkasına, eşit genlikte çekme ve basma gerilmelerine uğradığı döner mil deneyidir[67-70]. Dönme sırasında sıfır değerindeki ortalama gerilme etrafında titreşen, değişen eğme gerilmeleri meydana gelir. Aynı malzemenin yapılmış ve aynı ön işlemlerden geçmiş birçok numune, gittikçe azalan gerilme genliği etkisinde kopmaya kadar test edilir ve kopma için gerekli yük tekrar sayısı tespit edilir. Devir sayısı 1000 d/d ile 10000 d/d arasındadır (1 devir=1 yük tekrarı). Sınır yük tekrar sayısı NG'ye erisen numuneler artık kopmazlar ve testten çıkartılırlar[68]. R. R. Moore tarafından geliştirilen döner eğme gerilmeli yorulma test düzeneğinin şematik resmi Şekil 2.7'de gösterilmiştir[68].



Şekil 2.7. R. R. Moore döner eğme gerilmeli yorulma makinesinin şematik resmi[68].

R. R. Moore tarafından geliştirilen bu sistemde, iki milin uçlarına rijid olarak yerleştirilen numune sadece eğilmeye maruz kalmaktadır. Dönme esnasında üst kısmı daima basıya, alt kısmı da daima çekiye çalışan numune yüzeyinin her noktasında sinüzoidal değişen bir gerilme doğar. Yükleme statik olduğundan sabit bir yükleme yapılabilir ve ortalama gerilme sıfırdır. Şekil 2.7’de şematik gösterilen yorulma deney düzeneğinin çalışma prensibi şöyle açıklanabilir. Öncelikle test için belirlenen gerilme miktarı hesaplanarak gereken yük rulmanlar üzerindeki yük asma kelepçeleri yardımı ile deney numunesine uygulanır. Numune, yorulma dayanımına etki eden faktörlerden bir veya birkaç tanesine maruz kalır ve belli bir süre sonra kırılır. Numune kırıldığı anda tutucu switch anahtarın üzerine düşer ve sistemi durdurur. Cihaz üzerindeki numaratör yardımı ile kırılma sonucundaki çevrim sayısı hesaplanır. Bu çalışma değişik gerilmeler altında türdeş numunelere uygulanarak yorulma testi tamamlanır. Uygulanan gerilmenin hesaplanması aşağıdaki bağıntı ile yapılır:

$$\sigma \text{ (N/mm}^2\text{)} = 32.P.L / (\pi .d^3)$$

(2.3)

Burada;

σ : Gerilme (N/mm²)

P: Uygulanan kuvvet(Newton)

L: Uzaklık (mm)

d: Numune çapı (ince çap) (mm)

2.6.3. Burulma Gerilmeli Yorulma Deneyi

Deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma (dönme) işlemi uygulanır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme-basma kuvvetlerinin uygulandığı tüm helisel yaylarda bu tür burulma gerilmeleri oluşur.

2.6.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi

Yukarıda sayılan farklı gerilme türünde ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda bileşik gerilmeler söz konusu olur. Uygulamada en çok rastlanan bileşik gerilme durumu “eğme ve burulma gerilmelerinin” bir arada bulunduğu durum ile “eksenel ve burulma gerilmelerinin” bir arada bulunduğu durumdur. Motorların krank mili başlıklarındaki gerilme, eğme ve burulma gerilmelerinin bir arada bulunduğu gerilme türüne ait en güzel örnektir.

2.7. YORULMA DENEYİ İLE İLGİLİ TERİMLER

2.7.1. Çevrim

Gerilme–zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denir.

2.7.2. Gerilme

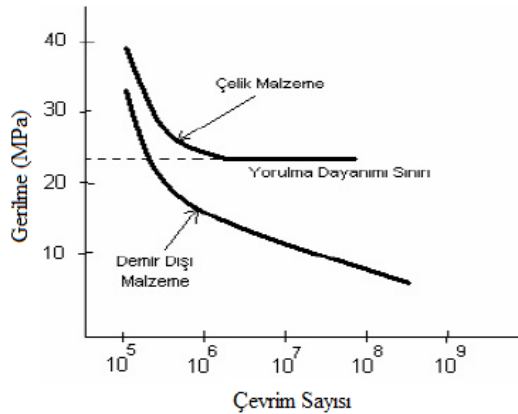
En büyük gerilme uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir. Diğerlerinde olduğu gibi çekme gerilmeleri pozitif (+), basma gerilmeleri negatif (-) işaretlerle gösterilir. En küçük gerilme uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir. Ortalama gerilme ise en büyük ve en küçük gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır.

2.7.3. Gerilme Aralığı, Genliği ve Oranı

Gerilme aralığı en büyük gerilme ile en küçük gerilme arasındaki cebirsel farktır. Gerilme genliği gerilme aralığının yarısına eşittir. Başka bir deyişle maksimum ve minimum gerilme ile ortalama gerilme arasındaki farktır. Yorulma deneyinde, değişen basma ve çekme gerilmeleri halinde gerilmeler simetrik olabileceği gibi asimetrik de olabilir [59]. Gerilme oranı ise en küçük gerilmenin en büyük gerilmeye oranıdır. Diğer bir ifadeyle gerilme genliğinin ortalama gerilmeye bölünmesi ile elde edilir [51].

2.7.4. S–N Diyagramı (Wöhler Diyagramı)

Daha öncede ifade edildiği gibi bu diyagram, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. S–N eğrisinin çizilmesi için genellikle 8 ile 12 benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına) kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Deneylerin tümünde gerilme genliği deney süresince sabit tutulur. S–N eğrileri 10^6 çevrimden sonra genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler (Şekil 2.8).



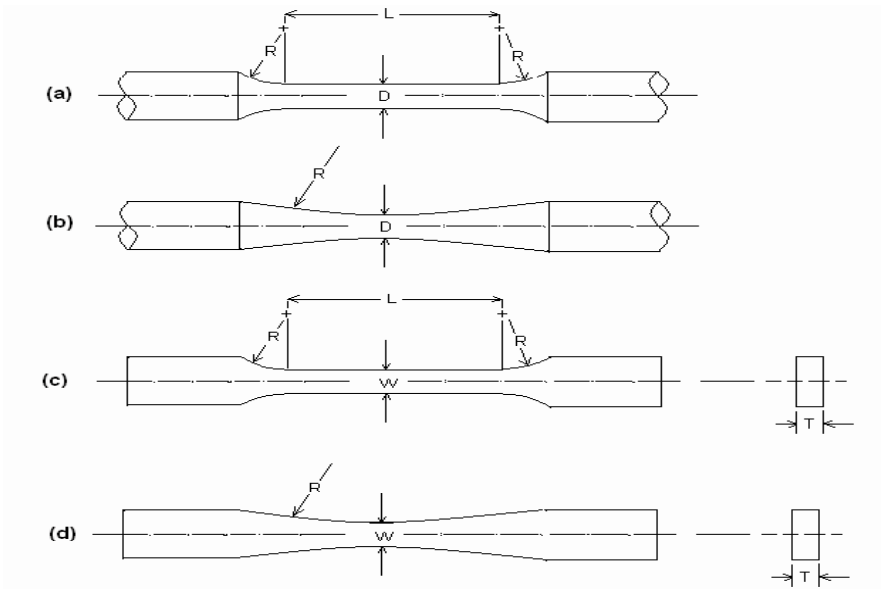
Şekil 2.8. Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik S–N eğrileri [60].

2.7.5. Yorulma Dayanımı, Yorulma Sınırı ve Yorulma Ömrü

Yorulma dayanımı, malzemenin tam N çevrim sonunda çatlama (veya kopma) gösterdiği gerilme olarak tanımlanır. Yorulma sınırı; S-N diyagramında, eğrinin asimptotik durum aldığı gerilmeye “yorulma sınırı” veya “yorulma dayanımı sınırı” denir (Şekil 2.8). Bu gerilmenin altındaki periyodik gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir. Yorulma ömrü ise benzer numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme altında çatlama (veya kopma) gösterdikleri (N) çevrim sayılarının medyan ortalaması şeklinde tanımlanır.

2.8. YORULMA DENEY NUMUNELERİ

Kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Son yıllarda hazırlanan standartlarla numune tipleri için bazı genel kurallar geliştirilmiştir. ASTM E-466’da aksel gerilmeli yorulma deneyi için Şekil.2.9’da gösterilen numune şekilleri tavsiye edilmektedir.



Şekil 2.9. ASTM E-466’ye göre aksel gerilmeli yorulma deneyi için önerilen numune şekilleri [59].

Numune boyutları için aşağıdaki genel kurallar ön koşuldür [59].

- Çatlama numunenin daraltılmış kesitinde meydana gelmesi için uygun tasarlanmalıdır.
- Numunenin daraltılmış kesiti öylesine seçilmelidir ki en büyük gerilmenin mutlak değeri deney cihazının çalışma kapasitesinin en az % 25'inde, minimum gerilmenin mutlak değeri ise cihazın çalışma kapasitesinin en az % 2,5'inde oluşmalıdır.
- Numune boyutları öylesine seçilmelidir ki; numunenin doğal frekansı cihazın frekansının en az iki misli olmalıdır.

2.8.1. Dairesel Kesitli Numuneler

Şekil 2.9'da (a) ve (b) şekilleri ile gösterilen numuneler için daraltılmış kısmının çapı için 5 ile 25 mm arasında bir değer seçilir. Numunenin cihaz çeneleri arasına giren kesitinin, daraltılmış kesitine oranı en az 1,5 olmalıdır. Çentik etkisini minimuma indirmek için için daraltılmış kesitin her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı daraltılmış kısmın (D) çapının en az 8 katı olmalıdır.

(b) numunesinde (D) çapına sürekli bir radyus ile geçilmektedir. (a) numunesinde ise belirli bir daraltılmış uzunluk söz konusudur. Daraltılmış kısmın (L) uzunluğu (D) çapının en az 3 katı olmalıdır. Ancak basma gerilmelerinin uygulanacağı durumlarda burkulmaları önlemek amacıyla (L) uzunluğu, (D) çapının 4 katından fazla olmamalıdır.

2.8.2. Dikdörtgen Kesitli Numuneler

Bu numunelerde kesitin daraltılması tek boyutta ve genellikle genişlikte yapılır. Dairesel kesitli numunelerde olduğu gibi cihazın çeneleri arasında kalan kesitin daraltılmış kesite oranı en az 1,5 olmalıdır. Daraltılmış uzunluğun her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı, daraltılmış kısmın (W) genişliğinin en az 8 katı olmalıdır. Daraltılmış kısımda (W) genişliğinin (T) kalınlığına oranı 2 ile 6 arasında olmalı ve daraltılmış kısmın kesiti tercihen 20 ile 650 mm² arasında seçilmelidir. Daraltılmış kısmın (L) uzunluğundaki daraltılmış kısımdaki (W) genişliğinin en az 3 katı olmalı, basma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda ise 4 katını geçmemelidir.

Diğer özellikler dairesel kesitli numunelerle benzer durumdadır. Yorulma deneyi numunelerinin hazırlanmasında büyük özen gerekir. Talaş kaldırma işlemi keskin bir kalem ucu ile yapılmalıdır. İç gerilmelerin oluşmasını engellemek için aşırı deformasyonlardan ve aşırı ısınmalardan kaçınılmalıdır. Talaş kaldırma esnasında özellikle enlemesine çizik ve çentiklerin oluşmamasına dikkat edilmelidir. Talaş kaldırma işleminden sonra numuneye hassas bir taşlama işlemi ve daha sonra numune boyunca ince zımpara uygulanmalıdır. Ancak bu işlemler sayesinde temiz ve parlak yüzeyler elde edilir. Numune uzun zaman saklanacak ise parlatılmış yüzey korozif olmayan bir yağla kaplanarak korunmalıdır. Numune hazırlama işleminden sonra yüzey kalitesinin 20X büyütme bir mercekle kontrolü tavsiye edilir.

2.9. YORULMA DENEYİNİN UYGULANIŞI

Yorulma deneyinde izlenecek en klasik yol malzemenin belirli koşullar altında S–N diyagramının elde edilmesidir. Bu amaç için benzer şekillerde hazırlanmış en az 8 ile 12 numune alınır. Numunelere farklı gerilmeler uygulanarak çatlamanın (veya kırılmanın) görüldüğü (N) çevrim sayısı tespit edilir. Burada numunenin tamamen kopması veya önceden belirtilen belirli boyuttaki çatlak kriter alınır.

S–N eğrisini elde etmek için önce bir veya iki numuneye küçük çevrim sayısında çatlama (veya kopma) gösterecek şekilde nispeten yüksek gerilmeler uygulanır. Daha sonra bir numuneye çok büyük çevrim sayısında çatlacak (veya kopacak), bir diğerine “yorulma dayanımı sınırı” içine girecek şekilde gerilme uygulanır. Sonunda ise arada kalan gerilmeler için deney yapılır.

Bir malzemenin yorulma dayanımı sınırı için çekme dayanımı veya Brinell sertlik değerlerinden faydalanılarak yaklaşık değerler seçilir [51,59].

- Demir-çelik grubu malzemelerde:
Yorulma Dayanımı Sınırı $\sim \pm 0,5$ Çekme dayanımı
 $\sim \pm 0,18$ Brinell sertlik değeri
- Demir dışı metal ve alaşımlarda:
Yorulma Dayanımı Sınırı $\sim \pm 1/3$ Çekme dayanımı

Nispeten yüksek gerilmelerin uygulandığı ilk deneylerde çekme dayanımının yaklaşık 2/3'ü değerinde bir gerilme seçilir.

Deney öncesi, numunede gerekli ölçmeler yapılır. Kesit hesaplamalarında 5 mm'ye kadar boyutlar $\pm 0,001$ mm duyarlılıkta, 5 mm'den büyük boyutlar $\pm 0,03$ mm duyarlılıkla ölçülmelidir. Numune cihaza yerleştirilirken büyük özen gösterilerek aksenal konum sağlanmalı, çalışma esnasında simetri ekseninin sapma yapmamasına dikkat edilmelidir. Gerilme, deneyde öngörülen değerde hassas olarak uygulanmalı, ancak darbe ve başka türde gerilmelerin oluşması önlenmelidir. Gerilme deney süresince sabit tutulmalıdır.

2.10. MALZEMEDE YORULMA OLAYINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Yorulma olayına etki eden birçok faktör vardır. Bu faktörleri aşağıdaki gruplar altında incelemek mümkündür [59].

2.10.1. Malzeme Cinsinin, Bileşiminin ve Yapısının Etkisi

Genellikle malzemenin statik çekme dayanımı arttıkça, malzemenin yorulma dayanımı sınırı da yükselir. Çapın artması numunenin yüzey alanı ve hacmini artırır. Yüzeyin artması yorulmanın genellikle yüzeyden başlaması ve yüzey kusurlarının bulunma olasılığının artması nedeniyle yorulmayı etkiler [69-77].

2.10.2. Yüzey Özelliklerinin Etkisi

Yorulma olaylarında çatlak oluşumu genellikle yüzeyde başlar. Çünkü eğme ve burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda en yüksek gerilme yüzeylerde oluşur. Yüzeyde başlayan yorulma çatlağının kendisi daha sonra çentik etkisi göstereceğinden gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlağın hızla ilerlemesine yol açacaktır. Bu nedenle malzemenin yorulma dayanımını arttırmak büyük ölçüde yüzey çatlaklarının oluşumunu engellemekle olur. Çatlağa engel olma yüzey özelliklerinin arttırılması ile mümkündür. Bu nedenle, yorulma özelliği yüzeydeki

çentik, girinti, çıkıntı, keskin köşe vb gibi tasarımdan kaynaklanan kusurlara karşı çok duyarlıdır [74,75].

Özellikle sert malzemelerde yüzeyin düzgünlüğü yorulma dayanımını büyük ölçüde arttırmaktadır. Örneğin yüzeyi parlatılmış bir numunenin yorulma dayanım sınırı, tornado kabaca işlenmiş bir numuneye oranla % 15 – 40 daha yüksektir. Çünkü yüzeydeki pürüzlülükler çentik etkisi yaratır [79].

Yüzey düzgünlüğü yanında, yüzey sertliğinin artırılması da çatlama karşı direnci arttıracığından, yorulma dayanımının artmasını sağlar. Çeliklerde sementasyon, nitrürasyon ve benzeri yüzey sertleştirme işlemleri yorulma dayanımı açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Öte yandan karbon çeliklerinin tavlanması ve sıcak işlenmesi esnasında yüzeyde karbon azalması oluşur. Yüzeydeki 1mm'lik bir tabakada böyle bir olayın görülmesi yorulma dayanımını düşürür. Karbon azalması ile yüzeyde yumuşak tabaka elde edileceğinden çatlak, küçük gerilmelerde dahi oluşacaktır.

2.10.3. Çentik Etkisi

Parça kesitinde çentik, delik ve ani değişimlerin bulunması yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltır. Parça kesitinde görülen bu tür süreksizlikler gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlak başlangıcına neden olur. Çentik etkisi çentiğin şekil ve boyutlarına bağlıdır.

2.10.4. Gerilmelerin Etkisi

Yorulma deneyinde gerilme türünün etkisi önemlidir. Genellikle aksel gerilme ile düzlemsel eğme gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar birbirine çok yakındır. Burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar çok farklıdır.

Uygulamada parçaya gelen gerilmeler deneydeki gibi sabit genlikli ve sabit periyotlu değildir. Böyle bir durum göz önünde bulundurulursa, zaman zaman aşırı gerilmelerin uygulandığı görülür. Aşırı gerilmeler yorulma ömrünü kısaltır. Ancak

bu konuda karar verebilmek için istatistiksel hesaplardan faydalanılır. Deney öncesinde numunede oluşan kalıcı iç gerilmelerde yorulmayı etkilerler. Genellikle numune yüzeyinde oluşturulan basma yönünde kalıcı iç gerilmeler yorulma dayanımı sınırı ve yorulma ömrünü artırır. Yüzeyde kalıcı basma gerilmelerini oluşturmada kullanılan ticari yöntemlerden biri yüzeylerin küçük pasolarla haddelenmesidir. Diğer bir yöntem ise yüzeyin aşırı hıza sahip çok küçük çelik bilyelerle dövülmesidir.

2.10.5. Korozyonun Etkisi

Korozyonun kimyasal etkisi ile yorulmanın mekanik etkisinin aynı anda oluşmasına “Korozyonlu Yorulma” olayı denir. Yorulma olayından önce malzemenin korozyona uğraması, yorulma dayanımını azaltır. Burada, korozyonun neden olduğu yüzeydeki çok küçük oyuklar çentik etkisi yaparak malzemenin yorulma dayanımının düşmesine neden olur. Korozyon ve yorulma olayının beraber olduğu durumda, yorulma dayanımında çok büyük düşüşler görülür. Korozyonun buradaki etkili rolü çatlak teşekkülü ve çatlağın ilerlemesini hızlandırmasıdır.

2.10.6. Sıcaklığın Etkisi

Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artar. Ancak sıcaklığın oda sıcaklığının altına inmesi malzemenin çentik hassasiyetini artırır. Oda sıcaklığının üzerine yapılan deneylerde genellikle sıcaklık yükseldikçe yorulma dayanımı düşer. Sadece düşük karbonlu çeliklerde 200 –300 °C sıcaklık arasında yorulma dayanımında artış görülür. Bu olay 200 – 300 °C sıcaklık arasında düşük karbonlu çeliklerin deformasyon yaşlanmasına uğrayarak çekme dayanımlarının artmasına bağlıdır.

2.10.7. Deney Hızının Etkisi

Deney hızının (frekansın) yorulma deney sonucuna etkisi saptanamamıştır. Deney cihazlarının çoğunda uygulanan 200 ile 10.000 çevrim/dakika’lık frekansın deney sonuçlarını pek etkilemediği kabul edilir. Düşük karbonlu çeliklerde, alüminyum

alaşımlarında ve bakırda çok yüksek deney hızlarında yorulma dayanımı sınırının yükseldiği görülmüştür. Çok düşük deney hızlarında yorulma dayanımı sınırının azaldığı kabul edilir. Öte yandan çok yüksek frekanslarda, malzemede oluşan ısının kısa zamanda yayınamaması yorulma dayanımı sonuçlarını olumsuz etkiler [60].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde iş makinelerinin jant üretiminde kullanılan EN 10025-2'ye göre kısa gösterimi yapılan S275JRC genel yapı çeliğinin temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra yaşlanma davranışlarının araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla; temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+ normalizasyon ısıl işlemi uygulanan deney numuneleri, % 5 öndeformasyon işleminden sonra, 50 ve 160 °C sıcaklıkta, farklı yaşlandırma zamanlarında statik gerinim yaşlanmasına tabii tutulmuştur. Yaşlandırılan numunelerin mekanik özellikleri ve mikroyapı değişimlerinin belirlenmesinde yararlanılan test yöntemleri ve mikroyapı irdelemeleri sırasıyla bu bölümde açıklanmış ve tanıtılmıştır.

3.2. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEME

Çalışmada Çizelge 3.1'de kimyasal içeriği belirtilen (% ağırlık), 600x100x6 mm ebatlarında OYAK Ereğli demir ve çelik fabrikalarından temin edilen S275JRC kalite soğuk şekillendirmeye ve kaynak edilmeye müsait jant üretiminde yararlanılan çelik kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi(% ağırlık).

Standart		Elementler (% Ağırlık)								
DIN EN 10025-2:2004	Erdemir Kalite No	C	Mn	P	S	Cu	Si	Ni	V	Cr
S275JRC	3944	0.182	0.949	0.012	0.0002	0.052	0.069	0.025	0.003	0.017

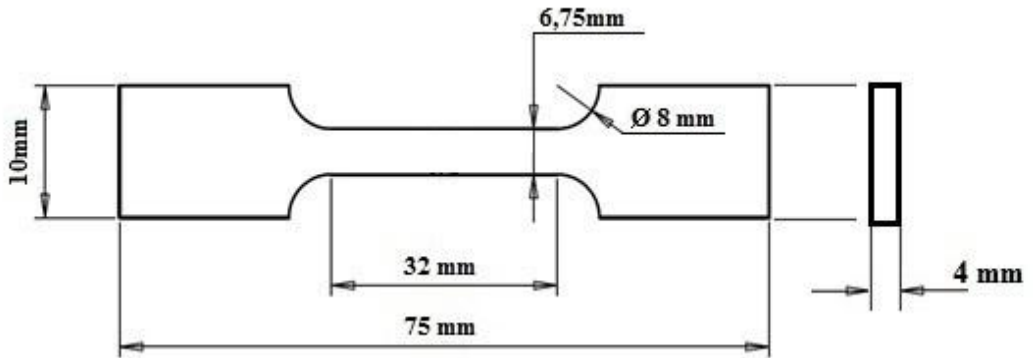
3.3. ÇEKME DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Çalışmada kullanılan jant çeliğinin statik gerinim yaşlanma davranışı çekme deney numunesi üzerinden belirlenmiştir. Bu amaçla çekme deney numuneleri TS EN ISO 6892-1 standardında gösterilen boyutlarda tel erozyon yöntemiyle kesilerek hazırlanmıştır [66]. Hazırlanan çekme test numuneleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere; temin edildiği şekliyle yaşlandırmak üzere 27 adet, homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi sonrasında yaşlandırma uygulanmak üzere 60 adet çekme numunesi hazırlanmıştır.



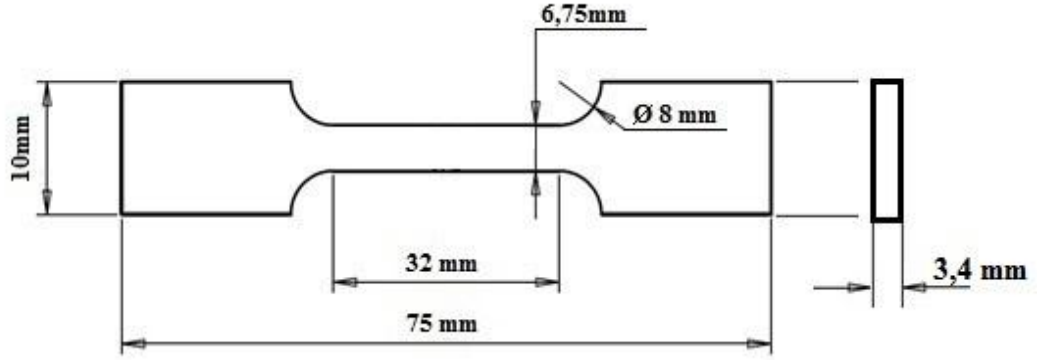
Şekil 3.1.Çekme deneyi numuneleri.

Temin edildiği şekliyle yaşlandırılacak numuneler Şekil 3.2’de gösterilen boyutlarda hazırlanmıştır.



Şekil 3.2. Çekme deney numunelerinin hazırlanma ölçüleri.

Ancak homojenleştirme +normalizasyon ısı işleminden sonra yaşlandırılacak çekme deney numuneleri, yüzeylerinde meydana gelen oksitleri ve tufalları gidermek amacıyla, düzlem taşlamada her iki yüzeyinden 0,3 mm olmak üzere taşlanmıştır. Taşlama ile ısı işlem sırasında oluşabilecek de-karbürize bölge numune yüzeyinden kaldırılmış olup düzgün yüzey elde edilmiştir. Taşlama işlemine tabi tutulan numunelerin ölçüleri Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çekme deney numune boyutları.

3.4. HOMOJENLEŞTİRME+NORMALİZASYON ISIL İŞLEMLERİNİN UYGULANMASI

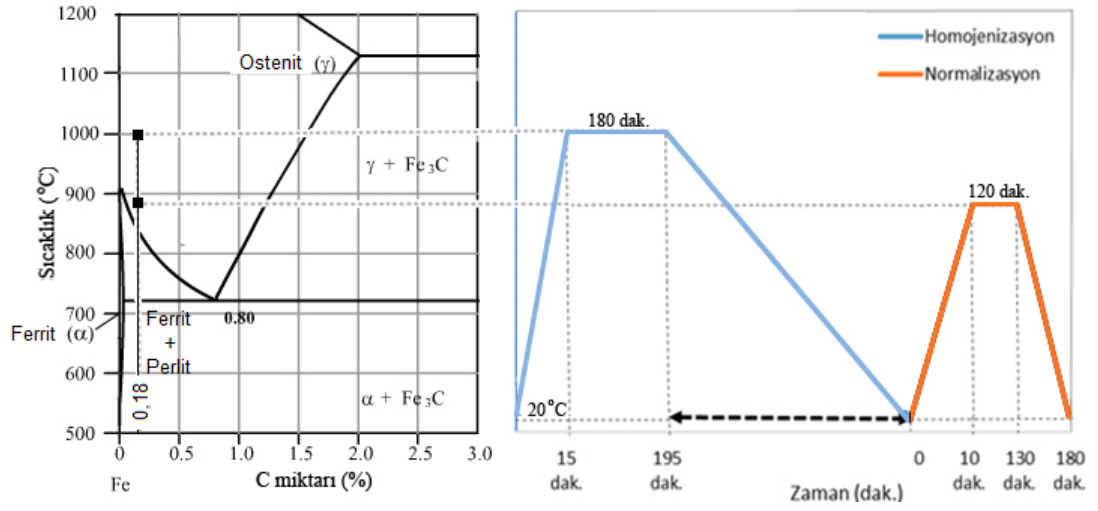
Deneyisel çalışmada homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemlerinin yanı sıra yaşlandırma işleminde 1200 °C kapasiteli Protherm marka ısı işlem fırını kullanılmıştır (Şekil 3.4).

Ödeneysel incelemeler, çalışmada kullanılacak çeliğin mikroyapısının homojen olmadığını gösterdiği için, homojen bir yapı elde edebilmek amacıyla çekme deney numunelerine 1000 °C sıcaklıkta 180 dakika homojenleştirme tavlama yapıldıktan sonra fırında soğutma işlemi uygulanmıştır. Homojenleştirme ısı işlem sıcaklığı ve zamanı ödeneyler sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 3.4.Protherm marka ısıtım fırını.

Yaşlandırma işlemi için arayer atomlarınca zengin katı ergiyik elde edebilmek amacıyla deney numunelerine solüsyona alma ısıtım işlemi müteakiben hızlı soğutma işlemi uygulanır. Ancak yapılan ödeneyler S275JRC çelik malzemenin solüsyona alma ısıtım işlemi sonunda su ve yağ gibi soğutma ortamlarında hızlı soğutulduklarında yapılarının değişmesine yol açtığını göstermiştir. Bu sebeple çalışmada homojenleştirme uygulanan numunelerin yapısının değişmemesi, tane boyutunun iyileştirilmesi ve arayer atomlarınca zengin katı ergiyik oluşturmak amacıyla 890 °C sıcaklıkta 120dakika tavlandıktan sonra havada soğutma (normalizasyon) ısıtım işlemi uygulamanın daha doğru olacağına işaret etmiştir. Normalizasyon ısıtım işlem sıcaklığı Andrew formülü yardımıyla belirlenen üst kritik sıcaklık değerinin 50 °C üstünde 890 °C normalizasyon sıcaklığı olarak ödeneyler sonucunda belirlenmiştir. Deney numunelerine uygulanan ısıtım işlemler Fe-Fe₃C denge diyagramı ile ilişkilendirilerek şematik olarak Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Deney numunelerine uygulanan ısı işlemlerin Fe-Fe₃C denge diyagramı ile ilişkili şematik gösterimi.

3.5. TEST NUMUNELERİNE ÖNDEFORMASYON İŞLEMİNİN UYGULANMASI

Statik gerinim yaşlanmasını uygulayabilmek amacıyla deney numunelerinin öndeformasyonu, Şekil 3.6'da gösterilen SHIMADZU AG-IS 50kN kapasiteli test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Shimadzu marka çekme deney cihazı.

Bütün numunelere % 5 öndeformasyon işlemi uygulanmıştır. Öndeformasyon öncesi 32 mm boyun uzunluğuna sahip numunelerin boyun uzunluğu, deformasyondan sonra 33,6 mm ölçülmüştür. Öndeformasyon işlemi çekme test numunelerinin boyuna doğrultusunda 2 mm/dakika çekme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.6. STATİK GERİNİM YAŞLANDIRMA İŞLEMİ

Çalışmada kullanılan jant çeliğinin servis şartlarındaki karşı karşıya kalacağı durumlar göz önünde bulundurularak yaşlandırma sıcaklığı olarak balatalardaki sürtünmeye bağlı oluşan ısı ile ulaşılabilecek sıcaklık olan 50 °C belirlenmiştir. İlaveten imalat süreci göz önünde bulundurularak soğuk deformasyon sonrasında kaynak termal çevriminin yanı sıra boyama işleminden sonra uygulanabilecek bir fırında kurutma ısı işlemi için uygulanabilecek sıcaklık olan 160 °C diğer bir yaşlandırma sıcaklığı olarak belirlenmiştir.

Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış % 5 öndeforme edilmiş deney numunelerinin 36 adeti, 50 °C sıcaklıkta ısı işlem fırınında 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 ve 360 dakika yaşlandırma sürelerinde yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Düşük sıcaklıklarda yaşlandırma işleminin daha uzun zaman dilimlerinde gerçekleşeceğinden hareketle daha uzun yaşlandırma zamanı seçilmiştir.

Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış % 5 öndeforme edilmiş geriye kalan 24 adet deney numunesi ise 160 °C sıcaklıkta ısı işlem fırınında 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 ve 180 dakika yaşlandırma zamanlarında yaşlandırılmıştır. Artan yaşlandırma sıcaklığıyla yaşlandırma zamanı azalacağından yaşlandırma zamanı 180 dakikada sonlandırılmıştır.

Temin edildiği şekliyle yaşlandırılacak 27 adet çekme test numunesi 160 °C sıcaklıkta ısı işlem fırınında 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 ve 180 dakika bekletilerek yaşlandırılmıştır. Deneysel hataları minimize edebilmek amacıyla her bir yaşlandırma zamanı için 3 adet deney numunesi kullanılmıştır.

3.7. YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Statik gerinim yaşlanmasına bağlı olarak jant çeliklerinin mekanik özelliklerindeki değişim çekme deneyi, sertlik ölçümü ve yorulma deneyi ile belirlenmeye çalışılmıştır.

3.7.1. Çekme Deneyi

Yaşlandırılan deney numuneleri Şekil 3.6'da gösterilen SHIMADZU AG-IS 50kN kapasiteli test cihazı yardımıyla 2 mm/dakika çekme hızında çekme deneyi uygulanarak koparılmıştır. Koparılan çekme test numunelerinin görünümü Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Çekme testi sonrası deney numuneleri.

Çekme testi sonrası farklı sıcaklıklarda ve farklı zaman dilimlerinde statik yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş deney numunelerinin “Gerilme-%uzama” eğrileri elde edilmiştir. Bu eğri verilerinden yararlanılarak malzemelerin statik gerinim yaşlanmasının en belirgin işareti olan akma dayanımdaki artış, çekme dayanımı, % uzama değerindeki değişimler incelenmiş ve sonuç bölümünde grafiksel olarak sunulmuştur.

3.7.2. Döner Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

Çalışmada temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işleminden sonra 50°C ve 160°C sıcaklıklarda farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan deney numunelerinin servis şartlarında maruz kalacağı dinamik yükler göz önünde bulundurularak jant çeliklerinin yorulma davranışları da incelenmiştir. Deneylerde

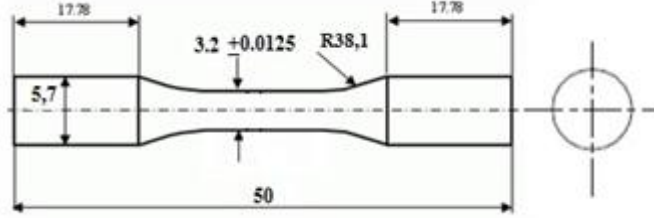
kullanılan tüm numunelere yorulma deneyi uygulamak yerine sadece yaşlanmaya bağlı optimum dayanım artışının sağlandığı, aşırı yaşlanmaya bağlı en çok dayanım düşüşünün yaşandığı ve ikinci defa dayanım artışının yaşandığı numunelere yorulma deneyinin uygulanmasının yeterli olacağına karar verilmiştir. Bu amaçla temin edildiği şekliyle; 160°C sıcaklıkta 20, 45 ve 120 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunelere, homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra 160°C sıcaklıkta 30, 60 ve 90 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunelere yorulma deneyi uygulanması amaçlanmıştır. Ayrıca homjenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra optimum yaşlanmanın elde edildiği 50°C sıcaklıkta 300 dakika yaşlandırma zamanına sahip numunelere yorulma deneyi uygulanmasına karar verilmiştir.

Bu amaçla yorulma deneyleri Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan döner eğmeli yorulma deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Yorulma testlerinde numunelerin akma dayanım değerleri hesaplanarak elde edilen değerler başta olmak üzere yorulma numunelerine uygulanan yük gittikçe azaltılarak, toplamda dört farklı yük uygulanmış ve sonuç olarak çevrim sayıları belirlenip S–N diyagramı elde edilmiştir. Şekil 3.8’de gösterilen yorulma test cihazı yardımıyla 3000/dakika çevrim çalışma hızında yorulma deneyi uygulanarak numuneler kırılmıştır.

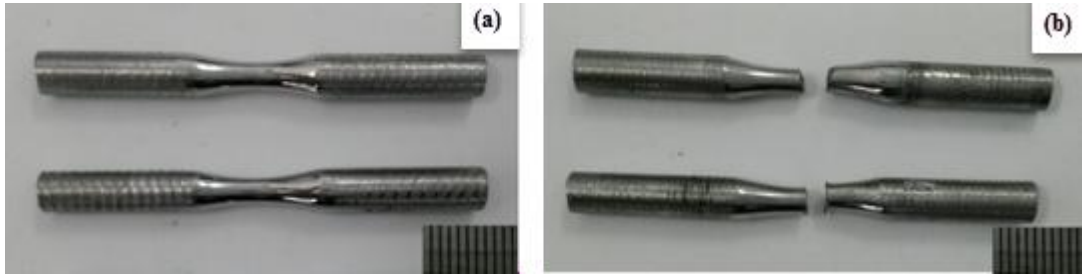


Şekil 3.8. Döner eğme gerilmeli yorulma test cihazı.

Yorulma deneyleri sırasında her parametre için 3 adet deneysel numune kullanılmış ve sonuçlar üç numunenin ortalaması olarak grafikte gösterilmiştir. Deney numunesinin boyutları Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Şekil 3.10 a-b’de yorulma deney numuneleri ve koparılan deney numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Dairesel kesitli döner eğme gerilmeli yorulma deney numunesi boyutu.



Şekil 3.10. Deneyde kullanılan a) test numuneleri b) kırılan test numuneleri.

3.7.3. Sertlik Ölçümü

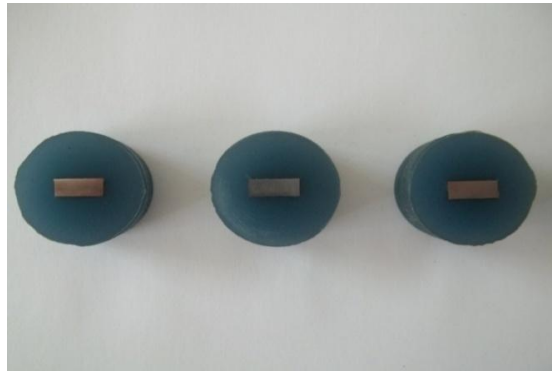
Sertlik ölçümü mekanik test laboratuvarlarında bulunan HMV MICRO HARDNESS TESTER SHIMADZU marka sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Deney cihazı şekil 3.11’de gösterilmiştir. Sertlik ölçümleri batıcı uca HV₁ (1000 g) yük uygulanarak gerçekleştirilmiş ve numunelerden 5’er adet ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.11. Mikrosertlik test cihazı.

3.8. METALOGRAFİ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada kullanılan çeliğin mikroyapısını incelemek amacıyla optik mikroskoptan yararlanılmıştır. İnceleme yapabilmek amacıyla 10x10x4 mm ölçülerinde numuneler kesilmiştir. Numunelerin deformasyona uğrayan tabakalarının ortadan kaldırılması amacıyla zımparalama ve parlatma işlemi yapılır. Şekil 3.12’de gösterilen soğuk kalıba alınan numuneler yüzeylerinin çizilmemesi için su zımparası ile zımparalanmıştır.



Şekil 3.12. Reçine ile soğuk kalıba alınan metalografi numuneleri.

Zımparalama işlemi sırasıyla olmak üzere 180, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 grid’lik silisyum karbür su zımparası ile ve her zımparalama arasında 90° çevrilerek

tamamlanmıştır. Zımpara işleminden sonra bu yüzeyler sırayla 6 µm, 3 µm ve 1 µm elmas pastalar ile parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Parlatma işlemi Şekil 3.13’de gösterilen Mecapol P262 marka parlatma cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.13. Parlatma cihazı.

Metalografik incelemeler için parlatılan ve dağlamaya hazır hale getirilen numuneler için etanol içerisine % 2 nitrik asit karıştırılarak elde edilen Nital çözeltisi hazırlanmıştır. Dağlama işlemi numunelerin Nital çözeltisi içerisine daldırılarak 8-10 saniye bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra dağlanan yüzeyler alkol ile temizlenip kurutulduktan sonra optik mikroskopta incelemeye hazır hale getirilmiştir.

3.9. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Farklı sıcaklıklarda ve farklı yaşlandırma zamanlarında temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işleminden sonra statik gerinim yaşlandırma işlemine tabi tutulan jant çeliğinin mikroyapı incelemesi optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir.

3.9.1. Optik Mikroskop İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri, X50-X1000 büyütme kapasiteli Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Her numunenin değişik bölgelerinden farklı büyüklüklerde görüntüler alınarak bu görüntülerin bütün mikroyapıyı temsil edebilir

nitelikte olmasına dikkat edilmiştir. Çalışmada kullanılan çeliğin faz oranları ve tane boyutları ölçümü için Clemex Vision Lite görüntü analiz sisteminden yararlanılmıştır.

3.9.1.1. Tane Boyutu Ölçümü ve Faz Oranlarının Belirlenmesi

Tane boyutu, ölçüm çizgisinin haddeleme yönüne 45° açı oluşturacak şekilde belirlenmesini içeren ortalama doğrusal kesme metodu kullanılarak ölçülebilir. Ölçüm çizgisinin kesmiş olduğu tane veya tane sınırı adeti sayılır. Tek fazlı yapılarda ölçüm çizgisinin toplam uzunluğu, bulunan tane sınırı sayısına bölünerek ortalama tane boyutu bulunur. Çift fazlı yapılarda ise ortalama tane boyutu, ölçüm çizgisinin toplam uzunluğunun ilgili fazın hacimsel oranıyla çarpılması ve bulunan sonucun tane sayısına bölünmesiyle elde edilir. Ölçüm işlemi için en az 500 tane veya tane sınırı sayılmalıdır. Çalışmada tane boyutu ortalama kesme metodu kullanılarak belirlenmiştir. Ferrit ve Perlit faz hacim oranları ise nokta sayım metodu kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemde, sayılan ferrit fazına karşılık gelen nokta sayısının, sayılan toplam nokta sayısına oranlanması ile ferrit hacim oranı, sayılan perlit fazına karşılık gelen nokta sayısının, sayılan toplam nokta sayısına oranlanması ile perlit hacim oranı belirlenmiştir.

3.9.2. Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemesi

Çekme numunelerin kırık yüzeylerinin incelenmesi Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsüne ait laboratuarda bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Fesemmarka tarama elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Temin edildiği şekliyle ve ısıtma işlemi (homojenleştirme+normalizasyon) uygulanmış şekliyle % 5 öndeforme edildikten sonra 160 °C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin çekme deneyi sonucunda kopan numunelerin kırık yüzey görüntüleri alınarak yaşlanma süresinin çeliklerin kırılma davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır.

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

4.1. SONUÇLAR VE İRDELEMESİ

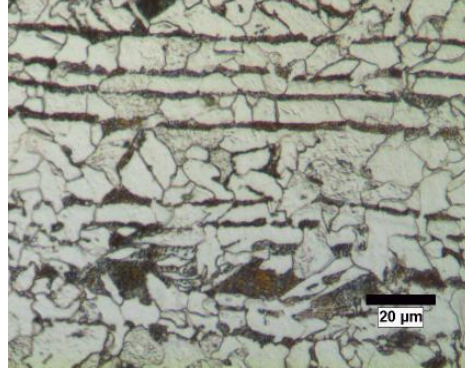
Çalışmanın bu bölümünde; iş makinelerinin jant imalatında kullanılan genel yapı çeliğinin ticari olarak temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon uygulandıktan sonra servis ve imalat şartlarını temsil eden 50 °C ve 160 °C sıcaklıklarda, farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılmış numunelerin deneysel sonuçları verilmiştir. Bölüm 4.2’de ticari olarak temin edildiği şekliyle 160 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılmış numunelerin deneysel sonuçları verilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Bölüm 4.3’de ise homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi görmüş, 50 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılmış numunelerin deneysel sonuçları paylaşarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Bölüm 4.4’de homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi sonrası 160 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılmış numunelerin deneysel sonuçları verilmiş ve bulgular irdelenmiştir.

4.2. TEMİN EDİLDİĞİ ŞEKİLİYLE YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN DENEYSEL SONUÇLARI

İş makinelerinin jant imalatında kullanılan, kaynak edilebilen ve soğuk şekillendirmeye uygun S275JRC çeliğinin ticari olarak temin edildiği şekliyle statik gerinim yaşlanması davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla % 5 öndeforme edilen numuneler 160 °C sıcaklıkta sırasıyla 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 ve 180 dakika zaman dilimlerinde yaşlandırılmıştır. Temin edildiği şekliyle farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan numunelerin mikroyapı incelemeleri yapılmış ve aynı zamanda mekanik özellikleri çekme deneyi ile belirlenmiştir. Sonuçlar sırasıyla aşağıdaki bölümlerde paylaşarak etraflıca irdelenmiştir.

4.2.1. Mikroyapı İncelemesi ve Sonuçların İrdelenmesi

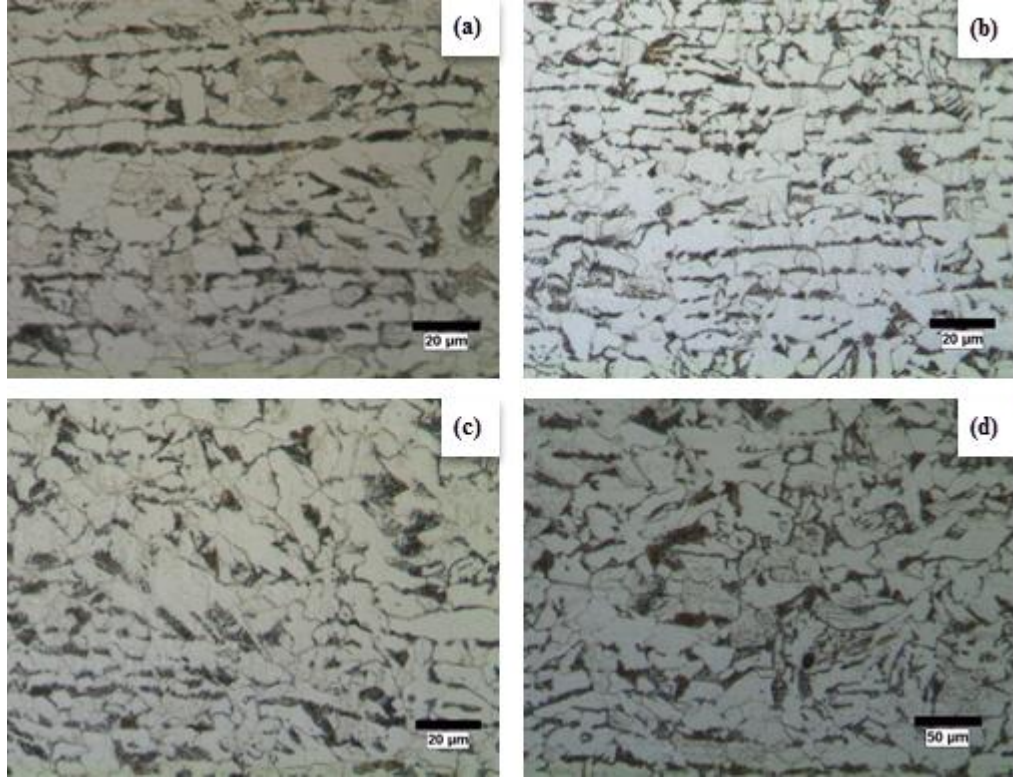
Ağır iş makinelerinin çelik jantlarının imalatında kullanılan S275JRC kalite çelik malzemenin ticari olarak temin edildiği şekliyle mikroyapısı optik mikroskop yardımıyla incelenmiş ve sonuç Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Temin edildiği şekliyle deney numunesi mikroyapı görüntüsü.

Şekil 4.1’den görüldüğü gibi eşksenel ferrit ve perlit tanelerinden oluşan S275JRC çeliğin yapısında aynı zamanda üretim sürecine bağlı olarak oluştuğu düşünülen bantlaşmalar görülmektedir. Çalışmada kullanılan çeliğin faz oranları ve tane boyutları ticari olarak temin edildiği şekliyle ölçülmüştür. Perlit faz oranı % 28,8 ölçülürken, ferrit faz oranı % 71,2 olarak tespit edilmiştir. Perlit ve ferrit fazlarının tane boyutları ise yaklaşık olarak sırasıyla 6,57 μm ve 8,12 μm olarak ölçülmüşlerdir.

Çalışmada kullanılan çeliğin servis şartlarında maruz kalacağı statik yükler etkisiyle oluşabilecek soğuk deformasyon miktarını temsil ettirebilmek amacıyla % 5 oranında öndeformasyona tabi tutulan deney malzemeleri 160 °C sıcaklıkta 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 ve 180 dakika zaman aralıklarında statik gerinim yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan malzemelerin mikroyapı görüntüleri incelenmiş, 10, 20, 45, 120 dakika yaşlandırılan numunelerin mikroyapı sonuçları Şekil 4.2 a-d’ de gösterilmiş, perlit ve ferrit faz oranları ile tane boyutları Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.2. a-d. Deneyde a) temin edildiği şekliyle; 160 °C sıcaklıkta 10 dakika b) 20 dakika c) 45 dakika d) 120 dakika yaşlandırılan numunelerin mikroyapısı.

Şekil 4.2.a-d'den görüldüğü gibi ticari olarak temin edildiği şekliyle üretim sürecine bağlı olarak yapı içerisinde görülen bantlaşmaların 160 °C yaşlandırma sıcaklığında yeterince uzun süre (2 saat) beklenildiğinde yayınarak azaldığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.1. Temin edildiği şekliyle; 160 °C sıcaklıkta 10, 20, 45 ve 120 dakika yaşlandırılan numunelerin perlit ve ferrit faz oranları ile tane boyutları.

Temin edildiği şekliyle	% Perlit Oranı	Perlit tane boyutu (μm)	% Ferrit Oranı	Ferrit tane boyutu (μm)
10 dakika	24,38	5,56	75,62	9,02
20 dakika	32,5	4,49	67,5	7,76
45 dakika	21,5	5,64	78,5	8,58
120 dakika	26,2	5,73	73,8	9,68

Yaşlandırma zamanına bağlı olarak ferrit ve perlit fazı hacimsel oranlarında bir değişim gözlemlenmemiştir. Ayrıca yaşlandırılan numunelerin tane boyutunda

yaşlandırma sıcaklığının yeniden kristalleşme sıcaklığının oldukça altında olması sebebiyle bir değişim tespit edilememiştir.

Bilindiği üzere yaşlanma kinetiklerinin kontrol edilmesindeki statik gerinim yaşlanmasından önceki malzemenin mikroyapısı oldukça önemlidir. Ancak mikroyapı; alaşımın kimyasal kompozisyonu, üretim süreci ve uygulanan ısı işlemler tarafından etkilenir. Örneğin, çeliğin hızlı soğutulması yüksek miktarda arayer atomunun katı ergiyik içerisinde kalmasına sebep olarak, daha çabuk yaşlanma ve çökelti oluşumu sağlar [78]. Bu durum soğuma yaşlanması olarak bilinir. Soğuma yaşlanması ve statik gerinim yaşlanması kombinasyonu yüksek akma gerilmesi elde etmek için termo-mekanik kontrollü işlemlerde birlikte kullanılır. Çeliklerde yüksek dayanım elde etmek için soğutma, soğuk deformasyon ve düşük sıcaklıkta yaşlandırma sıralaması en efektif yoldur. Örneğin, çift fazlı çeliklerin (yani düşük alaşımlı çeliklerin) gerinim yaşlanmasının ilk aşamalarında çözünen atom-dislokasyon etkileşiminin esasını oluşturduğu Cottrellatmosferi modeli gözlemlenirken, uzun yaşlandırma zamanlarında çökelti dislokasyon etkileşiminin yanı sıra üçüncü mekanizma martenzit faz dönüşümünde soğuma yaşlanması sırasında oluşan çökelti, çift fazlı çeliklerin sertleşmesinde sorumlu mekanizmalardır [79].

Daha da ötesi, mikroalaşımlı çift fazlı çeliklerde yaşlanma işlemi çift fazlı karbonlu çeliklere göre daha yavaş gerçekleşir. Bu durum alaşımlı çeliğin karbür oluşturma eğiliminin yüksek olması sebebiyle katı ergiyik içerisinde arayer atomlarında azalma ile açıklanır. Genelde çelik içerisinde kuvvetli karbür ve nitrür oluşturuca alüminyum, krom, vanadyum, titanyum ve niobium miktarı statik gerinim yaşlanma davranışını etkiler. Çünkü; bu karbür ve nitrür oluşturuca, katı ergiyik içerisindeki karbon ve azot gibi arayer atomlarının miktarını düşürür.

Karbür ve nitrür oluşturuca elementlerin yanı sıra statik gerinim yaşlanmasını düşüren katı ergiyik içerisinde mangan ve silisyum gibi yer alan atomlar vardır. Bunlar mikroyapının dönüşümü M-C ve M-N çiftlerinin oluşumuna sebep olur. Bu elementler ferrit fazı içerisinde arayer atomlarıyla reaksiyona girerek onların hareketini engellerler ve böylece statik gerinim yaşlanmasını geciktirirler. Örneğin,

yüksek silisyumlu çeliklerde statik gerinim yaşlanması zayıf etki gösterir. Bu zayıf yaşlanma etkisi, ferritik-perlit mikroyapının yanı sıra, mangan ve silisyum atomlarının arayer atomlarını bağlayarak çözünen atom atmosferi oluşturmasını engellemesine atfedilir. Sonuç olarak statik gerinim yaşlanmasının çeliklerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi arayer atom eliminasyonu veya ilavesi, uygun mikroyapı ve kimyasal kompozisyon ile kontrol edilebilir.

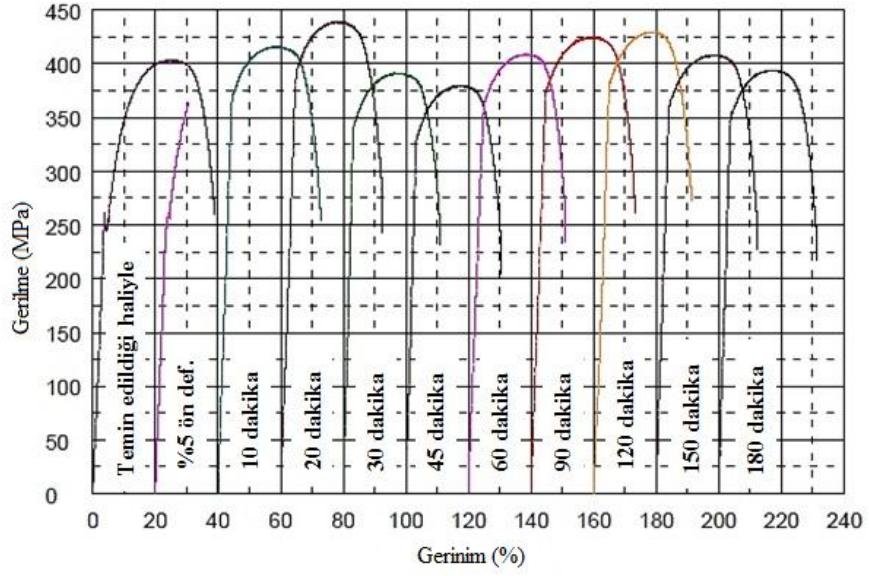
4.2.2. Mekanik Özellik Deneysel Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi

Temin edildiği şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanlarında yaşlandırılan numunelerin mekaniksel özellikleri sırasıyla çekme deneyi, yorulma dayanımı ve sertlik ölçümü ile belirlenmiştir.

4.2.2.1. Çekme Deneysel Sonucu

Ticari olarak temin edildiği şekliyle iş makineleri jant imalatında kullanılan S275JRC çeliği % 5 öndeforme edildikten sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin yaşlanma davranışları çekme testi ile belirlenmiştir. Yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi sonucu ortalama gerilme-% uzama eğrileri elde edilmiş ve grafiksel olarak Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

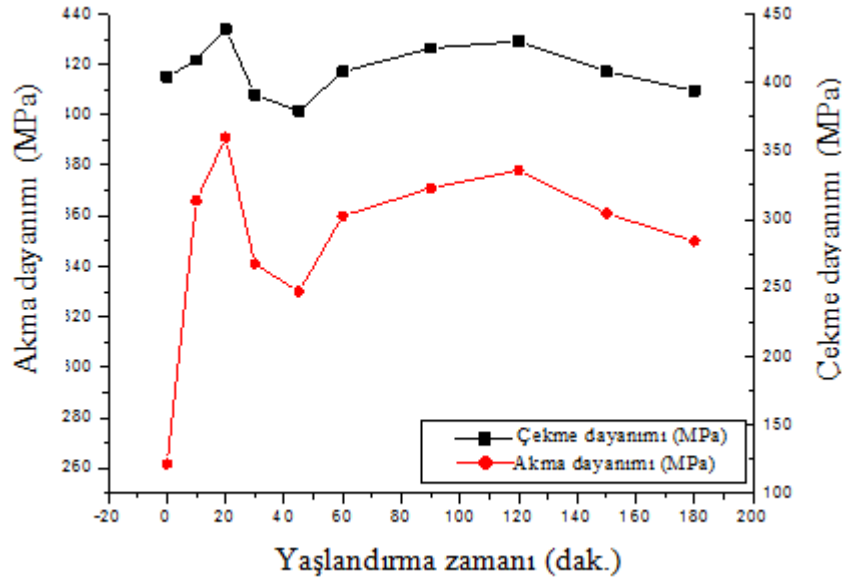
Şekil 4.3'deki verilerden yararlanarak temin edildiği şekliyle, % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta, farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan numunelerin akma, çekme dayanımlarındaki ve % kopma uzama miktarlarındaki değişimin yanı sıra öndeformasyondan kaynaklanan gerilim artışından sonraki, sadece yaşlanmadan kaynaklanan akma dayanımındaki değişim olan (ΔY_2) eğriler üzerinden hesaplanarak Çizelge 4.2'de verilmiştir. Ayrıca yaşlanmaya bağlı olarak akma ve çekme dayanımlarındaki değişim grafiksel olarak Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil.4.3. Temin edildiği şekliyle; 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi gerilme-% uzama eğrileri.

Çizelge 4.2. Temin edildiği şekliyle, % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zamanlarda yaşlandırılan numunelerin ortalama çekme deney verileri.

Yaşlanma zamanı (dakika)	Akma dayanımı (MPa)	ΔY_2 (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Orjinal	262	-	404	24,6
10	366	4	416	19,01
20	391	29	439	17,9
30	341	-21	391	16,25
45	330	-32	379	18,1
60	360	-2	408	18,7
90	371	9	425	19,6
120	378	16	430	18,6
150	361	-1	408	18,3
180	350	-12	394	16,3



Şekil.4.4. Temin edildiği şekliyle, % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin yaşlandırma zamanı ile akma ve çekme dayanımları arasındaki ilişki.

Şekil 4.3 ve 4.4 ve Çizelge 4.2'den görüldüğü gibi, 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırma işlemi uygulanan jant imalatında kullanılan S275JRC çeliğinin gerilme-%uzama grafiğinde, 20 dakika yaşlandırma zamanına kadar numunelerin akma ve çekme dayanımında belirgin bir artışın yaşandığı görülmektedir. Daha sonraki yaşlandırma zamanlarında numunenin akma ve çekme dayanımında azalma tespit edilmiştir. Ancak 45 dakika yaşlandırma zamanından sonraki yaşlandırma zamanlarında numunenin akma ve çekme dayanımında tekrar bir artış bulunmuştur. Fakat 120 dakika yaşlandırma zamanından sonra yaşlandırılan numunenin her iki dayanımında da tekrar bir azalma tespit edilmiştir.

Örneğin; ticari olarak temin edildiği şekliyle ortalama 262 MPa akma dayanımına sahip S275JRC iş makinelerinin jant imalatındada kullanılan çeliğin % 5 öndeformasyon işlemiyle soğuk deformasyona bağlı dayanım artışı olan (ΔY_1) miktarı yaklaşık 100 MPa artış göstermiştir. Yalnızca yaşlanmadan dolayı dayanım artışı olan (ΔY_2) miktarı 10 dakika yaşlanma zamanında 4 MPa artış göstermiştir. Yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki maksimum artış 20 dakika yaşlanma zamanında elde edilmiş ve 29 MPa olarak tespit edilmiştir. 30 dakikalık yaşlanma zamanında (ΔY_2) miktarında 21 MPa ve 45 dakika yaşlanma zamanında ise aşırı

yaşlanmaya bağlı 32 MPa azalma meydana gelmiştir. Yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki değişim olan (ΔY_2) miktarı sırasıyla 60 dakika yaşlanma zamanında 2 MPa azalma, 90 dakika yaşlanma zamanında ise 9 MPa tekrar artış göstererek 120 dakika yaşlanma zamanında ise akma dayanımındaki değişim ikinci defa maksimum değerine ulaşmış ve 16 MPa bir artış göstermiştir. Daha sonra deney numunelerinin yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki değişim miktarı olan (ΔY_2) azalma eğilimine girmiş sırasıyla 150 ve 180 dakikalık yaşlanma zamanlarında aşırı yaşlanmayla birlikte 1 ve 12 MPa bir azalma göstermiştir.

Numunenin bilhassa yaşlanmadan dolayı akma dayanımında meydana gelen belirgin artış ve azalmalar numunenin statik gerinim yaşlanmasıyla yaşlandığına ve hatta tekrarlı yaşlanmaya maruz kaldığına işaret etmektedir. Diğer bir ifadeyle çalışmada kullanılan çeliğin belirtilen sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde yaşlandırma sürecinde tekrarlı yaşlanma oluştuğuna işaret etmektedir.

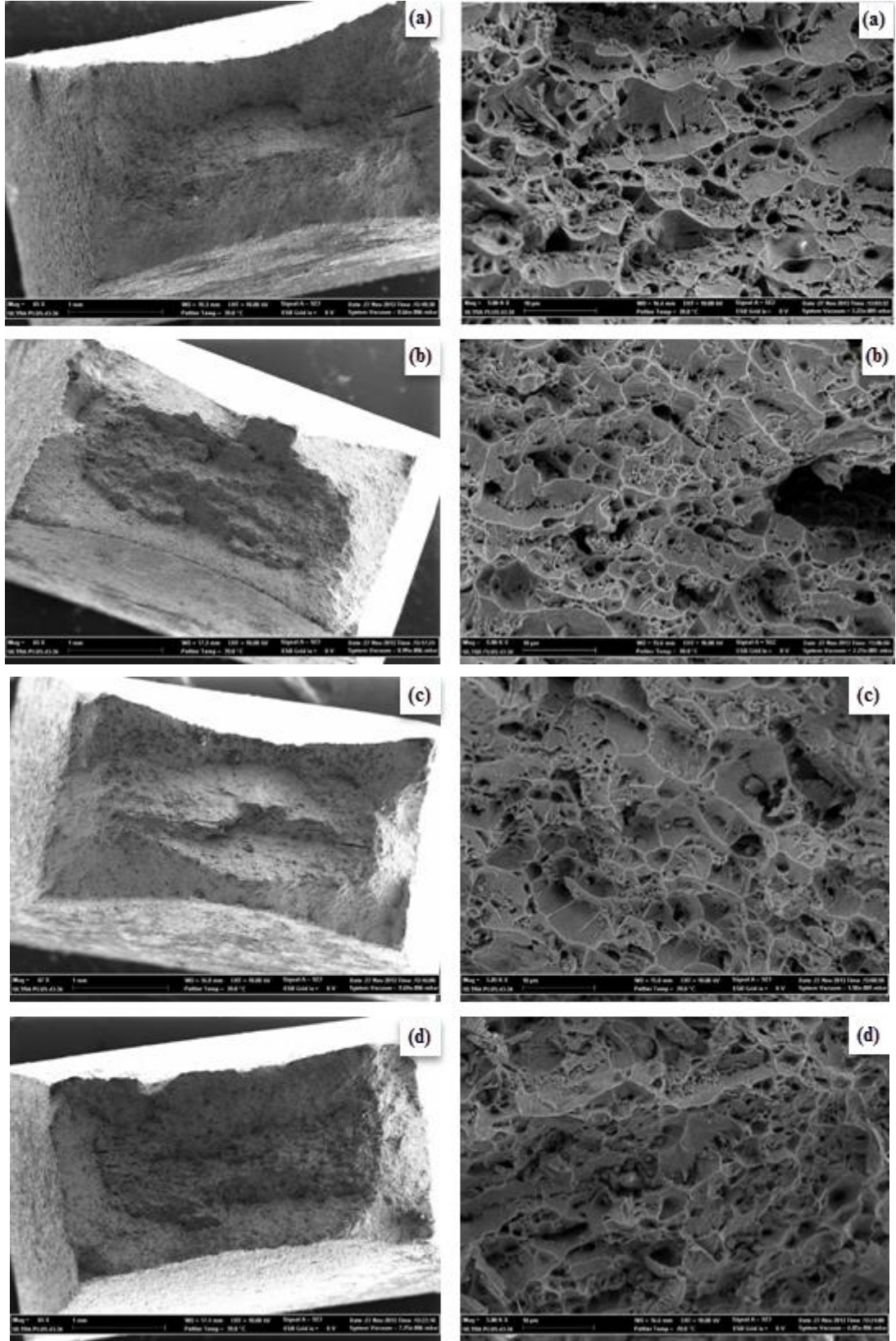
Şekil 4.3'deki gerilim-%uzama eğrilerinden görülen en belirgin hususlardan bir tanesinde temin edildiği şekliyle S275JRC çelik malzemede belirgin akma davranışı, Luder bantları az da olsa görülürken öndeformasyon işleminden sonraki yaşlanma zamanlarında tamamen görünmez hale gelmiştir. Bu durum çeliğin iç yapısıyla ilişkilendirilerek şöyle açıklanabilir. Çeliklerdeki orta ve yüksek karbon miktarı lamelli perlit oluşturduğu için belirgin akma noktası görülme durumunu azaltır veya tamamen kaldırır. Şuna dikkat edilmelidir ki lamelli perlit içerisindeki ferrit tabakası çok ince ve dislokasyon çoğalmasına kolayca izin verir. Bu durum Luder geriniminin azalmasına perlit miktarı arttığı zaman ise tamamen Luder bantlarının görülmemesine sebep olur[80].

Bununla birlikte yüksek oranda perlit içeren çeliklerde ferrit fazındaki yaşlanmanın etkisi limitli olur. Yüksek karbonlu perlitik çeliklerde statik gerinim yaşlanmasının etkisi, düşük karbonlu çeliklere göre daha zayıftır. Çünkü yüksek karbonlu çeliklerin oda sıcaklığı ve 95°C sıcaklıkta daha düşük yaşlanma indeksine sahip olduğu belirtilmiştir. Daha da fazlası bu çeliklerde Luder bantlarının, perlitik yapısından dolayı hemen hemen tamamen bastırıldığı belirtilmektedir [80].

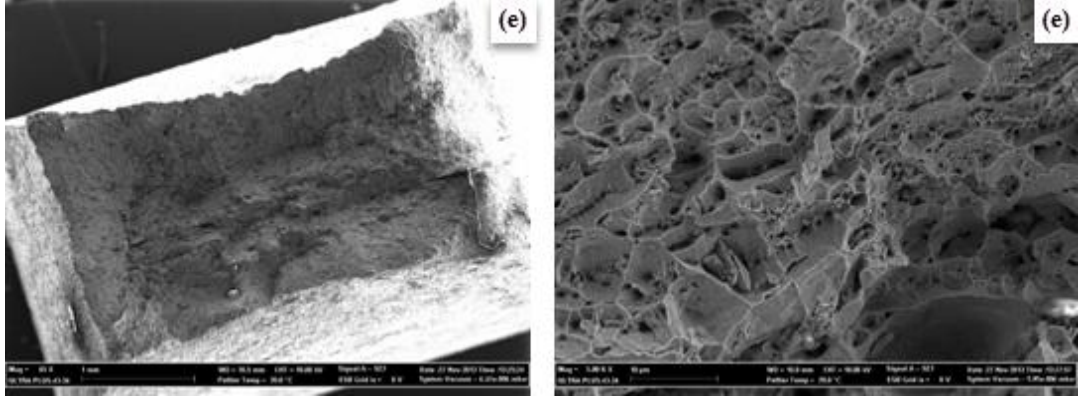
Statik gerinim yaşlanmasına uğrayan metal ve alaşımlarının mekanik özelliklerinde zamana bağlı olarak değişiklik meydana gelir. Bilhassa yalın karbonlu çeliklerin düşük sıcaklık uygulamalarında akma noktalarının belirgin hale gelmesi ve Luder bantlarının görülmesi statik yaşlanmanın belirgin ana karakteristikleridir. Luder bantları ancak belirgin şartlarda gerinim sonrası yaşlanma ile tekrar görülür. Bu olay temelde arayer atomlarının difüz ederek hareketli dislokasyonları kilitlemesinden dolayıdır. Bu olayın mekanizması temelde dislokasyon çizgileri ile katı ergiyik içerisindeki çözünen atomlar arasındaki etkileşime dayanır. Gerinim yaşlanması deformasyon sırasında da oluşabilir. Buna dinamik gerinim yaşlanması denir. Bu yaşlanma mavi kırılma olarak da bilinir. Gözle görülebilir oranda şekillendirilebilirlikte azalmaya ve akma uzamasında önemli derecede artışa sebep olur. Şartlar sağlandığında dinamik gerinim yaşlanması ve statik gerinim yaşlanması beraber oluşabilir. Örneğin; ılık deformasyon işlemlerinde, deformasyon sırasında dinamik yaşlanma oluşur. Daha sonra statik yaşlanma meydana gelir. Bu sebeple gerinim yaşlanması oluşumunda malzeme parametreleri, deformasyon işlemi ve onun karakteristikleri önemli rol oynarlar[80].

Yukarıdaki bulgular çalışmada kullanılan jant çeliğinin temin edildiği şekliyle yapısında çok az miktarda serbest halde arayer atomu bulunduğuna işaret etmektedir. Çünkü çeliğin üretim sürecine bağlı olarak kimyasal bileşimindeki karbon; tane içi ve tane sınırlarında değişik karbürler halinde ya da Fe ile reaksiyona girerek Fe₃C demir karbür (sementit) oluşturarak ferrit fazı ile birlikte bir arada bulunarak ötektoid dönüşüm ürünü olan perlit fazını meydana getirdiği düşünülmektedir. Bu sebeple katı ergiyik içerisinde serbest halde bulunan arayer atomları (karbon ve azot) deformasyon sürecinde hareketli dislokasyonlarla etkileşime girerek az da olsa belirgin akma noktası ve Luder bandı oluşturur. Daha sonraki yaşlanma sürecinde hareketli arayer atomları ikincil faz parçacıkları ve/veya sementit oluşturarak Luders bant oluşumunu lamelli perlit yapısıyla engellediği düşünülmektedir.

Çalışmada temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 160 °C sıcaklıkta 10, 20, 45, 120 dakika süreyle yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi sonrası kırılma yüzeyleride incelenmiştir. Kırık yüzey görüntüleri Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Temin edildiği şekliyle 160 °C sıcaklıkta 10, 20, 45 ve 120 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunelerin kırık yüzey resimleri.



Şekil 4.5. (devam ediyor).

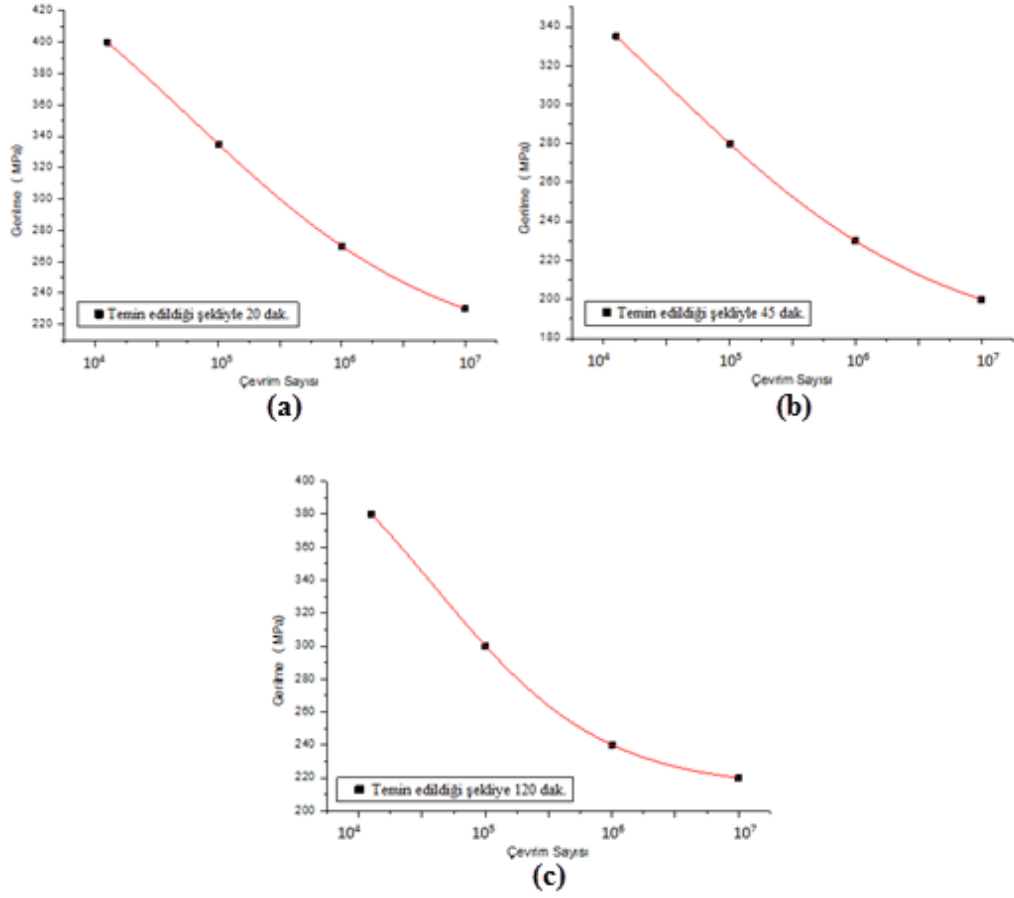
Şekil 4.5’den görüldüğü gibi, temin edildiği şekliyle orijinal deney numunesinin yanı sıra, temin edildiği şekliyle 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında statik gerinim yaşlanmasına tabi tutulan S275JRC çeliğinin mekanik özelliklerini belirlemede yararlanılan çekme test numunelerinin kırılma yüzeyleri tüm numunelerin sünek bir kırılma davranışı göstererek koptuğuna işaret etmektedir. Kırılma yüzeylerindeki çukurlar kırılma öncesi yüksek miktarda enerji absorbe ederek önemli oranda plastik deformasyona uğradığını göstermektedir. Temin edildiği şekliyle yaşlandırma uygulanmadan test edilen numunenin üretim sürecine bağlı olarak bazı tane içi kırılmalara rastlanırken genelde kırılma taneler arası çatlak ilerlemesiyle meydana gelmiştir. Temin edildiği şekliyle 160 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin kırılma yüzeylerinde ise göze batan en önemli husus numunenin yaşlanmadan dolayı maksimum dayanım artışının yaşandığı, 20 dakika yaşlandırma zamanından sonra test edilen numunenin kırılma yüzeyinde tek yönlü uygulanan gerilime dik yönde tane içi klivaj kırılmalara daha fazla rastlanılmaktadır. Aynı zamanda maksimum dayanım artışının yaşandığı bu yaşlandırma zamanında yaşlandırıldıktan sonra test edilen numunenin kesit daralması diğer yaşlandırılma zamanlarında test edilen numunelere oranla daha az meydana geldiği görülmektedir. Benzer şekilde tekrarlı yaşlanmanın yaşandığı 120 dakika yaşlanma zamanında numunenin kırılma yüzeyinde de tane içi klivaj ayrılmalar görülmektedir. Belirtilen yaşlandırma zamanında test edilen numunelerin kırılma yüzeyleri daha parlak görümlü olması bu tanelerin gevrek kırılma davranışı ile kırıldığına işaret etmektedir. Kristal yapılu gevrek malzemelerin birçoğunda çatlak ilerlemesi ayrılma adı verilen, belli kristal düzlemler boyunca atomlar arası bağların peş peşe ve

tekrarlanarak kopmasıyla oluştuğu rapor edilmiştir [82].Optimum yaşlanmanın yaşandığı 20 dakika yaşlanma zamanında yaşlandırıldıktan sonra test edilen numunenin kırılma yüzeyinde göze batan diğer bir hususta çukur diplerinde ikincil faz parçacıkları olduğu dűřünölen oluşumlar görölmektedir. Bu oluşumların dislokasyonları engelleyerek dayanım artışına sebep olduğu dűřünölmektedir.

Aşırı yaşlanmanın yaşandığı numunelerin kırılma yüzeyinde plastik deformasyonun yoğun bir şekilde etkisiyle kıvrılma ve yırtıklar görölmektedir. Bu durum numunelerin daha sünek bir şekilde kırıldığına işaret etmektedir.

4.2.2.2. Yorulma Deneyi Sonucu

Jant elikleri servis şartlarında dinamik yüklerde maruz kalmaktadır. Bu nedenle çeliklerin yorulma dayanımları da göz ardı edilmemelidir. Bu amaçla ticari olarak temin edildiği şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta yaşlandırılan çeliğin optimum, minimum ve ikinci defa yaşlandırmaya bağlı dayanım artışının elde edildiği 20, 45, 120 dakika yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin yorulma deneyleri ile elde edilen Wöhler eğrileri grafiksel olarak şekil 4.6 a-c' de gösterilmiştir.

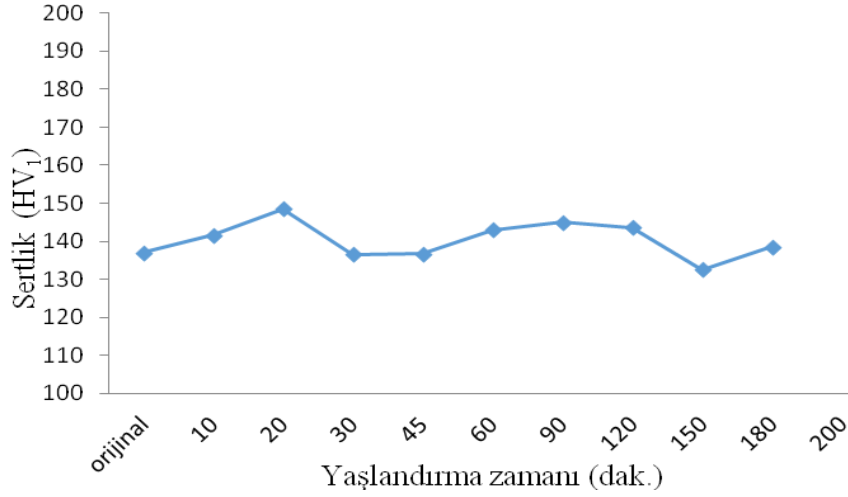


Şekil 4.6. Temin edildiği şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta a)20 dakika, b) 45 dakika ve c) 120 dakika yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.

Şekil 4.6 a-c'den görüldüğü üzere ticari olarak temin edildiği şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta 20, 45, 120 dakika, yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımları değerleri incelendiğinde tüm numuneler için 10^7 çevrim sayısı olan yorulma ömrüne ulaşılmıştır. Yaşlandırmaya bağlı maksimum dayanım artışının sağlandığı 160°C sıcaklıkta 20 dakika yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımı en yüksek olup 230MPa olarak tespit edilmiştir. Aşırı yaşlanmayla dayanım düşüşüne bağlı olarak 45 dakika yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımında da azalma tespit edilmiş ve 200 MPa olarak en düşük bulunmuştur. Ticari olarak temin edildiği şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta 120 dakika yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımı yaşlanmaya bağlı ikinci defa dayanım artışıyla paralel artış göstermiş ve 220 MPa tespit edilmiştir.

4.2.2.3. Sertlik Ölçüm Sonucu

Ticari olarak temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 160 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin sertlik ölçümleride gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil. 4.7. Temin edildiği şekliyle, % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin ortalama sertlik sonuçları.

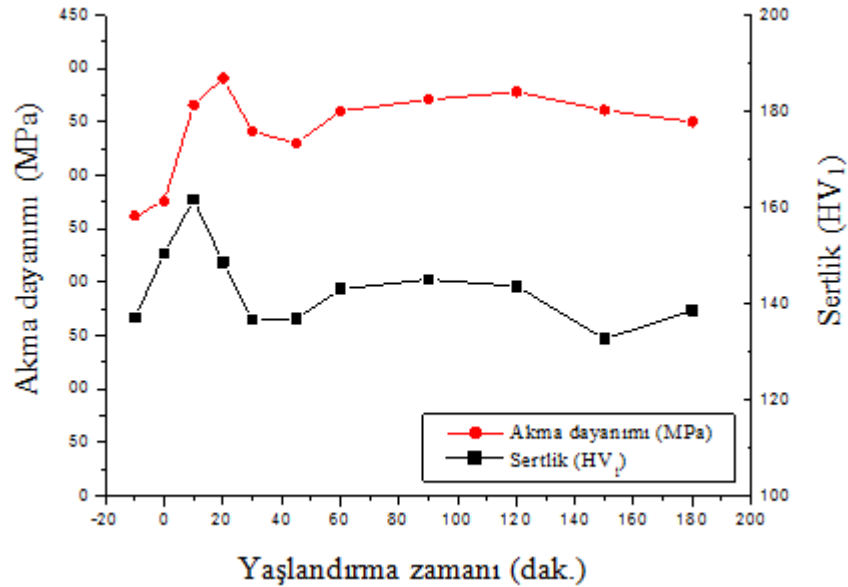
Şekil4.7’ den görüldüğü gibi artan yaşlandırma zamanına bağlı olarak temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunelerin sertliğinde belirgin artış ve azalmalar meydana gelmiştir. Örneğin; temin edildiği şekliyle 137 HV₁ ortalama sertlik değerine sahip deney numunesinin sertliği sırasıyla 10 ve 20 dakika yaşlanma zamanlarında yaklaşık 5 HV₁ ve 12 HV₁ artış göstermiştir. Ancak 30 ve 45 dakikalık yaşlandırma zamanlarında sertlikte 20 dakikalık yaşlanma zamanına göre sırasıyla yaklaşık 13 HV₁ azalma tespit edilmiştir. Diğer bir ifadeyle 30 ve 45 dakikalık yaşlandırma zamanlarında deney numunesinin sertliği yaklaşık olarak malzemenin temin edildiği şekliyle sahip olduğu sertlik değerine düşmüştür. Daha sonraki, sırasıyla 60, 90 ve 120 dakika yaşlandırma zamanlarında ise temin edildiği şekliyle numunenin sertlik değerine göre yaklaşık olarak tekrar 7 HV₁ sertlik artışı meydana gelmiştir. 150 ve 180 dakika yaşlandırma zamanlarında ise numunenin sertlik değerlerindeki genel eğilim azalma yönündedir. Sertlikteki bu azalma miktarı yaklaşık olarak 5 HV₁ tespit edilmiştir.

Temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin sertlik değişimi akma ve çekme dayanımlarında meydana gelen değişime uygun paralellik arz etmektedir. Ancak sertlik değerlerindeki değişim miktarı daha düşük bulunmuştur.

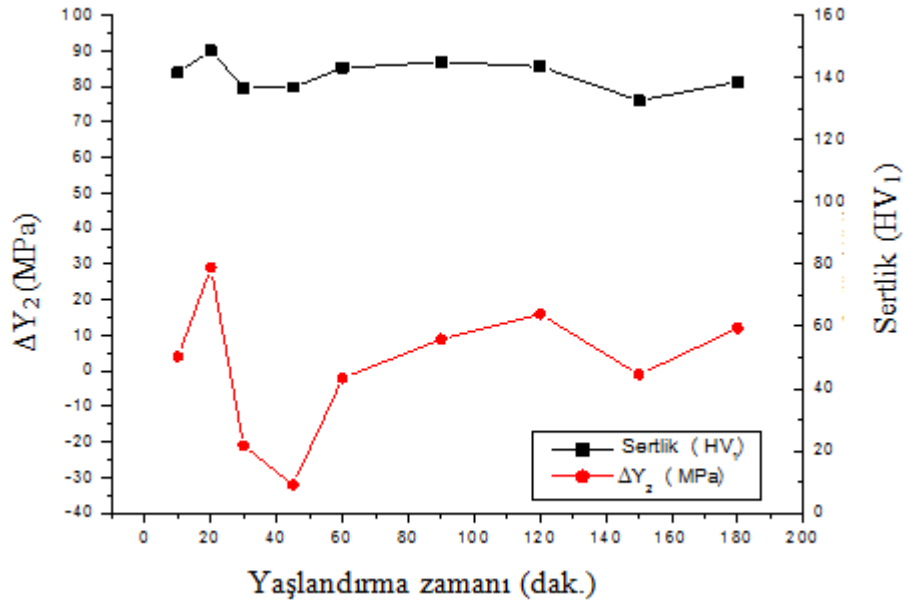
4.2.2.4. Temin Edildiği Şekliyle Yaşlandırılan Numunelerin Yaşlanma Davranışları

Bilindiği üzere malzemelerde statik yaşlanmanın en belirgin göstergesi numunenin akma dayanımındaki değişimdir. Yaşlanmaya bağlı çekme dayanımı ve % kopma uzaması ve sertlik gibi mekanik özelliklerin yanı sıra malzemelerin elektrik iletkenliklerinde de değişim meydana gelir.

Bu sebeple çalışmanın bu bölümünde temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan jant çeliğinin yaşlanmaya bağlı mekanik özelliklerindeki değişim sırasıyla akma dayanımı ile sertlik arasında ve yalnızca statik yaşlanmadan dolayı dayanım değişim miktarı olan (ΔY_2) ile sertlik arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 4.8. ve 4.9'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Temin edildiği şekliyle, 160 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanına bağlı olarak akma dayanımı ve sertlik ilişkisi.



Şekil 4.9. Temin edildiği şekliyle, 160 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanına bağlı olarak yalnızca yaşlanmadan dolayı dayanım artışı (ΔY_2) ve sertlik ilişkisi.

Şekil 4.8 ve 4.9'dan görüldüğü gibi temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta, farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan jant çeliğinin statik gerinim yaşlanmasına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişim en belirgin olarak akma dayanımı, sertlik ve statik yaşlanmadan dolayı akma dayanımında değişim olan (ΔY_2) değerlerinde görülür. Akma dayanımı ve yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki değişim ile sertlik arasındaki ilişkiyi net olarak ifade eden bu grafikte en belirgin husus şudur. Ferritik-perlitik iç yapıdan oluşan jant çeliğinde dayanım artışına sebep olan yaşlanma mekanizma ve/veya mekanizmalarına bağlı olarak meydana gelen akma dayanımı ve yalnızca yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki (ΔY_2) değişim ile sertlik değişimi belirgin bir paralellik arz etmesidir.

Temin edildiği şekliyle 262 MPa akma dayanımına sahip numunenin akma dayanımı soğuk şekillendirme (öndeformasyon) (ΔY_1)+yaşlanma kaynaklı dayanım artışıyla (ΔY_2) birlikte 160 °C sıcaklıkta, 20 dakikalık yaşlanma zamanında en yüksek değeri olan 391 MPa ulaşmıştır. Diğer bir ifadeyle; numunede yalnızca statik gerinimyaşlanmasına bağlı olarak meydana gelen dayanım artışı maksimum 29 MPa olarak 20 dakika yaşlanma zaman diliminde gerçekleşmiştir. Daha sonraki zaman

diliminde numunenin aşırı yaşlanma evresine girdiği ve malzemenin akma dayanımı 45 dakikalık yaşlanma zamanında soğuk şekillendirme ile kazanılan dayanım (ΔY_1) değerinin altına 330 MPa değerine düştüğü tespit edilmiştir.

Daha sonraki yaşlanma süreçlerinde (uzun yaşlandırma zamanlarında) düşük karbonlu, fırında sertleştirilebilen, arayer atomsuz ve çift fazlı çeliklerin yaşlanma davranışlarından farklı bir durum göze çarpmaktadır. Numunenin akma dayanımı ve yaşlanmadan dolayı gerilme değişimi tekrar bir artış eğilimine girmiştir. Bunun sonucunda 120 dakika yaşlanma zamanında akma dayanımı 378 MPa çıkarken, yalnızca yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı 16 MPa olarak bulunmuştur. 120 dakika yaşlandırma zamanından sonra tekrar bir aşırı yaşlanma ile dayanımda azalma eğilimi başlamıştır. 180 dakika yaşlanma zamanında numunenin akma dayanımı azalarak 350 MPa değerine düşmüştür.

Kısacası sonuçlar; jant çeliği olarak kullanılan S275JRC çeliği temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik gerilim yaşlanmasına maruz bırakıldığında 20 dakika gibi kısa zaman diliminde yaşlandığına işaret etmektedir. Fakat daha uzun yaşlanma zamanında; aşırı yaşlanmaya maruz kaldıktan sonra tekrar yaşlandığına, kısacası tekrarlı yaşlanmaların meydana geldiğine işaret etmektedir.

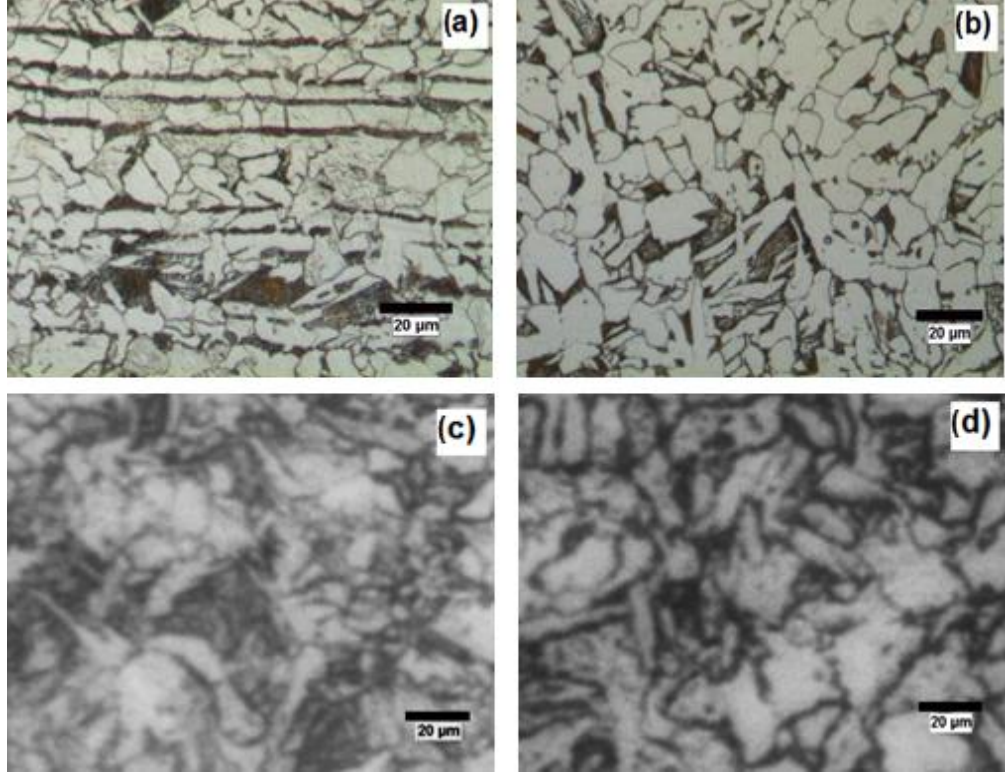
Ancak yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı ile sertlik arasındaki ilişkiyi ifade eden Şekil 4.9'daki grafik ilk optimum yaşlanma zamanında belirgin bir sertlik artışı bulunmuştur. Temin edildiği şekliyle sertliği ölçülen numuneye göre mukayese edildiğinde optimum yaşlanmanın yaşandığı 20 dakikalık yaşlanma zamanında yaklaşık 12 HV₁ sertlik artışı meydana getirirken, 45 dakikalık yaşlanma zamanında diğer ifadeyle aşırı yaşlanma oluştuğunda numunenin sertliği temin edildiği şekliyle sahip olduğu sertlik değerlerine düşmüştür. Daha uzun yaşlanma zamanlarında tekrar artış eğilimine girerek ikinci defa optimum yaşlanmanın elde edildiği zaman dilimindeki (120 dakika) sertlik artışı yaklaşık 7 HV₁ tespit edilmiştir. Yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı ile sertlik sonuçları paralellik arz etmesine rağmen, sertlikteki değişim ΔY_2 değerleriyle karşılaştırıldığında daha düşük bulunmuştur.

4.3. HOMOJENLEŞTİRME+NORMALİZASYON ISIL İŞLEMİ UYGULANDIKTAN SONRA 50 °C'DE YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN DENEYSEL SONUÇLARI

Ağır iş makinelerinin jant imalatında kullanılan soğuk Şekillendirmeye uygun S275JRC eliğinin 1000 °C sıcaklıkta 180 dakika sũreyle homojenleştirme ısıl işlemi ve ardından 890 °C sıcaklıkta 120 dakika sũreyle normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra yaŐlanabilirliđi araştırılmıştır. Bu amaçla % 5 ˆndeforme edilen numuneler 50 °C sıcaklıkta sırasıyla 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 30 ve 360 dakika zaman dilimlerinde yaşlandırılmıştır. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış, farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan numunelerin mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. İlave olarak 50 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan numunelerin mekanik ˆzellikleri çekme deneyi ile belirlenmiştir. Sonuçlar sırasıyla aşağıdaki bˆlũmlerde paylaşılarak etraflıca irdelenmiştir.

4.3.1. Mikroyapı Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi

Daha ˆncede belirtildiği gibi çalışmada kullanılan elik malzemenin ticari olarak temin edildiği Şekliyle mikroyapısı, eşksenel ferrit ve perlit tanelerinden oluştuğu ve çeliğin yapısında aynı zamanda ˆretim sũrecine bağlı olarak oluşan bandlaŐmalar bulunmuştur. Bu bandlaŐmaları ortadan kaldırmak ve daha homojen bir yapı elde etmek için 1000 °C'de 180 dakika sũreyle homojenleştirme ısıl işlemi uygulandıktan sonra fırın içerisinde oda sıcaklığına soğutulan numunelere ardından 890 °C sıcaklıkta 120 dakika sũreyle normalizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Temin edildiği Şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemleri uygulanmış havada, suda ve yağda soğutulmuş numunelerin mikroyapıları optik mikroskop yardımıyla incelenmiş sonuçlar sırasıyla Şekil 4.10 a-d' de gˆsterilmiŐtir.

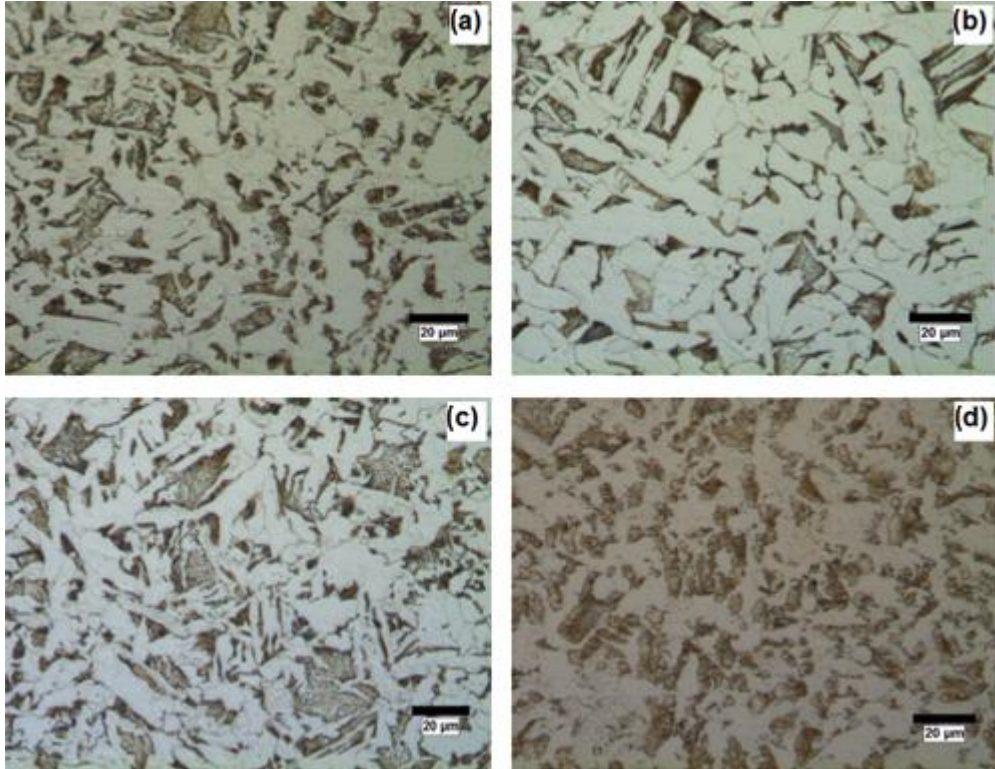


Şekil 4.10. Deneplerde kullanılan a) temin edildiği şekliyle, b) homojenleştirme+normalizasyon ısııl işleme sonrası, havada soğutulmuş c) suda soğutulmuş d) yağda soğutulmuş numunelerin mikroyapı görüntüsü.

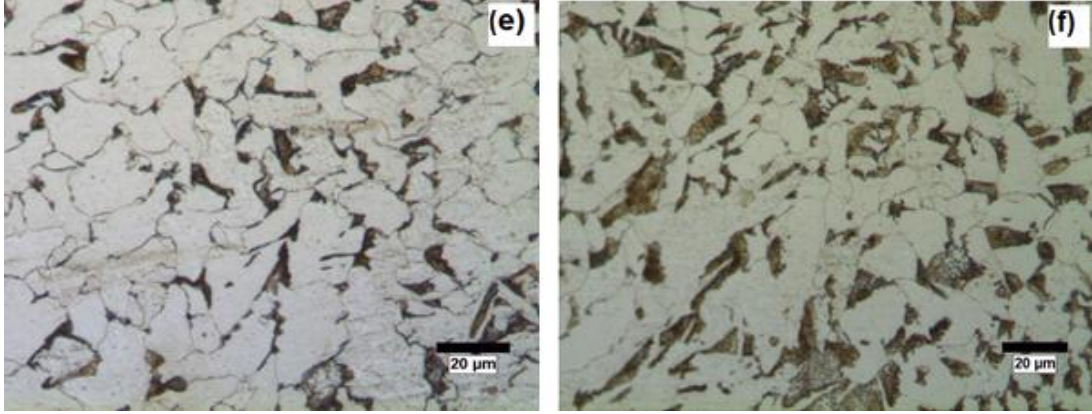
Şekil 4.10 a ve d'den görüldüğü gibi ferritik-perlitik iç yapıya sahip, jant imalatında kullanılan çelik deney numunesinde görülen bantlaşmalar 1000 °C sıcaklıkta 3 saat uygulanan homojenleştirme ısııl işleme sürecinde difüzyonla yayılarak ortadan kalkmış ve yapıda homojenleşme sağlanmıştır. Homojenleştirme ısııl işleme uygulanan deney numuneleri oda sıcaklığına kadar fırın içerisinde soğutulmuştur. Homojenleştirme sürecinde deney numunesinin kabalaşan tane boyutunu inceltmek ve yaşlandırma işleme için karbon ve azot arayer atomlarınca zengin katı ergiyik elde edebilmek için deney numunesine 890 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle normalizasyon ısııl işleme uygulandıktan sonra suda ve yağda soğutma ısııl işleme uygulanmıştır. Yapıda hızlı soğumaya bağlı olarak martenzit ve beynit gibi fazlara dönüşüm oluştuğu için havada soğutma ısııl işleminin daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Bu sebeple çalışmada kullanılan deney numuneleri normalizasyon ısııl işleme sonrasında oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur. Böylece yapısı ve tane boyutu iyileştirilmiş ferritik-perlitik iç yapı, yapısında

yaşlanma için yeterince çözünmüş serbest halde karbon ve azot gibi arayer atomları bulunduran deney numuneleri elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan çeliğin homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra servis şartlarında maruz kalacağı statik yükler ve sıcaklık değerleri temsil ettirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla soğuk deformasyon miktarını temsil ettirebilmek amacıyla % 5 oranında öndeformasyona tabi tutulan deney numuneleri servis şartlarındaki jantlarda ulaşılan sıcaklığı temsil ettirebilmek amacıyla 50 °C sıcaklıkta 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 ve 360 dakika zaman aralıklarında yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin mikroyapı görüntüleri incelenmiş, 10, 20, 30, 120, 180, 300 dakika yaşlandırılan numunelerin mikroyapı sonuçları Şekil 4.11 a-f' de gösterilmiş, perlit ve ferrit faz oranları ile tane boyutları Çizelge 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra % 5 öndeformasyon uygulanan; a) 50 °C sıcaklıkta 10 dakika b) 20 dakika c) 30 dakika d) 120 dakika e) 180 dakika f) 300 dakika yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri.



Şekil 4.11. (devam ediyor).

Şekil 4.11.a-f'den görüldüğü gibi homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış numunelerin yaşlandırma zamanına bağlı olarak birincil ferrit ve perlit fazı miktarlarında hacimsel olarak bir değişim meydana gelmediği düşünülmektedir. Ayrıca yaşlandırılan numunelerin tane boyutunda yaşlandırma sıcaklığının yeniden kristalleşme sıcaklığının oldukça altında olması sebebiyle beklenildiği gibi bir değişim tespit edilememiştir.

Çizelge 4.3. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra %5 öndeforme edilmiş, 50°C sıcaklıkta 10, 20, 45, 120, 180 ve 300 dakika yaşlandırılan numunelerin % perlit ve ferrit faz oranları ile tane boyutları.

50°C sıcaklıkta	% Perlit Oranı	Perlit tane boyutu (µm)	% Ferrit Oranı	Ferrit tane boyutu (µm)
10 dakika	29,94	6,28	70,06	9,19
20 dakika	19,6	5,71	80,4	9,38
30 dakika	27,12	5,93	72,88	9,33
120 dakika	33,86	6,12	66,14	9,65
180 dakika	13,29	4,1	86,71	11,6
300 dakika	25,62	6,4	74,38	9,76

Daha önce bölüm 4.2'de ifade edildiği gibi yaşlanma kinetiklerinin kontrol edilmesinde malzemenin yaşlanmasından önceki yapısı önemlidir. Ancak yapı alaşımın kimyasal kompozisyonu, üretim süreci ve uygulanan ısıl işlemler tarafından etkilenir. Örneğin; mikroalaşımli çift fazlı çeliklerin yaşlanma işlemi çift fazlı

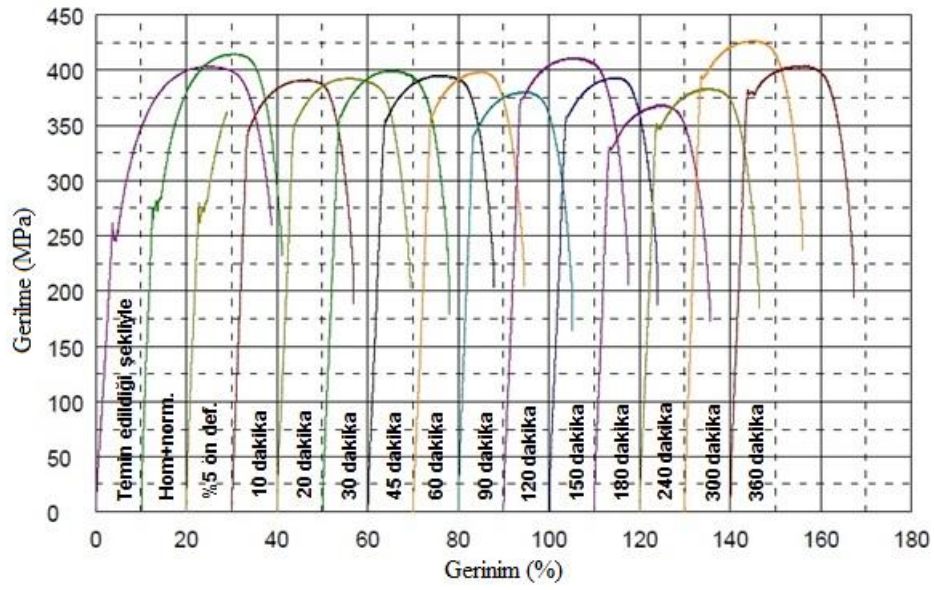
karbonlu çeliklere göre daha yavaştır. Bu durum alaşımlı çeliğin karbür oluşturma eğiliminin yüksek olması sebebiyle katı ergiyik içerisinde arayer atomlarında azalma ile açıklanır. Genelde çelik içerisinde kuvvetli karbür ve nitrür oluşturuca alüminyum, krom, vanadyum, titanyum ve niobium miktarı statik gerinim yaşlanma davranışını etkiler. Çünkü bu karbür ve nitrür oluşturuca katı ergiyik içerisindeki karbon ve azot gibi arayer atomlarının miktarını düşürür. Karbür ve nitrür oluşturuca elementlerinin yanı sıra statik gerinim yaşlanmasını düşüren katı ergiyik içerisinde mangan ve silisyum gibi yer alan atomları da vardır. Bu elementler ferrit matrikse girerek arayer atomlarıyla reaksiyona girerek onların hareketini engellerler ve böylece statik gerinim yaşlanmasını geciktirirler.

4.3.2. Mekanik Özellik Deney Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi

Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden daha sonra 50°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanlarında yaşlandırılan numunelerin mekaniksel özellikleri sırasıyla çekme deneyi, yorulma dayanımı ve sertlik ölçümü ile belirlenmiştir.

4.3.2.1. Çekme Deney Sonucu

Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeforme edildikten sonra 50 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin yaşlanma davranışları çekme testi ile belirlenmiştir. Yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi sonucu ortalama gerilme - % uzama eğrileri elde edilmiş ve grafiksel olarak Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

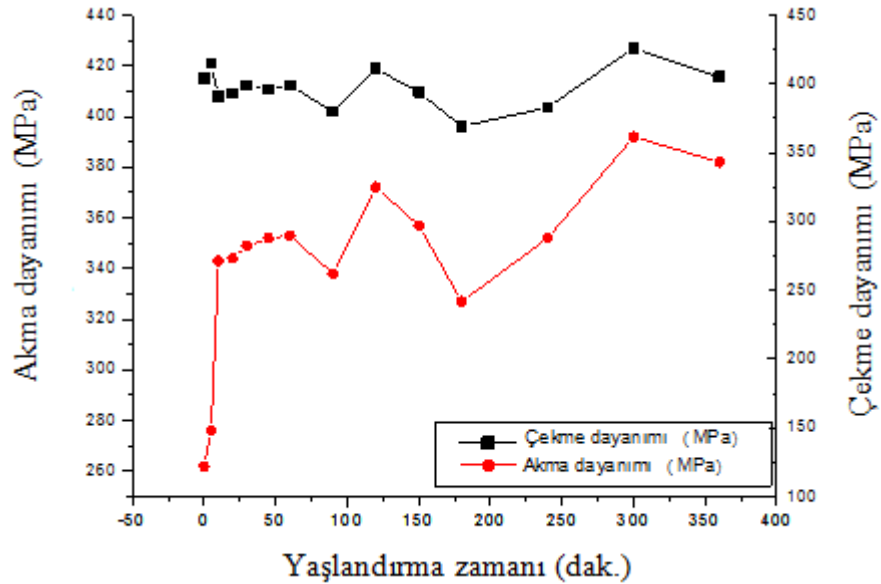


Şekil 4.12. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra 50 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi gerilme-% uzama eğrileri.

Şekil 4.12'deki verilerden yararlanarak homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden sonra 50 °C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerin akma, çekme dayanımlarındaki ve % uzama miktarlarındaki değişimin yanı sıra sadece yaşlanmadan kaynaklanan akma dayanımındaki değişim olan (ΔY_2) eğriler üzerinden hesaplanarak Çizelge 4.4'de verilmiştir. Ayrıca yaşlanmaya bağlı olarak akma ve çekme dayanımlarındaki değişim grafiksel olarak Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemleri uygulanmış şekilde % 5 öndeformasyon işleminden sonra 50 °C sıcaklıkta farklı zamanlarda yaşlandırılan numunelerin ortalama çekme deney verileri.

Yaşlanma Süresi (dakika)	Akma Dayanımı (MPa)	ΔY_2 (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Orjinal	262	-	404	24,6
Hom+normalizasyon	276	-	415	22,4
10	343	-9	391	16,8
20	344	-8	393	16,5
30	349	-3	399	15,5
45	352	0	396	14,8
60	353	1	399	15,6
90	338	-14	380	14,3
120	372	20	411	15,4
150	357	5	394	15
180	327	-25	369	14,7
240	352	0	383	15,7
300	392	40	426	15
360	382	30	405	17



Şekil 4.13. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemleri uygulanmış şekilde % 5 öndeformasyon sonrası 50 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin yaşlandırma zamanı ile akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Çizelge 4.4'den görüldüğü gibi homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemlerinden sonra numunelerin akma dayanımlarında temin edildiği şekliyle test edilen numuneye oranla, yaklaşık 15 MPa belirgin bir artış tespit edilmiştir. Çelik standardında belirtilen minimum 275 MPa akma dayanım değerine ulaşılmıştır. Akma dayanımındaki bu artış homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemi ile oluşturulan homojen yapıya ve tane boyutu iyileşmesiyle alakalı olduğu düşünülmektedir.

% 5 öndeformasyon işleminden sonra 50 °C sıcaklıkta, farklı zaman aralıklarında statik gerinim yaşlandırma işlemi uygulanan çeliğin gerilme-%uzama grafiği açıkça şunu göstermektedir. Yaşlandırma zamanına bağlı olarak numunelerin akma ve çekme dayanımında belirgin bir değişimin daha uzun yaşlandırma zamanlarında meydana geldiğine işaret etmektedir. 90 dakika yaşlandırma zamanına kadar yaşlandırılan numunelerin akma dayanımında öndeformasyon işlemi ile kazanılan dayanım artışının altındaki bir değere kadar az da olsa bir azalma tespit edilmiştir. Daha sonra 120 dakika yaşlandırma zamanında numunenin akma ve çekme dayanımında bir artış yerini 180 dakika yaşlandırma zamanlarında azalmaya bırakmıştır. Daha uzun yaşlanma dilimlerinde numunenin akma ve çekme dayanımında artış eğilimi 300 dakika yaşlandırma zamanında numunenin akma ve çekme dayanımındaki en büyük değerine ulaşmıştır. Son olarak 360 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunenin her iki dayanımında da tekrar bir azalma tespit edilmiştir.

Homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemi sonrası 50 °C sıcaklıkta yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin mekanik özelliklerindeki değişim çok uzun yaşlanma dilimlerinde meydana gelmiştir. Bunda 50 °C gibi düşük sıcaklıkta katı ergiyik içerisindeki serbest haldeki çözünen atomların hareketli dislokasyonların olduğu bölgelere daha uzun zaman dilimlerinde yayılımının etkili olduğu düşünülmektedir.

Örneğin; daha öncede belirtildiği gibi ticari olarak temin edildiği şekliyle ortalama 262 MPa akma dayanımına sahip çeliğin homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemlerinden sonra yapıdaki bandlaşmaların ortadan kaldırılması ve daha homojen

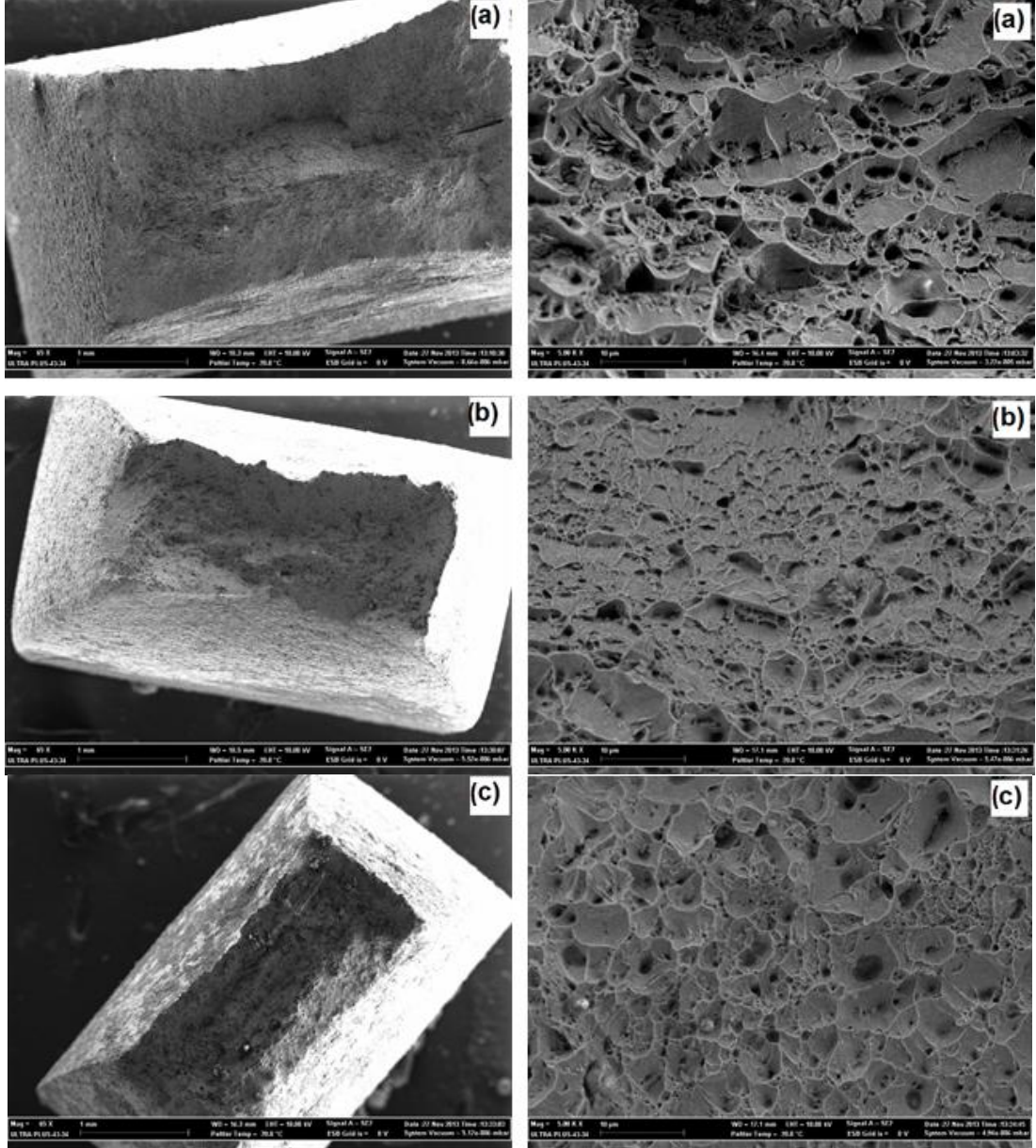
ve ince taneli bir yapı elde edilmesine bağlı olarak numunenin akma dayanımında yaklaşık 15 MPa artış bulunmuştur. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işleminden sonra % 5 öndeformasyon işlemiyle soğuk deformasyona bağlı dayanım artışı olan (ΔY_1) miktarı yaklaşık 87 MPa artış göstererek 352 MPa değerine ulaşmıştır. Yalnızca yaşlanmadan dolayı dayanım artışı olan (ΔY_2) miktarı ilk defa 120 dakika yaşlanma zamanında 20 MPa artış göstermiştir. 180 dakikalık yaşlanma zamanında (ΔY_2) miktarında en büyük azalma gözlemlenmiş ve bu azalma miktarı 20MPa olarak tespit edilmiştir. 300 dakika yaşlanma zamanında ise yaşlanmadan dolayı meydana gelen dayanım artışı 40 MPa ulaşmış ve en büyük artış bu yaşlandırma zamanında tespit edilmiştir. 360 dakika yaşlanma zamanında bu artış miktarı 300 dakika yaşlandırma zamanına göre 10 MPa azalarak 30 MPa olarak hesaplanmıştır.

Numunenin bilhassa yaşlanmadan dolayı akma dayanımında meydana gelen değişim bu çeliğin yaşlandığına ve uzun zaman dilimli yaşlandırma sürecinde tekrarlı yaşlanmaya maruz kaldığına işaret etmektedir. Daha önceki bölümdede ifade edildiği gibi, bu durum yaşlandırılan çeliğin ferritik-perlitik iç yapıya sahip olması ve katı ergiyik içerisindeki serbest halde çözünen atomların karbür ve nitrür yapıcı elementler tarafından bağlanarak dislokasyonlara doğru ilerlemelerinin engellenmesinden dolayı kaynaklandığı düşünölmektedir. Yapıda önceden oluşan sementitin veya tane sınırlarında çökelen karbür, nitrür veya karbonitrürlerin uzun zaman dilimli yaşlandırma sürecinde gerisi geriye difüzyonla çözünerek tekrar dislokasyon hareketine engel çıkararak dayanım artışına diğer bir ifadeyle tekrarlı yaşlanmalara sebep olduğu düşünölmektedir.

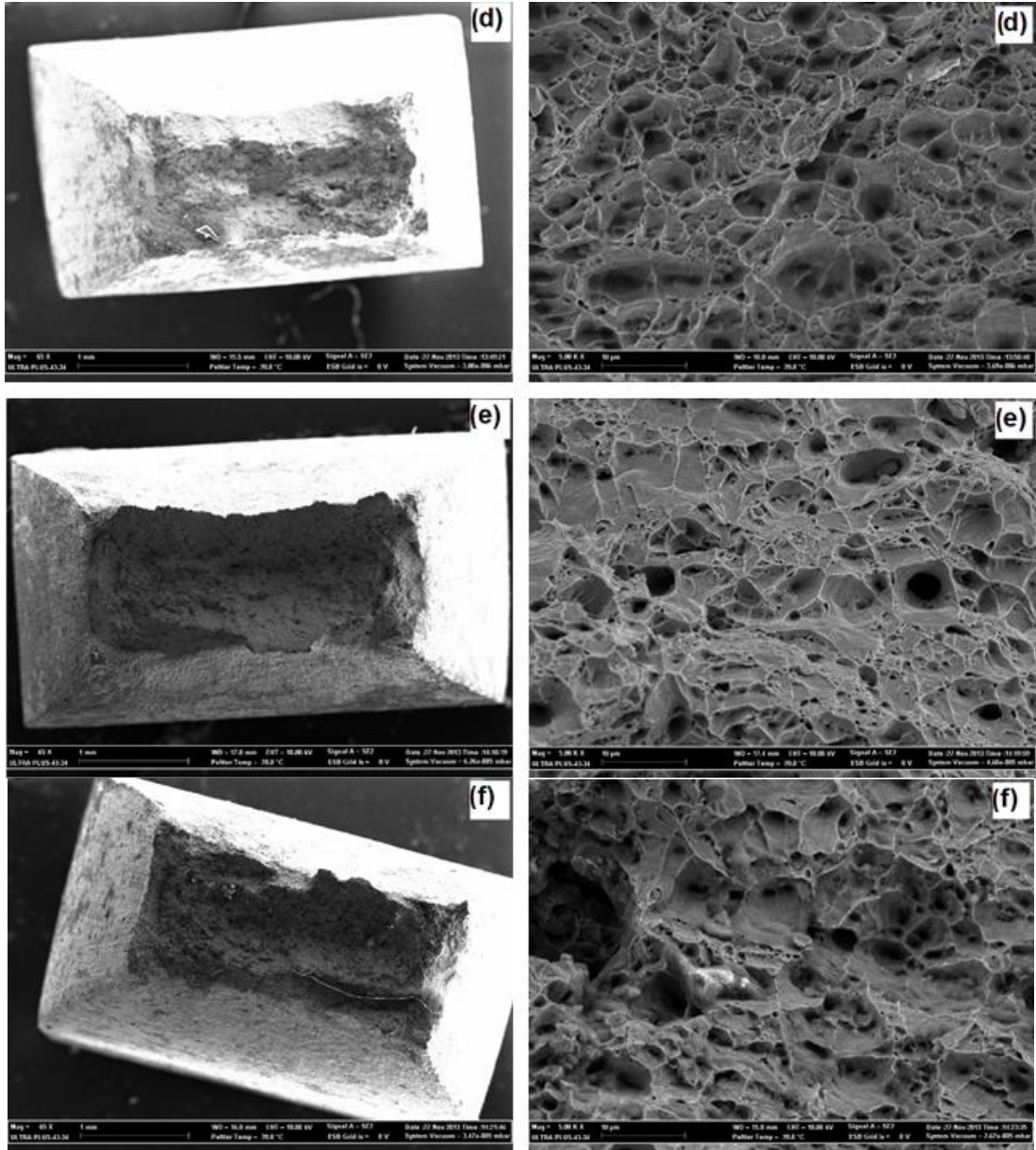
Gerilme-%uzama eğrilerinde göze batan önemli bir hususta homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi sonrası 50 °C gibi oldukça düşük sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan çeliğin ferritik+perlitik bir iç yapıya sahip olması sebebiyle 90 dakika yaşlandırma zamanına kadar Luder bantları görülmez iken, bu yaşlandırma zamanından daha uzun yaşlandırma sürelerinde bilhassa 360 dakikalık yaşlandırma zamanında çok belirgin hale gelmiştir.

Temin edildiği şekliyle, homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve % 5 öndeformasyon sonrası 50 °C sıcaklıkta 10, 20, 30, 120, 180, 300

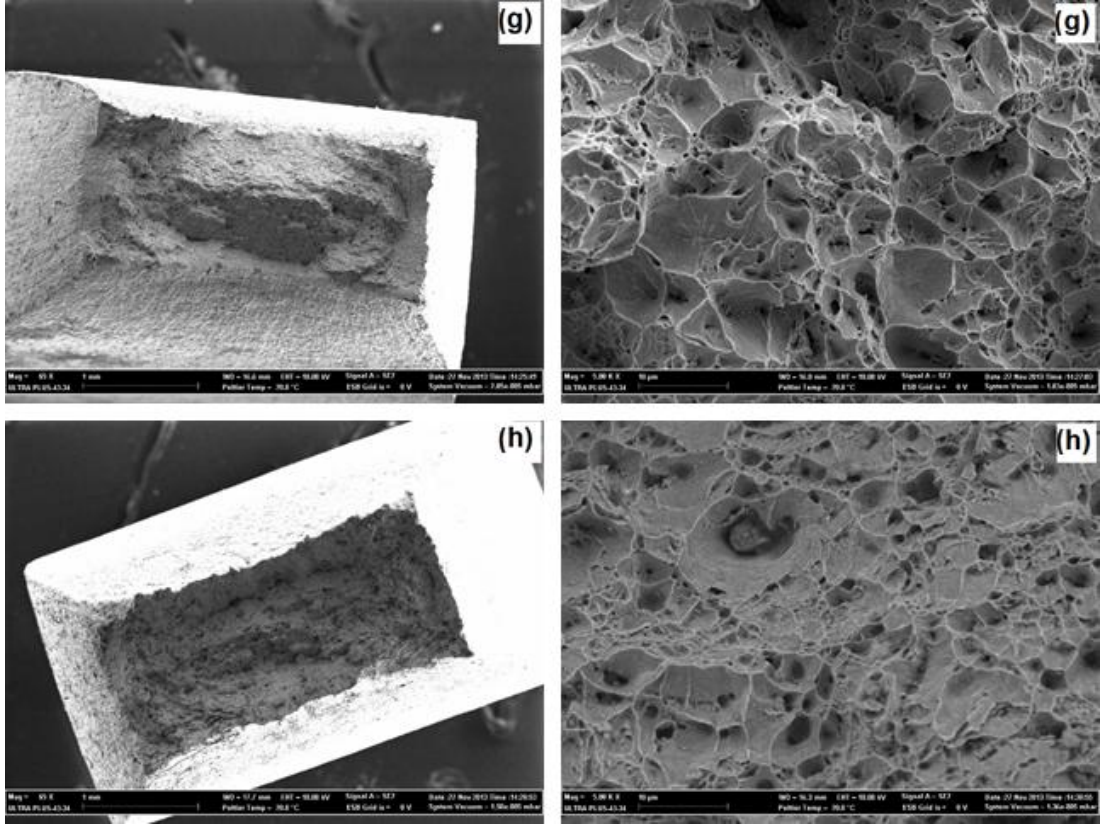
dakika süreyle yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi sonrası kırılma yüzeylerinde incelenmiştir. Kırık yüzey görüntüleri Şekil 4.14.a-h’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 50 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanında yaşlandırılmış numunelerin kırık yüzey resimleri.



Şekil 4.14. (devam ediyor).



Şekil 4.14. (devam ediyor).

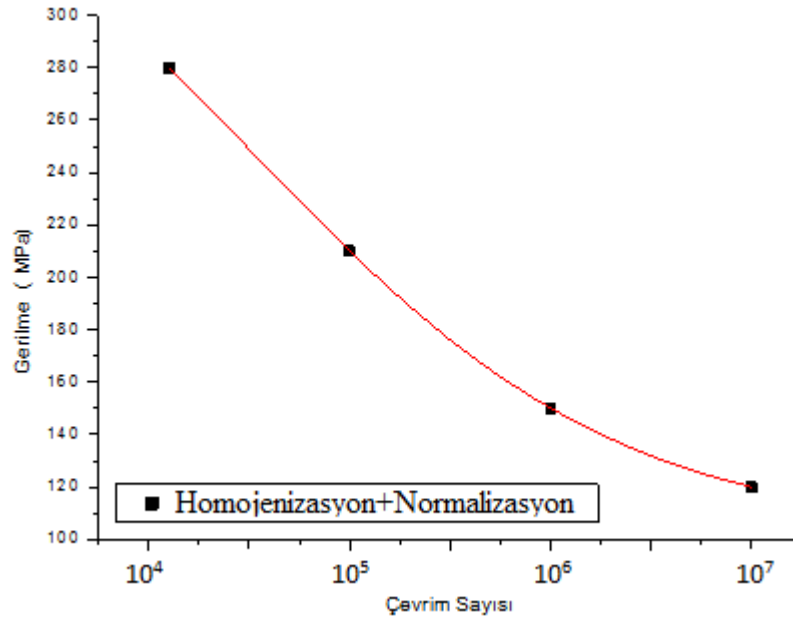
Şekil 4.14 a ve b'den görüldüğü gibi; homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle numunenin kırılma yüzeyi, temin edildiği şekliyle incelenen numuneye oranla daha fazla kesit daralması göstererek sünek kırılma davranışı göstererek kopmuştur. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işleminin çeliğin iç yapısında sağladığı homojenizasyon ve tane iyileşmesi daha fazla kesit daralmasının sorumlusu olduğu düşünülmektedir.

Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 50 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanında yaşlandırılmış numunelerin kırık yüzey resimleri ise test numunelerinin sünek kırılma biçimiyle ayrıldığını göstermektedir. Numunelerin kırılma yüzeylerinde tane içi klivaj ayrılmalar görülsede, en belirgin 300 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırıldıktan sonra test edilen numunenin kırılma yüzeyinde görülmektedir. Difüzyon hızınının daha düşük olması sebebiyle 50 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunenin optimum yaşlanma dayanımında 300 dakikalık yaşlandırma zamanında elde edilmiştir. Bu sebeple

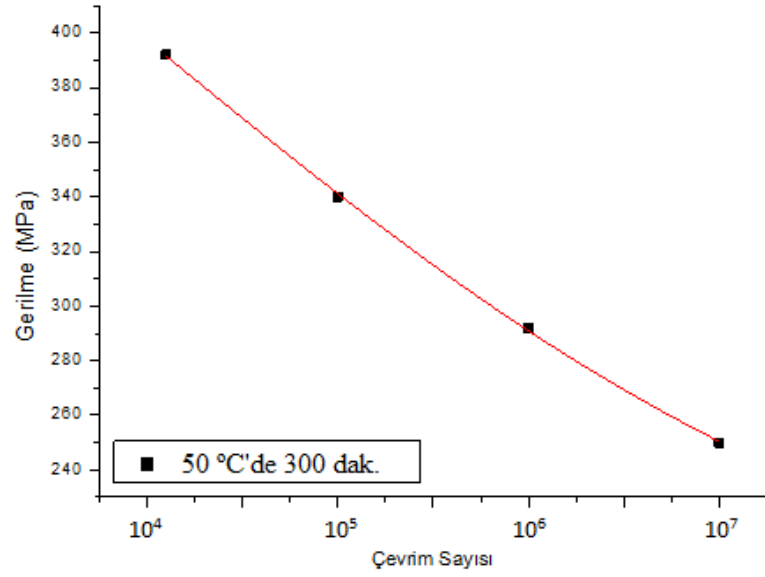
dayanım artışına bağlı sertlik artışında yaşandığı bu yaşlanma zamanında test edilen numunenin kırılma yüzeyinde görülen klivaj ayrılmalar beklenen durumdur.

4.3.2.2. Yorulma Deneyi Sonucu

Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle Şekil 4.15'de ısı işlem sonrası %5 öndeforme edildikten sonra 50°C sıcaklıkta yalnızca optimum yaşlandırma zamanı olan 300 dakika süreyle yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımı belirlenmiştir. Sonuç grafiksel olarak Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.

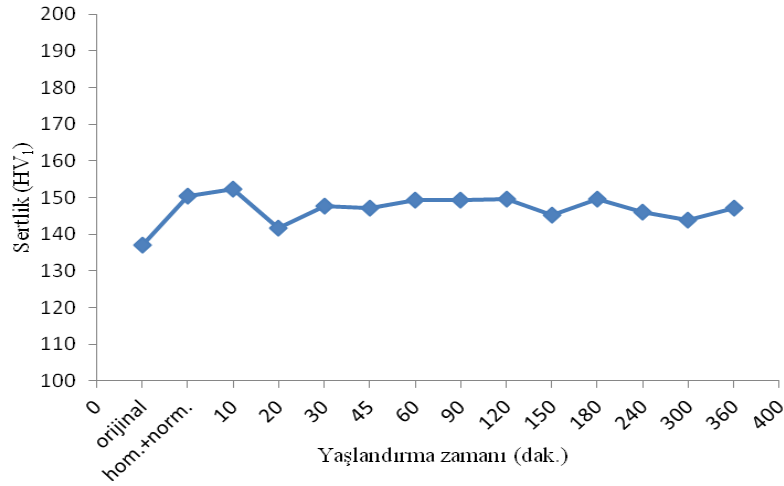


Şekil 4.16. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve %5 öndeformasyon sonrası 50°C sıcaklıkta 300 dakika yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'dan görüldüğü üzere homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi sonrası %5 öndeforme edilip 50°C sıcaklıkta 300 dakika yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımları incelendiğinde tüm numuneler için 10⁷ çevrim sayısı olan yorulma ömrüne ulaşılmıştır. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış numunelerin yorulma dayanımı 120 MPa tespit edilirken, homojenleştirme+normalizasyon ısıl işleminden sonra %5 öndeforme edilen ve 50°C sıcaklıkta optimum yaşlandırmadan dolayı dayanım artışının elde edildiği 300 dakika süreyle yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımı en yüksek 250 MPa tespit edilmiştir. Sonuçlar yaşlanmaya bağlı dayanım artışına bağlı olarak numunenin yorulma dayanımında belirgin bir artışın meydana geldiğine işaret etmektedir.

4.3.2.3. Sertlik Ölçüm Sonucu

Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 50 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılmış numunelerin sertlik ölçümleri de gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası, 50 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin ortalama sertlik sonucu.

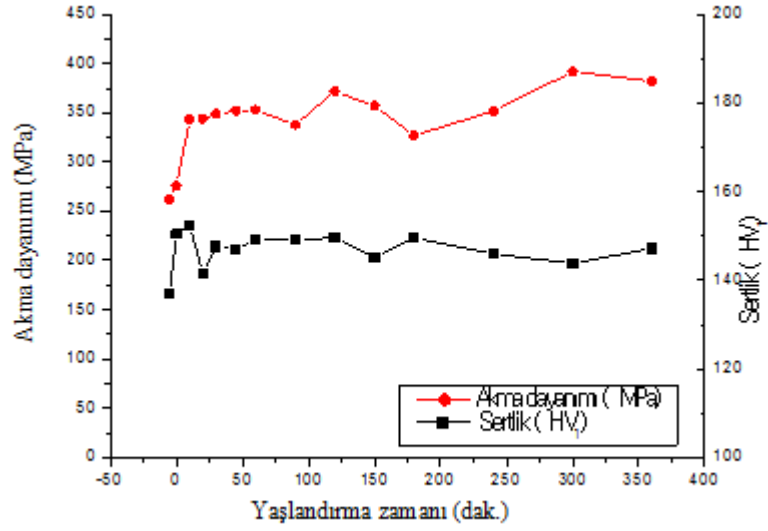
Şekil 4.17’den görüldüğü gibi artan yaşlandırma zamanına bağlı olarak temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunelerle kıyaslandığında, homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra yaşlandırılan numunelerin sertliğinde değişim çok belirgin bulunmamıştır. Örneğin, temin edildiği şekliyle 137 HV₁ ortalama sertlik değerine sahip deney numunesinin sertliği homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi sonunda yaklaşık 150 HV₁ değerine çıkmıştır. Sertlik artışı numunenin akma ve çekme dayanımındaki artışla paralellik arz etmekte ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemiyle alakalı tane boyutu iyileşmesi ve öndeformasyondan dolayı çalışma sertleşmesi ile alakalı olduğu düşünülmektedir.

50 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik gerinim yaşlanması sırasında ilk 10 dakikalık yaşlanma zamanında sertlikte homojenleştirme+ normalizasyon ısıl işleminin yanı sıra % 5 öndeforme edilmiş şekline göre ortalama 5 HV₁ artış tespit edilmiştir. Diğer yaşlandırma zamanlarında meydana gelen sertlikteki değişim çok az genellikle ısıl işlem+öndeformasyonla kazanılan dayanım değerlerine ait sertlikler civarında bulunmuştur.

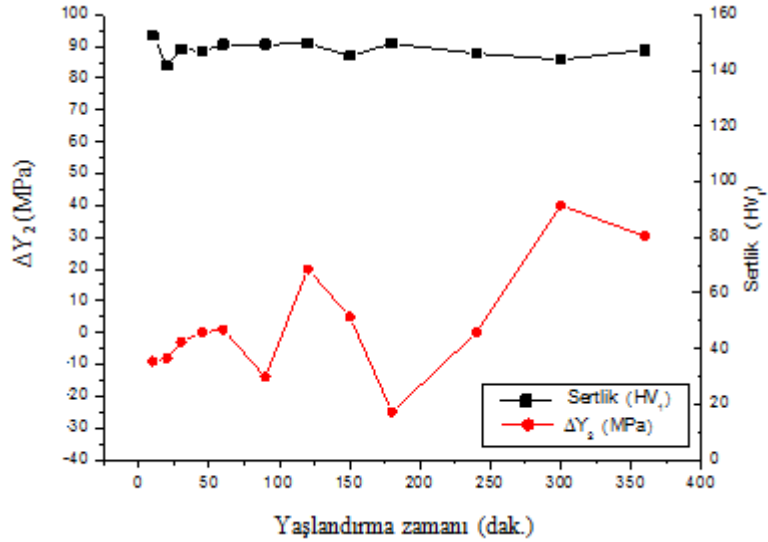
Homojenleştirme+normalizasyon ısıtıl işlemleri uygulanmış şekliyle 50 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin sertlik değişimi, akma ve çekme dayanımlarında meydana gelen değişimle tamamen paralellik arz etmemektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi yaşlanmaya bağlı akma ve çekme dayanımındaki nispeten daha belirgin değişim, sertlik değerlerinde tespit edilememiştir. Bu durum 50 °C gibi oldukça düşük, neredeyse oda sıcaklığına yakın, bir sıcaklıkta yapısında daha az serbest halde arayer atomu barındıran ferritik+perlitik iç yapıya sahip çelik içerisinde difüzyonun daha yavaş ve uzun sürelerde meydana gelmesi yaşlanmadan dolayı mukavemet artışına daha belirgin yansırken, sertlik artışına etkisi belirgin yansımadağı düşünölmektedir.

4.3.2.4. Homojenleştirme+Normalizasyon Isıl İşlemleri Uygulanmış Şekliyle Yaşlandırılan Numunelerin Statik Yaşlanma Davranışları

Bölüm 4.2.2.4'de belirtildiği üzere, statik gerinim yaşlanmasının en belirgin göstergesi numunenin akma dayanımındaki değişimdir. Bu sebeple homojenleştirme+normalizasyon ısıtıl işlemleri uygulanmış şekliyle, % 5 öndeformasyondan sonra 50 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan jant çeliğinin yaşlanmaya bağlı mekanik özelliklerindeki değişim araştırılmıştır. Bu amaçla akma dayanımı ile sertlik arasında ve yalnızca statik yaşlanmadan dolayı akma dayanımında değişim miktarı olan (ΔY_2) ile sertlik arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 4.18. ve 4.19'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra, 50 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine bağlı olarak akma dayanımı - sertlik arasındaki ilişki.



Şekil 4.19. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra, 50 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine bağlı olarak yalnızca yaşlanmadan dolayı akma dayanımında değişim (ΔY_2) - sertlik arasındaki ilişki.

Şekil 4.18 ve 4.19'dan görüldüğü gibi homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 50 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin mekanik özelliklerindeki etkisinin en belirgin olduğu parametreler akma dayanımı ve yalnızca yaşlanmadan dolayı dayanım artışı

olan (ΔY_2) ve sertlik değişimi değerleridir. 50 °C gibi oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta 160 °C sıcaklıktaki yaşlandırma zamanlarına göre daha uzun yaşlandırma sürelerinde statik gerinim yaşlanması uygulanan numunelerde yaşlanmadan dolayı akma dayanım değişimi (ΔY_2) en belirgin sırasıyla 120 ve 300 dakika yaşlanma zamanlarında meydana gelmiş ve sırasıyla 20 MPa ve 40 MPa olarak hesaplanmıştır.

Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle 276 MPa akma dayanımına sahip numunenin akma dayanımı soğuk şekillendirme (ndeformasyon) (ΔY_1) birlikte 87 MPa artarak 252 MPa değerine ulaşmıştır. 50°C sıcaklıkta 10 dakikalık yaşlanma zamanında yaşlanmadan kaynaklı akma dayanımındaki değişim miktarı, 9MPa azalma göstererek, akma dayanımı 343 MPa bulunmuştur.

Diğer bir ifadeyle numunede yalnızca statik gerinim yaşlanmasına bağlı olarak meydana gelen akma dayanım artışı ilk defa 120 dakika yaşlanma zamanında 20MPa olarak hesaplanmıştır. Daha sonraki zaman diliminde numunenin aşırı yaşlanma evresine girdiği ve malzemenin akma dayanımı soğuk şekillendirme ile kazanılan dayanım (ΔY_1) değerinin altına (352MPa) ve/veya seviyelerine düştüğü tespit edilmiştir. Ancak yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki artış yönündeki değişim 40 MPa olarak 300 dakika yaşlandırma zamanında tespit edilmiştir.

Sonuçlar ağır iş makinelerinin jant çeliği olarak kullanılan S275JRC çeliğinin homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra 50°C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik gerinim yaşlanmasına maruz bırakıldığında belirgin olarak ilk defa 120 dakika daha sonra 300 dakika gibi uzun yaşlandırma sürelerinde tekrarlı yaşlanma eğilimi gösterdiğine işaret etmektedir.

Ancak yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı(ΔY_2) ile sertlik arasındaki ilişkiyi ifade eden şekil 4.19'daki grafikten görüldüğü üzere sırasıyla 120 ve 300 dakikalık yaşlanma zamanlarında belirgin bir sertlik artışı meydana gelmemiştir. Yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı ile sertlik sonuçları genel eğilim olarak paralellik arz etmesine rağmen sertlik değerlerindeki değişim (ΔY_2) değerleriyle mukayese edildiğinde oldukça düşük bulunmuştur. Daha öncede ifade edildiği gibi yaşlanmaya bağlı akma ve çekme dayanımındaki nispeten daha belirgin değişim, sertlik

değerlerinde tespit edilememiştir. Bu durum 50 °C gibi oldukça düşük sıcaklıkta yapısında daha az serbest halde arayer atomu barındıran ferritik+perlitik iç yapıya sahip çelik içerisinde difüzyonun daha yavaş ve uzun sürelerde meydana gelmesi, yüksek karbonlu çeliklerin oda sıcaklığı ve 95 °C sıcaklıkta daha düşük yaşlanma indeksine sahip olması yaşlanmadan dolayı mukavemet artışına daha belirgin yansırken, sertlik artışına etkisi belirgin yansımadağı düşünülmektedir.

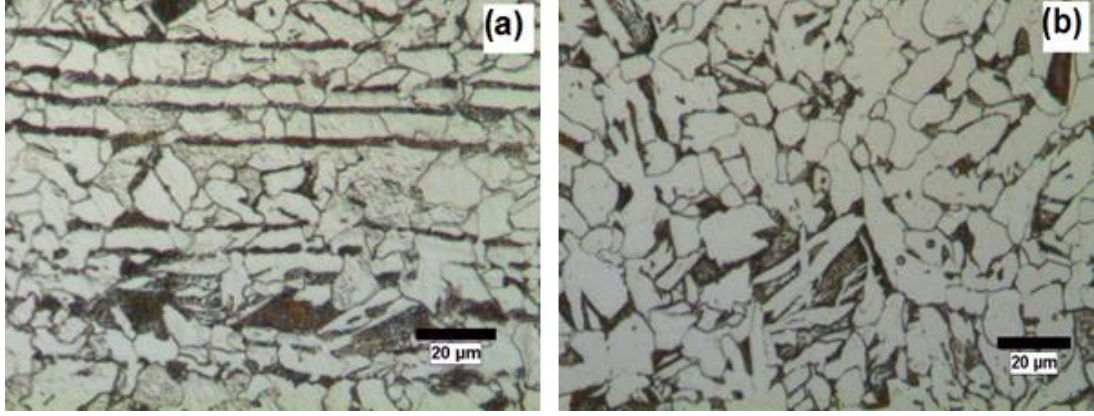
4.4. HOMOJENLEŞTİRME+NORMALİZASYON ISIL İŞLEMİ SONRASI 160°C SICAKLIKTA FARKLI SÜRELERDE YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN DENEYSEL SONUÇLARI

Ağır iş makinelerinin jant imalatında kullanılan S275JRC çeliği 1000 °C sıcaklıkta 180 dakika homojenleştirme ısıl işlemi ve ardından 890 °C’de 120 dakika normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra statik gerinim yaşlanma davranışı etraflıca araştırılmıştır. Bu amaçla % 5 öndeforme edilen deneysel numuneler 160 °C sıcaklıkta sırasıyla 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 ve 180 dakika ısıl işlem fırınında bekletilerek yaşlandırılmıştır. Farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan numunelerin mikroyapıları incelenerek değerlendirilmiştir. Belirtilen yaşlanma sıcaklığında yaşlanma zamanına bağlı olarak mekanik özellik değişimleri çekme deneyi ile belirlenmiştir. Deney sonuçları sırasıyla aşağıdaki bölümlerde paylaşılarak etraflıca irdelenmiştir.

4.4.1. Mikroyapı Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi

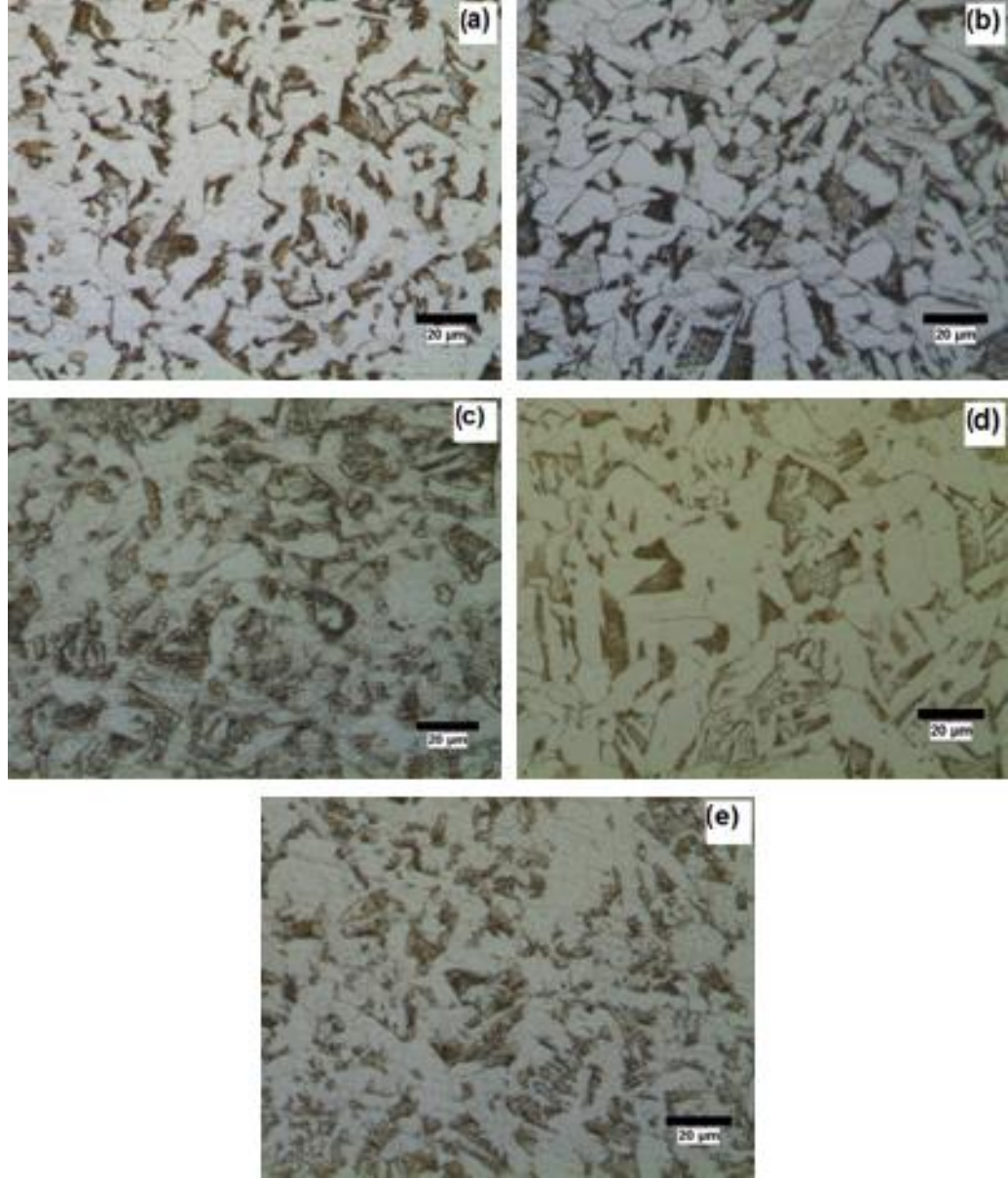
Çalışmada kullanılan S275JRC çelik numunenin ticari olarak temin edildiği şekliyle eşksenel ferritik-perlitik bir mikroyapıya sahip olduğu ilaveten yapıda üretim sürecine bağlı bantlaşmalar olduğu bölüm 4.2.1’de gösterilerek açıklanmıştı. Bu bantlaşmaları ortadan kaldırmak ve daha homojen bir yapı elde etmek için 1000 °C’ sıcaklıkta 180 dakika homojenleştirme ısıl işleminden sonra oda sıcaklığına kadar fırın içerisinde soğutulmuştur. Ardından 890 °C sıcaklıkta 120 dakika normalizasyon ısıl işlemi sonrası havada soğutma uygulanmasıyla bantlaşmaların kaybolduğu ve tane yapısında iyileşme olduğu bölüm 4.3.1’de gösterilerek değerlendirilmesi yapılmıştı. Ancak çalışmanın bu bölümünde de temin edildiği şekliyle ve

homojenleştirme+normalizasyon ısıt işlemleri uygulanmış şekliyle numunelerin mikroyapıları optik mikroskop yardımıyla incelenmiş sonuçlar sırasıyla Şekil 4.20 a-b' de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Deneylerde kullanılan a) temin edildiği şekliyle ve b) homojenleştirme+normalizasyon ısıt işlemleri yapılmış şekliyle numunelerin mikroyapı görüntüsü.

Çalışmada kullanılan çeliğin homojenleştirme+normalizasyon ısıt işlemleri uygulandıktan sonra servis şartlarında maruz kalacağı statik yükler etkisiyle oluşabilecek soğuk deformasyon miktarını temsil ettirebilmek amacıyla % 5 oranında öndeformasyon uygulanmıştır. Daha sonra imalat sürecinde ulaşılabilecek sıcaklığı temsil ettirebilmek amacıyla deney numuneleri 160 °C sıcaklıkta 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 ve 180 dakika zaman aralıklarında statik yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin mikroyapı görüntüleri incelenmiş, 10, 20, 30, 60, 90 dakika yaşlandırılan numunelerin mikroyapı sonuçları Şekil 4.21 a-f' de gösterilmiş, perlit ve ferrit faz oranları ile tane boyutları Çizelge 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Deneylerde kullanılan a) homojenleştirme+normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon uygulandıktan sonra 160 °C sıcaklıkta 10 dakika b) 20 dakika c) 30 dakika d) 60 dakika e) 90 dakika yaşlandırılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri.

Şekil 4.21.a-e ve Çizelge 4.5'den görüldüğü gibi homojenleştirme+normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin yaşlandırma zamanına bağlı olarak ferritik-perlitik iç yapısında ve tane boyutunda farklılık görülmemektedir.

Çizelge 4.5. Homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemi uygulandıktan sonra %5 öndeformasyon uygulanmış 160°C sıcaklıkta 10, 20, 30, 60 ve 90 dakika yaşlandırılan numunelerin % perlit ve ferrit faz oranları ile tane boyutları.

160 °C sıcaklıkta	% Perlit Oranı	Perlit tane boyutu (µm)	% Ferrit Oranı	Ferrit tane boyutu (µm)
10 dakika	26,5	6,32	73,5	9,64
20 dakika	30,13	6,29	69,87	8,33
30 dakika	38,9	6,38	61,1	8,86
60 dakika	24,41	4,92	75,59	8,81
90 dakika	29,02	6,09	70,98	9,08

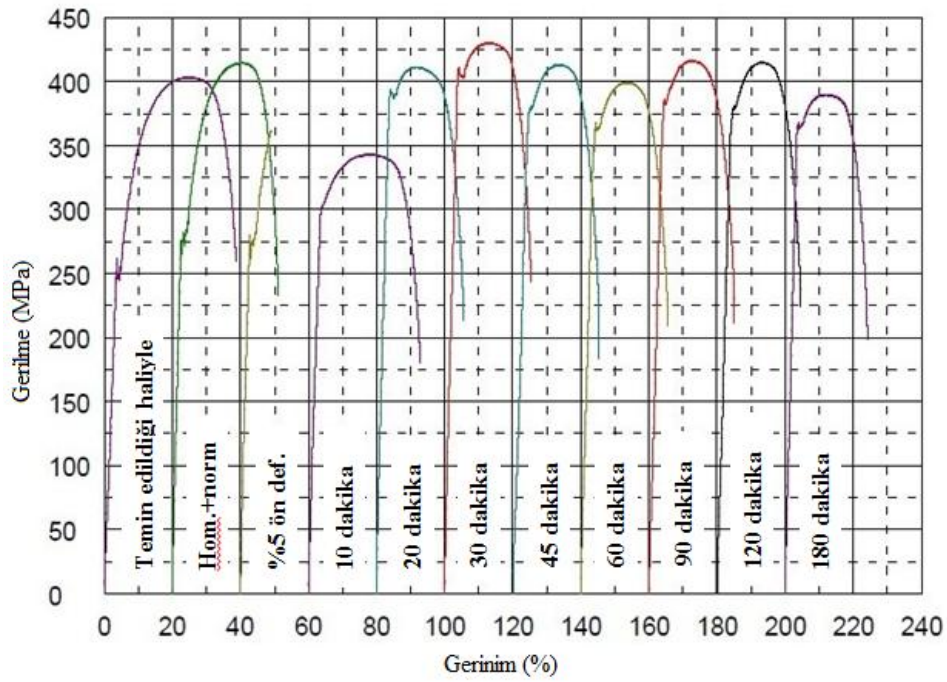
Daha önceki bölüm 4.2 ve 4.3’de ifade edildiği gibi malzemenin yaşlanma karakteristiğinde yaşlanmadan önceki mikroyapısının etkisi büyüktür. Çünkü alaşımın kimyasal kompozisyonu, üretim süreci ve uygulanan ısıtma işlemleri mikroyapıyı etkiler. Örneğin, çeliğin statik yaşlanma eğiliminin zayıf olması, malzemenin karbür oluşturma eğiliminin yüksek olması sebebiyle katı ergiyik içerisinde arayer atomlarında azalma ile açıklanır. Genelde çelik içerisinde kuvvetli karbür ve nitrür oluşturuşu alüminyum, krom, vanadyum, titanyum ve niobium miktarı statik gerinim yaşlanma davranışını etkiler. Çünkü bu karbür ve nitrür oluşturuşu katı ergiyik içerisindeki karbon ve azot gibi arayer atomlarının miktarını düşürür. Karbür ve nitrür oluşturuşu elementlerinin yanı sıra statik gerinim yaşlanmasını düşüren katı ergiyik içerisinde mangan ve silisyum gibi yer alan atomları da vardır. Bu elementler ferritik yapıda arayer atomlarıyla reaksiyona girerek onların hareketini engellerler ve böylece statik gerinim yaşlanmasını geciktirirler.

4.4.2. Mekanik Özellik Deney Sonuçları ve Sonuçların İrdelenmesi

Homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden sonra, 160°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma zamanlarında yaşlandırılan numunelerin mekaniksel özellikleri sırasıyla çekme deneyi, yorulma dayanımı ve sertlik ölçümü ile belirlenmiştir.

4.4.2.1. Çekme Deney Sonucu

Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işleminin uygulanmış şekliyle S275JRC çeliği % 5 öndeformasyon uygulandıktan sonra, 160°C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik gerinim yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin yaşlanma davranışları çekme testi ile belirlenmiştir. Yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi sonucu ortalama gerilme-% uzama eğrileri elde edilmiş ve grafiksel olarak Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

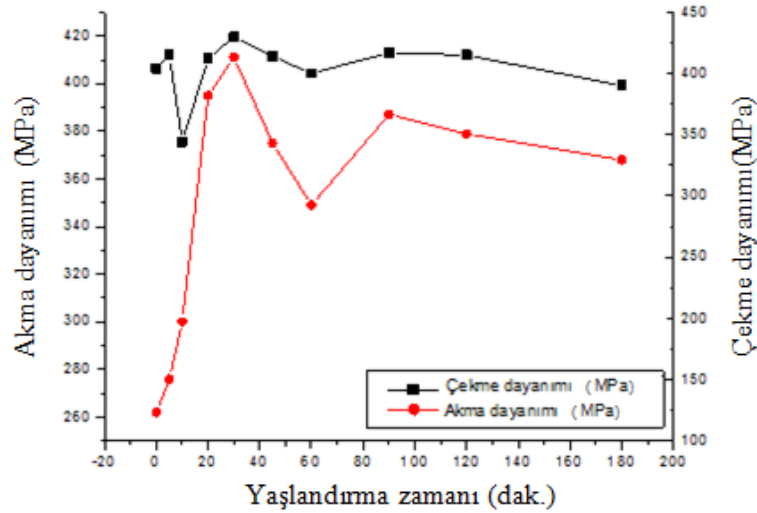


Şekil 4.22. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası, 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi gerilme - % uzama eğrileri.

Şekil 4.22’deki verilerden yararlanarak homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan numunelerin akma, çekme dayanımlarındaki ve % uzama miktarlarındaki değişimin yanı sıra sadece yaşlanmadan kaynaklanan akma dayanımındaki değişim olan (ΔY_2) eğriler üzerinden hesaplanarak Çizelge 4.6’da verilmiştir. Ayrıca statik gerinim yaşlanmasına tabi tutulan numunelerin akma ve çekme dayanımındaki değişim grafiksel olarak Şekil 4.23’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemleri uygulanmış şekliyle, % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zamanlarda yaşlandırılan numunelerin ortalama çekme deneyi verileri.

Yaşlanma Süresi (dakika)	Akma Dayanımı (MPa)	ΔY_2 (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Orjinal	262	-	404	24,6
Hom+normalizasyon	276	-	415	22,4
10	300	-52	344	18,6
20	395	43	412	11,3
30	411	59	430	12,6
45	375	23	414	13,7
60	349	-3	400	13,8
90	387	35	417	12,1
120	379	27	415	13,6
180	369	16	390	11,9



Şekil 4.23. Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemleri uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 160 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin yaşlandırma zamanı ile akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişki.

Şekil 4.22 ve 4.23 ve Çizelge 4.6'dan görüldüğü gibi; homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemlerinden sonra numunelerin akma dayanımlarında, temin edildiği şekliyle test edilen numunenin akma dayanımına oranla, yaklaşık 15 MPa belirgin bir artış bulunmuş ve çelik standardında belirtilen minimum 275 MPa akma dayanım değerine ulaşılmıştır. Akma dayanımındaki bu artış bölüm 4.3'de ifade edildiği gibi homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemleri ile oluşturulan homojen ve ince taneli yapıya atfedilebilir.

Şekil 4.22 ve 4.23 ve Çizelge 4.6'dan görüldüğü gibi homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle 160 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan numunelerin akma ve çekme dayanımlarında aynı sıcaklıkta temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunelere oranla daha belirgin bir artış görülmektedir. Jant imalatında da kullanılan S275JRC çeliğinin gerilme-%uzama grafiği; 30 dakika yaşlandırma zamanına kadar numunelerin 10 dakika yaşlandırma zamanındaki çekme dayanımı haricinde, akma ve çekme dayanımında belirgin bir artışın yaşandığı görülmektedir. Daha sonraki yaşlanma zamanları olan 45 ve 60 dakika zaman aralıklarında aşırı yaşlanmaya bağlı olduğu düşünülen numunelerin akma ve çekme dayanımında bir azalma tespit edilmiştir. Temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunelerde olduğu gibi homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi sonrası yaşlandırılan bu numunelerin akma ve çekme dayanımında 90 dakika yaşlanma zamanından sonra tekrar bir artış meydana gelerek 120 dakika yaşlandırma zamanında bu artış ikinci defa en yüksek değerine ulaşmıştır. Daha uzun yaşlandırma zamanında ise (180 dakika) gibi numunenin aşırı yaşlanmayla ilişkili olduğu düşünülen akma ve çekme dayanımında tekrar bir azalma tespit edilmiştir.

Aynı sıcaklıkta aynı zaman dilimlerinde temin edildiği şekliyle öndeformasyon işleminden sonra yaşlandırılan numunelerin gerilme-%uzama grafiği ile kıyaslandığında homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle yaşlandırılan numunelerin ilk dayanım artışının yaşandığı optimum yaşlanma zamanında (30 dakika) 10 dakikalık bir gecikme tespit edilmiştir. İkinci defa dayanım artışının yaşandığı yaşlanma zamanı ise temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunede homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle yaşlandırılan numuneye oranla 30 dakika daha uzun yaşlanma zamanında, yarım saatlik gecikme zamanıyla, 120 dakikada gerçekleşmiştir.

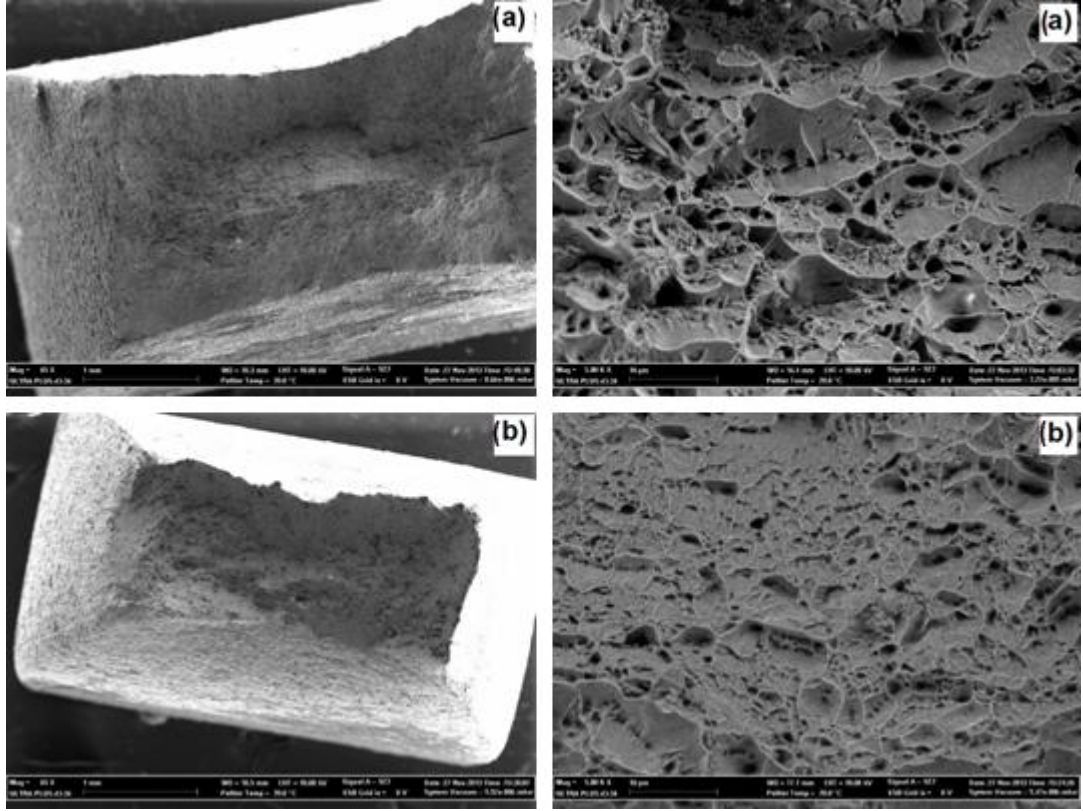
Örneğin; homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden sonra soğuk şekillendirmeye bağlı dayanım artışı olan (ΔY_1) miktarı yaklaşık 90 MPa artış göstermiştir. Yalnızca yaşlanmadan dolayı olan dayanım artışı olan (ΔY_2) miktarı 10 dakikalık yaşlanma zamanında kayda değer miktarda azalma gözlemlenmiş ve bu azalma miktarı 52 MPa olarak tespit edilmiştir.

20 dakika yaşlanma zamanında 43 MPa, 30 dakika yaşlanma zamanında ise en büyük yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı bulunmuş bu artış yaklaşık 59 MPa olarak tespit edilmiştir. Başka bir deyişle 30 dakika yaşlanma zamanında (ΔY_2) miktarında en büyük artış gözlemlenmiştir. Yaşlanmadan dolayı dayanım artışı olan (ΔY_2) değeri ticari olarak temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunenin değeriyle (29 MPa) mukayese edildiğinde yaklaşık 30 MPa daha fazla bulunmuştur. Bu durum homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemleri uygulanmış şekliyle yaşlandırılan numunede daha fazla serbest halde arayer atomunun katı ergiyik içerisinde bulunduğuna işaret etmektedir.

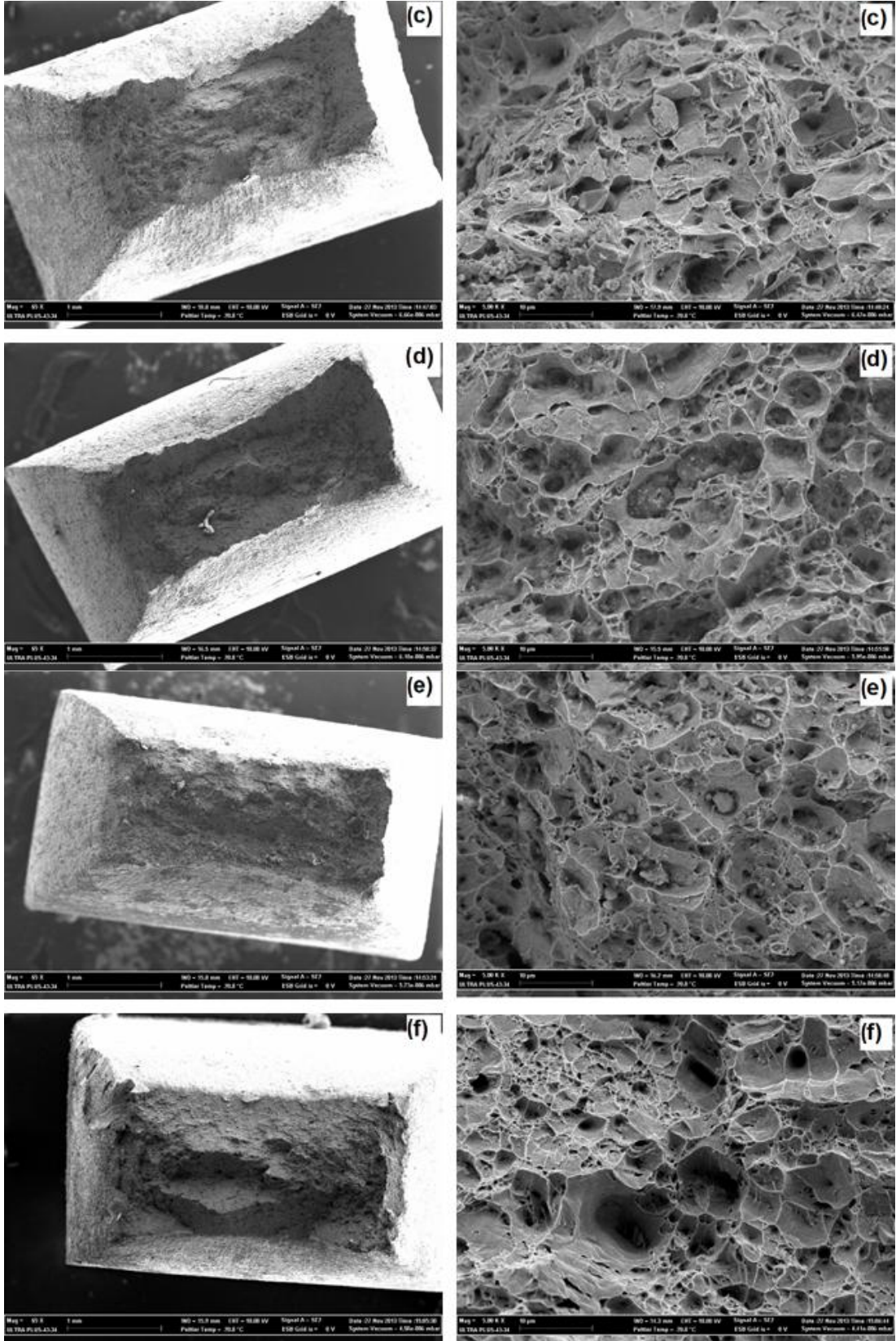
30 dakika yaşlanma zamanından sonra yaşlanmadan dolayı dayanım artışı azalma eğilimine girmiş ve (ΔY_2) 45 dakika yaşlanma zamanında 23MPa olarak bulunmuştur. Aşırı yaşlanmaya bağlı olarak 60 dakika yaşlanma zamanında (ΔY_2) değeri, soğuk şekillendirilmeyle kazanılan dayanım değeri olan (ΔY_1) altında 3 MPa azalma göstermiştir. Ancak 90 dakika yaşlanma zamanında (ΔY_2) değeri ikinci defa en yüksek artış göstererek 35 MPa artış bulunmuştur. Aynı sıcaklıkta temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numuneye oranla ikinci defa yaşlanmadan dolayı dayanım artışı 19 MPa daha yüksek meydana geldiği göze batan önemli hususlardan bir tanesidir. Daha uzun yaşlandırma zamanlarında (ΔY_2) değeri ikinci defa azalma eğilimine girmiş ve 120 dakika yaşlanma zamanında 27 MPa, 180 dakika yaşlanma zamanında ise 16 MPa artış gösterdiği tespit edilmiştir. Yaşlanmadan dolayı akma dayanımında meydana gelen değişimler numunenin yaşlandığına ve uzun zaman dilimli yaşlandırma sürecinde tekrarlı yaşlandırmaya maruz kaldığına işaret etmektedir.

Daha önceki bölümdede ifade edildiği gibi, bu durum yaşlandırılan çeliğin ferritik-perlitik iç yapıya sahip olması ve katı ergiyik içerisindeki serbest halde çözünen atomların karbür ve nitür yapıcı elementler tarafından bağlanarak hareketli dislokasyonlara doğru ilerlemelerinin engellenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıda önceden oluşan sementitin veya tane sınırlarında çökelen karbür, nitür veya karbonitrürlerin uzun zaman dilimli yaşlandırma sürecinde gerisi geriye difüzyonla çözünerek tekrar dislokasyon hareketine engel çıkarak dayanım artışına diğer bir ifadeyle tekrarlı yaşlanmalara sebep olduğu düşünülmektedir.

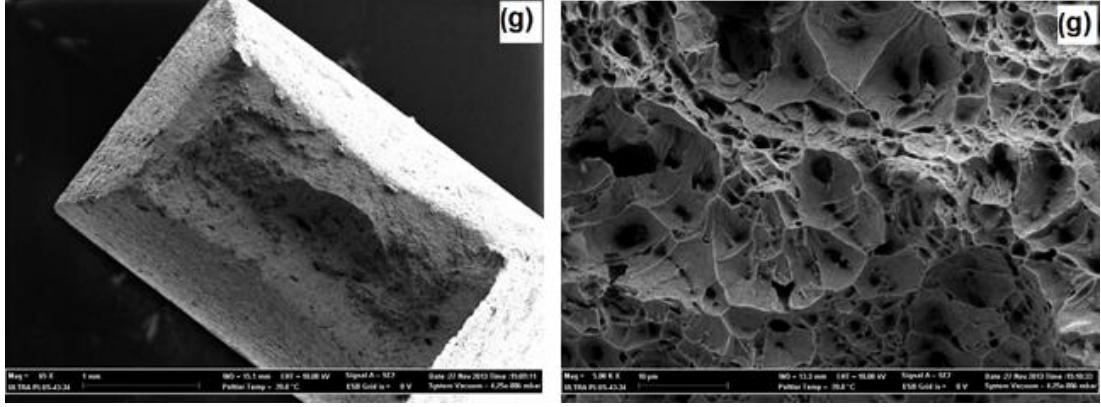
Gerilme-%uzama eğrilerinde göze batan önemli bir hususta homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi sonrası 50 °C gibi oldukça düşük sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan çeliğin ferritik+perlitik bir iç yapıya sahip olması sebebiyle 90 dakika yaşlandırma zamanına kadar Luder bantları görülmez iken, 160 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerde 20 dakika yaşlandırma zamanından daha uzun yaşlandırma sürelerinde çok belirgin hale gelmiştir. Ayrıca çalışmada temin edildiği şekliyle, homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta 10, 20, 30, 60, 90 dakika yaşlandırma zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi sonrası kırılma yüzeyleri de incelenmiştir. Kırık yüzey görüntüleri Şekil 4.24 a-g'de gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Homojenleştirme + normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyona işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılmış numunelerin kırık yüzey resimleri.



Şekil 4.24. (devam ediyor).



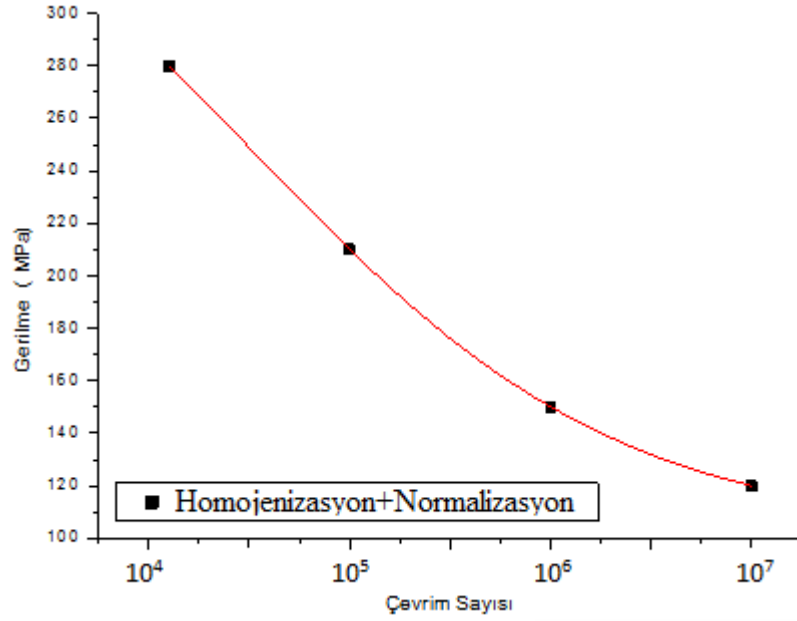
Şekil 4.24. (devam ediyor).

Şekil 4.24'den görüldüğü gibi kırık yüzey resimleri homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 160 °C sıcaklıkta, farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin genelinde sünek kırılma davranışı ile ayrılmaların meydana geldiği görülmektedir. Ancak artan yaşlanma zamanına bağlı olarak numunelerin kırılma yüzeyinde daha parlak klivaj tane içi kırılmalarında rastlanmaktadır. Yaşlanmadan dolayı en fazla dayanım artışının yaşandığı 30 dakika yaşlanma zamanında test edilen numunede bu klivaj ayrılmaları daha belirgindir. İlave 30 dakika yaşlanma zamanında test edilen numunenin kırık yüzeyinde görülen çukurların içerisinde ikincil faz parçacığı olduğu düşünülen oluşumlarda görülmektedir. Ana matrise göre daha sert olan bu oluşumlar tek yönlü uygulanan aksenal çekme kuvveti sırasında kırılma başlangıç yeri olarak davrandıkları düşünülmektedir.

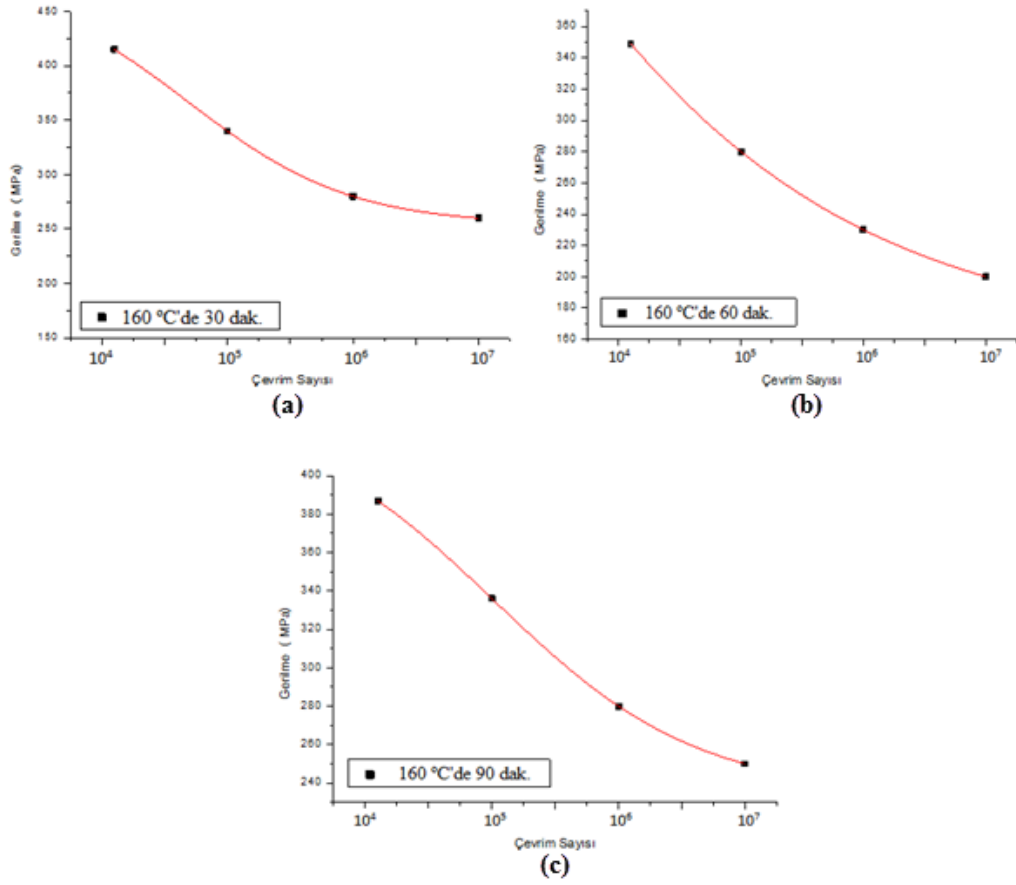
Çalışmada dikkat çekici bir hususta bu oluşumların daha sonraki yaşlanma zamanında yaşlandırılan numunelerin kırılma yüzeylerinde bulunmamasıdır. Bu durum oluşumların daha uzun yaşlanma zamanlarında çözünerek ileriki yaşlandırma zamanlarında tekrar yaşlanmaya sebep olabilirler. Nitekim bu çalışmada meydana gelen ikinci defa yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı tespit edilmesi yapı içerisinde çözüldüğü düşünülen bu oluşumlarla alakalı olabilir.

4.4.2.2. Yorulma Deneyi Sonucu

Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle Şekil 4.25’ de ve %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta sırasıyla yaşlanmaya bağlı optimum, minimum ve ikinci defa dayanım artışının yaşandığı 30, 60, 90 dakika yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımları belirlenmiş ve sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.26 a-c’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.



Şekil 4.26.Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 160 °C sıcaklıkta a) 30 dakika, b) 60 dakika ve 90 dakika yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.

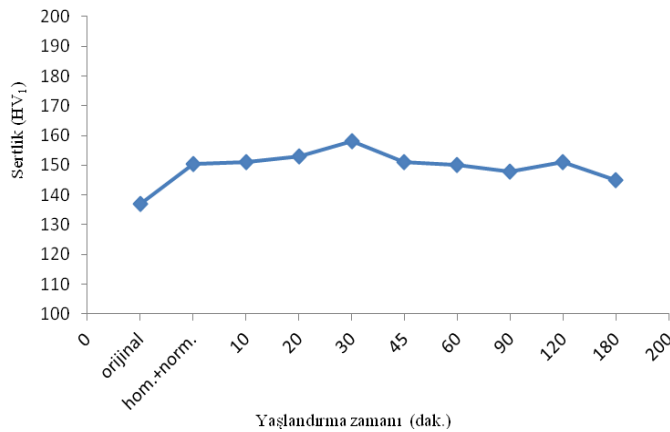
Şekil 4.26 a-c'den görüldüğü üzere homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta 30, 60, 90 dakika yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımları incelendiğinde tüm numuneler için 10⁷ çevrim sayısı olan yorulma ömrüne ulaşılmıştır. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış çeliğe %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Optimum yaşlandırma dayanım artışının elde edildiği 30 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımı en yüksek bulunmuş ve 255 MPa olarak tespit edilmiştir. Aşırı yaşlanmaya bağlı dayanım azalmasının yaşandığı 60 dakika yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımı ise en düşük bulunmuş ve 200 MPa olarak tespit edilmiştir. İkinci defa dayanım artışının yaşandığı 90 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımında dayanım artışına bağlı bir artış bulunmuş ve 250 MPa tespit edilmiştir. Yorulma deney sonucu

yaşlandırmaya bağlı dayanım artışı ile yorulma dayanımı belirgin bir şekilde paralellik arzettiğine işaret etmektedir.

4.4.2.3. Sertlik Ölçüm Sonucu

S275JRC çelik homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemi uygulanmış şekilde % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılmış numunelerin sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

Şekil 4.27’den görüldüğü gibi artan yaşlandırma zamanına bağlı olarak homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemi uygulandıktan sonra yaşlandırılan numunelerin sertliğinde belirgin değişim tespit edilmiştir. Örneğin, temin edildiği şekilde 137 HV₁ ortalama sertlik değerine sahip numunenin sertliği 160 °C sıcaklıkta sırasıyla 10 ve 20 dakika yaşlanma zamanlarında statik gerinim yaşlanmasına maruz bırakıldıktan sonra yaklaşık 14 HV₁ ve 16 HV₁ artış göstermiştir. Yaşlanmadan dolayı maksimum dayanım artışının yaşandığı 30 dakikalık yaşlandırma zamanında ise sertlikte 20 dakikalık yaşlanma zamanına göre yaklaşık 5 HV₁ artış tespit edilmiş ve sertlik 159 HV₁ ölçülmüştür. Diğer bir ifadeyle 30 dakikalık yaşlandırma zamanında deney numunesinin sertliği yaklaşık olarak malzemenin temin edildiği şekilde sahip olduğu sertlik değerinden 21 HV₁ artmıştır.



Şekil. 4.27. Homojenleştirme+normalizasyon ısıtma işlemi uygulanmış şekilde % 5 öndeformasyon işlemi sonrası 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin ortalama sertlik sonucu.

Aşırı yaşlanma evresine geçişle birlikte sertlikte bir azalma eğilimi başlamıştır. Örneğin, 45 ve 60 dakikalık yaşlandırma zamanında deney numunesinin sertliği, 30 dakika yaşlandırma zamanında elde edilen sertlik değerinden yaklaşık olarak sırasıyla 7 HV₁ ve 8 HV₁ azalmıştır. Daha uzun yaşlandırma dilimlerinde yaşlanmadan dolayı tekrar dayanım artışının sağlandığı zaman aralıklarında sırasıyla 90 ve 120 dakika yaşlandırma zamanlarında ise temin edildiği şekliyle numunenin sertlik değerine göre sırasıyla yaklaşık olarak tekrar 11 HV₁ ve 14 HV₁ sertlik artışı meydana gelmiştir. Meydana gelen bu sertlik artış eğilimi yaşlanmadan kaynaklanan akma dayanım artışına oranla daha az belirgin olarak meydana gelmiştir. 180 dakika gibi daha uzun yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunenin sertliğinde 120 dakikada yaşlandırılan numuneye oranla 6 HV₁ tekrar bir azalma bulunmuştur. Bu durumun yaşlanma sırasında oluşan çökeltilerin tekrar büyüyerek birim dislokasyon başına düşen çökelti miktarının azalmasına ve kabalaşan çökeltileri dislokasyonların keserek yollarına devam ettiklerine işaret etmektedir. Ancak Çizelge 4.6'daki %kopma uzaması miktarında diğer ifadeyle kendini şekillendirilebilirlikte belirgin artış olarak göstermemiştir.

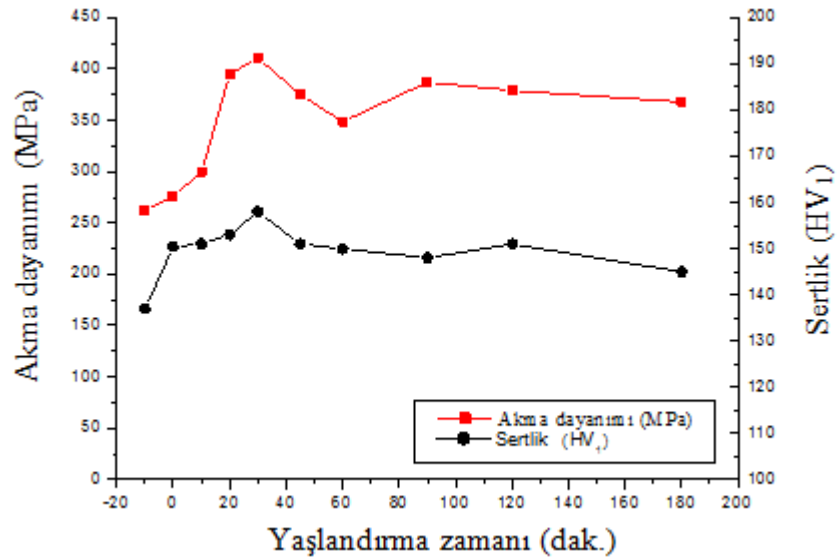
Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin sertlik değişimi akma ve çekme dayanımlarında meydana gelen değişime uygun paralellik arz etmektedir.

Şekil 4.27'den görüldüğü gibi artan yaşlandırma zamanına bağlı olarak homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandıktan sonra 50°C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerle kıyaslandığında 160°C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin sertliğinde değişim çok daha belirgin bulunmuştur. Örneğin, temin edildiği şekliyle 137 HV₁ ortalama sertlik değerine sahip deney numunesinin sertliği homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi sonunda yaklaşık 150 HV₁ değerine çıkmıştır. 50 °C sıcaklıkta yaşlanmadan dolayı meydana gelen sertlik artışı maksimum 5 HV₁ iken 160 °C sıcaklıkta optimum yaşlanma zamanındaki bu değişim yaklaşık 21 HV₁ tespit edilmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi homojenleşme+normalizasyon ısıl işlemi sonucunda yaklaşık 13 HV₁ sertlik artışı tane boyutu iyileşmesi ve öndeformasyondan dolayı çalışma sertleşmesi ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Statik gerinim yaşlanmasından kaynaklanan sertlik artışının

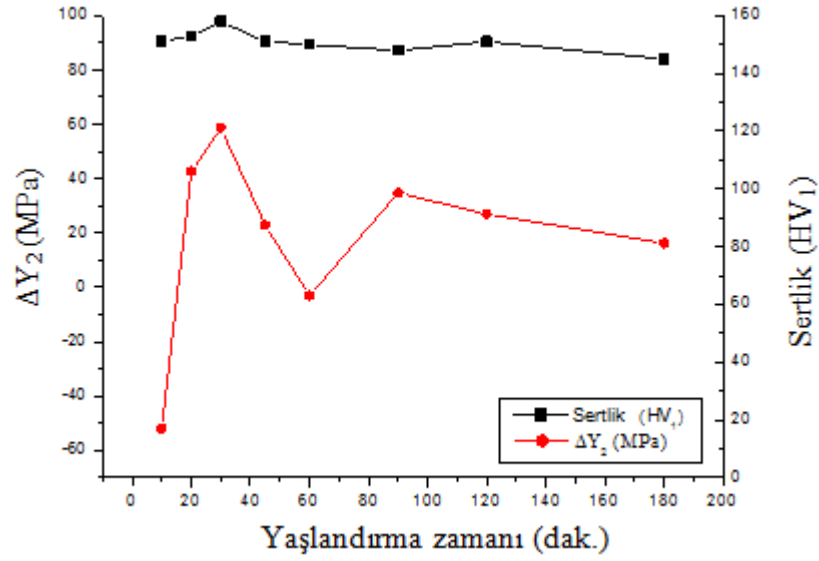
daha belirgin olmasının arkasında ise katı ergiyik içerisindeki serbest arayer atomlarının 160°C sıcaklıkta, daha kısa zaman diliminde hareketli dislokasyonların olduğu bölgelere hızla yayılarak ve orada çökelti oluşturarak dislokasyon hareketine engel çıkararak dayanım artışına dolayısıyla sertlik artışına sebep olduğu düşünülmektedir.

4.4.2.4. Homojenleştirme+Normalizasyon Isıl İşlemi Uygulandıktan Sonra 160°C 'de Yaşlandırılan Numunelerin Statik Yaşlanma Davranışları

Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle 160 °C sıcaklıkta, farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan, soğuk şekillendirmeye uygun çeliğin, yaşlanmaya bağlı mekanik özelliklerindeki değişim araştırılmıştır. Bu sebeple sırasıyla akma dayanımı ile sertlik arasında ve yalnızca statik yaşlanmadan dolayı değişim miktarı olan (ΔY_2) ile sertlik arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 4.28 ve 4.29'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra, 160 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine bağlı olarak akma dayanımı - sertlik arasındaki ilişki.



Şekil 4.29. Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra, 160 °C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerin yaşlanmadan dolayı akma dayanımı (ΔY_2) - sertlik ilişkisi.

Şekil 4.28 ve 4.29'dan görüldüğü gibi homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası, 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin mekanik özelliklerindeki yaşlanmanın etkisinin en belirgin olduğu parametreler akma dayanımı ve yalnızca yaşlanmadan dolayı dayanım artışı olan (ΔY_2) ve sertlik değişimi değerleridir.

Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle 276 MPa akma dayanımına sahip numunenin, akma dayanımı soğuk şekillendirme (öndeformasyon) (ΔY_1) birlikte 87MPa artarak yaklaşık 352 MPa değerine ulaşmıştır. 160°C sıcaklıkta 10 dakikalık yaşlanma zamanında yaşlanmadan kaynaklanan akma dayanımındaki değişim miktarı, yaklaşık 52 MPa azalma göstererek, 300 MPa bulunmuştur. Akma dayanımındaki belirgin azalmanın sebebi olarak serbest arayer atomlarının bir araya gelerek Cottrell atmosferi oluşturmaları sırasında kafeste bol miktarda boş yer hatası oluşturması ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Daha uzun yaşlanma zamanı ile birlikte yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı ile numunelerin akma dayanımı 20 dakika yaşlandırma zamanı için 43MPa ve 30 dakikalık yaşlanma zamanı için 59 MPa artarak sırasıyla 395MPa ve 411MPa bulunmuştur. 30 dakikalık yaşlanma zamanında numunenin maksimum çekme

dayanımı ise homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulandığı şekline oranla yaklaşık 15 MPa artış göstererek 430MPa değerine ulaşmıştır.

Bu çalışmada; akma dayanımında oluşan 59 MPa ve çekme dayanımında meydana gelen 15MPa artış S275JRC çeliğinin deformasyon yaşlanması ile kazandırılan maksimum dayanım artışı olarak bulunmuştur. Ticari olarak temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle 50 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelere oranla daha yüksek meydana gelen dayanım artışının arkasında şu hususlar yatmaktadır. Isıl işleme bağlı olarak malzemenin homojen bir yapıya kavuşarak, normalizasyon ısıl işlemi sonrasında ise tane boyutunun iyileşme göstererek, havada soğutma sürecinde ise yapısında daha fazla serbest arayer atomlarının katı ergiyik içerisinde kalmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

Daha sonraki zaman diliminde numunenin aşırı yaşlanma evresine girdiği 60 dakika yaşlanma zamanında malzemenin akma dayanımı soğuk şekillendirme ile kazanılan dayanım (ΔY_1) 352MPa değerinin 3MPa altına 249MPa seviyesine düştüğü tespit edilmiştir. Dayanım azalması aşırı yaşlanmaya bağlı dislokasyon başına düşen çökelti sayısındaki azalma ve çökelti kabalaşması ile ilişkilidir.

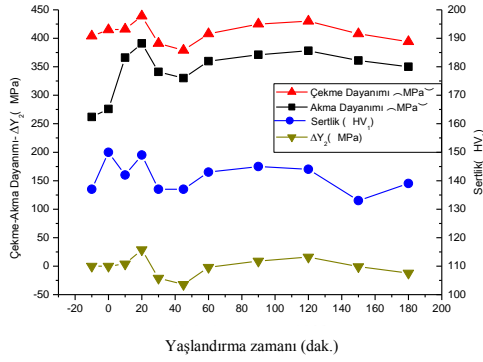
Daha sonraki yaşlanma zamanlarında ferritik-perlitik içyapıya sahip çelik içerisindeki sementitin veya tane sınırlarında bulunan çökeltilerden gerisi geriye difüzyonla ortama bırakılan serbest atomlar tekrar dislokasyonlarla etkileşime girerek ikinci defa dayanım artışına sebep olmaktadırlar. 90 dakika yaşlanma zamanında yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki artış 35 MPa değerine ulaşarak tekrarlı bir yaşlanmaya işaret etmektedir. Daha uzun yaşlanma zamanlarında malzemenin akma ve çekme dayanımında tekrar bir azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Örneğin 180 dakika yaşlanma zamanında dayanımda meydana gelen azalma 90 dakika yaşlanma zamanında elde edilen değer yarısı kadar oluşmuştur.

Sonuçlar iş makinelerinin jant çeliği olarak kullanılan S275JRC çeliğinin homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyondan sonra 160°C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik gerinim yaşlanmasına maruz bırakıldığında belirgin olarak ilk defa 30 dakika daha sonra 90 dakika gibi yaşlandırma sürelerinde tekrarlı yaşlanma eğilimi gösterdiğine

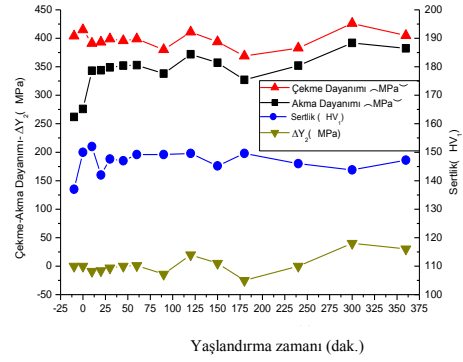
işaretetmektedir. İlk optimum dayanım artışının sağlandığı bu yaşlandırma zamanı, aynı sıcaklıkta temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numuneye göre, 10 dakika sonra, fakat ikinci optimum dayanım artışının sağlandığı duruma göre ise yaklaşık 30 dakika daha önce meydana gelmiştir. Bu durum difüzyon hızı ve temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunenin kafes yapısındaki üretim sürecine bağlı olarak meydana gelen deformasyonlarla ilişkilendirilebilir. Ancak yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı(ΔY_2) ile sertlik arasındaki ilişkiyi ifade eden Şekil 4.29'daki grafikten görüldüğü üzere sırasıyla 30 dakikalık yaşlanma zamanında belirgin bir sertlik artışı meydana tespit edilirken ikinci defa tekrar eden yaşlanmadan dolayı dayanım artışının yaşandığı 90 dakika yaşlanma zamanında sertlik artışı çok belirgin bulunmamıştır. Bu durum yapısında daha az serbest halde arayer atomu barındıran ferritik+perlitik iç yapıya sahip çelik içerisinde difüzyonun daha yavaş ve uzun sürelerde meydana gelmesi yaşlanmadan dolayı mukavemet artışına daha belirgin etkisini gösterirken, sertlik artışına etkisinin belirgin yansımadağı düşünülmektedir.

4.5. JANT ÇELİKLERİNİN STATİK YAŞLANMA DAVRANIŞI

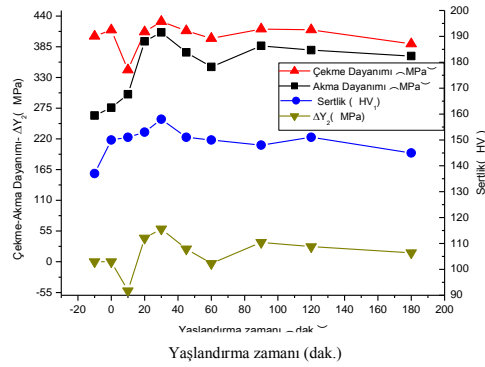
Deformasyon yaşlanması olarak bilinen statik gerinim yaşlanmasının en belirgin göstergesi numunenin akma dayanımındaki, hareketli dislokasyonlarla serbest arayer atomları ve çökeltilerin etkileşiminin, neden olduğu değişimdir. Temin edildiği şekliyle 160 °C sıcaklıkta ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle 50 °C ve 160 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan çeliğin yaşlanmaya bağlı mekanik özelliklerindeki değişim araştırılmıştır. Bu sebeple akma dayanımı, çekme dayanımı, yalnızca yaşlanmadan dolayı meydana gelen dayanım artışı (ΔY_2) ve sertlik ile yaşlanma zamanı arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 4.30 a.b ve c'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.30. a) Temin edildiği şekliyle, b) Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle 50 °C sıcaklıkta c) Homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle 160 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerin akma, çekme dayanımı, ΔY_2 ve sertlik ile yaşlanma zamanı arasındaki ilişki.

Şekil 4.30 a'dan görüldüğü gibi temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta, farklı zaman dilimlerinde yaşlandırılan jant çeliğinin statik gerinim yaşlanmasına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişim en belirgin olarak akma ve çekme dayanımı ile yaşlanmadan dolayı akma dayanımında değişim olan (ΔY_2) değerlerinde tespit edilmiştir.

Bilindiği üzere, metalik malzemelerin soğuk deformasyon işleminden sonra genelde düşük sıcaklıklarda tavlınması veya oda sıcaklığında uzun süre bekletilmesi sonucunda akma ve çekme mukavemetlerinin artması, sünekliğinin azalması olayı deformasyon yaşlanması olarak isimlendirilir. Soğuk deformasyon ile giderilmiş olan akma olayı, yaşlanmada tekrar görülür [83,84]. Akma ve çekme dayanımı

ileyaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki değişim ile yaşlanma zamanı arasındaki ilişkiyi net olarak ifade eden bu grafiklerde en belirgin husus şudur. Ferritik-perlitik: iç yapıdan oluşan jant çeliğinde dayanım artışına sebep olan yaşlanma mekanizma ve/veya mekanizmalarına bağlı olarak meydana gelen akma ve çekme dayanımı ile yalnızca yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki (ΔY_2) değişim ile yaşlanma zamanı belirgin bir paralellik arz etmesidir. Örneğin, temin edildiği şekliyle 262 MPa akma dayanımına sahip numunenin akma dayanımı soğuk şekillendirme (öndeformasyon) (ΔY_1) + yaşlanma kaynaklı dayanım artışıyla (ΔY_2) birlikte 160°C sıcaklıkta, 20 dakikalık yaşlanma zamanında en yüksek değeri olan 391 MPa ulaşmıştır. Diğer bir ifadeyle: numunede yalnızca statik gerinim yaşlanmasına bağlı olarak meydana gelen dayanım artışı maksimum 29 MPa olarak 20 dakika yaşlanma zaman diliminde gerçekleşmiştir. Daha sonraki zaman diliminde numunenin aşırı yaşlanma evresine girdiği ve malzemenin akma dayanımı 45 dakikalık yaşlanma zamanında soğuk şekillendirme ile kazanılan dayanım (ΔY_1) değerinin altına 330 MPa değerine düştüğü tespit edilmiştir. Daha sonraki yaşlanma süreçlerinde (uzun yaşlandırma zamanlarında) fırında sertleştirilebilen, arayer atomsuz ve çift fazlı çeliklerin yaşlanma davranışlarından daha farklı bir durum göze çarpmaktadır. Numunenin akma dayanımı ve yaşlanmadan dolayı gerilme değişimi tekrar bir artış eğilimine girmiştir. Bunun sonucunda 120 dakika yaşlanma zamanında akma dayanımı 378 MPa çıkarken, yalnızca yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı 16 MPa olarak bulunmuştur. 120 dakika yaşlandırma zamanından sonra tekrar dayanımda azalma eğilimi başlamıştır. 180 dakika yaşlanma zamanında numunenin akma dayanımı azalarak 350 MPa düşmüştür.

Kısacası sonuçlar ağır iş makinelerinin jant imalatında kullanılan S275JRC çeliği temin edildiği şekliyle % 5 öndeformasyondan sonra 160 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik gerinim yaşlanmasına maruz bırakıldığında 20 dakika gibi kısa zaman diliminde yaşlandığına işaret etmektedir. Kısa yaşlanma zamanı üzerinde numunenin yaşlandırma öncesi mikroyapısının, çözünen atomların dağılımının, dislokasyon yoğunluğunun ve numunenin sahip olduğu kalıntı gerilmelerin etkili olduğu düşünülmektedir. Yaşlanma kinetiklerinin kontrol edilmesindeki statik gerinim yaşlanmasından önceki malzemenin mikroyapısı da önemlidir. Ancak mikroyapı, alaşımın kimyasal kompozisyonu, üretim süreci ve uygulanan ısı

işlemler tarafından etkilenir. Örneğin, çeliğin hızlı soğutulması yüksek miktarda arayer atomunun katı ergiyik içerisinde kalmasına sebep olarak daha çabuk yaşlanma ve çökelti oluşumuna neden olur [84]. Ek olarak plastik gerinim, deformasyon tarihçesi, deformasyon durumu ve deformasyon yolu (path) da yaşlanma kinetiğini etkileyen unsurlardır. Gerinim düzensizliği ve kalıntı gerilmelerde statik gerinim yaşlanmasını etkiler.

Sonuç olarak statik gerinim yaşlanması yalnızca katı ergiyik içerisindeki çözünen arayer atomlarının elastik gerilme bölgelerinde dislokasyonlarla etkileştiğini esas alan tek bir modelle açıklanamaz. Statik gerinim yaşlanmasını “dislokasyon yoğunluğu, uygulanan deformasyon süreci, çözünen atomların dağılımı, yaşlanma öncesi uygulanan termal süreç, öndeformasyon sürecinde meydana gelen dinamik yaşlanma, ürünün geometrisi, mekanik işleme sürecinde malzemelerde oluşan kalıntı gerilmeler” gibi faktörler de önemli derecede etkiler. Temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunenin mikroyapı görüntüsü malzemenin iç yapısında görülen bantlaşmalar ve bu kalıntıların hadde yönünde uzamaları numunenin son kesit daraltma işleminin soğuk şekillendirme ile yapıldığına işaret etmektedir. Dolayısıyla soğuk deformasyon sürecinde çeliğin iç yapısında kristal kusurlarından noktasal ve çizgisel hataların (dislokasyonların) artmasının yanısıra kristal kafes sisteminde de çarpılma beklenir. Yaşlandırma öncesi uygulanan % 5 öndeformasyon sırasında bu hata miktarı dahada artarak yaşlandırma sırasında daha kısa zaman diliminde arayer atomları Cottrell atmosferi oluşturur ve mobil dislokasyonlarla etkileşime girerek dayanım artışına neden olur. Sıradan ferritik çeliklerin yaşlanma kinetiği çok düşük miktarda dahi olsa % 0.003 karbon ve azot atomlarının hareket halindeki dislokasyonlara doğru gitmesinden ileri gelir [85].

Fakat daha uzun yaşlanma zamanında; aşırı yaşlanmaya maruz kaldıktan sonra numunenin tekrar yaşlandığına, kısacası tekrarlı yaşlanmaların meydana geldiğine işaret etmektedir. Bu durum uzun yaşlandırma zamanında çeliğin iç yapısında oluşan perlit içerisindeki sementitin veya tane sınırlarındaki çökeltilerin ilave çözünen atom atmosferi oluşturarak tekrar mobil dislokasyonlarla etkileşerek ikinci defa dayanım artışına sebep olduğu düşünülmektedir. Çünkü tane sınırlarındaki çökelti ve (pre-existing cementite) önceden oluşmuş sementit de aynı zamanda ilave çözünen

(solute) atom atmosferi ve dislokasyon hatları üzerinde çökelti oluşumunda uzun zamanlı yaşlandırmalarda etkili olan unsurlar olarak rapor edilmişlerdir [74]. Şuna da dikkat edilmelidir ki difüzyon esaslı yaşlanma mekanizmalarıyla ilişkili denklemler kısa zamanlı yaşlanmalar için geçerlidir. Yüksek sıcaklıkta uzun zamanlı yaşlandırmalarda gerisi geriye difüzyon ve çökeltilerin etkisi de analizde hesaba katılması gereklidir.

Çalışmada, jant imalatındada kullanılan çeliğin yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı ile sertlik arasındaki ilişkiyi ifade eden grafikte ilk optimum yaşlanma zamanında belirgin bir sertlik artışı bulunmuştur. Temin edildiği şekliyle sertliği ölçülen numuneye göre mukayese edildiğinde optimum yaşlanmanın yaşandığı 20 dakikalık yaşlanma zamanında yaklaşık 12HV₁ sertlik artışitespit edilmiştir. 45 dakikalık yaşlanma zamanında ise diğer ifadeyle aşırı yaşlanma oluştuğunda numunenin sertliği temin edildiği şekliyle sahip olduğu sertlik değerine düşmüştür. Daha uzun yaşlanma zamanlarında tekrar artış eğilimine girerek ikinci defa optimum yaşlanmanın elde edildiği zaman dilimindeki (120 dakika) sertlik artışı yaklaşık 7HV₁ tespit edilmiştir. Yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı ile sertlik sonuçları paralellik arz etmesine rağmen sertlik değerlerindeki değişim (ΔY_2) değerleriyle mukayese edildiğinde daha düşük bulunmuştur.

Şekil 4.30 b'den görüldüğü gibi homojenleştirme+normalizasyon ısııl işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon sonrası 50 °C sıcaklıkta farklı zaman aralıklarında yaşlandırılan numunelerin mekanik özelliklerindeki gerinim yaşlanmasının etkisinin en belirgin olduğu parametreler akma ve çekme dayanımı ile yalnızca yaşlanmadan dolayı dayanım artışı olan (ΔY_2) ve sertlik değişimi değerleridir.

50 °C gibi oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta 160 °C sıcaklıktaki yaşlandırma zamanlarına göre daha uzun yaşlandırma sürelerinde statik gerinim yaşlanması uygulanan numunelerde yaşlanmadan dolayı akma dayanım değişimi (ΔY_2) en belirgin sırasıyla 120 ve 300 dakika yaşlanma zamanlarında meydana gelmiş ve sırasıyla 20 MPa ve 40 MPa olarak hesaplanmıştır. Homojenleştirme+normalizasyon ısııl işlemi uygulanmış şekliyle 276 MPa akma dayanımına sahip numunenin akma dayanımı soğuk şekillendirme (öndeformasyon) (ΔY_1) birlikte 87 MPa artarak 252

MPa değerine ulaşmıştır. 50°C sıcaklıkta 10 dakikalık yaşlanma zamanında yaşlanmadan dolayı dayanımındaki değişim miktarı, 9MPa azalma göstererek, akma dayanımı 343 MPa bulunmuştur.

Statik gerinim yaşlanmasına bağlı olarak meydana gelen akma dayanım artışı ilk defa 120 dakika yaşlanma zamanında 20MPa olarak hesaplanmıştır. Daha sonraki zaman diliminde numunenin aşırı yaşlanma evresine girdiği ve malzemenin akma dayanımı soğuk şekillendirme ile kazanılan dayanım (ΔY_1) değerinin altına (352MPa) ve/veya seviyelerine düştüğü tespit edilmiştir. Ancak yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki artış 40MPa olarak 300 dakika yaşlandırma zamanında tespit edilmiştir. Maksimum çekme dayanımında 300 dakika yaşlandırma zamanında, yaklaşık olarak 425MPa olarak tespit edilmiştir. Bu durum 50°C gibi düşük yaşlandırma sıcaklığı ile açıklanabilir. Difüzyon hızına etki eden parametreler içerisinde; sıcaklık, hareket eden atom boyutu ve hareket edilen ortamın doluluğu gelir. Buradaki yaşlandırma sürecinde, katı ergiyik içerisinde kalan arayer atomlarının biraraya gelerek Cottrell atmosferi veya Snoek dizilimi oluşturmaları ve mobil dislokasyonlarla etkileşime girmeleri difüzyon hızı düşük olduğu için daha uzun yaşlandırma zamanı gerektirmektedir. Hacim merkez kübik kristal yapı malzemelerde arayer atomları dislokasyonlar etrafındaki bölgesel gerilme alanlarında iç enerjiyi ve kimyasal potansiyelini düşürmek için düzene girerler. Sonuç olarak, çözünen atomların spesifik dağılım Snoek atmosferi veya Snoek dizilmesi oluşturur [74]. Cottrell atmosferi ile kıyaslanırsa Snoek atmosferi oluşumu için kısa mesafeli difüzyon, oldukça kısa zaman dilimi gerektirir. Bu olay bazı alaşım sistemlerinde oldukça kısa zaman aralığında belirgin akma noktasının tekrar geri gelmesiyle açıklanabilir. Bu çalışmada homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemini takip eden % 5 öndeformasyon sonrası yaşlandırılan numunelerde 10 dakika gibi kısa yaşlanma zamanında belirgin akma davranışının görülmeye başlaması bununla ilişkili olduğunu düşündürmektedir.

Sonuçlar: S275JRC çeliğinin homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyondan sonra 50°C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik gerinim yaşlanmasına maruz bırakıldığında belirgin olarak ilk defa 120 dakikada daha sonra 300 dakika gibi uzun yaşlandırma sürelerinde tekrarlı yaşlanma eğilimi

gösterdiğine işaret etmektedir. Dayanım artışının daha uzun yaşlandırma zamanında meydana gelişi düşük yaşlandırma sıcaklığına bağlı arayer atomlarının difüzyonunun yanı sıra Cottrell atmosferinin daha uzun zaman diliminde meydana gelmesi ve çökelti oluşümünün daha uzun zaman diliminde gerçekleşmesinin neden olduğu düşünülmektedir.

Ancak yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı (ΔY_2) ile sertlik arasındaki ilişkiyi ifade eden grafikten görüldüğü üzere sırasıyla 120 ve 300 dakikalık yaşlanma zamanlarında belirgin bir sertlik artışı meydana gelmemiştir. Yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı ile sertlik sonuçları genel eğilim olarak paralellik arz etmesine rağmen, sertlik değerlerindeki değişim (ΔY_2) değerleriyle mukayese edildiğinde oldukça düşük bulunmuştur. Daha öncede ifade edildiği gibi yaşlanmaya bağlı akma ve çekme dayanımındaki nispeten daha belirgin değişim, sertlik değerlerinde tespit edilememiştir. Bu durum 50°C gibi oldukça düşük sıcaklıkta yapısında daha az serbest halde arayer atomu barındıran ferritik+perlitik içyapıya sahip çelik içerisinde difüzyonun daha yavaş ve uzun sürelerde meydana gelmesine atfedilebilir. Yüksek karbonlu çeliklerin oda sıcaklığı ve 95°C sıcaklıkta daha düşük yaşlanma indeksine sahip olması yaşlanmadan dolayı mukavemet artışına daha belirgin yansırken, yeterince sert çökeltilerin oluşamaması sebebiyle sertlik artışına etkisi belirgin yansımadağı düşünülmektedir.

Şekil 4.30 c'den görüldüğü gibi homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle 276 MPa akma dayanımına sahip numunenin, akma dayanımı soğuk şekillendirme (öndeformasyon) (ΔY_1) birlikte 87MPa artarak yaklaşık 352 MPa değerine ulaşmıştır. 160°C sıcaklıkta 10 dakikalık yaşlanma zamanında yaşlanmadan kaynaklanan akma dayanımındaki değişim miktarı, yaklaşık 52 MPa azalma göstererek 300MPa bulunmuştur. Akma dayanımındaki belirgin azalmanın sebebi, serbest arayer atomlarının bir araya gelerek Cottrell atmosferi oluşturmaları sırasında kafeste bol miktarda boş yer hatası oluşturması ile ilgili olduğudüşünülmektedir.

Daha uzun yaşlanma zamanı ile birlikte yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı ile numunelerin akma dayanımı 20 dakika yaşlandırma zamanı için 43MPa ve 30

dakikalık yaşlanma zamanı için ise 59 MPa artarak sırasıyla, 395MPa ve 411MPa bulunmuştur. 30 dakikalık yaşlanma zamanında numunenin maksimum çekme dayanımı ise homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulandığı şekline oranla yaklaşık 15 MPa artış göstererek 430MPa değerine ulaşmıştır.

Bu çalışmada; akma dayanımında oluşan 59 MPa ve çekme dayanımında meydana gelen 15MPa artış S275JRC çeliğinin deformasyon yaşlanması ile kazandırılan maksimum dayanım artışı olarak bulunmuştur. Ticari olarak temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle 50 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunelere oranla daha yüksek meydana gelen dayanım artışının arkasında şu hususlar yatmaktadır. Isıl işleme bağlı olarak malzemenin homojen bir yapıya kavuşarak, normalizasyon ısı işlemi sonrasında ise tane boyutunun iyileşme göstererek, havada soğutma sürecinde ise yapısında daha fazla serbest arayer atomlarının katı ergiyik içerisinde kalmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

Daha öncede belirtildiği üzere; yaşlanma kinetiklerinin kontrol edilmesindeki statik gerinim yaşlanmasından önceki malzemenin mikroyapısı da önemlidir. Ancak mikroyapı; alaşımın kimyasal kompozisyonu üretim süreci ve uygulanan ısı işlemler tarafından etkilenir. Örneğin çeliğin hızlı soğutulması yüksek miktarda arayer atomunun katı ergiyik içerisinde kalmasına sebep olarak daha çabuk yaşlanma ve çökelti oluşumu meydana gelir [80]. Bu durum soğuma yaşlanması olarak bilinir. Soğuma yaşlanması ve statik gerinim yaşlanması kombinasyonu yüksek akma gerilmesi elde etmek için termo-mekanik kontrollü işlemlerde birlikte kullanılır. Çeliklerde yüksek dayanım elde etmek için soğutma, soğuk deformasyon ve düşük sıcaklıkta yaşlandırma sıralaması en efektif yoldur. Örneğin, çift fazlı çeliklerin (yani düşük alaşımlı çeliklerin) gerinim yaşlanmasının ilk aşamalarında çözünen arayer atomu ile dislokasyon etkileşiminin esasını oluşturduğu Cottrell modeli gözlemlenirken, uzun yaşlandırma zamanlarında çökelti dislokasyon etkileşiminin yanı sıra üçüncü mekanizma martenzit faz dönüşümünde soğuma yaşlanması sırasında oluşan çökelti çift fazlı çeliklerin sertleşmesinde sorumlu mekanizmalardır. Statik yaşlanma sertleşmesinin etkisi, akma gerilmesinde bir artış ve uzamada bir düşüş olarak görülmektedir. Bu etkilere; hareket eden dislokasyonlar ve onları kilitleyen karbon ve azot arayer atomları ile karbür, nitrür veya karbonitrürlerin neden olduğu kabul edilmektedir [29,86]. Deformasyona uğrayan

çeliklerde ferrit içerisinde çözünen karbon ve azot arayer atomlarının düşük sıcaklıklarda difuzyon yoluyla dislokasyon hareketine engel olarak dayanımı arttırdığı belirtilmiştir [87].

Daha da ötesi mikroalaşımli çift fazlı çeliklerde yaşlanma işlemi çift fazlı karbonlu çeliklere göre daha yavaş gerçekleşir. Bu durum alaşımli çeliğin karbür oluşturma eğiliminin yüksek olması sebebiyle katı ergiyik içerisinde arayer atomlarında azalma ile açıklanır. Genelde çelik içerisinde kuvvetli karbür ve nitrür oluşturuca alüminyum, krom, vanadyum, titanyum ve niobium miktarı statik gerinim yaşlanma davranışlarını etkiler. Çünkü bu karbür ve nitrür oluşturuca katı ergiyik içerisindeki karbon ve azot gibi arayer atomlarının miktarını düşürür.

Karbür ve nitrür oluşturuca elementlerinin yanı sıra statik gerinim yaşlanmasını düşüren katı ergiyik içerisinde mangan ve silisyum gibi yer alan atomları vardır. Bunlar mikroyapının dönüşümü sırasında Mn-C ve Mn-N çiftlerinin oluşumuna sebep olur. Bu elementler ferrit matrikse girerek arayer atomlarıyla reaksiyon oluşturarak onların hareketini engellerler. Böylece statik gerinim yaşlanmasını geciktirirler. Örneğin; yüksek silisyumlu çeliklerde statik gerinim yaşlanması zayıf etki gösterir. Bu zayıf yaşlanma etkisi, ferritik-perlitik mikroyapı yanısıra, mangan ve silisyum atomlarının arayer atomlarını bağlayarak solute atom atmosferi oluşturmalarını engellemesine atfedilir. Sonuç olarak statik gerinim yaşlanmasının çeliklerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi arayer atom eliminasyonu veya ilavesi, uygun mikroyapı ve kimyasal kompozisyon ile kontrol edilebilir.

Numunenin aşırı yaşlanma evresine girdiği 60 dakika yaşlanma zamanında malzemenin akma dayanımı soğuk şekillendirme ile kazanılan dayanım (ΔY_1) 352MPa değerinin 3MPa altına 249MPa seviyesine düştüğü tespit edilmiştir. Bu dayanım azalması aşırı yaşlanmaya bağlı olarak meydana gelen dislokasyon başına düşen çökelti sayısındaki azalma ve çökelti kabalaşması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Artan yaşlanma sıcaklığına bağlı olarak yapıda oluşan çökelti boyutları artarak dislokasyon başına düşen çökelti miktarı azaldığı için dislokasyon hareketine yeterince engel olunamaması dayanım ve sertlik azalmasının temel sebebidir [88].

Daha sonraki yaşlanma zamanlarında ferritik-perlitik içyapıya sahip çelik içerisindeki sementitin veya tane sınırlarında bulunan çökeltilerden gerisi geriye difüzyonla ortama bırakılan serbest atomlar tekrar mobil dislokasyonlarla etkileşime girerek veya çökelti oluşturarak ikinci defa dayanım artışına sebep olmaktadır. 90 dakika yaşlanma zamanında yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki artış 35MPa değerine ulaşarak tekrarlı bir yaşlanmaya işaret etmektedir. Daha uzun yaşlanma zamanlarında malzemenin akma ve çekme dayanımında tekrar bir azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Örneğin 180 dakika yaşlanma zamanında dayanımda meydana gelen azalma 90 dakika yaşlanma zamanında elde edilen değer yarısı kadar oluşmuştur.

Sonuçlar; iş makinelerinin jant çeliği olarak kullanılan S275JRC çeliğinin homojenleştirme+normalizasyon ısısal işlemi uygulanmış şekliyle %5 öndeformasyondan sonra 160°C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik gerinim yaşlanmasına maruz bırakıldığında belirgin olarak ilk defa 30 dakika daha sonra 90 dakika gibi yaşlandırma sürelerinde tekrarlı yaşlanma eğilimi gösterdiğine işaret etmektedir. İlk optimum dayanım artışının sağlandığı bu yaşlandırma zamanı, aynı sıcaklıkta temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numuneye göre, 10 dakika sonra, fakat ikinci optimum dayanım artışının sağlandığında ise yaklaşık 30 dakika daha önce meydana gelmiştir. Bu durum difüzyon hızı ve temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunenin kafes yapısındaki üretim sürecine bağlı olarak meydana gelen deformasyonlarla ilişkilendirilebilir. Çünkü temin edildiği şekliyle öndeformasyondan sonra yaşlandırılan numunenin kristal kusurları ve kafesteki çarpılmalar ısısal işlem görmüş numuneye oranla daha fazla olduğu için Cottrell atmosferi ve çökelti oluşumu daha hızlı gerçekleşmesi sebebiyle yaşlanmadan dolayı dayanım artışı temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunede daha kısa yaşlandırma zamanı yeterli olmuştur. Ancak ısısal işlem görmüş numunelerin tekrar yaşlanmaya bağlı olarak dayanım artışının daha kısa yaşlandırma zamanında meydana gelişini homojenleştirmeye bağlı olarak yapıda iyileşme ve kafesteki çarpılmaların azalmasına bağlı olabilir. Çünkü tekrar yaşlanmada sementitin ve tane sınırı karbürlerinin çözülerek ortama arayer atomu bırakmalarından dolayı arayeratomları hareketli dislokasyon bölgelerine doğru daha engelsiz bir ortamda yayınmaları ve orada kristal kafesi çarpılması ve/veya çökelti oluşturması sebebiyle daha kısa zaman diliminde dayanım artışına neden olduğu düşünülmektedir.

Ancak yaşlanmadan kaynaklanan dayanım artışı (ΔY_2) ile sertlik arasındaki ilişkiyi ifade eden grafikten görüldüğü üzere sırasıyla 30 dakikalık yaşlanma zamanında belirgin bir sertlik artışı tespit edilirken ikinci defa tekrar eden yaşlanmadan dolayı dayanım artışının yaşandığı 90 dakika yaşlanma zamanında sertlik artışı çok belirgin bulunmamıştır. Bu durum yapısında daha az serbest halde arayer atomu barındıran ferritik+perlitik içyapıya sahip çelik içerisinde difüzyonun daha yavaş ve uzun sürelerde meydana gelmesi yaşlanmadan dolayı mukavemet artışına daha belirgin etkisini gösterirken, sertlik artışına etkisinin belirgin yansımadağı düşünülmektedir.

Statik gerinim yaşlanması işleminde alaşım elementleri ve impurite elementlerinin etkisinde çok büyüktür. Azot ve karbon gibi arayer çözünen atomlarının düşük sıcaklıkta gerinim yaşlanması sırasında akma noktasının belirginleşmesinde sorumluluğu büyüktür. Bilhassa azot, karbonla kıyaslandığında daha hızlı atomik difüzyon oranına sahiptir. Bu sebeple akma noktasının belirginleşmesinde azotun etkisi daha büyüktür. Gerinim yaşlanması oluşması için katı ergiyik içerisinde çözünen atomların az seviyede bulunması bile yeterlidir. Bu sebeple alaşımın çözünen arayer (solute) atom eritebilirliği önemlidir. ΔY ve akma dayanımında artış olması dislokasyonlar ile karbon ve azot gibi arayer atomlarının etkileşim içerisinde olduğunu ve dislokasyonların hareket edemediğini göstermektedir [89].

Diğer taraftan orta ve yüksek karbon miktarı lamelli perlit oluşturduğu için belirgin akma noktası görülme durumunu azaltır veya tamamen kaldırır. Şuna dikkat edilmelidir ki lamelli perlit içerisindeki ferrit tabakası çok ince ve dislokasyon çoğalmasına kolayca izin verir. Bu durumda Luder geriniminin azalmasına sebep olur veya perlit miktarı arttığı zaman tamamen Luder bantlarının görülmemesine sebep olur [79]. Bununla birlikte yüksek oranda perlit içeren çeliklerde ferrit fazındaki yaşlanmanın etkisi limitli olur [79]. Yüksek karbonlu perlitik çeliklerde statik gerinim yaşlanmasının etkisi düşük karbonlu çeliklere göre daha zayıftır. Çünkü yüksek karbonlu çeliklerin oda sıcaklığı ve 95 °C sıcaklıkta daha düşük yaşlanma indeksine sahip olduğu belirtilmiştir. Daha da fazlası bu çeliklerde Luder bantlarının perlitik yapısından dolayı hemen hemen tamamen bastırıldığı belirtilmektedir. Bu durum alaşımli çeliğin karbür oluşturma eğiliminin yüksek olması sebebiyle katı ergiyik içerisinde arayer atomlarında azalma ile açıklanır. Genelde çelik içerisinde kuvvetli karbür ve nitrür oluşturu alüminyum, krom,

vanadyum, titanyum ve niobium miktarı statik gerinim yaşlanma davranışlarını etkiler. Çünkü bu karbür ve nitrür oluşturuçular katı ergiyik içerisindeki karbon ve azot gibi arayer atomlarının miktarını düşürür.

Karbür ve nitrür oluşturuç elementlerinin yanı sıra statik gerinim yaşlanmasını düşüren katı ergiyik içerisinde mangan ve silisyum gibi yer alan atomları vardır. Bunlar mikroyapının dönüşümü Mn-C ve Mn-N çiftlerinin oluşumuna sebep olur. Bu elementler ferrit matrikse girerek arayer atomlarıyla reaksiyona girerek onların hareketini engellerler ve böylece statik gerinim yaşlanmasını geciktirirler. Örneğin, yüksek silisyumlu çeliklerde statik gerinim yaşlanması zayıf etki gösterir. Bu zayıf yaşlanma etkisi, ferritik-perlitik mikroyapı yanısıra, mangan ve silisyum atomlarının arayer atomlarını bağlayarak solute atom atmosferi oluşturmasını engellemesine atfedilir.

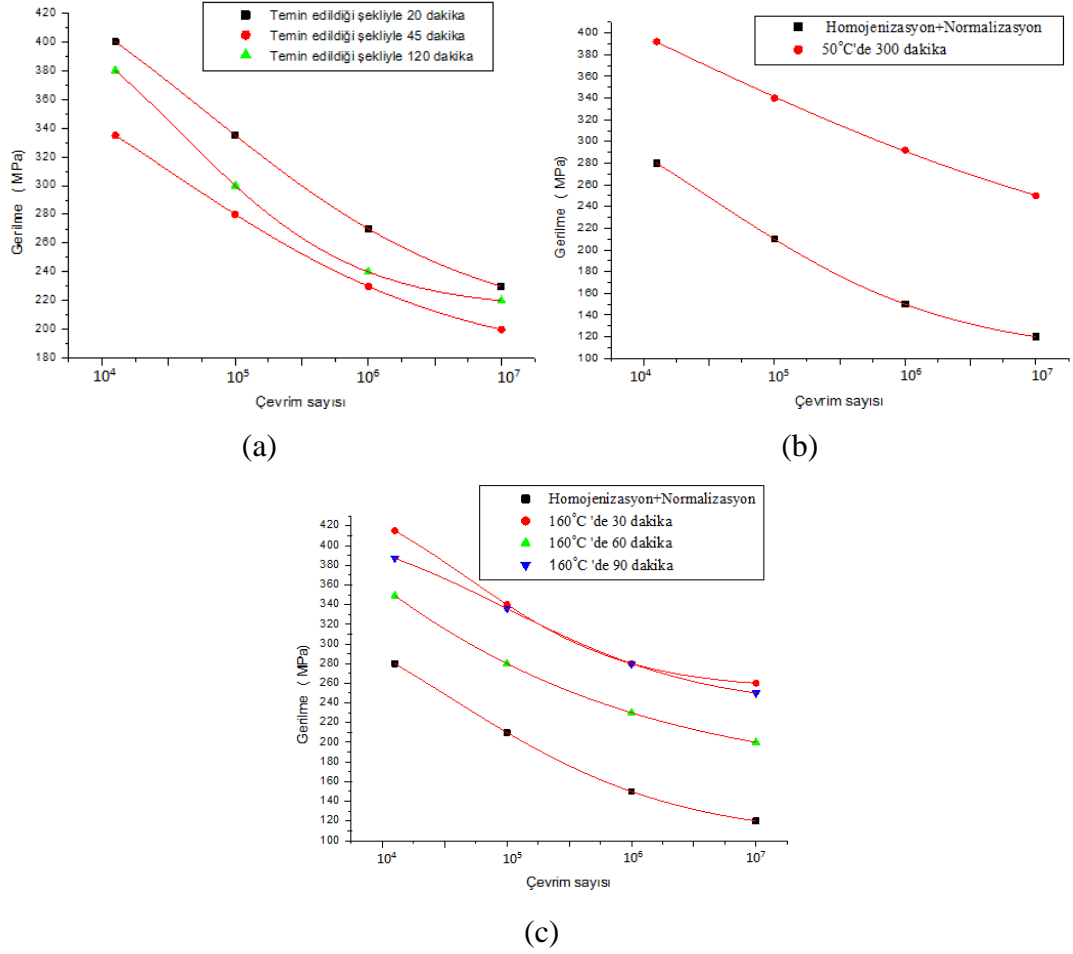
Sonuç olarak; statik gerinim yaşlanmasının çeliklerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi arayer atom eliminasyonu veya ilavesi, uygun mikroyapı ve kimyasal kompozisyon ile kontrol edilebilir.

4.6. JANT ÇELİKLERİNİN YORULMA DAVRANIŞI

Jant imalatında kullanılan çeliklerin statik yaşlanmaya bağlı mekanik özelliklerindeki değişim dinamik yük etkisi altındaki tekrarlı gerilmeler altındaki kullanılmaları sırasındaki davranışlarında etki etmesi beklenir. Bu sebeple çalışmada ticari olarak temin edildiği şekliyle 160 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik yaşlandırmaya tabi tutulan, homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi sonrası 50 °C ve 160 °C sıcaklıkta farklı zaman dilimlerinde statik yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin tamamına yorulma testi uygulamak gereksizdir. Bunun yerine yalnızca optimum yaşlanma dayanımın elde edildiği, aşırı yaşlanmaya bağlı dayanım düşüşünün elde edildiği ve ikinci defa yaşlanmaya bağlı maksimum dayanım artışının yaşandığı yaşlanma zamanlarında elde edilen numunelerin tekrarlı gerilmeler etkisi altındaki davranışları dört noktalı eğme yorulmalı test cihazı ile belirlenmiştir. Numunelerin yorulma deneyleri ile elde edilen Wöhler eğrilerinde

uygulanan gerilme-çevrim sayısı grafikleri sırasıyla Şekil 4.31 a.b ve c'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 4.31 a-c'den de görüldüğü gibi tekrarlı gerilmeler altında tüm numuneler için yorulma dayanımı 10^7 çevrim değerine ulaşılmıştır. Şekil 4.31 a' da temin edildiği şekliyle %5 öndeformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta 20, 45, 120 dakika yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımı en yüksek 160°C sıcaklıkta 20 dakika yaşlandırılan numunede bulunmuş, 230 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.31 b' de homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi sonrası %5 öndeforme edilip 50°C sıcaklıkta statik yaşlanmadan dolayı maksimum dayanım artışının sağlandığı 300 dakika süreyle yaşlandırılan numunelerde yorulma dayanımı 250 MPa olarak en yüksek bulunmuştur.



Şekil 4.31. a) Temin edildiği şekliyle 160 °C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerin b) Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve 50 °C sıcaklıkta 300 dakika süreyle yaşlandırılan numunelerin c) Homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve 160 °C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırılan numunelerin (S-N) yorulma eğrisi.

Şekil 4.31 c'den görüldüğü üzere homojenleştirme+normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış şekliyle ve %5 öndeyformasyon sonrası 160°C sıcaklıkta 30, 60, 90 dakika yaşlandırma sürelerinde yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımları incelendiğinde, optimum yaşlandırma dayanım artışının elde edildiği 30 dakika yaşlandırma zamanında yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımı en yüksek bulunmuş ve 255 MPa olarak tespit edilmiştir.

Sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde yaşlandırmaya bağlı dayanım artışı ile yorulma dayanımı belirgin bir şekilde paralellik arzettiğine işaret etmektedir. Statik gerilim yaşlanması sonucu artan çekme, akma ve sertlik dayanımı artışına bağlı olarak

yorulma dayanım değerleri de artış göstermektedir. Sertlik ve çekme dayanımı yüksek olan malzemelerde yorulma dayanımın yüksek çıkması da beklenen bir durumdur[91,92]. Tüm numuneler için aşırı yaşlanmaya bağlı dayanım düşüşü numunelerin yorulma dayanımında azalmaya sebep olmuştur. Bu malzemelerin statik yaşlanma davranışlarında en göze batan hususlardan bir tanesi de daha uzun yaşlanma zamanlarında malzemelerin dayanımında ikinci defa dayanım artışına neden olmasıdır. Bu durum malzemelerin yorulma davranışlarında da belirgin olarak artış yönünde etki göstermiştir.

Oates ve Wilson, bir çalışmalarında düşük karbonlu çeliklerin gerilme yaşlanmasının yorulma dayanımına etkisini araştırmış ve ince taneli çeliklerde yaşlanmaya bağlı olarak yorulma dayanım değerlerinde artış tespit ederken, kaba taneli çeliklerin yaşlanmasında belirgin bir yorulma dayanımı elde edememişlerdir. Yorulma dayanımı artışının, yaşlanmaya bağlı meydana gelen birincil dislokasyon kitlenmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir [93]. Bu çalışmada da statik yaşlanmaya bağlı olarak dislokasyon hareketinin engellenmesi dayanım artışına neden olarak aynı zamanda jant imalatında kullanılan bu çeliklerin tekrarlı gerilmeler altındaki davranışlarını belirgin şekilde etkilediği düşünülmektedir.

BÖLÜM 5

GENEL SONUÇLAR

Endüstriyel uygulamalarda geniş yelpazede kullanım alanı bulan genel yapı çelikleri grubunda değerlendirilen S275JRC soğuk şekillendirmeye uygun çelik ağır iş makinelerinin jant imalatında kullanılmaktadır. Jantların imalat süreci ve servis şartlarında maruz kaldığı sıcaklık ve yükler göz önünde bulundurulduğunda statik gerinim yaşanması oluşabilir.

Bu sebeple bahsedilen çelik malzemenin ticari olarak temin edildiği şekliyle ve arayer atomlarınca zengin katı ergiyik elde edebilmek amacıyla homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon işleminden sonra 160 °C ve 50 °C sıcaklıklarda, farklı yaşlandırma zamanlarında bekletilerek statik gerinim yaşanma davranışları etraflıca araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular sırasıyla aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- İş makinelerinin jant imalatında kullanılan S275JRC yapı çeliği 160 °C ve 50 °C sıcaklıklarda farklı yaşlanma zamanlarında temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle % 5 öndeformasyon süreci sonrasında farklı sürelerde ısı işlem fırını içerisinde bekletildiğinde statik gerinim yaşanması gösterdiği tespit edilmiştir.
- Serbest arayer atomlarınca daha zengin katı ergiyik elde edilmesi sebebiyle; homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi uygulanmış şekliyle yaşlandırılan numunelerde statik yaşlanmadan dolayı akma dayanımındaki değişim miktarı olan (ΔY_2), temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numuneye oranla yaklaşık 29 MPa daha yüksek bulunmuştur.

- 160 °C sıcaklıkta temin edildiği şekliyle yaşlandırılan numunede, optimum yaşlanma zamanına 20 dakikalık yaşlanma zamanında, homojenleştirme+normalizasyon ısı işlemi görmüş şekliyle yaşlandırılan numunede ise 30 dakika yaşlanma zamanında ulaşılmıştır. 50 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunede difüzyon hızının düşmesine bağlı olarak optimum yaşlanma süresi 300 dakika gibi uzun bir yaşlanma zamanında gerçekleşmiştir.
- Ferritik-perlitik iç yapıya sahip çeliğin yapısıyla ilişkili olarak, serbest arayer atomlarının büyük çoğunluğu karbür ve nitrür halinde bağlıdır. Aynı zamanda karbon atomları demir ile bileşik yaparak perlit içerisinde sementit oluştururlar. Belirtilen sıcaklıklarda ve sürelerde yaşlandırma işlemi sürecinde sementit ve karbür uzun yaşlanma zamanında çözünerek gerisi geriye difüzyon ile ortamda ilave arayer atomu oluşmasına neden olur. Bu ilave arayer atomlarının uzun yaşlanma zamanlarında tekrar eden yaşlanma davranışına neden olduğu düşünülmektedir.
- Ticari olarak temin edildiği şekliyle ve homojenleştirme+normalizasyon ısı işleminden sonra 160 °C ve 50 °C sıcaklıkta, farklı zamanlarda yaşlandırılan numunelerin sertlikleri genel eğilim olarak optimum yaşlanma zamanlarında artış gösterirken, aşırı yaşlanma evresinde bir azalma eğilimindedir. Ancak sertlik artışı homojenleştirme+normalizasyon ısı işleminden sonra 160 °C sıcaklıkta yaşlandırılan numunede daha belirgin iken, diğer şartlarda yaşlandırılan numunelerde daha az meydana gelmiştir.
- Ticari olarak temin edildiği şekliyle test edilen ferritik-perlitik iç yapıya sahip, jant imalatında kullanılan çelik deney numunesinde görülen bantlaşmalar 1000 °C sıcaklıkta 3 saat uygulanan homojenleştirme ısı işlemi sürecinde difüzyonla yayınarak ortadan kalkmış ve yapıda

homojenleşme sağlanmıştır. Normalizasyon ısı işlemi ile tane boyutundaki iyileşme ve iç yapıdaki homojenleşmeye bağlı olarak deney numunelerinin akma dayanımında, ticari olarak temin edilmiş şekliyle kıyaslandığında daha fazla artışa neden olmuştur.

- Yaşlandırma zamanına bağlı olarak ferrit ve perlit fazı hacimsel oranlarında bir değişim gözlemlenmemiştir. Ayrıca yaşlandırılan numunelerin tane boyutunda yaşlandırma sıcaklığının yeniden kristalleşme sıcaklığının oldukça altında olması sebebiyle bir değişime neden olamaz.
- Statik gerilim yaşlanmasının yorulma dayanım değeri üzerinde olumlu etkisi bulunmaktadır. Statik gerilim yaşlanması sonucu artan çekme, akma ve sertlik dayanımı artışına bağlı olarak yorulma dayanım değerleri de artış göstermektedir.

Elde edilen bulgular, soğuk şekillendirmeye uygun S275JRC çeliği ağır iş makineleri jant imalatında kullanılırken servis şartlarındaki ve üretim sürecindeki soğuk şekillendirme ve müteakiben maruz kalacağı termal çevrimlerde (50-160 °C) statik gerilim yaşlanmasından dolayı mekanik özelliklerinde değişimler oluşabileceği göz ardı edilmemelidir.

KAYNAKLAR

1. Kaya, N.,“AISI 304 Paslanmaz çelik ile genel yapı çeliğinin sürtünme kaynak kabiliyetinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,Ankara (2010).
2. Kendirci, M. F., “İnce taneli yüksek mukavemetli yapı çeliklerinde kaynaklı bölgelerin ısıtılma mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi”,Yüksek Lisans Tezi,*Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2008).
3. Kınıkoğlu, N.G., “Malzeme Bilimi ve Mühendisliği”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını*, İstanbul, 65, 855 (2001).
4. Onaran, K., “ Malzeme Bilimi”, *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, 383 (2006).
5. Türkiye İstatistik Kurumu, “İstatistiklerle Türkiye”, *TÜİK*, Ankara,98 (2008).
6. Topbaş, A.,“Çelik ve Isıl İşlem”, *İTÜ Yayınları*, İstanbul, 1-102 (1998).
7. Smith, W. F.,“Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri”, Erdoğan, M., *Nobel Yayıncılık*, Ankara, 30-150 (2000).
8. Şavaşkan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, *Derya Kitabevi Yayınları*, Trabzon, 132-168 (1999).
9. Kazdal, Z. H.,“Demir ve Çelik Malzemelerin Mikro Yapısı”, *TÜBİTAK MAM Eğitim Notları*, Gebze, 88-118 (2007).
10. Askeland, D.R.,“Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeler”, Çev: Erdoğan,M., *Nobel Yayıncılık*, Ankara, 20-60 (2000).
11. Smith, W. F.,“Malzeme Bilimi ve Mühendisliği”, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, 25 (2001).
12. BS EN, “General rules and rules for buildings”, *British Standard Institution*, London,56-71 (2005).
13. ANSI/AISC, “Specification for structural steel buildings”, *American Institute of Steel Construction*, Chicago 40 (2005).
14. Chiew, S.P., Zhao, M.S. and Lee, C.K., “ Mechanical properties of heat-treated high strength steel under fire/post-fire conditions”, *Journal of Constructional Steel Research*, 98: 12–19 (2014).

15. Kaynak Teknolojisi ve Tahribatlı/Tahribatsız Muayene Eğitim Araştırma, Uygulama Merkezi, “Uluslararası kaynak mühendisliği (IWE) eğitimi ders notları”, *Gedik Eğitim Vakfı*, 32-35(2009).
16. Karahan, T., Ertek, E. H., Tümer, M. and Kaçar, R., “Strengthening of AISI 2205 duplex stainless steel by strain ageing”, *Materials and Design*, 55: 250–256 (2014).
17. Josefson, B., Nilsson, J.O. and Wilson, A., “Phase transformation in duplex steels and the relation between continuous cooling and isothermal heat treatment”, *Proc. Conf. Dup. Stainless Steel*, 91:67-69 (1991).
18. Petterson, C. and Fager, S., “Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF2304, SAF2205 and SAF2507”, *AB Sandvik Steel*, Sweden, 811: 81 (1995).
19. Leslie, W. C., “The Physical Metallurgy Of Steels”, *McGraw-Hill Book Company*, New York, 189-210 (1980).
20. Strutt, A.J. and Larimer, J.W., “Structure property relationships of Zeron 100”, *Proc. Conf. Phase Transformation*, Cambridge, 178 (1987).
21. Baird, J. D., “Strain ageing of steel”, *Iron and Steel*, 36: 186-192 (1963).
22. Baird, J. D., “The effect of strain ageing due to interstitial solutes on the mechanical properties of metal”, *Metallurgical Reviews*, 16: 1-18 (1971).
23. Lu, L., Liu, T., Tan, M., Chen, J. and Wang, Z., “Effect of annealing on microstructure evolution and mechanical property of cold forged magnesium pipes”, *Materials and Design*, 39: 131–9 (2012).
24. Li, S.L., Zhanga, H.L., Wang, Y.L., Li, S. X., Zhenga, K. and Xue, F., “Annealing induced recovery of long-term thermal aging embrittlement in a duplex stainless steel”, *Mater Sci Eng A*, 564: 85–91 (2013).
25. Gunduz, S. and Tosun, A., “Influence of straining and ageing on the room temperature mechanical properties of dual phase steel”, *Mater. Des.*, 29: 1914–1918 (2008).
26. Calonne, V., Berdin, C., Saint-Germain, B. and Jayet-Grendrot, S., “Damage and dynamic strain ageing in a thermal aged cast duplex stainless steel”, *J Nucl Mater.*, 327: 202–10 (2004).
27. Cottrell, A. H. and Bilby, B.A., “Dislocation theory of yielding and strain ageing of iron”, *Proc. Phys. Soc.*, 62: 49-62 (1949).
28. Glen, J., “Effect of alloying elements on the high temperature tensile strength of normalised low carbon steel”, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 186: 21-32 (1957).

29. Tosun, A., “Yaşlandırılan çift fazlı çeliklerin mekanik davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Zonguldak, 30-40 (2007).
30. Graff, S., Forest, S., Strudel, J. L., Prioul, C., Pilvin, P. and Béchade, J. L., “Strain localization phenomena associated with static and dynamic strain ageing in notched specimens: experiments and finite element simulations”, **Materials Science and Engineering A**, 387–389: 181–185 (2004).
31. Wilson, D.V. and Russel, B., “The contribution of precipitation to strain ageing in low carbon steels”, **Acta Metall.**, 8: 468-479 (1960).
32. Dieter, G.E., “Mechanical Metallurgy”, **McGraw-Hill Book Company**, New York, 36 (1961).
33. Hall, E.O., “Yield Point Phenomenon in Metals and Alloys”, **Macmillan**, London (1970).
34. Gündüz, S. and Kaçar, R., “Static strain ageing in microalloyed steels”, **Technology**, 4: 139-147 (2000).
35. Baird, J.D. and Jamieson, A., “Relation between structure and mechanical properties of metals”, **National Physical Laboratory (NPL) Symposium**, London, 362-369 (1963).
36. Girones, A., Llanes, L., Anglada, M. and Mateo, A., “Dynamic strain ageing effects on superduplex stainless steels at intermediate temperatures”, **J. Material Science and Eng A**, 367: 322-328 (2004).
37. Udaya P. H. and Rajendra U. K., “Dynamic Strain Ageing in AISI 316L Type Stainless Steel as Revealed by Indentation Creep Studies”, **Procedia Engineering**, 55: 566-572 (2013).
38. Mulford, R.A. and Kocks, U.F., “New observations on the mechanisms of dynamic strain ageing and of jerky flow”, **Acta Metall.**, 27: 1125-1133 (1979).
39. Li, C.C. and Leslie, W.C., “Effects of dynamic strain aging on the mechanical properties of carbon steels”, **Metall. Trans. A**, 9: 1765-1775 (1978).
40. Gündüz, S., “Dynamic strain ageing effects in niobium microalloyed steel”, **Ironmaking and Steelmaking**, 29: 341-346 (2002).
41. Cormick, P.G., “The Portevin-Le Chatelier effect in a pressurized low carbon steel”, **Acta Metall.**, 21: 873–878 (1973).
42. Cheng, J., Nemat, N. S. and Guo, W., “A unified constitutive model for strain-rate and temperature dependent behavior of molybdenum”, **Mech. Mater.**, 33: 603–616 (2001).

43. Cormick, P.G., “The effect of strain on the ageing time for serrated yielding in an Al-Mg-Si alloy”, *Acta Metall.*, 22: 489–493 (1974).
44. Fressengeas, C., Beaudoin, A.J., Lebyodkin, M., Kubin, L.P. and Estrin, Y., “Dynamic strain aging: A coupled dislocation-solute dynamic model”, *Mater. Sci. Eng. A*, 400–401: 226–230 (2005).
45. Benallal, A., Berstad, T., Bqrvik, T., Hopperstad, O. S. and Koutiri, I., “Codes an experimental and numerical investigation of the behaviour of AA5083 aluminium alloy in presence of the Portevin–Le Chatelier effect”, *Int. J. Plasticity*, 24: 1916–1945 (2008).
46. Cormick, P.G., Venkadesan, S. and Ling C.P., “Propagative instabilities: an experimental view”, *Scr. Metall.*, 29: 1159–1164 (1993).
47. Honeycombe, R. W. K. and Bhadeshia, H.K.D.H., “Steels 2ndEd.” *Edward Arnold*, London, 302-318 (1995).
48. Tekeli, S. and Güral, A., “Microstructural characterization and impact toughness of intercritically annealed pm steels”, *Materials Science and Engineering A*, 406: 172-179 (2005).
49. Leslie, W. C. and Keh, A. S., “Ageing of rolled steel products as investigated by electron microscopy, in mechanical working of steel”, *Met. Soc. Conf.*, New York, 337-345 (1965).
50. Herman, W. A., Erazo, M. A., Patto, L. R., Sekizawa, M., and Pense, A.W., “Strain ageing behaviour of microalloyed steels”, *Welding Research Council Bulletin*, 322: 1-13 (1987).
51. Jones, W. and Coombs, G., “Fundamental of stells” *Journal of the Iron and Steel Institute*, 174: 9-15 (1953).
52. Booser, E. R., “Friction lubrication and wear technology”, *Metal Working Lubrications*, 18: 132-150 (1992).
53. Duga, J. J., “Failure analysis and prevantion”, *Metals Handbook*, 11: 314-450 (1992).
54. Antolovich, S. D. and Saxena, A., “Fatigue Failures, Metals Handbook; 9th Edition Vol. 11 Failure Analysis and Prevention”, *ASM Handbook Committee, American Society for Metals*, USA, 102-135 (1986).
55. Laird, C., “Fatigue failures”, *Metals Handbook Desk Edition, American Society for Metals*, USA, 110: 13-32 (1985).
56. Wulpi, D. J., “Understanding how components fail”, *American Society for Metals*, USA, 78-83 (1985).

57. Guy, A., “Fiziksel Metalurjinin Esasları”, Çev: Güler, D., *İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi*, İstanbul, 282-286 (1972).
58. F110-GE-100/100B/100C, “Turbofan motoruna ait Technical Manual Maintenance Instructions Depot Level Disassembly”, Teknik Emir Kitabı, *General Electric*, New York, US (2001).
59. Kayalı, E.S., Ensari, C. ve Dikeç, F., “Metalik malzemelerin mekanik deneyleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi*, İstanbul, 143-177 (1996).
60. İnternet: Afyon Üniversitesi, “Teknolojik Araştırmalar”, http://eegitim.teknolojikarastirmalar.com/mekanik_deneyler/yorulma.htm (2014).
61. Matthews, F. L. and Rawlings, R. D., “Composite Materials”, *Engineering and Science*, London, 80-147 (1994).
62. Askeland, D.R., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, Çeviri: Erdoğan, M., *Nobel Yayınları*, Ankara 114-117 (1998).
63. Akkurt, M., “Makina Elemanları, Cilt 1”, *İTÜ Yayınları*, İstanbul, 34-240 (1975).
64. Bayraktar, N., “Bilyalı dövme teori ve uygulaması”, *MMO*, 405: 15-25 (1993).
65. Aydın, M., Küçükömeroğlu, T. ve Savaşkan, T., “Çinko alüminyum esaslı alaşımların yorulma özelliklerinin incelenmesi”, *MMO*, 444: 40-46 (1197).
66. Al, İ., “Dual fazlı çeliklerin kısa ömürlü yorulması”, Yüksek Lisans Tezi, *OG Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 31-32 (1996).
67. Kayalı, E. S., Ensari, C. ve Dikeç, F., “Metalik malzemelerin mekanik deneyleri”, *O.D.T.Ü. Metalürji ve Malzeme Bölümü*, Ankara, 45 (1978).
68. Weissbach, W., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Çeviri: Anık, S., Anık, E. S. ve Vural, M., *Birsen Yayınevi*, İstanbul 54-57 (1998).
69. Kandemir, K., Çetin, A. ve Asi, O., “Üretim aşamasında makina parçalarının yorulma dayanımını artırıcı önlemlerin alınması”, *MMO*, 486: 23-30 (2000).
70. Meyers, M.A. and Chawla, K.K. “Mechanical behaviour of materials”, *Chambridge University Press*, U.K, 1-855 (2009).
71. Sarafianos, N., “Environmentally assisted cracking of high strength carbon steel patented wire”, *Journal of Met. Sci. Letters*, 11: 1486-2488 (1989).

72. Ertek E. H., “ Petrol sondaj borusu çeliklerinin sürtünme kaynak kabiliyetinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 47-73 (2012).
73. Gözütok, E. ve Karahan, S., “Metal malzemelerde yorulma sürünme ve llmesi”, Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Teknik Eēitim Fakültesi**, Ankara, 3-18 (1994).
74. Onaran, K., “Malzemelerin Şekil deēiřtirmesi”, **Malzeme Bilimi Bilim Teknik Yayınevi**, İstanbul, 247-254 (1993).
75. alık, A., “Dolgu kaynaēı yapılmış millerin yorulma ömrünün deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazıē, 2-22 (1997).
76. Erkan, T., “Nokta kaynaklı konstrüksiyonların bilgisayar destekli yorulma ömrü hesaplamaları ve deneysel yöntemlerle doērulanması”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 15-61 (2005).
77. TS EN ISO 6892–1 Standardı, “Metallic materials – tensile testing – part 1: method of test at room temperature”, **TSE**, Ankara (2010).
78. Rashid, M.S., “Strain ageing of vanadium, niobium or titanium strengthened high strength low alloy steels”, **Metall Trans A.**, 6: 1265-1268(1975).
79. Vyhnal, R.F. and Radcliffe, S.V., “The effect of quench rate on the ageing of alpha iron”, **Acta. Met.**, 20: 435-445 (1972).
80. Serajzadeh, S., “Static strain ageing”, **Encyclopedia of Iron, Steel and Their Alloys**, 57-78 (2013).
81. imen, M., “Gaz trbinli motorlarda yorulma hasarı ve TI-6AL-4V malzemesinin yüksek sıcaklıktaki sürtünme yorulması davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 11-41 (2012).
82. Callister, W. D. and Rethwisch, D.G., “Materials Science and Engineering”, **Wiley P**, New York, 240 (2009).
83. Reddy, G.M. and Mohandas, T., “Explorative studies on grain refinement of ferritic stainless steel welds”, **Journal of Materials Science Letters**, 20: 721-723 (2001).
84. Brandao, W. S., Buono, W. T. L., Marques, P. V. and Modenesi, P. J., “Avoiding Problems when welding AISI430 ferritic stainless steel”, **Welding International**, 6: 713-716 (1992).
85. Higgins, R.A., “Engineering Metallurgy Applied Physical Metallurgy 6th Edition”, **Elsevier**, London, 79-99(1993).

86. Buono, W. T. L., Gonzales, B. M. and Andrade, M. S., “Strain ageing of AISI 430 ferritic stainless steel”, *Scripta Materialia*, 38: 185-190 (1998).
87. Park, D. B., Lee, J. W., Lee, Y. S., Park, K. T. and Nam, W. J., “Effects of the annealing temperature and time on the microstructural evolution and corresponding the mechanical properties of cold-drawn steel wires”, *Met. Mater. Int.*, 14 (1): 59-64 (2008).
88. Lee, C. and Zuidema, B. K., “On high strength sheet steels for the automotive industry”, *Proc. Symp Iron and Steel Society*, Warrendale, 103 (1994).
89. Mohan, R. and Marshall, C., “Cracking instabilities in a low-carbon steel susceptible to dynamic strain aging” *Acta Mater.*, 46: 1933-1948 (1998).
90. Baird, J.D., “The theory of strain ageing”, *Iron and Steel*, 36: 326–334 (1963).
91. Dawles, C. J., “Friction stir welding”, Birmingham and Christian Lerory, *EAA*, U.K.(1999).
92. Şık, A., Ertürk, İ. ve Önder, M., “AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16: 139-147 (2010).
93. İnternet: Acta Metallurgica, “The Effects of Dislocation Locking and Strain Ageing on The Fatigue Limit of Low-Carbon Steel”, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0001616064900501-AFF2> (1964).

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet BÜLBÜL 27.12.1986 tarihinde Trabzon'un Vakfikebir ilçesinde doğdu. İlköğrenimine Vakfikebir Merkez Kemaliye İlköğretim Okulu'nda başladı ve Vakfikebir Osman Tan İlköğretim Okulu'nda devam ederek ilköğrenimini tamamladı. Ortaokul eğitimini Trabzon Beşikdüzü Anadolu İmam Hatip Lisesi'nde tamamladı ve lise eğitimini de Vakfikebir Lisesi'nde tamamlayarak buradan mezun oldu. 2006 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Öğretmenliği Bölümü'nü kazandı. Lisans eğitimini tamamladıktan sonra 2011 yılında Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü'nde lisansüstü eğitime başlamıştır. Halen Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi'nde lisansüstü eğitime devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Kirazlık Yenimahalle Çeşme Sok. No:11 Kat:2

Vakfikebir/TRABZON

Tel : (544) 779 39 49

E-posta: ahmet.bulbul@hotmail.com